

JNC TJ7420 2005-063

乾式破碎応力測定法の室内検証試験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

1999年3月

三井金属資源開発株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

乾式破碎応力測定法の室内検証試験*

新宮和喜**, 中嶋敏秀**, 山下 貢**

要 旨

岐阜県と富山県の県境付近に位置する神岡鉱山茂住坑には、断層を横断する活断層調査坑道があり、総合的な活断層の調査研究が行われている。本報告書は、断層周辺の応力場を測定する乾式破碎応力測定法の確立のために、室内载荷試験と数値シミュレーションを実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 本試験で得られた鋼管内载荷試験結果は昨年度の結果を補うことができ、試験結果はシミュレーションの結果と一致した。
- (2) 本年度のプロープの改良により、安定した再開口圧力を得ることができるようになったため、各拘束圧条件下で3回程度の繰り返し载荷を行う必要性はなくなった。
- (3) 試験時に計測した圧力-変位曲線の再開口圧力と、理論式から求めた再開口圧力との相関は、理論値の低圧部から高圧部まで、一定の関係を持つことが分かった。
- (4) 各供試体の拘束条件下で得られた折れ点圧力の実測値を用いて、拘束圧力と亀裂と主応力方向との角度を逆算した結果、プロープによる実測値と試験の設定値はほぼ一致した。
- (5) 载荷試験時に計測した AE 結果から、亀裂発生、亀裂閉口および再開口時の明瞭な AE 特性をとらえるにはさらに詳細な計測条件の設定、波形の解析が必要であることが判った。

*本報告書は三井金属資源開発株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室：東濃地科学センター 地質安定性研究グループ

**三井金属資源開発株式会社

March, 1999

Laboratory Validation Test of Dry-Fracture Method of Stress Measurement*

Kazuki Shingu**, Toshihide Nakajima**, Mitsugu Yamashita**,

ABSTRACT

The active fault survey tunnel across the Mozumi-Sukenobu Fault is located at the Kamioka Mine, northern Gifu prefecture, Central Japan. At present, The comprehensive studies of the active fault are being carried out in this tunnel. In this report, the results of the laboratory test and numerical simulation for the new ground stress measuring instrument were presented in order to inspect the stress state around the active fault.

The following points became clear from this investigation.

- (1) In the loading test using a steel pipe, there is a comparative agreement between the measured values and the calculated results.
- (2) By several improvements of the instrument, the repetitious loadings like the last year became unnecessary.
- (3) The relationship between the fracture re-opening pressure analyzed from the laboratory test and the theoretical result became clear.
- (4) By the calculation of the loading pressure from fracture re-opening pressure, a comparative agreement between the measurement values and the set pressure of the test was found.
- (5) By the AE measurement in the loading test, it was found that the more detailed analysis was necessary to catch the clear characteristic of AE.

* This work was performed by Mitsui Mineral Development Engineering Co., LTD. under contract with Japan Nuclear Cycle Institute.

JNC Liason : Neotectonic Research Group, Tono Geoscience Center

** Mitsui Mineral Development Engineering Co., LTD.

目 次

1. 調査概要	1
1. 1. 件名	1
1. 2. 目的	1
1. 3. 調査期間	1
1. 4. 担当者	1
2. 乾式一面破碎法による応力測定の概要	2
2. 1. プローブと計測システム	2
2. 2. 応力測定理論	4
2. 3. これまでの試験結果と得られた問題点	7
2. 4. プローブの改良点	9
3. 鋼管内载荷試験	13
3. 1. 試験の概要	13
3. 2. 試験結果	14
3. 3. 鋼管内载荷試験のシミュレーション	21
3. 3. 1. 鋼管内解析モデル	21
3. 3. 2. 解析結果	22
4. 室内破碎試験	27
4. 1. 载荷試験装置	27
4. 2. 供試体	28
4. 3. AE計測システム	29
4. 4. 試験条件	30
4. 5. 試験結果	33
4. 6. AE計測結果	111
4. 7. 室内破碎試験のシミュレーション	168
4. 7. 1. 解析モデル	168
4. 7. 2. 解析結果	169
4. 8. 拘束圧力と角度の算定	172
5. 結論	175

図 表 一 覧

図 一 覧

図2.1.1.	S-800プローブの載荷部の基本構造	2
図2.1.2.	S-800計測システム図	3
図2.2.1.	半無限円孔板の円孔周辺応力概念図	5
図2.2.2.	円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合	6
図2.2.3.	内圧が部分的に作用する場合	6
図2.2.4.	円孔周辺の応力	7
図2.4.1.	S-500プローブ（昨年度使用）の断面図	9
図2.4.2.	鋼管内載荷試験時に観測されたプレスケールの結果 （昨年度の試験より）	10
図2.4.3.	S-800プローブ（今年度使用）の断面図	11
図2.4.4.	鋼管内載荷試験時に観測されたプレスケールの結果	12
図3.1.1.	鋼管載荷試験ゲージ貼り付け位置	13
図3.2.1.	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt1)	15～17
図3.2.2.	鋼管載荷試験ひずみ計測結果(Pt2)	18～20
図3.3.1.	解析モデル	23
図3.3.2.	鋼管内周境界に載荷したせん断応力分布	23
図3.3.3.	解析結果	25～26
図4.1.1.	室内検証試験装置概念図	27
図4.3.1.	AE計測システム図	29
図4.5.1.	圧力-変位曲線(S800pt1)	39
図4.5.2.	圧力-変位曲線(S800pt2)	40
図4.5.3.	圧力-変位曲線(S800pt3)	41
図4.5.4.	圧力-変位曲線(S800pt5)	42
図4.5.5.	圧力-変位曲線(S800pt6)	43
図4.5.6.	圧力-変位曲線(S800pt7)	44
図4.5.7.	圧力-変位曲線(S800pt8)	45
図4.5.8.	圧力-変位曲線(S800pt9)	46
図4.5.9.	圧力-変位曲線(S800pt10)	47
図4.5.10.	圧力-変位曲線(111S8-1)	48
図4.5.11.	圧力-変位曲線(111S8-2)	49

図4. 5. 12.	圧力-変位曲線(111S8-3)	-----	50
図4. 5. 13.	圧力-変位曲線(112S8-1)	-----	51
図4. 5. 14.	圧力-変位曲線(112S8-2)	-----	52
図4. 5. 15.	圧力-変位曲線(113S8-1)	-----	53
図4. 5. 16.	圧力-変位曲線(113S8-2)	-----	54
図4. 5. 17.	圧力-変位曲線(114S8-1)	-----	55
図4. 5. 18.	圧力-変位曲線(114S8-2)	-----	56
図4. 5. 19.	圧力-変位曲線(115S8-1)	-----	57
図4. 5. 20.	圧力-変位曲線(116S8-1)	-----	58
図4. 5. 21.	圧力-変位曲線(117S8-1)	-----	59
図4. 5. 22.	圧力-変位曲線(118S8-1)	-----	60
図4. 5. 23.	圧力-変位曲線(119S8-1)	-----	61
図4. 5. 24.	圧力-変位曲線(121S8-1)	-----	62
図4. 5. 25.	圧力-変位曲線(121S8-2)	-----	63
図4. 5. 26.	圧力-変位曲線(122S8-1)	-----	64
図4. 5. 27.	圧力-変位曲線(123S8-1)	-----	65
図4. 5. 28.	圧力-変位曲線(124S8-1)	-----	66
図4. 5. 29.	圧力-変位曲線(126S8-1)	-----	67
図4. 5. 30.	圧力-変位曲線(127S8-1)	-----	68
図4. 5. 31.	圧力-変位曲線(128S8-1)	-----	69
図4. 5. 32.	圧力-変位曲線(129S8-1)	-----	70
図4. 5. 33.	圧力-変位曲線(131S8-1)	-----	71
図4. 5. 34.	圧力-変位曲線(131S8-2)	-----	72
図4. 5. 35.	圧力-変位曲線(132S8-1)	-----	73
図4. 5. 36.	圧力-変位曲線(133S8-1)	-----	74
図4. 5. 37.	圧力-変位曲線(134S8-1)	-----	75
図4. 5. 38.	圧力-変位曲線(134S8-2)	-----	76
図4. 5. 39.	圧力-変位曲線(136S8-1)	-----	77
図4. 5. 40.	圧力-変位曲線(137S8-1)	-----	78
図4. 5. 41.	圧力-変位曲線(138S8-1)	-----	79
図4. 5. 42.	圧力-変位曲線(139S8-1)	-----	80
図4. 5. 43.	圧力-変位曲線(3S800pt1)	-----	81
図4. 5. 44.	圧力-変位曲線(219S8-1)	-----	82
図4. 5. 45.	圧力-変位曲線(218S8-1)	-----	83
図4. 5. 46.	圧力-変位曲線(217S8-1)	-----	84

図4. 5. 47.	圧力-変位曲線 (216S8-1)	-----	85
図4. 5. 48.	圧力-変位曲線 (211S8-1)	-----	86
図4. 5. 49.	圧力-変位曲線 (212S8-1)	-----	87
図4. 5. 50.	圧力-変位曲線 (213S8-1)	-----	88
図4. 5. 51.	圧力-変位曲線 (214S8-1)	-----	89
図4. 5. 52.	圧力-変位曲線 (215S8-1)	-----	90
図4. 5. 53.	圧力-変位曲線 (226S8-1)	-----	91
図4. 5. 54.	圧力-変位曲線 (227S8-1)	-----	92
図4. 5. 55.	圧力-変位曲線 (228S8-1)	-----	93
図4. 5. 56.	圧力-変位曲線 (229S8-1)	-----	94
図4. 5. 57.	圧力-変位曲線 (225S8-1)	-----	95
図4. 5. 58.	圧力-変位曲線 (224S8-1)	-----	96
図4. 5. 59.	圧力-変位曲線 (223S8-1)	-----	97
図4. 5. 60.	圧力-変位曲線 (222S8-1)	-----	98
図4. 5. 61.	圧力-変位曲線 (221S8-1)	-----	99
図4. 5. 62.	圧力-変位曲線 (236S8-1)	-----	100
図4. 5. 63.	圧力-変位曲線 (237S8-1)	-----	101
図4. 5. 64.	圧力-変位曲線 (238S8-1)	-----	102
図4. 5. 65.	圧力-変位曲線 (239S8-1)	-----	103
図4. 5. 66.	圧力-変位曲線 (235S8-1)	-----	104
図4. 5. 67.	圧力-変位曲線 (234S8-1)	-----	105
図4. 5. 68.	圧力-変位曲線 (233S8-1)	-----	106
図4. 5. 69.	圧力-変位曲線 (232S8-1)	-----	107
図4. 5. 70.	圧力-変位曲線 (231S8-1)	-----	108
図4. 5. 71.	圧力-変位曲線 (Ch. 1)	-----	109

(昨年度実施の予備载荷試験)

図4. 5. 72. (τ_{re})_{r=a=0}とした場合に亀裂位置の接線応力がゼロになる注入圧 (理論値) とP-D曲線の折れ曲がり点から検出された亀裂再開口圧 (実験値) との相関図

		-----	110
図4. 6. 1.	载荷圧とAEの発生数との関係	-----	114
図4. 6. 2.	载荷圧とAEの発生数との関係 (111S8-1)	-----	115
図4. 6. 3.	载荷圧とAEの発生数との関係 (111S8-2)	-----	116
図4. 6. 4.	载荷圧とAEの発生数との関係 (111S8-3)	-----	116
図4. 6. 5.	载荷圧とAEの発生数との関係 (112S8-1)	-----	117
図4. 6. 6.	载荷圧とAEの発生数との関係 (112S8-2)	-----	117

図4.6.7.	載荷圧とAEの発生数との関係(113S8-1)	-----	118
図4.6.8.	載荷圧とAEの発生数との関係(113S8-2)	-----	118
図4.6.9.	載荷圧とAEの発生数との関係(114S8-1)	-----	119
図4.6.10.	載荷圧とAEの発生数との関係(114S8-2)	-----	119
図4.6.11.	載荷圧とAEの発生数との関係(115S8-1)	-----	120
図4.6.12.	載荷圧とAEの発生数との関係(116S8-1)	-----	121～122
図4.6.13.	載荷圧とAEの発生数との関係(117S8-1)	-----	123
図4.6.14.	載荷圧とAEの発生数との関係(118S8-1)	-----	124
図4.6.15.	載荷圧とAEの発生数との関係(119S8-1)	-----	125
図4.6.16.	載荷圧とAEの発生数との関係(121S8-1)	-----	126
図4.6.17.	載荷圧とAEの発生数との関係(122S8-1)	-----	127
図4.6.18.	載荷圧とAEの発生数との関係(123S8-1)	-----	128
図4.6.19.	載荷圧とAEの発生数との関係(124S8-1)	-----	129
図4.6.20.	載荷圧とAEの発生数との関係(126S8-1)	-----	130
図4.6.21.	載荷圧とAEの発生数との関係(127S8-1)	-----	131
図4.6.22.	載荷圧とAEの発生数との関係(128S8-1)	-----	132
図4.6.23.	載荷圧とAEの発生数との関係(129S8-1)	-----	133
図4.6.24.	載荷圧とAEの発生数との関係(131S8-1)	-----	134
図4.6.25.	載荷圧とAEの発生数との関係(131S8-2)	-----	135
図4.6.26.	載荷圧とAEの発生数との関係(132S8-1)	-----	136
図4.6.27.	載荷圧とAEの発生数との関係(133S8-1)	-----	137
図4.6.28.	載荷圧とAEの発生数との関係(134S8-1)	-----	138
図4.6.29.	載荷圧とAEの発生数との関係(134S8-2)	-----	139
図4.6.30.	載荷圧とAEの発生数との関係(136S8-1)	-----	140
図4.6.31.	載荷圧とAEの発生数との関係(137S8-1)	-----	141
図4.6.32.	載荷圧とAEの発生数との関係(138S8-1)	-----	142
図4.6.33.	載荷圧とAEの発生数との関係(139S8-1)	-----	143
図4.6.34.	載荷圧とAEの発生数との関係(219S8-1)	-----	144～145
図4.6.35.	載荷圧とAEの発生数との関係(218S8-1)	-----	146～147
図4.6.36.	載荷圧とAEの発生数との関係(217S8-1)	-----	148～149
図4.6.37.	載荷圧とAEの発生数との関係(216S8-1)	-----	150～151
図4.6.38.	載荷圧とAEの発生数との関係(211S8-1)	-----	152～153
図4.6.39.	載荷圧とAEの発生数との関係(212S8-1)	-----	154～155
図4.6.40.	載荷圧とAEの発生数との関係(213S8-1)	-----	156～157
図4.6.41.	載荷圧とAEの発生数との関係(214S8-1)	-----	158～159

図4.6.42.	載荷圧とAEの発生数との関係(215S8-1)	-----	160
図4.6.43.	載荷圧とAEの発生数との関係(226S8-1)	-----	161~162
図4.6.44.	載荷圧とAEの発生数との関係(227S8-1)	-----	163
図4.6.45.	載荷圧とAEの発生数との関係(228S8-1)	-----	164
図4.6.46.	載荷圧とAEの発生数との関係(229S8-1)	-----	165
図4.6.47.	載荷圧とAEの発生数との関係(255S8-1)	-----	166
図4.6.48.	載荷圧とAEの発生数との関係(224S8-1)	-----	167
図4.7.1.	解析モデル	-----	169
図4.7.2.	圧力-変位曲線 (乾式一面破碎において拘束圧を等圧にした場合)	-----	170
図4.7.3.	圧力-変位曲線 (乾式一面破碎において拘束圧を偏圧にした場合)	-----	170
図4.7.4.	圧力-変位曲線 (乾式二面破碎において拘束圧を等圧にした場合)	-----	171
図4.7.5.	圧力-変位曲線の比較 (乾式一面破碎と乾式二面破碎)	-----	171

表 一 覧

表1.1.1.	供試体拘束圧力の段階数	-----	1
表3.1.1.	鋼管内載荷試験条件	-----	13
表3.3.1.	S-500による鋼管内載荷試験から得られた (鋼管外周ひずみ/載荷圧) 比	-----	23
表4.2.1.	供試体の配合表	-----	28
表4.2.2.	計測機器一覧表	-----	28
表4.3.1.	AE計測システムの仕様と設定値	-----	29
表4.4.1.	供試体拘束圧載荷条件	-----	31~32
表4.5.1.	S-800載荷試験一覧	-----	35~38
表4.6.1.	S-800載荷試験AE設定一覧表	-----	113
表4.8.1.	計算結果一覧	-----	173~174

< 巻末資料 1 >

付図-1 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)

付図-2 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)

付図-3 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)
付図-4 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T2)
付図-5 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-6 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-7 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)
付図-8 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T2)
付図-9 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-10 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-11 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)
付図-12 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T2)
付図-13 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-14 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-15 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)
付図-16 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T2)
付図-17 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-18 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-19 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)
付図-20 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T2)
付図-21 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-22 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-23 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)
付図-24 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T2)
付図-25 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-26 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-27 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)
付図-28 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T2)
付図-29 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-30 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-31 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-32 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-33 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)
付図-34 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T2)
付図-35 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T1)
付図-36 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-15T2)
付図-37 載荷圧とAEの発生数との関係 (試験1-80T1)

- 付図-38 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-80T2）
付図-39 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-15T1）
付図-40 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-15T2）
付図-41 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-15T1）
付図-42 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-15T2）
付図-43 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-80T1）
付図-44 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-80T2）
付図-45 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-15T1）
付図-46 載荷圧とAEの発生数との関係（試験1-15T2）

< 巻末資料 2 >

- ・ 調査写真

1. 調査概要

1.1. 件名

乾式破砕応力測定法の室内検証試験

1.2. 目的

活断層周辺応力場解明の基礎データを取得することを目的とし、昨年度に実施した乾式破砕応力測定法改良試験を踏まえて本測定法の実用性を評価する。

1.3. 調査期間

平成11年1月11日～平成11年3月19日

1.4. 調査項目

本調査の内容及び数量は以下のとおりである。

①鋼管内載荷試験

- ・ 載荷角度 2 方向
- ・ ひずみゲージ貼付枚数 2 2 枚

②室内破砕試験

- ・ 使用供試体 2 個（物性値の異なるもの）
- ・ 亀裂発生角度 各供試体 3 方向
- ・ 供試体内載荷試験（供試体拘束圧力の種類は下記の表に示す）

表1.1.1. 供試体拘束圧力の段階数

	等圧載荷			偏圧載荷		
	第1亀裂	第2亀裂	第3亀裂	第1亀裂	第2亀裂	第3亀裂
供試体1	5段階	4段階	4段階	4段階	4段階	4段階
供試体2	5段階	5段階	5段階	4段階	4段階	4段階

- ・ A E 計測：供試体内載荷試験時に併せて計測した。

1.5. 担当者

本調査は山口大学工学部水田義明教授と石田毅助教授の指導のもと以下に記す担当者が実施した。

三井金属資源開発株式会社

水資源事業部 副事業部長 新宮和喜

地球環境事業部 主任 中嶋敏秀

地球環境事業部 主任 山下 貢

2. 乾式一面破碎法による応力測定の概要

2.1. プロブと計測システム

乾式破碎法による応力測定原理は、地殻におけるボーリング掘削による円孔内を内圧載荷した時の載荷圧と孔径変化を観測し、地殻応力を推定するものである。

本室内試験で用いた応力測定装置は、昨年度使用した装置（S-500）を改良した乾式多面破碎計測装置S-800である。図2.1.1にS-800プロブの概念図を示す。このS-800計測装置は、既往の乾式破碎法とは異なり、ウレタン性のプロブの周辺に2つ割れの摩擦シェルを接合し、1方向のみに載荷方向を制御して新規亀裂を発生させ、再載荷時の圧力－直径変化曲線から亀裂に直行する方向の開口応力を決定し、同位置において最低3方向での計測結果から未知数として最大主応力、最小主応力およびその方向を決定する。原理的には、設定した任意方向以外の亀裂は、摩擦シェルの十分な摩擦により開口せず、観測される圧力－直径変化に影響を与えない。S-800プロブの摩擦シェルの表面はS-500に比べ摩擦シェルの摩擦効果を改善すべく工夫している。この載荷機構によれば、実岩盤での既存亀裂、潜在亀裂の影響を抑えて亀裂開口時の圧力を求められる可能性がある。

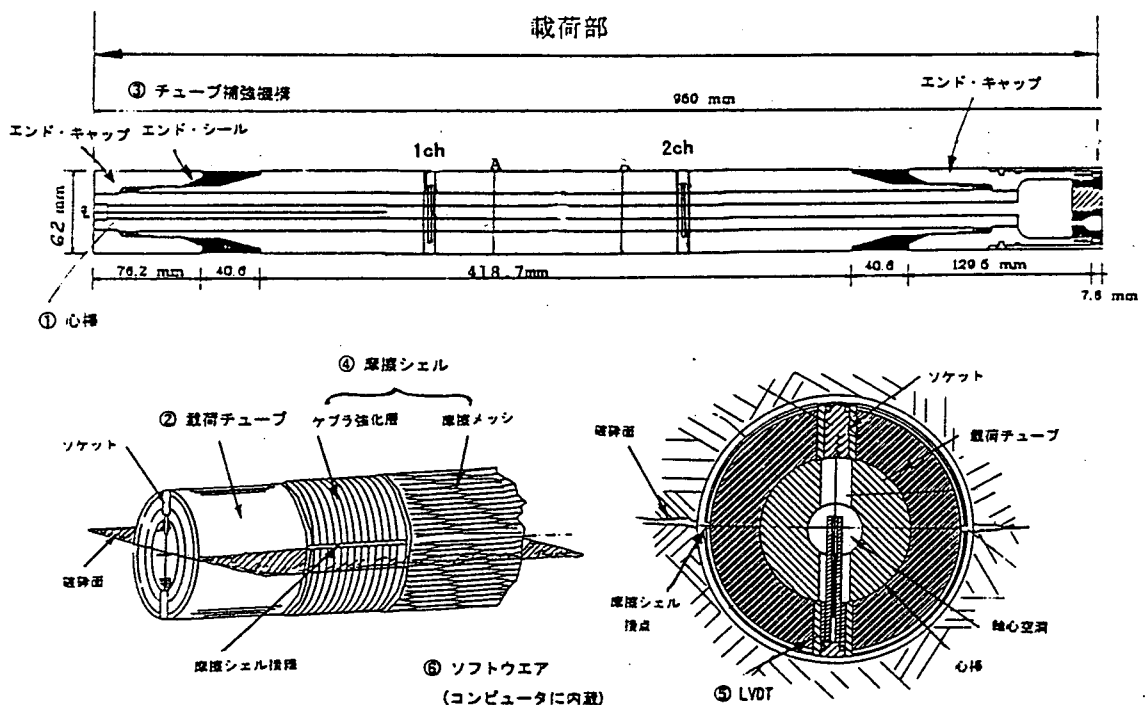


図2.1.1. S-800プロブの載荷部の基本構造

図2.1.2には、S-800を使用する際の計測システムの概要図を示す。この計測システムを用いて計測する項目は、実験開始からの経過時間、S-800プローブの載荷圧、載荷方向のS-800プローブの直径である。なおプローブの直径は、図2.1.1に示すように2カ所で同一方向の変化を計測する。

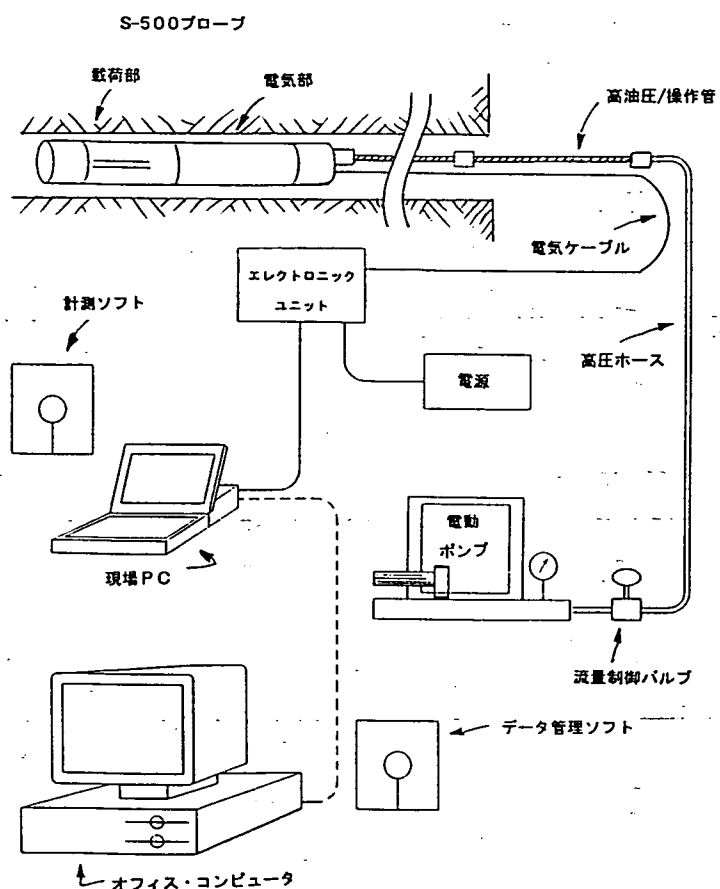


図 2.1.2. S-800 計測システム図

2.2. 応力測定理論

乾式破砕法による応力測定の原理は、基本的には、円孔周辺理論によるものである。半無限板に空いた円孔周辺の応力状態については、弾性論に基づき種々の理論が示されているが、平面ひずみ状態（応力場に関しては平面応力状態も同様）での拘束圧を受ける有孔板の応力については、Kirschの解が代表的なものとして挙げられる。乾式破砕法のような円孔内から内圧を負荷する場合の円孔周辺への応力の影響については、応力制御载荷、変位制御载荷および全面载荷、部分载荷などの载荷状態により異なり、それぞれ弾性理論に基づく理論解または近似解が得られている。応力制御载荷について着目すると、円孔壁面に全面载荷した場合には、Timoshenkoにより近似解が得られており、法線方向応力 σ_r および周方向応力 σ_θ は、それぞれ内圧 p がそのまま増加あるいは減少する応力状態となる。また、内圧が円孔壁面に部分的に作用する場合には、Jaegerの理論により、内圧 p の負荷により円孔に分布する法線方向応力 σ_r および周方向応力 σ_θ を算出することができる。

本検討で用いた乾式多面破砕式応力測定装置は、通常の乾式破砕法の载荷機構である等方圧の加わるウレタンチューブに半円形状に2分割された摩擦シェルを接合し、亀裂の方向を制御するメカニズムになっており、岩盤との摩擦、部分的な不均等载荷などの特徴があり、単純な応力状態にないものと考えられるため、ここではKirschの解による円孔理論を示し、内圧負荷による円孔壁面での応力状態について、Timoshenkoの解、Jaegerの理論を概略説明する。

(1) 弾性論に基づく円孔周辺応力

① Kirschの解

平面ひずみ状態における半無限円孔板の応力は、Kirschの解として一般的に知られている。半無限円孔板に任意応力 P とそれに直交する応力 Q が作用する場合、円孔中心から r の距離にあり、 P の作用方向から θ の角度における位置の応力は次式で与えられる。

図2.2.1に半無限円孔板の円孔周辺応力概念図を示す。

$$\sigma_r = \frac{P+Q}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{P-Q}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P+Q}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{P-Q}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P-Q}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (3)$$

ここに、 P, Q : 作用力、 a : 円孔半径、 r : 円孔中心からの距離、 θ : P 方向からの角度

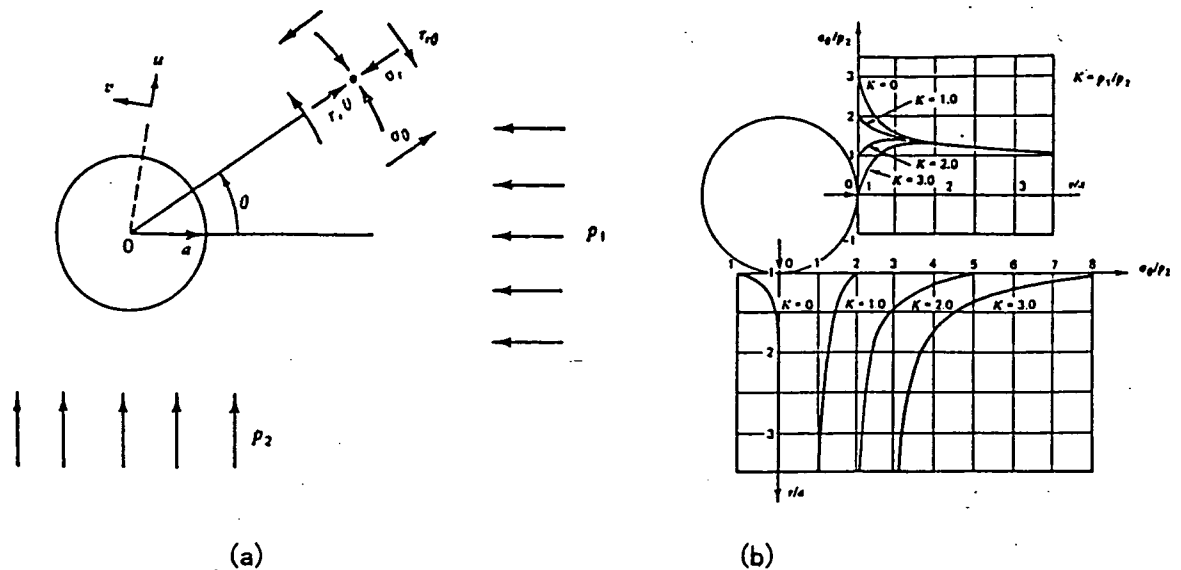


図 2.2.1. 半無限円孔板の円孔周辺応力概念図

②内圧载荷による周方向応力 σ_θ の変化

半無限板の円孔に内圧が負荷されることによる円孔壁面での周方向応力 σ_θ は、その载荷状態により異なる。法線方向応力 σ_r および周方向応力 σ_θ については、円孔壁面に全面载荷した場合には、Timoshenkoにより近似解が与えられており、部分的に载荷された場合には、Jaegerの理論により与えられている。以下に各理論による内圧 p の負荷による周方向応力 σ_θ に着目して述べる。

円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合には、図2.2.2に示す条件において、Timoshenkoの解より内圧 p による周方向応力 σ_θ' は、次式により与えられる。

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 b^2 (P_0 - P_1)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{P_0 b^2 - P_1 a^2}{b^2 - a^2} \quad (4)$$

P_1 : 内圧、 P_0 : 作用力、 a : 円孔半径、 b : 円孔中心からの作用力境界

ここで、作用力境界 b が円孔直径 a に対して十分に大きく、円孔壁面からのみ内圧 P_1 が作用した場合の σ_θ' を算定するには、以下の条件

$$b \gg a, \quad P_0 = 0, \quad r = a$$

を式(4)に代入する。

従って、内圧 P_1 による円孔壁面での周方向応力 σ_θ' は

$$\sigma_\theta = -P_1 \quad (5)$$

となる。すなわち、内圧を全载荷した場合には、円孔周方向応力は、符号を逆にしただけの増分となる。

次に、内圧が等方ではなく、図2.2.3に示すような部分的に作用する場合には、Jaegerの理論により内圧 p による周方向応力 σ_θ' は、次式により与えられている。

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= P_1 - (4P_1\alpha/\pi) & -\alpha < \theta < \alpha, \quad \pi - \alpha < \theta < \pi + \alpha \\ \sigma_{\theta} &= -4P_1\alpha/\pi & \alpha < \theta < \pi - \alpha, \quad \pi + \alpha < \theta < 2\pi - \alpha\end{aligned}\quad (6)$$

ここで、 α : 载荷角度(ラジアン)

(6) 式によれば、内圧を部分载荷した場合、内圧による非载荷部の円孔周方向応力の増加、すなわち、地殻応力 ((1) 式による円孔周辺の初期状態) に対する σ_{θ} の低減率が大きくなり、局部的な引張応力の発生が早くなることを示している。

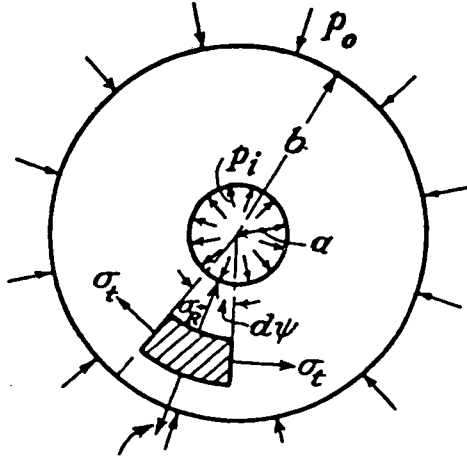


図 2.2.2. 円孔板の内圧が等応力状態で作用する場合

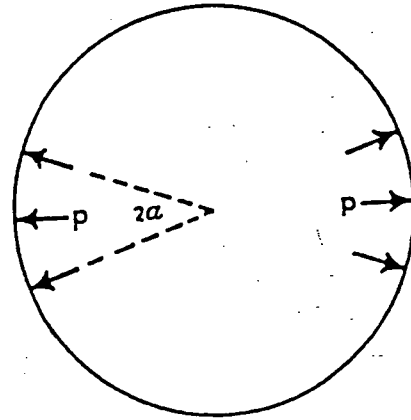


図 2.2.3. 内圧が部分的に作用する場合

③多面破碎法の地殻応力推定の概念

本検討の多面破碎式応力測定装置では、内圧はほぼ全载荷状態で負荷されているものと考えられる。そこで、Timoshenkoの等方载荷の場合を例にとり、任意方向の亀裂再開応力が捉えられることを前提として、地殻応力推定の概念について述べる。

前章にも述べたように、通常の乾式多面破碎式応力測定では、初期载荷により岩盤に亀裂を与え、再载荷による既存亀裂の開口挙動を観測し、最大および最小主応力を推定するものである。この概念では、円孔壁面での内圧と作用力（地殻応力による円孔周辺応力の応力状態の釣り合いを考えたもの）であり、(2) 式に $a = r$ を代入し、(5) 式と合わせた次式により定義されるものである。

$$\sigma_{\theta} = (3Q - P) + 4(P - Q)\sin^2 \theta - P_1 \quad (7)$$

平面内の主応力 P および Q の方向は未知であるため、図 2.2.4 に示すように x 軸から最大主応力軸の角度を α 、 x 軸から亀裂までの方向を θ' として式 (7) を一般化すると次式が与えられる。

$$\sigma_{\theta\alpha} = (3Q - P) + 4(P - Q)\sin^2 (\theta' + \alpha) - P_1 \quad (8)$$

既往の二面破碎法の場合、亀裂の方向は、最小主応力直交方向となり、初期载荷で岩盤に亀裂を発生させ、岩盤特性の引張強度を喪失させ、再载荷により岩盤特性には寄与し

ない境界条件の変化（亀裂の再開）による計測挙動変化を評価し、主応力を推定するものであるが、現実には潜在亀裂等の存在により、発生亀裂方向の確認および最大主応力の計測が困難な場合がある。

ここで、亀裂方向が制御できるものとし、二面破碎法での応力推定原理が適用できるものとするれば、式（8）において未知数は、 P 、 Q および θ であり、内圧 P_i の载荷により最低3方向で σ_θ の値が得られれば、連立方程式から未知数を求めることができる。

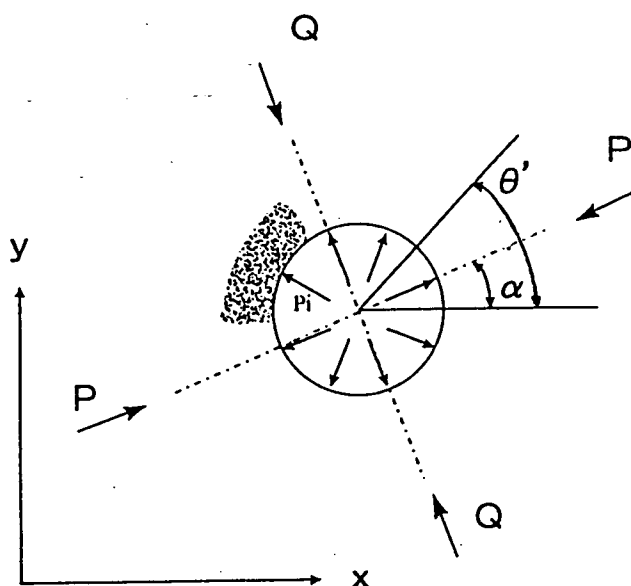


図 2.2.4. 円孔周辺の応力

2.3. これまでの乾式一面破碎法による試験の概要と得られた問題点

S-800は、2.1.節で述べたように、同位置において最低3方向の亀裂を発生させ、それぞれの亀裂を再開させたときの圧力－直径変化曲線から亀裂に直行する方向の開口応力を求める必要がある。従って、S-800が必要とされる重要な機能として、「任意方向に破断面を生成出来ること」と、「既存の破断面がある場で、特定の破断面だけを開口させる载荷荷重を精度良く決定できること」をあげることができる。

一昨年度のS-800の試験は、2種類のプローブ（サンダー・ベルト型摩擦シェル及びワイヤ・ブレード型摩擦シェル）を用いて国内および米国の室内で行った後、現場でも実施した。これらの試験の結果、S-800の性能を評価する上での第一の基本的要件である「任意方向に破断面を生成出来ること」に関して、亀裂の造成が可能であると確認された。しかしながら、2種類のプローブ共に、第一方向および第二方向の破断面が存在する状態で、第三方向の破断面の生成について、既存亀裂の開口を確実に押さえることが出来ていない。このことは、2つのプローブ部分の摩擦効果がなお不十分であることを示唆していると考えられた。

次に、第二の基本的要件である「既存の破断面がある場で、特定の破断面だけを開口させる載荷荷重を精度良く決定できること」については、室内試験の破断面が存在する場合の破断面再開口をシミュレートし、得られた圧力－変形曲線と試験で得られた圧力－変形曲線の特徴を対比させることにより、破断面の再開口時の荷重を特定する手法を提案することができた。しかし、圧力－変形曲線の上で、亀裂の再開口による折れ点を見つけだすことは理想的ではあるが、FEM解析結果からも、変化点を捉えることが容易ではなく、試験から得られる上部の折れ点圧力は、理論式から求めた折れ点圧力より2～3倍大きいということが明らかになった。

また、一昨年度の室内試験では、供試体の厚みが20cmであり、載荷部分全体を供試体に入れることができなかった。さらに、拘束圧を最大60kgf/cm²程度にしかあげることができず、地下深部での地核応力測定を想定した場合には、拘束圧が小さ過ぎた。

上記のことを踏まえて、昨年度の試験では60cm四方の立方供試体で試験ができる載荷装置を作成し、拘束圧力も最大150kgf/cm²となるようにした。またプローブも改良して検証試験を行った。その結果、折れ点圧力の理論値が150kgf/cm²以下の場合には折れ点圧力の実験値と理論値に相関性があったものの、150kgf/cm²以上の場合には、プロットした点が少なかったため両者に相関性があるか否かの判断ができなかった。載荷試験と同時に計測したAEに関しては、亀裂の挙動を捕らえているとは思われたが、亀裂の発生・閉口・再開口時のAE特性を捕らえるまでには到らなかった。

そのため本年度の検証試験では、折れ点圧力の理論値が150kgf/cm²以上になる拘束条件を昨年度よりも多くし、折れ点圧力の実験値と理論値との関係を明確にすることを主目的として室内試験を行った。

2.4. プロブの改良点

本年度の室内試験では、プロブの改良を行った。ここでまず、図2.4.1.に昨年度使用したプロブの断面図を示し、図2.4.2.に鋼管内載荷試験時にプロブに巻き付けたプレスケール（圧力によって発色する紙であり、色の濃淡から圧力の大きさが推定できる）の結果を示す。プロブ中央部の3つのやや白くなっている丸い部分は変位計のソケット2カ所とアンカー部である。一方、黒く太い筋状になっている部分は摩擦部と摩擦部の間、つまり亀裂発生部分である。この結果は、昨年度使用したプロブが、当初想定していた載荷機構（亀裂作成面が摩擦シェル内部のウレタンの等方膨張により引き離され引張破壊が起こっている）通りではなく、亀裂作成面直近の摩擦シェルの強い拘束を受けた状況下（シェルが供試体に食い込んだような状態）で、その内部のウレタンが膨張することによって生じる局部的引張破壊であると思われた。そのために本年度使用したプロブ（S-800）は図2.4.3.に断面図を示すように、亀裂発生箇所から内部のウレタンがはみ出してこない構造とした。S-800を使用したときのプレスケールの結果を図2.4.4.に示す。この結果、昨年度のような亀裂発生部で最も圧力が掛かっている状態では無くなっており、S-800プロブを用いると当初想定した破壊機構により、破碎が行えるものと期待される。また摩擦シェルの表面も、S-500が外周の表面から垂直に溝を入れていたのに対し、S-800では表面を鋸の歯のように加工し、載荷の時に摩擦シェルが孔壁に密着しやすい状態にしている。

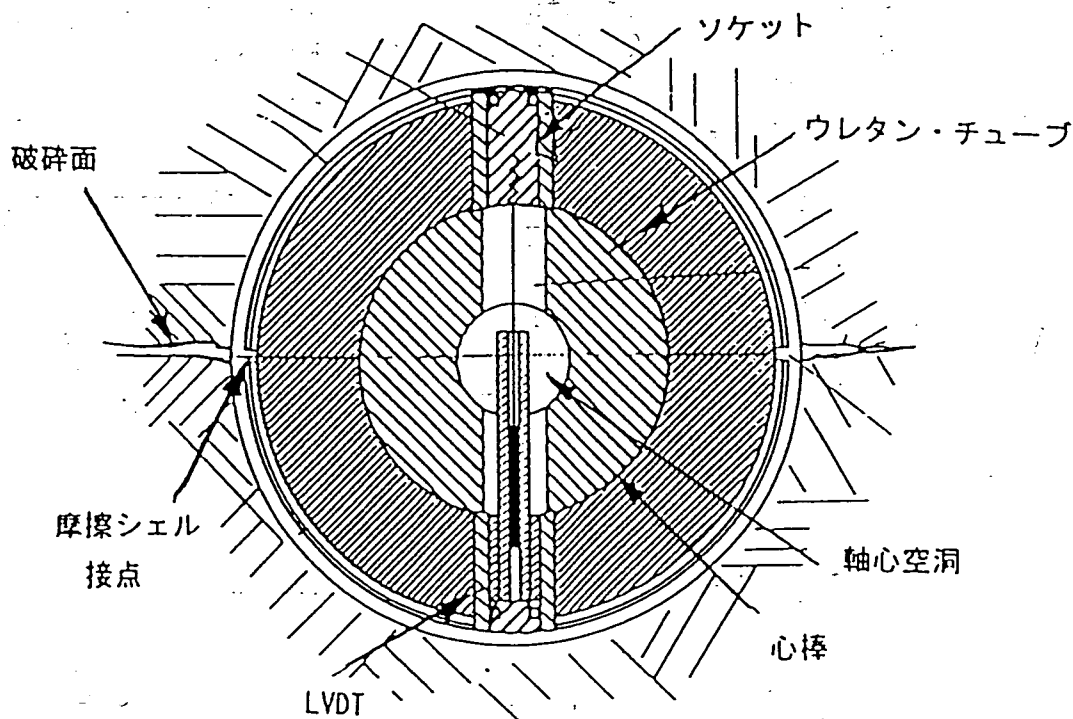
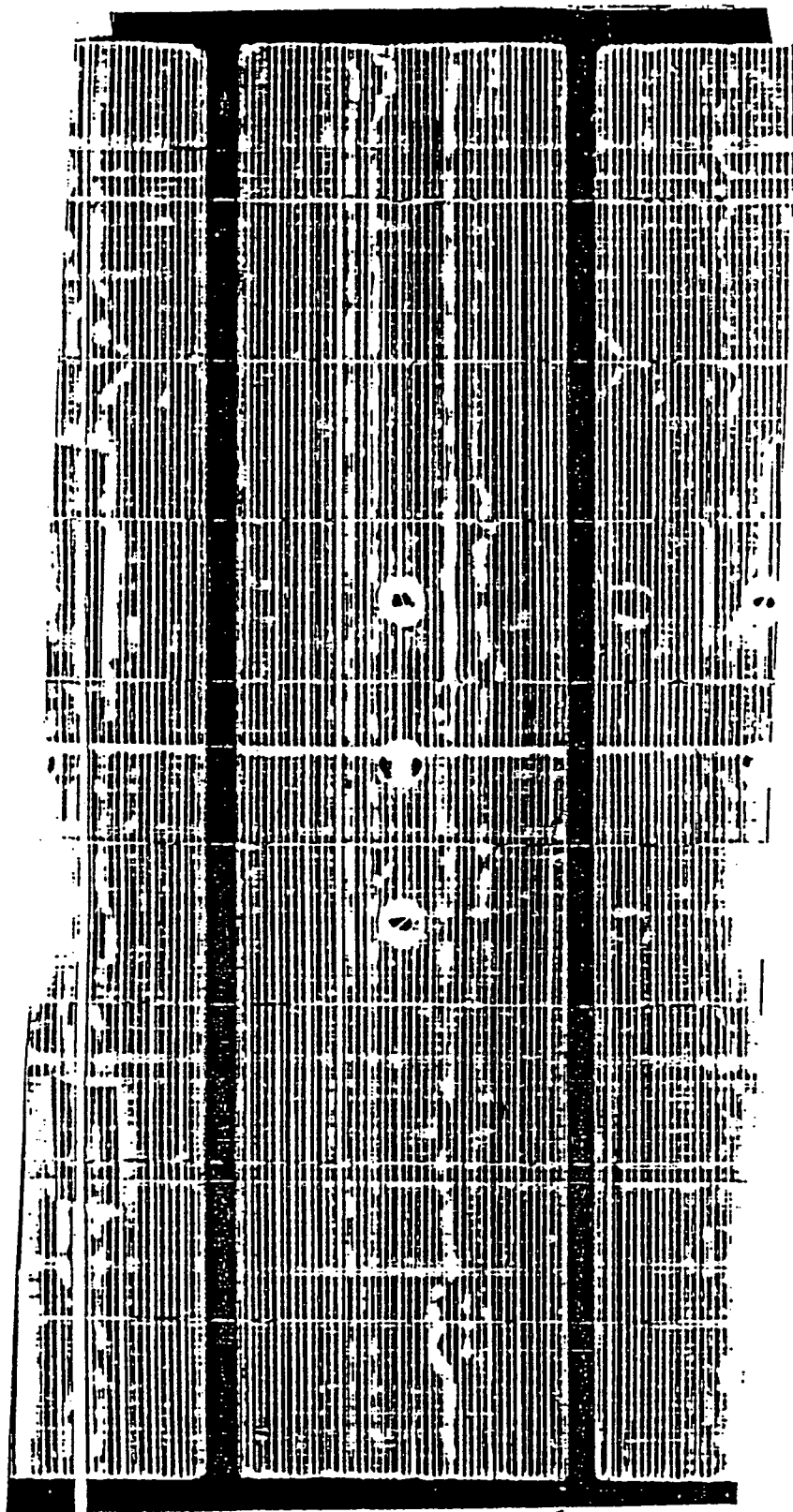


図 2.4.1. S-500 プロブ（昨年度使用）の断面図



亀裂発生位置

図 2.4.2 鋼管内載荷試験時に観測されたプレススケールの結果
(昨年度の試験より)

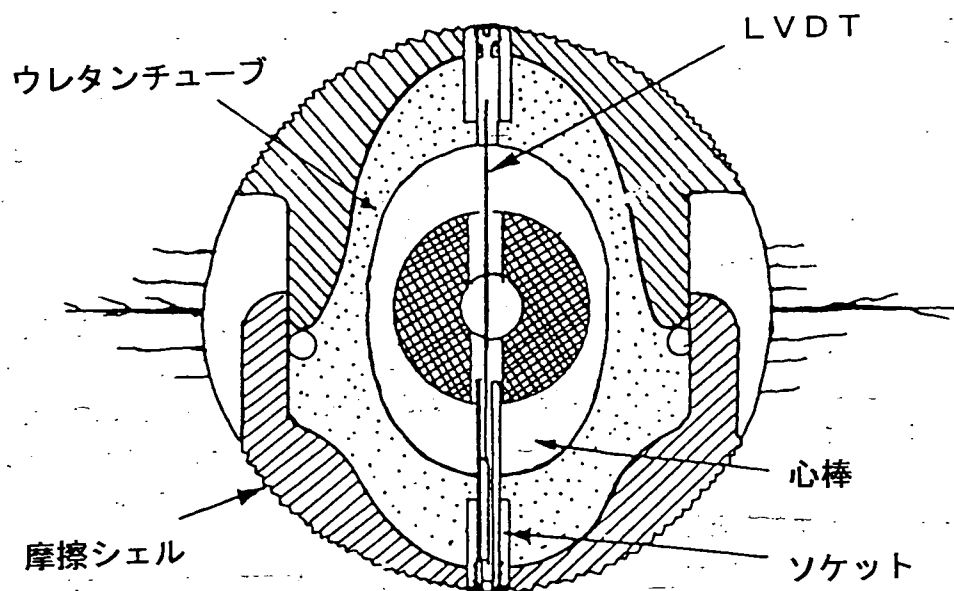


図 2.4.3. S-800 プロブ（今年度使用）の断面図

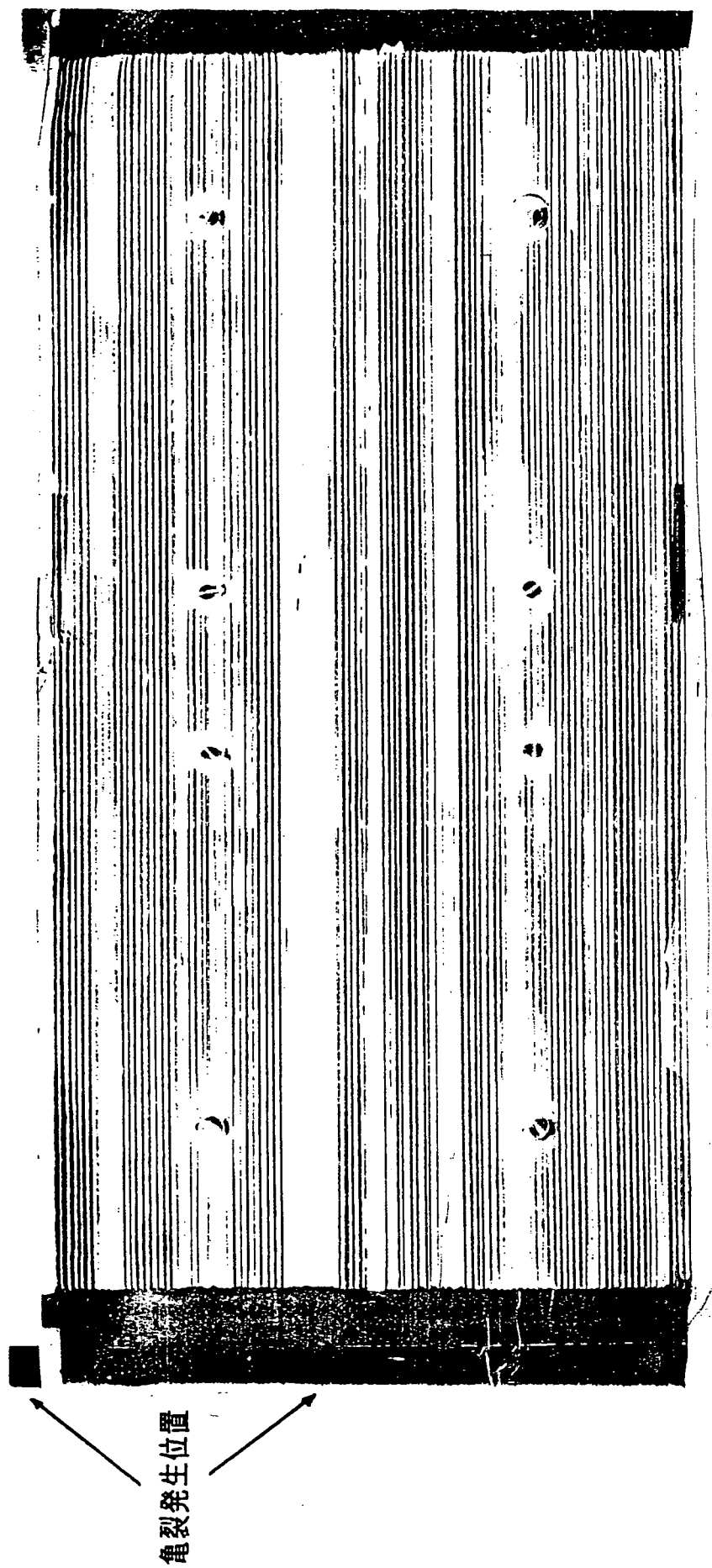


図 2.4.4. 鋼管内載荷試験時に観測されたプレススケールの結果

3. 鋼管内載荷試験

3.1. 試験の概要

昨年度の試験では、供試体を用いた破砕試験の他に、鋼管内で載荷試験を行い、そのときの鋼管外側のひずみを計測した。乾式一面破砕法によって起こされる破壊機構を確認するうえでプローブ上の圧力分布を知る必要があり、得られたひずみの値と数値シミュレーションの結果からプローブが鋼管内壁に与える応力状態を調べることを目的としたものであった。しかしながら、昨年度の鋼管内載荷試験で鋼管に貼付したひずみゲージは枚数が少なく、試験結果との比較をするにはあまりにもデータが少なかった。そこで、本試験では昨年度よりも鋼管に貼付するひずみゲージの枚数を増やし、再度鋼管内において載荷試験を試みた。図 3.1.1. に鋼管に貼付したひずみゲージの位置関係を示す。また、表 3.1.1. には試験の条件を示す。

表 3.1.1. 鋼管内載荷試験条件

試 験 名	亀裂作成方向 水平方向から時計回り (°)	最大載荷圧力 (kgf/cm ²)	参照図
P t 1	90	200	図 3.2.1.
P t 2	0	200	図 3.2.2.

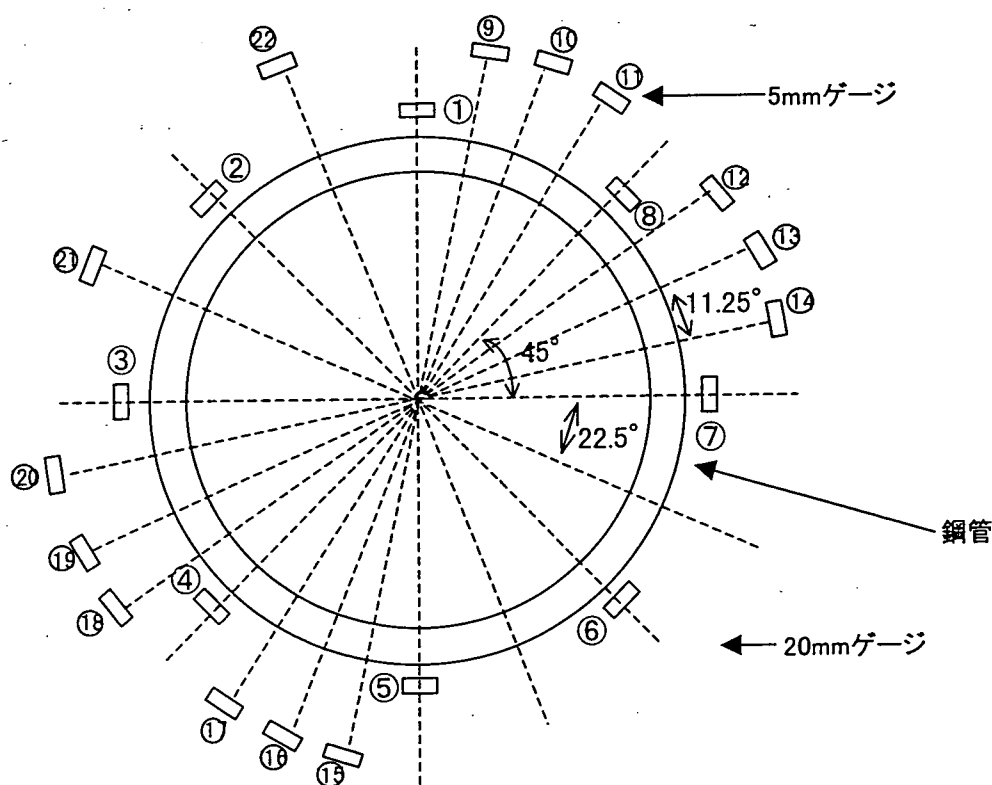


図3.1.1. 鋼管載荷試験ゲージ貼り付け位置

3.2. 試験結果

鋼管内載荷試験で得られたひずみの結果を図 3.2.1(a)～(f)および図 3.2.2(a)～(f)に示す。それぞれ図(a)、(b)には鋼管外壁に 45° 間隔で貼付したひずみゲージの結果を示す。図(c)と図(d)には 1ch と 8ch、8ch と 7ch それぞれの間の角度(45°)を 4 等分した位置のひずみを示す。図(e)には 5ch と 4ch の間の角度を 4 等分した位置と 4ch と 3ch の間の角度を 4 等分した位置の 1 つの結果を示し、図(f)は 4ch と 3ch の間の角度を 4 等分した位置の 1 つと 3ch と 2ch、2ch と 1ch の間の角度を 2 等分した位置のひずみを示す。但し、20ch はひずみゲージを貼付したが、断線のためデータの取得ができなかった。

図 3.2.1 の(a)と(b)を見ると、対称となる位置のひずみ量はほぼ等しいことが分かる。この結果は、プローブが 1ch と 5ch の位置で対称に開いており、ひずみゲージの方向や計測系が正しく機能していることを示している。また、亀裂発生位置の鋼管表面のひずみ量が最も小さく、亀裂発生位置と 90° 離れた位置で最もひずみ量が多いという結果は、昨年の鋼管試験の結果や、シミュレーションの結果とも一致しており、試験の再現性も充分あると思われる。

図 3.2.1 の(c)と(d)、(e)と(f)のそれぞれを比較すると、亀裂発生位置であるひずみ量の最も小さい位置から、亀裂発生位置から 90° 離れたひずみ量の最も大きな位置に向かってひずみ量が増加している。これは鋼管の表面におけるひずみの分布を表している。

図 3.2.2. は亀裂の発生方向を 90° 変化させた試験であるが、亀裂発生位置とひずみ量との関係は図 3.2.1. と同じである。

次節では、ここで得られた結果と昨年度行った鋼管内載荷試験のシミュレーション結果を比較する。

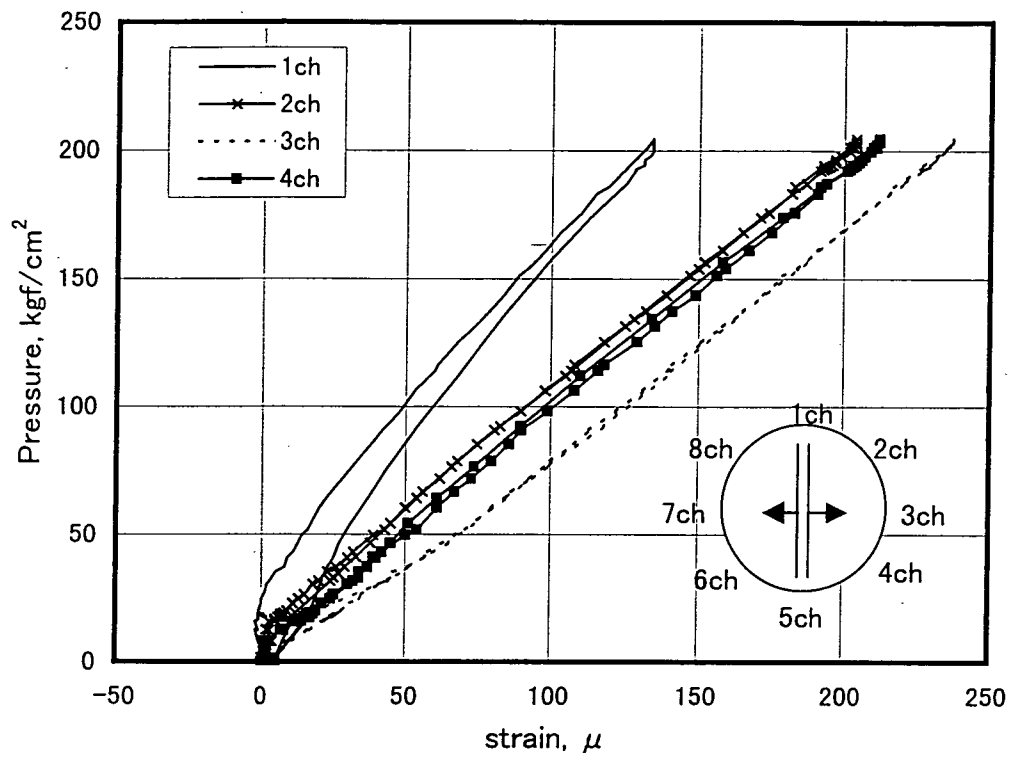


図3.2.1(a). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt1 1~4ch)

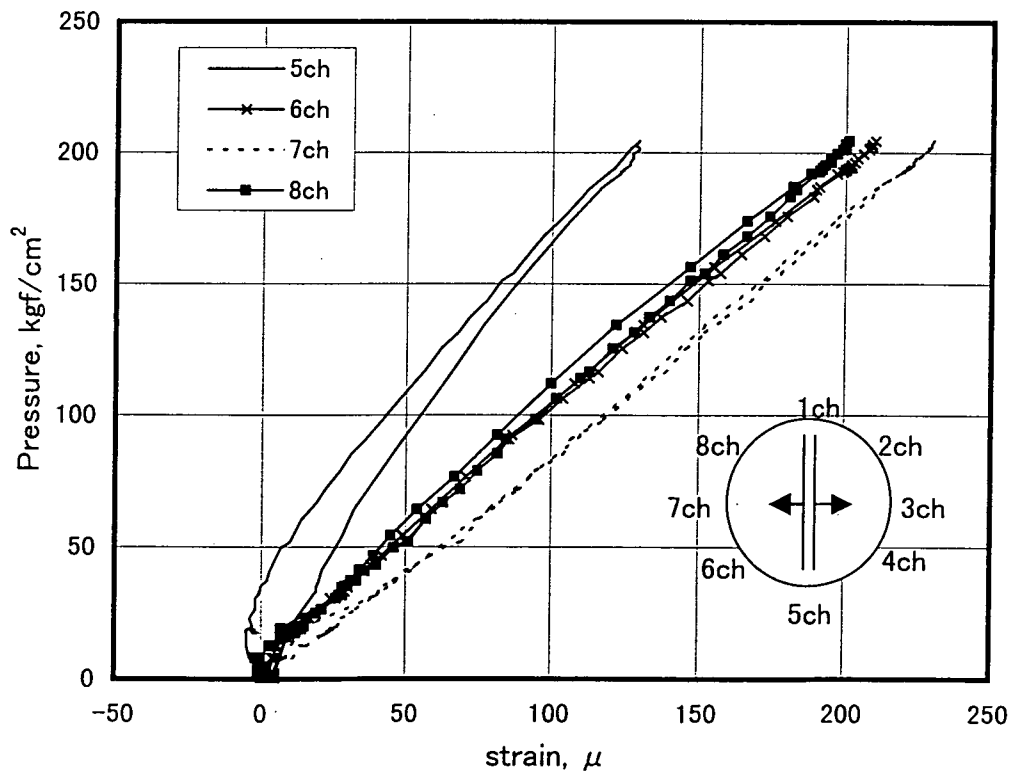


図3.2.1(b). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt1 5~8ch)

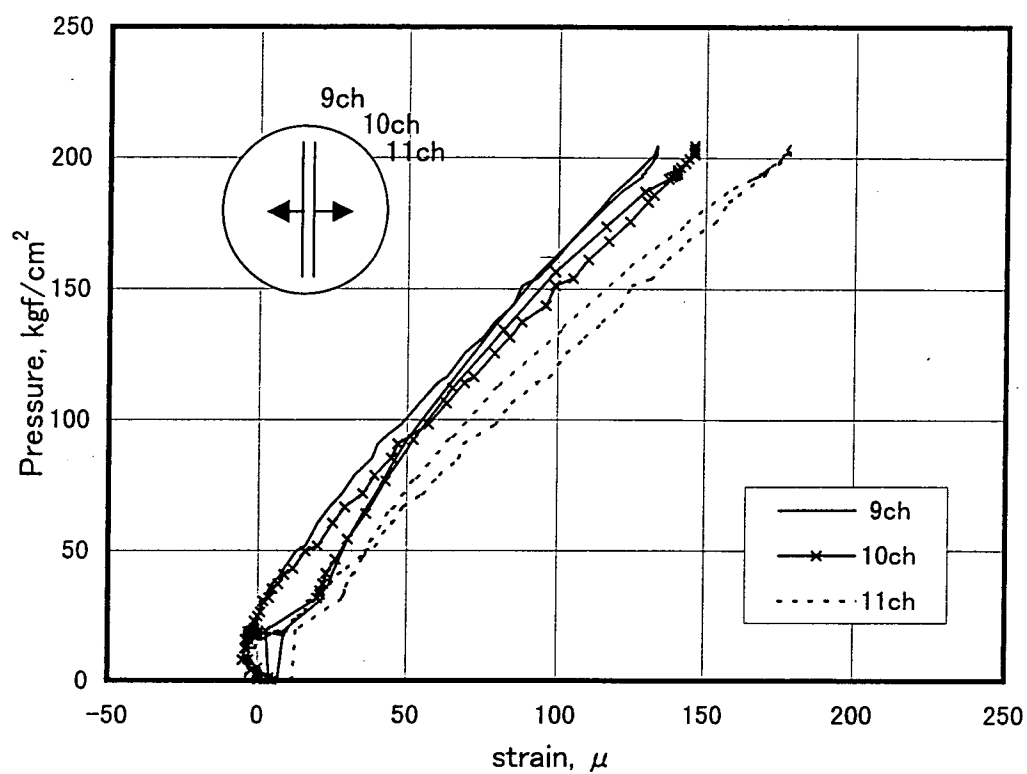


図3.2.1(c). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt1 9,10,11ch)

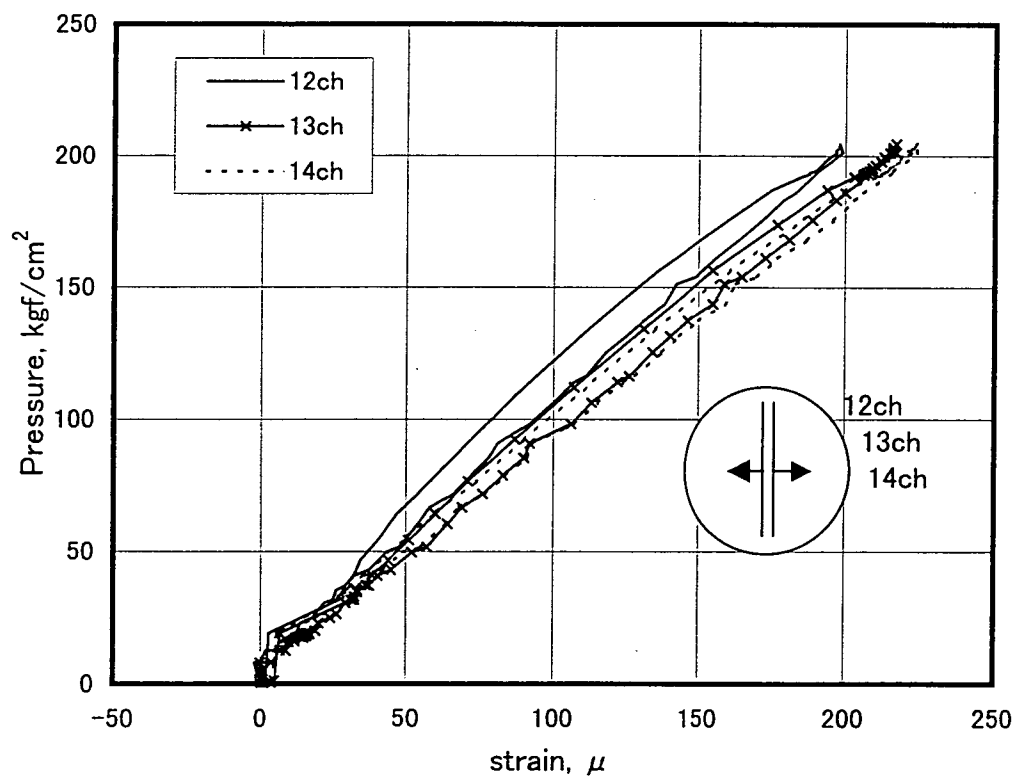


図3.2.1(d). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt1 12,13,14ch)

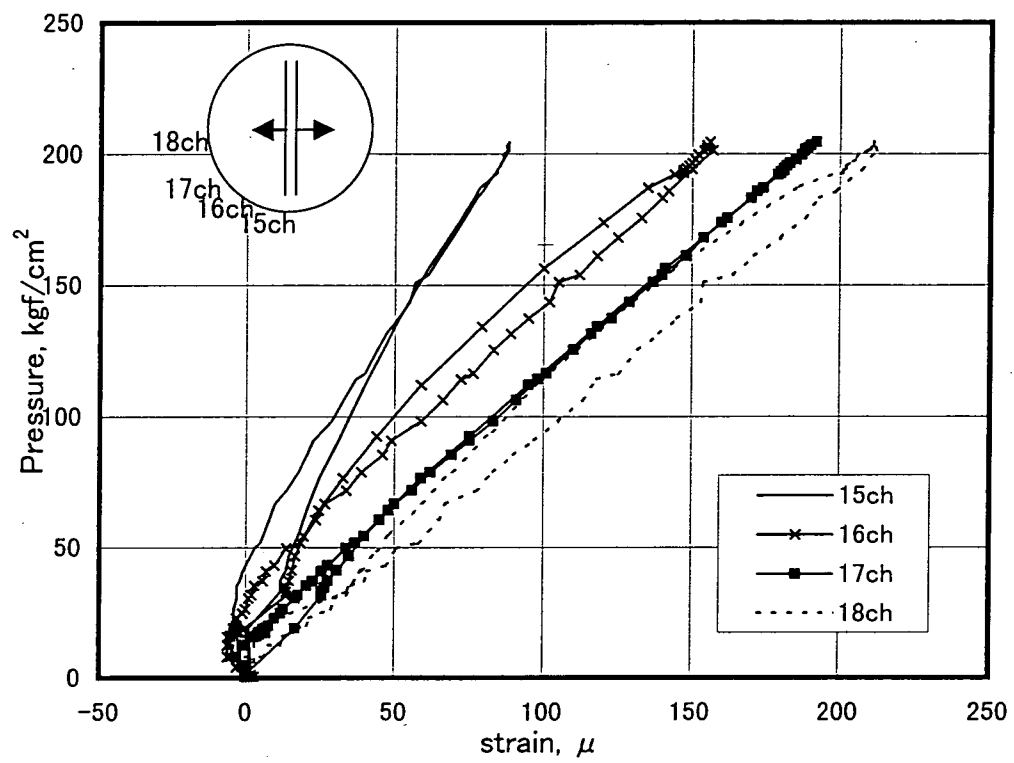


図3.2.1(e). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt1 15~18ch)

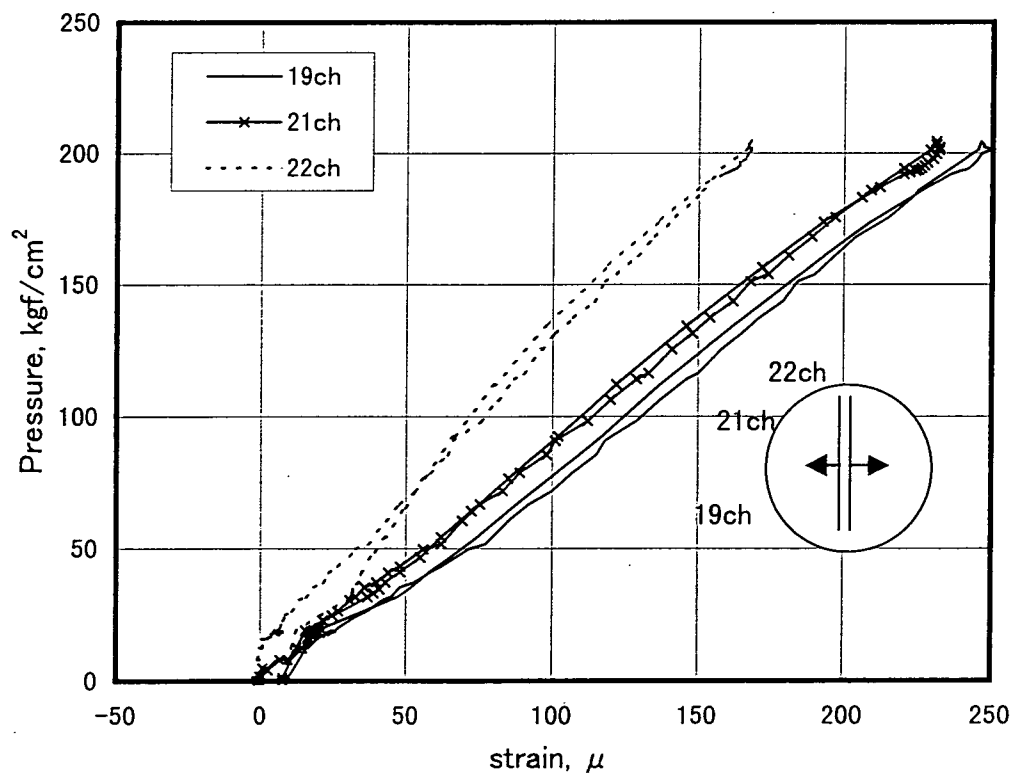
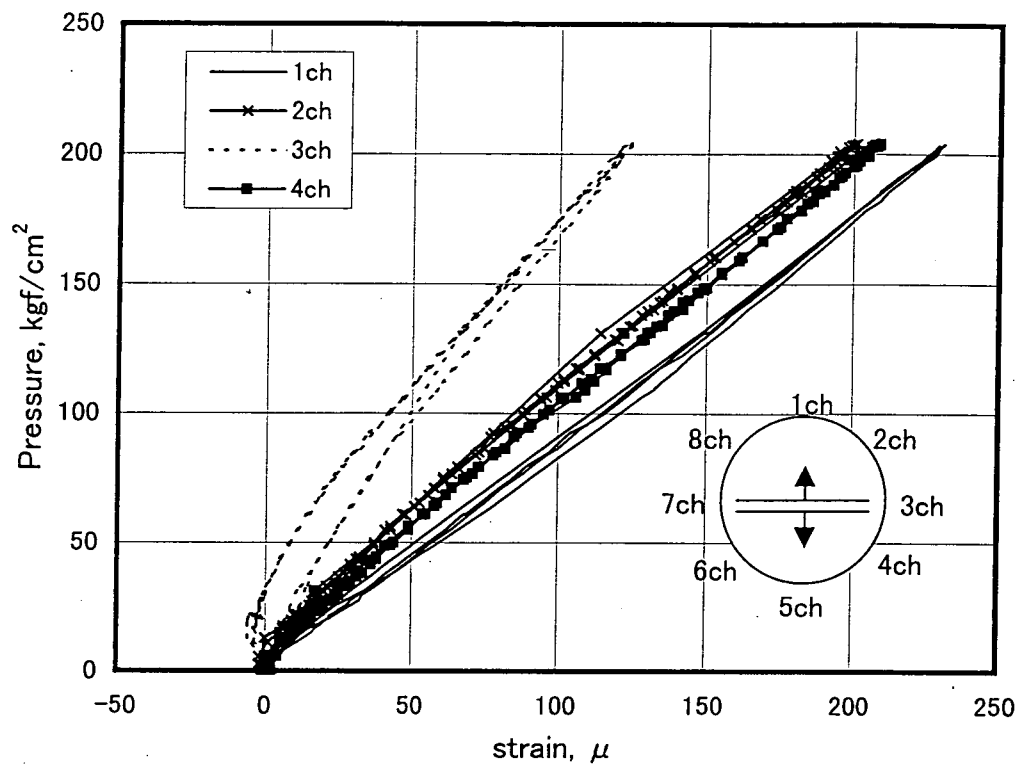
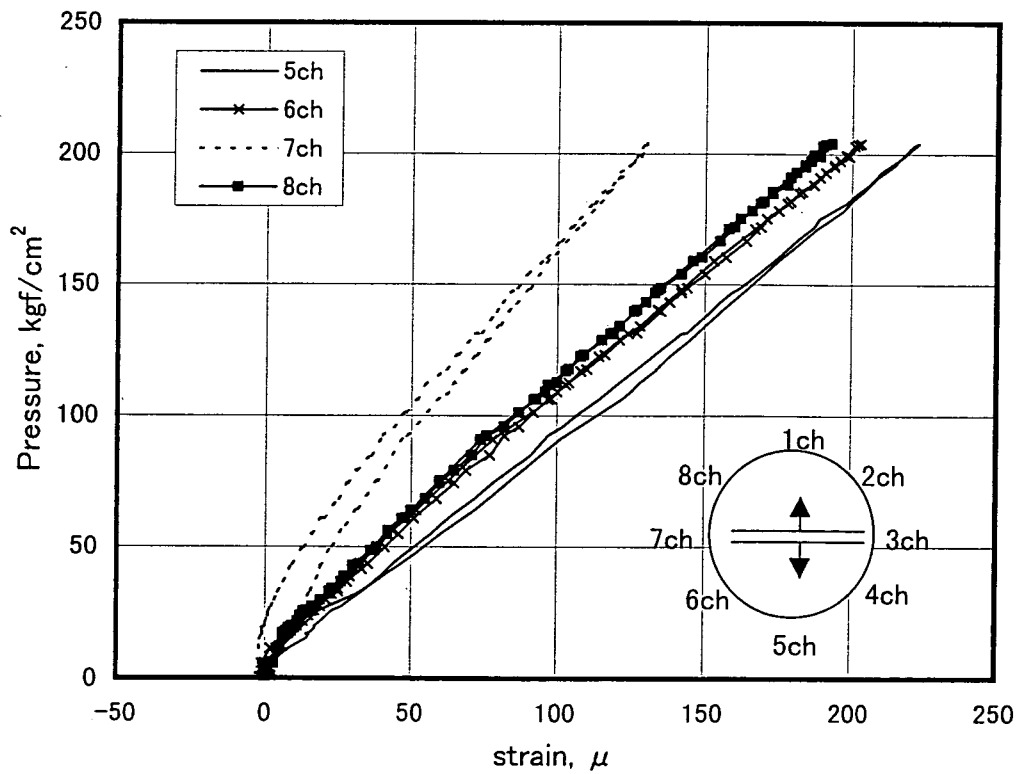


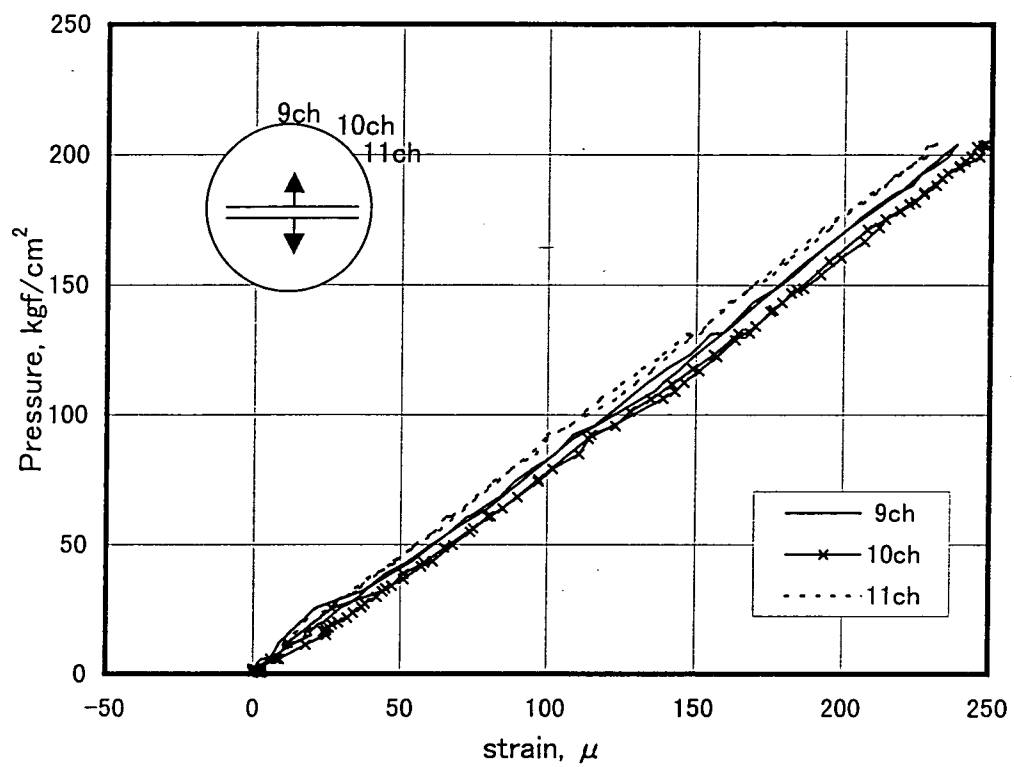
図3.2.1(f). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt1 19~22ch)



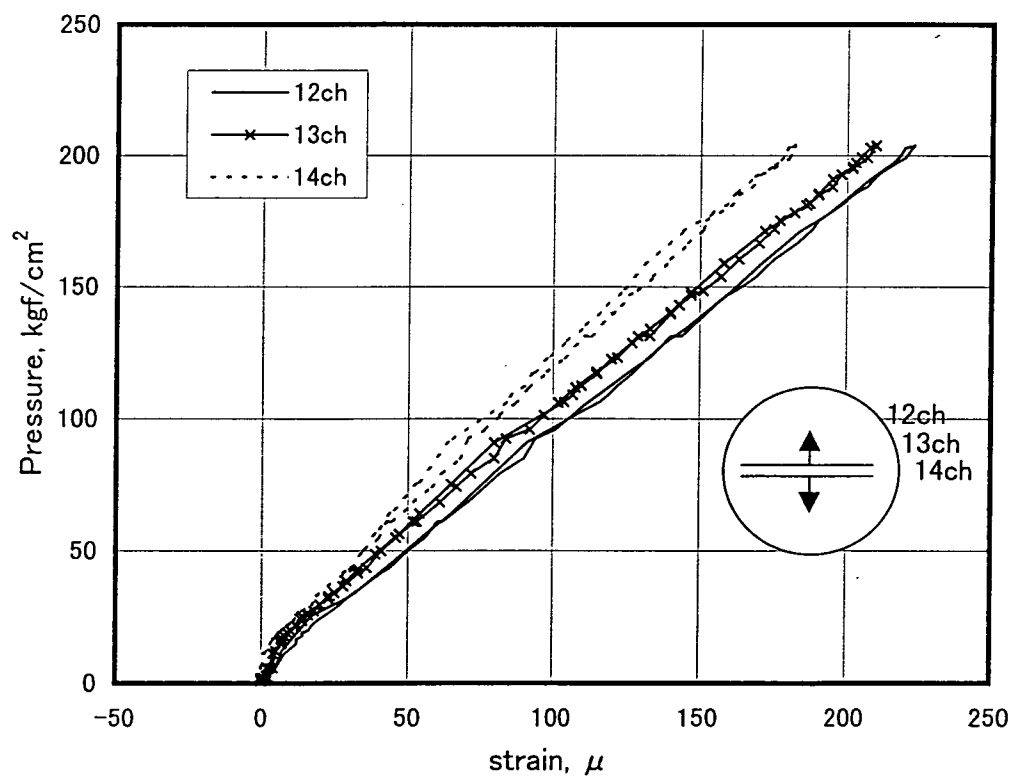
3.2.2(a). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt2 1~4ch)



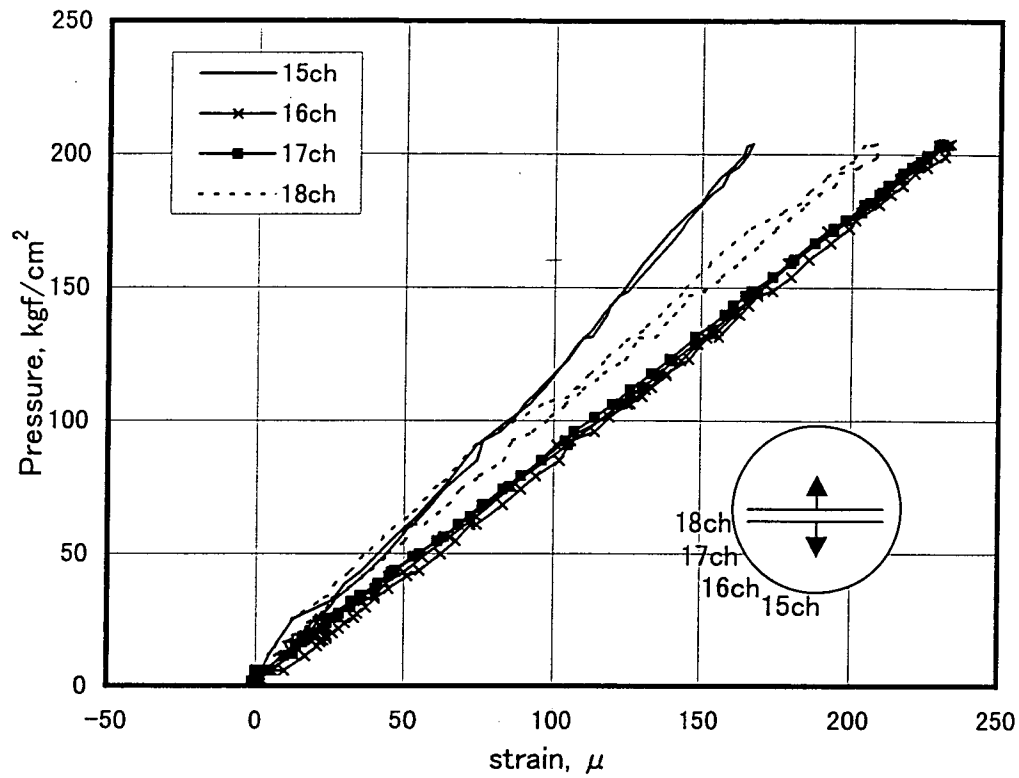
3.2.2(b). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt2 5~8ch)



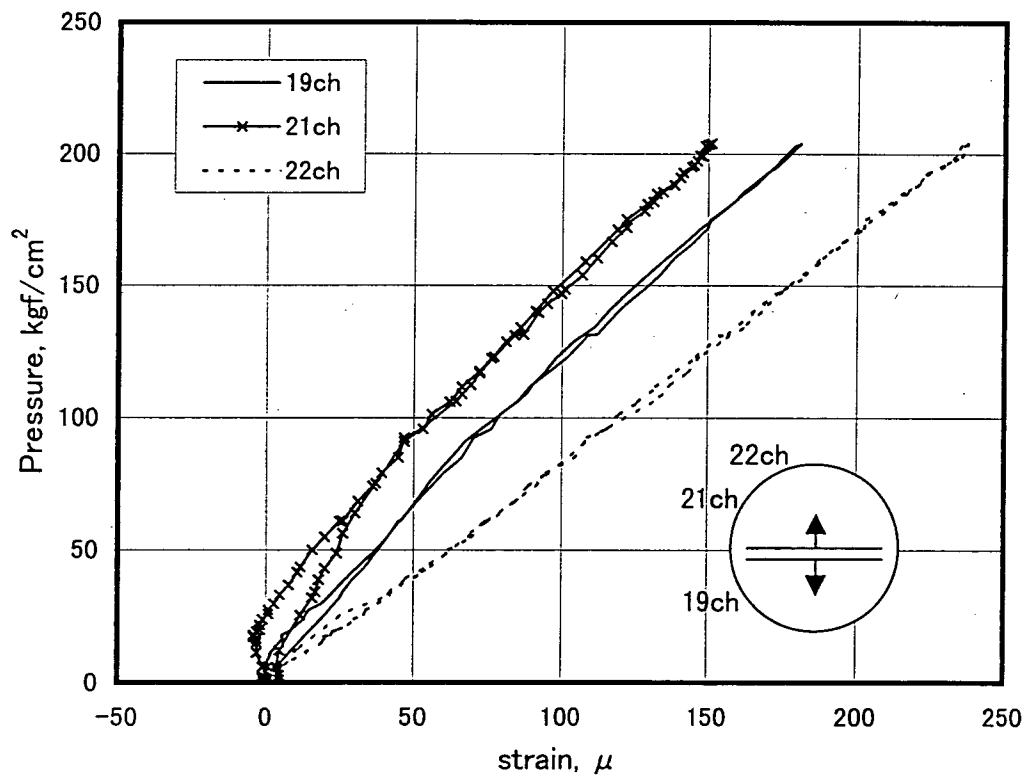
3.2.2(c). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt2 9,10,11ch)



3.2.2(d). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt2 12,13,14ch)



3.2.2(e). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt2 15,16,17,18ch)



3.2.2(f). 鋼管載荷試験ひずみ計測結果 (Pt2 19~22ch)

3.3. 鋼管内載荷試験のシミュレーション

境界要素法を用いた数値解析により載荷試験のシミュレーションを行った。数値解析に供したモデルは以下に示す通りである。

3.3.1. 鋼管内載荷モデル

図 3.3.1. に解析モデルを示す。図に示すように、同心円上の二つの境界の局所座標系において、鋼管の外周では時計回り方向（ n ）が正であり、鋼管の内周では反時計回り方向（ s ）が正である。したがって要素番号は内周境界については反時計まわりに、外周境界については時計まわりになっている。また、引張を正とすれば図中の矢印で示される方向の直応力、せん断応力が正であるが、ここではすべて逆向きの応力を正とする。すなわち引張を負とし、第一象限の内周境界に対して反時計まわりの方向に作用するせん断応力（本来は正）を負とする。内周境界、外周境界ともに 72 分割されている。境界要素法による解析手法は仮想応力法（Fictitious Stress Method, 以後 F S M 法と呼ぶことにする）による間接法である。仮想応力法は無限媒体中のある面に表面力を作用させることにより、その面において応力不連続をもたらすので、応力不連続法（Stress Discontinuity Method）とも呼ばれている。モデルの寸法、境界条件はつぎの通りである。

○外周境界の半径 b と内周境界の半径 a との比： 65/89

この比は、実際に使用した鋼管の寸法を参考に設定している。

○内周境界に一定の流体圧 p_i を作用させると同時に次式で与えられるせん断応力 p_s を作用させる。

$$p_s = -\alpha p_i \cos^2 \theta \quad (\pi/36 \leq \theta \leq 35\pi/36)$$

$$p_s = \alpha p_i \cos^2 \theta \quad (37\pi/36 \leq \theta \leq 71\pi/36)$$

ただし、鋼管外周境界の $\theta = \frac{\pi}{2}$ における接線応力と $\theta = 0$ における接線応力との

比 $(\sigma_\theta)_{\pi/2} / (\sigma_\theta)_0$ が計測されたひずみから応力に換算して求められた比と同じになる

ように、 $\alpha = 1.006$ とした。

圧縮を正とするとき、上式で与えられるせん断応力（内周境界に載荷）の符号はつぎの通りである。また、図 3.3.2. に内周境界に載荷したせん断応力分布を示す。

第 1 象限で負（反時計まわり）

第 2 象限で正（時計まわり）

第 3 象限で負（反時計まわり）

第 4 象限で正（時計まわり）

このモデルに対する厳密解はない。

3.3.2. 解析結果

解析結果を図 3.3.3. に示す。同図 (a) はモデルの外周境界上および内周境界上の σ_θ 分布を示す。同図 (b) は図中に示されている三つの r 断面上の各 7 点の σ_θ 分布を示している。

表 3.3.1 は鋼管内載荷試験結果、すなわち鋼管外周ひずみと載荷圧との関係（図 3.2.1.、図 3.2.2.）から最大載荷点での傾き（ひずみと載荷圧との比）を求めたものである。この表には、本実験結果と共に昨年度行った鋼管内載荷試験の結果も示す。昨年度行った鋼管内載荷試験では、最大載荷圧を 300kgf/cm^2 または 400kgf/cm^2 としており、本年度の最大載荷圧よりも大きい。しかし、ひずみと載荷圧との比を見ると、昨年度の試験結果とほぼ等しくなっており、昨年度の試験を再現していると思われる。

この表を見ると、 $\theta=0$ （内周境界が直接ウレタン樹脂と接する部分から延長した断面）付近におけるひずみがとくに小さくなっている。 $\theta=\pi/2$ におけるひずみの平均値と $\theta=0$ におけるひずみの平均値との比は 1.78 である。図 3.3.2(a) の黒丸印をみると、解析から得られた応力の比もほぼ同じ (1.65) であること、及び実測値が解析結果よりも一様に小さいことが分かる。実測値が解析結果よりも小さいのは、実際に孔壁に作用する圧力が計測している圧力よりも小さいということが考えられる。

図 3.3.3(a). でひずみから求めた応力の実測値と解析結果とを比較すると、実測値にはややばらつきがあるものの、 $\theta=0$ と $\pi/2$ の付近で σ_θ の変化量が少なく、 $\theta=\pi/4$ 付近で変化量が大きくなる傾向はシミュレーションと一致している。これは本試験に使用した乾式破碎装置が理論通りの挙動をしていることを示すものと思われる。

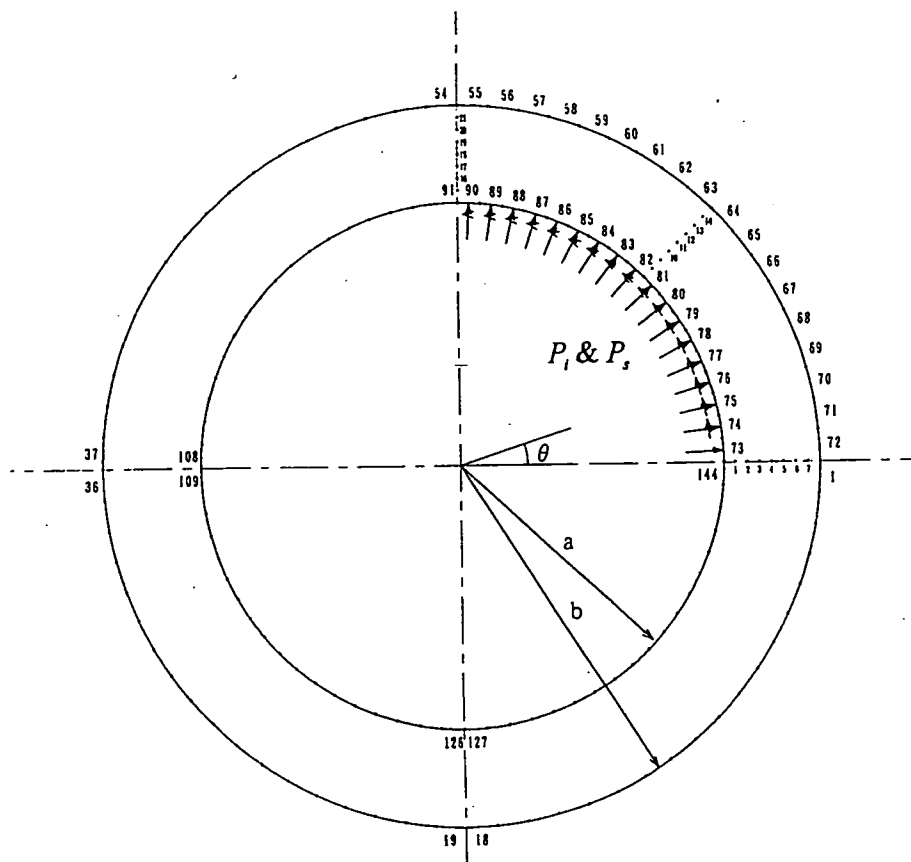


図 3.3.1 解析モデル

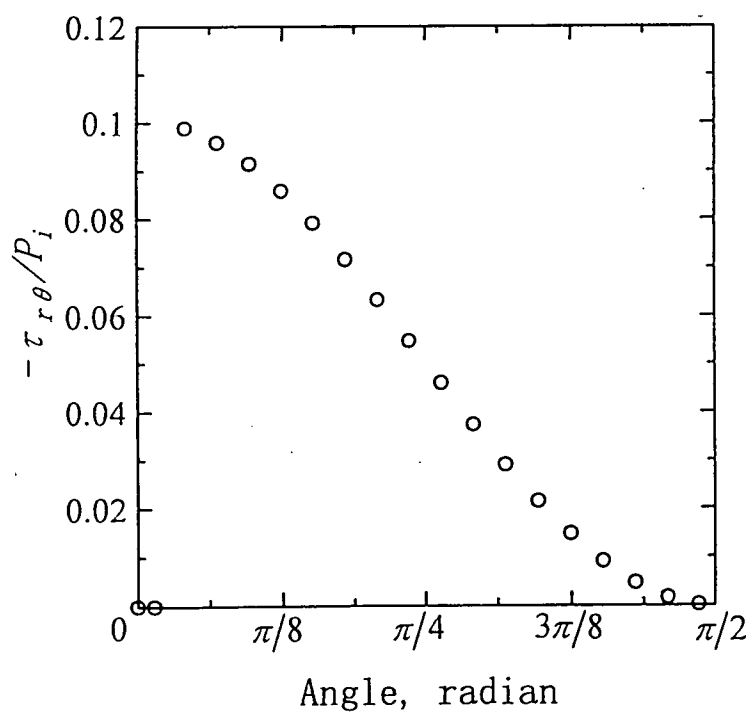


図 3.3.2. 鋼管内周境界に載荷したせん断応力分布

表3.3.1 鋼管内載荷試験から得られた
(鋼管外周ひずみ/載荷圧) 比

試験名	載荷圧 P _i , kgf/cm ²	(ε _θ) / P _i × 10 ⁻⁶ kgf/cm ²									
		0	π/16	π/8	3π/16	π/4	5π/16	3π/8	7π/16	π/2	
P t 1	204.5	0.655	0.650	0.714	0.870	0.983	0.968	1.061	1.095	1.124	
		0.631	0.430	0.763	0.939	1.036	1.032	1.203		1.159	
P t 2	203.9	0.637	0.892	1.030	1.093	0.946	1.133	1.216	1.167	1.133	
		0.608		0.888	1.020	1.025	1.128	1.142	0.819	1.093	
平均 σ _θ /P _i *		0.633	0.658	0.826	0.981	0.999	1.065	1.152	1.027	1.127	
		1.329	1.381	1.734	2.059	2.099	2.237	2.420	2.157	2.367	
前年度平均 σ _θ /P _i *		0.699	-	-	-	1.026	-	-	-	1.075	
		1.468	-	-	-	2.154	-	-	-	2.257	

* $E=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

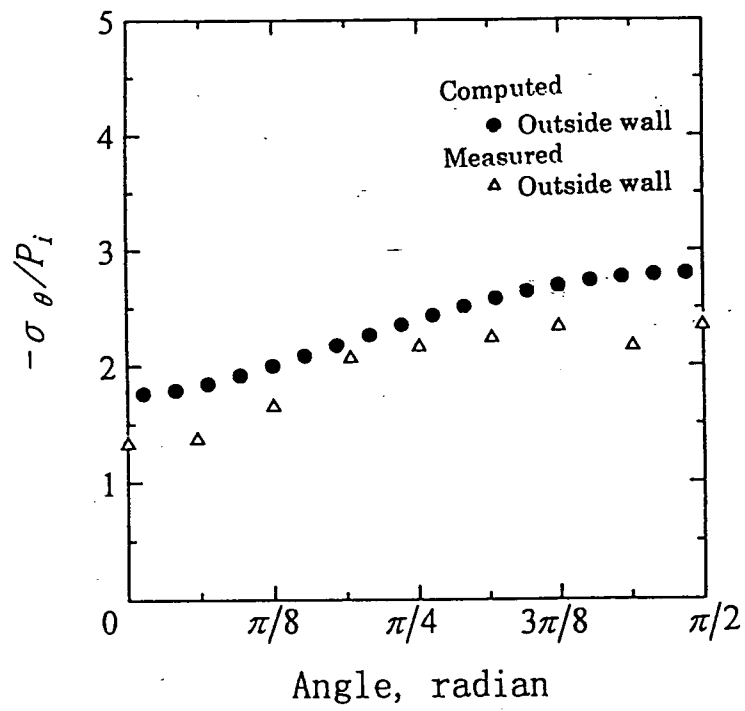


図 3.3.3(a). 解析結果(鋼管表面の σ_θ の分布
: 実測値とシミュレーション結果との比較)

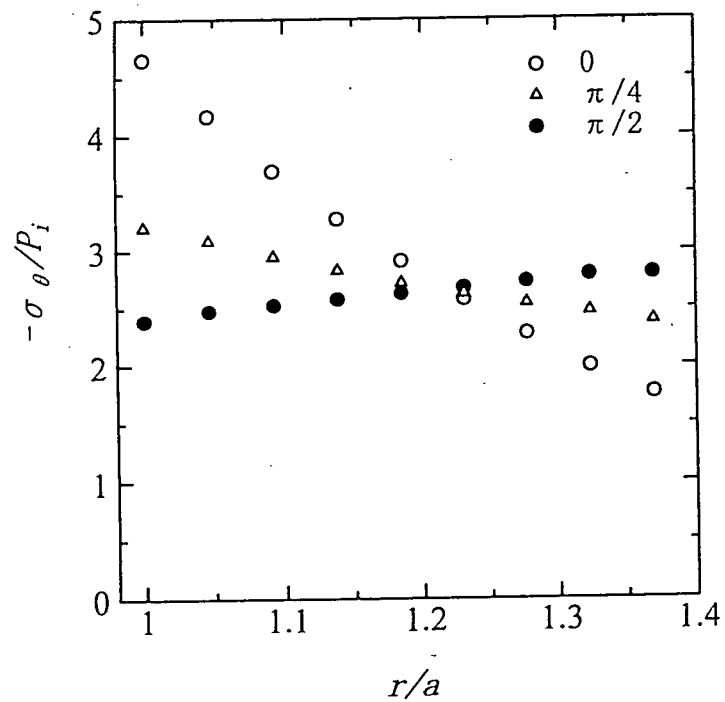


図 3.3.3(b). 解析結果(3方向のr断面上における σ_θ の分布)

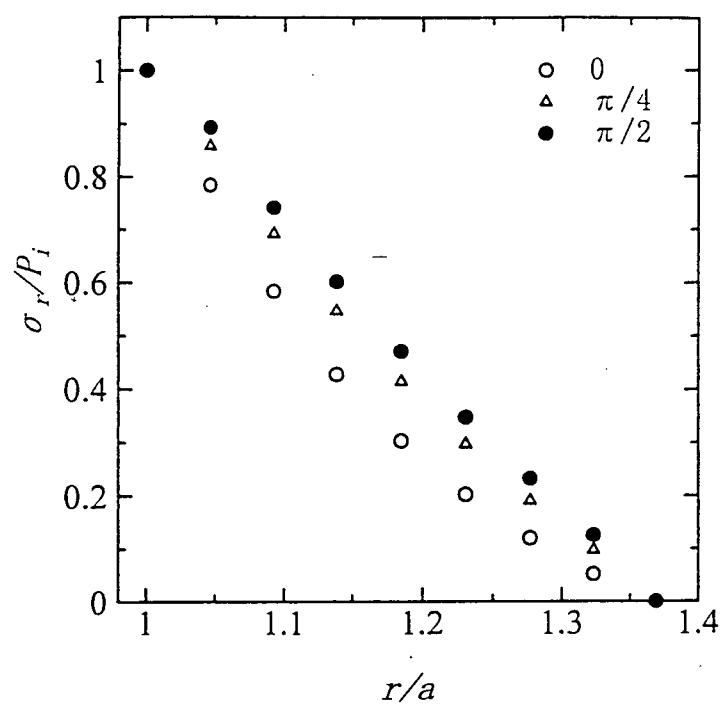


図 3.3.3(c). 解析結果(3方向の r 断面上における σ_r の分布)

4. 室内破砕試験

4.1. 載荷試験装置

本試験で使用した載荷試験装置は、昨年度の室内破砕試験に使用したのと同じ装置である。この装置では2方向の主応力をモルタル供試体で再現するために、図4.1.1.に示すような反力壁と4枚のフラットジャッキを準備し、異なる2系統の油圧系統を有している。載荷は、鉛直方向と水平方向の2方向であり、最大載加圧能力は 150kgf/cm^2 である。載荷時には供試体表面に偏圧がかからず、均等に載荷圧が分布するように供試体とフラットジャッキの隙間には石膏を流し込み充填した。また除荷時には高圧微調整バルブを用いならかに除荷できるようにした。

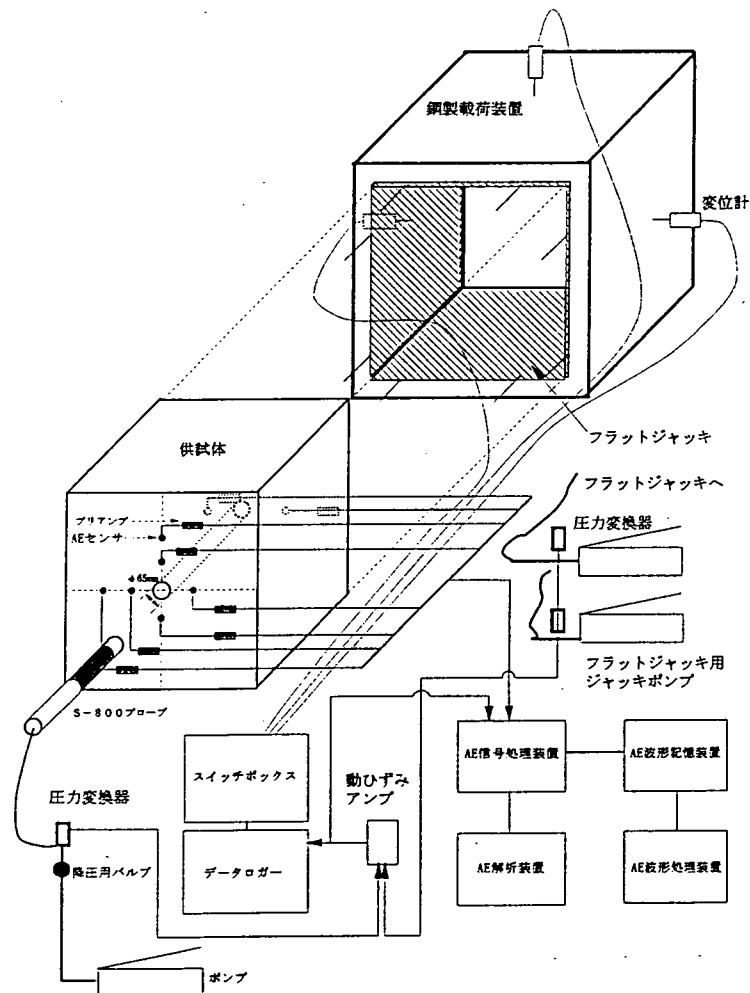


図 4.1.1 室内検証試験装置概念図

4.2. 供試体

本報の試験に使用した2つの供試体の大きさは、いずれも一辺 60 cmの立方体である。室内試験で用いる2つのモルタル供試体は、物性が異なるように、表 4.2.1 に示す配合を設定した。使用したセメントはいずれも早強セメントである。なお、細骨材については、最大 5.0mm のものを用いた。平均強度は供試体 1 が、7 日強度で 656 kgf/cm²、24 日強度で 770kgf/cm² であり、供試体 2 が、7 日強度で 764 kgf/cm²、21 日強度で 891kgf/cm² である。

表 4.2.1 供試体の配合表

供試体	セメント:砂	W/c	C	W	S
		%	kg		
供試体1	1 : 2	43.0	650	280	1301
供試体2	1 : 1	33.8	948	320	948

供試体の中央には、φ 64 mmの乾式多面破碎試験装置 (S-800 プローブ) 挿入用の円孔を施している。なお、この円孔は、供試体の穿孔等による円孔周辺の破損をなくするため、モルタル打設時に型枠により作成した。

亀裂の挙動および供試体自体の変化を観察するため、反力枠に変位計を合計で3個設置して載荷試験を行った。内圧の載荷圧とこれに伴う亀裂進展の経時変化の観測は、載荷圧と供試体表面での変位計による挙動観測は計測システムが異なるため、観測開始時に2つの計測システムが同時に観測を始められるよう声を掛けて観測を開始した。

本試験における供試体形状変化および計測フロー図は図 4.2.1 に示したとおりであり、計測機器一覧表は表 4.2.2 に示す。

表 4.2.2 計測機器一覧表

使用機器	機器型番	個数	概略仕様
データロガー	TDS-601	1	測定スピード1点あたり0.08 秒 測定最大点数 1000 点 3.5 インチ FDドライブ2基内蔵
スイッチボックス	ASW-30B	1	測定点数 30点
動ひずみ測定器	DPM-601A	3	測定点数 1点

4.3. AE 計測システム

亀裂の発生、再開口圧力を検知するための補助的な装置として、本報では AE センサーを図 4.3.1 に示すようにボアホールの周辺に表裏合計で 8 個配置した。この時使用した AE センサーは共振周波数 70kHz、直径 20 mm、長さ 26 mm の圧電型センサーである。使用したセンサーは瞬間接着剤を用いて供試体に接着した。図 4.3.2. には AE 計測システムを示し、表 4.3.1. にはシステムの仕様と設定値を示す。

表 4.3.1. AE 計測システムの仕様と設定値

名 称	仕 様	品 名	数 量	設 定 値
AE センサ	・共振周波数 70kHz	㈱富士セラミック製 AE703SW-GAMP-0542	8個	—
プリアンプ	・増幅度 40dB	㈱富士セラミック製 LN-043	8台	30dB
シグナルコンディショナ	・周波数帯域 100kHz~2MHz ・増幅度 0~60dB	㈱昭和電気研究所 製 NAIS-5000	1台	40dB
ウェーブメモリ	・サンプリングタイム 0.1μ秒~2μ秒 ・波形記録長 1,2,4,8kwords ・プレトリガ 波形記録長の 1/8,1/4,1/2	(株)オートニクス APC-5108	1台	・サンプリングタイム 1μ秒 ・波形記録長 1kwords ・プレトリガ 1/4
デジタルオシロスコープ(4ch 用)	・分解能 8bit ・周波数帯域 DC~150MHz	㈱横河電機社 製 DL2100	1台	—
AE 解析装置	・PC9801BX2	NEC 製	1台	—
AE 波形処理装置	・PC9801BA2	NEC 製	1台	—

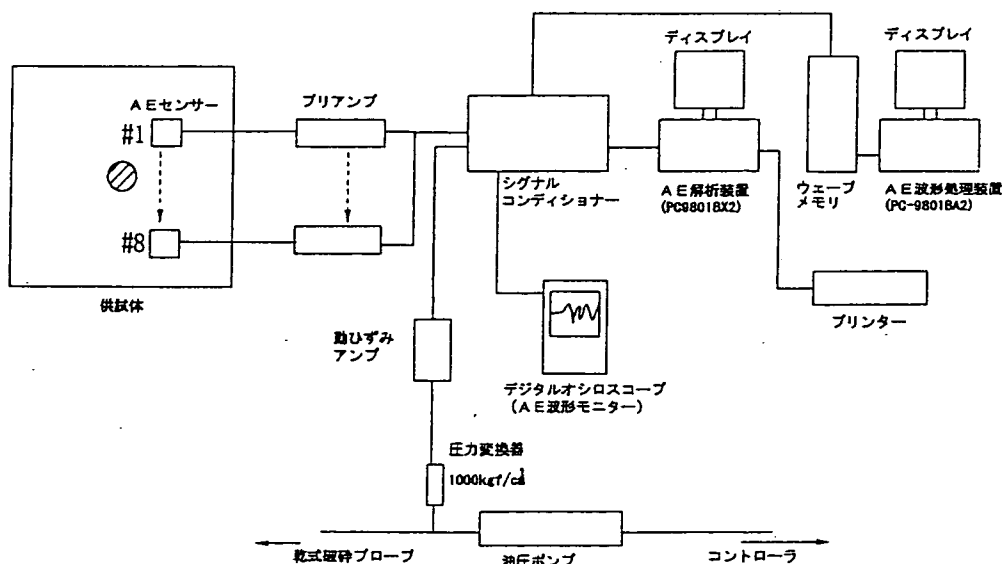


図 4.3.1. AE 計測システム図

4. 4. 試験条件

(1) 拘束圧載荷条件

供試体を用いた室内試験では、鋼板型摩擦シェルを用いて既存の亀裂がある状態でも任意の方向に亀裂を作成できることの確認、亀裂再開口時の圧力-変位曲線の再現性の確認、および実験から得られる圧力-変位曲線によって求められた折れ点圧力と理論式から得られる亀裂開口圧力との関係を明らかにするため、主応力比を一定に保ちながら拘束圧を数種類変化させた。また亀裂の発生方向は、2つの供試体それぞれで3方向にすることとした。本報の理論値の算出に使用した理論式は前述の Kirsch の式である。

拘束圧載荷圧力は、水平方向応力と鉛直方向応力の比が1 : 1または3 : 2となるように、載荷ジャッキの能力(最大 150kgf/cm²)等を考慮して、最大で 150kgf/cm²とした。亀裂の発生方向は、水平面から時計回りに第1供試体では25°、135° および60°、第2供試体では115°、45°、150°となるようにした。各載荷試験での供試体拘束圧と亀裂発生角度を表4.4.1.に示す。

なお、供試体を使用する載荷試験を行う前には、予備載荷として鋼管内での繰り返し載荷試験を行い、載荷に対するプローブの挙動が安定したのを確認した後、供試体内で試験を行っている。

表4. 4. 1 (a). 供試体拘束圧载荷条件

		実験内容	载荷回数	水平応力 (kgf/cm ²)	垂直応力 (kgf/cm ²)	亀裂発生角度 (水平から) (°)	折れ点圧力 (理論値) (kgf/cm ²)
第 1 亀 裂	等 圧 載 荷	破 碎	1	30	30	25	
		再 開 口	3	30	30	//	60
		//	2	60	60	//	120
		//	2	90	90	//	180
		//	2	120	120	//	240
		//	1	150	150	//	300
	偏 圧 載 荷	//	3	45	30	//	56
		//	2	75	50	//	93
		//	2	105	70	//	130
		//	2	135	90	//	167
第 2 亀 裂	等 圧 載 荷	破 碎	1	30	30	135	
		再 開 口	4	30	30	//	60
		//	2	60	60	//	120
		//	2	90	90	//	180
		//	2	120	120	//	240
	偏 圧 載 荷	//	2	45	30	//	75
		//	2	75	50	//	125
		//	2	105	70	//	175
		//	2	135	90	//	225
第 3 亀 裂	等 圧 載 荷	破 碎	1	30	30	60	
		再 開 口	2	30	30	//	60
		//	2	60	60	//	120
		//	2	90	90	//	180
		//	3	120	120	//	240
	偏 圧 載 荷	//	2	45	30	//	90
		//	1	75	50	//	150
		//	1	105	70	//	210
		//	1	135	90	//	270

表4.4.1(b). 供試体拘束圧載荷条件

		実験内容	載荷回数	水平応力 (kgf/cm ²)	垂直応力 (kgf/cm ²)	亀裂発生角度 (水平から) (°)	折れ点圧力 (理論値) (kgf/cm ²)
第 1 亀 裂	偏 圧 載 荷	破 砕	1	135	90	115	
		再 開 口	2	135	90	〃	283
		〃	3	105	70	〃	220
		〃	3	75	50	〃	157
		〃	3	45	30	〃	94
	等 圧 載 荷	〃	3	30	30	〃	60
		〃	3	60	60	〃	120
		〃	3	90	90	〃	180
		〃	3	120	120	〃	240
		〃	2	150	150	〃	300
第 2 亀 裂	偏 圧 載 荷	破 砕	1	45	30	45	
		再 開 口	2	45	30	〃	75
		〃	2	75	50	〃	125
		〃	2	105	70	〃	175
		〃	2	135	90	〃	225
	等 圧 載 荷	〃	2	150	150	〃	300
		〃	2	120	120	〃	240
		〃	2	90	90	〃	180
		〃	2	60	60	〃	120
		〃	2	30	30	〃	60
第 3 亀 裂	偏 圧 載 荷	破 砕	1	45	30	150	
		再 開 口	2	45	30	〃	60
		〃	3	75	50	〃	100
		〃	2	105	70	〃	140
		〃	3	135	90	〃	180
	等 圧 載 荷	〃	2	150	150	〃	300
		〃	2	120	120	〃	240
		〃	2	90	90	〃	180
		〃	2	60	60	〃	120
		〃	2	30	30	〃	60

(2) 試験手順

供試体を使用する場合の試験手順を以下に示す。

- ① 载荷治具へ供試体を設置する。設置に当たっては、石膏により供試体とフラットジャッキとの隙間を充填する。
- ② 各機器の動作確認、供試体測定 AE 計器の作動確認をし、载荷圧、载荷装置の変位および AE データの計測記録確認を実施する。
- ③ 载荷装置のハンドポンプにより所定の拘束圧までフラットジャッキを加圧し、供試体を静かに载荷する。この時、载荷装置に大きなひずみが発生していないか確認する。
- ④ S-800 プロブの载荷部を供試体の中央に設置する。
- ⑤ S-800 の電動ポンプによりプロブの载荷部が鋼管内壁に密着するまで静かに载荷する。
- ⑥ スタートの合図と共に、S-800 の圧力、孔径変位および AE の計測の計測を開始する。電動ポンプにより S-800 プロブに内圧を負荷する。
- ⑦ 応力-孔径変位の関係をモニターしながら完全な折れ点を認めると S-800 の内圧を除荷する。
- ⑧ ⑤⑥と同じ手順で再载荷し、亀裂を再開口させる。
- ⑨ (一度拘束圧を除荷させる場合には③の作業が必要)
- ⑩ 試験終了

4.5. 試験結果

図 4.5.1. ～図 4.5.70. に载荷条件毎の圧力-変位曲線の結果を示し、これらの図から読みとった折れ点の圧力は、理論値から求めた折れ点の圧力と共にまとめて表 4.5.1. に示す。各試験において複数回の载荷を行ったときの折れ点圧力は、最後の载荷で得られた折れ点圧力を示した。直径変形は図 2.1.1 に示したように Ch.1 と Ch.2 の 2 カ所で計測しているため、それぞれの図(a)には Ch.1 の結果を、図(b)には Ch.2 の結果を示す。また、図中には载荷条件と载荷方向、および折れ点圧力を併せて記述した。

ここでの得られた折れ点は、圧力-変位曲線の下部の直線的変形部分を上方に延長したときに直線から離脱する点とした。

鋼管内予備载荷試験結果(図 4.5.1.、図 4.5.2.)を見ると、いずれの試験でも繰り返しの载荷試験から得られる圧力-変位曲線はほぼ同じであることが分かる。図 4.5.71. は昨年度の試験で得られた圧力-変位曲線であり、両者を比較すると、このことはより明確になる。昨年度使用したプロブでは、圧力-時間曲線の履歴が同じになるまで、3 回程度の载荷を要していることから、実際の試験でも同一条件下で 3 回程度の载荷が必要になる。これに対し、本試験で使用したプロブによる载荷時の圧力-時間曲線は 1 回目から

殆ど変化がないことから、供試体を用いた試験を行うにあたり、多くの繰り返し载荷を必要としないと思われる。実際の供試体を用いた繰り返し载荷試験でも、表 4.5.1(a) 中にある同一拘束条件下の折れ点圧力（例えば試験名 111s8-1～3、112s8-1 と 2、113s8-1 と 2 および 114s8-1 と 2）を比較しても繰り返すごとの折れ点圧力の変化は少ない。

図 4.5.10. ～4.5.70. を見ると、圧力-変位曲線は、明確ではないが直線的な関係から上に凸の曲線へと変わる箇所（折れ点）のあることが分かる。この点の圧力をここでは亀裂が再開口した圧力（実験値）としているが、圧力-変位曲線では低圧部に下に凸の曲線部がある。この部分は、プローブの外側の摩擦シェルが孔壁に接触した後、プローブの内部と摩擦シェルが一体化して動き出すまでに必要な载荷と思われる。そのため、拘束圧が小さく、圧力-変位曲線の折れ点が低圧となる場合には、下に凸の部分に含まれ、折れ点圧力を検出しづらくなる可能性がある。

図 4.5.10. ～4.5.70. の中で、亀裂の発生を含んだ図（図 4.5.10、24、44、53、62）を見ると、いずれの図も破砕時の折れ点圧力は、再開口時の折れ点圧力よりも大きく、亀裂の発生を推測できる。また、圧力-変位曲線から読みとった亀裂再開口時の折れ点圧力は、拘束圧の増加と共に再開口時の折れ点圧力も増加している。これは、観測孔周辺の応力状態と S-800 によって観測される亀裂の再開口圧力との間に何らかの関係があることを示唆している。

以上の試験で得られた圧力-変位曲線から求めた折れ点の圧力と、Kirsch の解から求めた折れ点の理論値の圧力とを比較するため、図 4.5.72. に相関図を示す。図 4.5.72. にプロットした点は、2つの供試体の結果全て（各载荷条件で1つ）であり、Ch 1, 2 両方ともに示している。供試体 1 と 2 は異なる物性をもつもので、発生させた亀裂の角度も異なる。しかし、図 4.5.72. から分かるように、Kirsch の解から求めた折れ点圧力の理論値と実験値との間には、ややばらつきがあるものの明確な線形関係がある。さらに昨年度は不明であった理論値が 150kgf/cm^2 以上の部分についても低圧部から同じ関係を持っていることが分かる。実測値と理論値との関係が明らかになったことから、本試験で得られた関係式と式（8）を用いて主応力の大きさと角度を求めることができる。

表4.5.1(a). S-800 載荷試験一覧 (供試体1)

実験内容	試験名	水平応力 (kgf/cm ²)	垂直応力 (水平から) (kgf/cm ²)	角度 - (°)	折れ点圧力			参照図
					実験値		理論値	
					Ch. 1 (kgf/cm ²)	Ch. 2 (kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	
予備載荷試験1(3回)	S800pt1	-	-	-	-	-	-	図4.5.1
予備載荷試験2(4回)	S800pt2	-	-	-	-	-	-	図4.5.2
予備載荷試験3(1回)	S800pt3	-	-	-	-	-	-	図4.5.3
予備載荷試験5(2回)	S800pt5	-	-	-	-	-	-	図4.5.4
予備載荷試験6(1回)	S800pt6	-	-	-	-	-	-	図4.5.5
予備載荷試験7(2回)	S800pt7	-	-	-	-	-	-	図4.5.6
予備載荷試験8(1回)	S800pt8	-	-	-	-	-	-	図4.5.7
予備載荷試験9(1回)	S800pt9	-	-	-	-	-	-	図4.5.8
予備載荷試験10(1回)	S800pt10	-	-	-	-	-	-	図4.5.9
破砕+再開口 (1回目)	111s8-1	30	30	25	145	148	-	図4.5.10
					104	96	60	
再開口 (2回目)	111s8-2	//	//	//	100	104	//	図4.5.11
再開口 (3回目)	111s8-3	//	//	//	91	100	//	図4.5.12
再開口 (1回目)	112s8-1	60	60	//	142	130	120	図4.5.13
再開口 (2回目)	112s8-2	//	//	//	142	133	//	図4.5.14
再開口 (1回目)	113s8-1	90	90	//	200	186	180	図4.5.15
再開口 (2回目)	113s8-2	//	//	//	193	194	//	図4.5.16
再開口 (1回目)	114s8-1	120	120	//	244	241	240	図4.5.17
再開口 (2回目)	114s8-2	//	//	//	244	237	//	図4.5.18
再開口 (1回目)	115s8-1	150	150	//	272	263	300	図4.5.19
再開口 (3回)	116s8-1	45	30	//	98	92	56	図4.5.20
再開口 (2回)	117s8-2	75	50	//	118	117	93	図4.5.21
再開口 (2回)	118s8-1	105	70	//	161	166	130	図4.5.22
再開口 (2回)	119s8-2	135	90	//	180	182	167	図4.5.23

表4.5.1(b). S-800 載荷試験一覧 (供試体1)

実験内容	試験名	水平応力 (kgf/cm ²)	垂直応力 (kgf/cm ²)	角度 (水平から) - (°)	折れ点圧力			参照図
					実験値		理論値	
					Ch. 1 (kgf/cm ²)	Ch. 2 (kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	
破砕+再開口(2回)	121s8-1	30	30	135	-	-	60	図4.5.24
再開口(2回)	121s8-2	30	30	//	109	115	60	図4.5.25
再開口(2回)	122s8-1	60	60	//	145	127	120	図4.5.26
再開口(2回)	123s8-1	90	90	//	194	216	180	図4.5.27
再開口(2回)	124s8-1	120	120	//	250	269	240	図4.5.28
再開口(2回)	126s8-1	45	30	//	112	106	75	図4.5.29
再開口(2回)	127s8-1	75	50	//	138	167	125	図4.5.30
再開口(2回)	128s8-1	105	70	//	168	197	175	図4.5.31
再開口(2回)	129s8-1	135	90	//	214	239	225	図4.5.32
破 砕	131s8-1	30	30	60	-	-	-	図4.5.33
再開口(2回)	131s8-2	30	30	//	100	113	60	図4.5.34
再開口(2回)	132s8-1	60	60	//	142	144	120	図4.5.35
再開口(2回)	133s8-1	90	90	//	190	205	180	図4.5.36
再開口(2回)	134s8-1	120	120	//	-	-	240	図4.5.37
再開口(1回)	134s8-2	120	120	//	238	225	240	図4.5.38
再開口(2回)	136s8-1	45	30	//	140	133	90	図4.5.39
再開口(1回)	137s8-1	75	50	//	198	175	150	図4.5.40
再開口(1回)	138s8-1	105	70	//	234	213	210	図4.5.41
再開口(1回)	139s8-1	135	90	//	268	255	270	図4.5.42

表4.5.1(c). S-800 載荷試験一覧 (供試体2)

実験内容	試験名	水平応力 (kgf/cm ²)	垂直応力 (kgf/cm ²)	角度 (水平から) — (°)	折れ点圧力			参照図
					実験値		理論値 (kgf/cm ²)	
					Ch. 1 (kgf/cm ²)	Ch. 2 (kgf/cm ²)		
予備載荷試験1(3回)	3S800pt1	—	—	—	—	—	—	図4. 5. 43
破砕＋再開口(2回)	219s8-1	135	90	115	294	278	283	図4. 5. 44
再開口(3回)	218s8-2	105	70	〃	231	250	220	図4. 5. 45
再開口(3回)	217s8-1	75	50	〃	166	175	157	図4. 5. 46
再開口(3回)	216s8-1	45	30	〃	131	117	94	図4. 5. 47
再開口(3回)	211s8-1	30	30	〃	64	92	60	図4. 5. 48
再開口(3回)	212s8-2	60	60	〃	124	124	120	図4. 5. 49
再開口(3回)	213s8-1	90	90	〃	206	200	180	図4. 5. 50
再開口(3回)	214s8-1	120	120	〃	252	259	240	図4. 5. 51
再開口(2回)	215s8-1	150	150	〃	287	320	300	図4. 5. 52
破砕＋再開口(2回)	226s8-1	45	30	45	119	105	75	図4. 5. 53
再開口(2回)	227s8-2	75	50	〃	173	151	125	図4. 5. 54
再開口(2回)	228s8-1	105	70	〃	209	188	175	図4. 5. 55
再開口(2回)	229s8-1	135	90	〃	269	247	225	図4. 5. 56
再開口(2回)	225s8-1	150	150	〃	309	314	300	図4. 5. 57
再開口(2回)	224s8-2	120	120	〃	266	266	240	図4. 5. 58
再開口(2回)	223s8-1	90	90	〃	202	214	180	図4. 5. 59
再開口(2回)	222s8-1	60	60	〃	155	142	120	図4. 5. 60
再開口(2回)	221s8-1	30	30	〃	102	90	60	図4. 5. 61

表4.5.1(d). S-800載荷試驗一覽(供試體2)

[illegible]

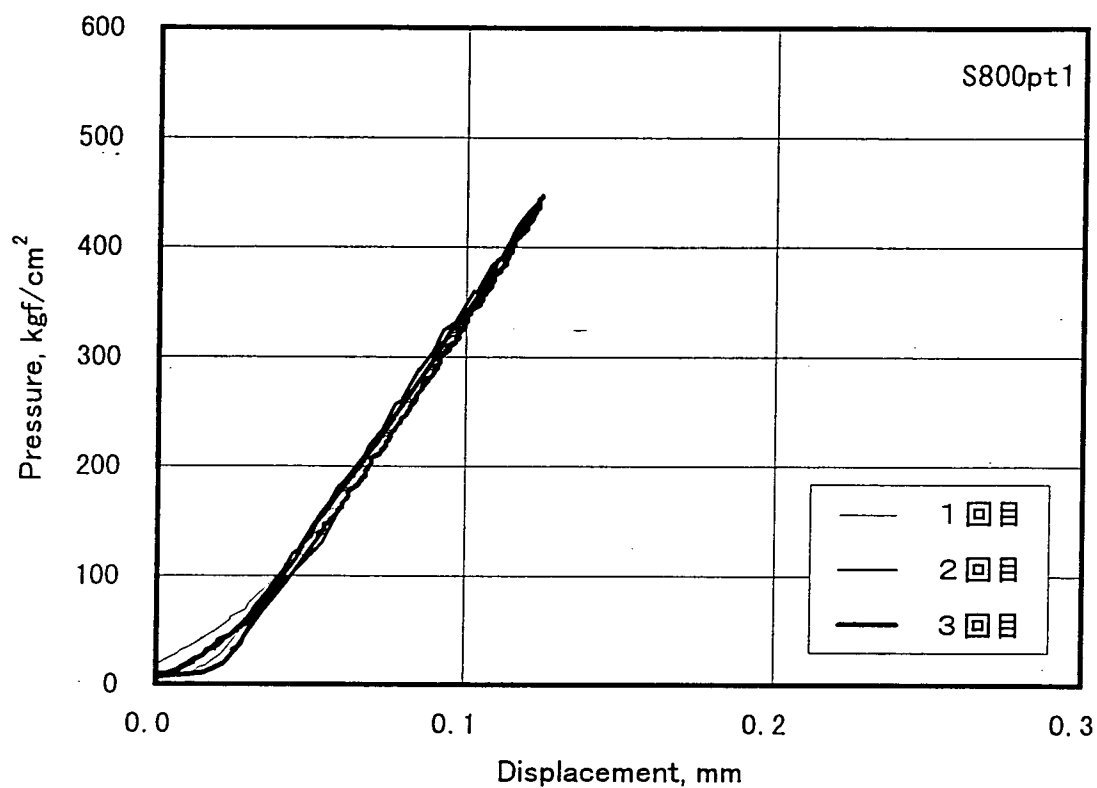


図4.5.1 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

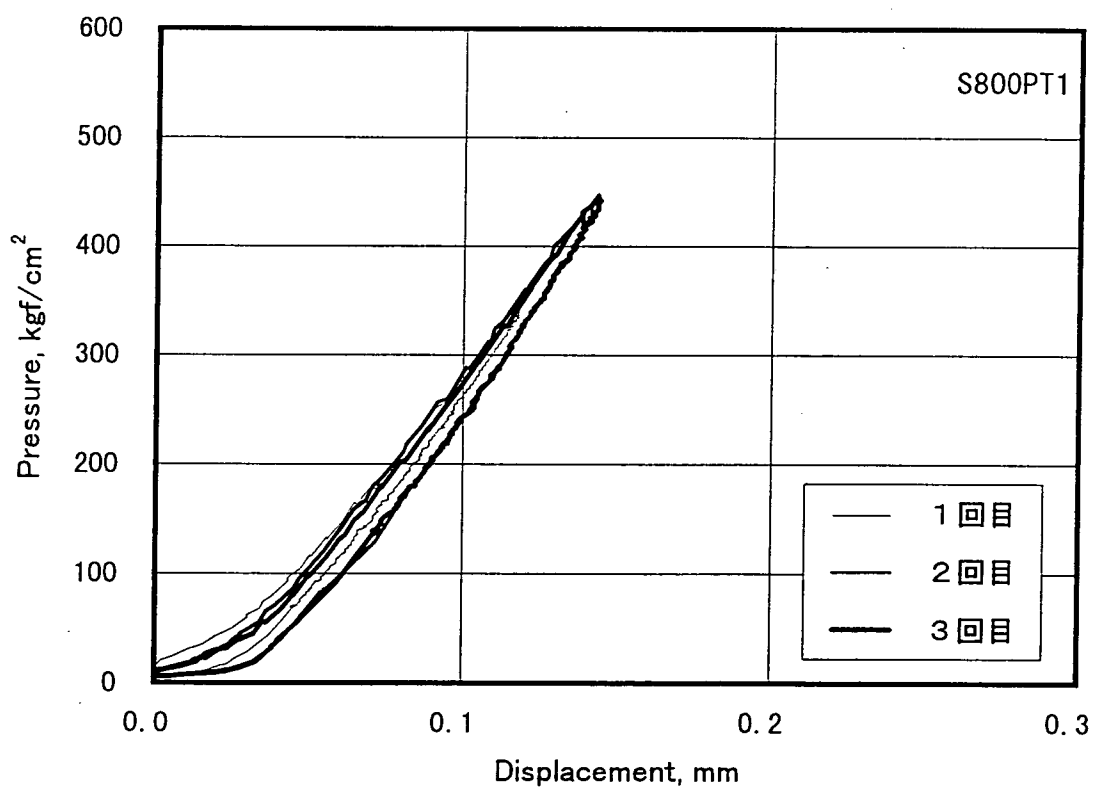


図4.5.1 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

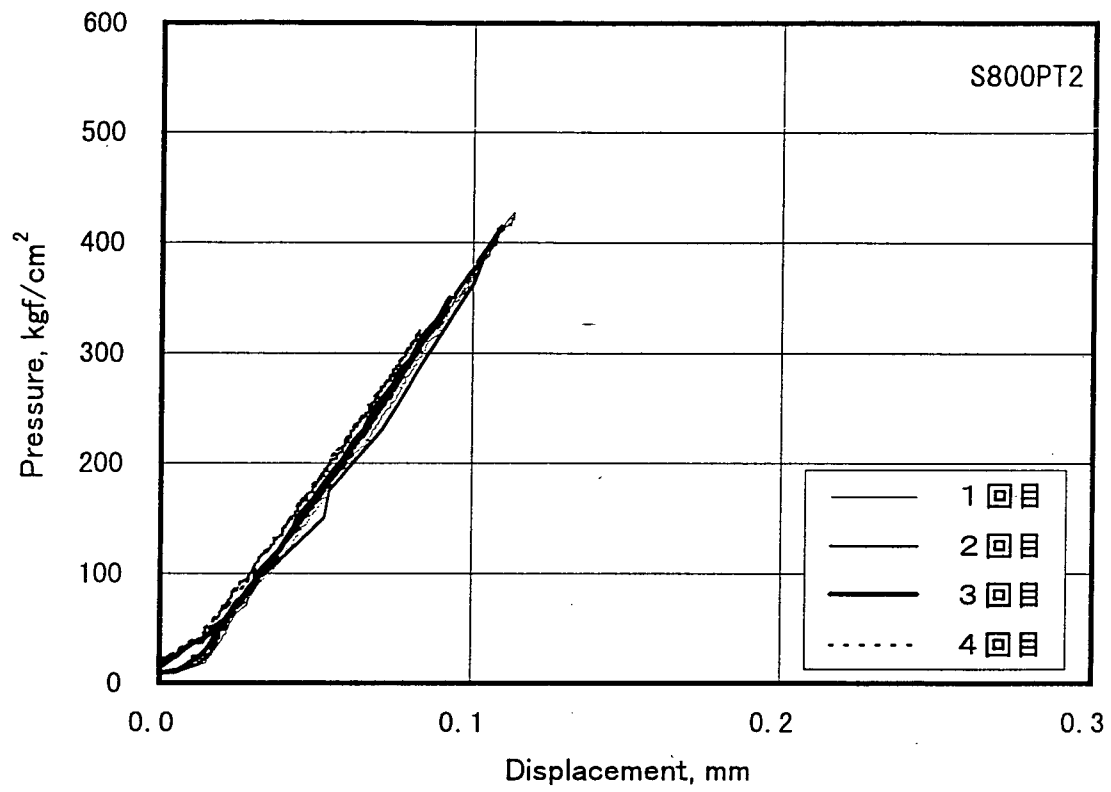


図4.5.2 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

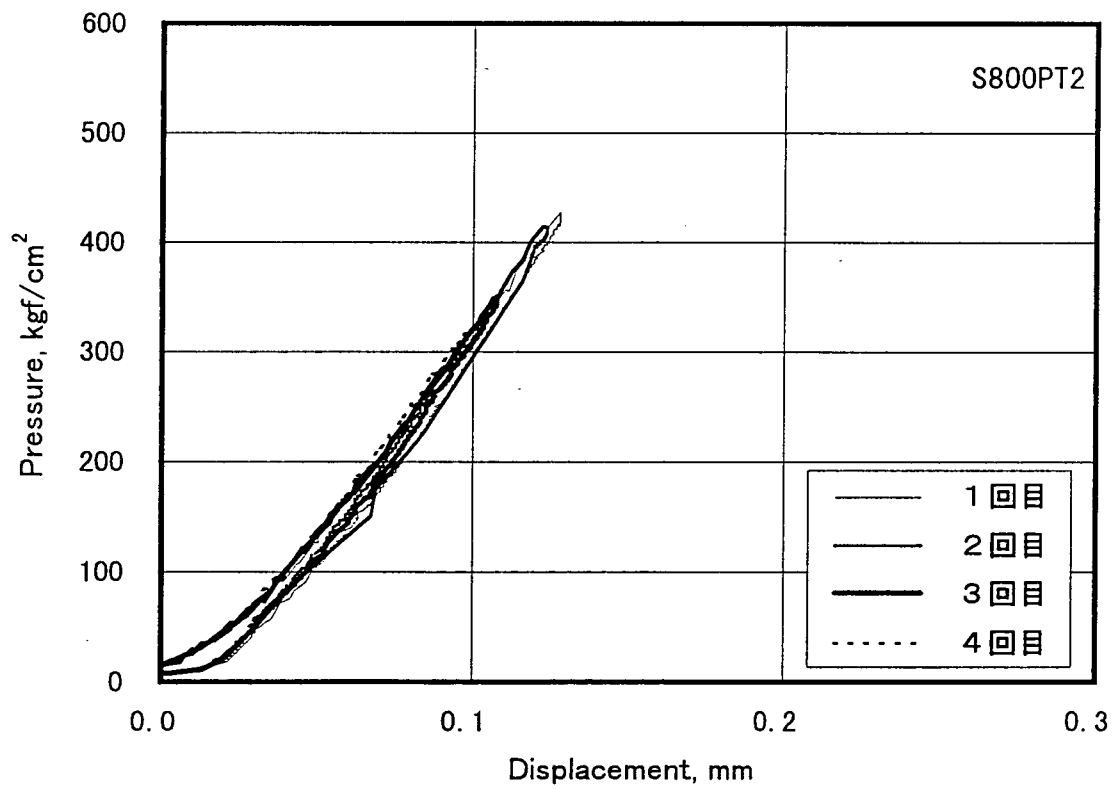


図4.5.2 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

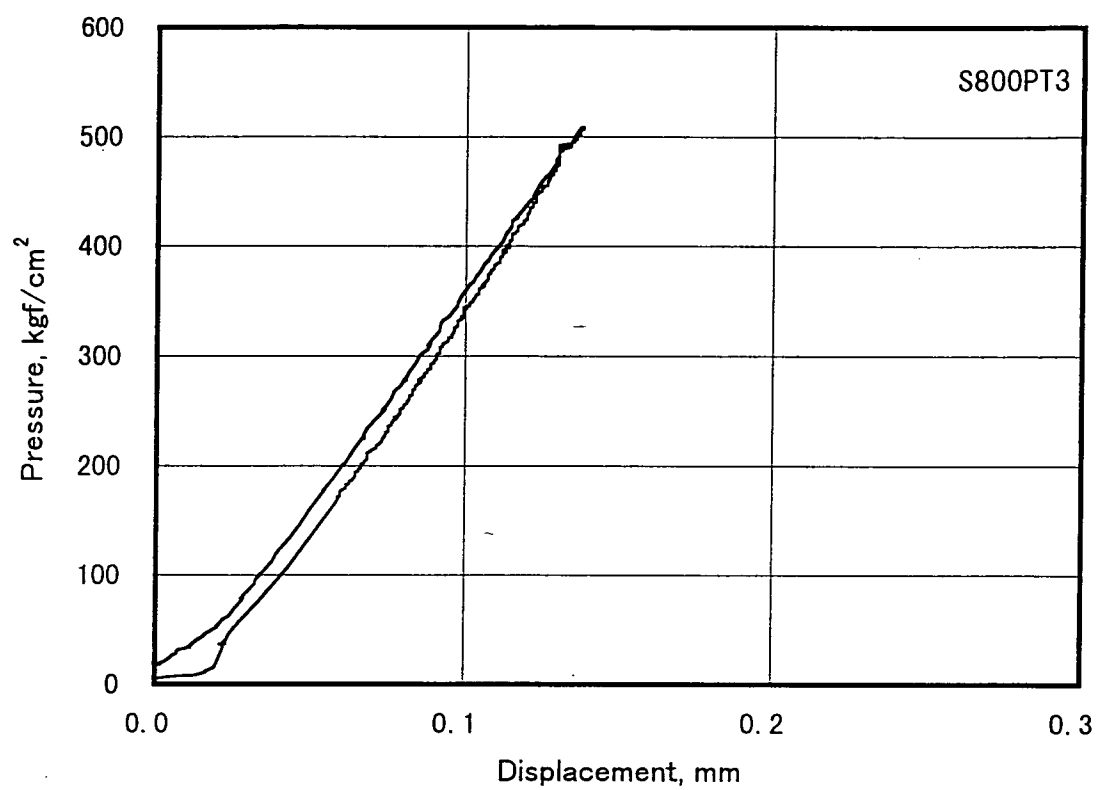


図4.5.3 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

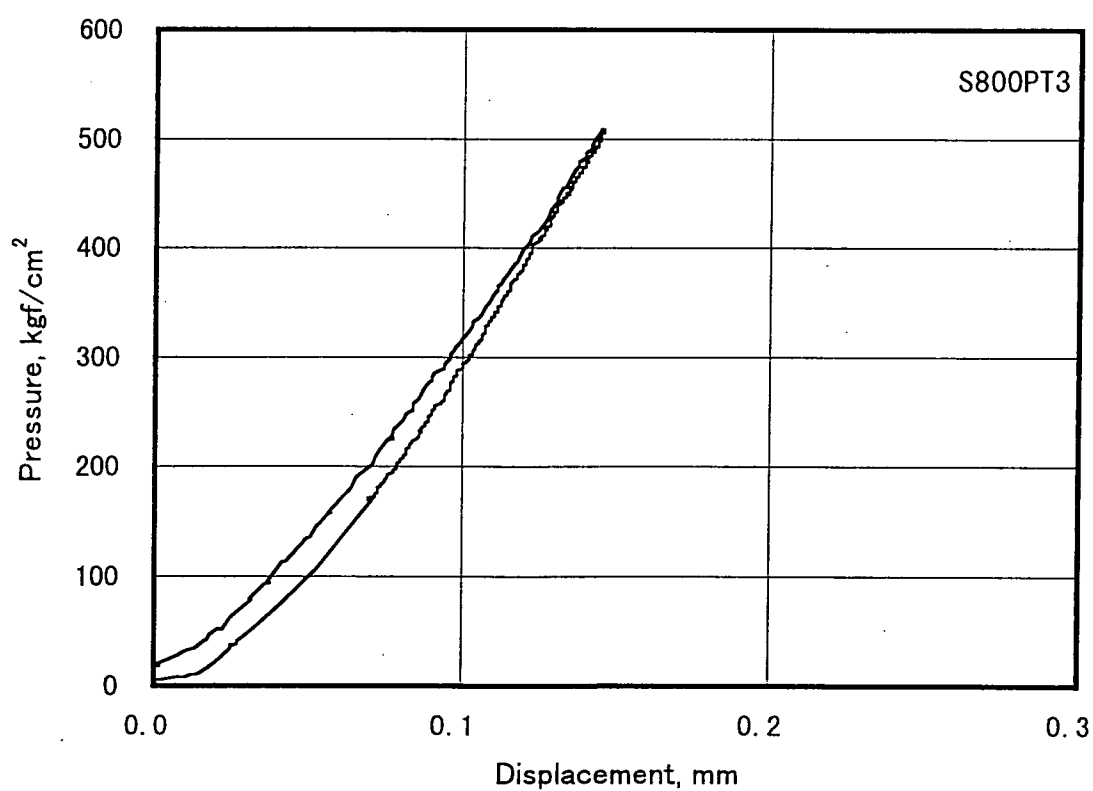


図4.5.3 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

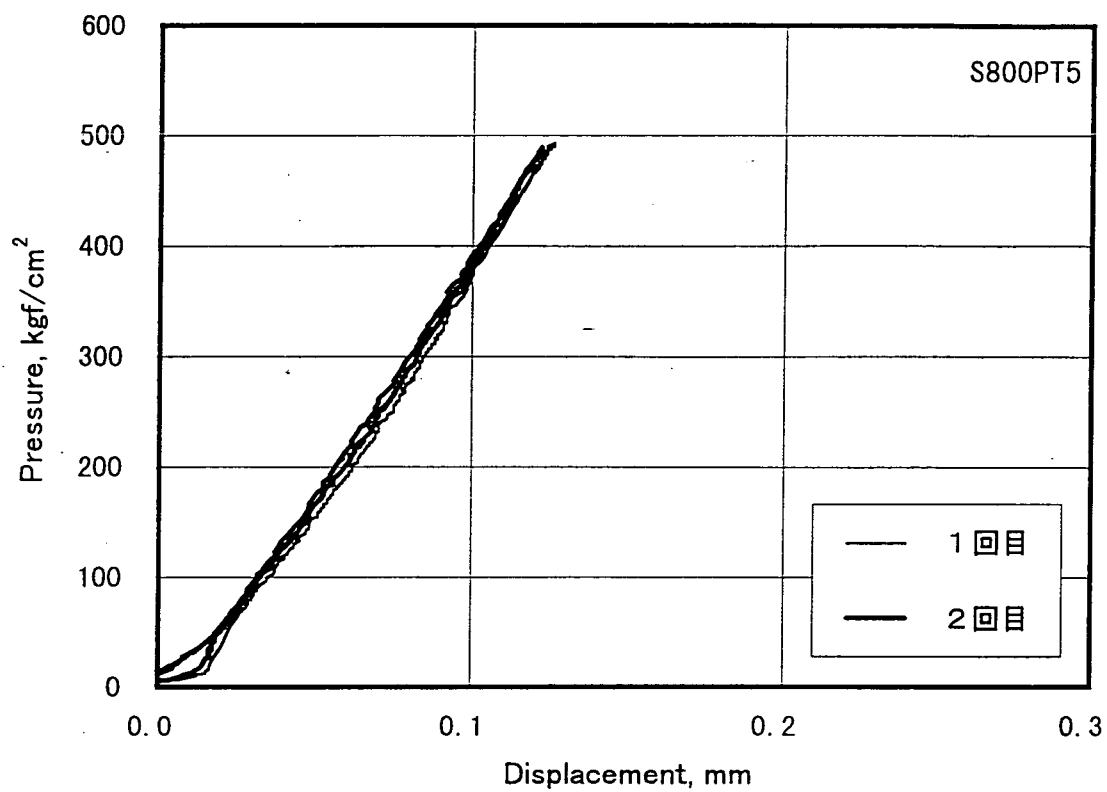


図4.5.4 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

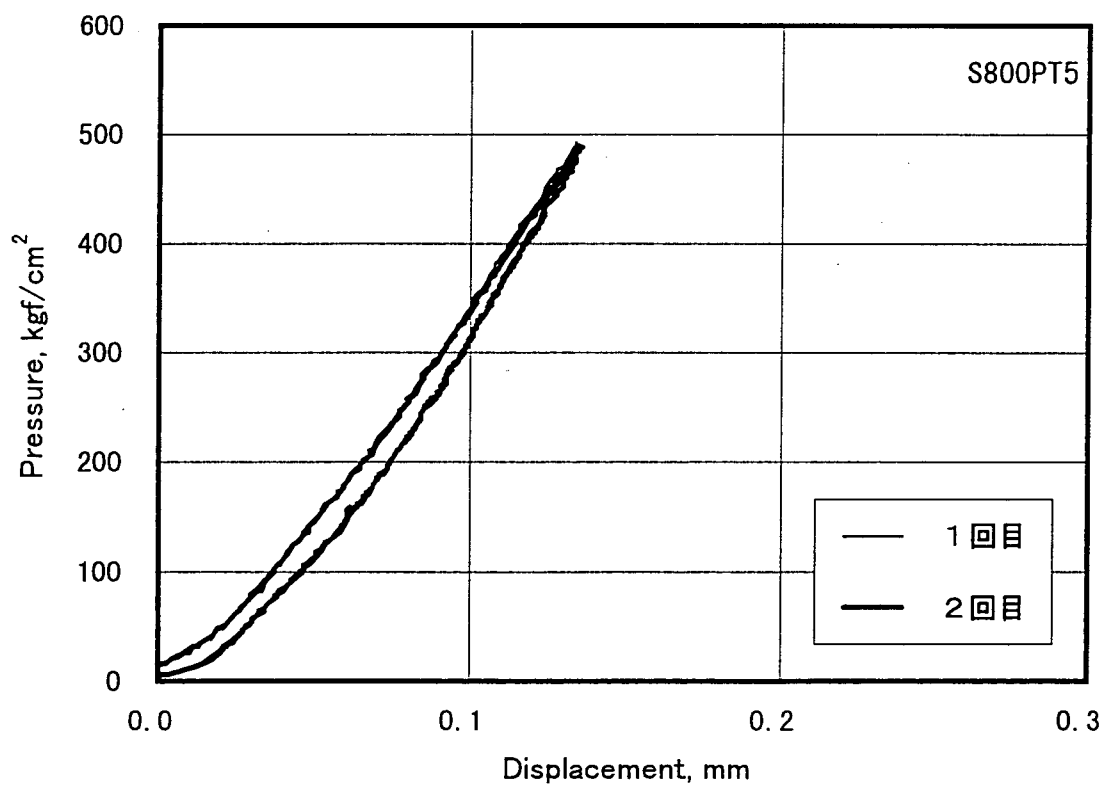


図4.5.4 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

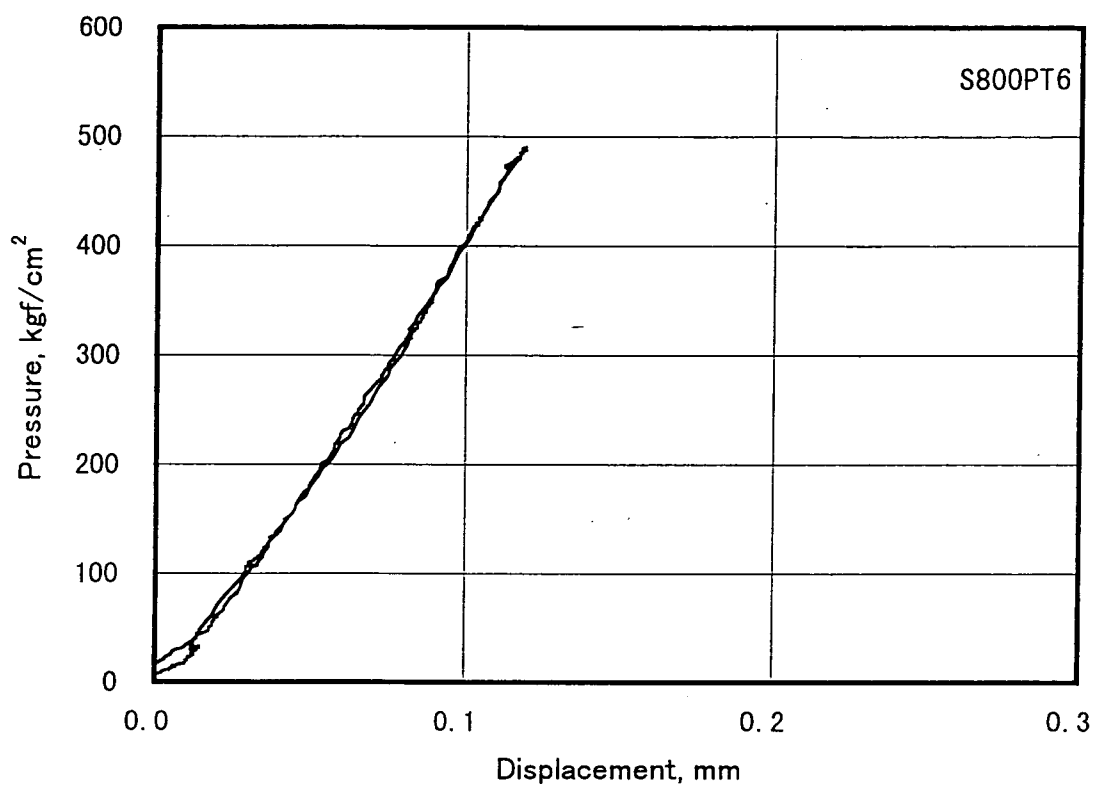


図4.5.5 (a). 压力-変位曲線 (Ch. 1)

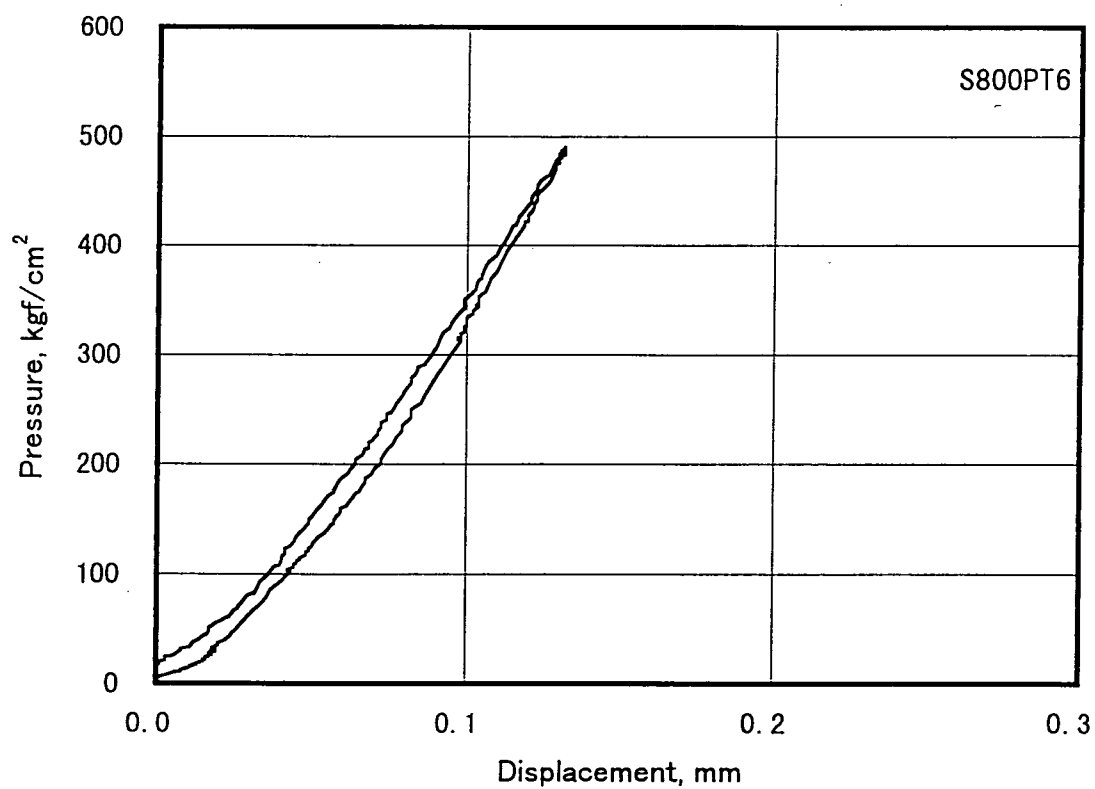


図4.5.5 (b). 压力-変位曲線 (Ch. 2)

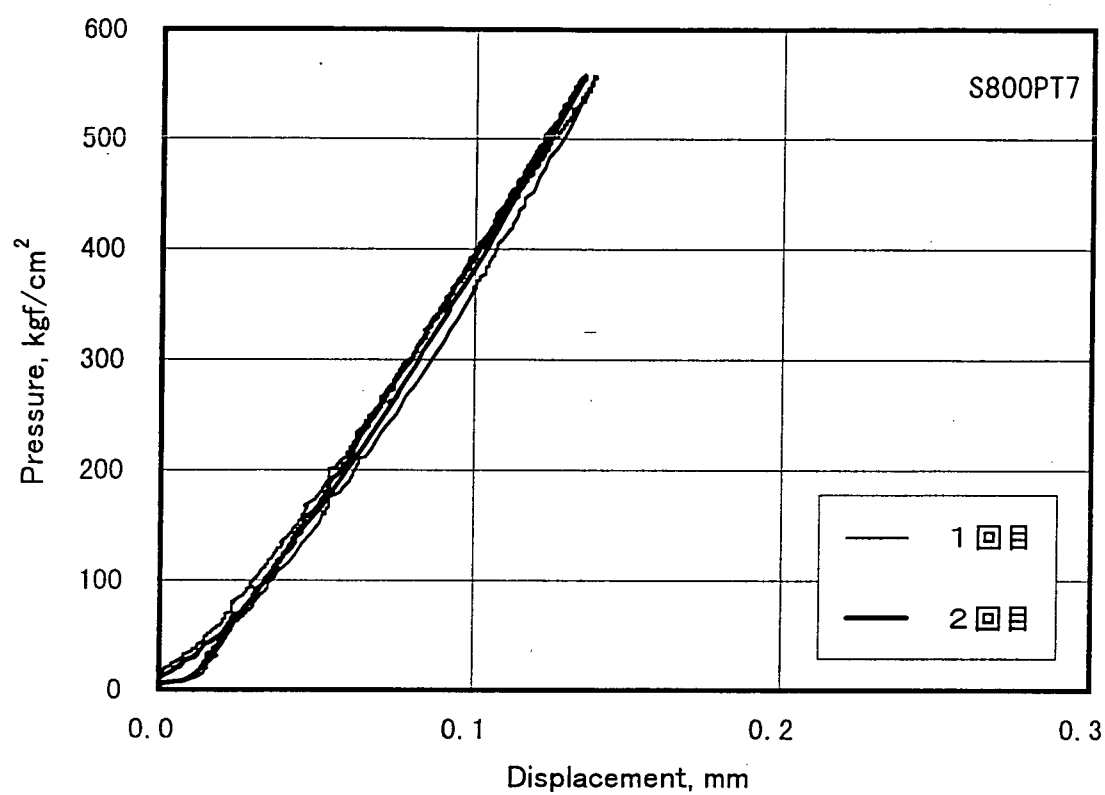


図4.5.6 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

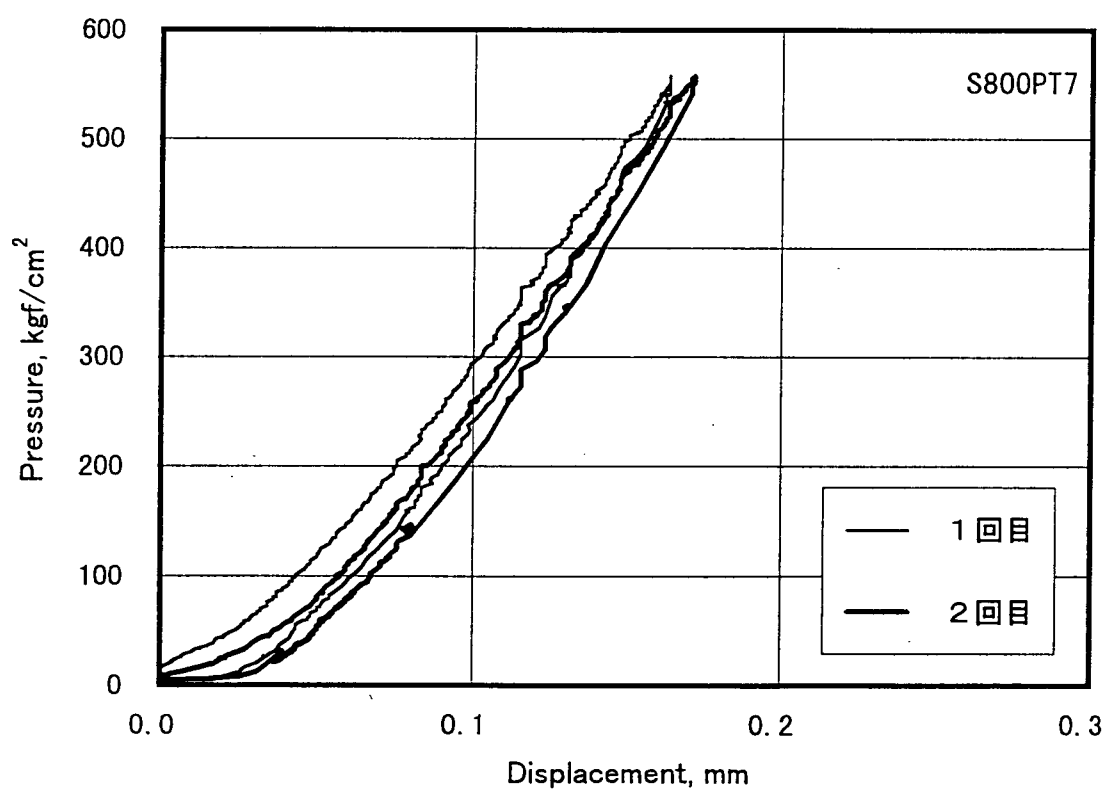


図4.5.6 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

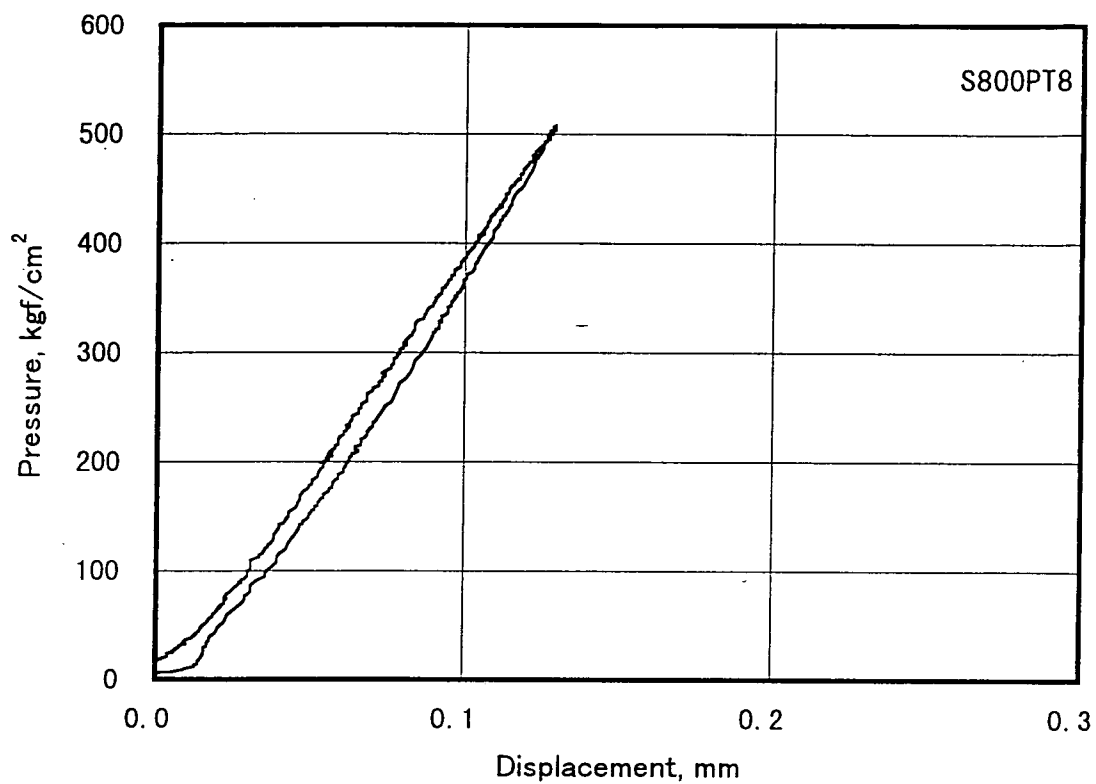


図4.5.7 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

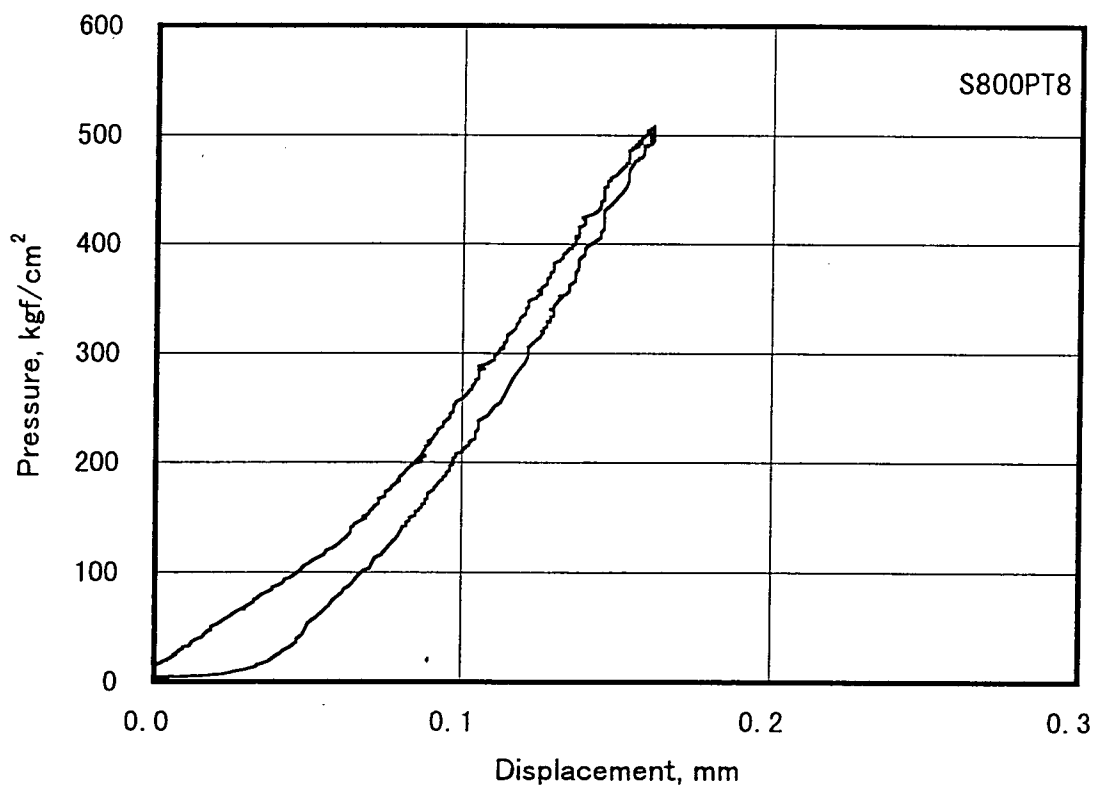


図4.5.7 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

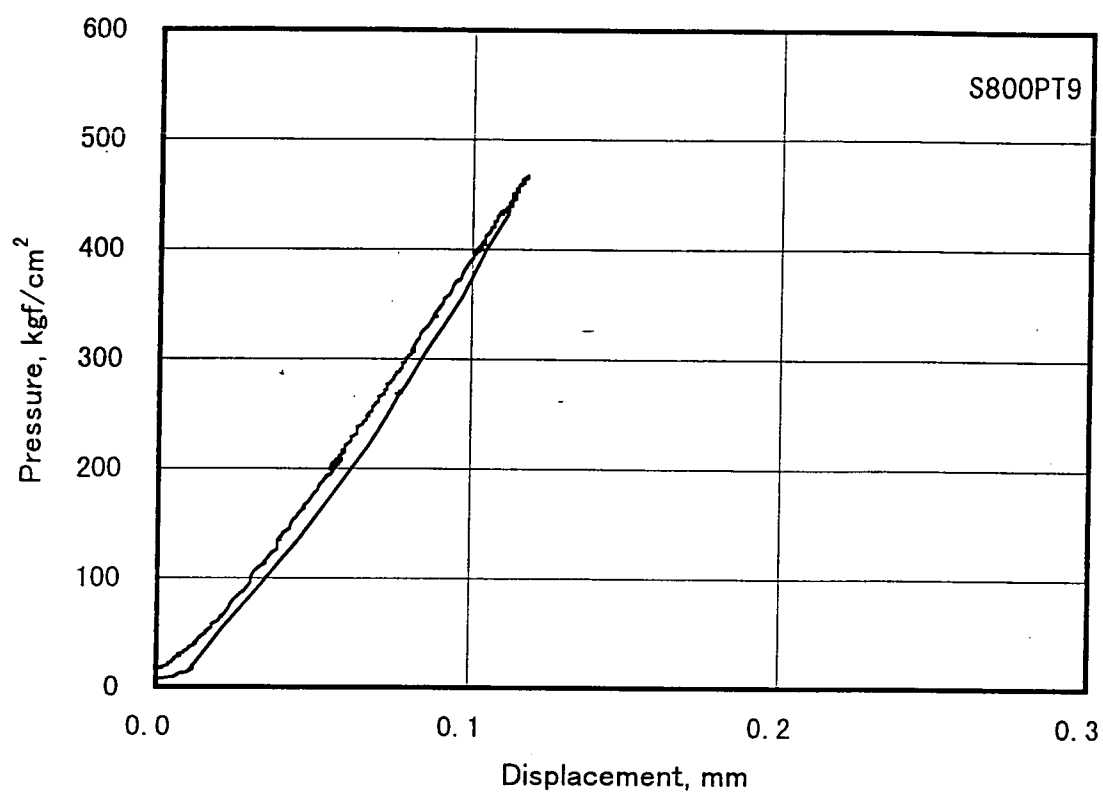


図4.5.8 (a). 压力-変位曲線 (Ch. 1)

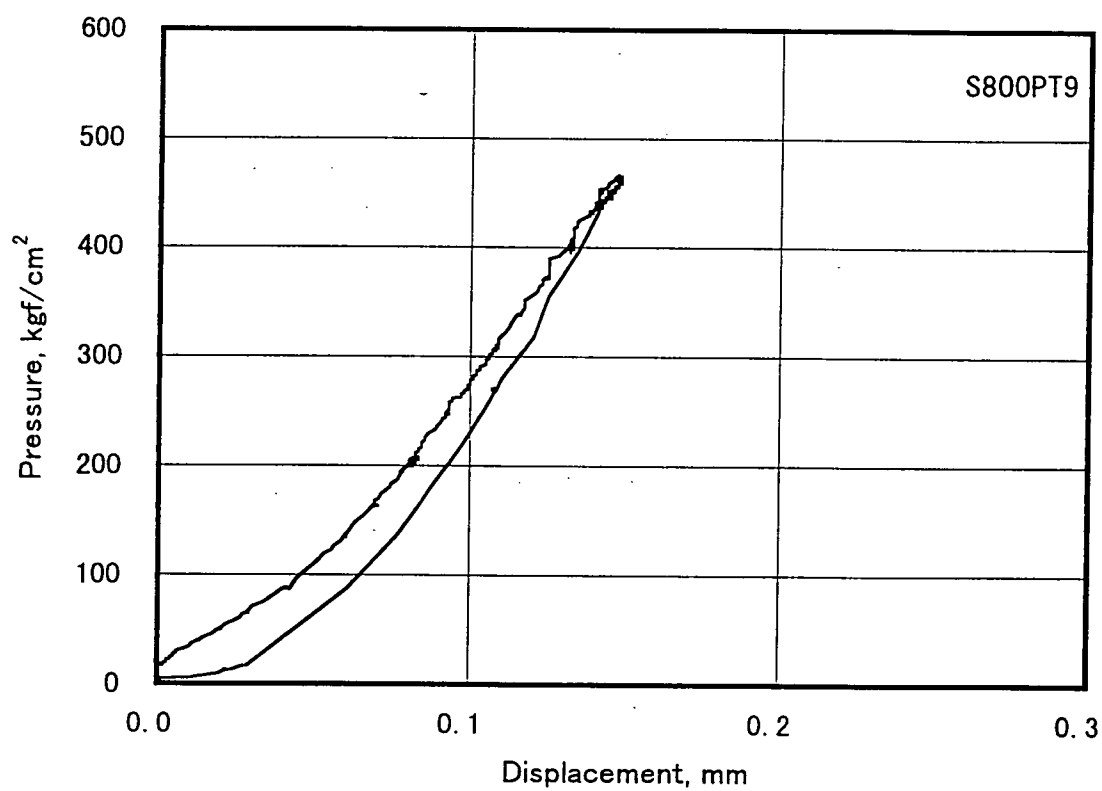


図4.5.8 (b). 压力-変位曲線 (Ch. 2)

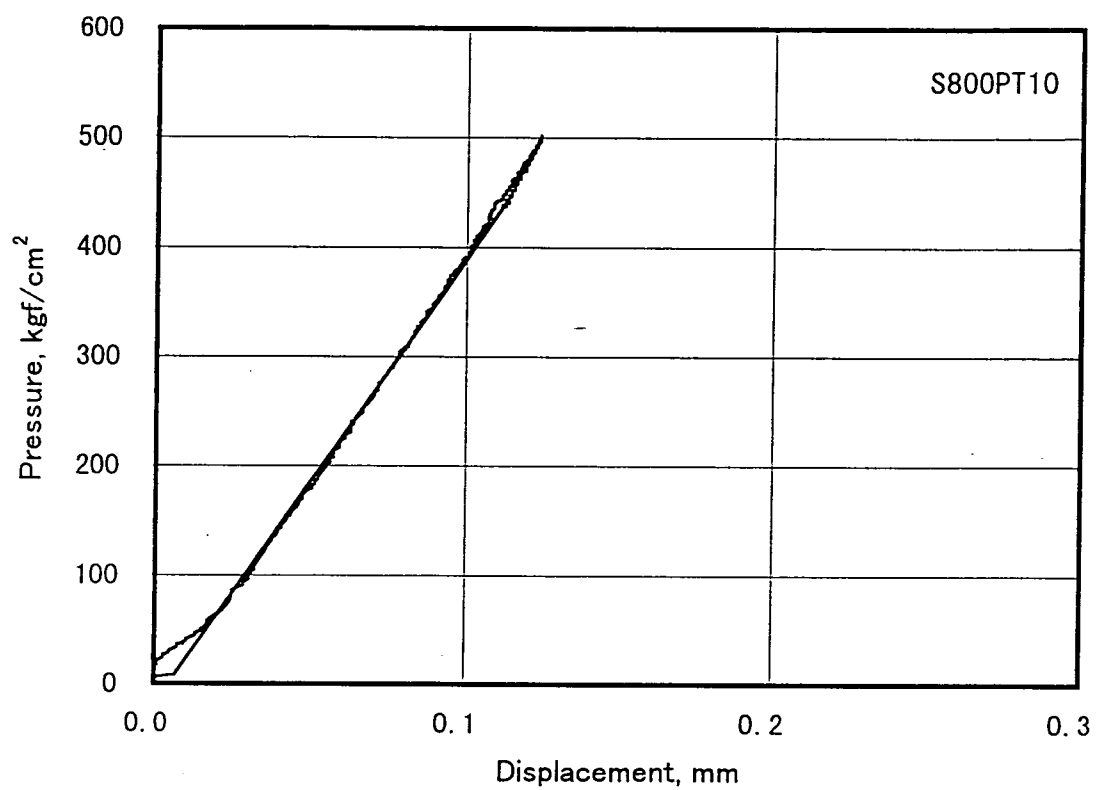


図4.5.9 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

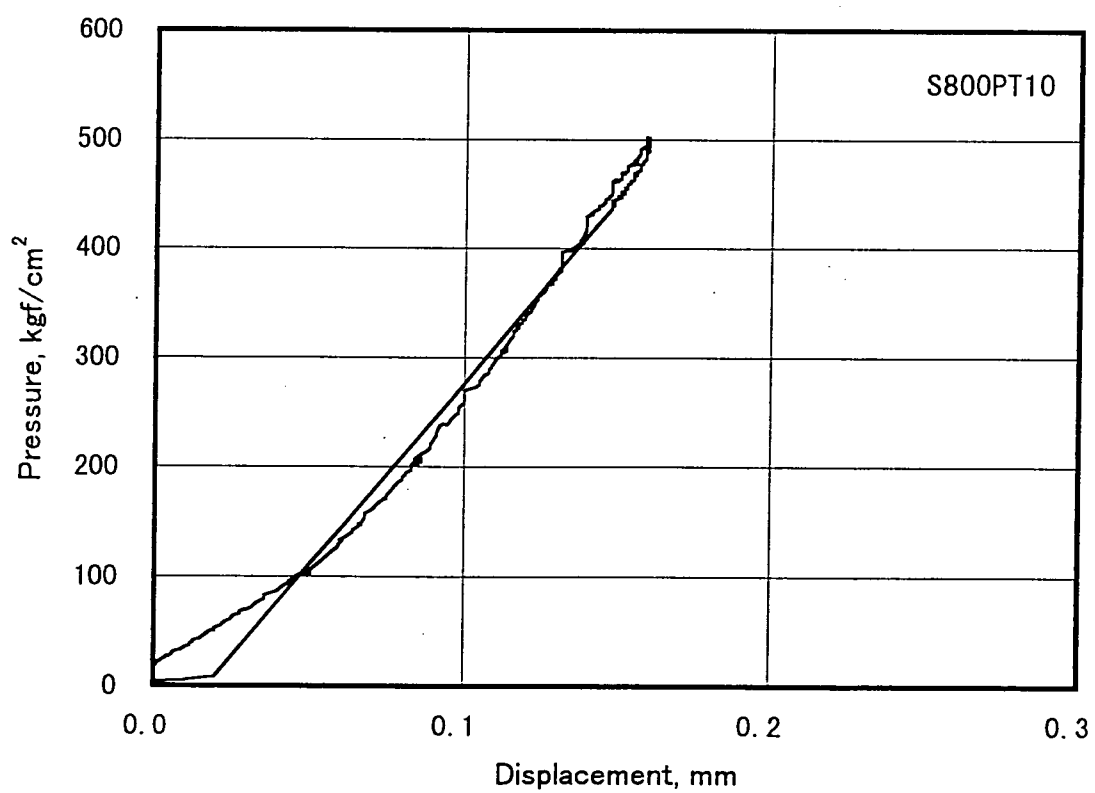


図4.5.9 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

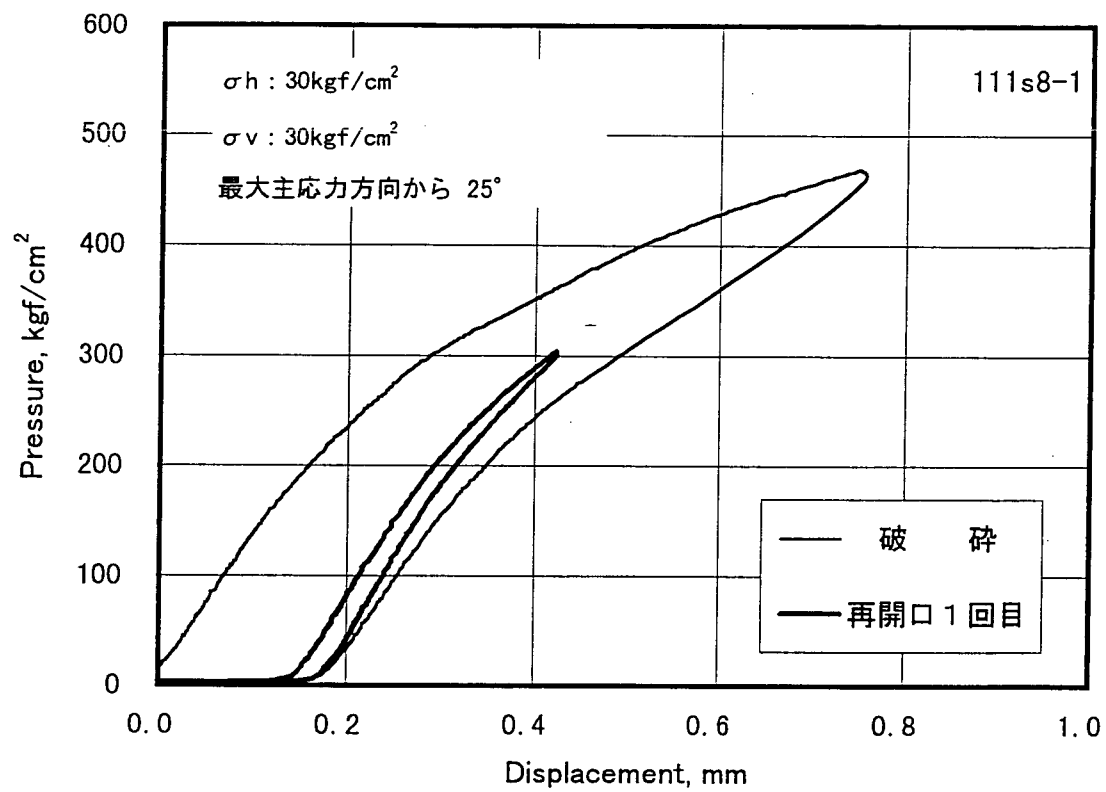


図4.5.10 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

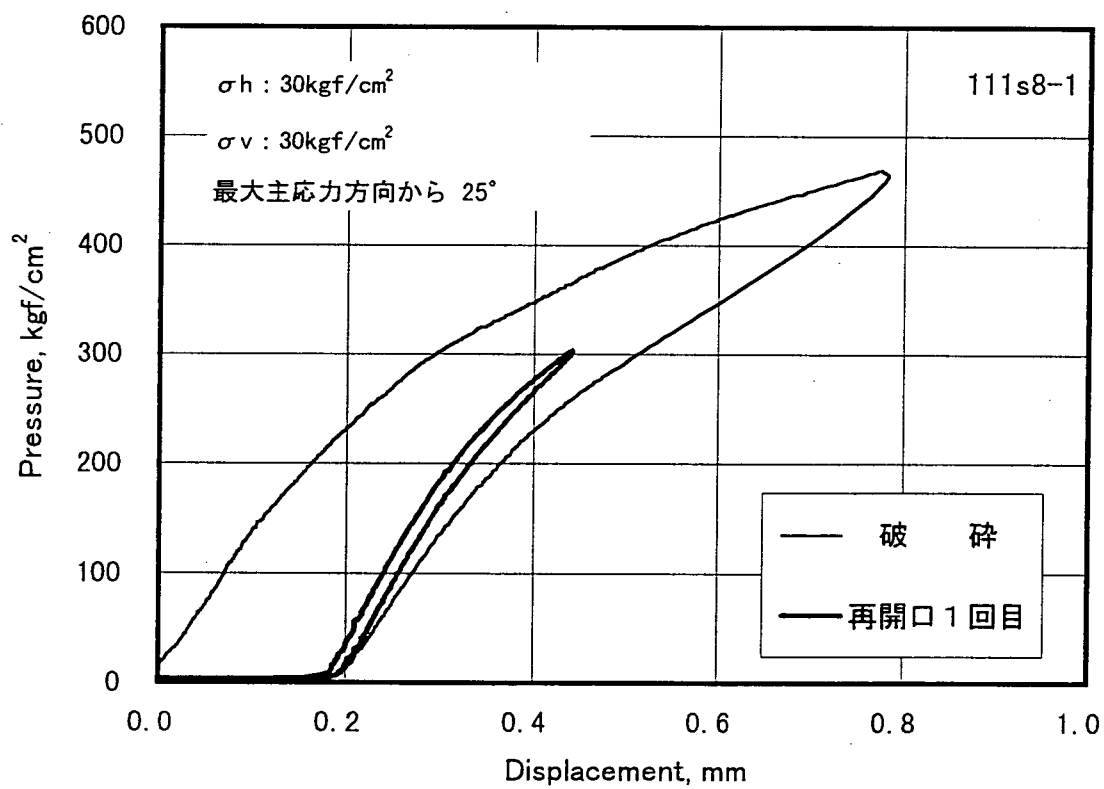


図4.5.10 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

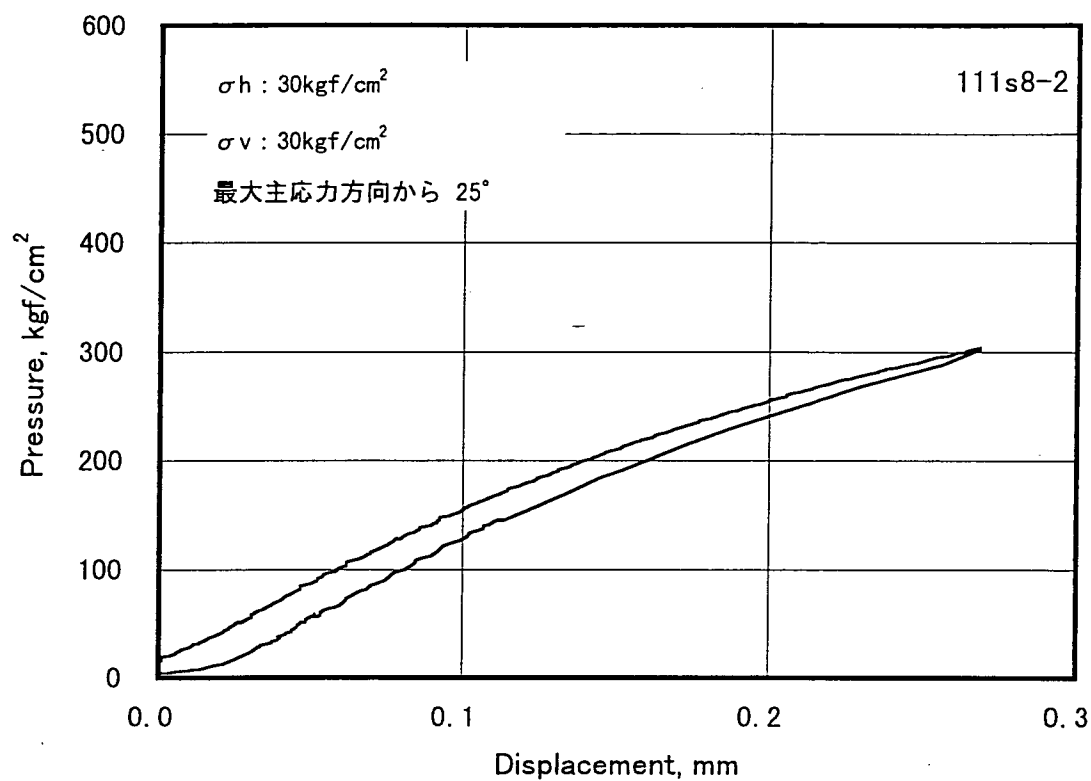


図4.5.11 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

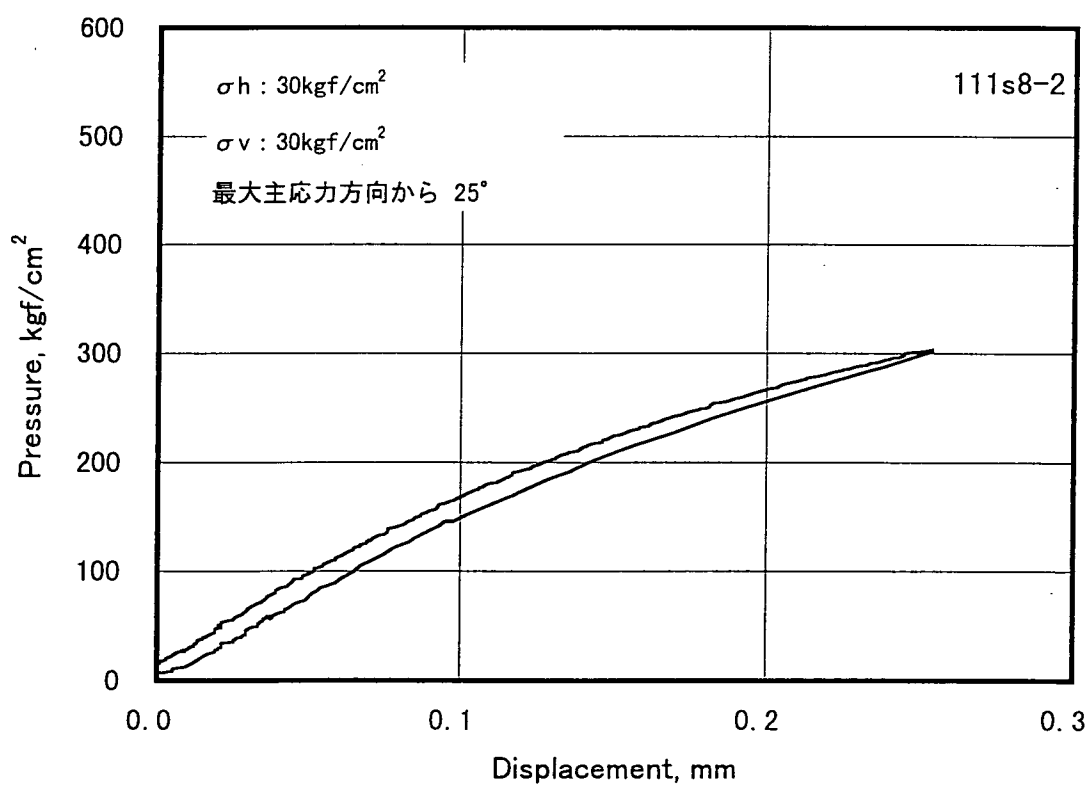


図4.5.11 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

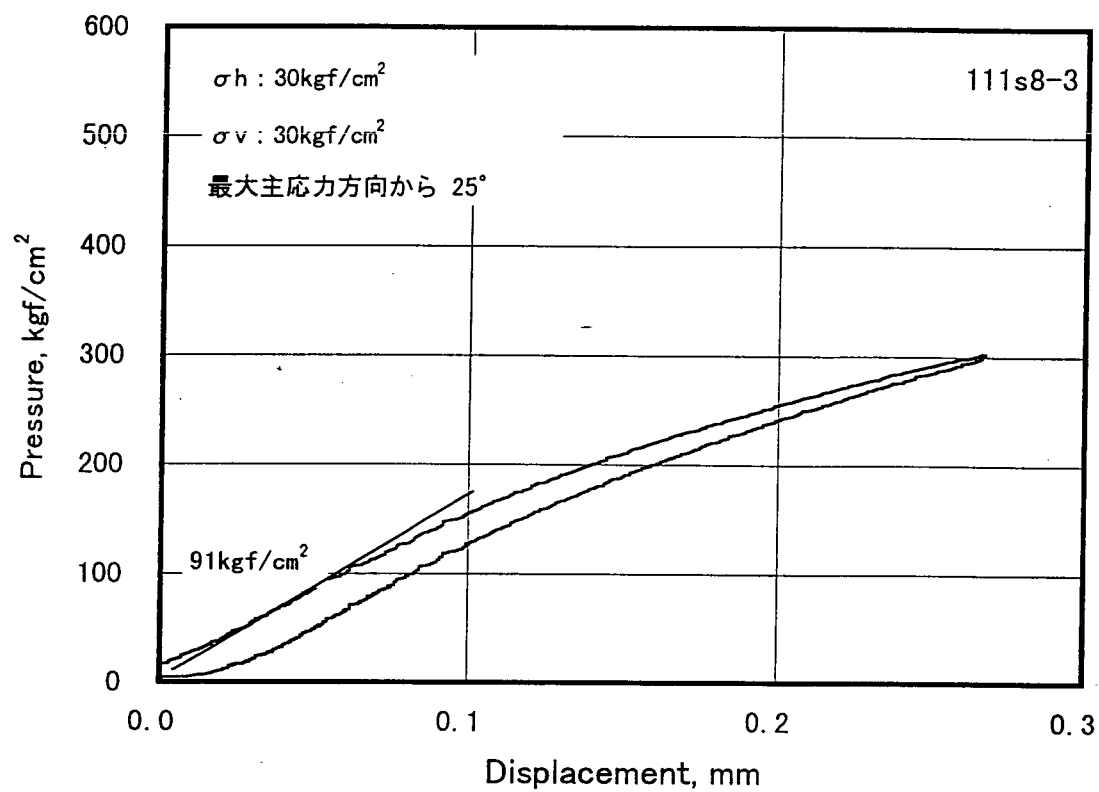


図4.5.12 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

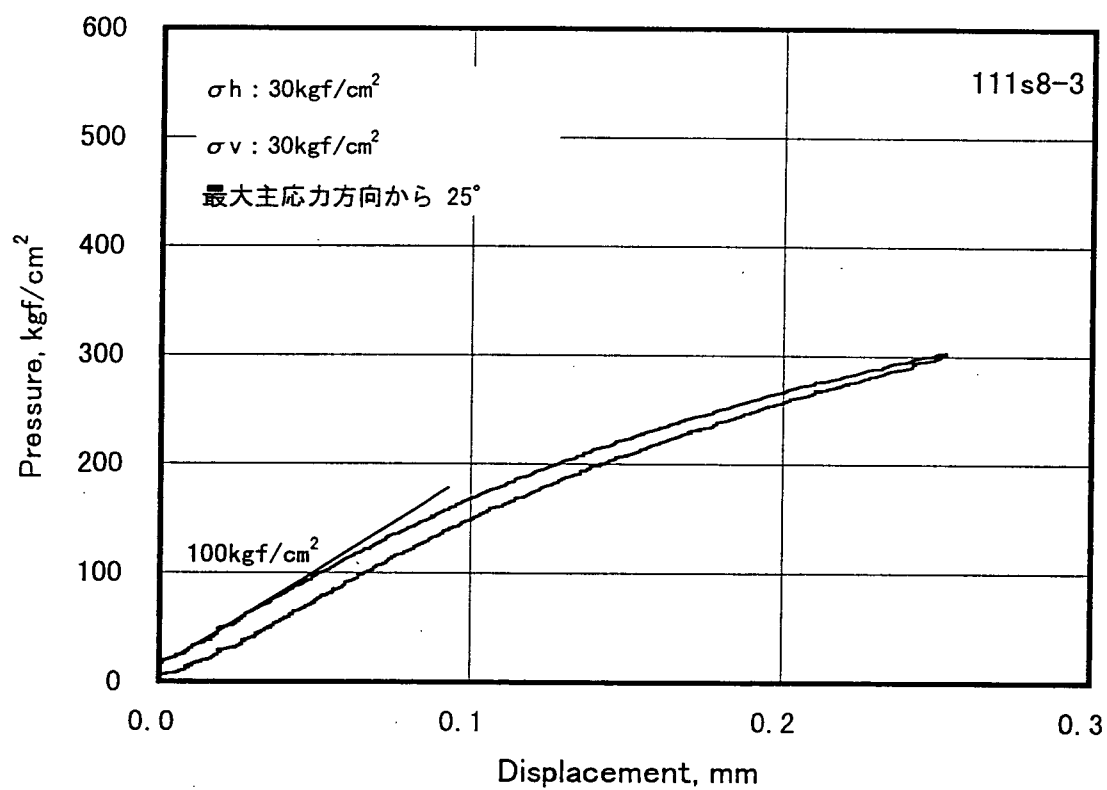


図4.5.12 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

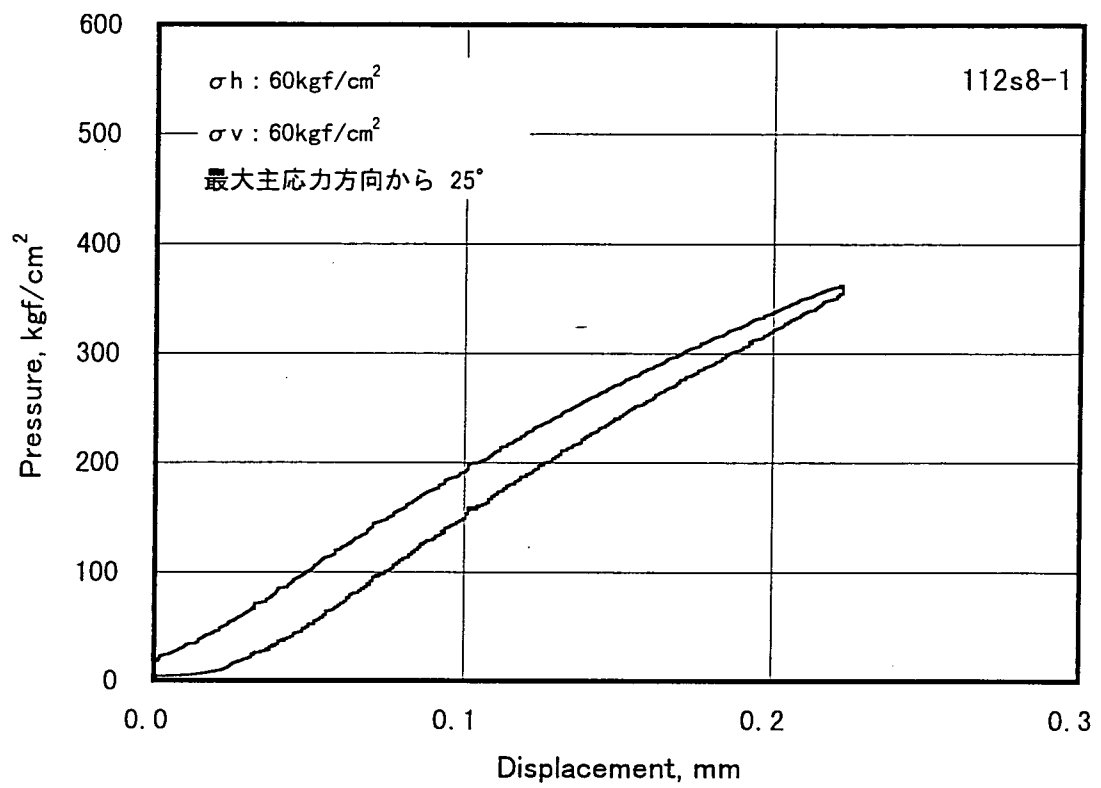


図4.5.13 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

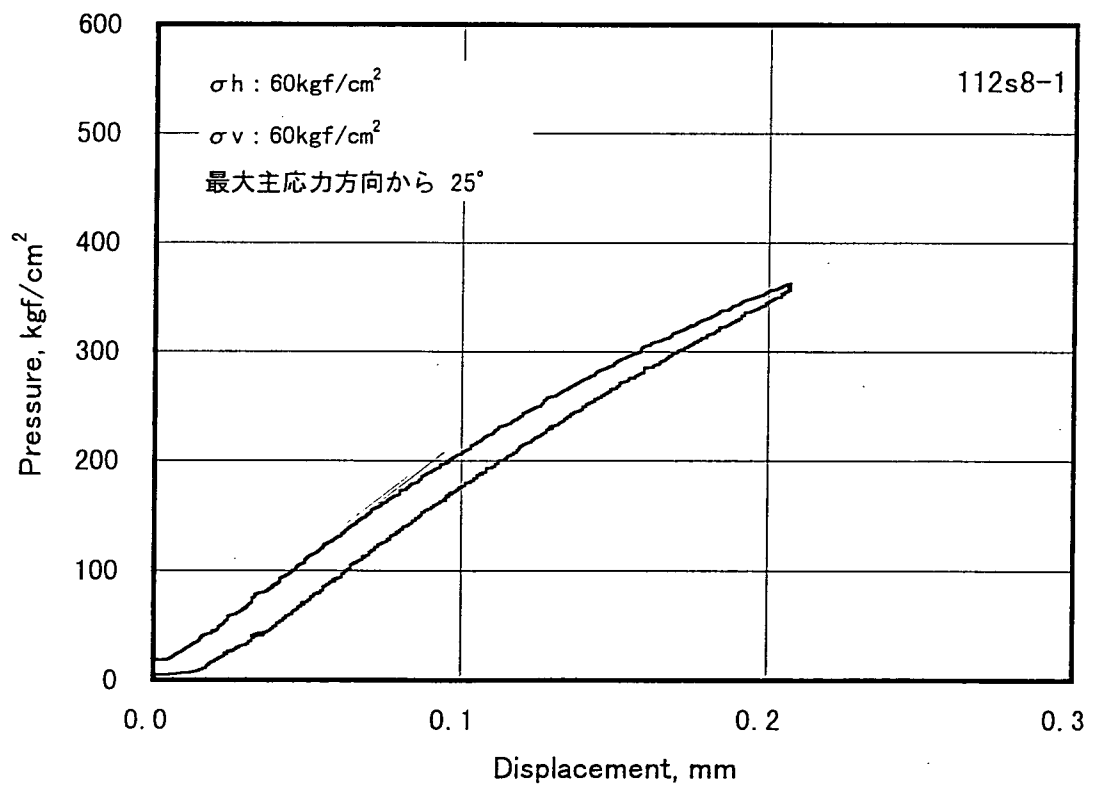


図4.5.13 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

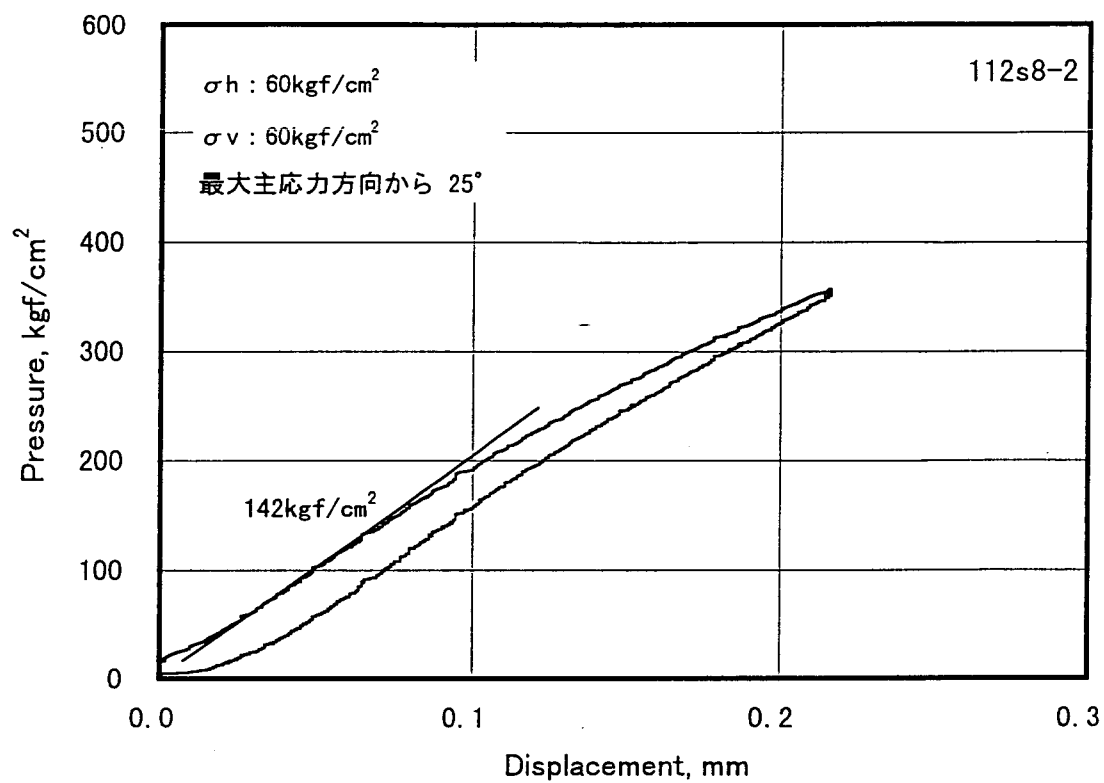


図4.5.14 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

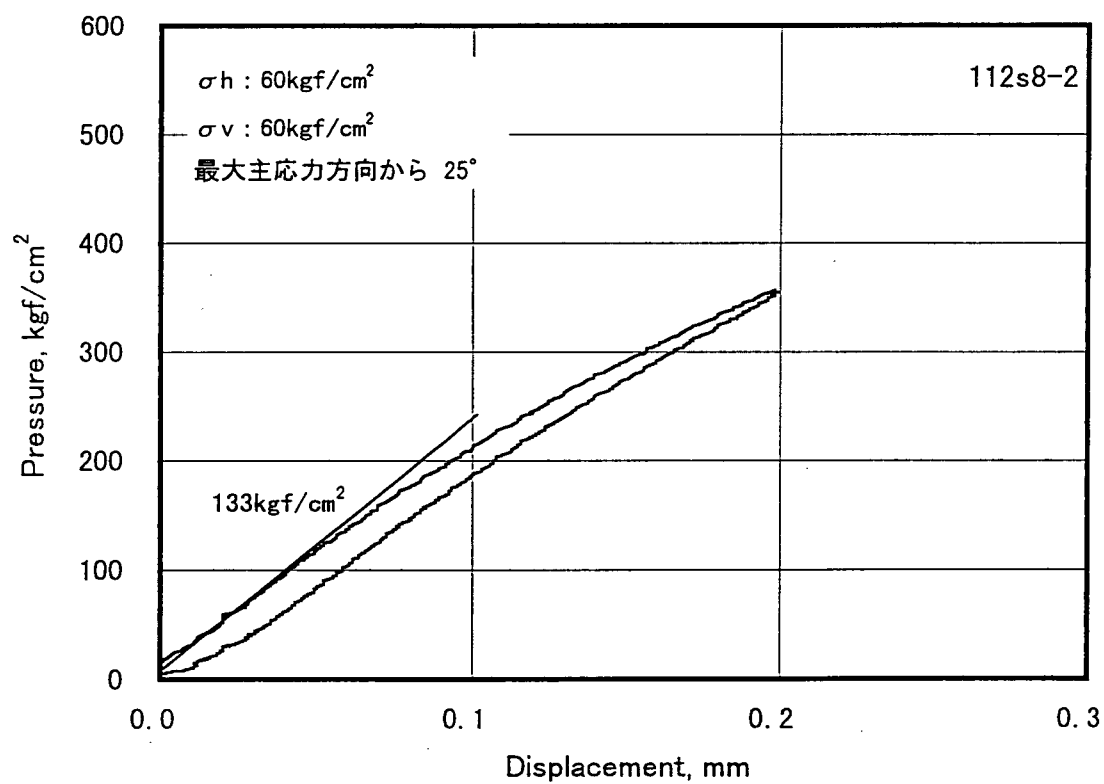


図4.5.14 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

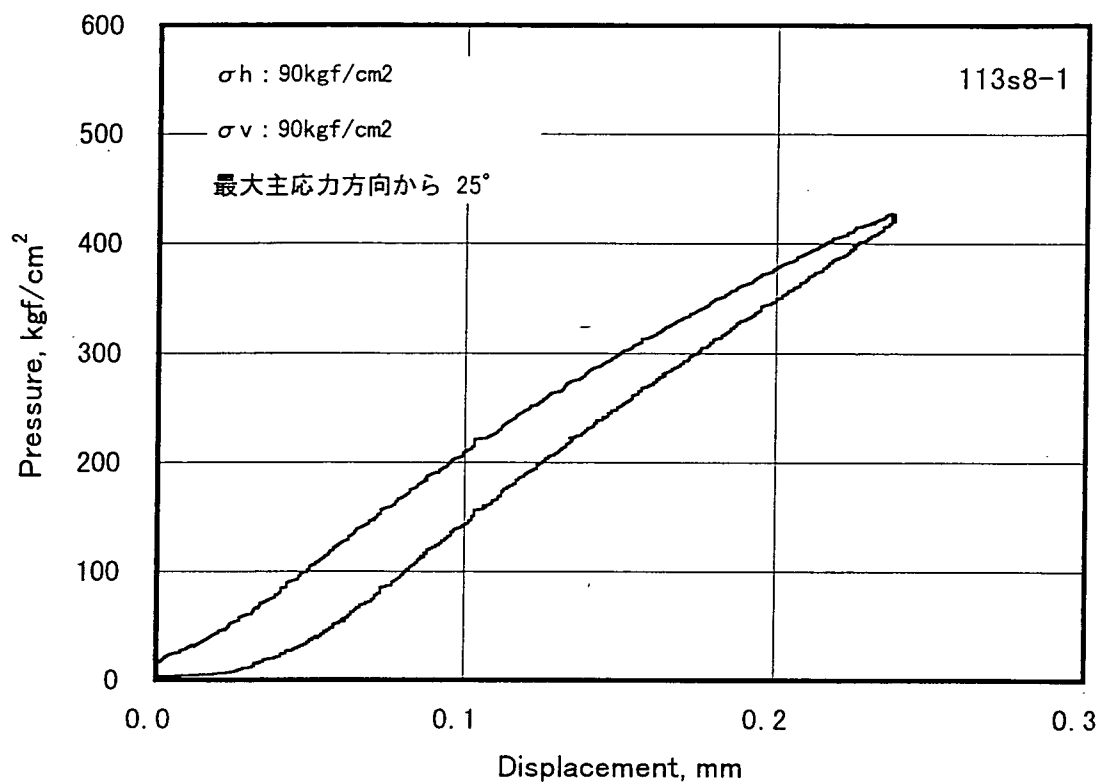


図4.5.15 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

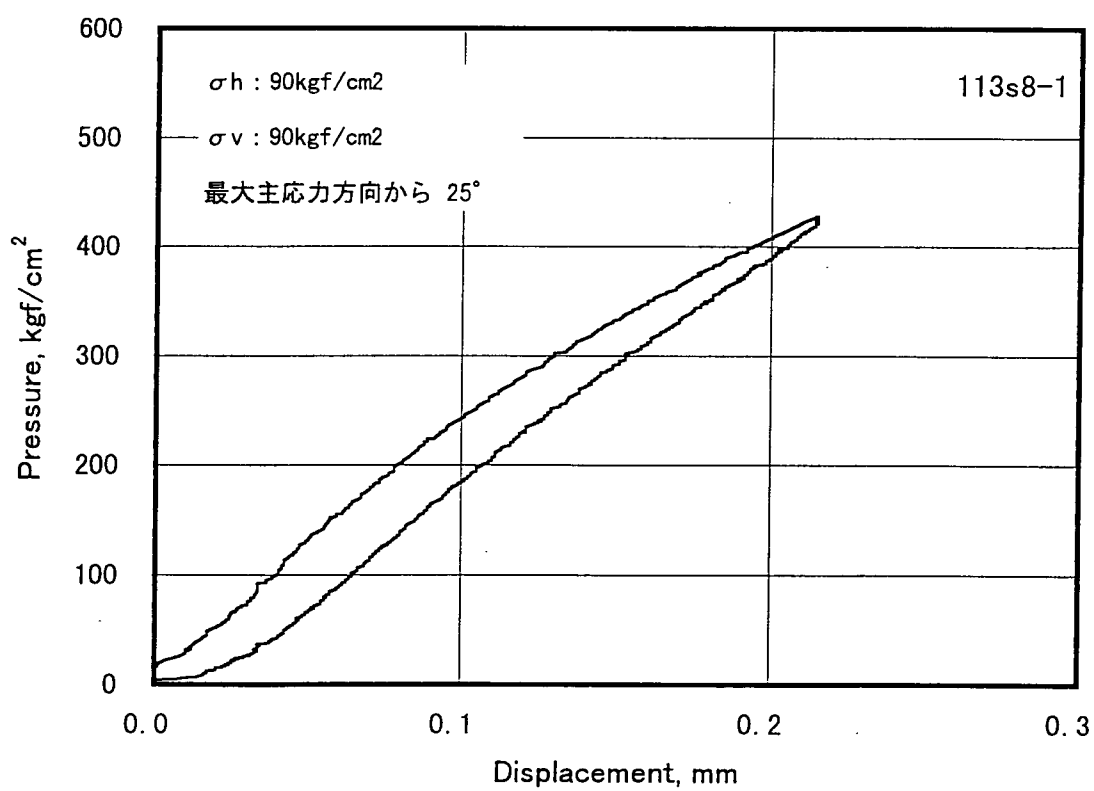


図4.5.15 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

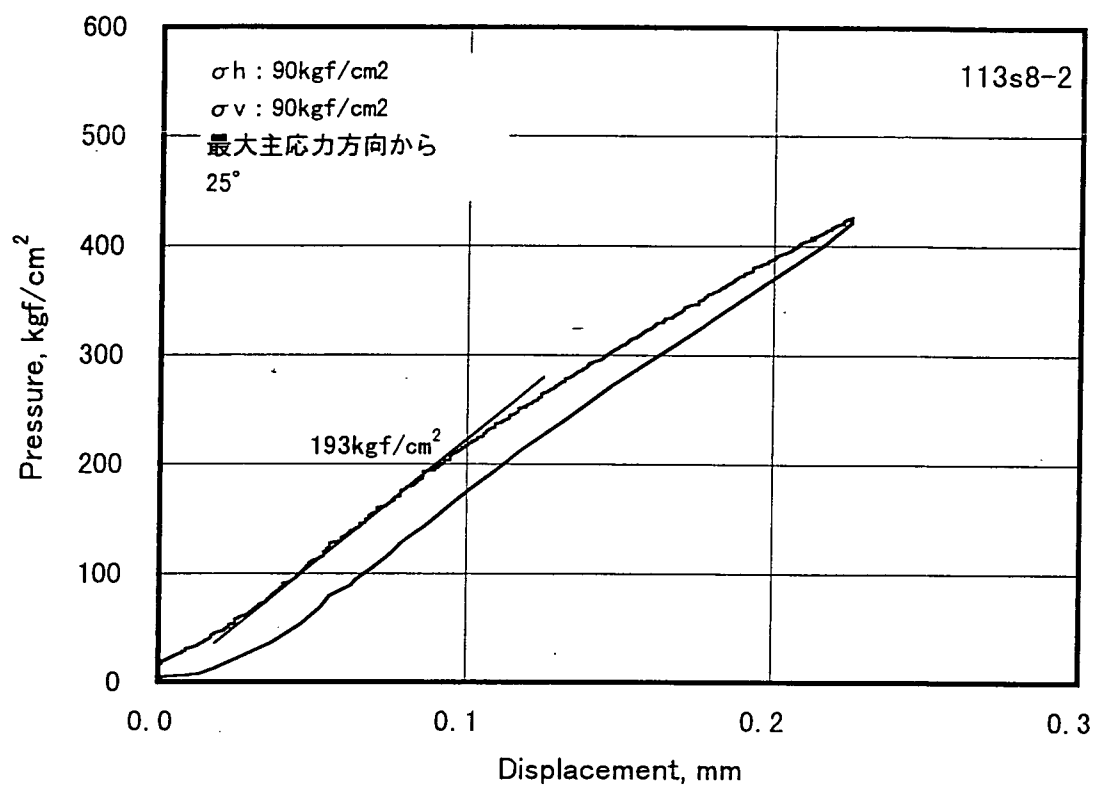


図4.5.16 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

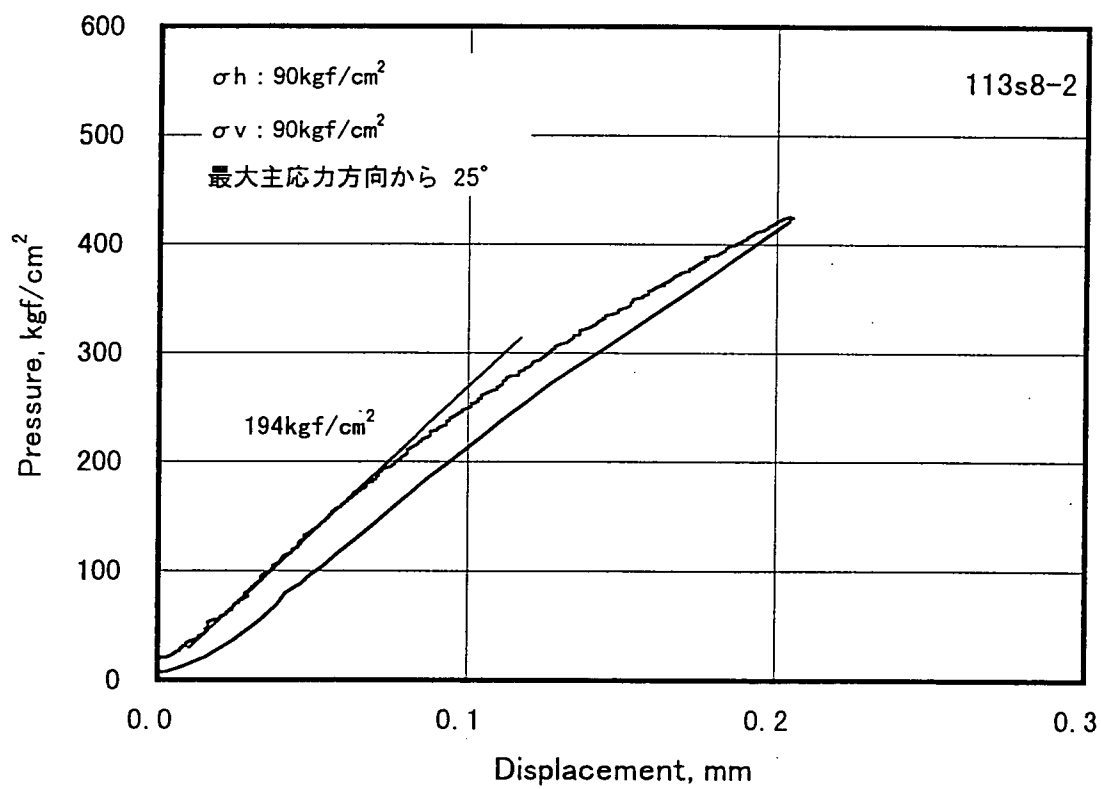


図4.5.16 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

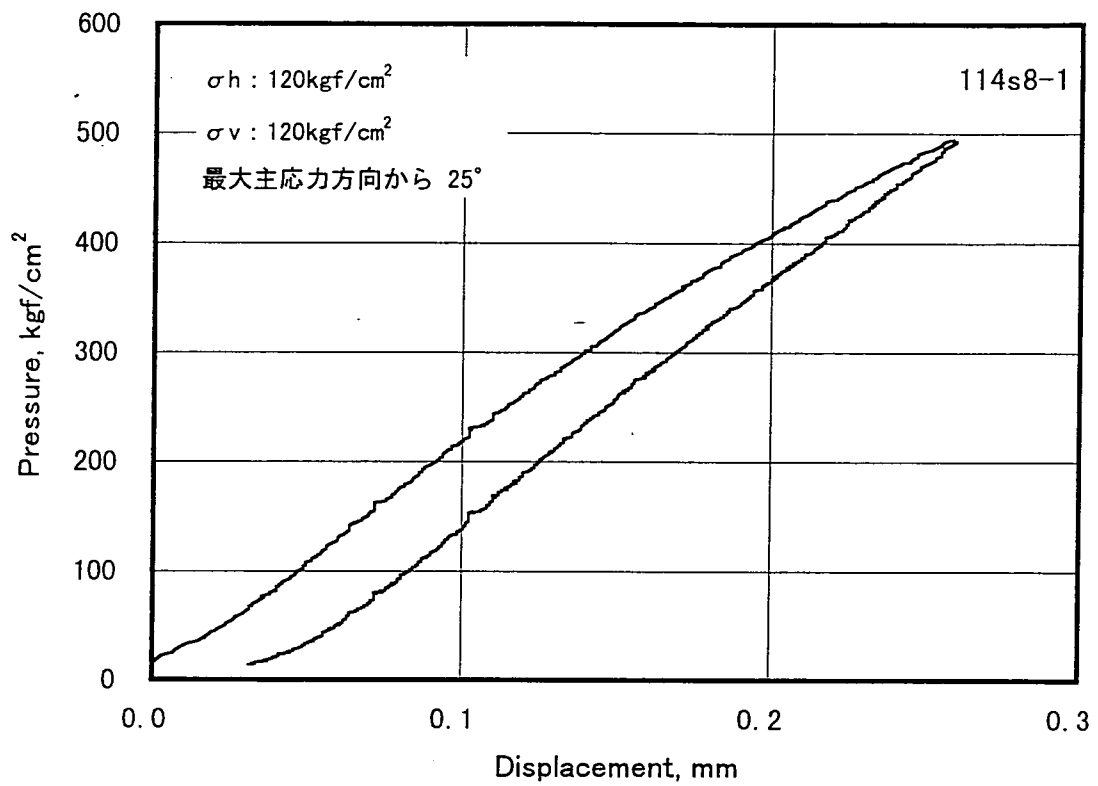


図4.5.17 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

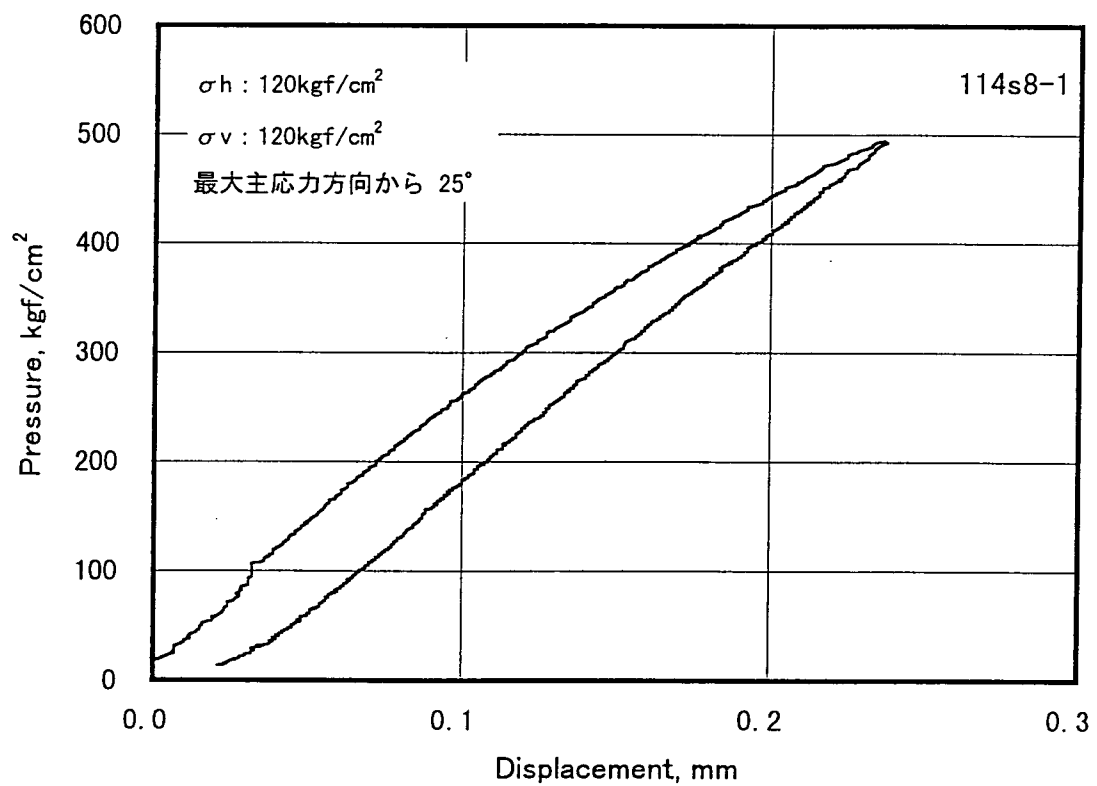


図4.5.17 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

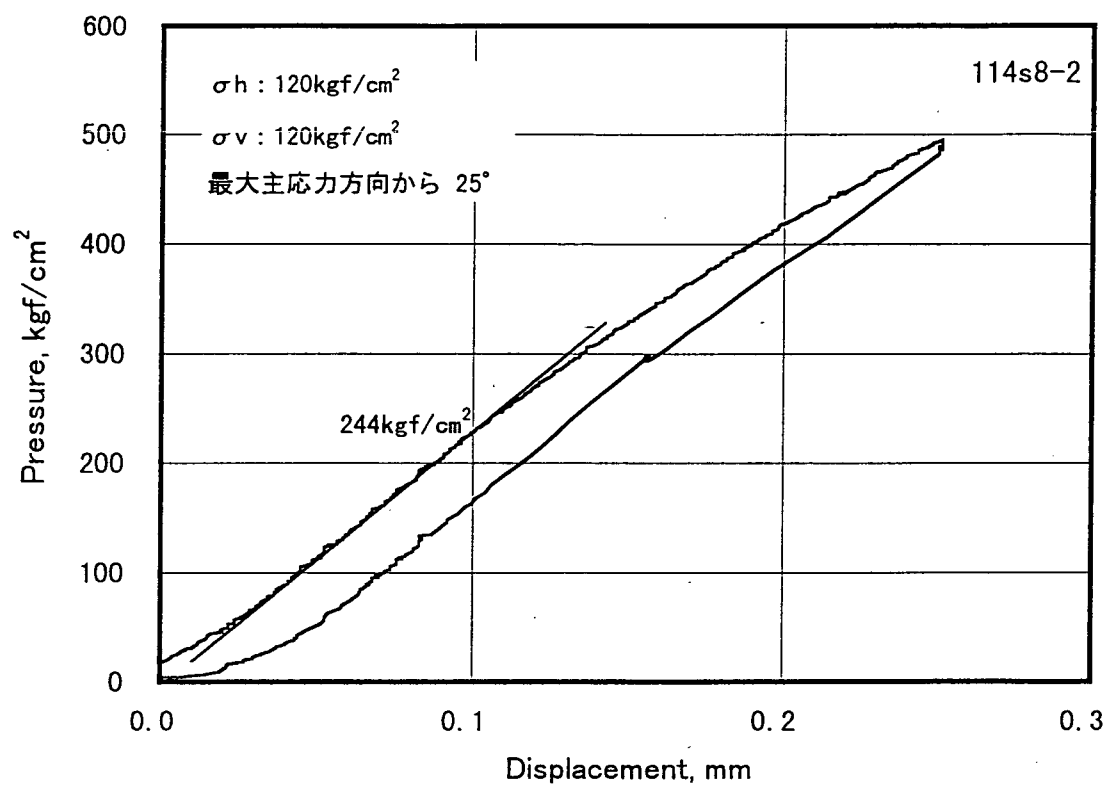


図4.5.18 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

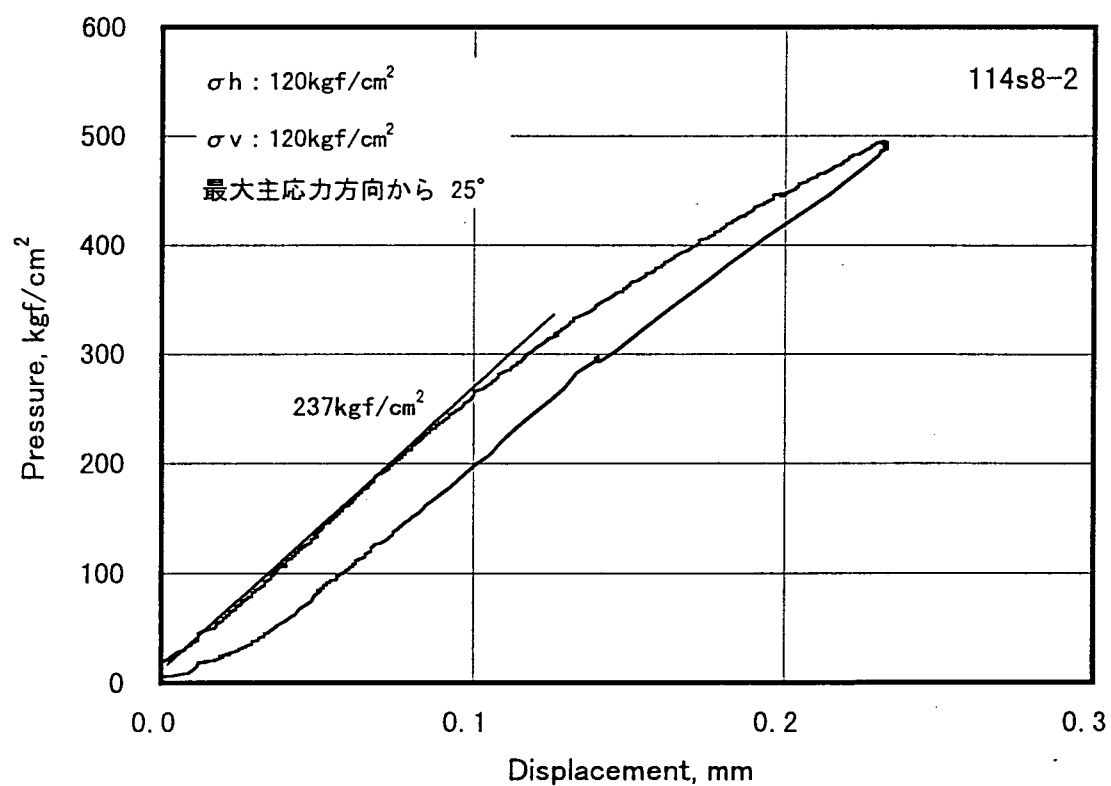


図4.5.18 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

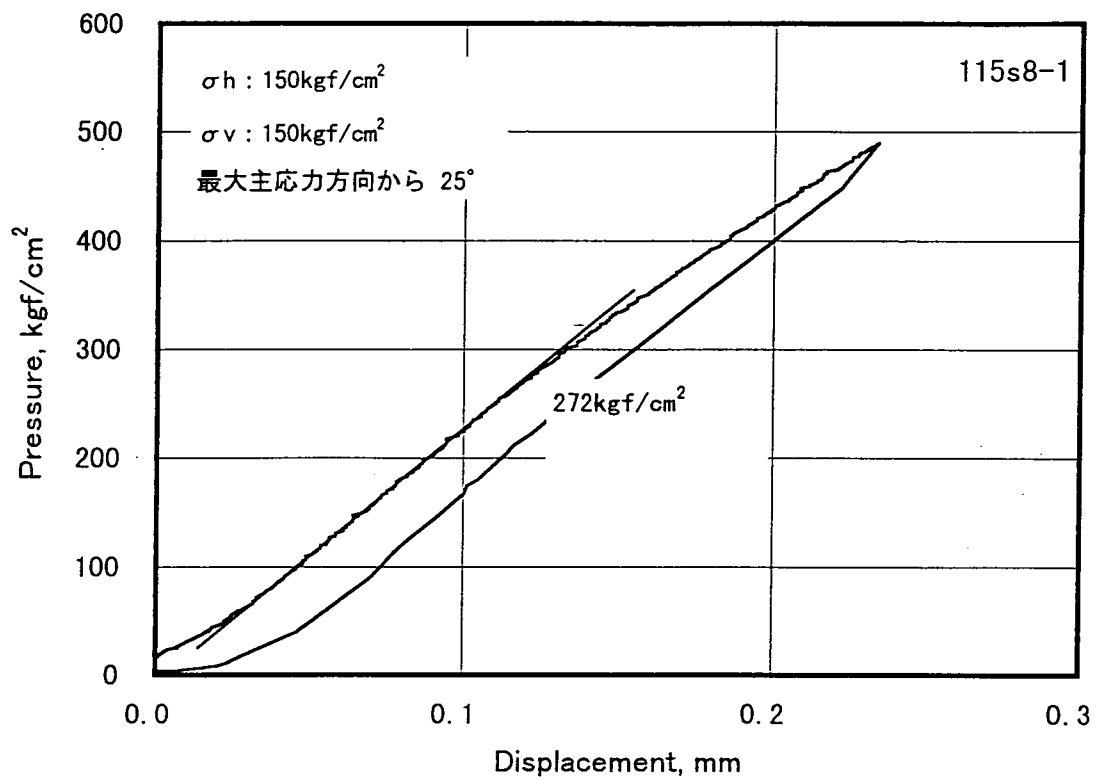


図4.5.19 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

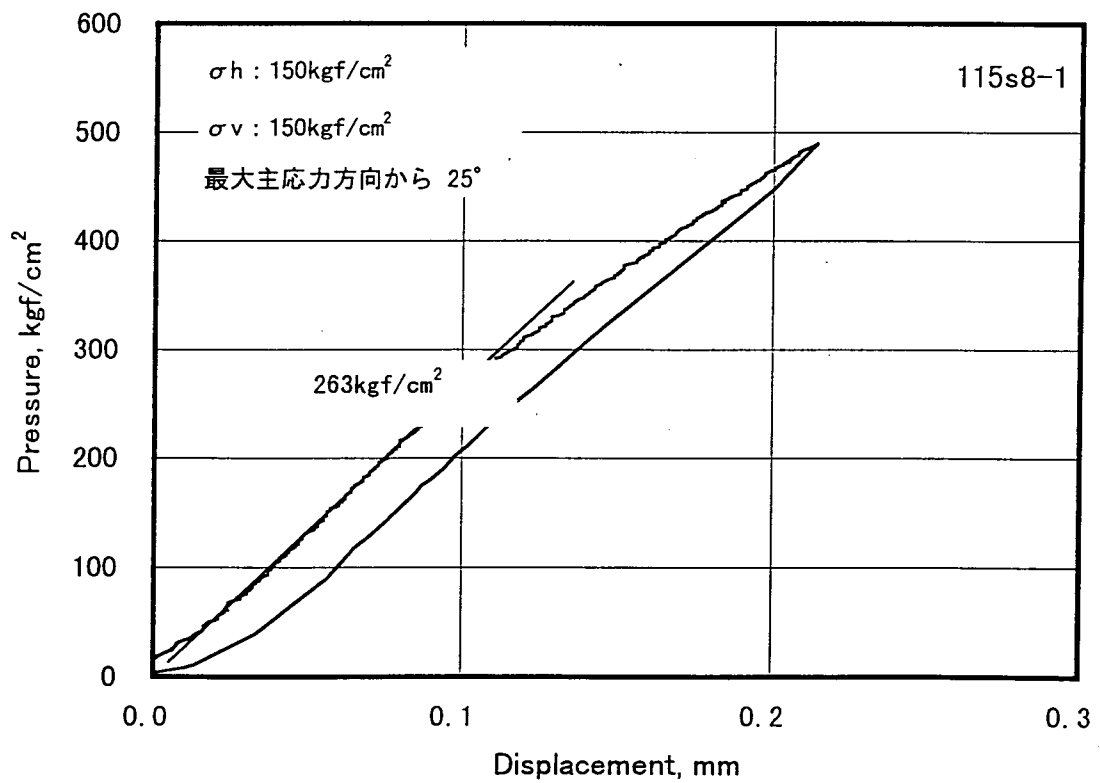


図4.5.19 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

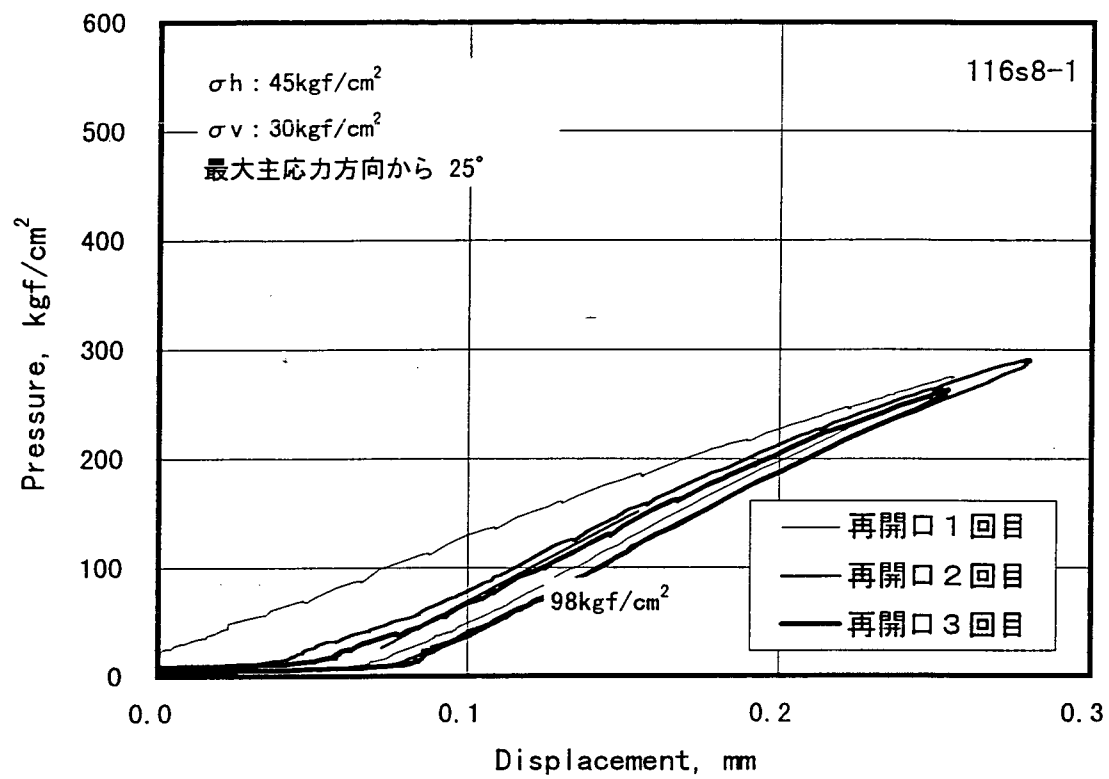


図4.5.20 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

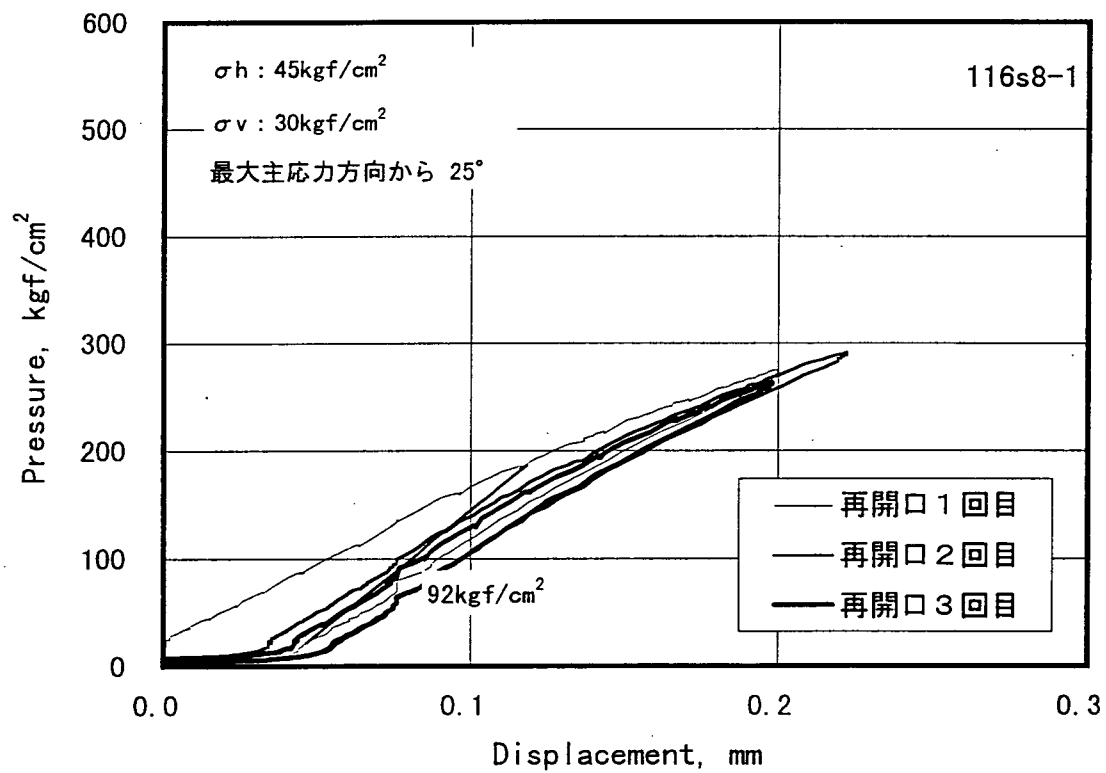


図4.5.20 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

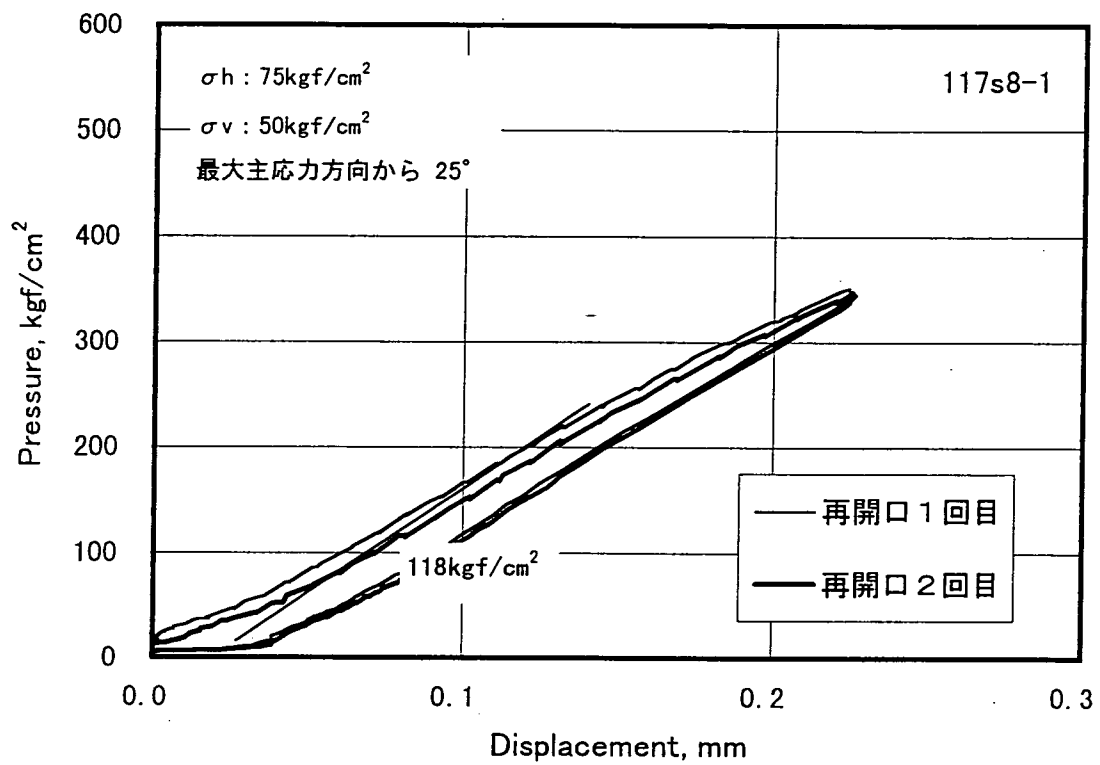


図4.5.21 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

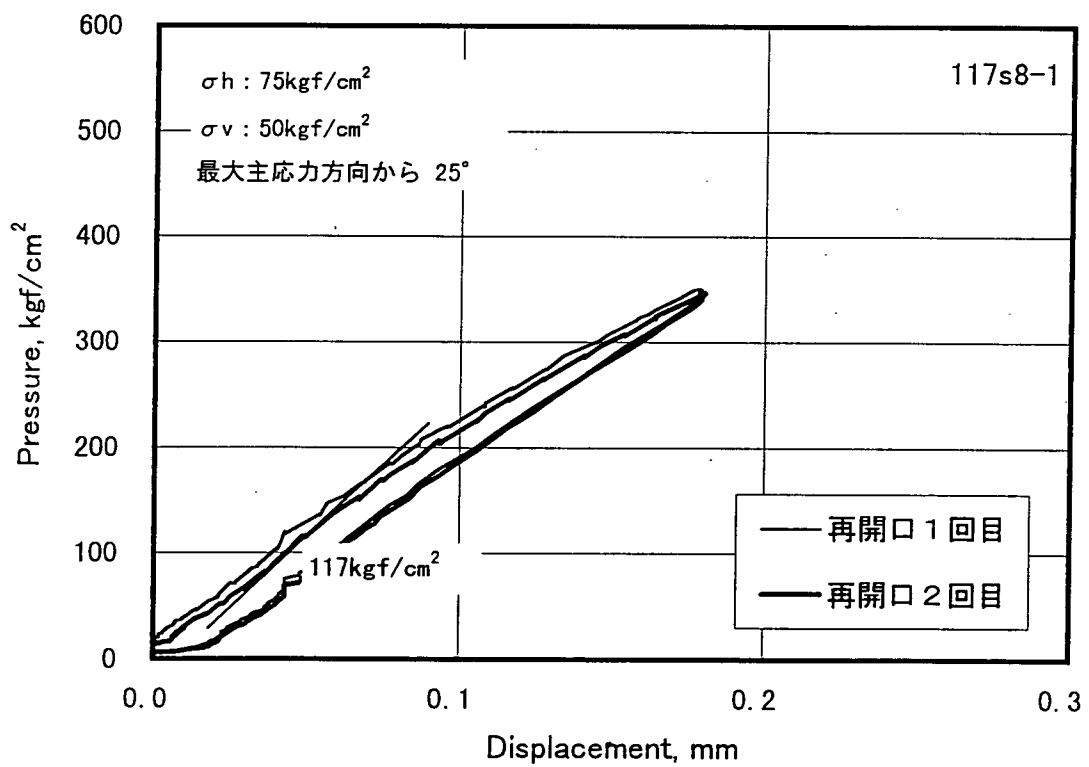


図4.5.21 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

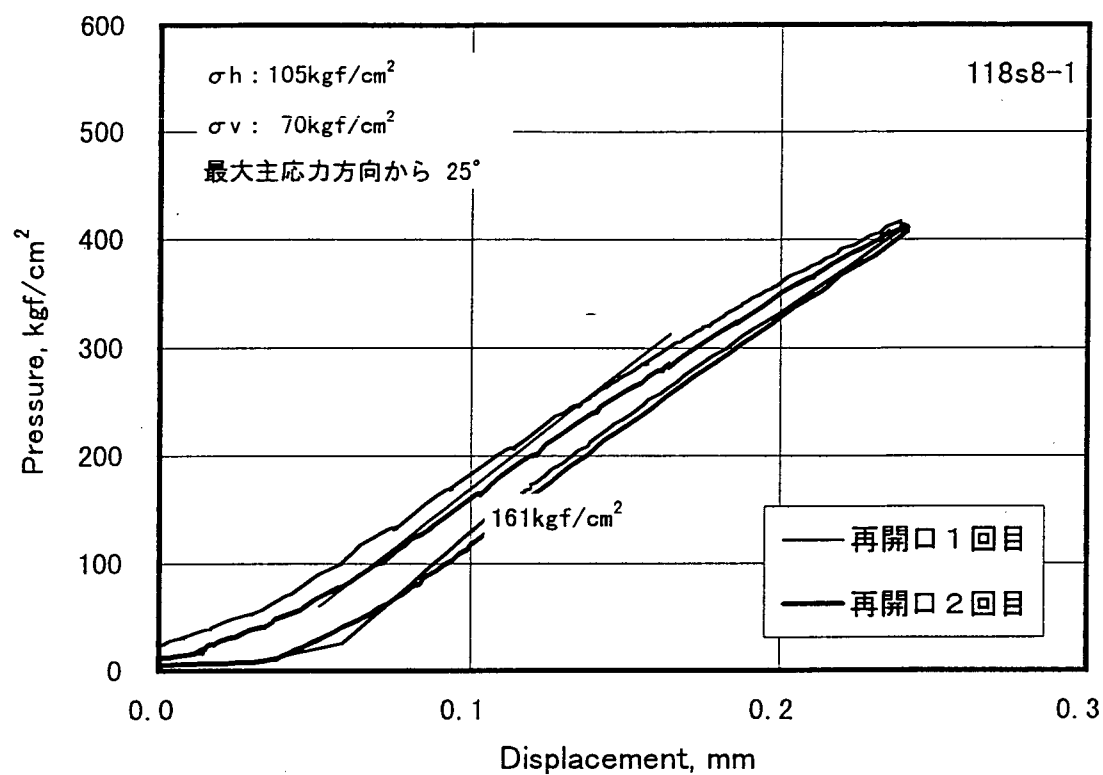


図4.5.22 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

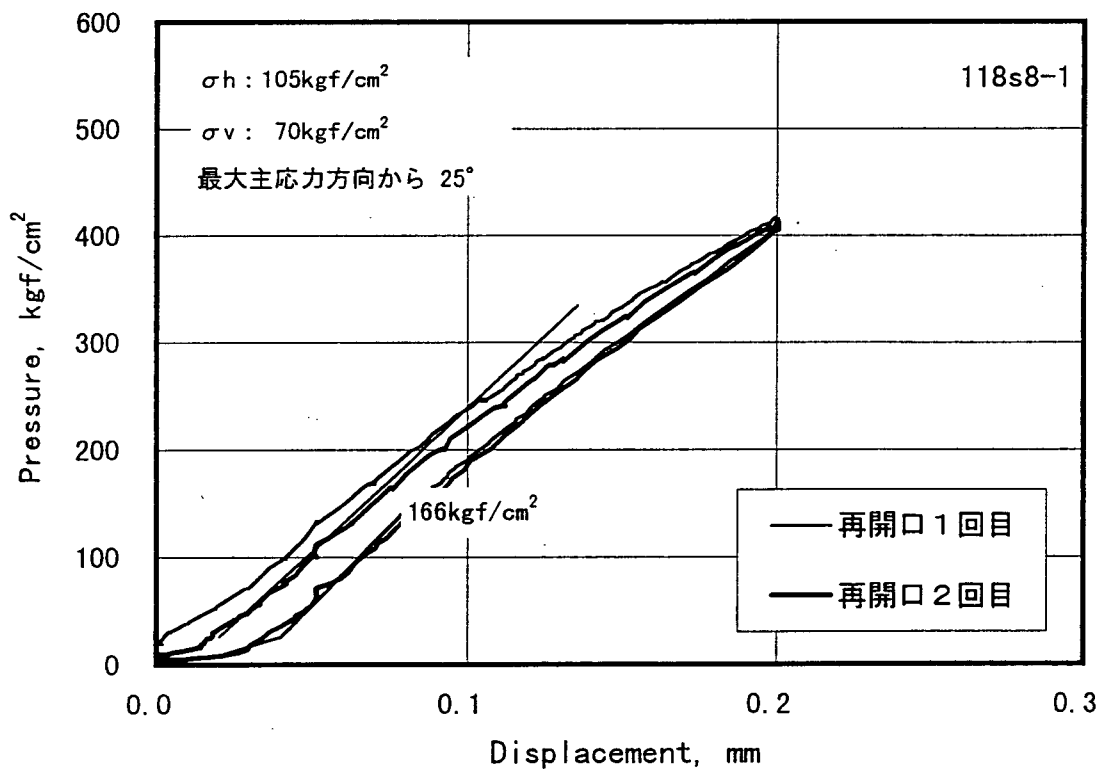


図4.5.22 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

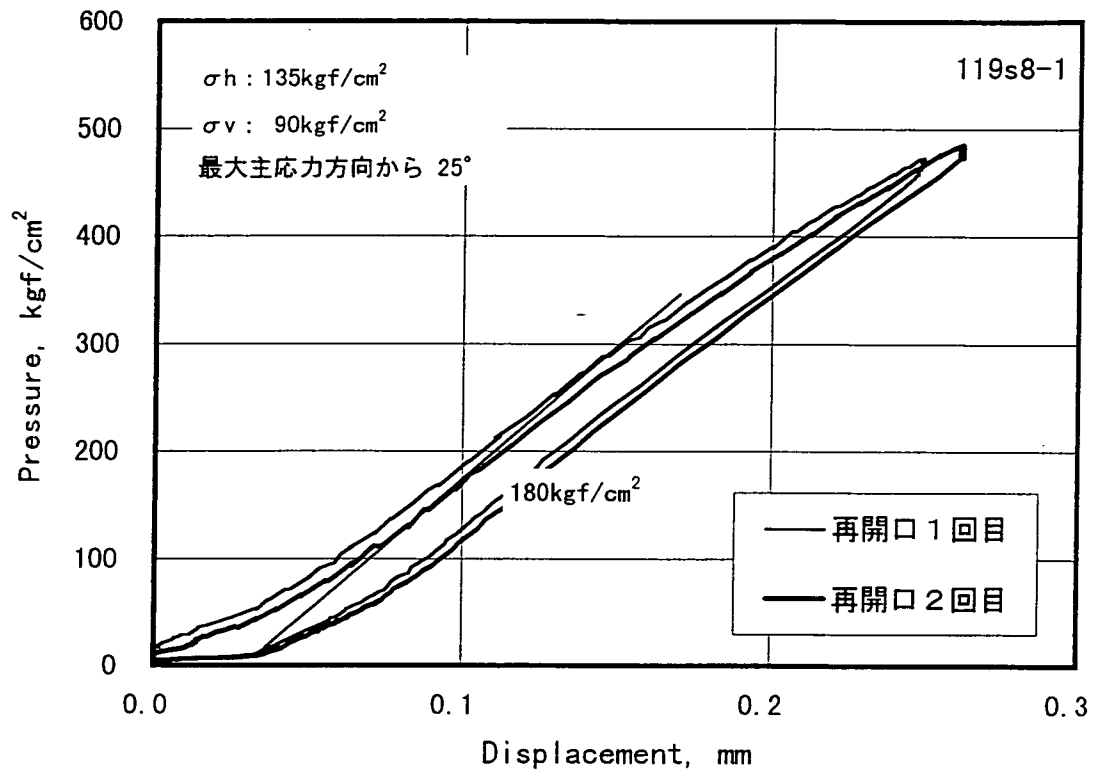


図4.5.23 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

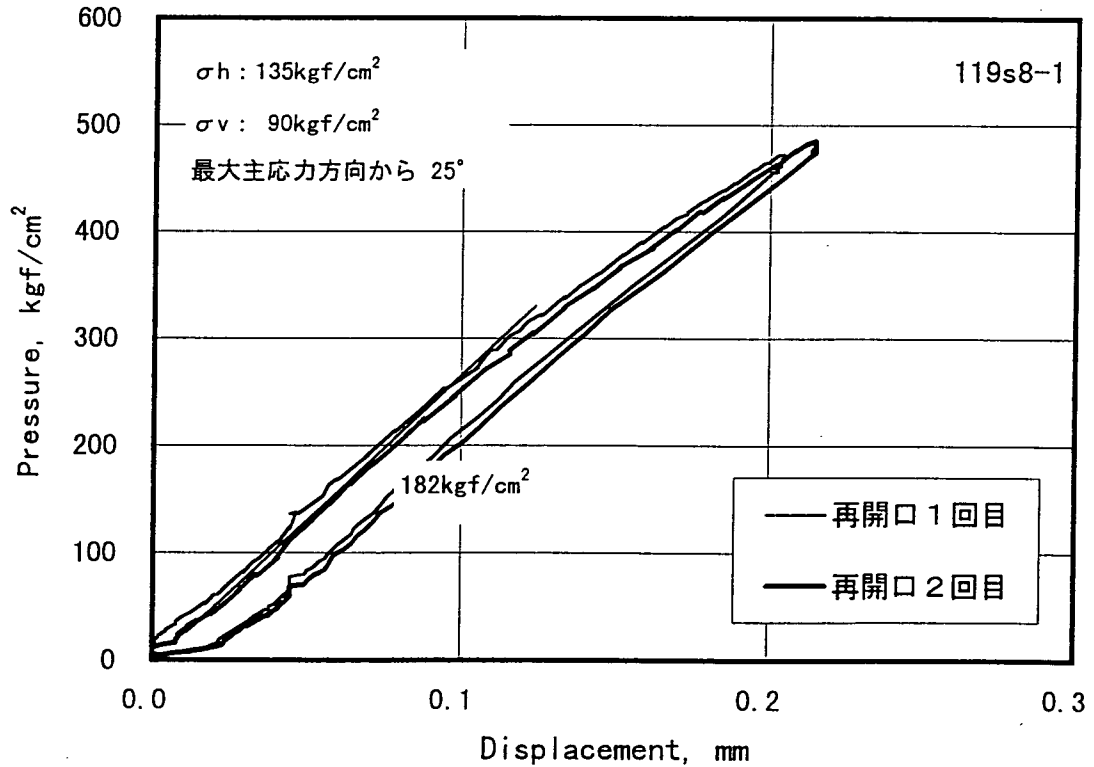


図4.5.23 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

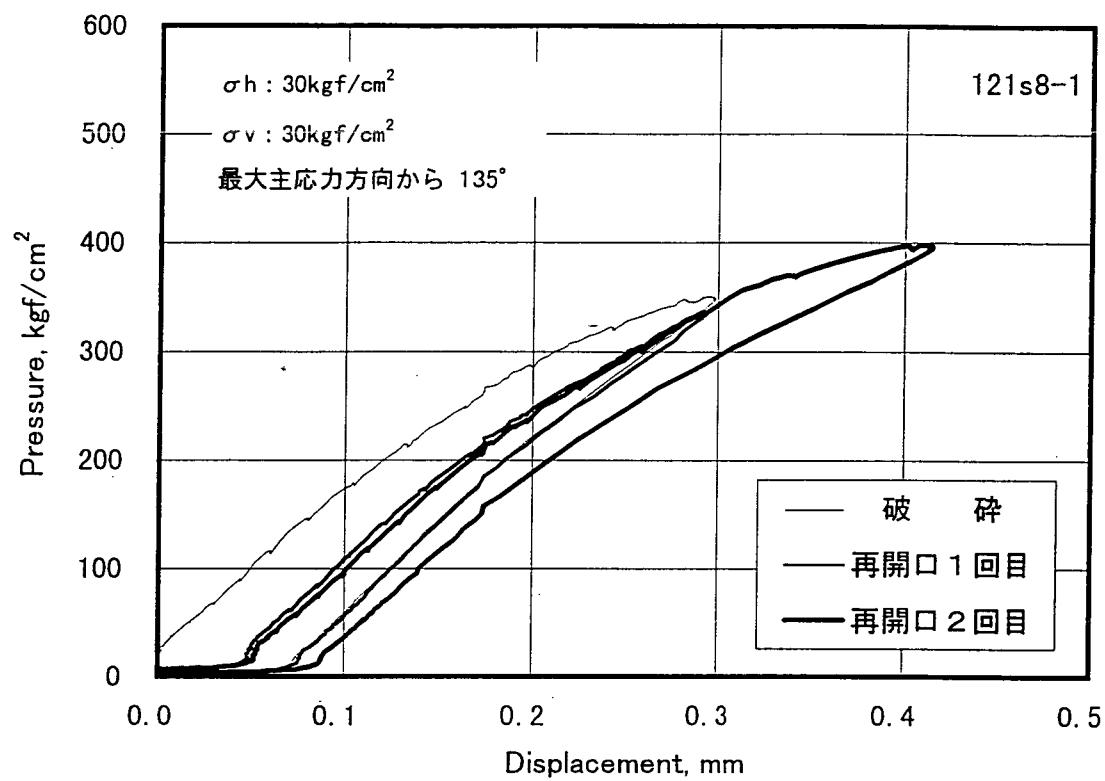


図4.5.24 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

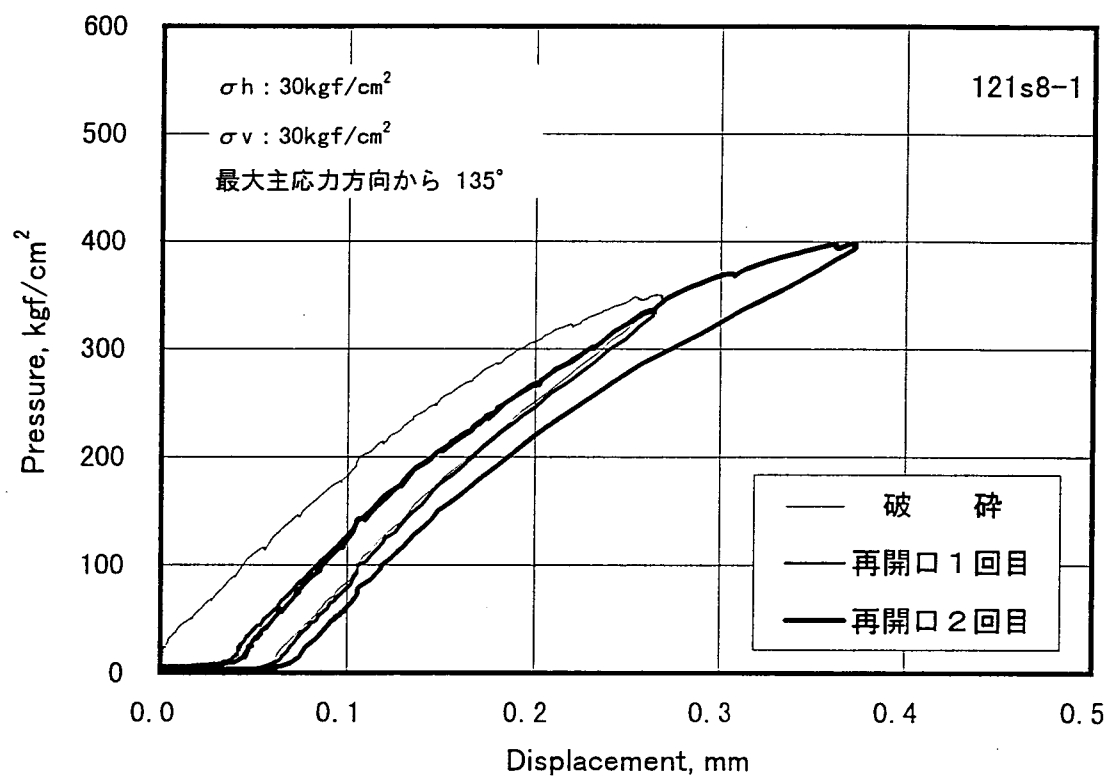


図4.5.24 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

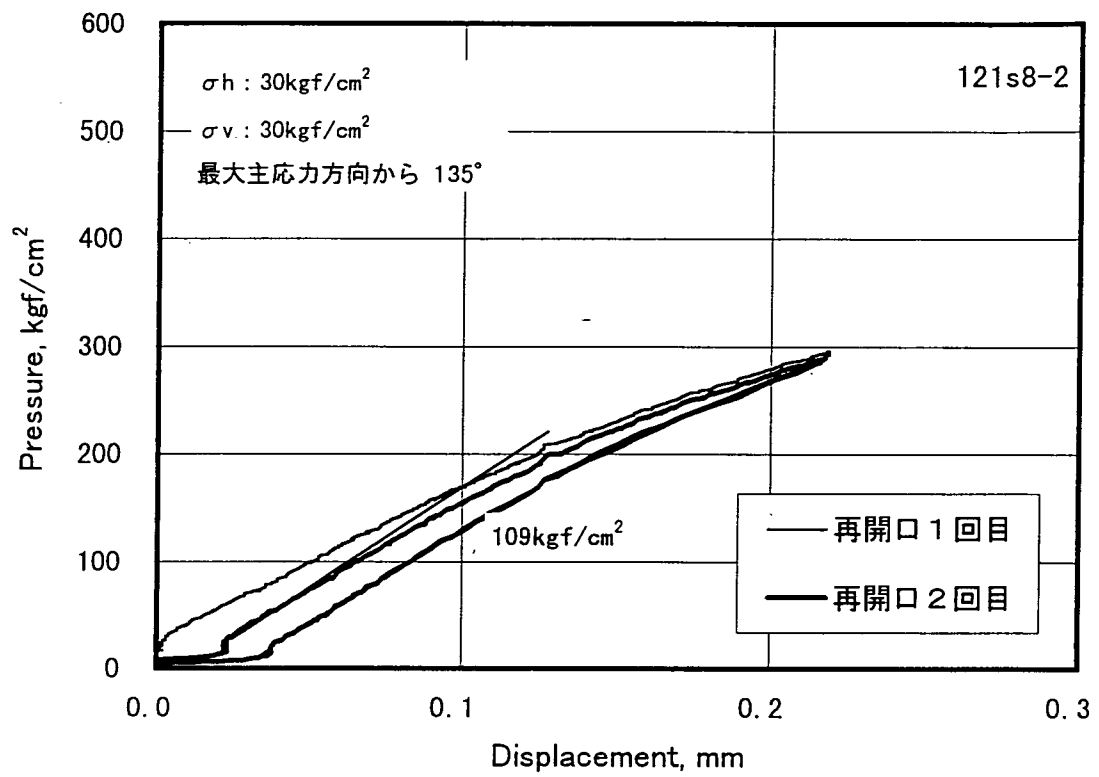


図4.5.25 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

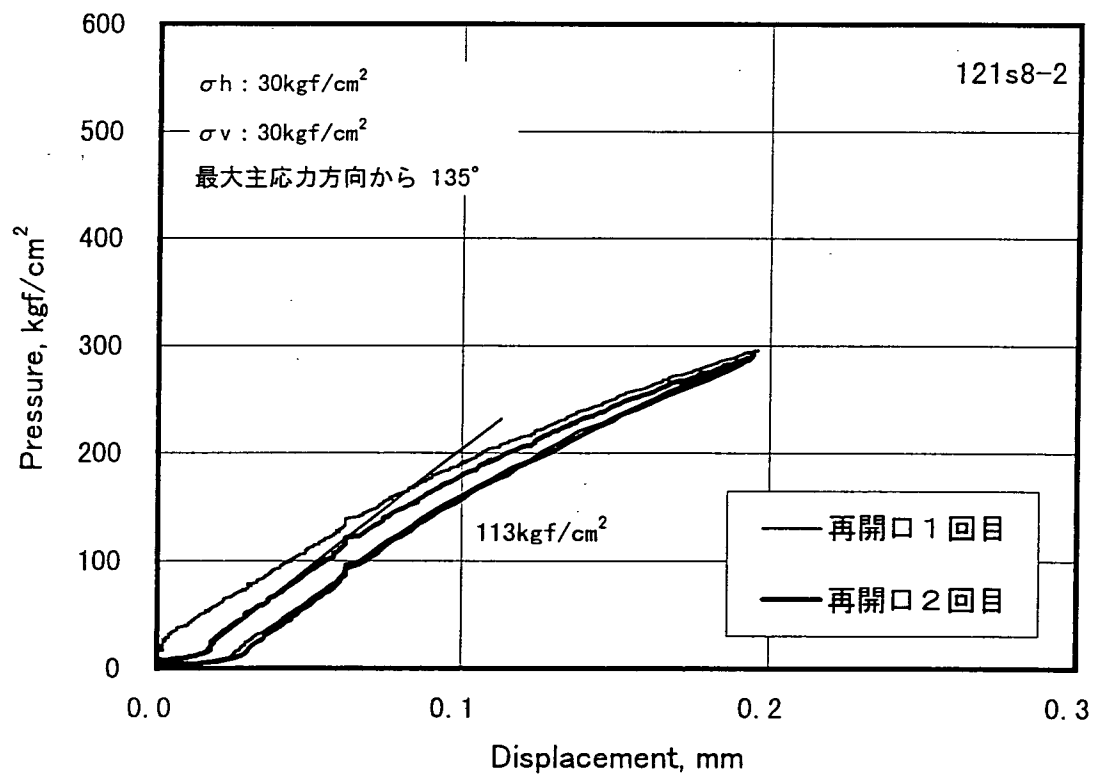


図4.5.25 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

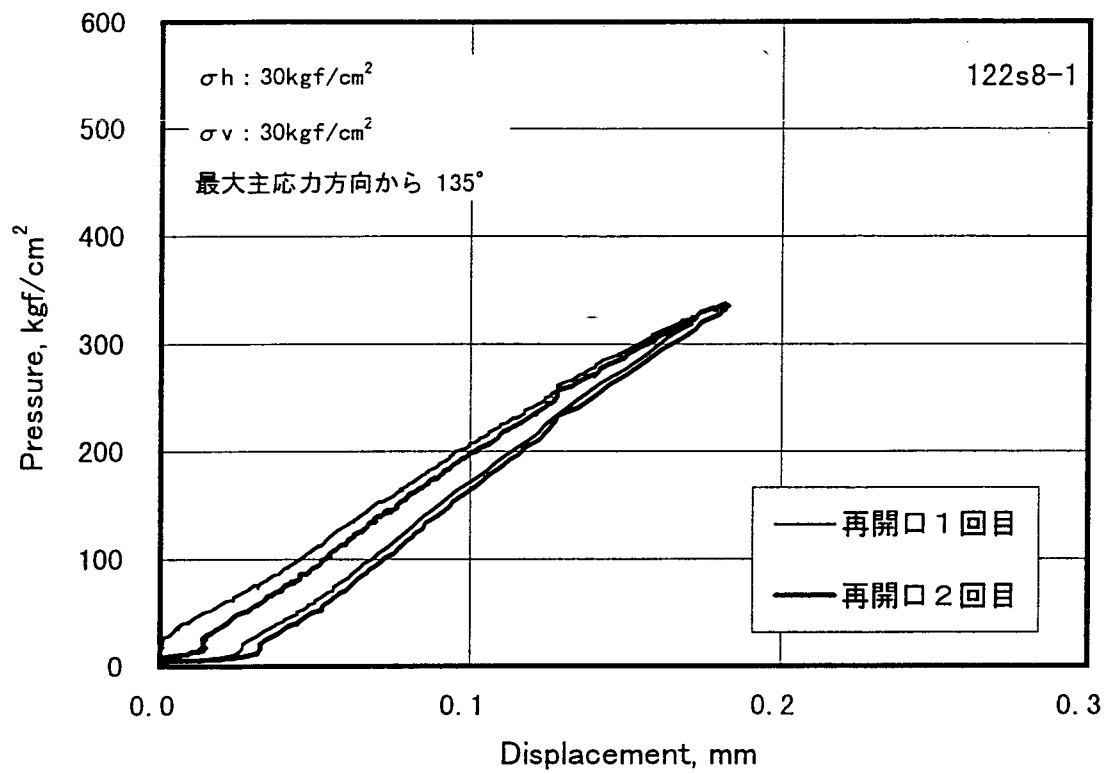


図4.5.26 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

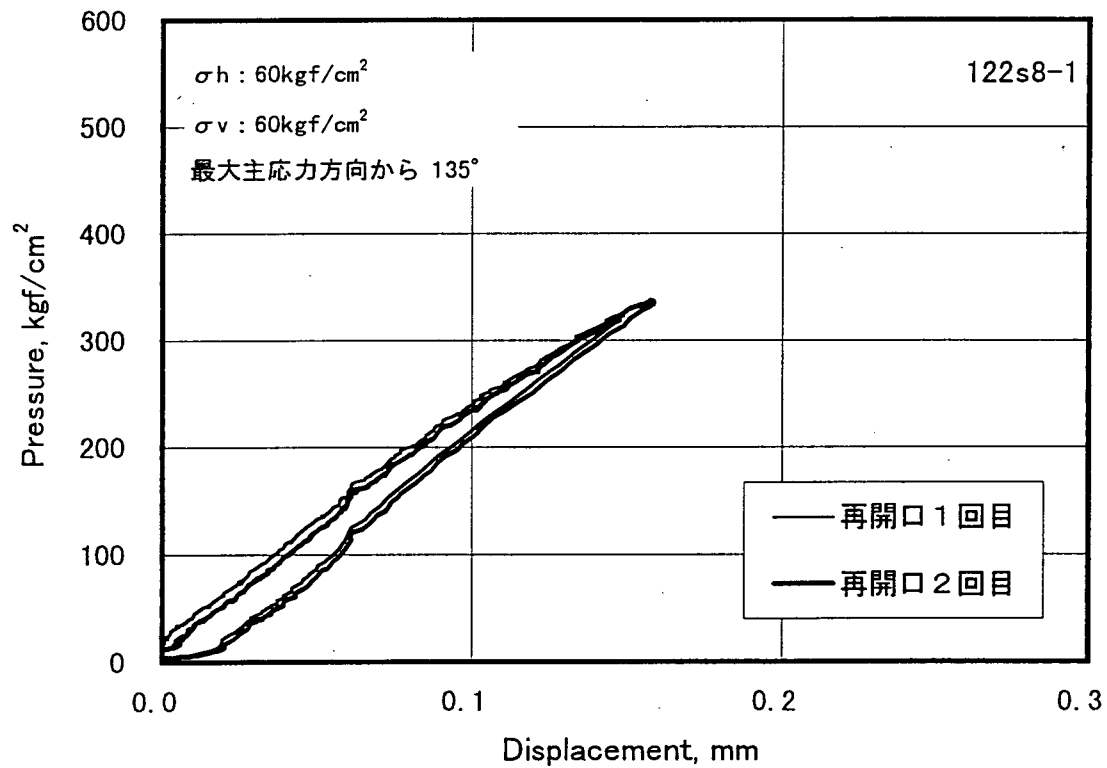


図4.5.26 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

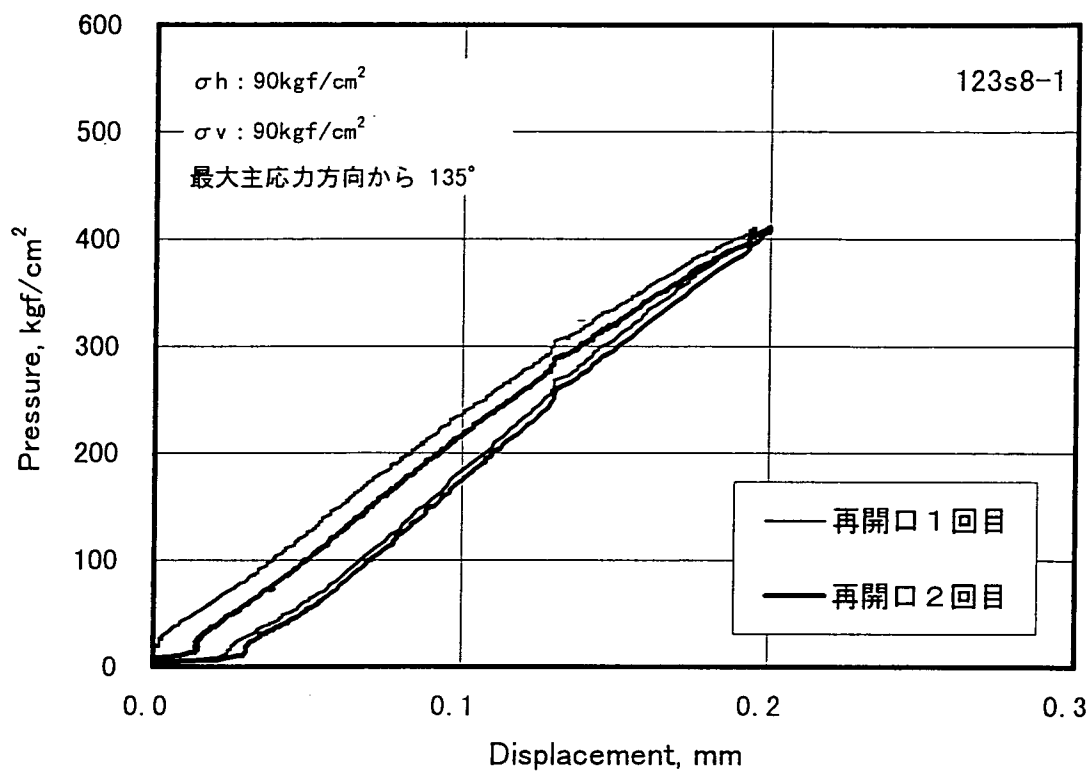


図4.5.27 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

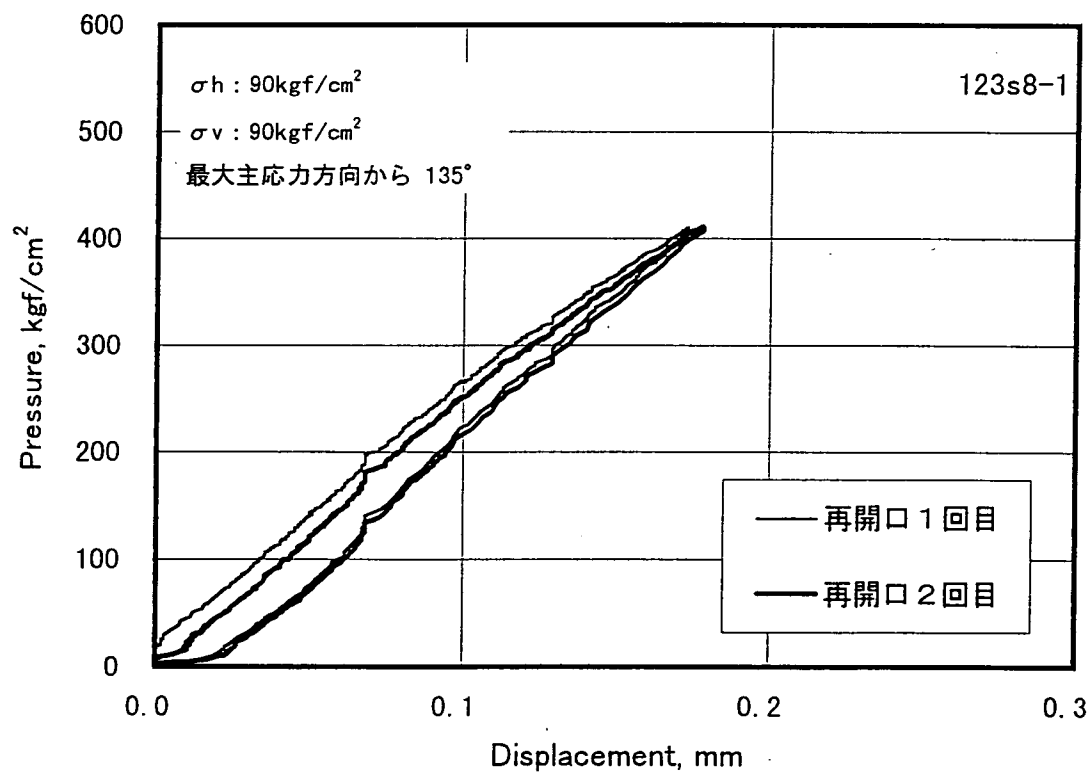


図4.5.27 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

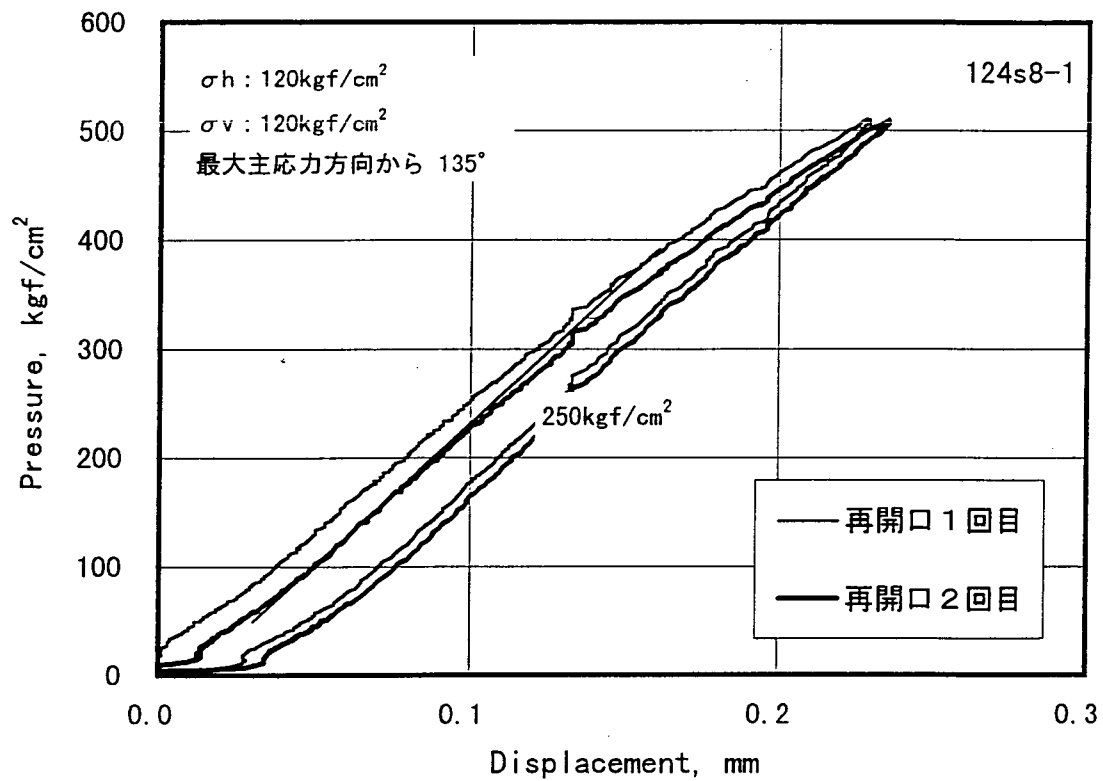


図4.5.28 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

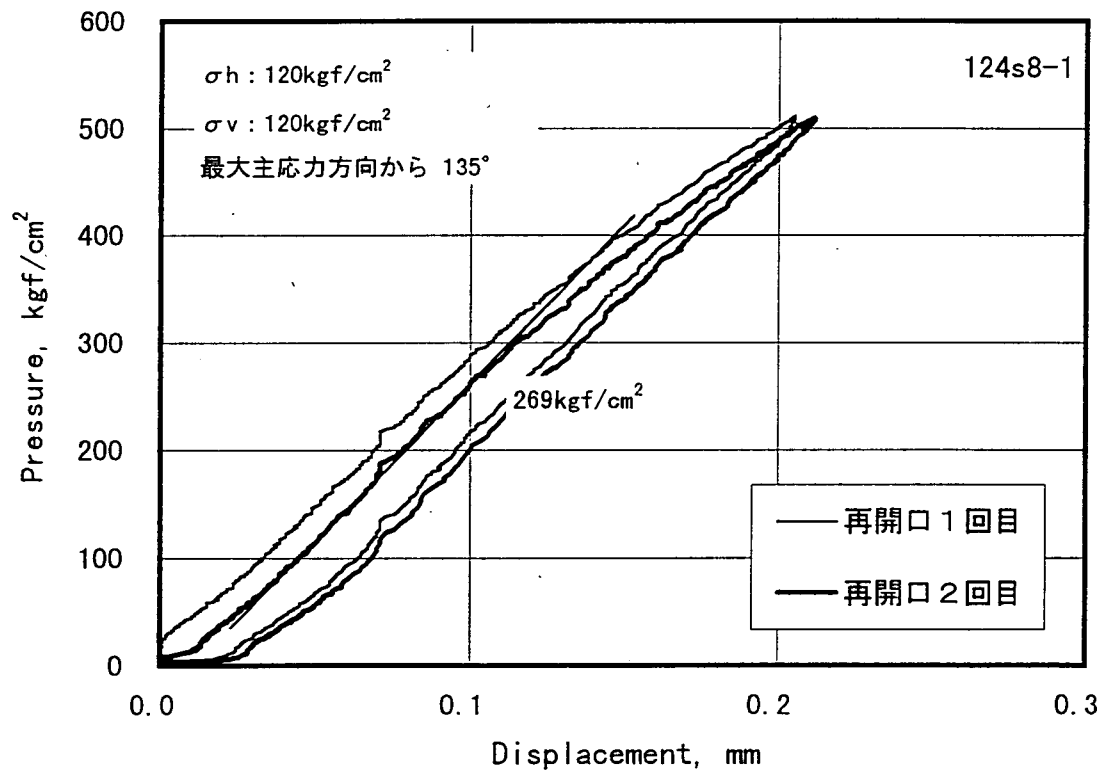


図4.5.28 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

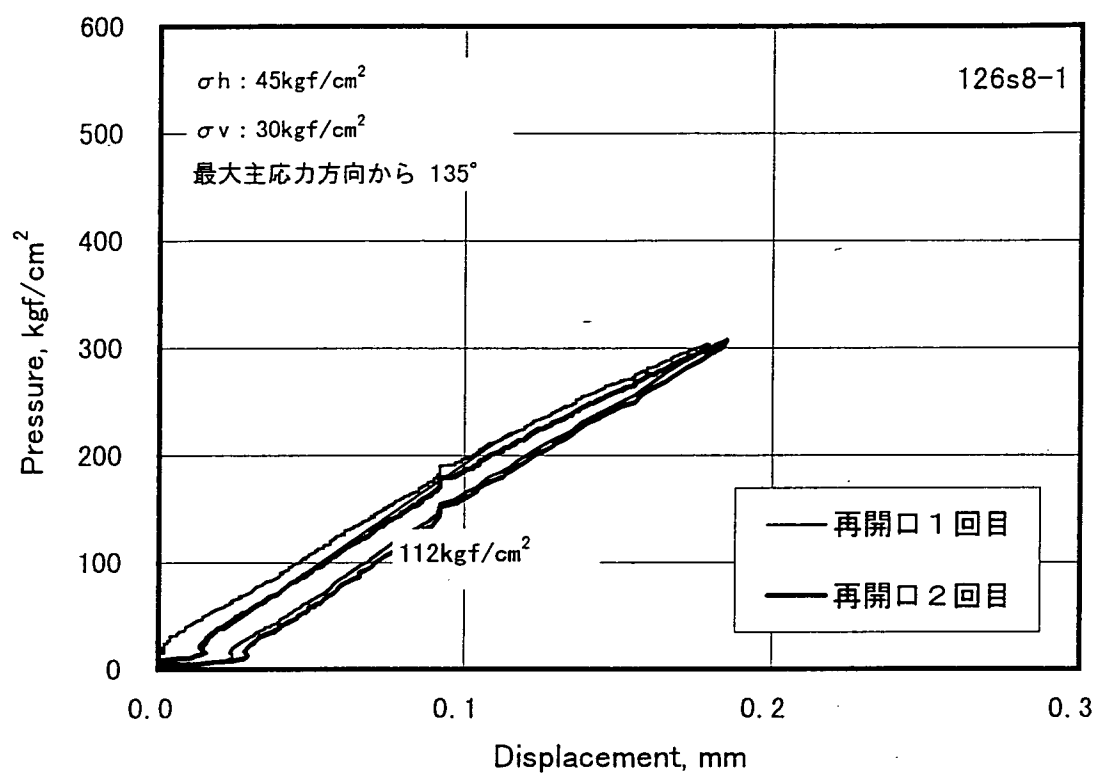


図4.5.29 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

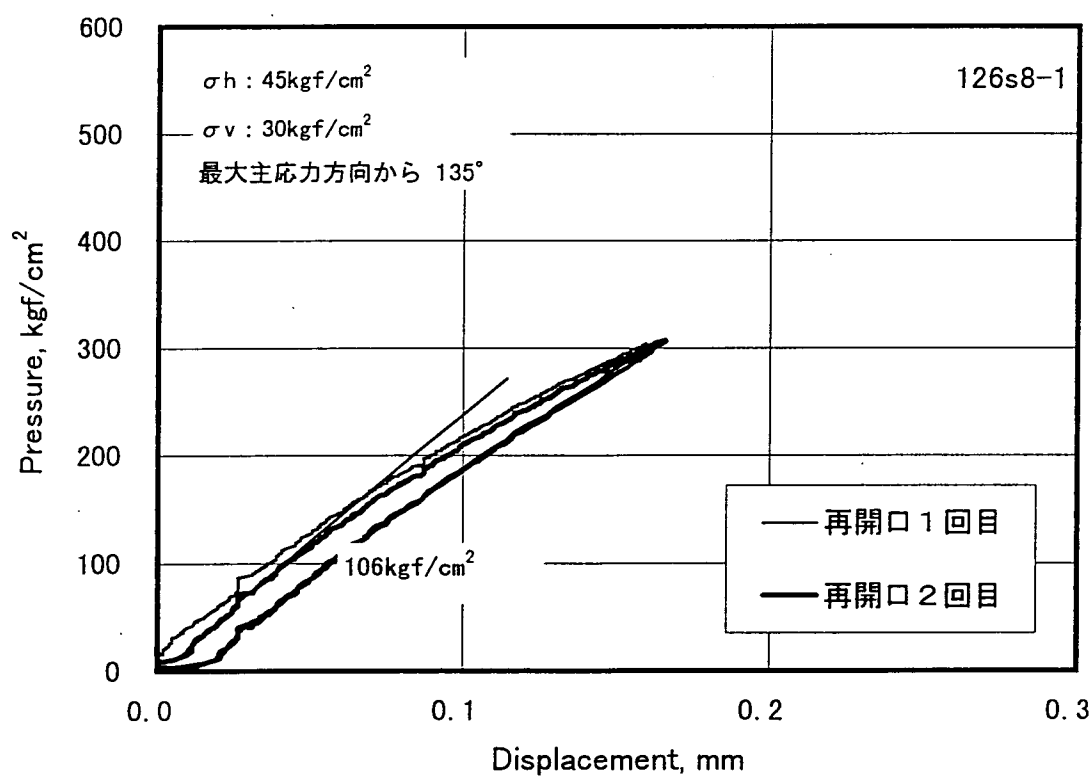


図4.5.29 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

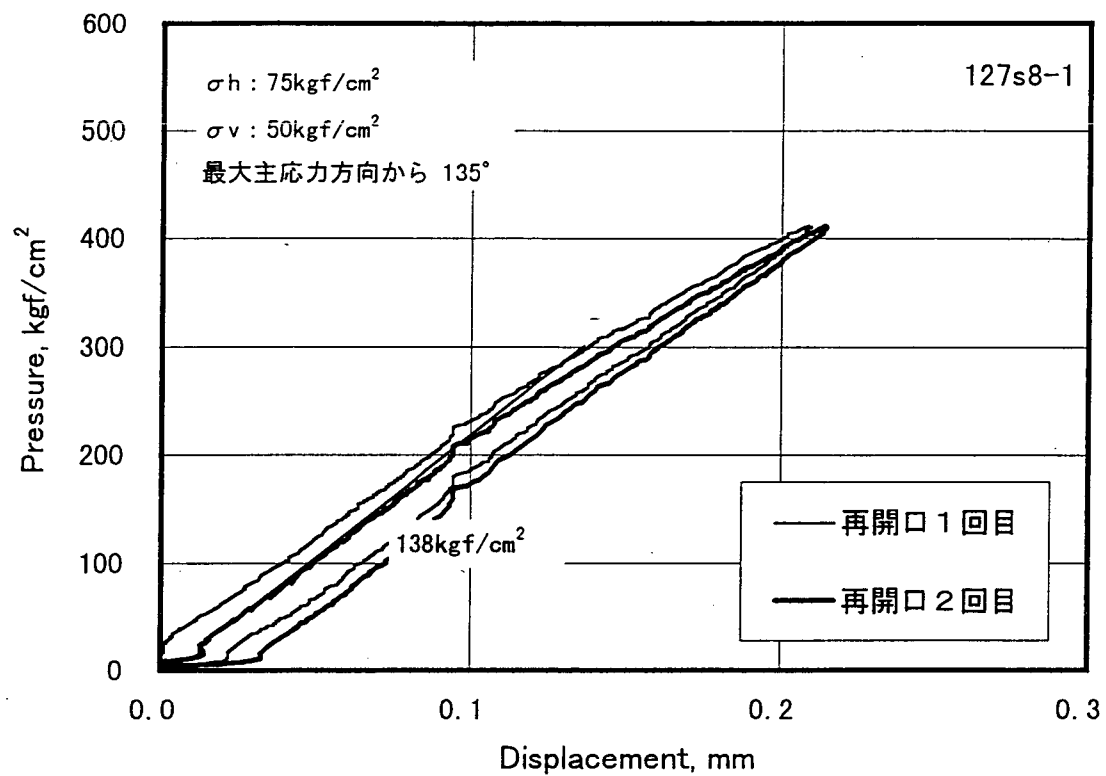


図4.5.30 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

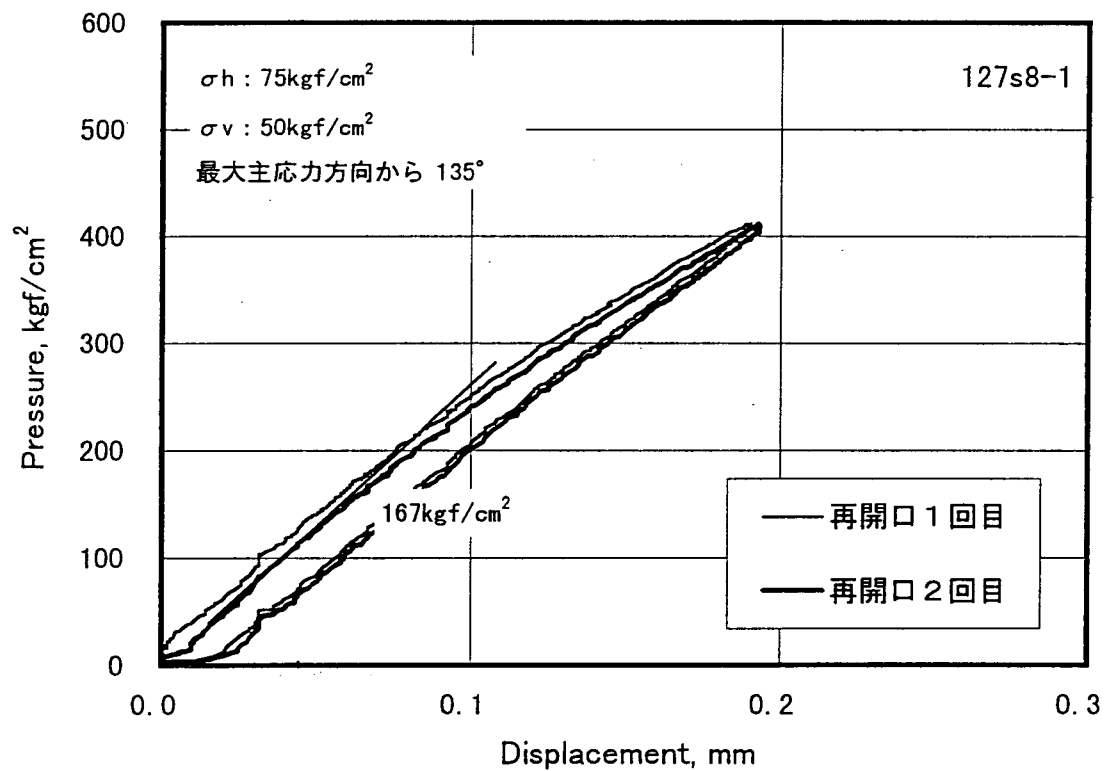


図4.5.30 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

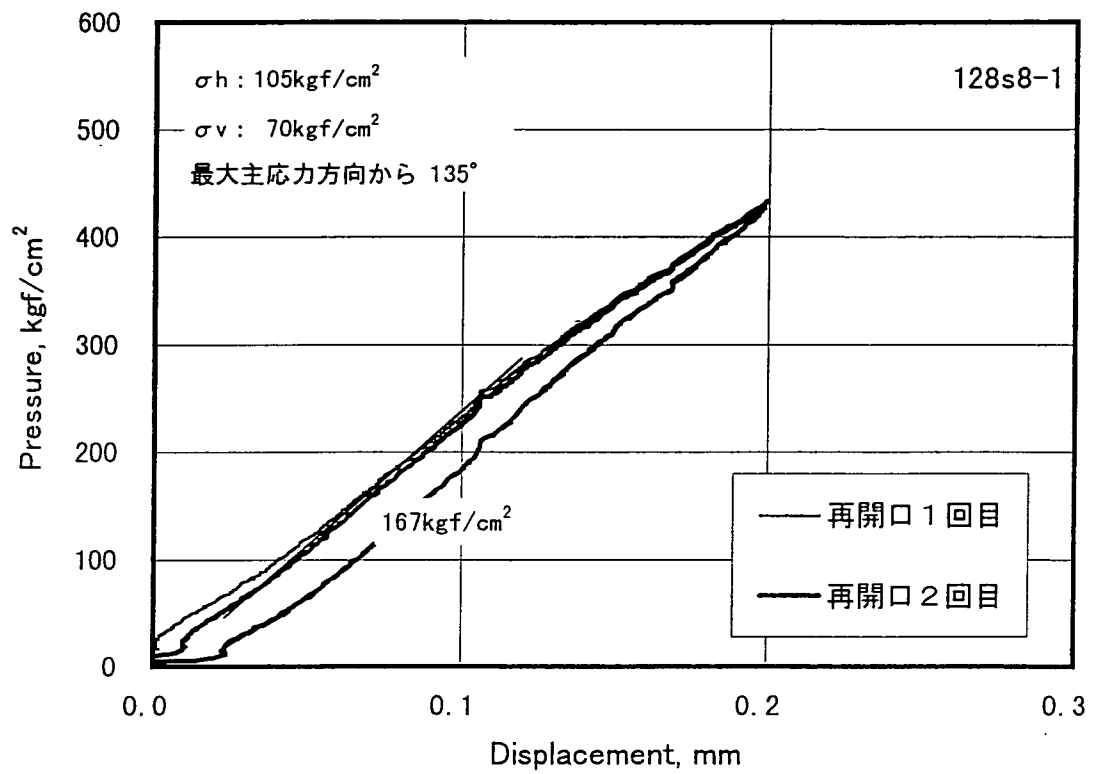


図4.5.31 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

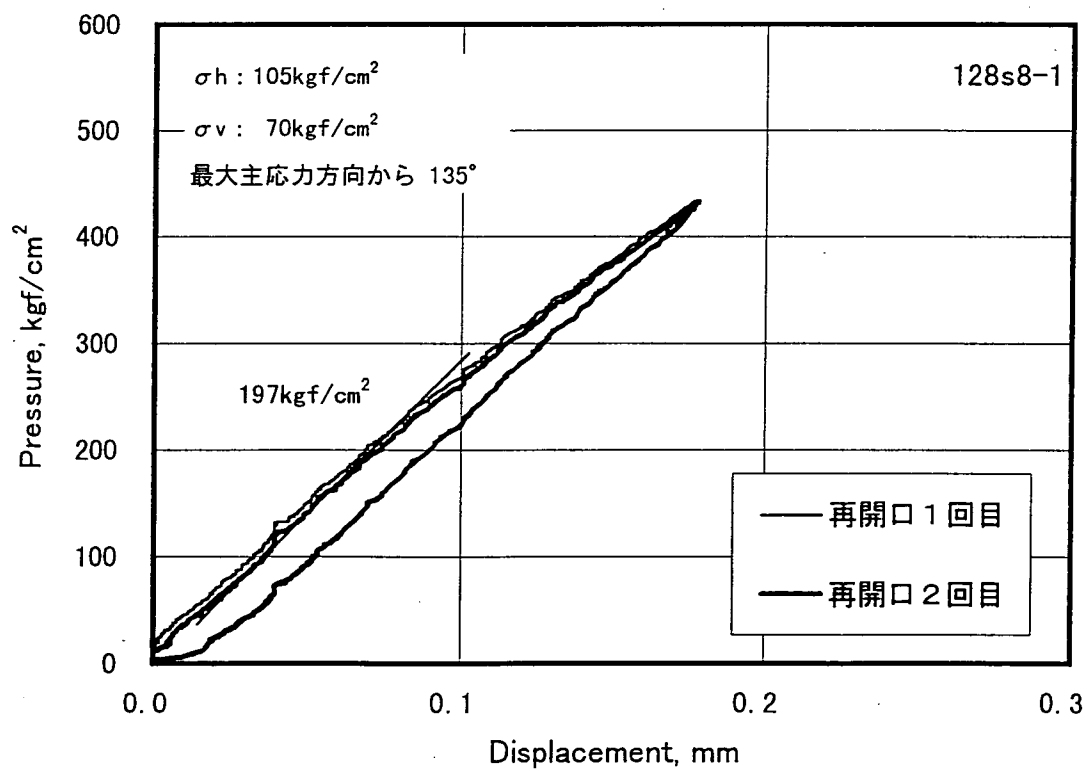


図4.5.31 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

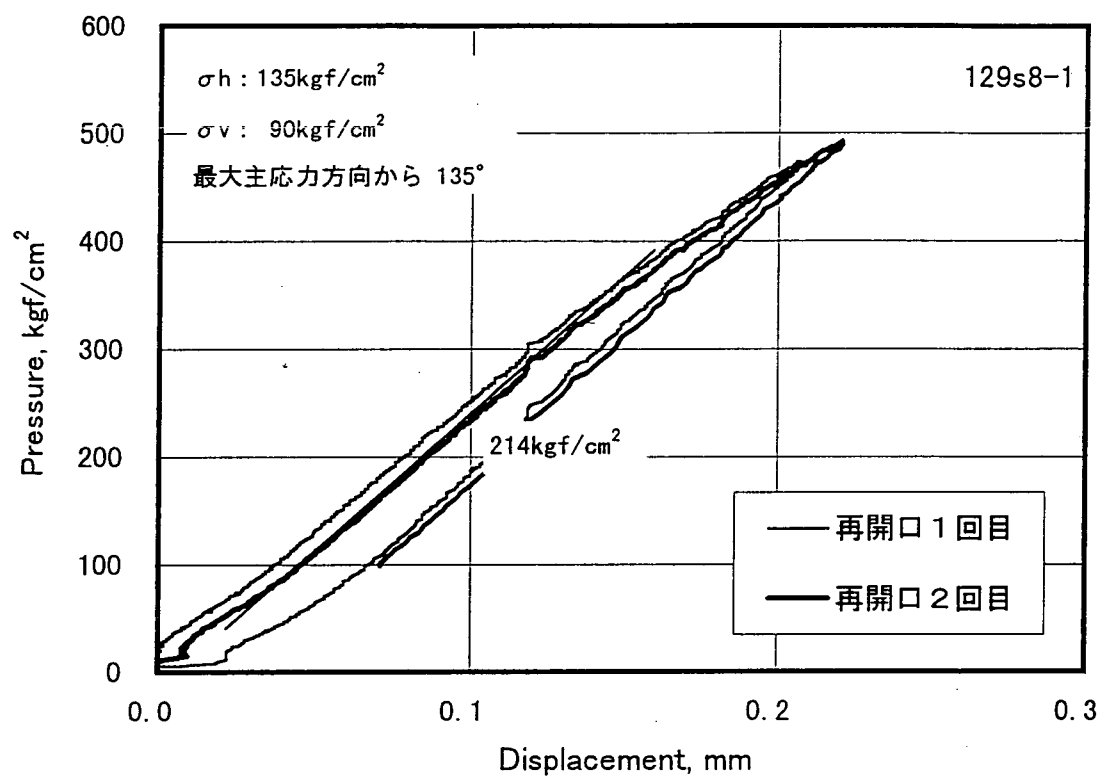


図4.5.32 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

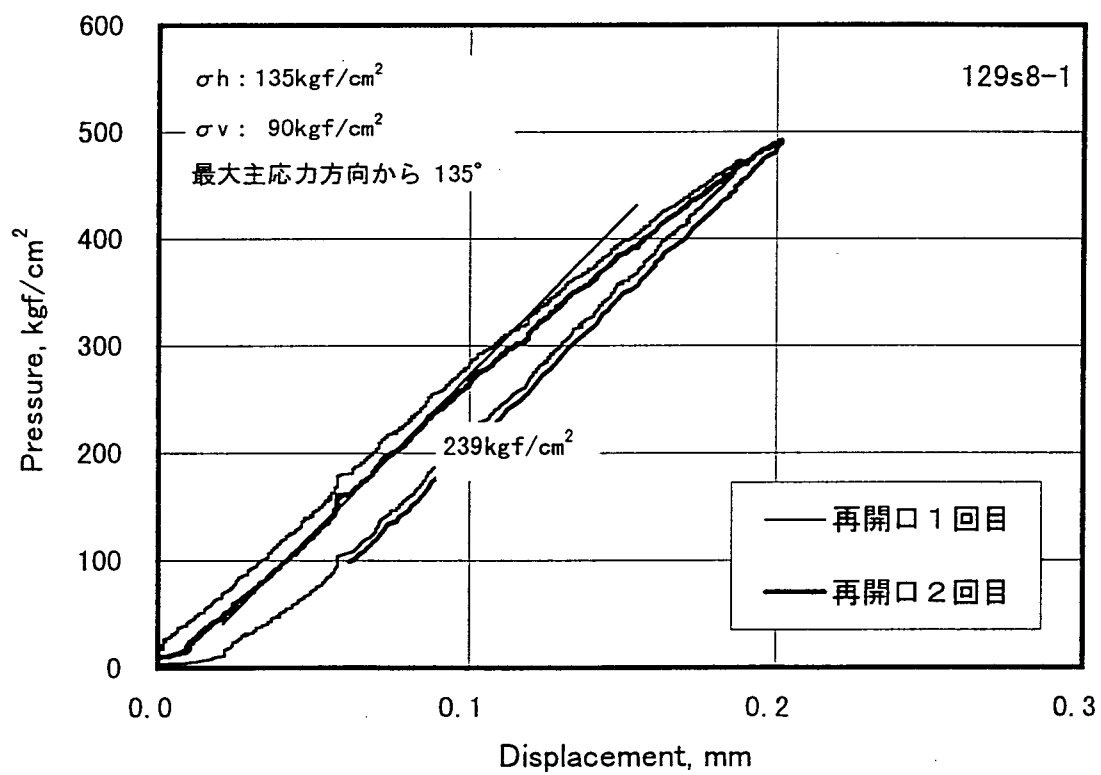


図4.5.32 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

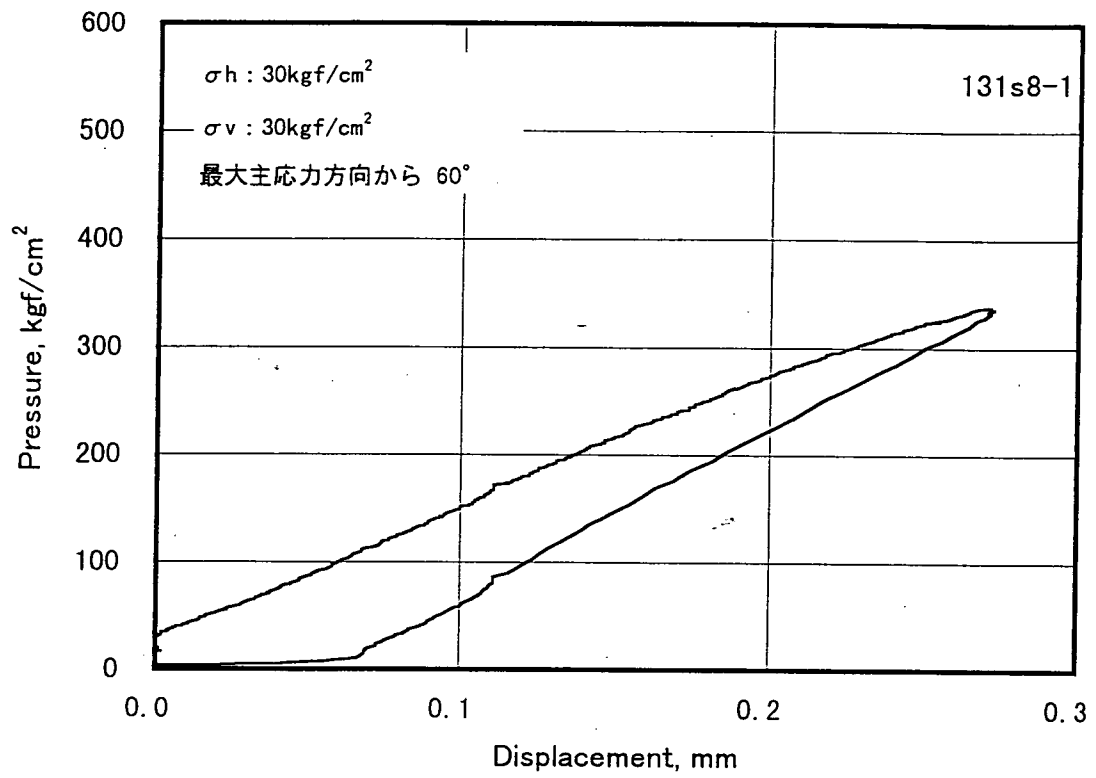


図4.5.33 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

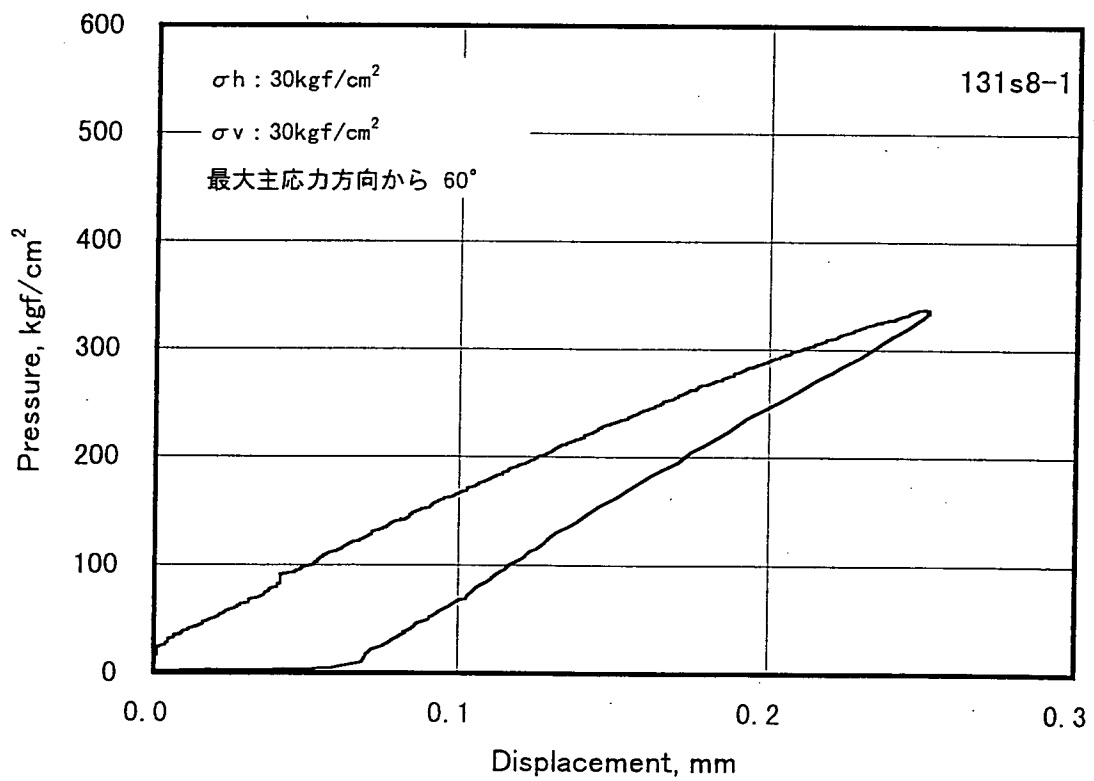


図4.5.33 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

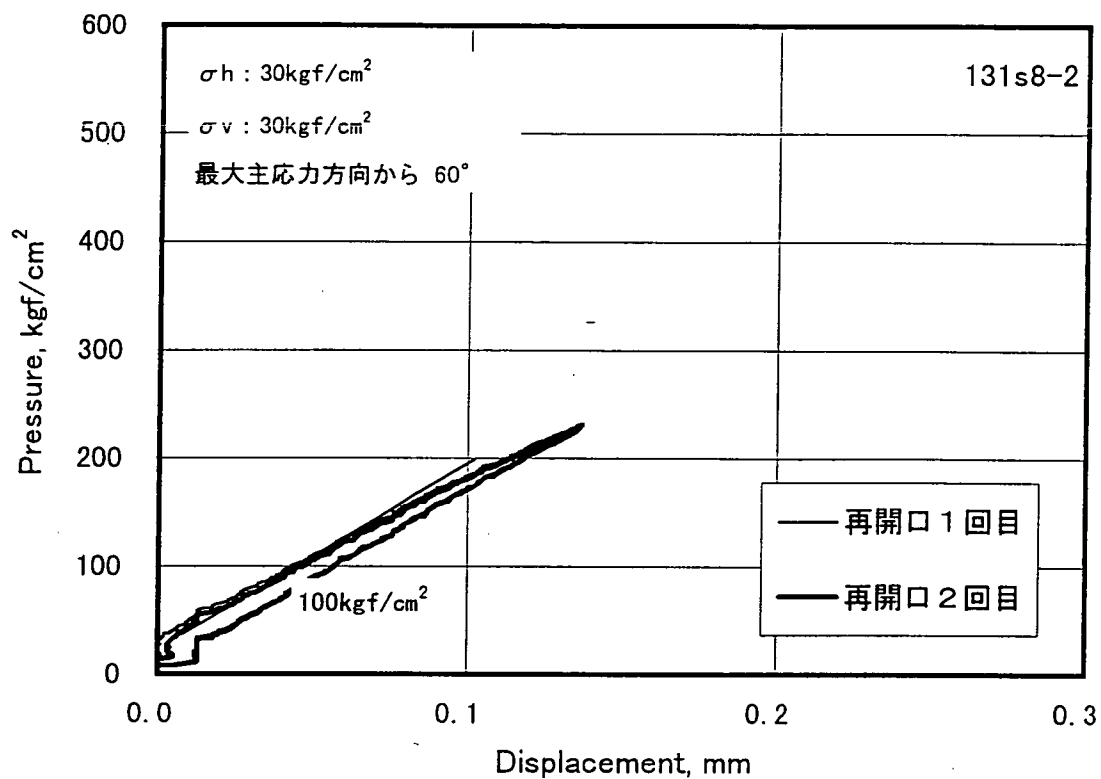


図4.5.34 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

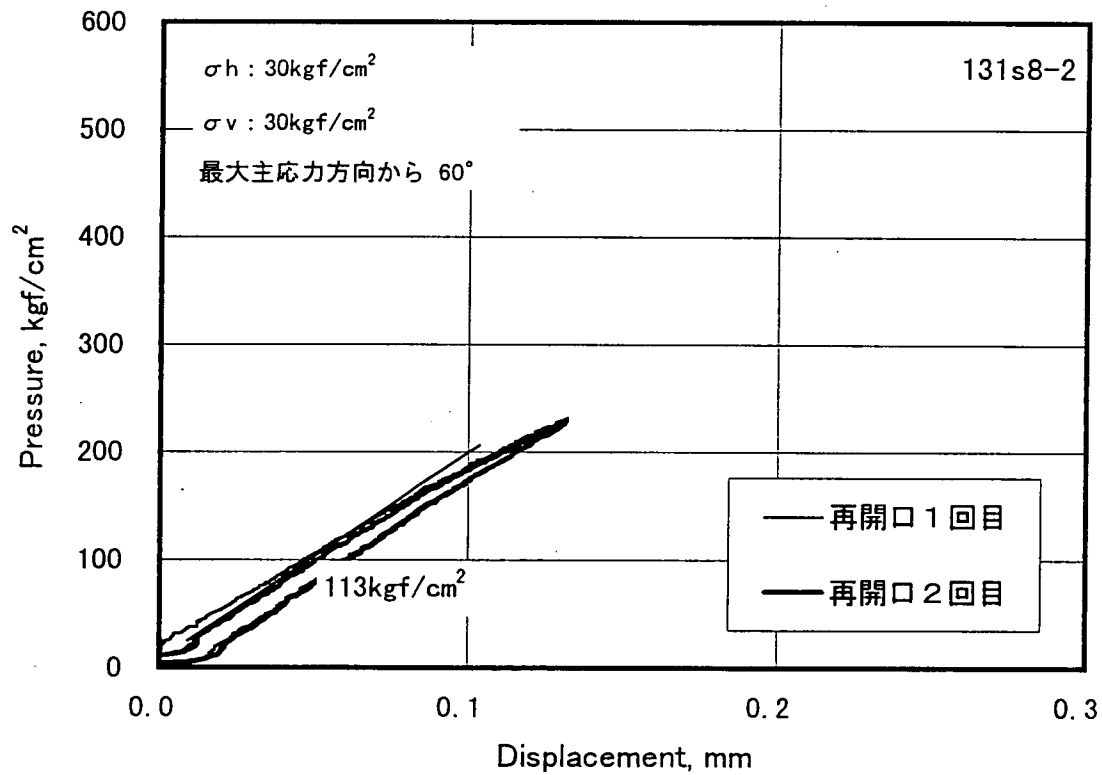


図4.5.34 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

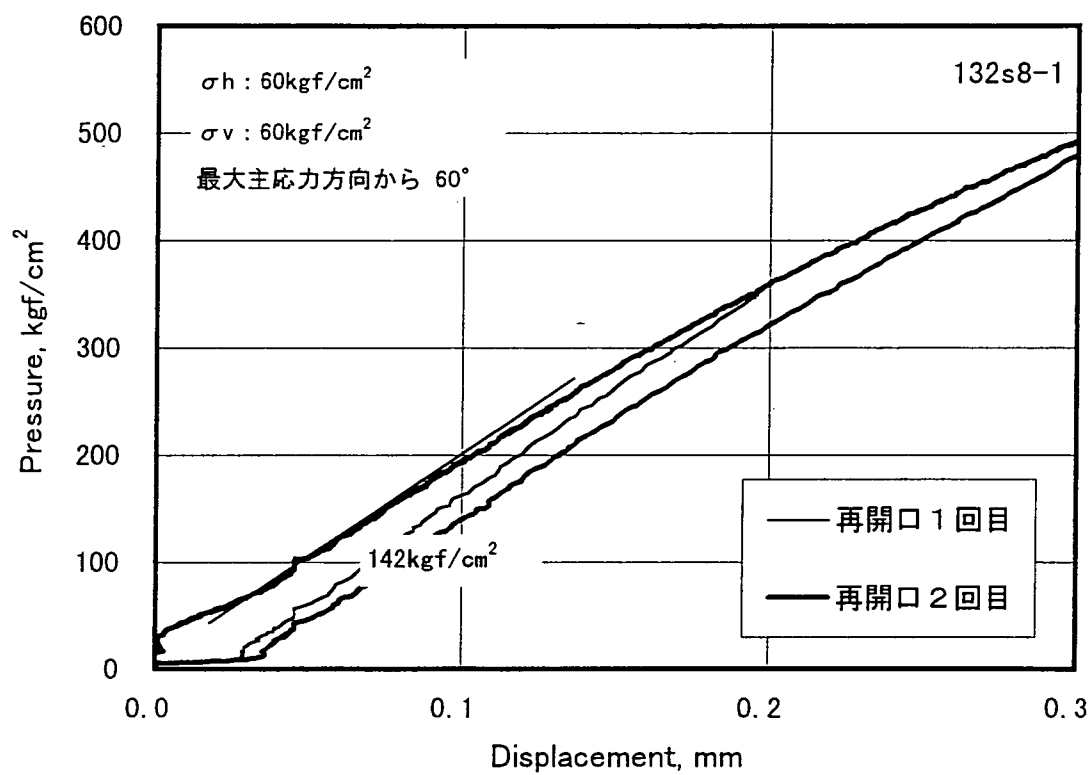


図4.5.35 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

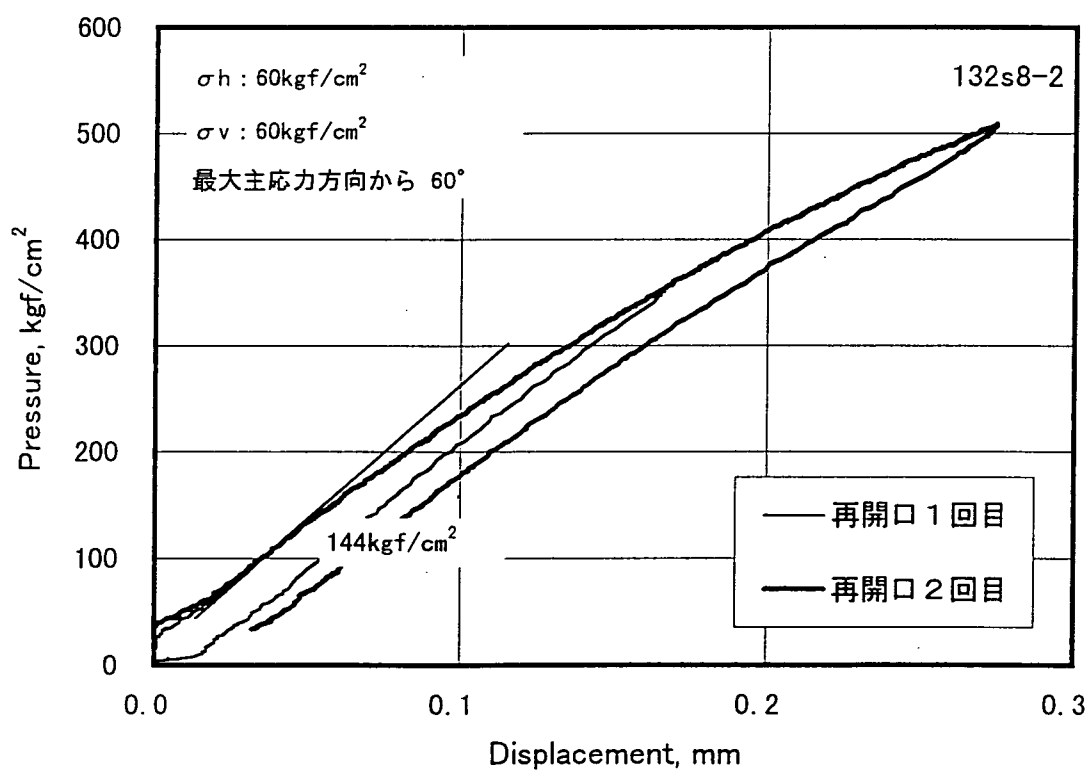


図4.5.35 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

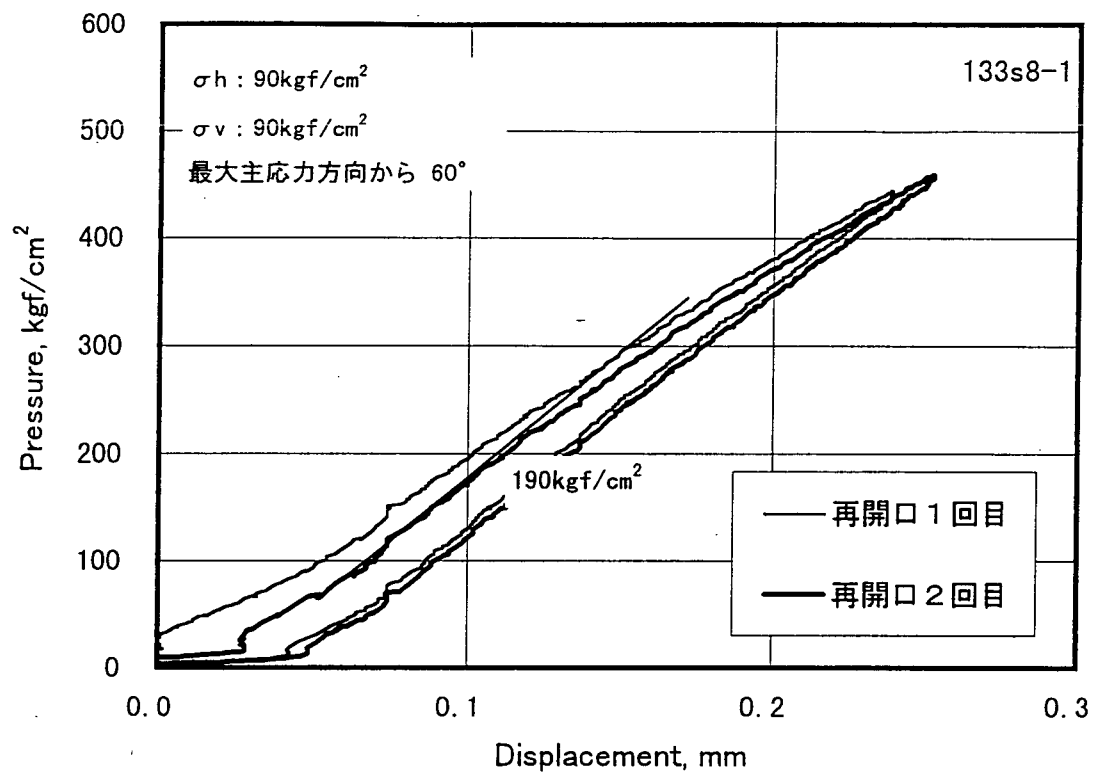


図4.5.36 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

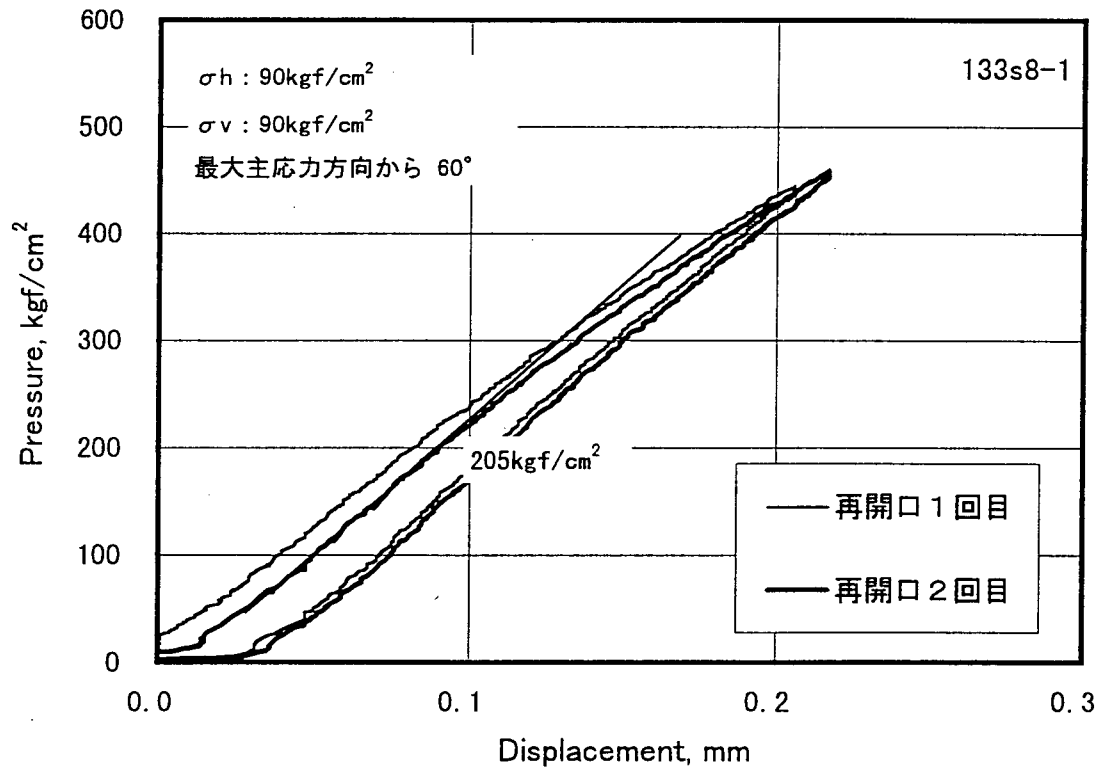


図4.5.36 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

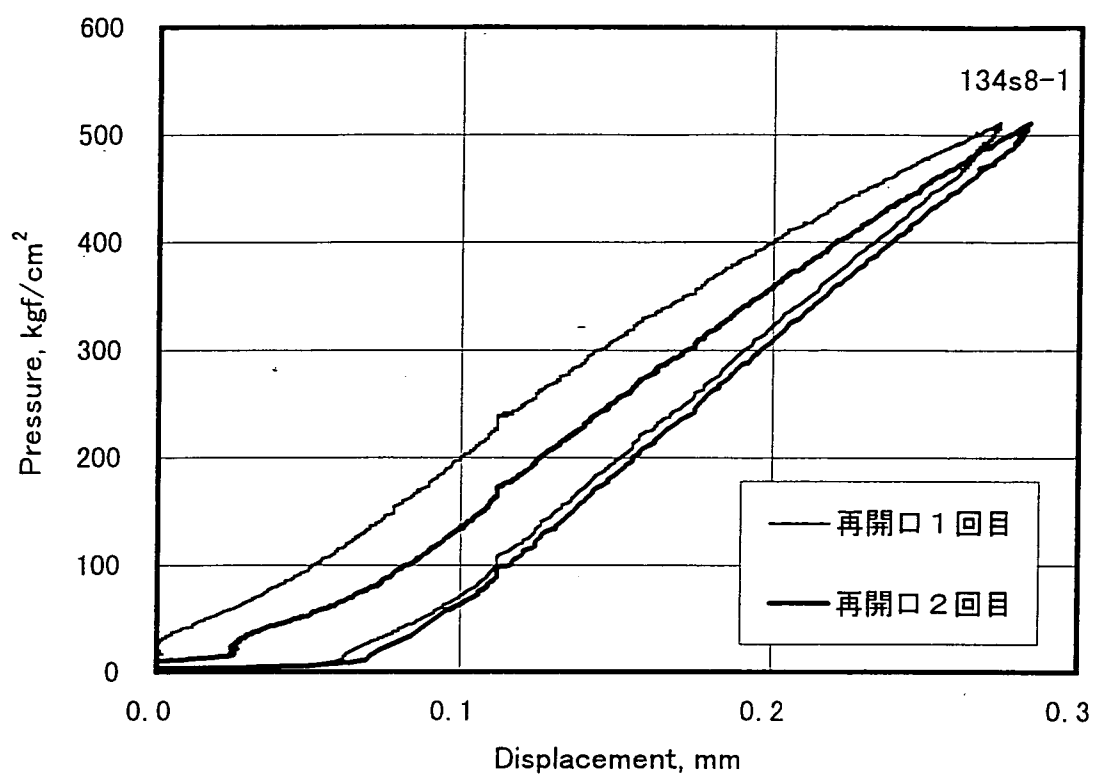


図4.5.37 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

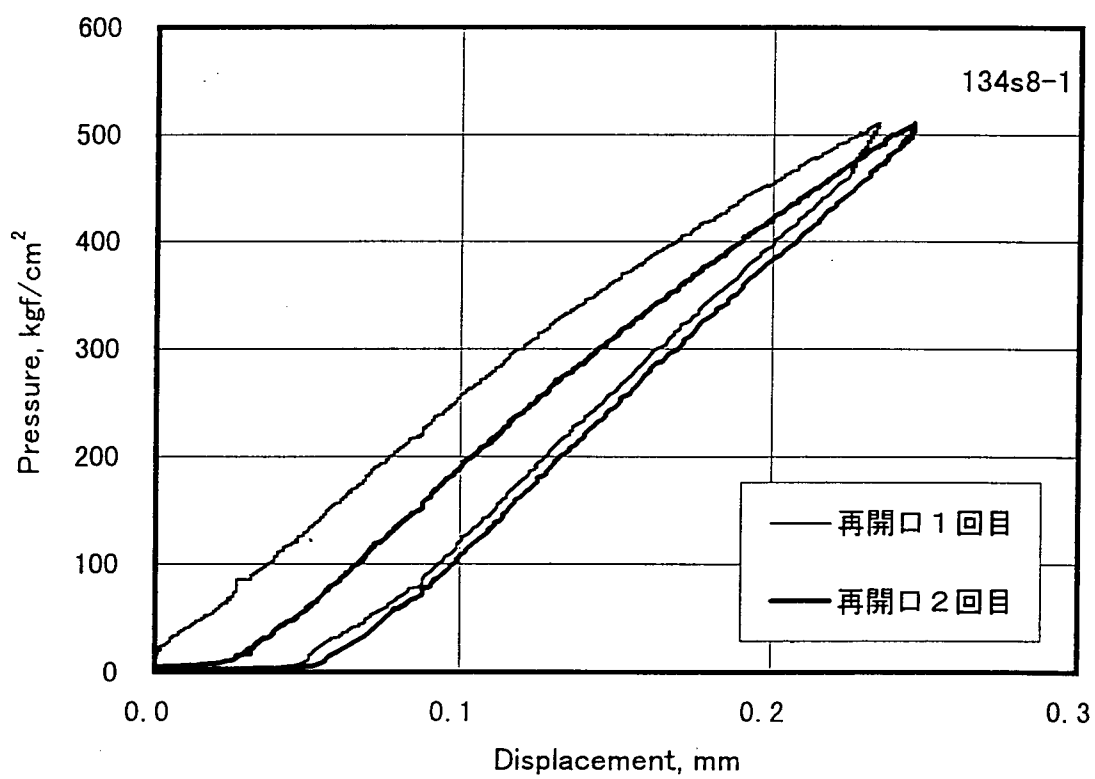


図4.5.37 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

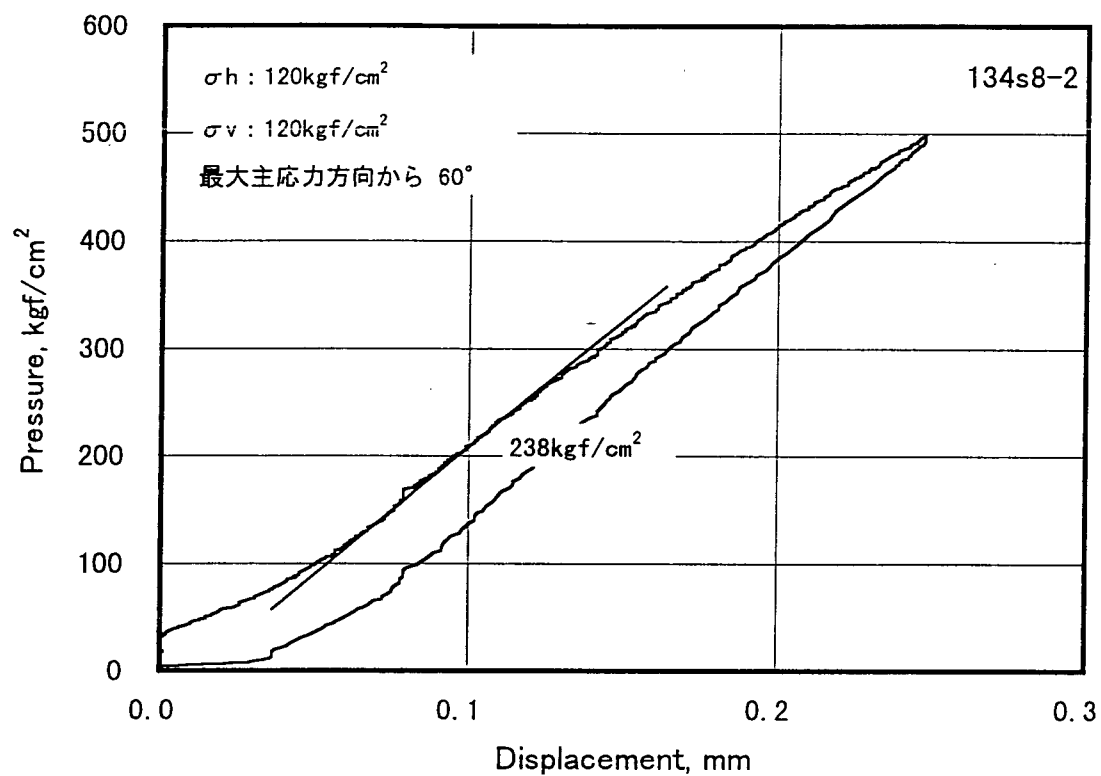


図4.5.38 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

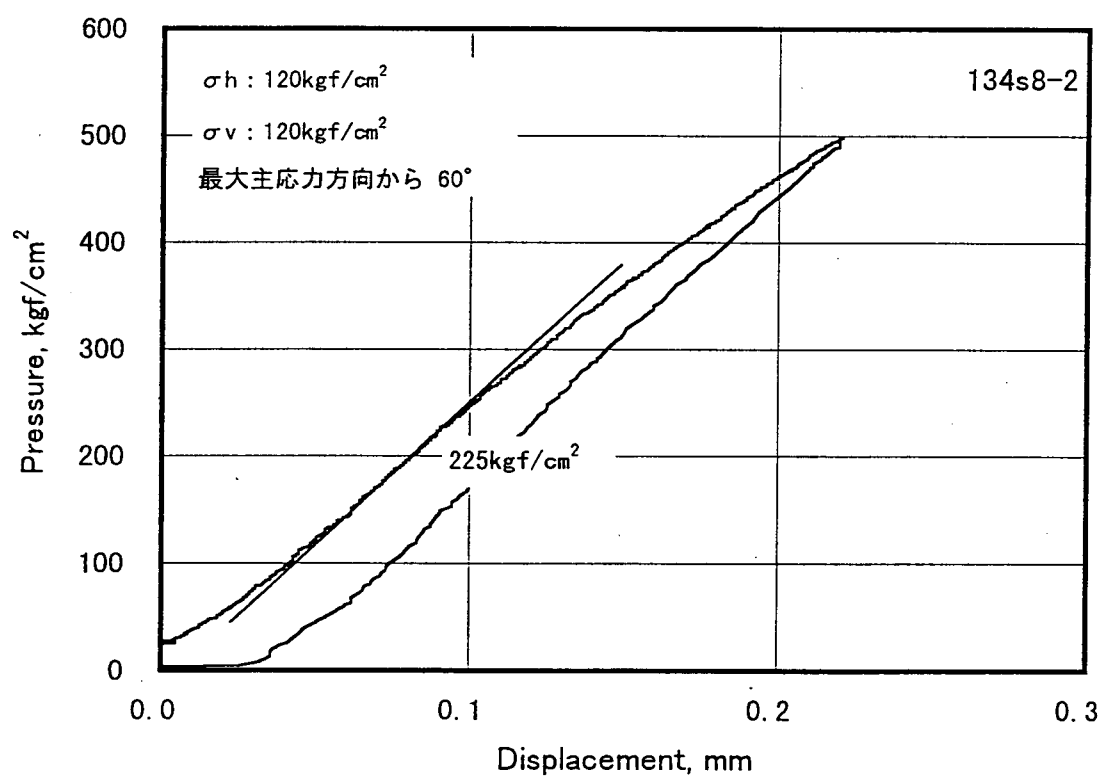


図4.5.38 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

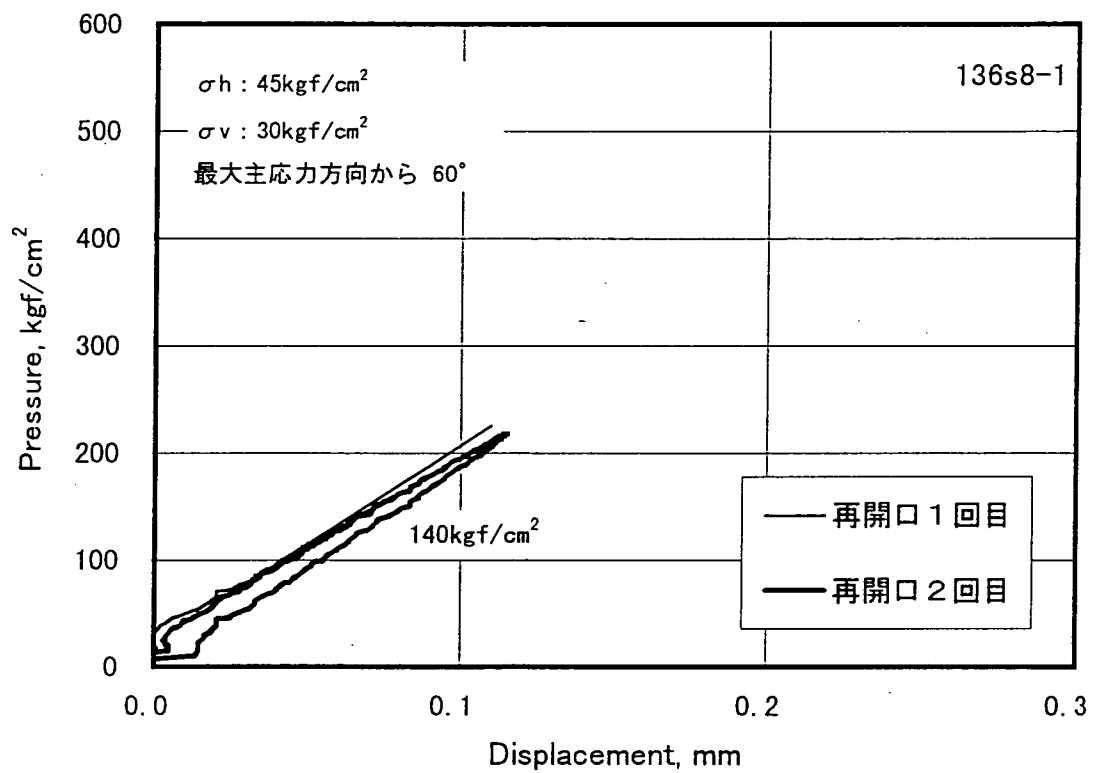


図4. 5. 39 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

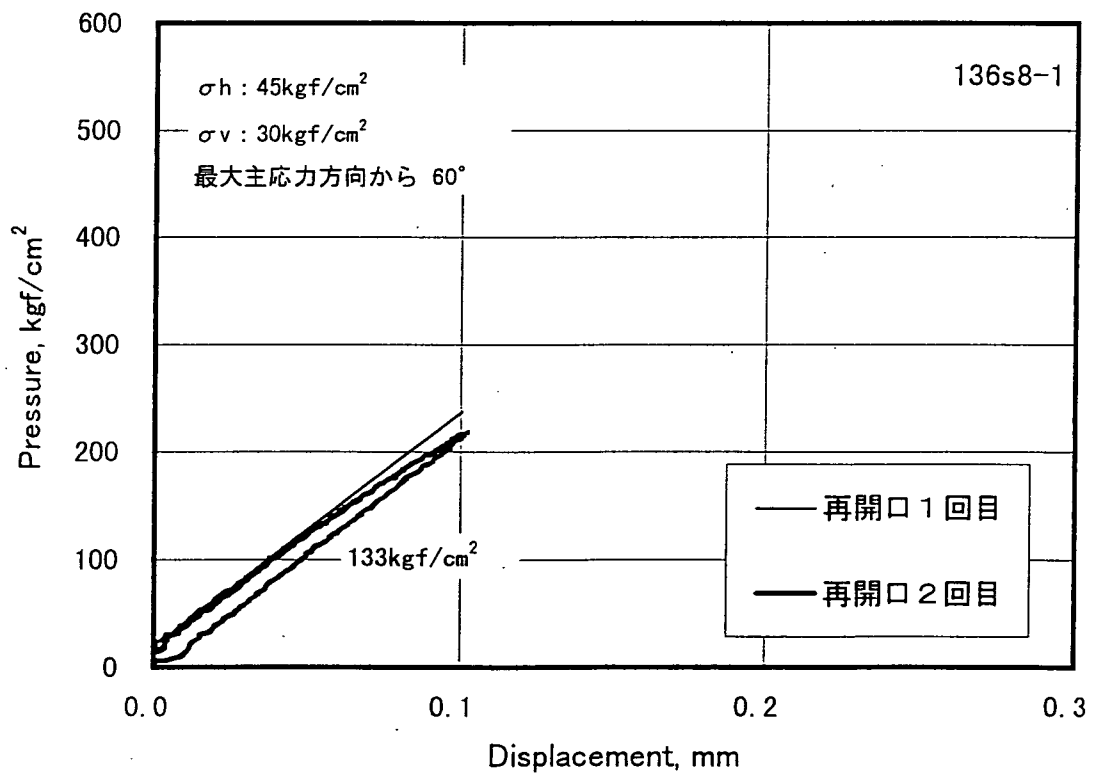


図4. 5. 39 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

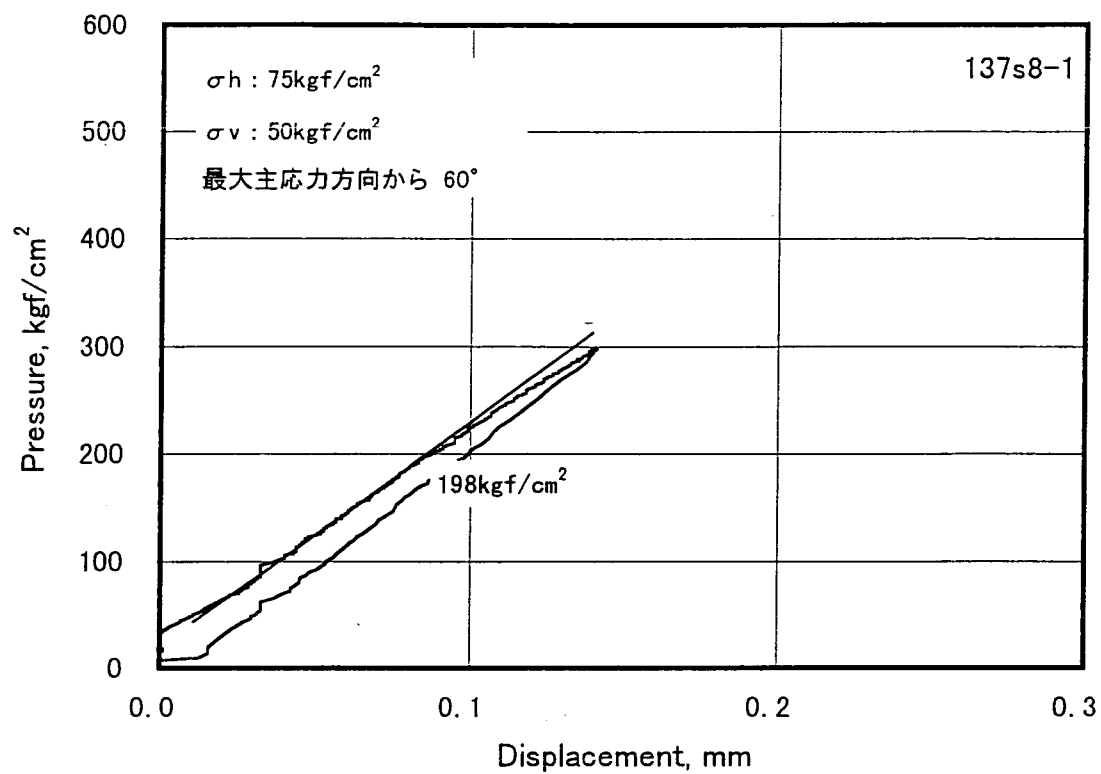


図4.5.40 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

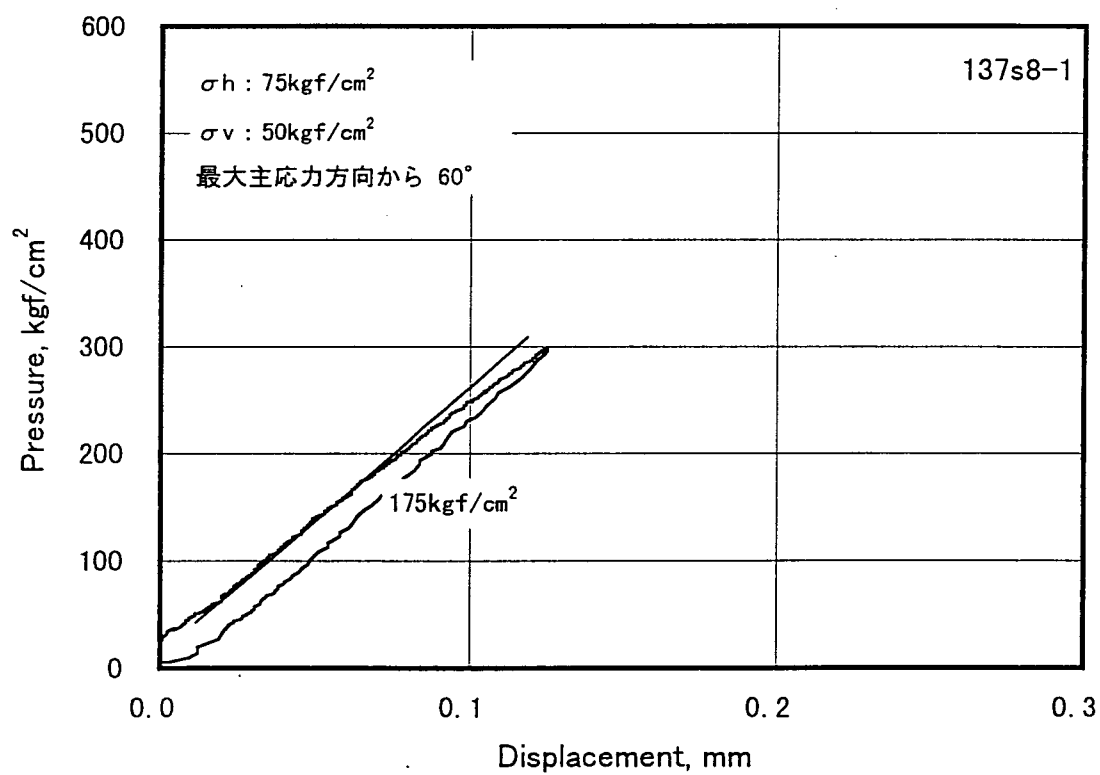


図4.5.40 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

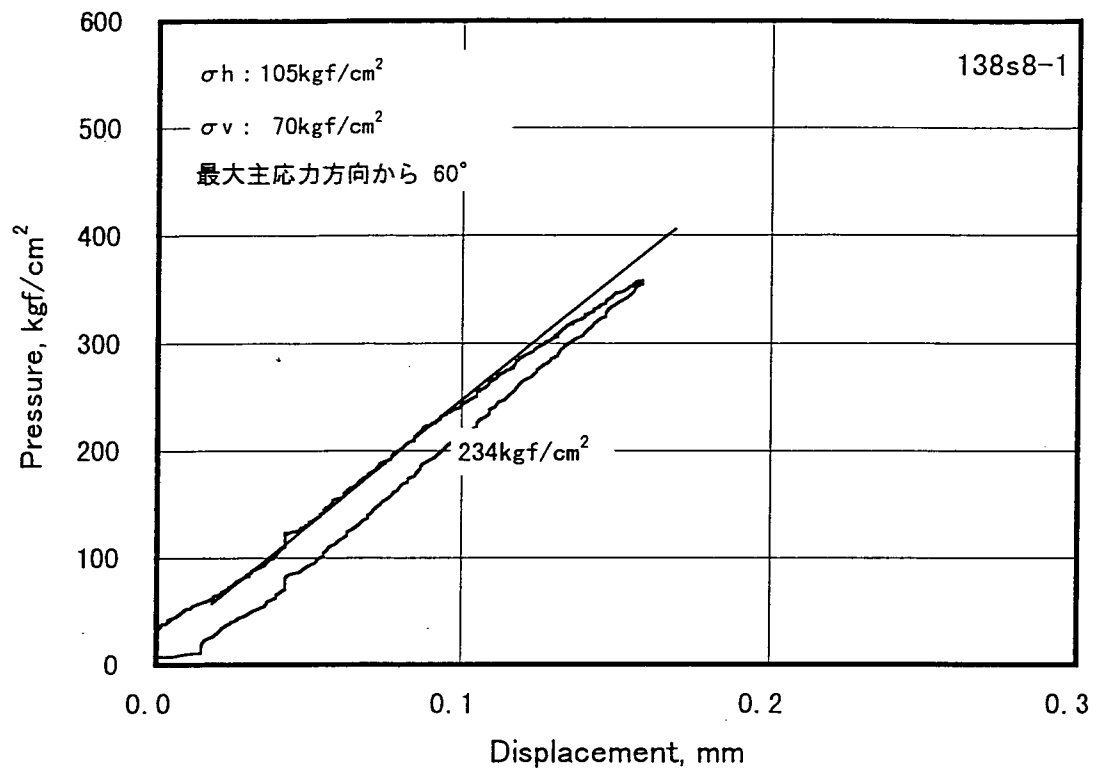


図4.5.41 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

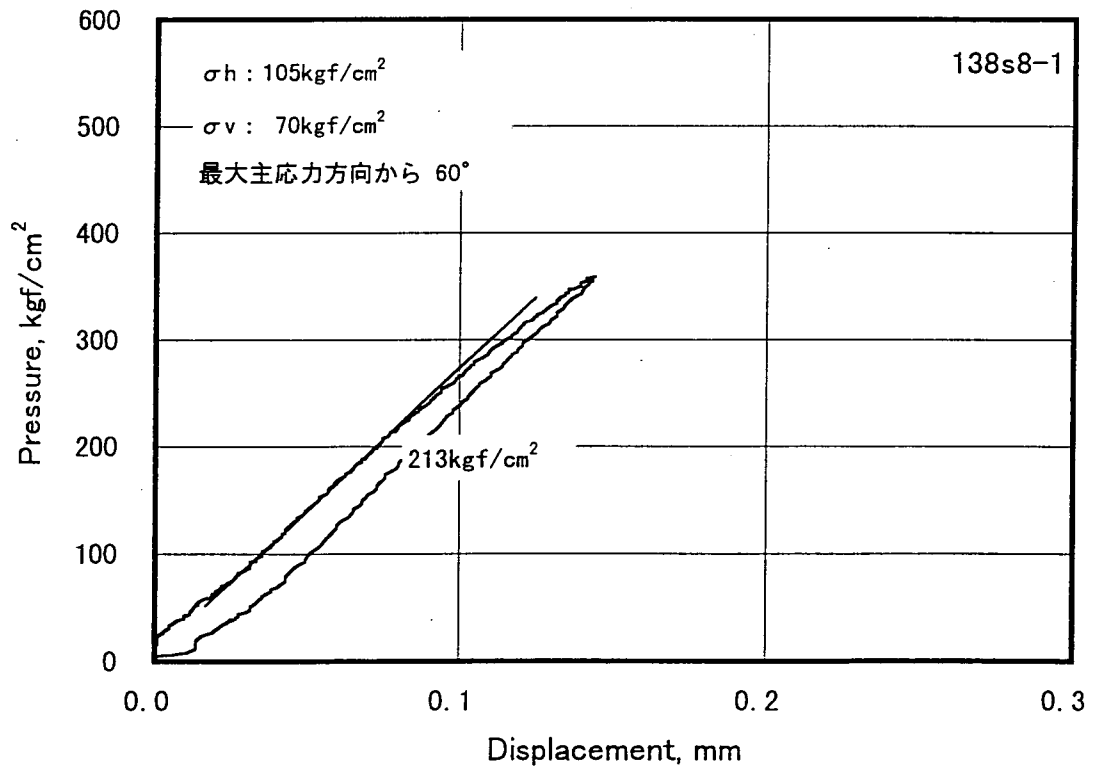


図4.5.41 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

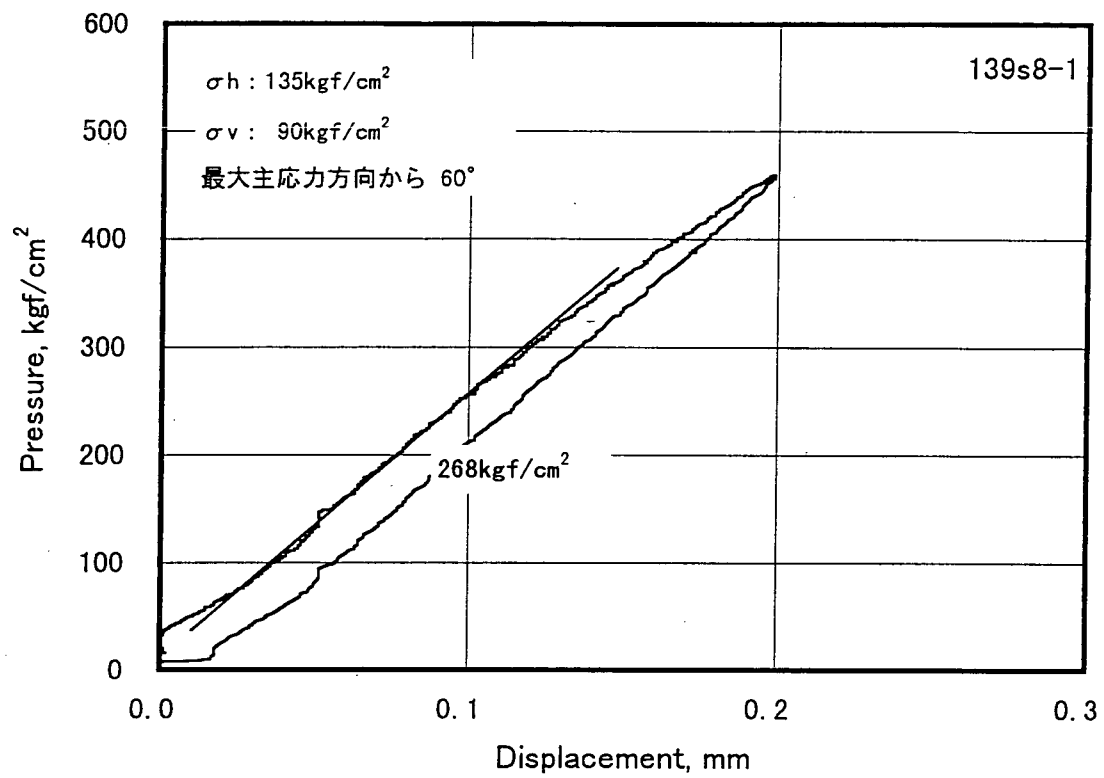


図4.5.42 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

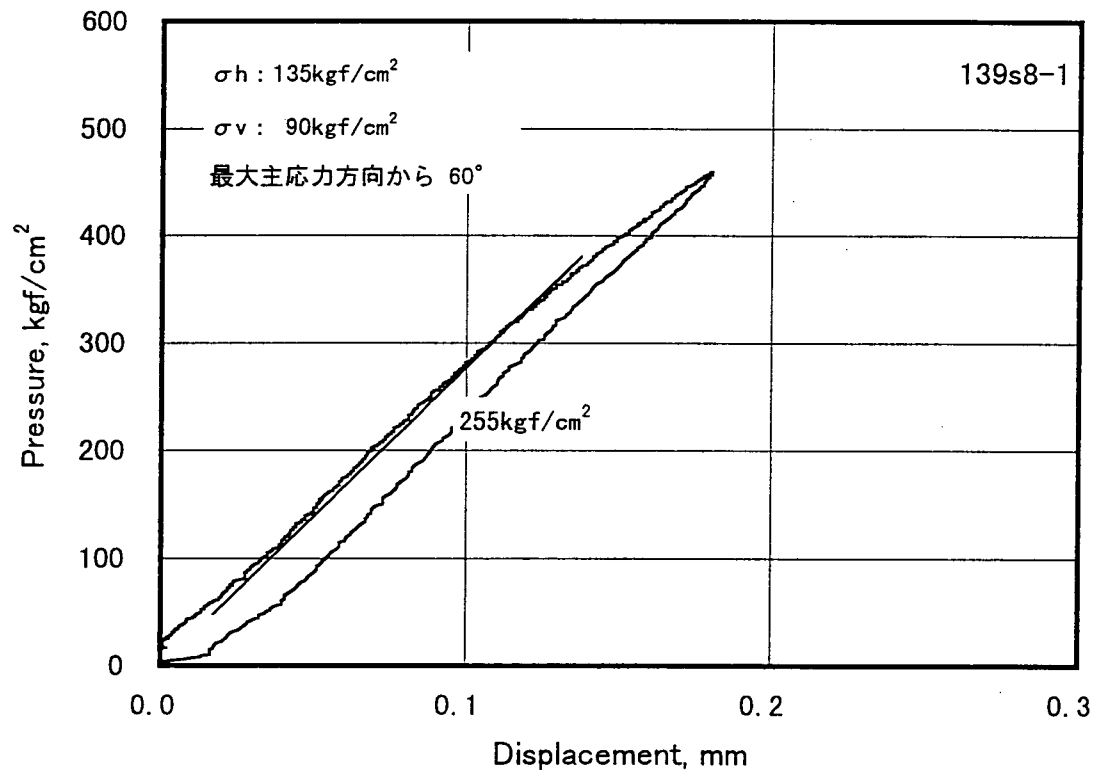


図4.5.42 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

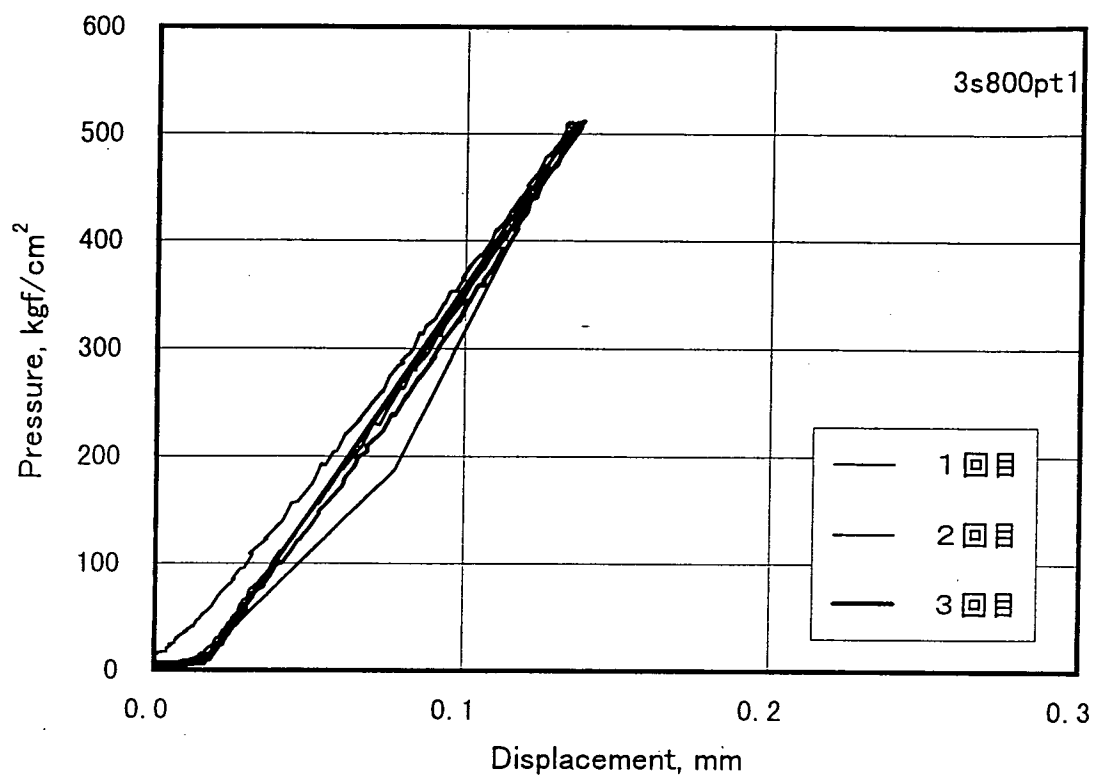


図4.5.43 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

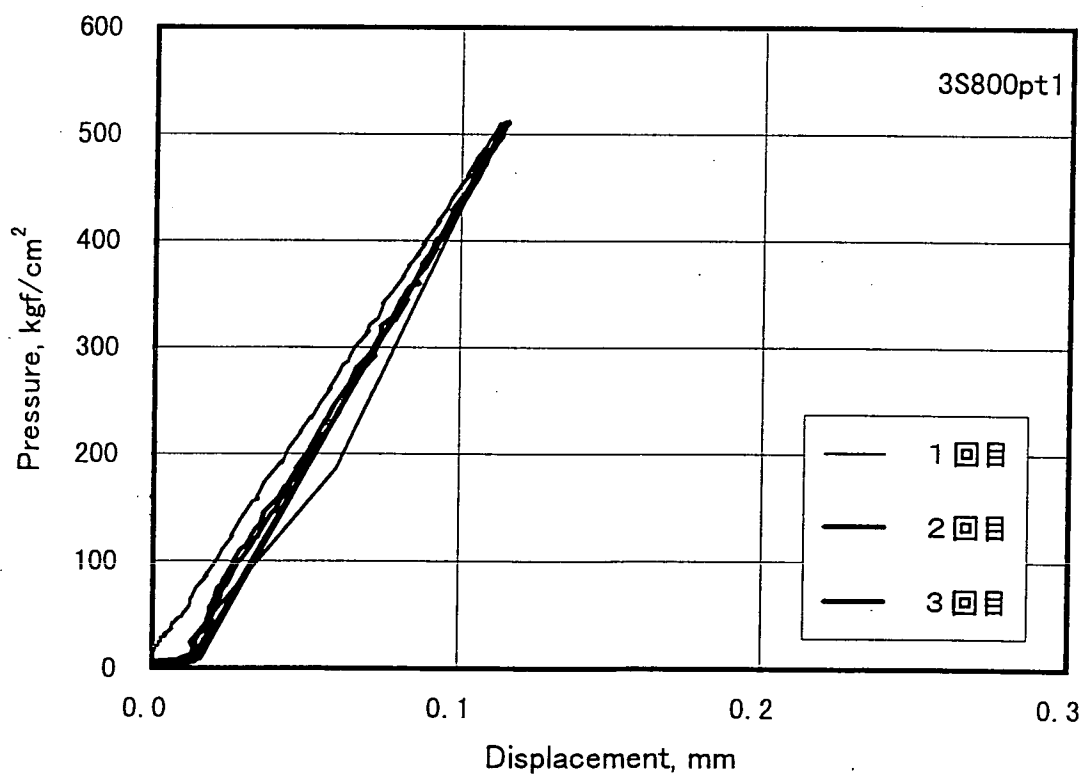


図4.5.43 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

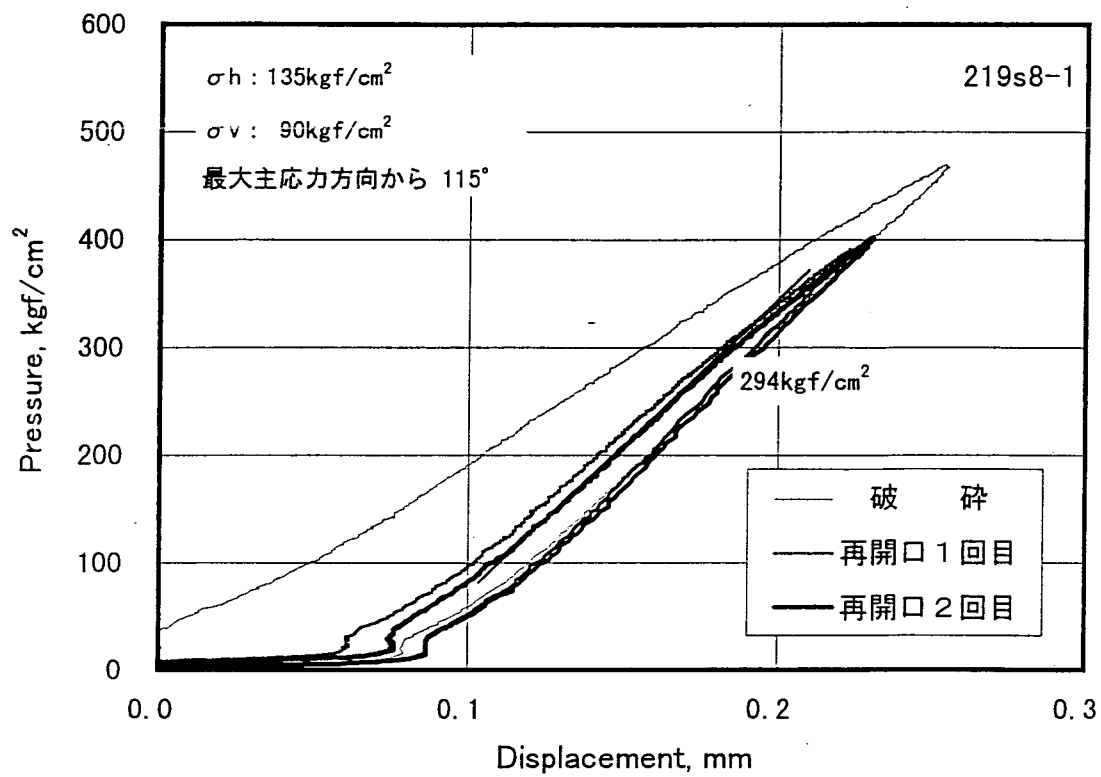


図4.5.44 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

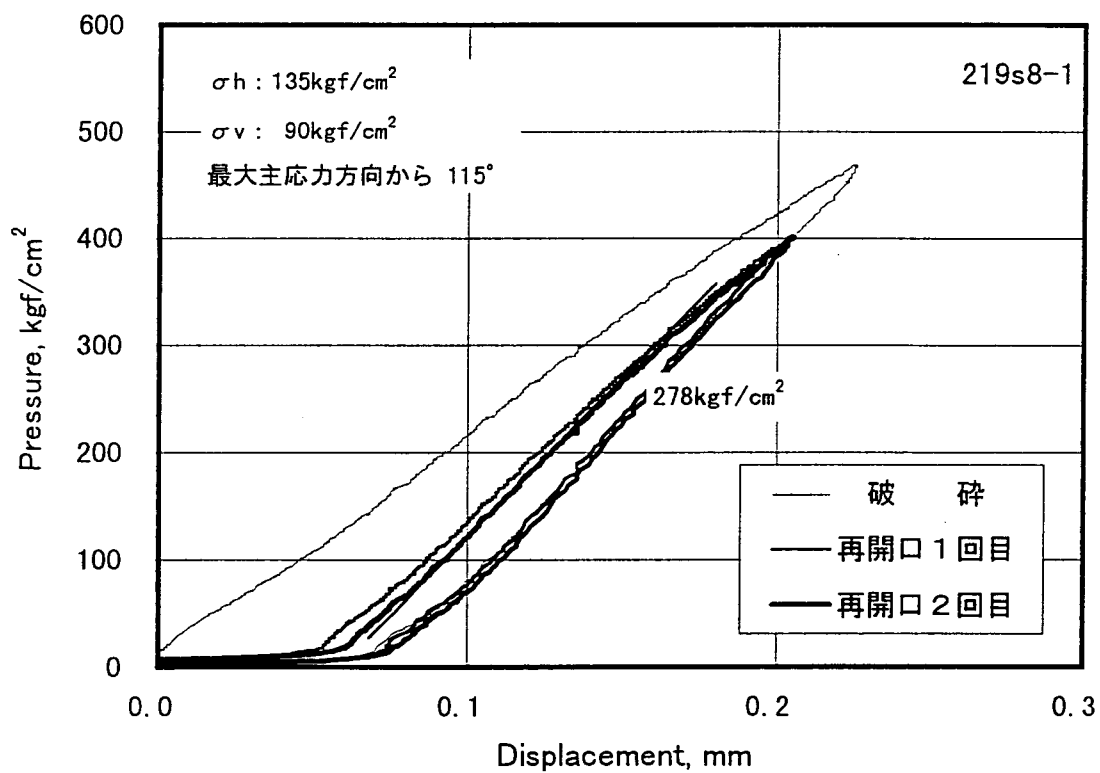


図4.5.44 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

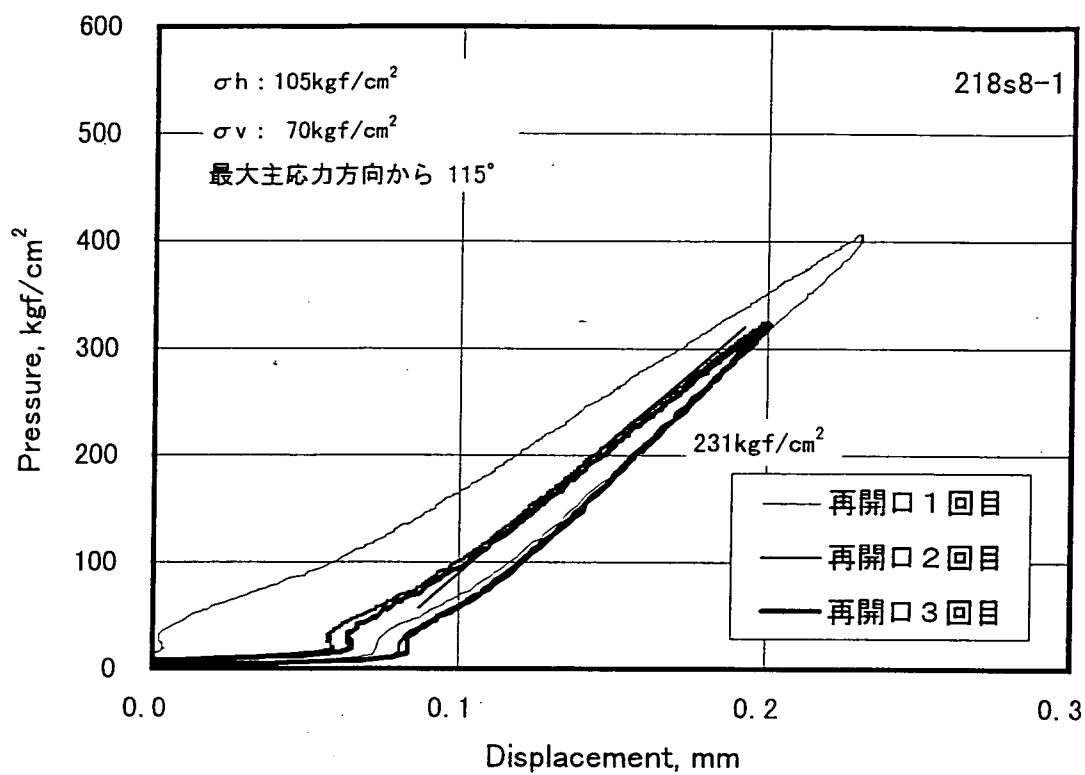


図4.5.45 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

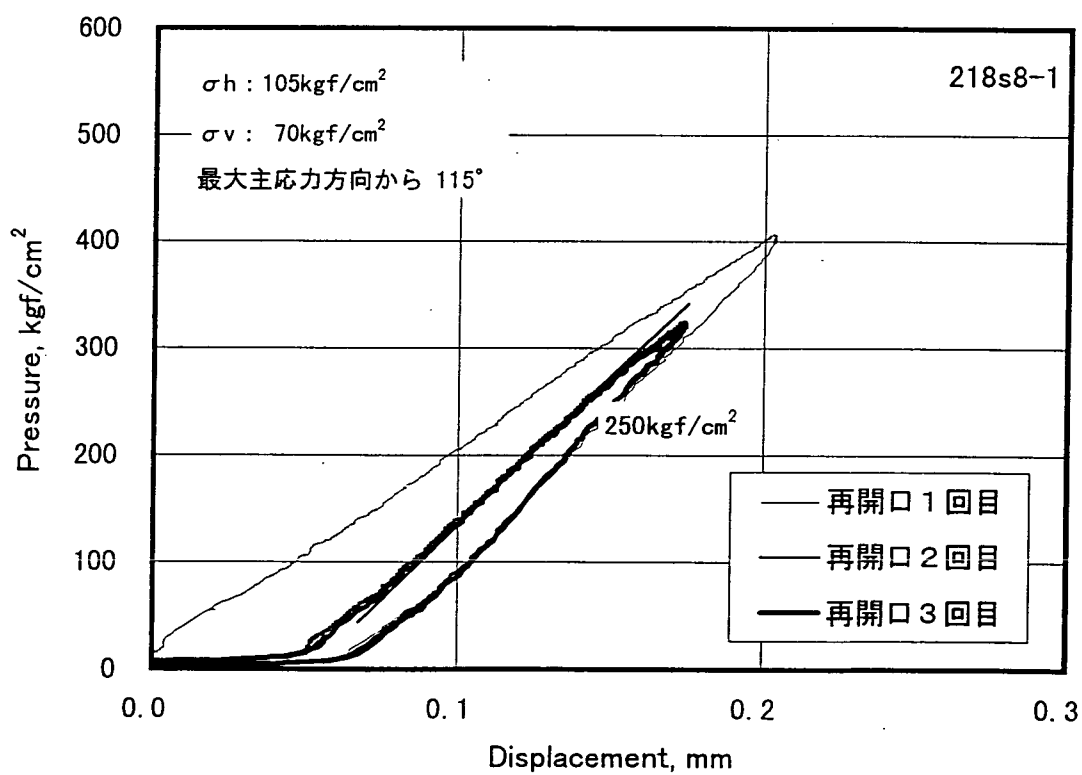


図4.5.45 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

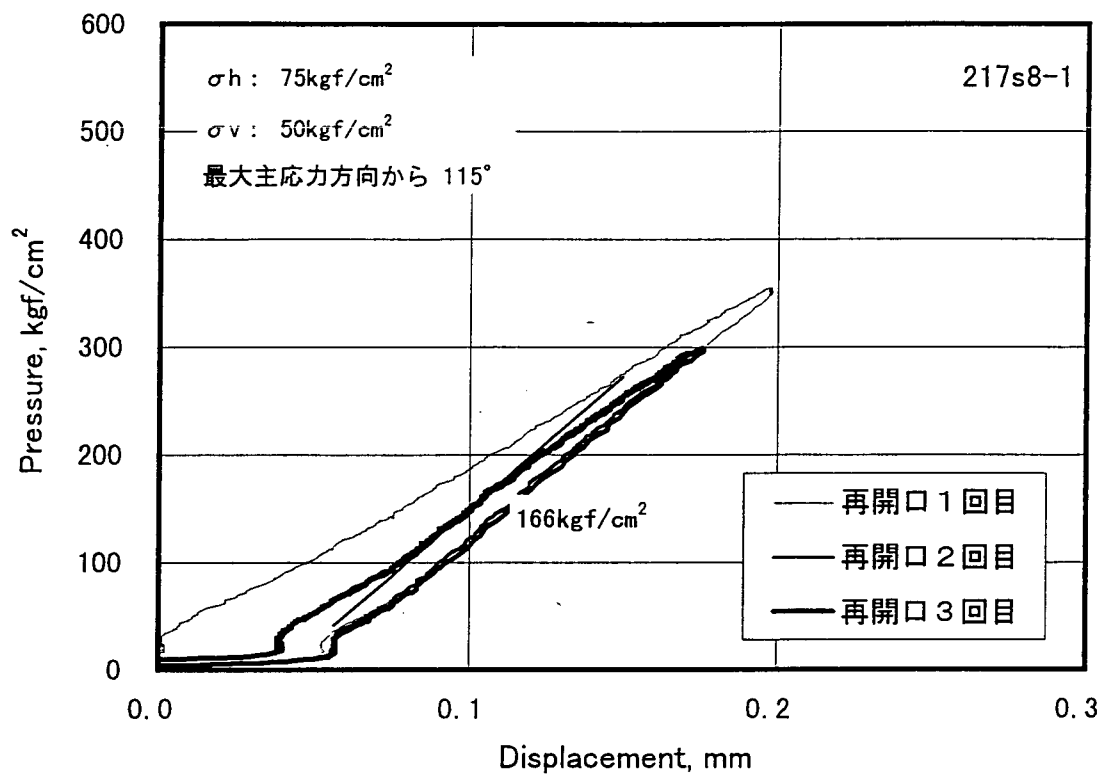


図4.5.46 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

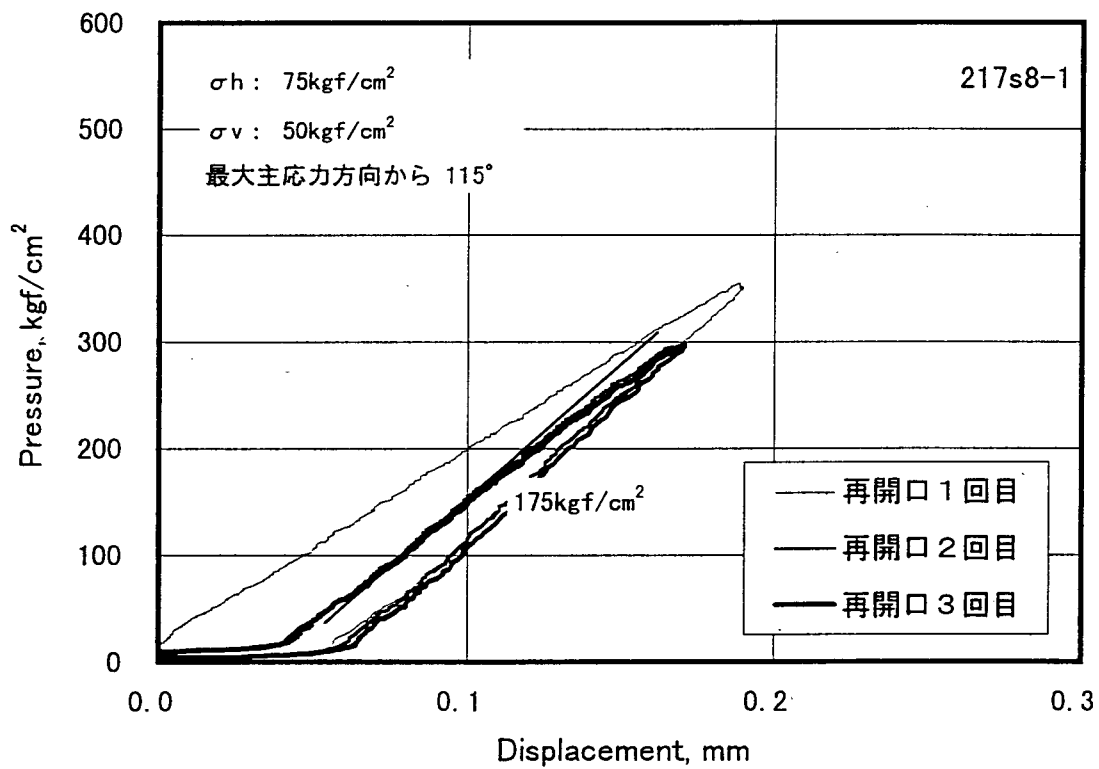


図4.5.46 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

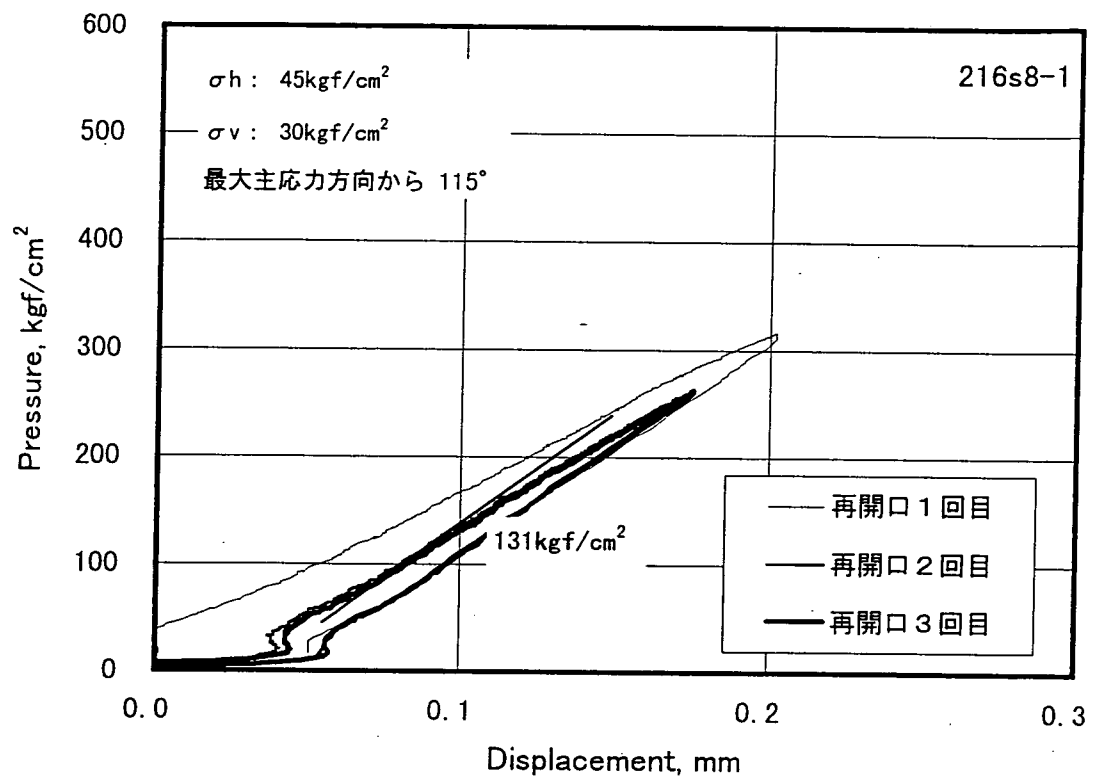


図4.5.47 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

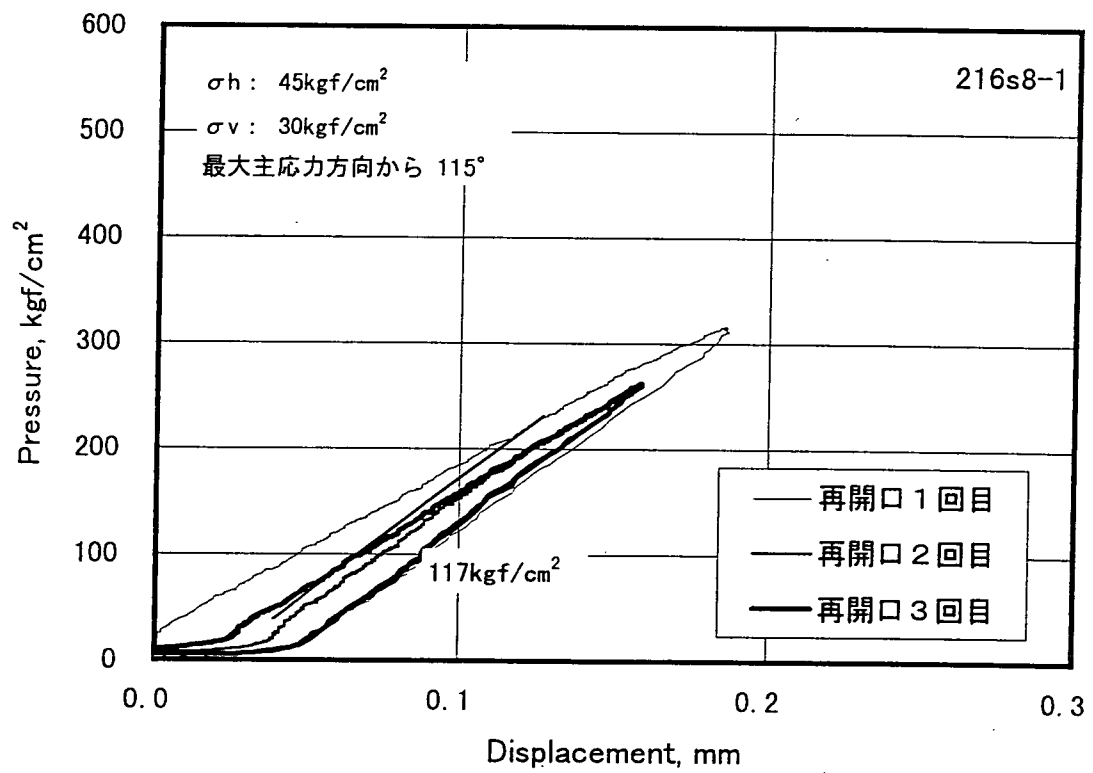


図4.5.47 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

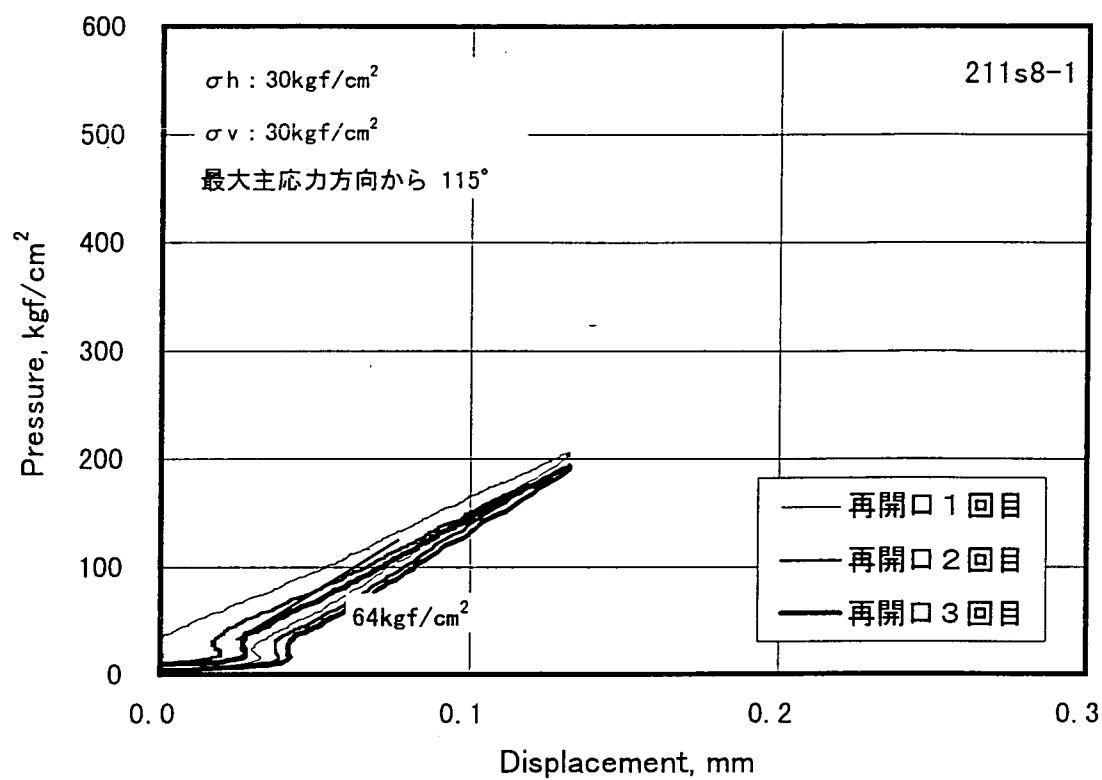


図4.5.48 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

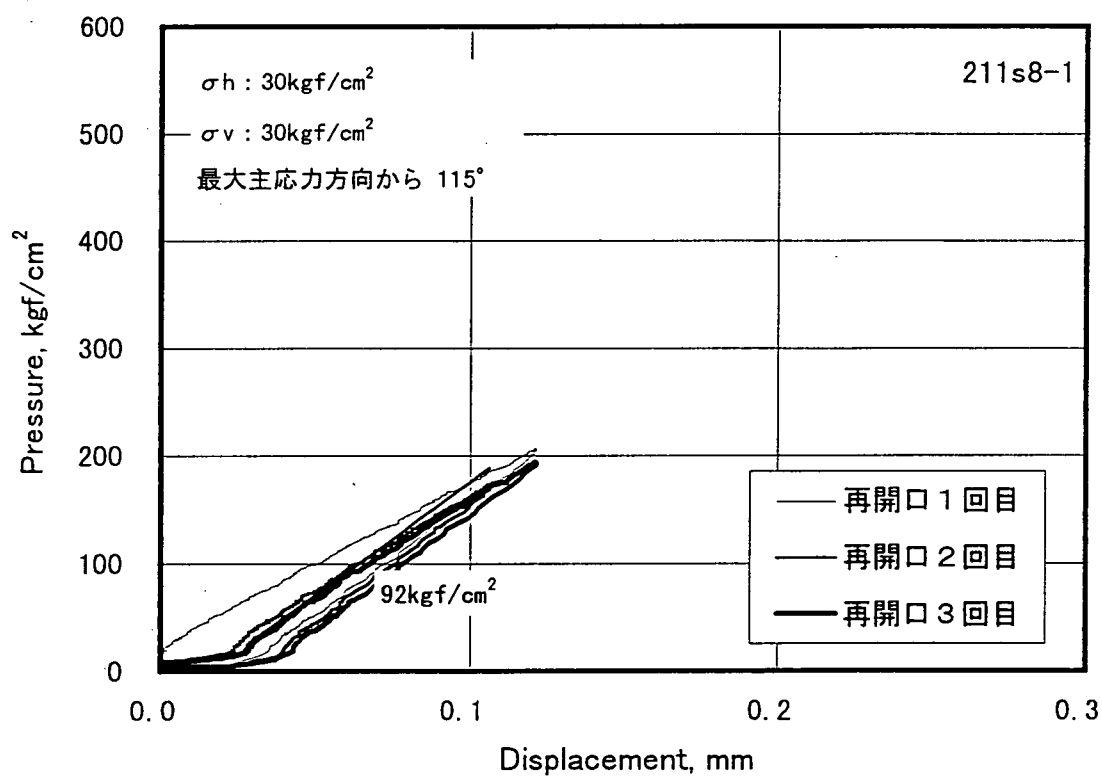


図4.5.48 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

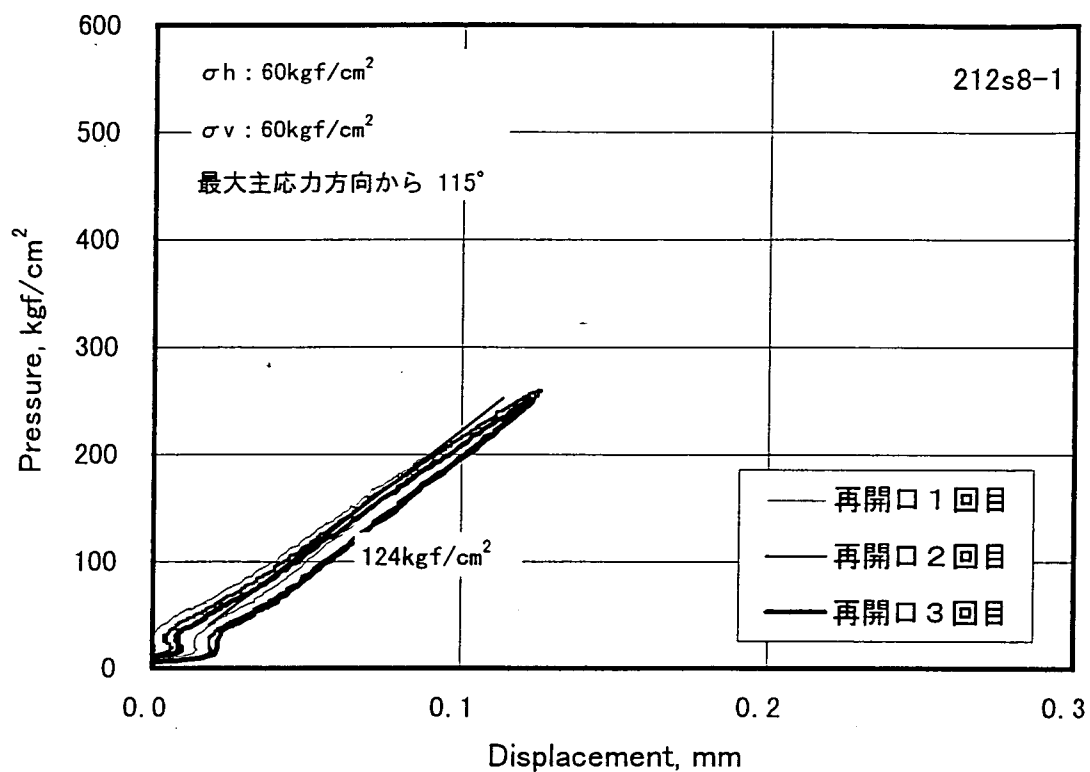


図4.5.49 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

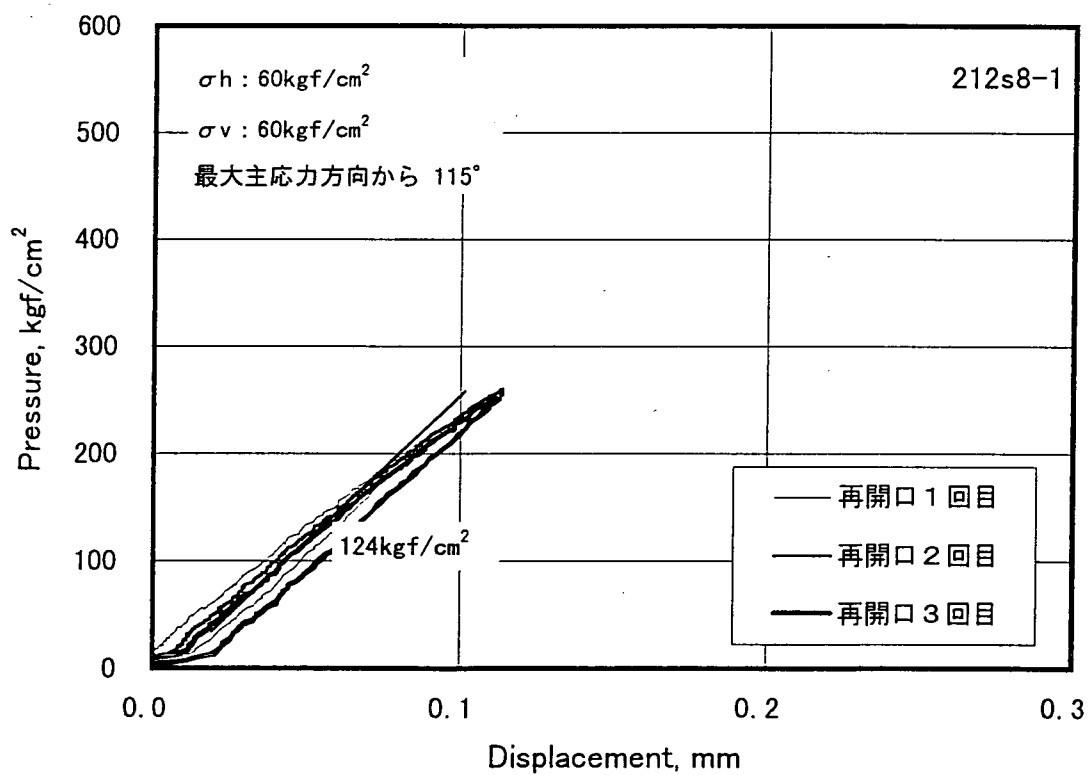


図4.5.49 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

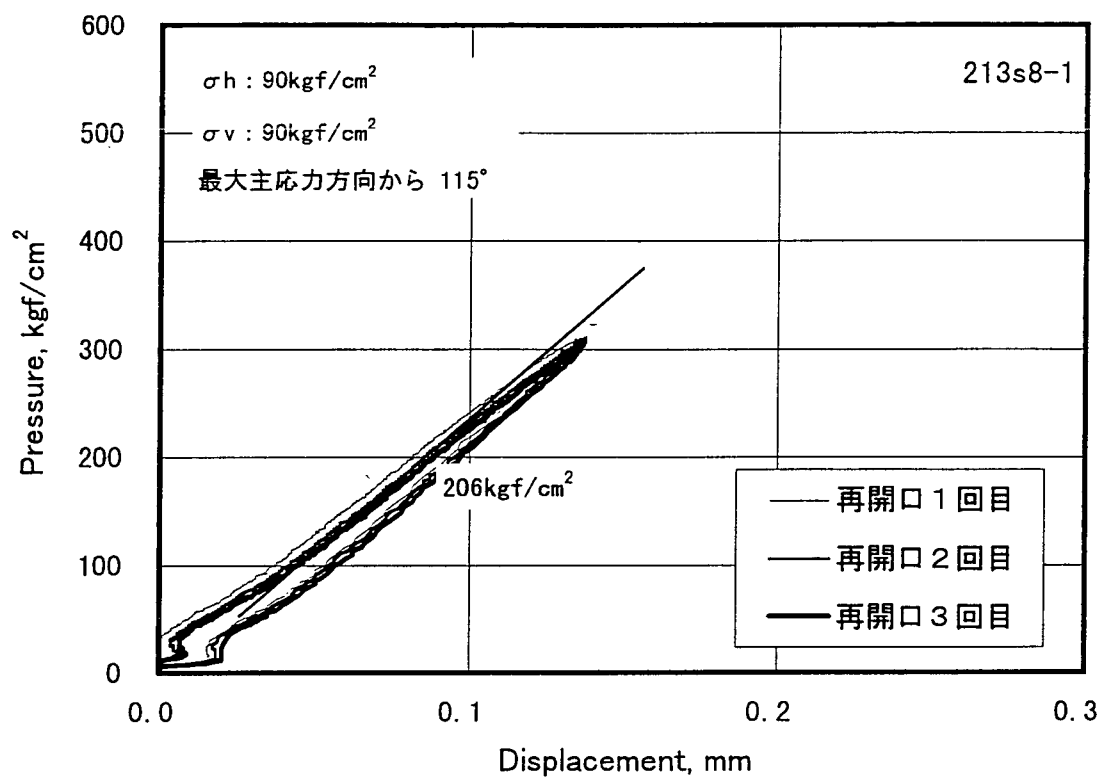


図4.5.50 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

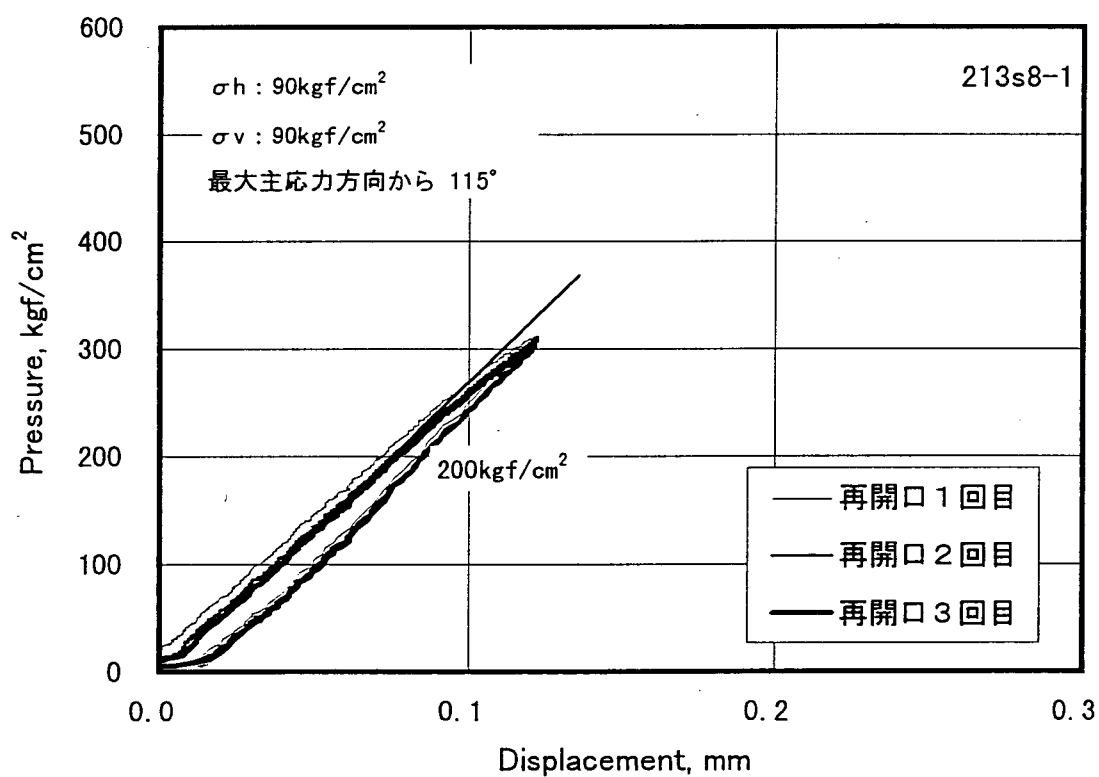


図4.5.50 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

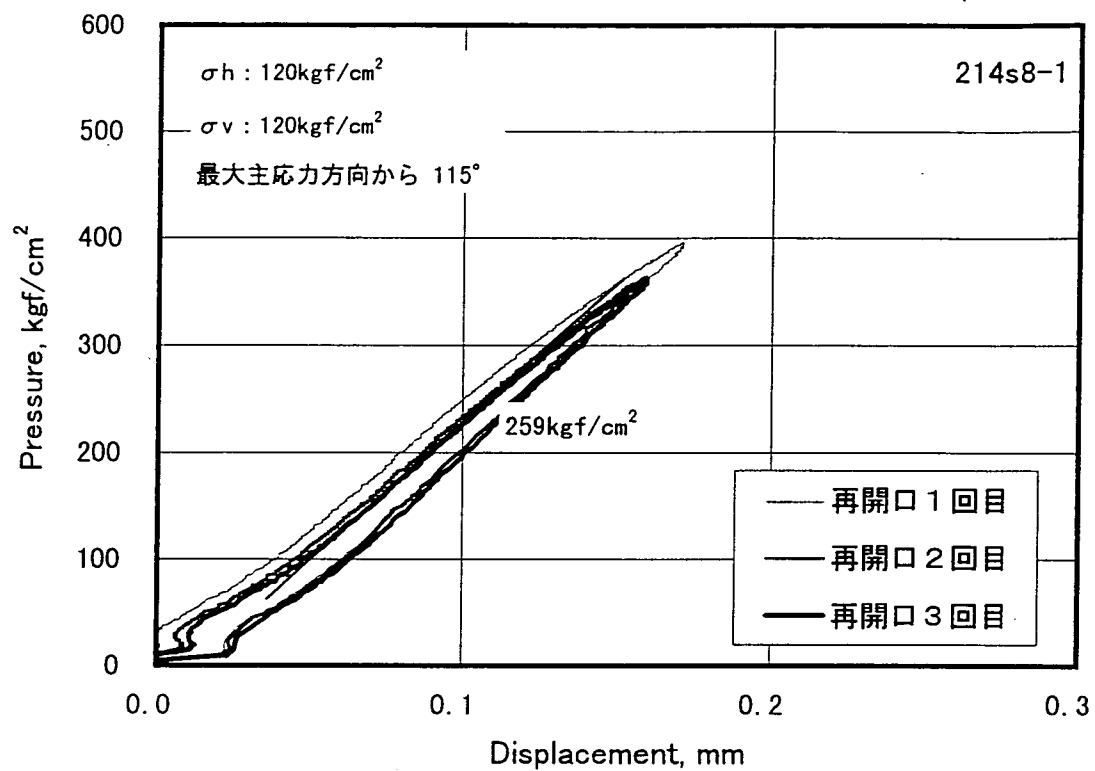


図4.5.51 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

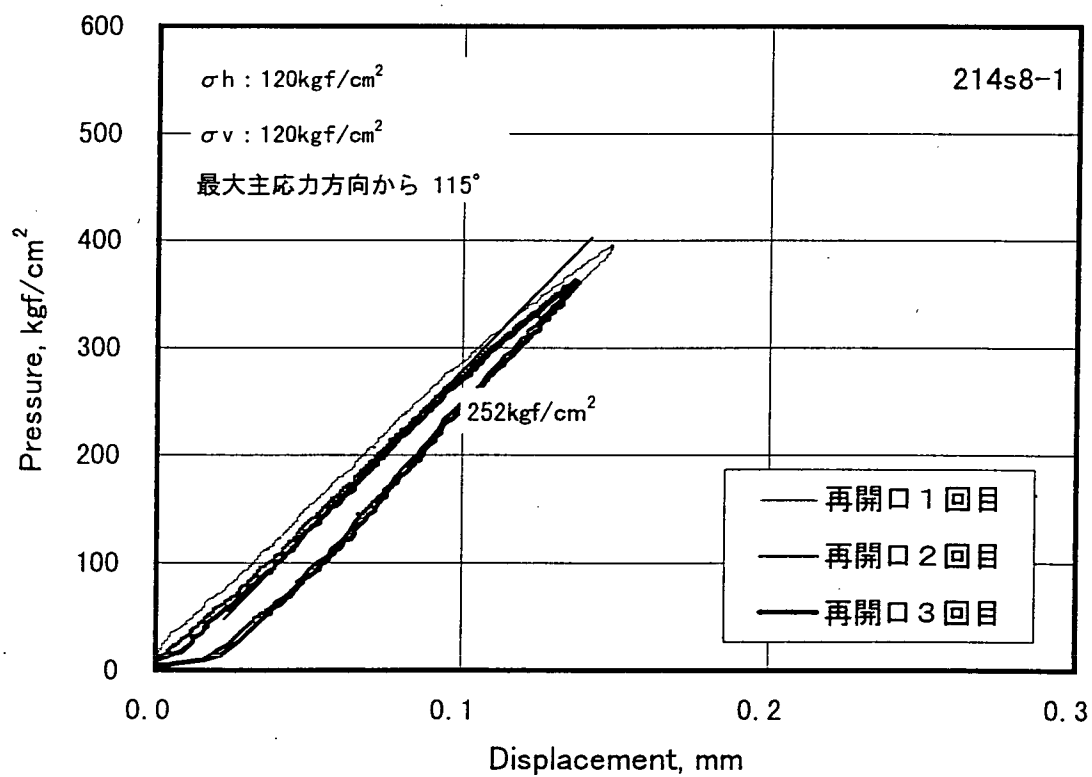


図4.5.51 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

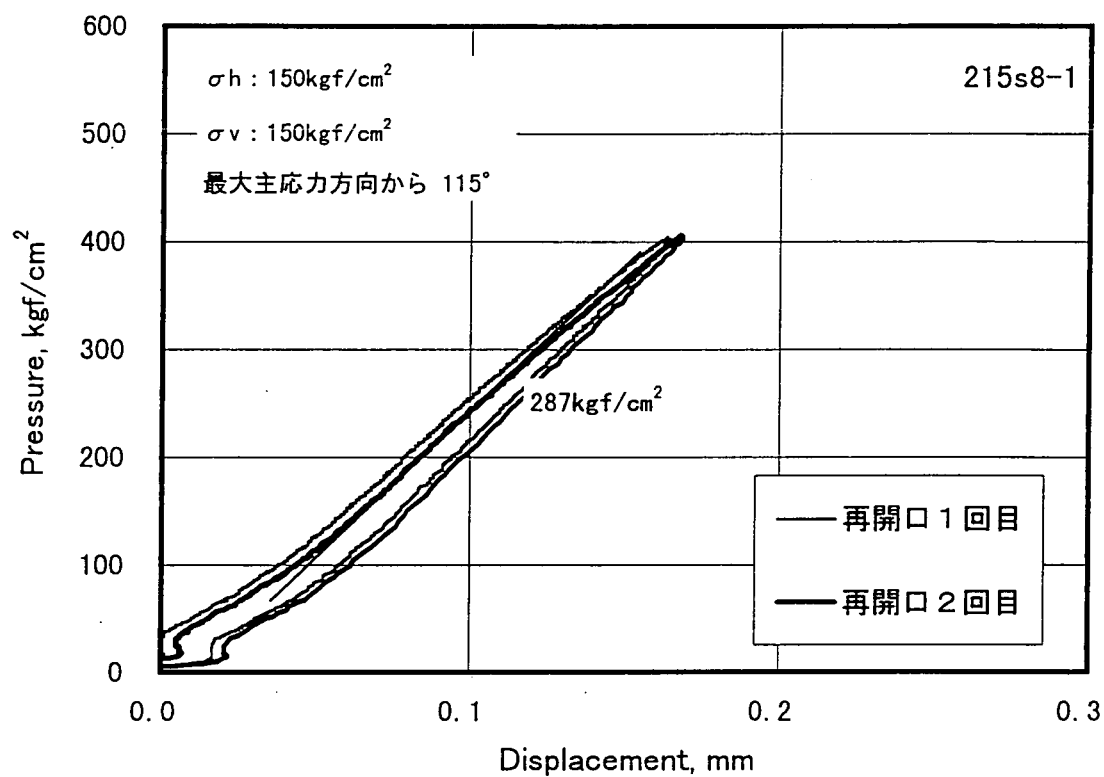


図4.5.52 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

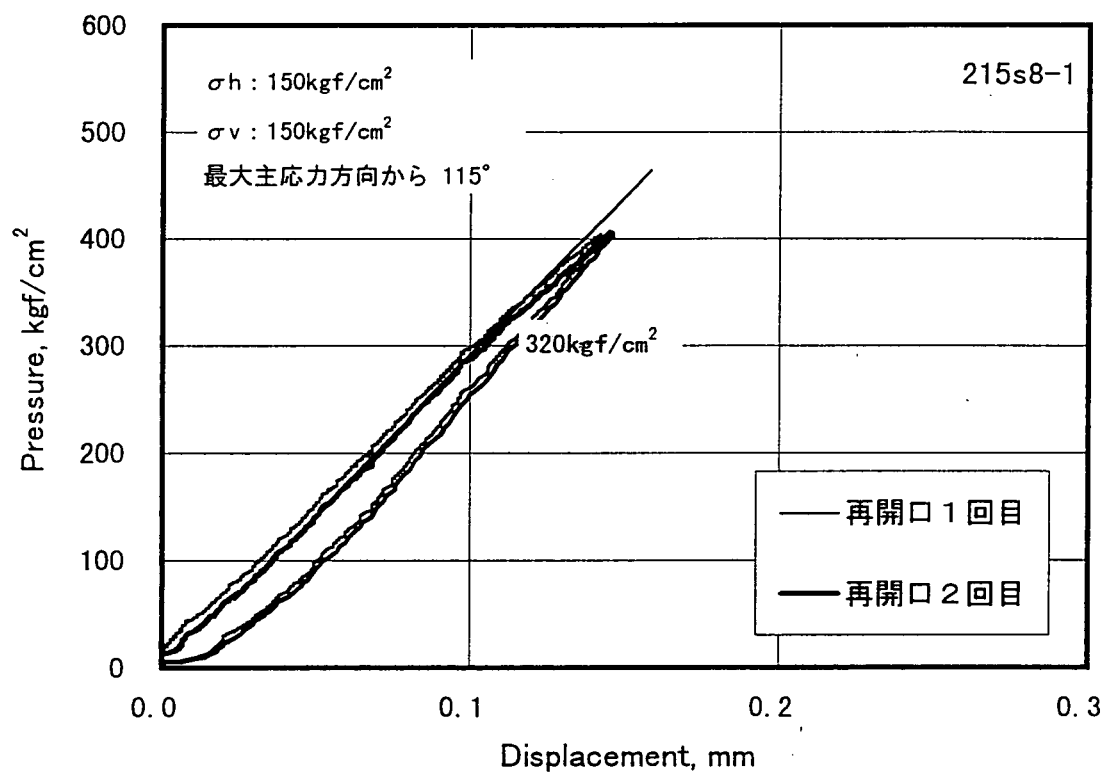


図4.5.52 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

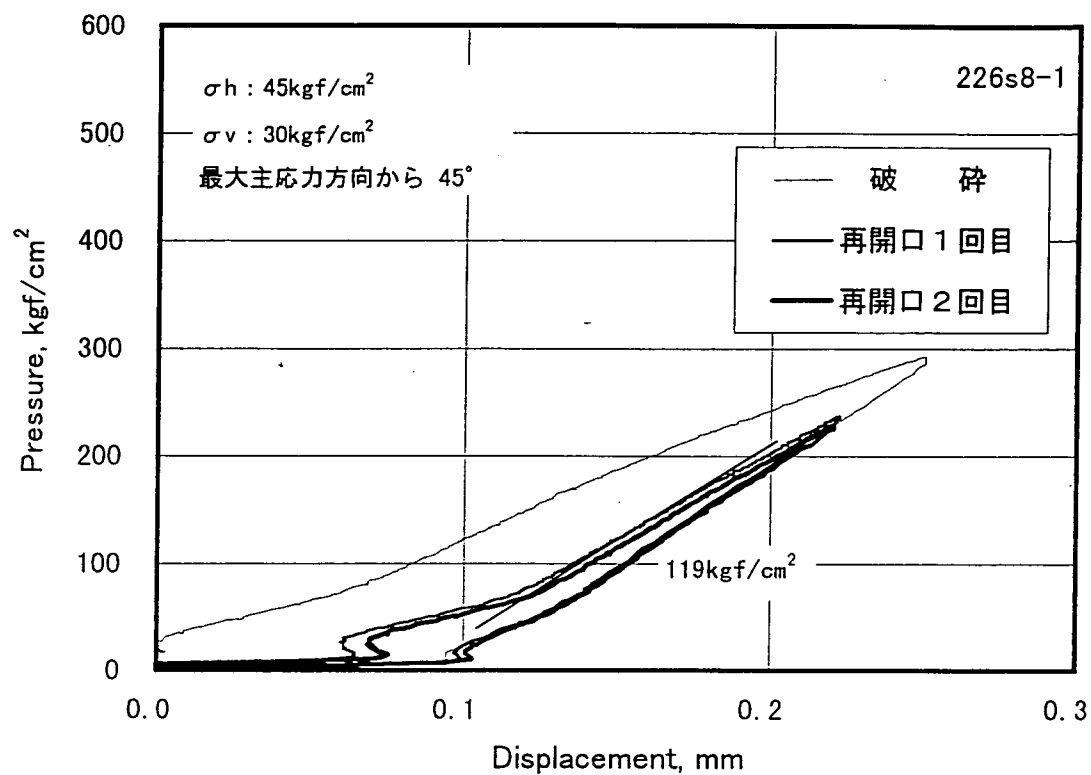


図4.5.53 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

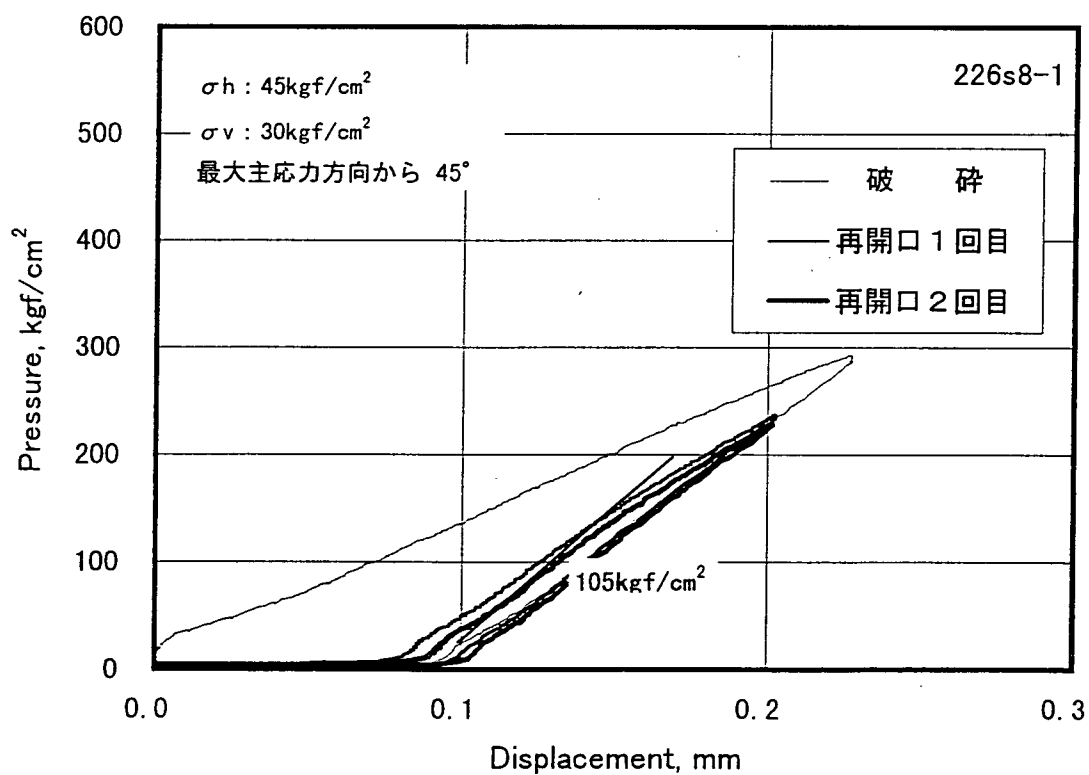


図4.5.53 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

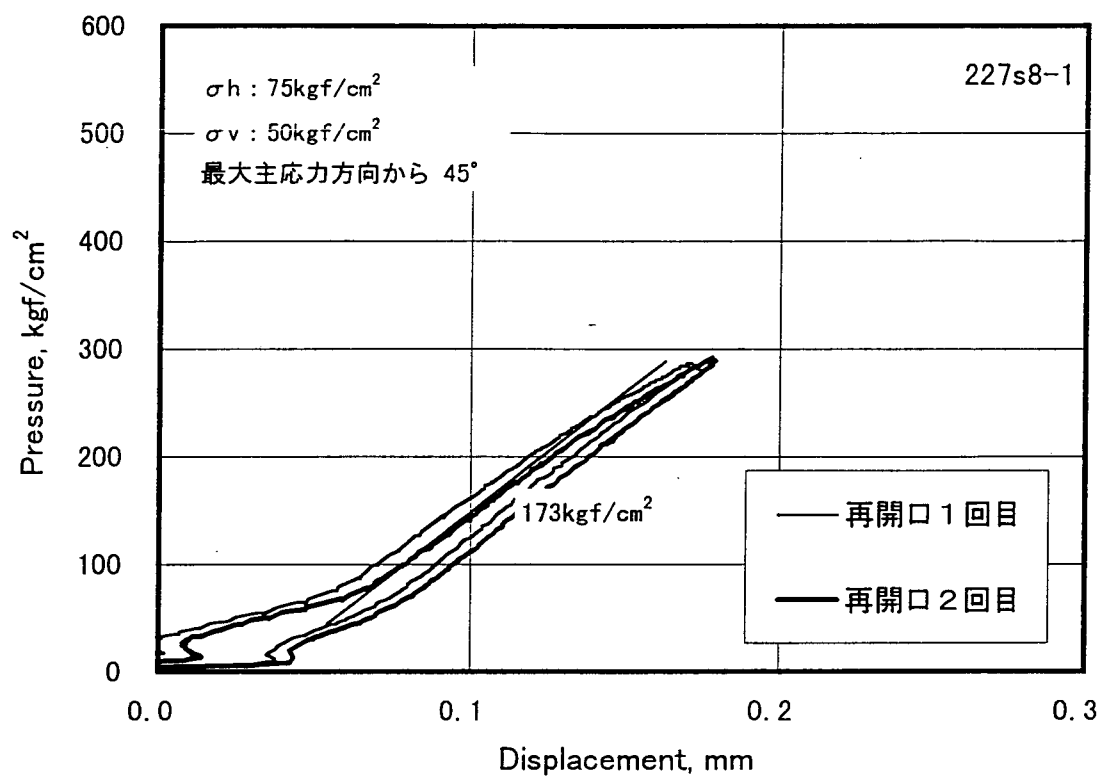


図4.5.54 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

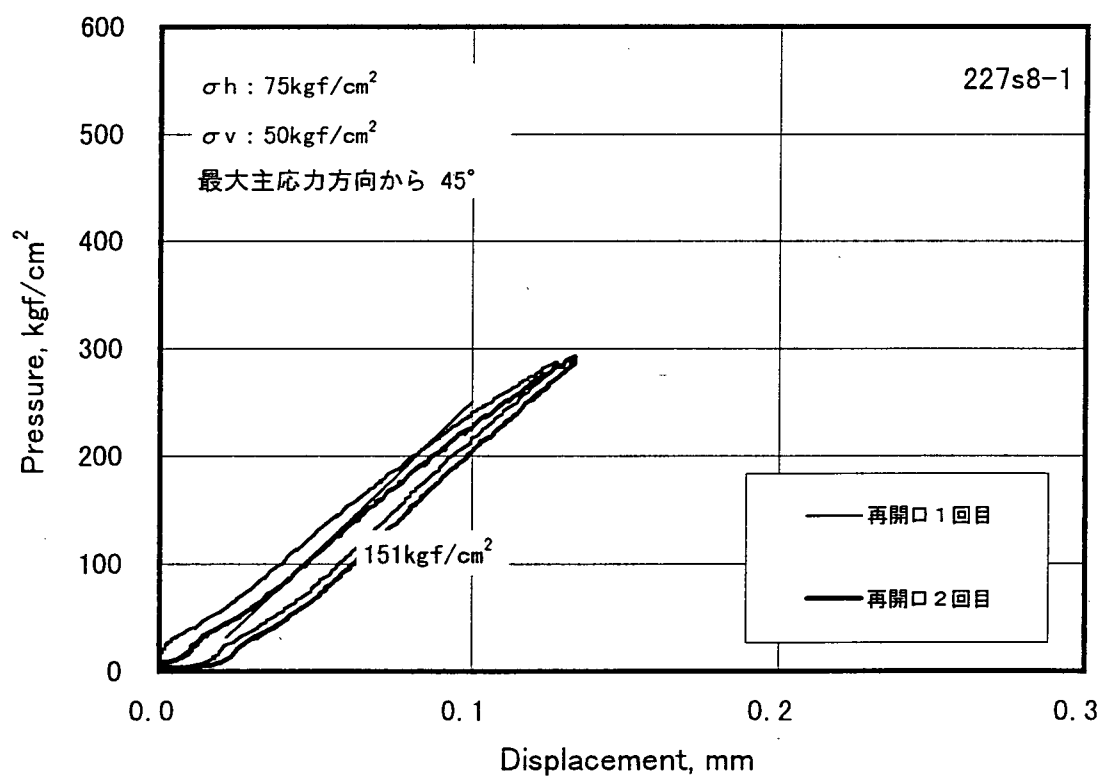


図4.5.54 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

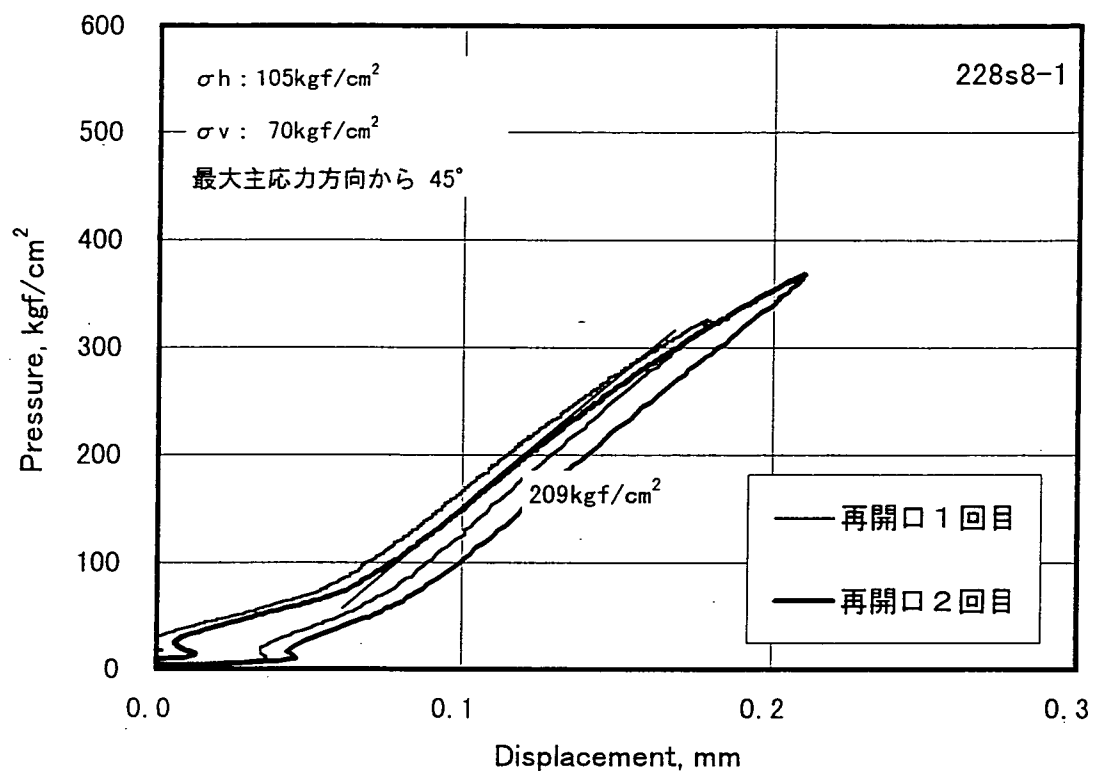


図4.5.55 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

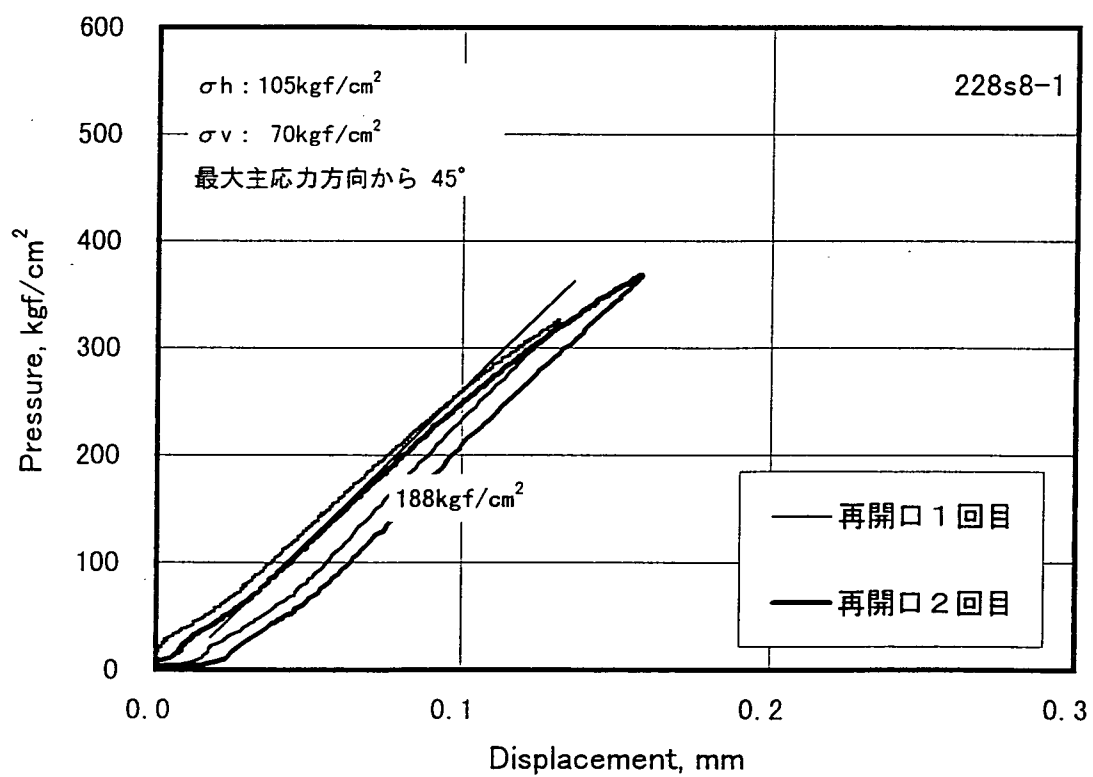


図4.5.55 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

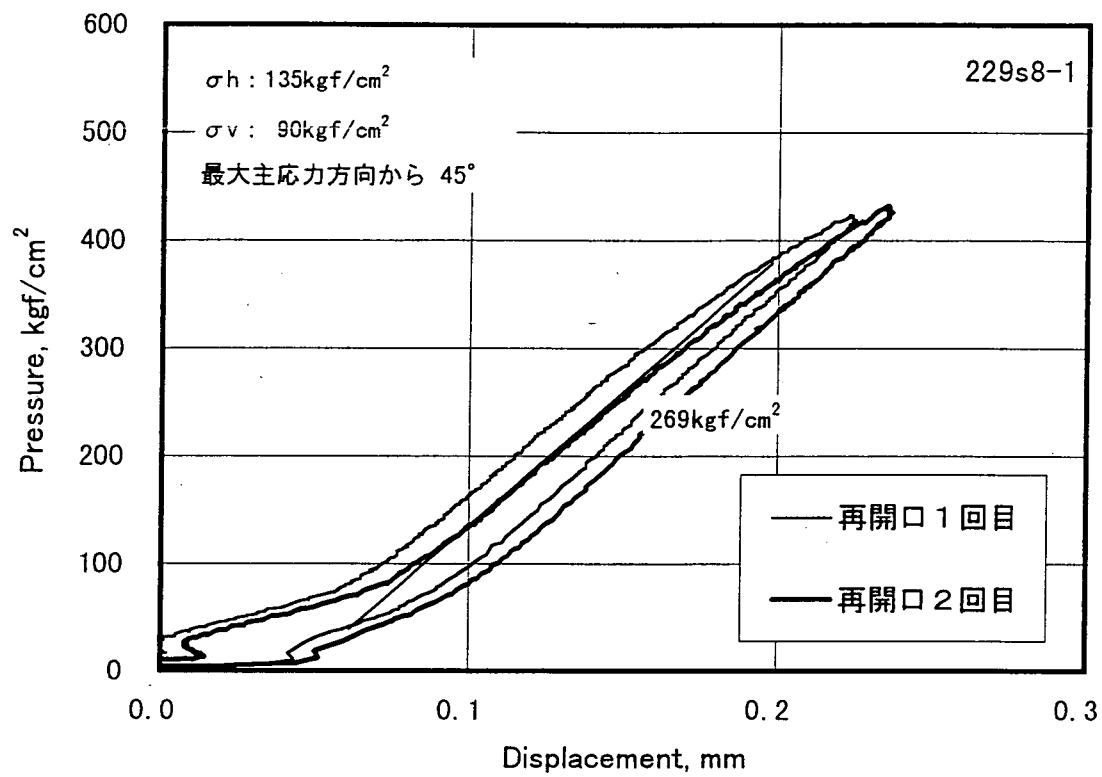


図4.5.56 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

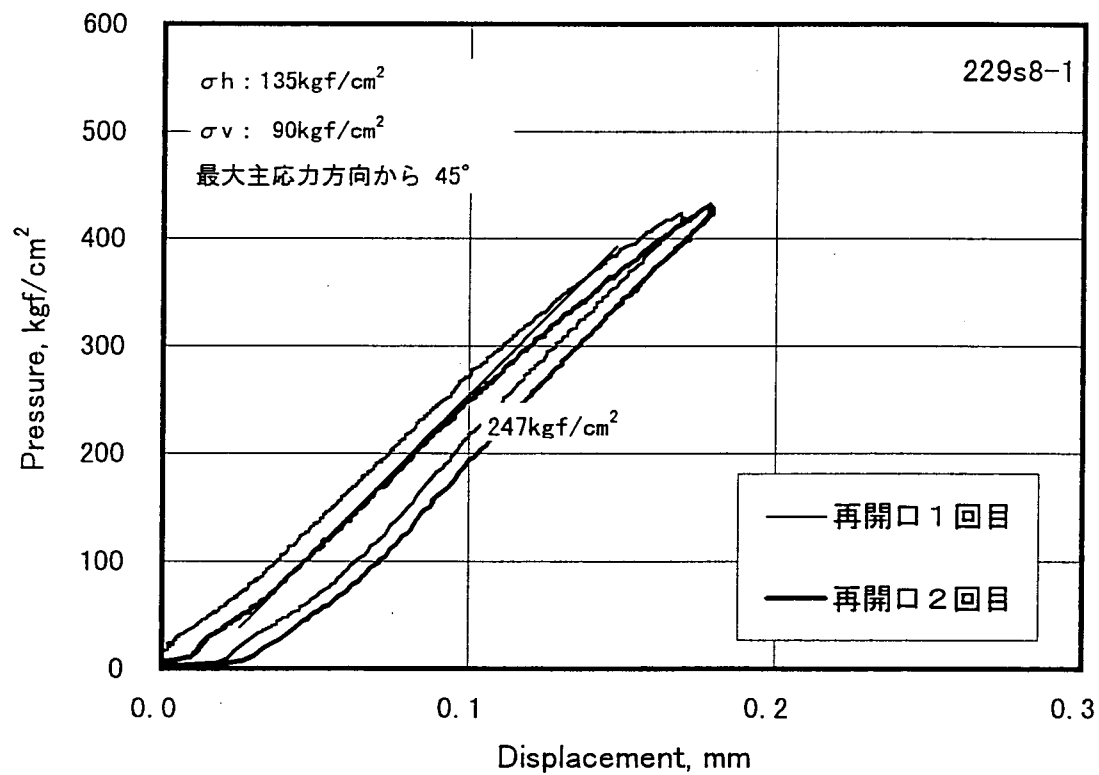


図4.5.56 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

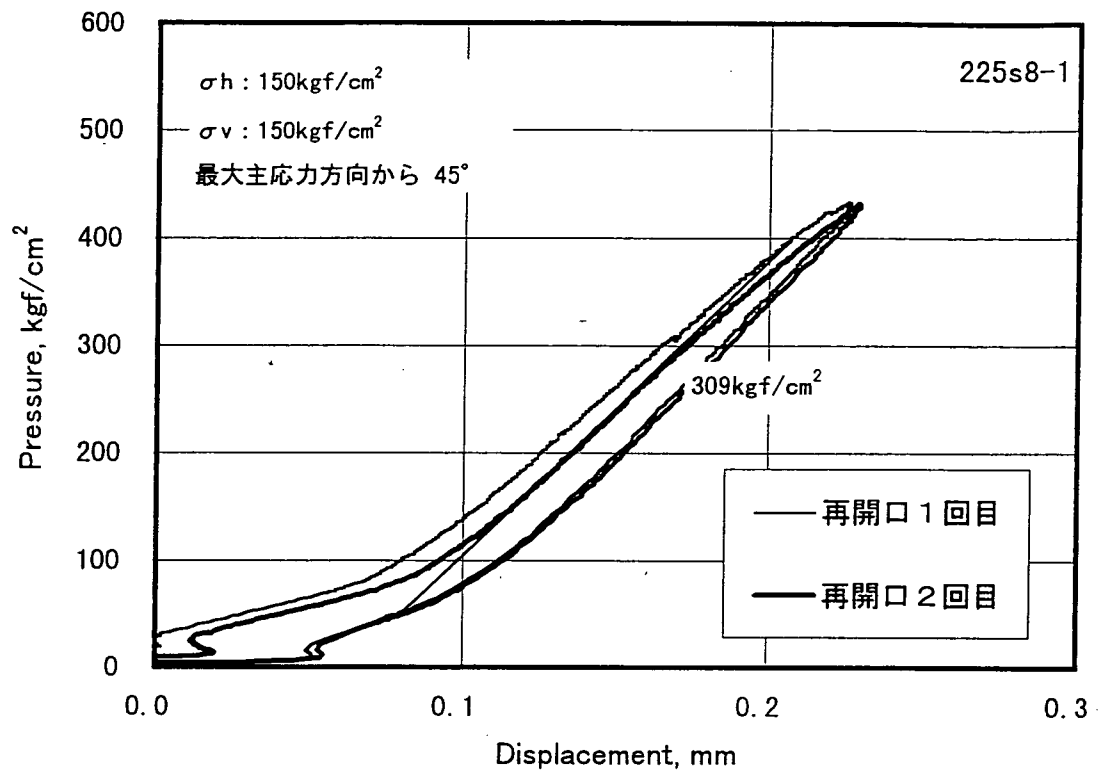


図4.5.57 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

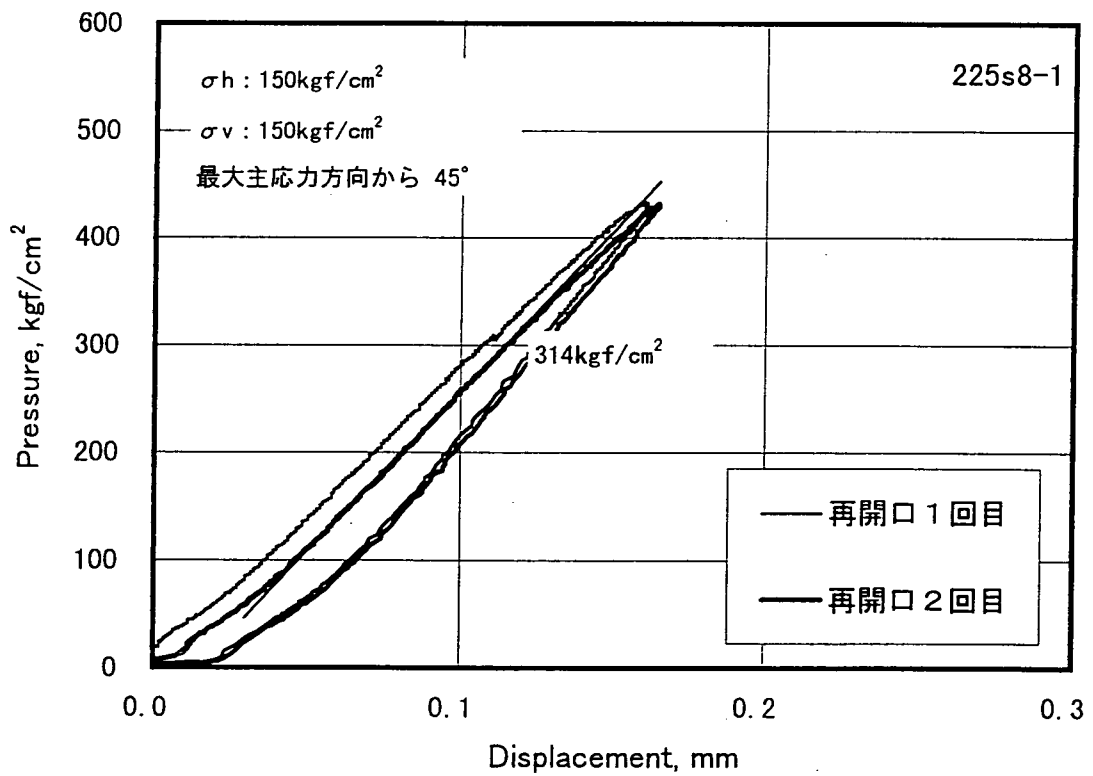


図4.5.57 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

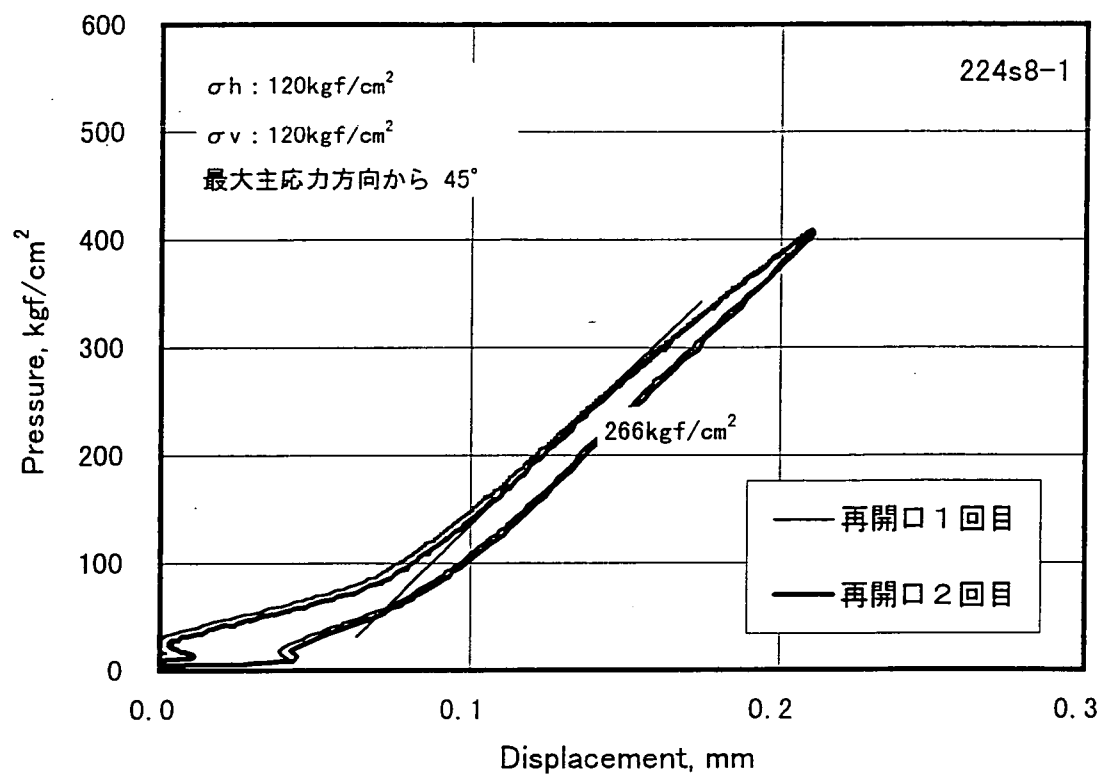


図4.5.58 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

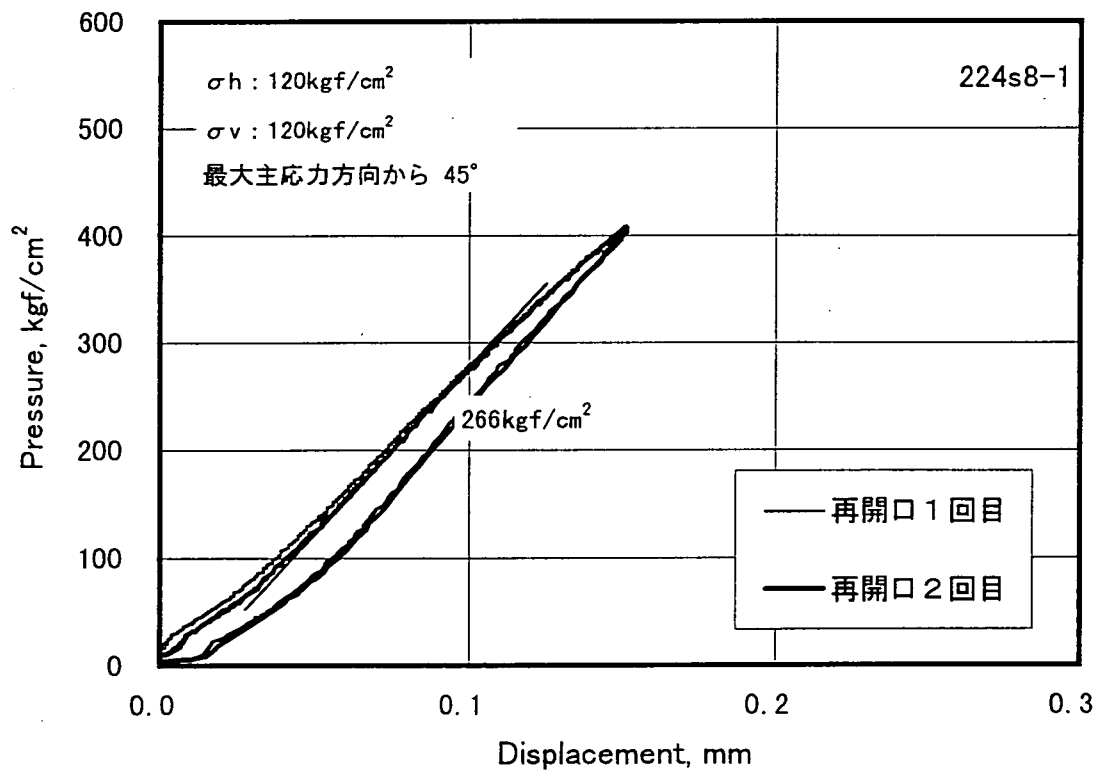


図4.5.58 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

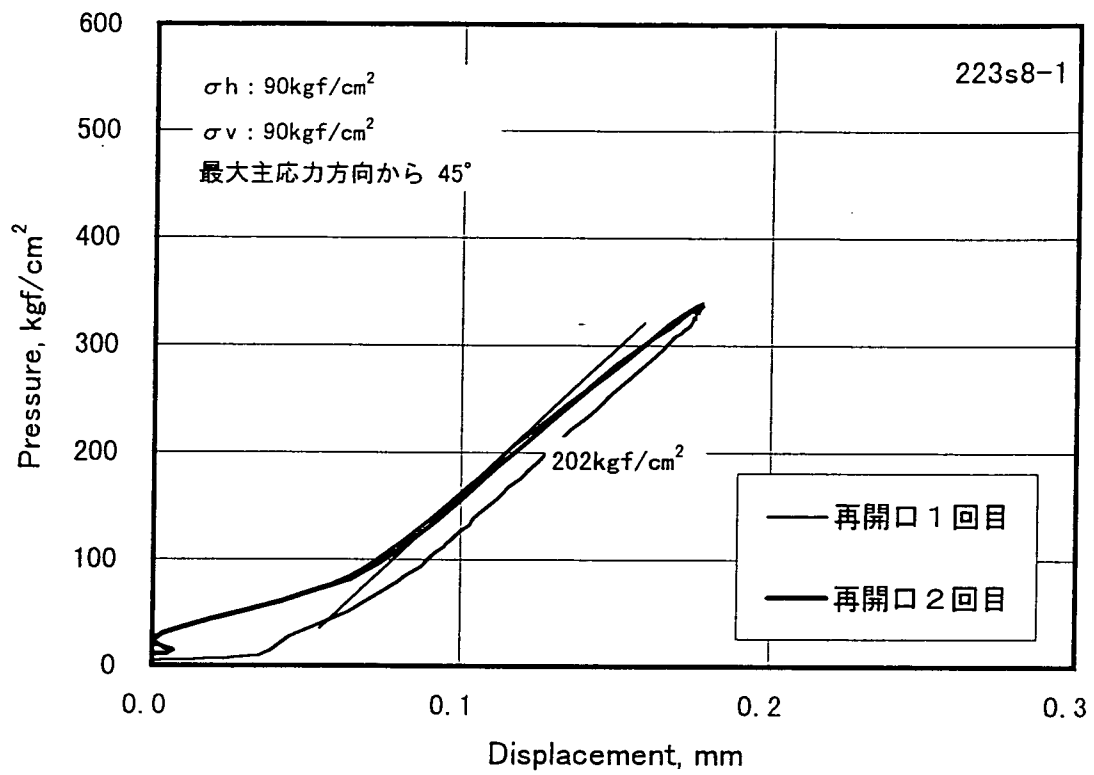


図4.5.59 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

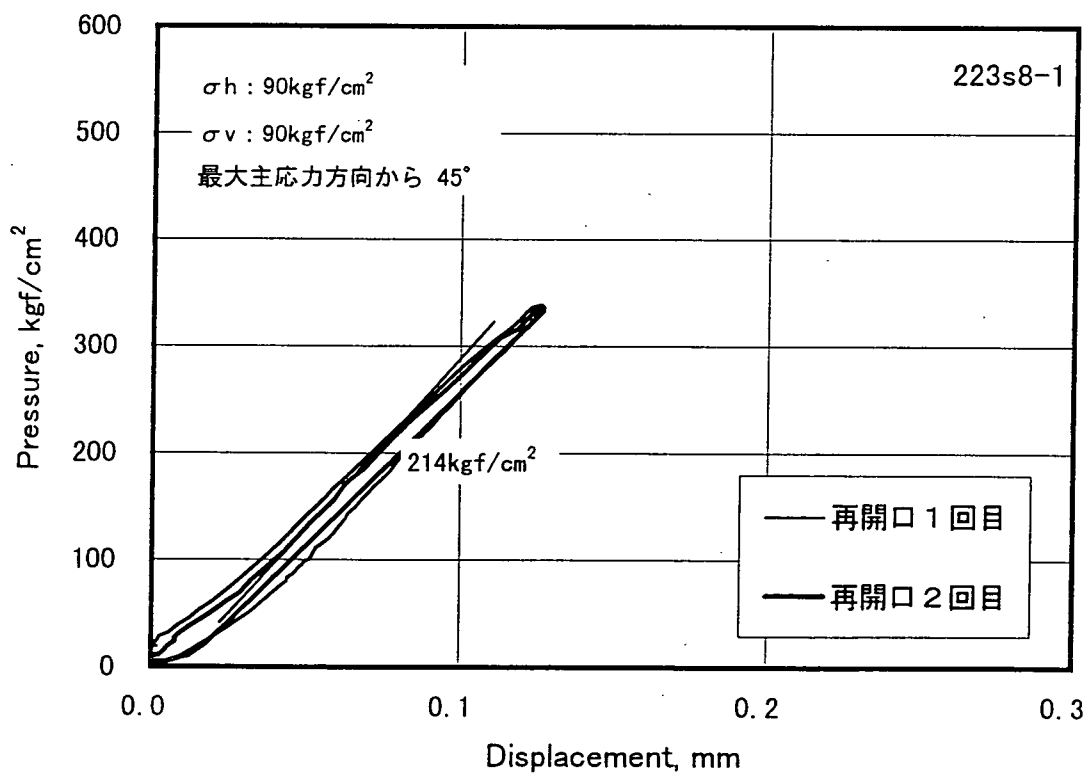


図4.5.59 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

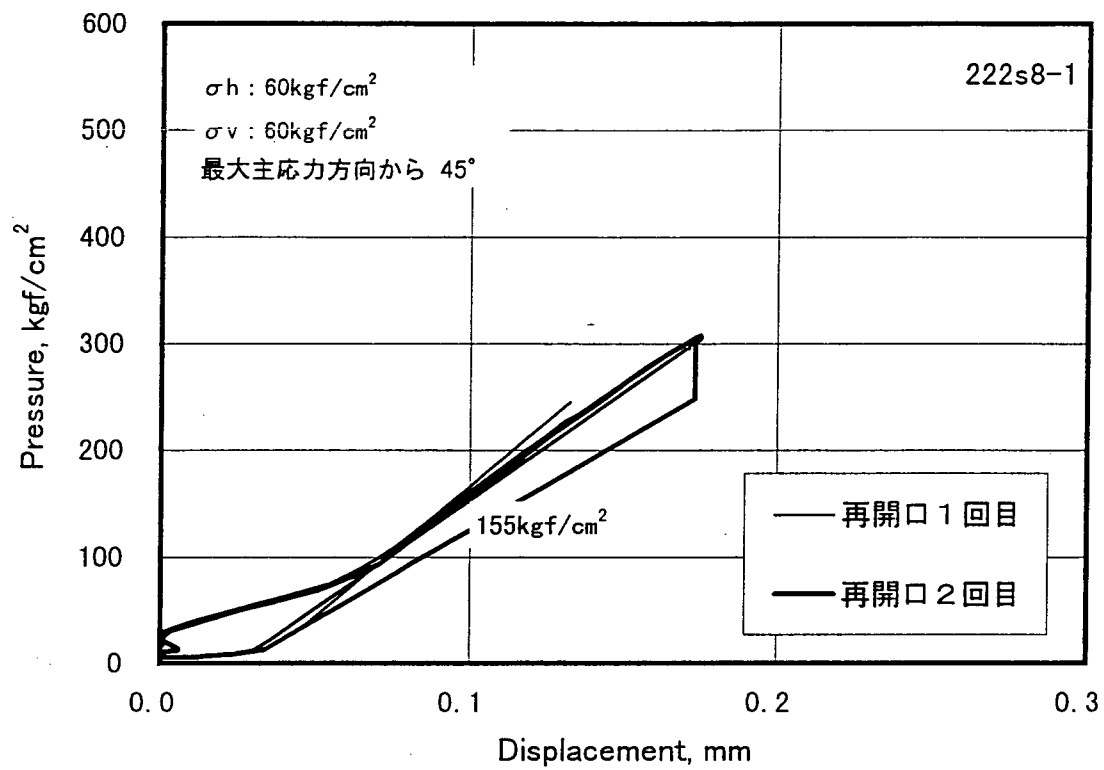


図4.5.60 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

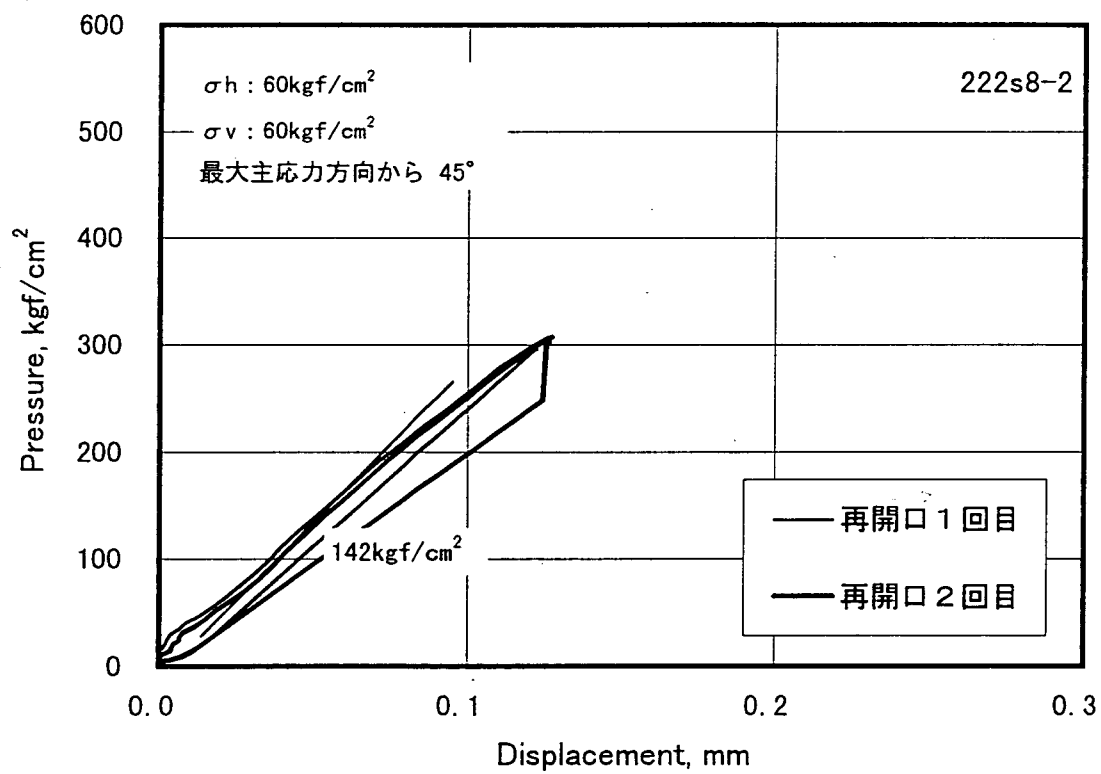


図4.5.60 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

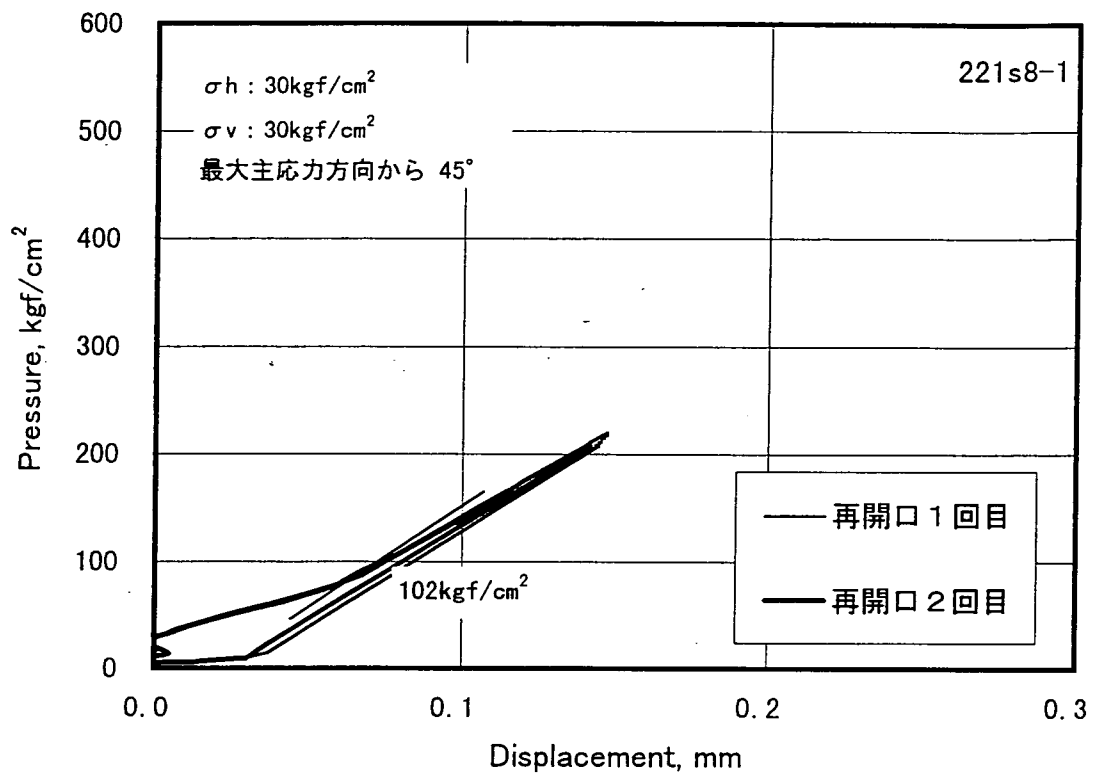


図4.5.61 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

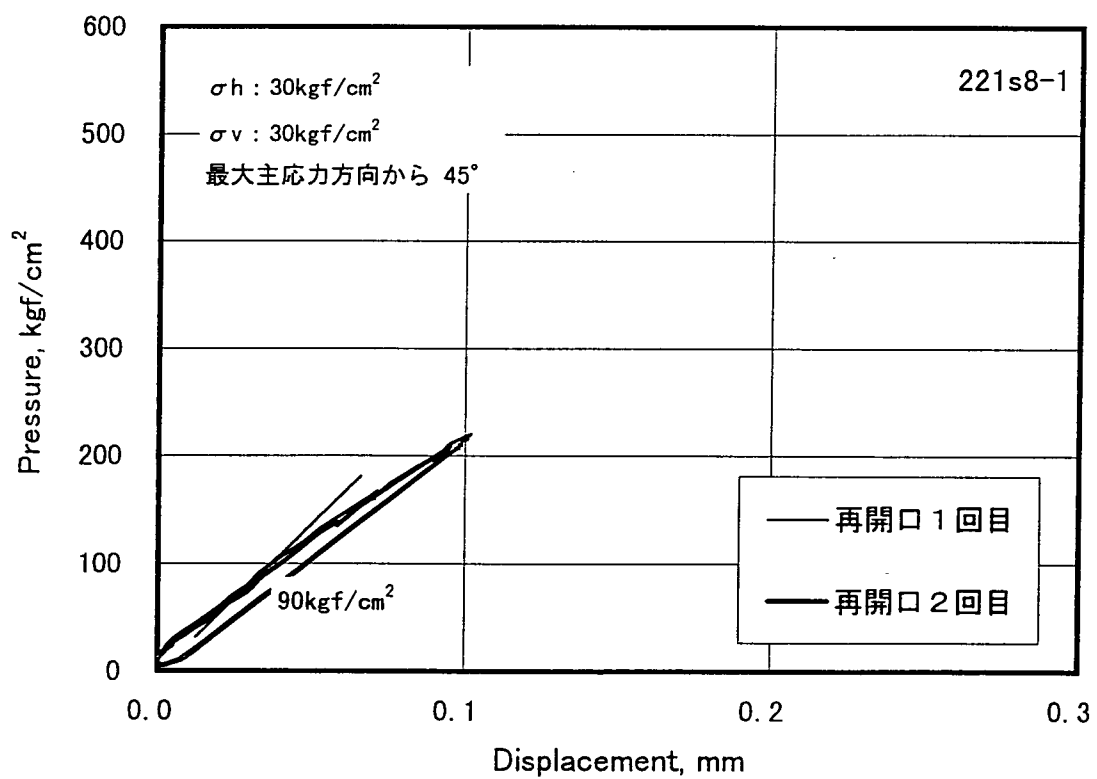


図4.5.61 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

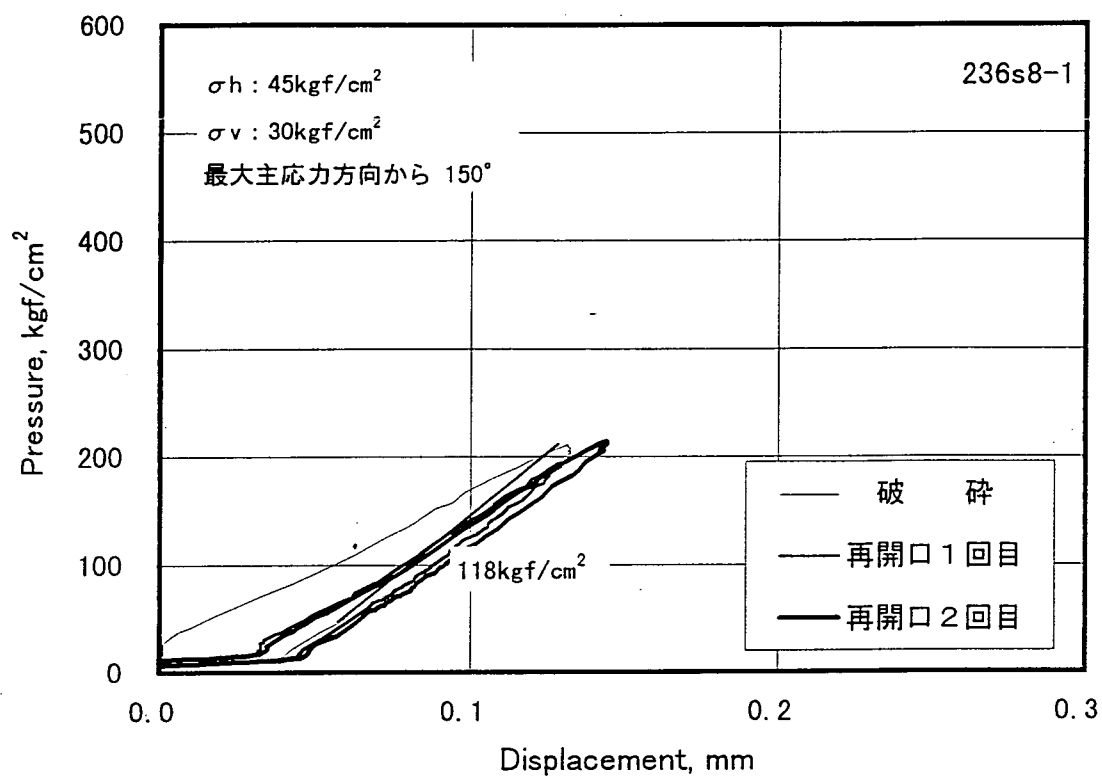


図4.5.62 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

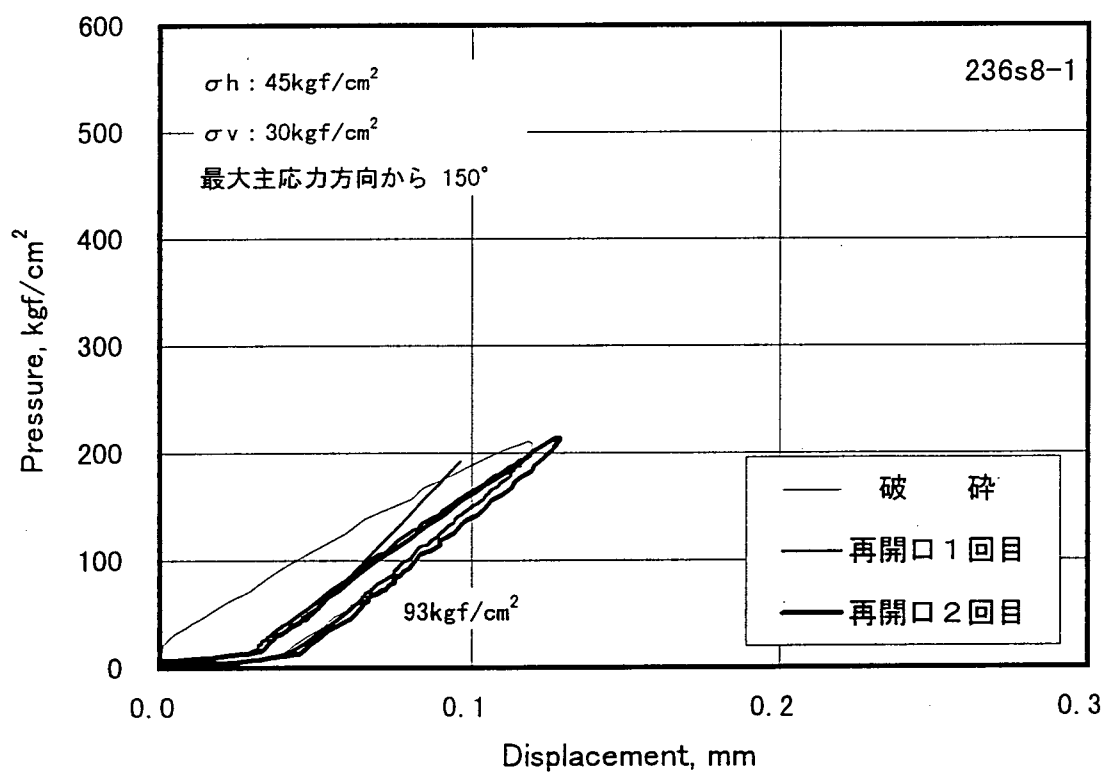


図4.5.62 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

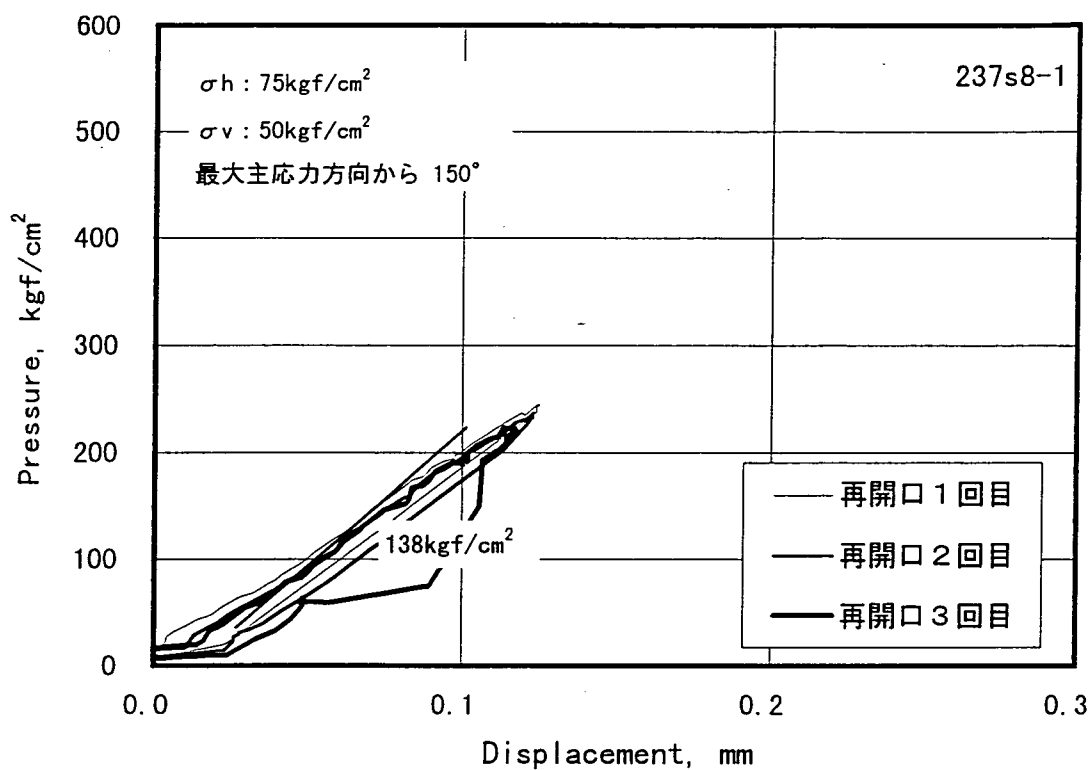


図4.5.63 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

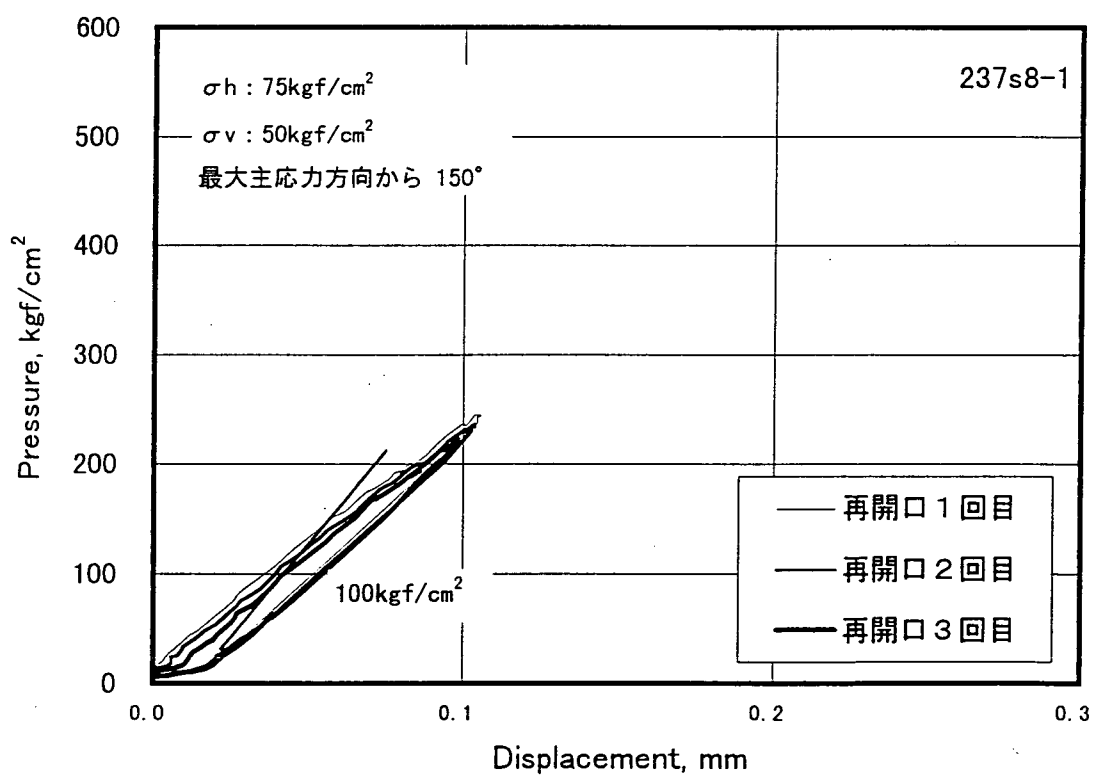


図4.5.63 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

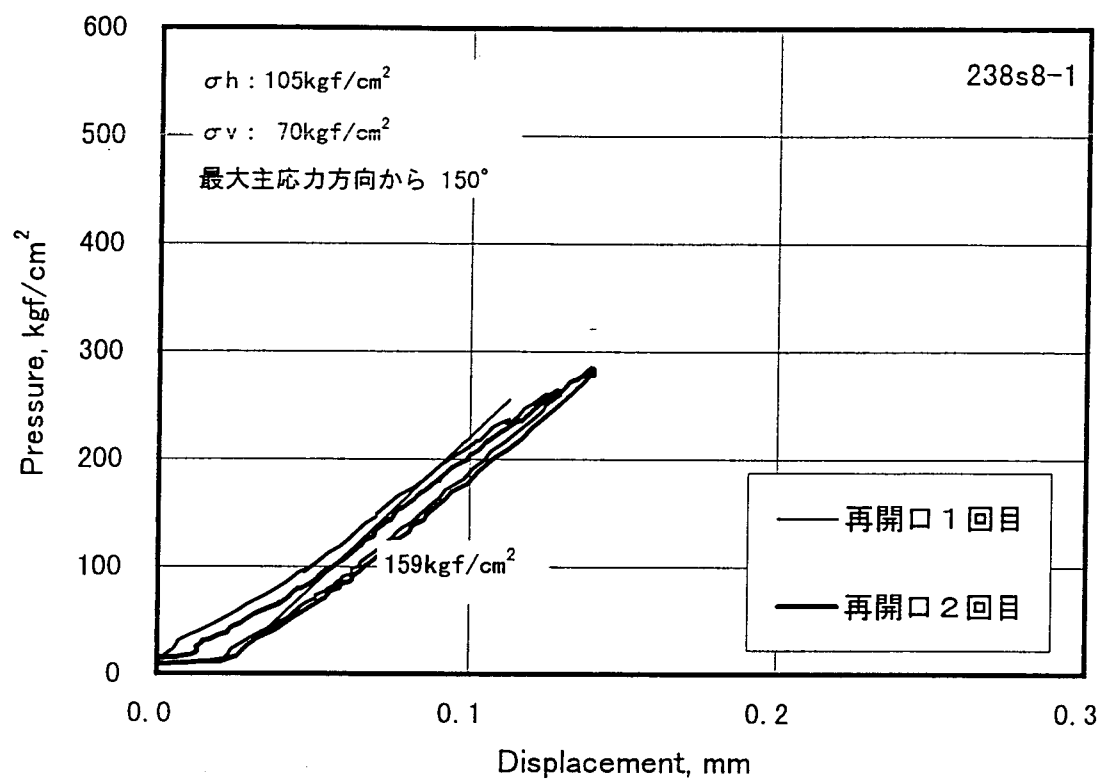


図4.5.64 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

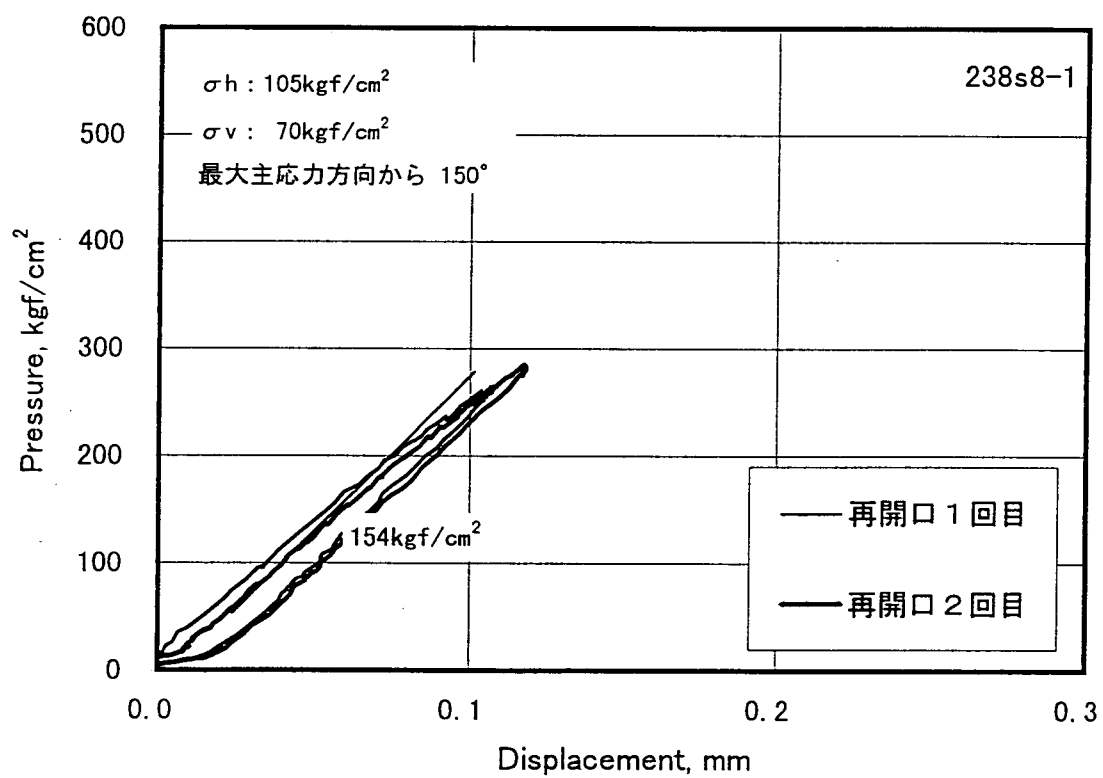


図4.5.64 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

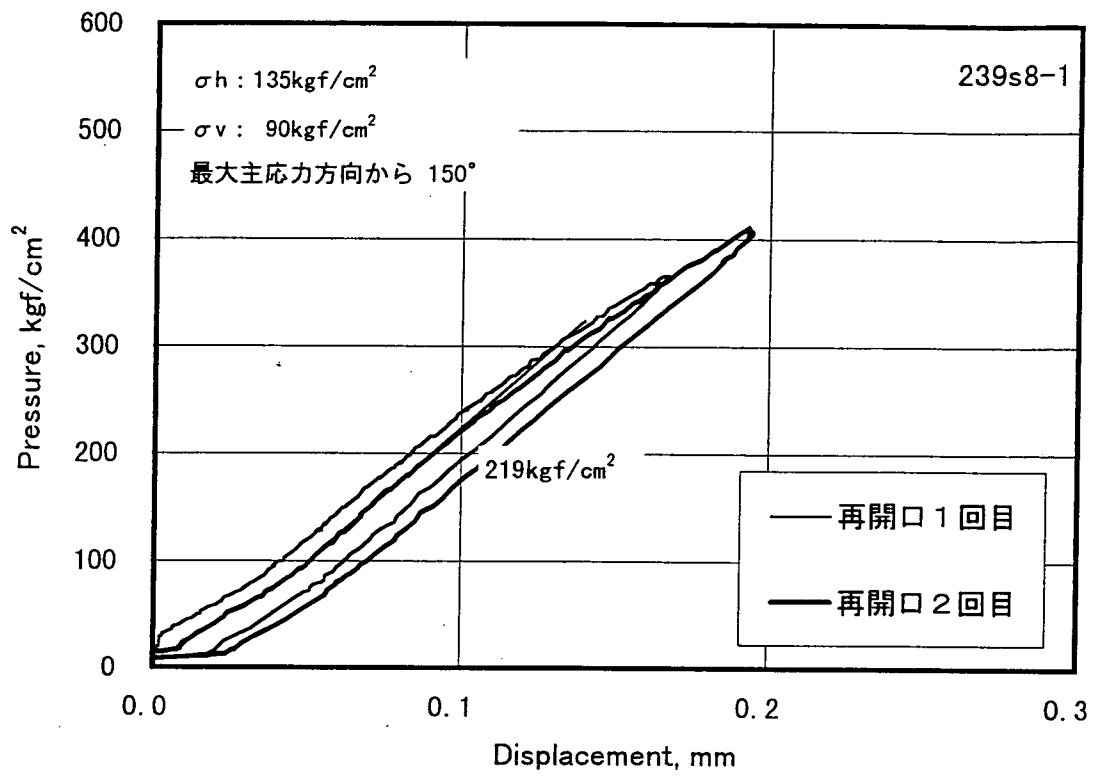


図4.5.65 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

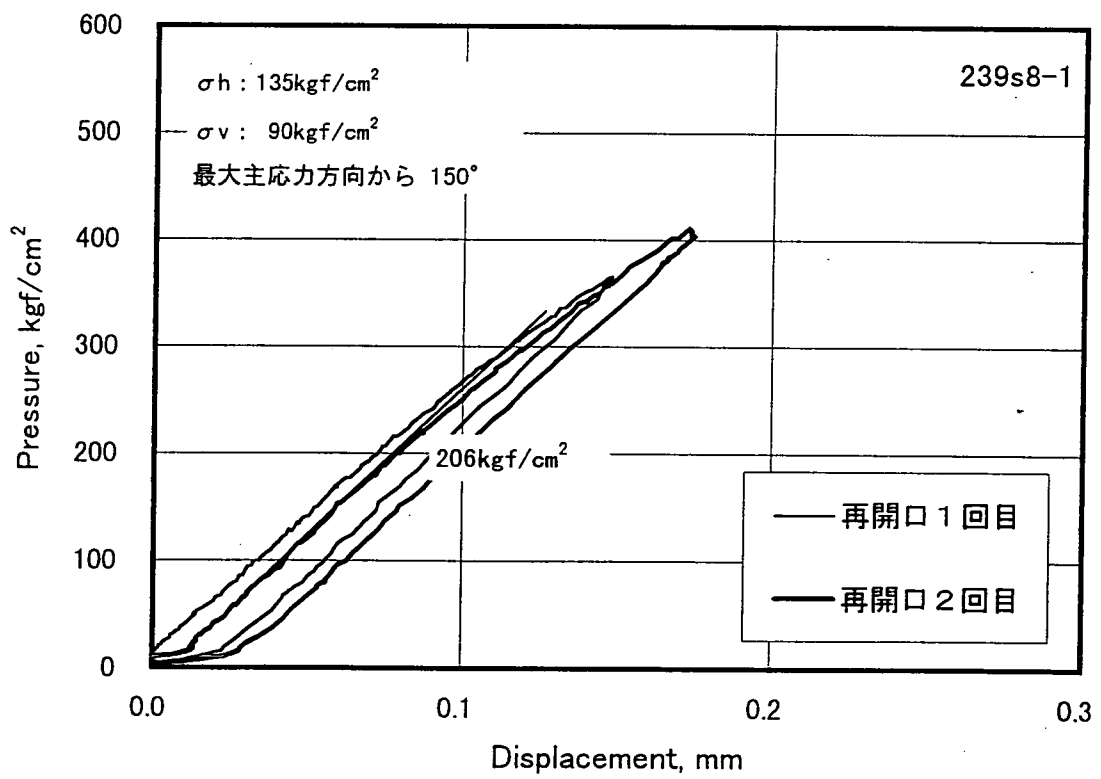


図4.5.65 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

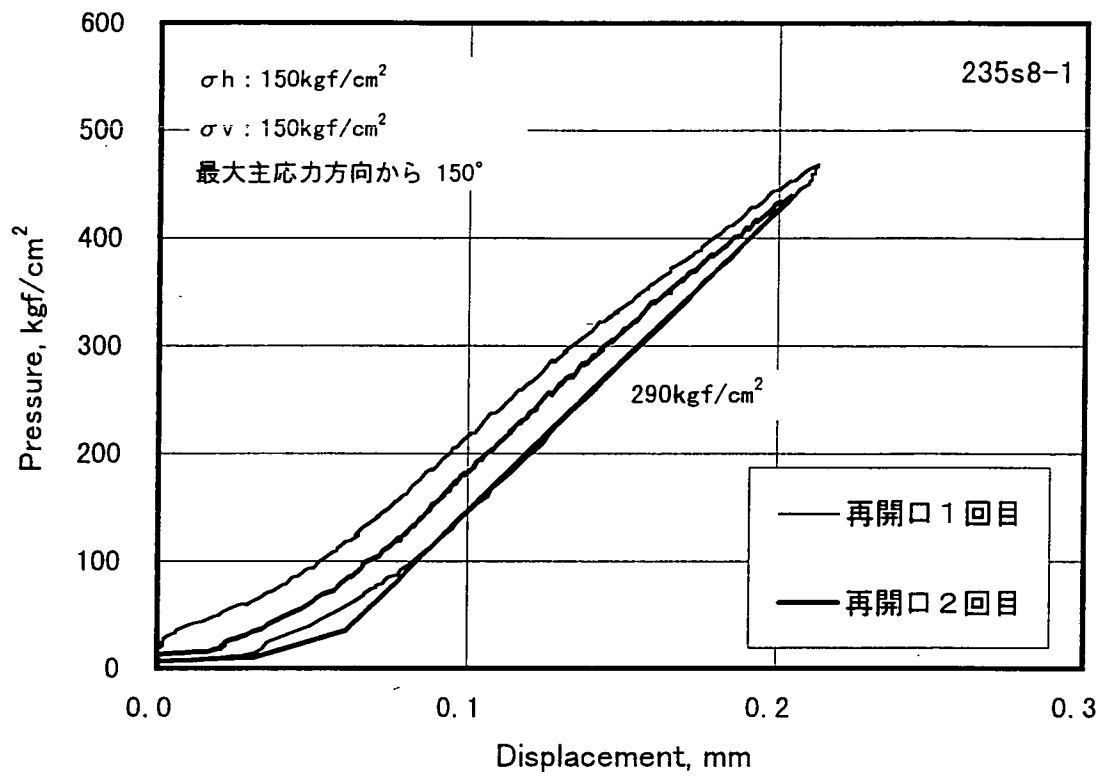


図4.5.66 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

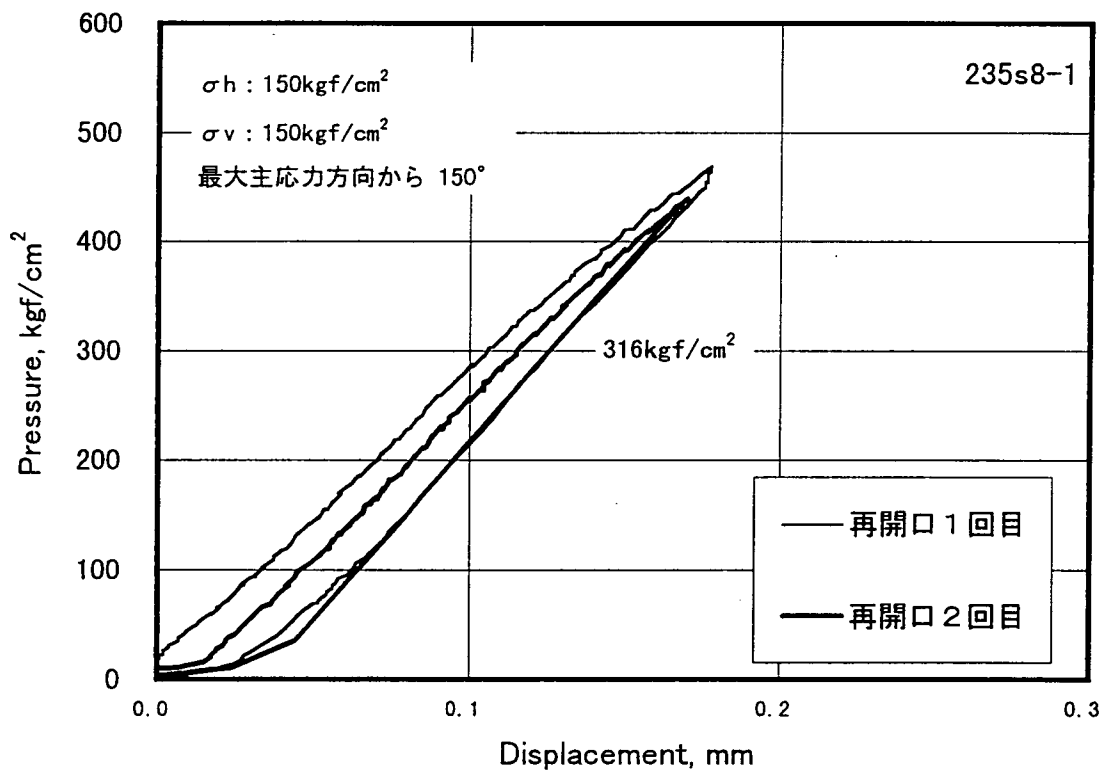


図4.5.66 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

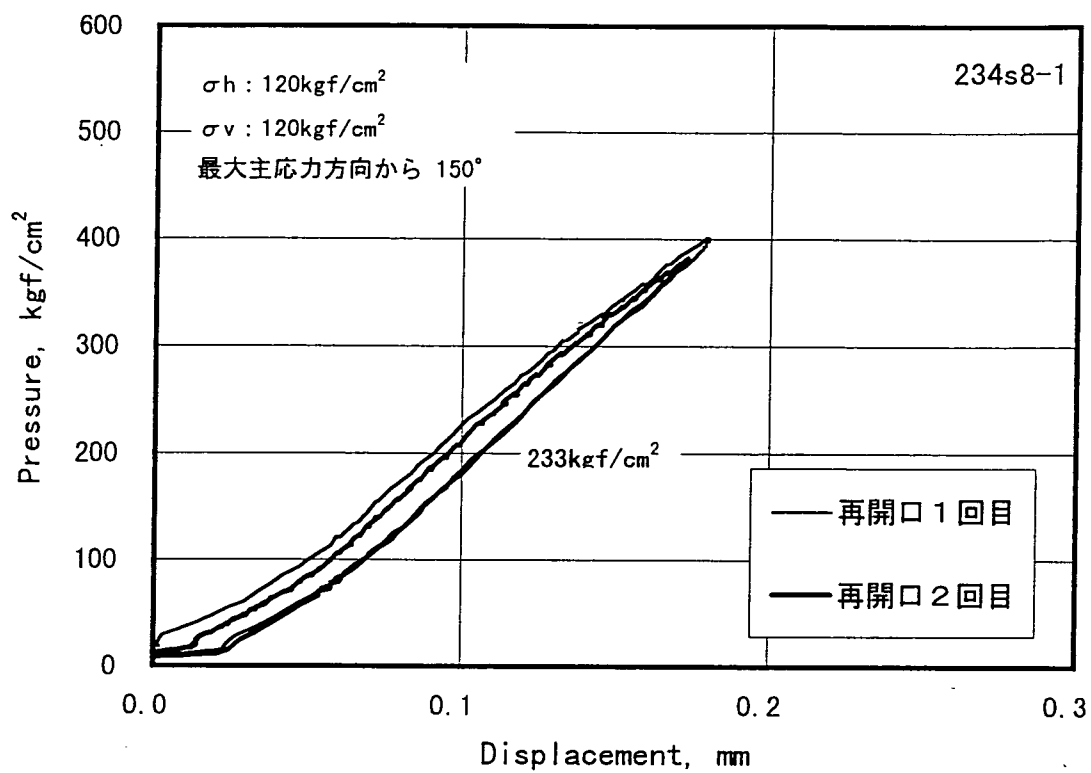


図4.5.67 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

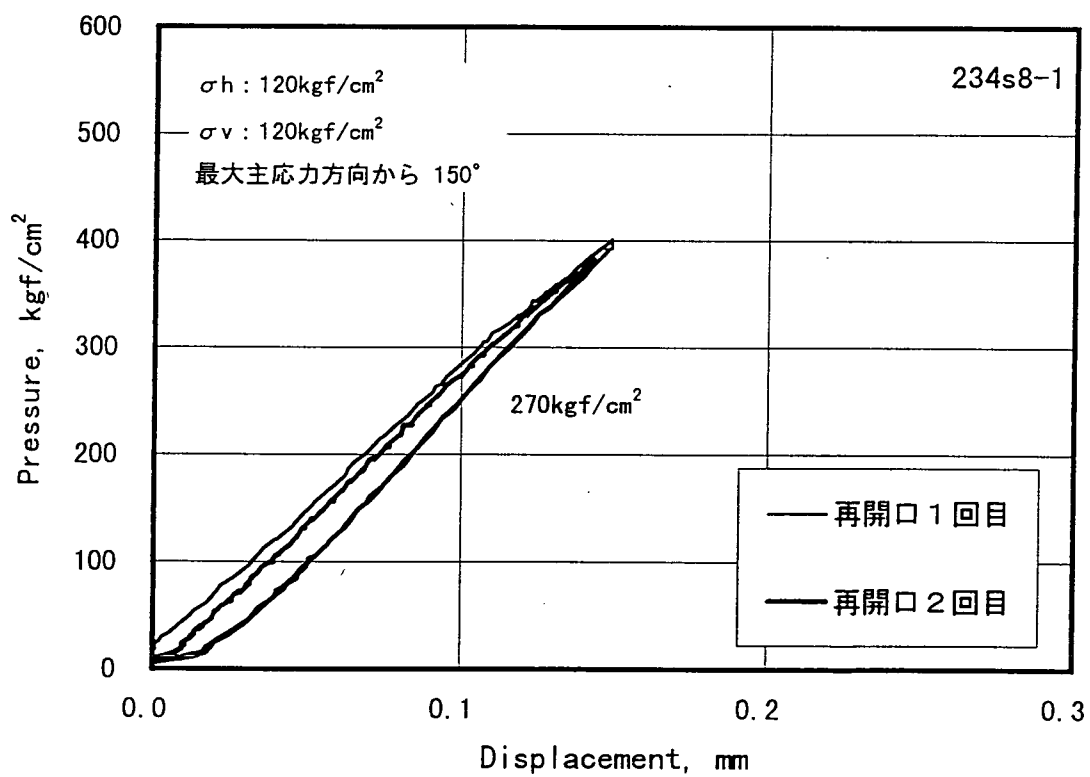


図4.5.67 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

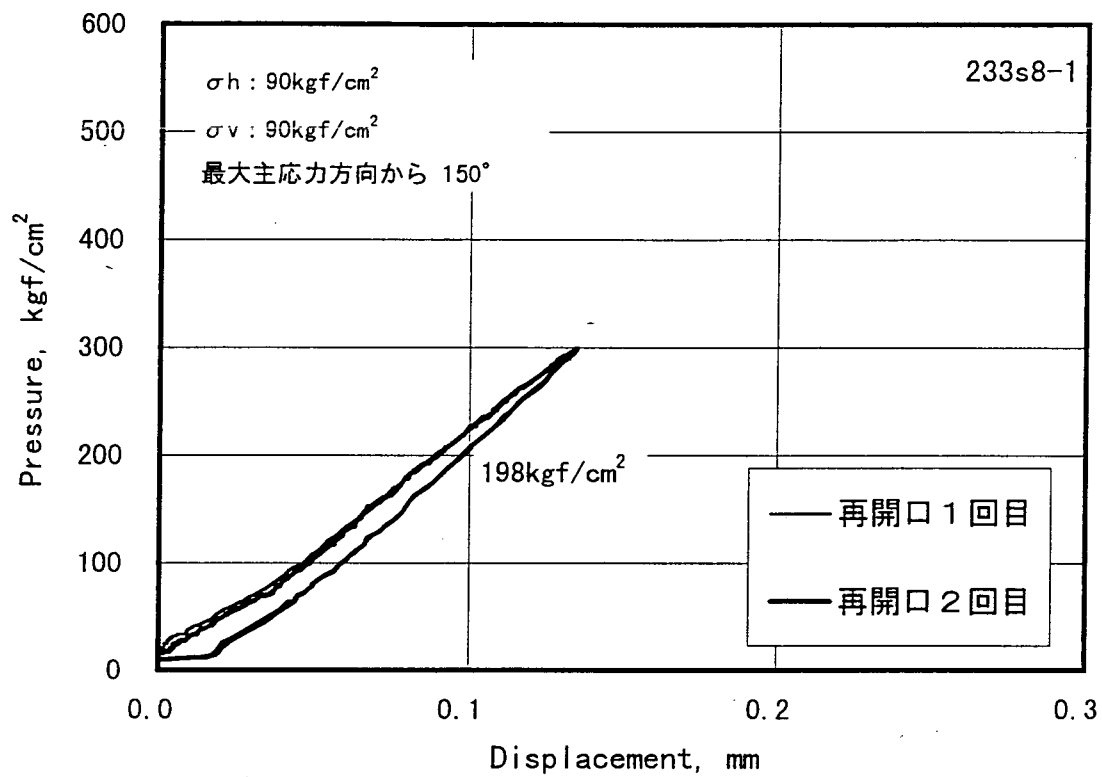


図4.5.68 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

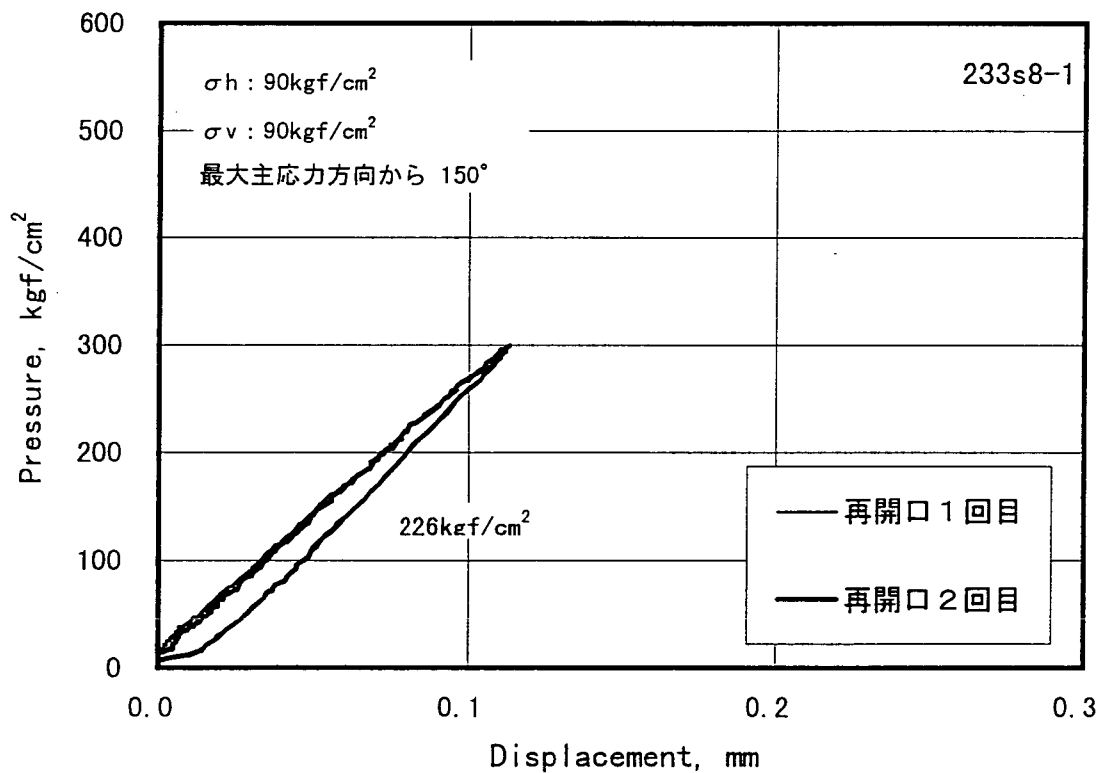


図4.5.68 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

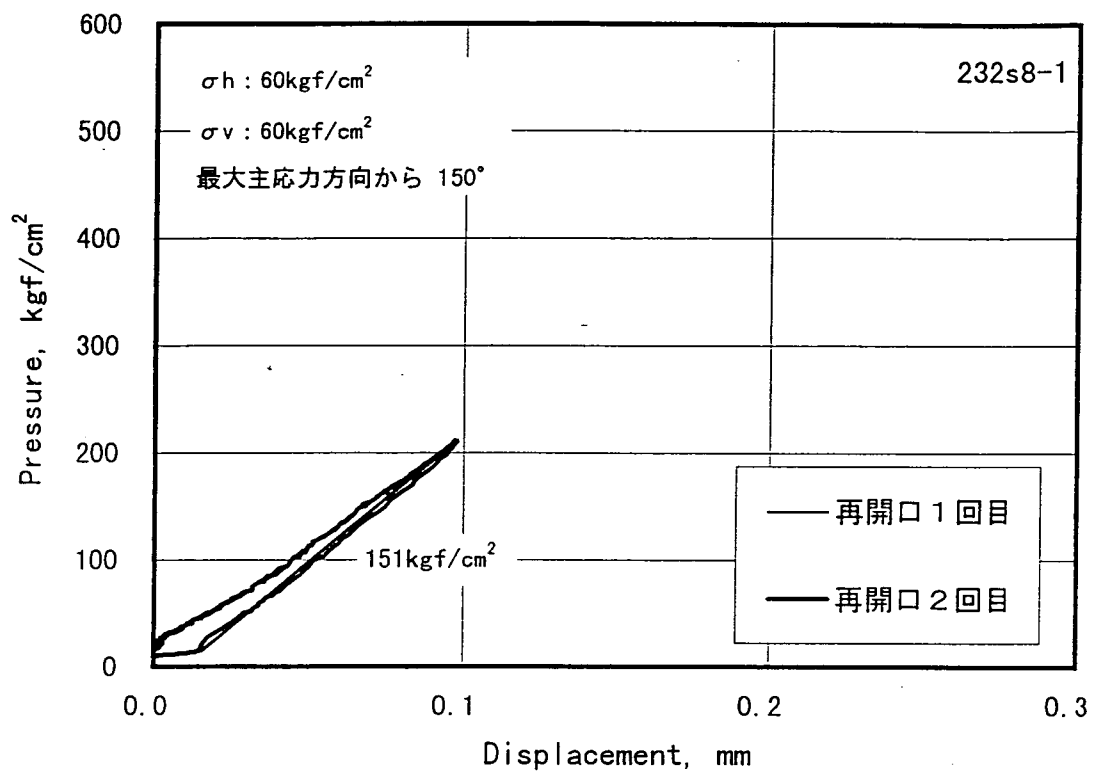


図4.5.69 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

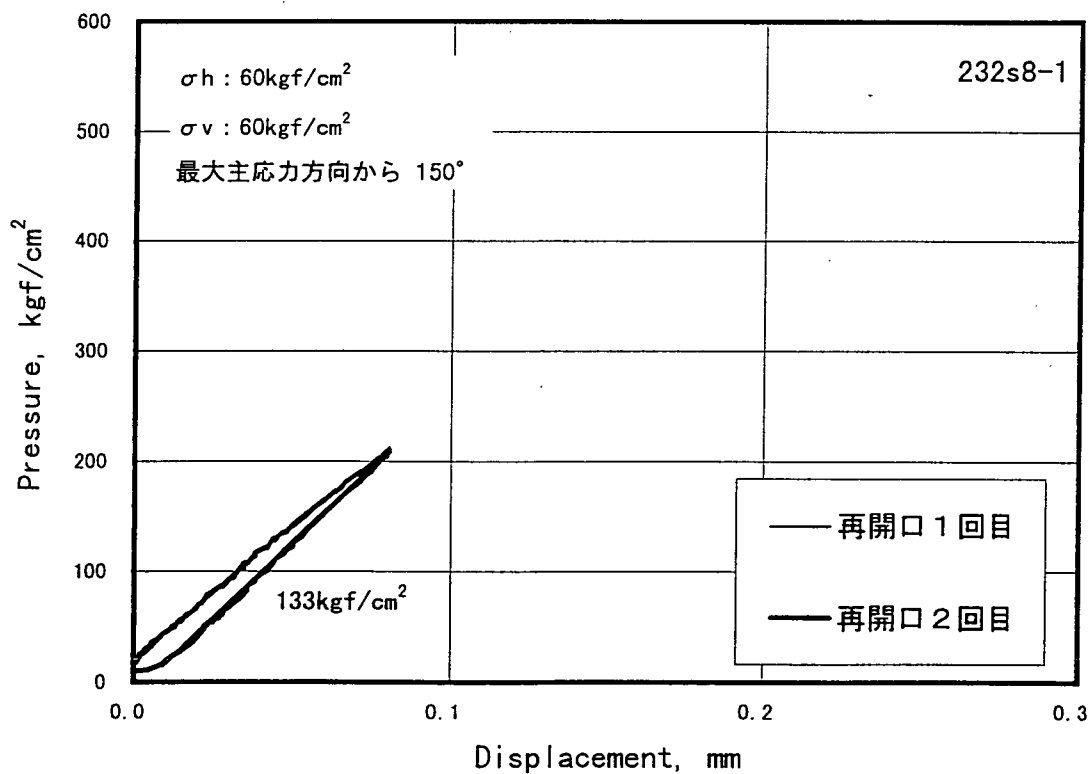


図4.5.69 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

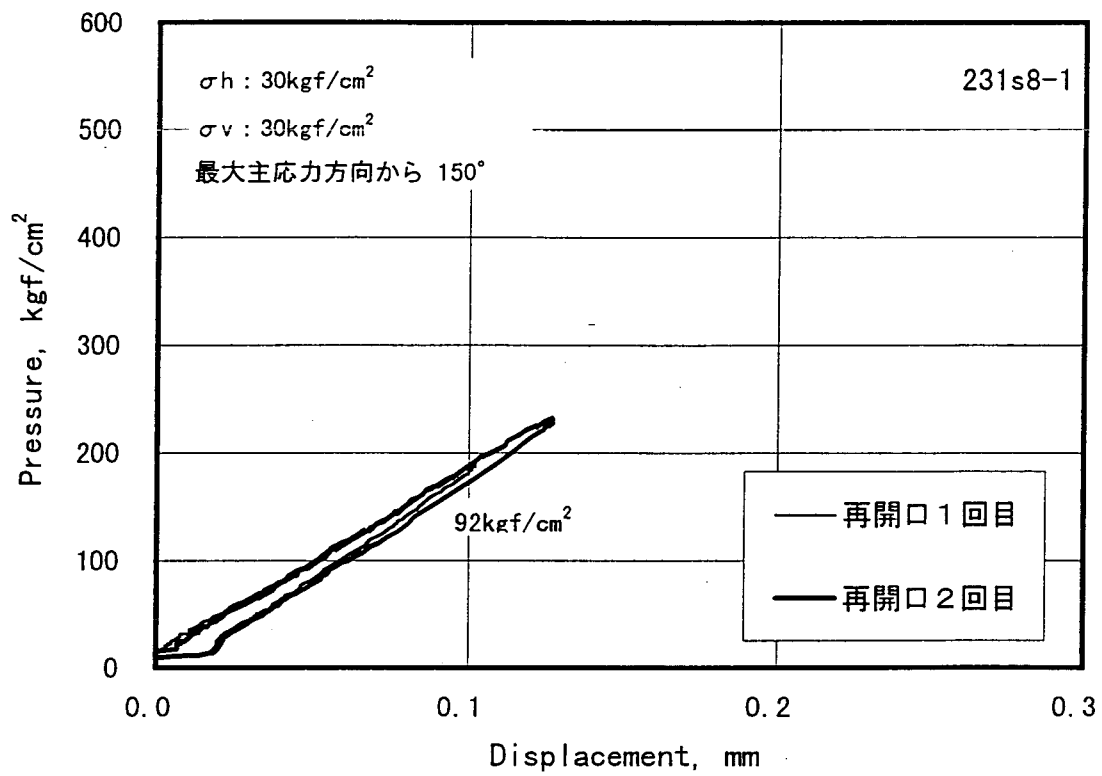


図4.5.70 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)

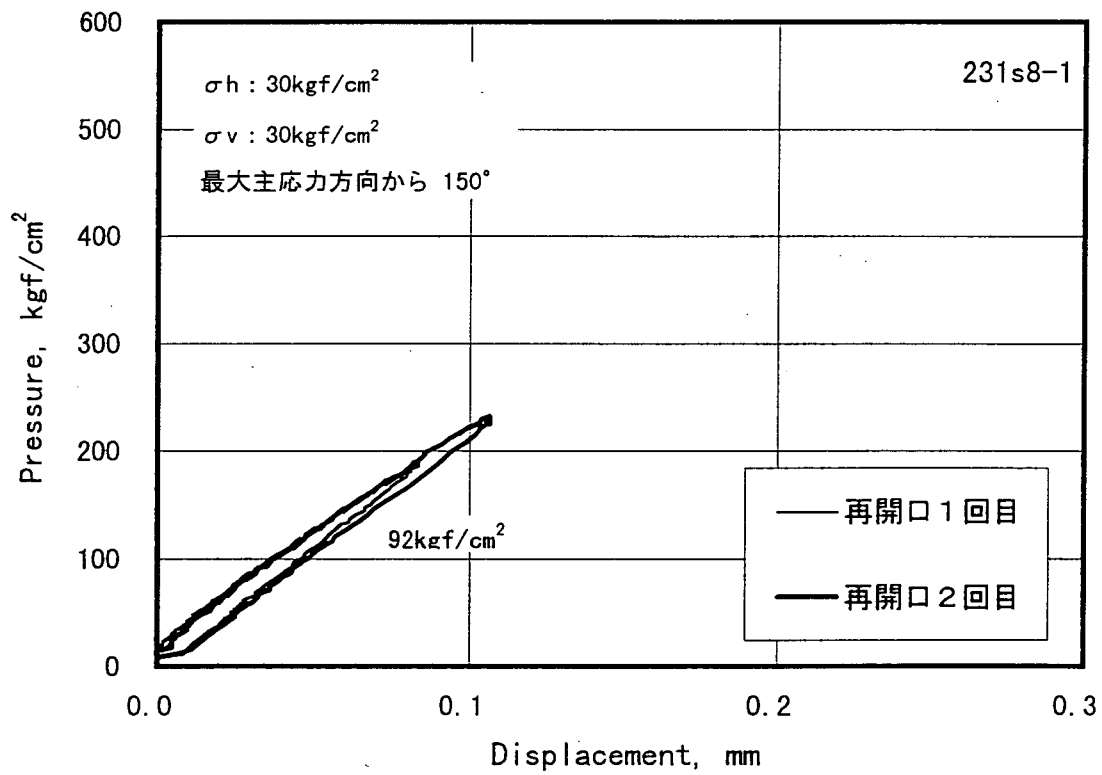


図4.5.70 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)

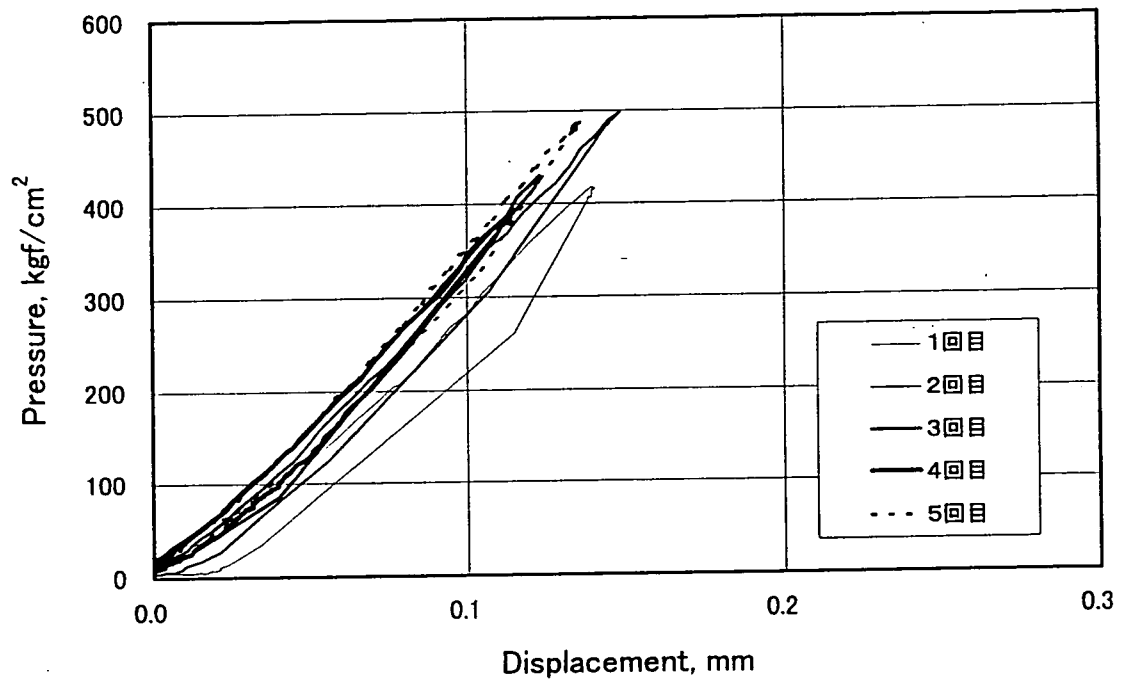


図4.5.71 (a). 圧力-変位曲線 (Ch. 1)
(昨年度実施の予備载荷試験)

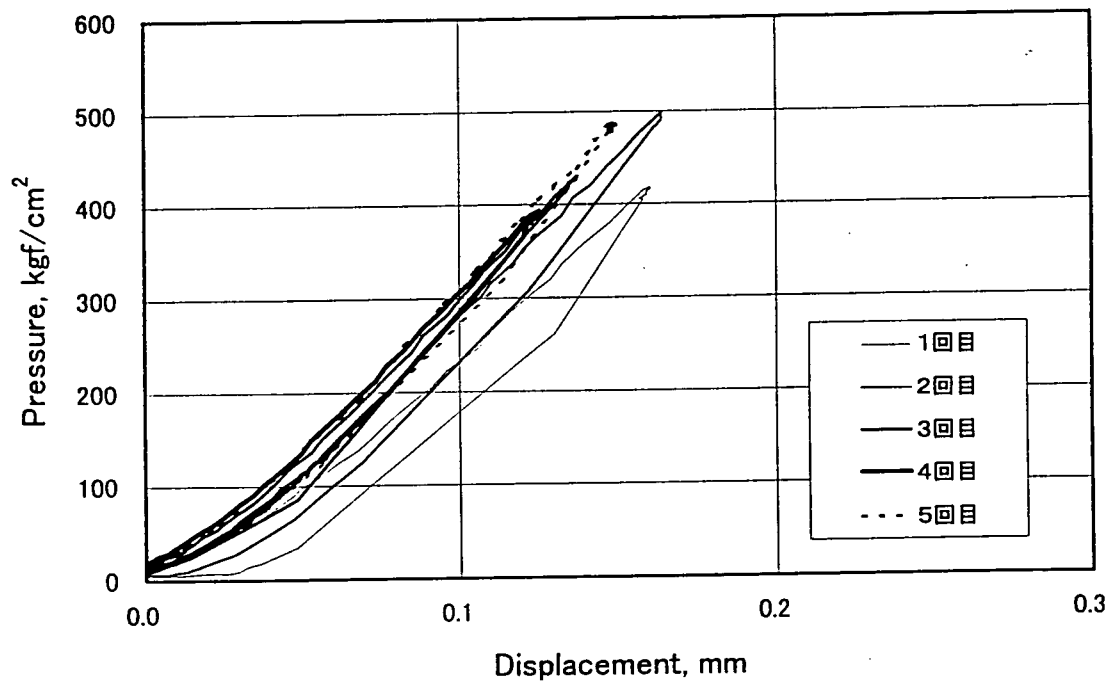


図4.5.71 (b). 圧力-変位曲線 (Ch. 2)
(昨年度実施の予備载荷試験)

$$(Pr)_{theo} = (3Q - P) + 4(P - Q)\sin^2(\theta' - \alpha)$$

P : 最大主応力

Q : 最小主応力

θ' : 亀裂の方向 (x軸から反時計まわり)

α : P の方向 (x軸から反時計まわり)

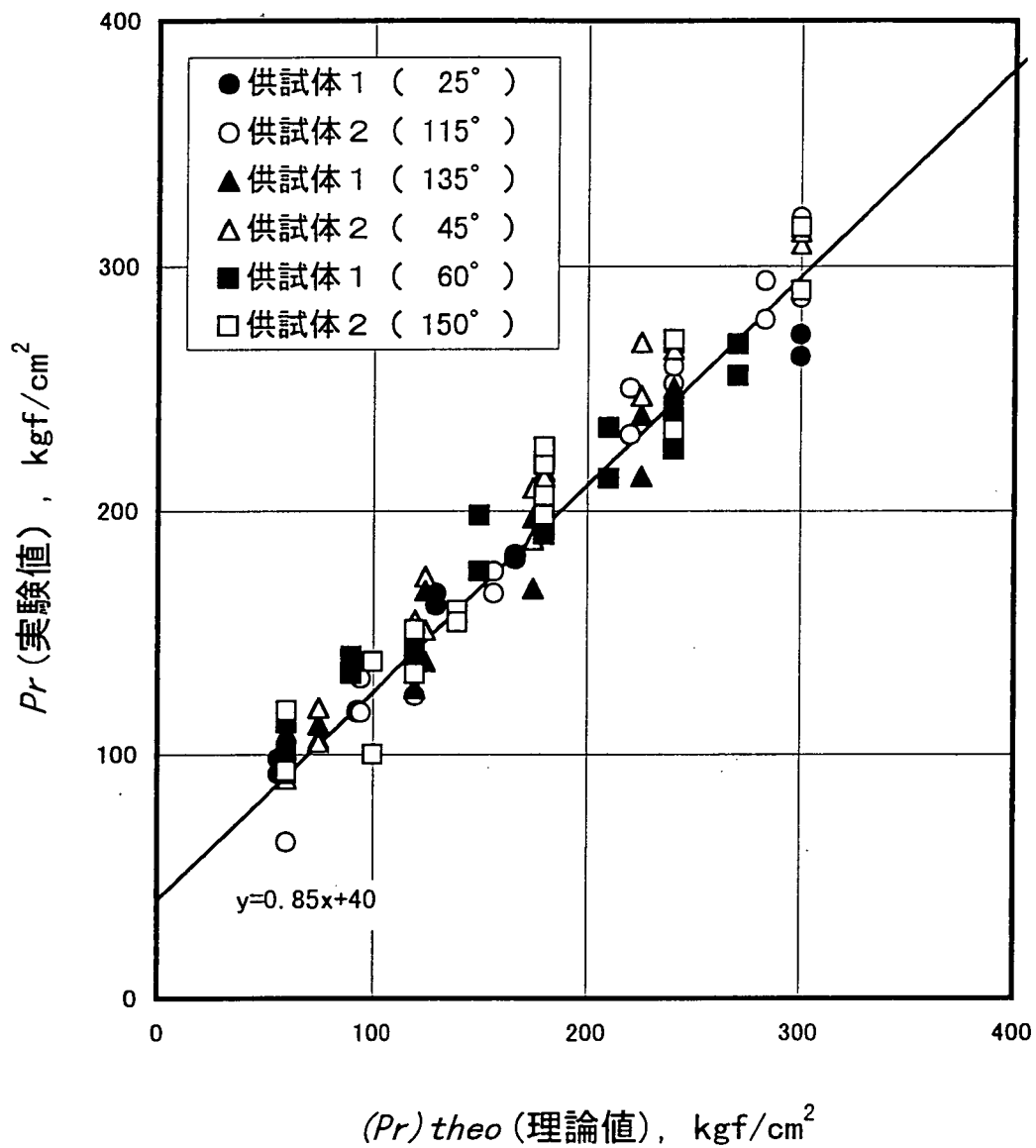


図4.5.72. $(\tau_{r\theta})_{r=a}=0$ とした場合に亀裂位置の接線応力がゼロになる内圧(理論値)とP-D曲線の折れ曲がり点から検出された亀裂再開口圧(実験値)との相関図

4.6. AE計測結果

本試験でAEの計測試験を行う前に、AEにより亀裂閉口圧力を捕らえることができるか否か確認するため、水圧破碎による破碎および亀裂の再開口試験を行った。そのとき計測された圧力の変化とAEの測定結果を図4.6.1.に示す。図4.6.1.では破碎試験、再開口試験いずれにおいても亀裂が閉口すると思われる50kgf/cm²付近にAE発生数のピークが見られる。このことは亀裂が閉口する際にはAEが発生し、それを捕らえることができることを示している。S-800による試験ではプローブからのノイズが予想されるものの、AEにより亀裂の閉口を捕らえる可能性が十分あることを示しているものと思われる。昨年度の試験では除荷速度が速く、亀裂閉口時のAEが捕らえにくいという点があったため、本試験では亀裂閉口時の除荷速度を遅くする降圧用バルブを油圧ラインに取り付け試験を行った。

S-800による本試験でAEの計測を行ったのは、表4.6.1.の「S-800 載荷試験AE設定一覧表」に示した試験である。AE計測結果は図4.6.2～4.6.48に示した。この図は、試験の経過時間をX軸にとり、Y1軸にはS-800の載荷圧力値（単位はkgf/cm²）、Y2軸にはAEの発生数をとっている。AEセンサは8個を使用しており、各図の下にセンサの配置と亀裂の角度を示している。ここでは、亀裂が発生すると考えられる方向に近い位置に設置したセンサのうち、最もAEを捕らえたセンサについてまとめた。なお個々のセンサについての計測結果は煩雑さを防ぐため巻末資料として添付した。

S-800 載荷に伴うAE計測の結果は、いずれの試験においても載荷初期段階及び除荷時最終段階の低圧時で発生数が増大している。このとき観測されたAEはS-800の鋼板摩擦シェルと供試体とのかみ合わせによるノイズと考えられる。

供試体No1の試験では破碎角度を3回変えて実施しているが、3回ともS800による亀裂発生時のAE発生数増加はあまり明確でない。これは上記した載荷初期段階の摩擦シェルかみ合わせによるノイズが多く発生し、亀裂発生時のAEと区別できなかった事によるものと思われる。ただ角度60度の3回目の破碎では載荷途中からAE発生数の増加が認められ、亀裂の発生に伸展していることも想定される。

亀裂再開口時では、降圧時にAEが急増するものが認められた。この中には、図4.6.34、38のようにS-800の折れ点圧力と対応しているものもあったが、折れ点圧力との対応が不明確な例（例えば図4.6.37、39.）や対応していない例（例えば図4.6.40、41）などまちまちであり、AEの発生数と折れ点圧力との対応は判断できない。ただし、再開口を繰り返し実施するとAEの発生数は減少する傾向が見られた。

供試体1の第2、3亀裂の試験ではS-800昇圧降圧によるAE発生数の増加は認められるものの顕著な傾向は認められなかった。これは載荷初期の鋼板シェルのかみ合わせによるノイズ除去を目的に、フィルター及びアンプ増幅dbを試行錯誤的に変化させた結果によるものである。供試体2ではいずれの試験も鋼板シェルのかみ合わせによるノイズ

除去はある程度出来たが、結果として亀裂発生時及び亀裂再開口併合時のA E計測が不明瞭となった。

S-800 載荷試験によるA E計測は、亀裂発生時及び亀裂併合時に発生するA Eを一部計測することは出来ていると思われるが、鋼板シェルと供試体との噛み合わせ等によるノイズ発生により、その計測条件設定が非常に微妙であることが判明した。今後、計測条件および計測したA Eの波形についても詳細な検討が必要と考えられる。

表4.6.1. S-800載荷試験AE設定一覧表

供試体 番号	実験内容	試験名	水平応力 (kgf/cm ²)	垂直応力 (kgf/cm ²)	角度 (水平から) (°)	AE設定		
						Ch数	amplitude (db)	slice level (mv)
1	破碎+再開口(1回目)	111S8-1	30	30	25	8	30	60
	再開口(2回目)	111S8-2	"	"	"	"	"	"
	再開口(3回目)	111S8-3	"	"	"	"	"	"
	再開口(1回目)	112S8-1	60	60	"	"	"	"
	再開口(2回目)	112S8-2	"	"	"	"	"	"
	再開口(1回目)	113S8-1	90	90	"	"	"	"
	再開口(2回目)	113S8-2	"	"	"	"	"	"
	再開口(1回目)	114S8-1	120	120	"	"	"	"
	再開口(2回目)	114S8-2	"	"	"	"	"	"
	再開口(1回目)	115S8-1	150	150	"	"	"	"
	再開口(3回)	116S8-1	45	30	"	"	"	"
	再開口(2回)	117S8-2	75	50	"	"	25	40
	再開口(2回)	118S8-1	105	70	"	"	22	40
	再開口(2回)	119S8-2	135	90	"	"	"	"
	破碎+再開口(1回)	121S8-1	30	30	135	4	22	40
	再開口(2回)	122S8-1	60	60	"	"	15	"
	再開口(2回)	123S8-1	90	90	"	"	"	"
	再開口(2回)	124S8-1	120	120	"	"	"	"
	再開口(2回)	126S8-1	45	30	"	"	20	"
	再開口(2回)	127S8-1	75	50	"	"	"	"
	再開口(2回)	128S8-1	105	70	"	"	"	"
	再開口(1回)	129S8-1	135	90	"	"	18	"
	破碎	131S8-1	30	30	60	4	15	40
	再開口(2回)	131S8-2	30	30	"	"	"	"
	再開口(2回)	132S8-1	60	60	"	"	"	"
	再開口(2回)	133S8-1	90	90	"	"	"	"
	再開口(2回)	134S8-1	120	120	"	"	"	"
	再開口(1回)	134S8-2	120	120	"	"	"	"
	再開口(2回)	136S8-1	45	30	"	"	"	"
	再開口(1回)	137S8-1	75	50	"	"	"	"
	再開口(1回)	138S8-1	105	70	"	"	"	"
	再開口(1回)	139S8-1	135	90	"	"	20	"
2								
	破碎+再開口(2回)	219S8-1	135	90	115	8	20	40
	再開口(3回)	218S8-2	105	70	"	"	"	"
	再開口(3回)	217S8-1	75	50	"	"	"	"
	再開口(3回)	216S8-1	45	30	"	"	"	"
	再開口(3回)	211S8-1	30	30	"	"	"	"
	再開口(3回)	212S8-2	60	60	"	"	"	"
	再開口(3回)	213S8-1	90	90	"	"	"	"
	再開口(3回)	214S8-1	120	120	"	"	30	"
	再開口(2回)	215S8-1	150	150	"	"	35	"
	破碎+再開口(2回)	226S8-1	45	30	45	8	30	40
	再開口(2回)	227S8-2	75	50	"	"	"	"
	再開口(2回)	228S8-1	105	70	"	"	"	"
	再開口(2回)	229S8-1	135	90	"	"	"	"
	再開口(2回)	225S8-1	150	150	"	"	"	"
	再開口(2回)	224S8-2	120	120	"	"	"	"

水圧破碎

水平圧力80kgf/cm²、垂直圧力50kgf/cm²

破碎

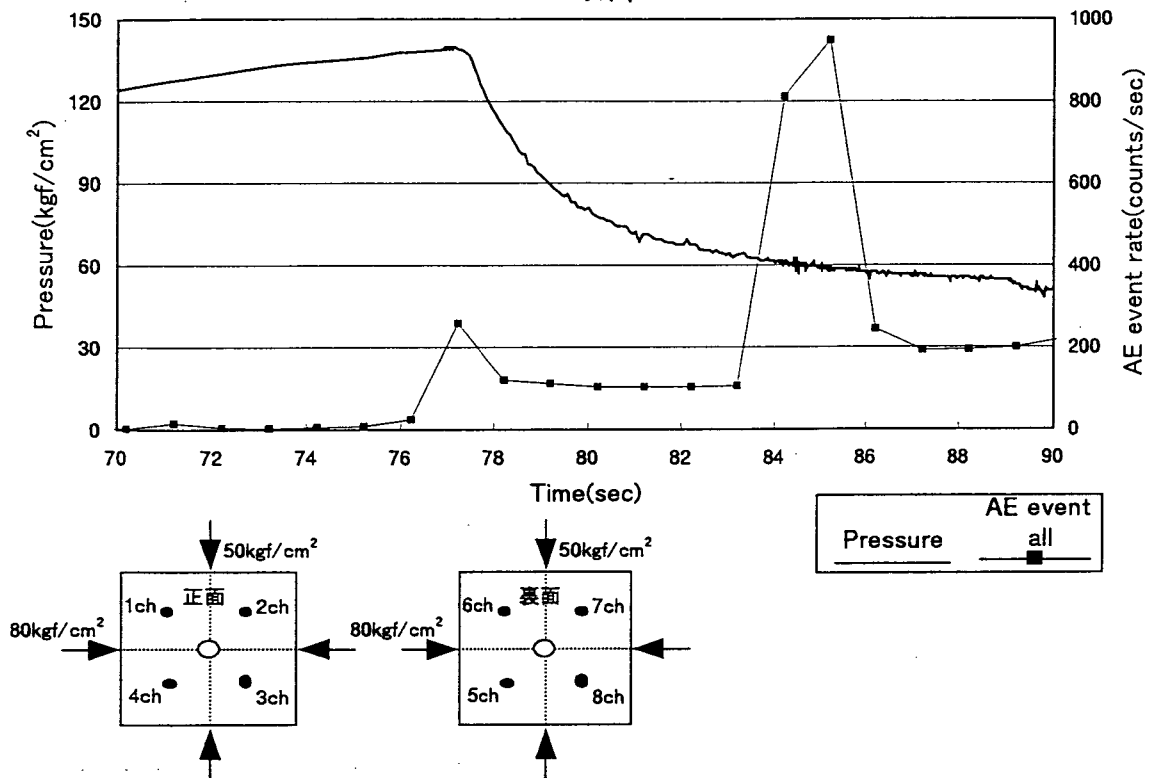


図 4. 6. 1 (a). 載荷圧と AE の発生数との関係 (破碎)

再開口

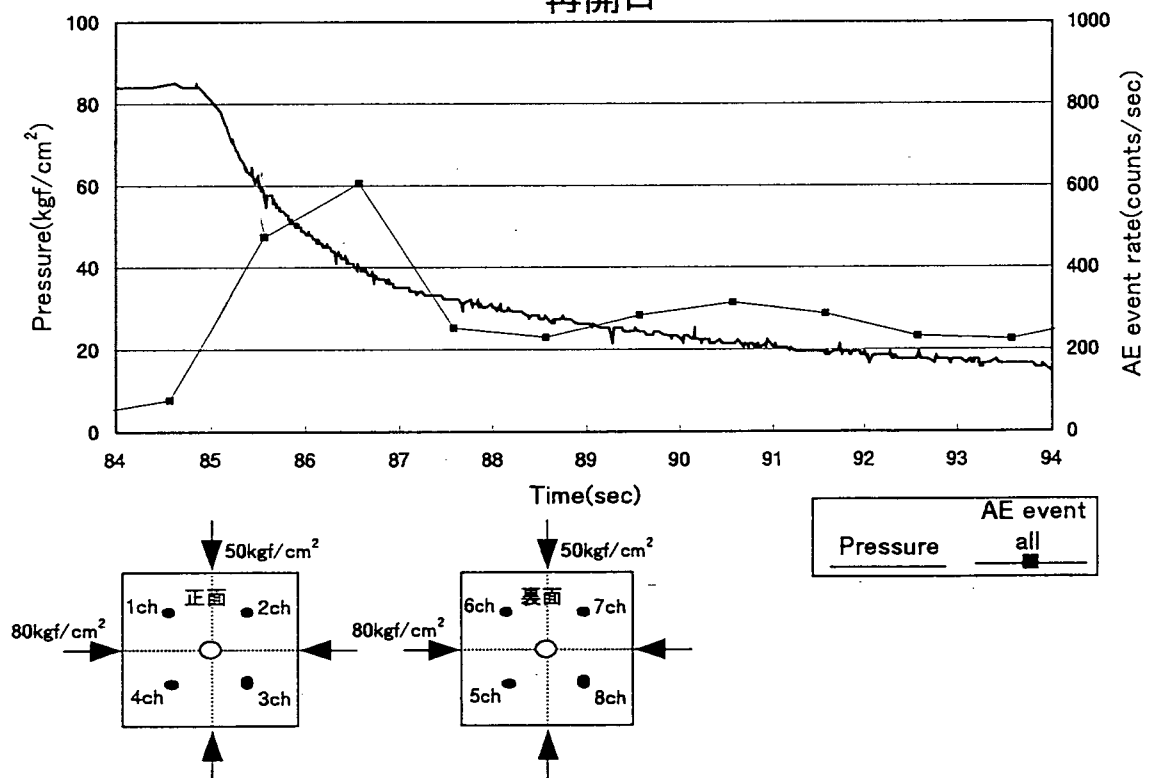


図 4. 6. 1 (b). 載荷圧と AE の発生数との関係 (再開口)

111S8-1

25° 水平圧力30kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

破碎

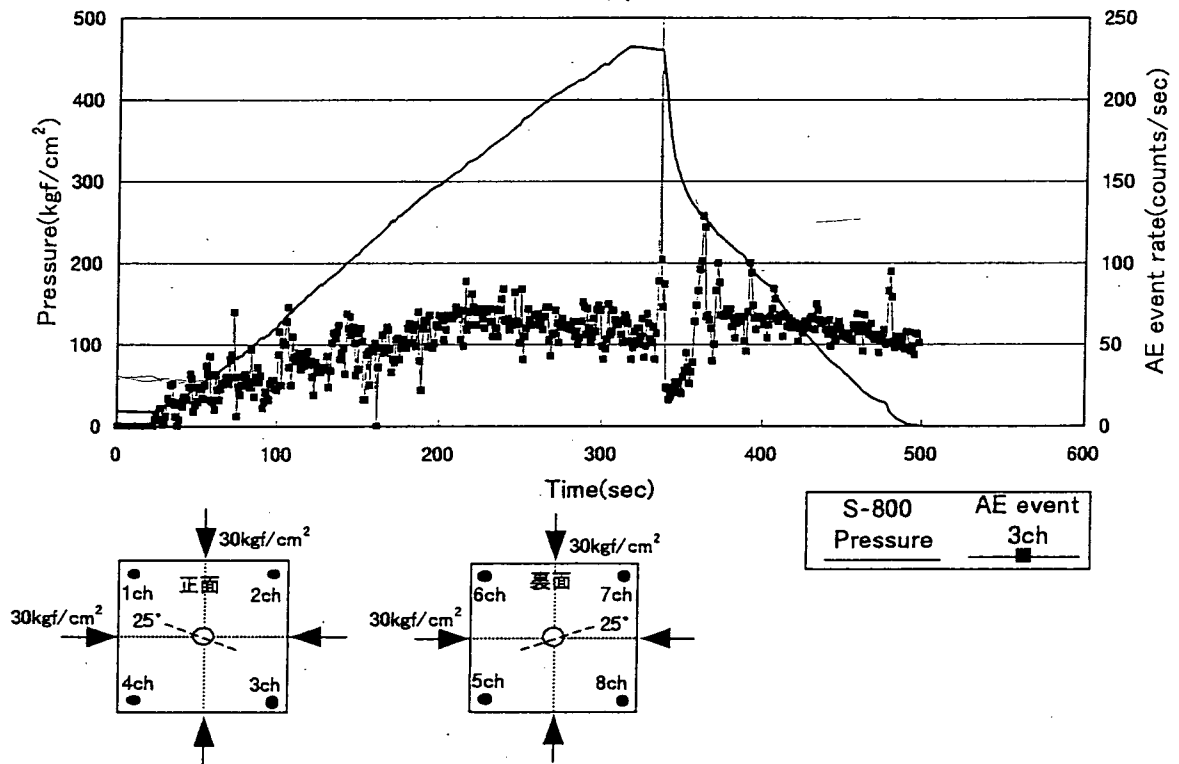


図4. 6. 2. 載荷圧とAEの発生数との関係 (破碎)

再開口(1回目)

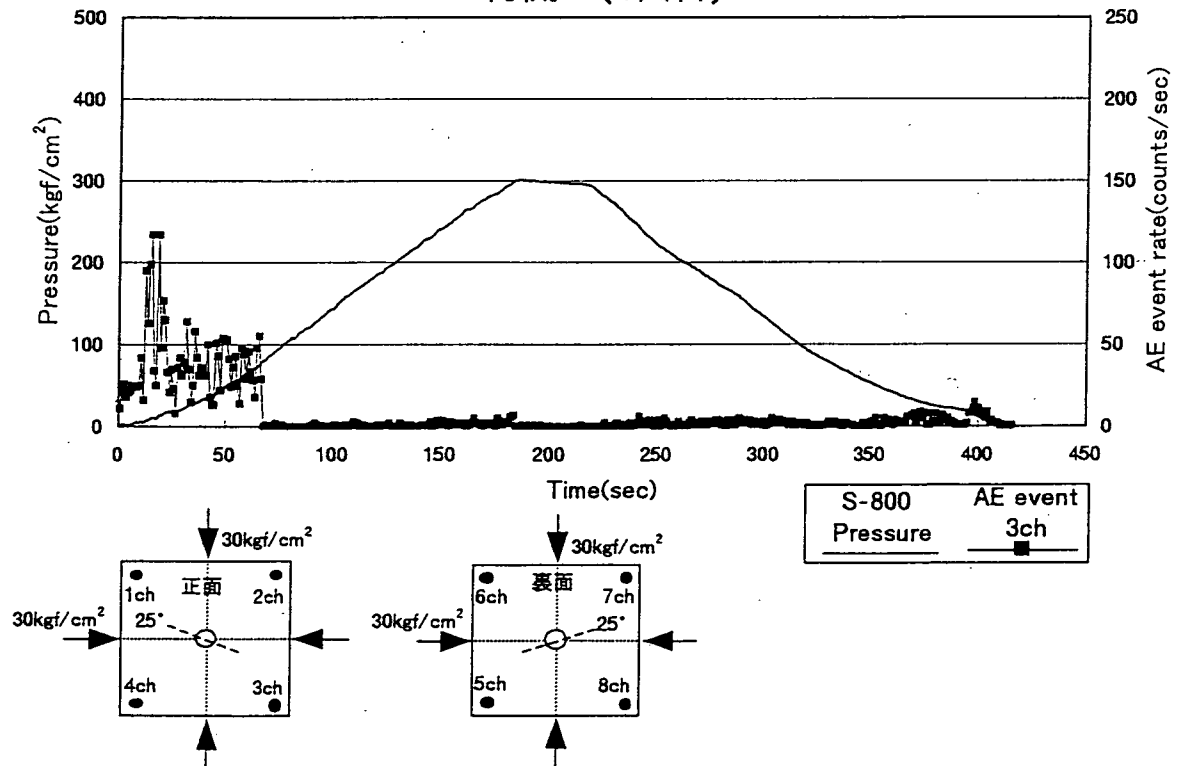


図4. 6. 2. 載荷圧とAEの発生数との関係 (再開口)

111S8-2

25° 水平圧力30kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(2回目)

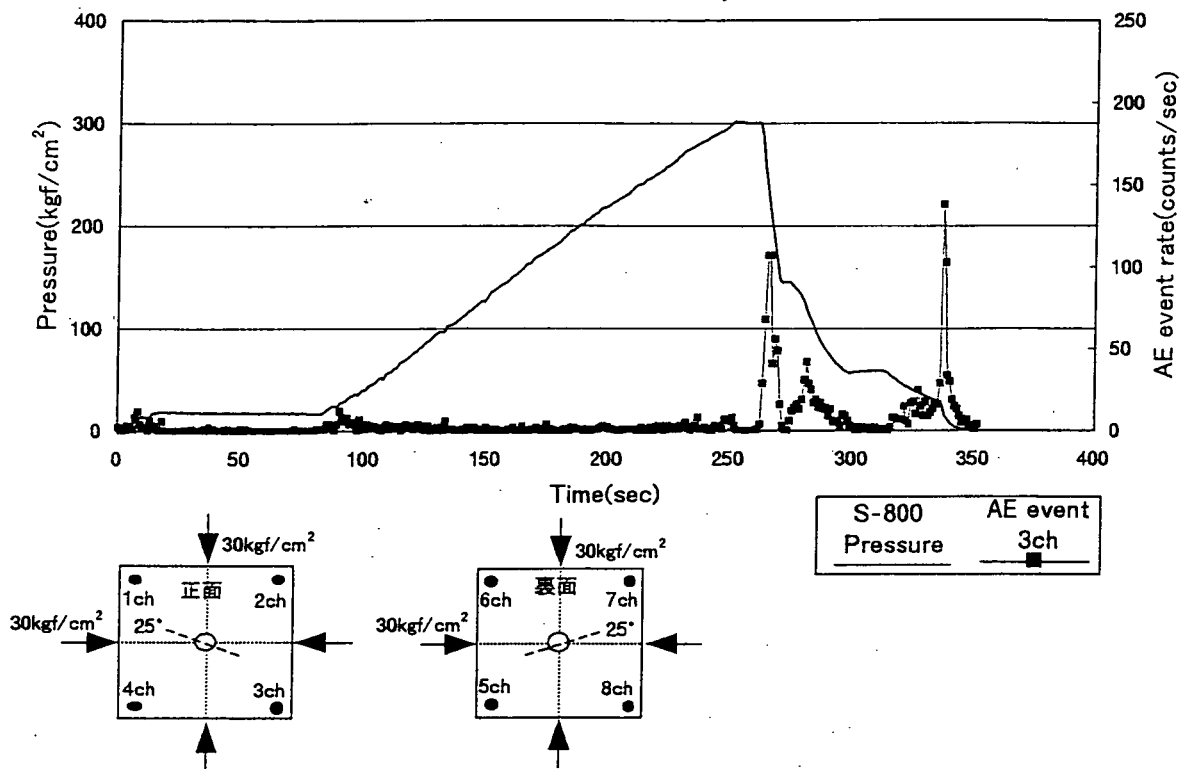


図4.6.3. 載荷圧とAEの発生数との関係

111S8-3

再開口(3回目)

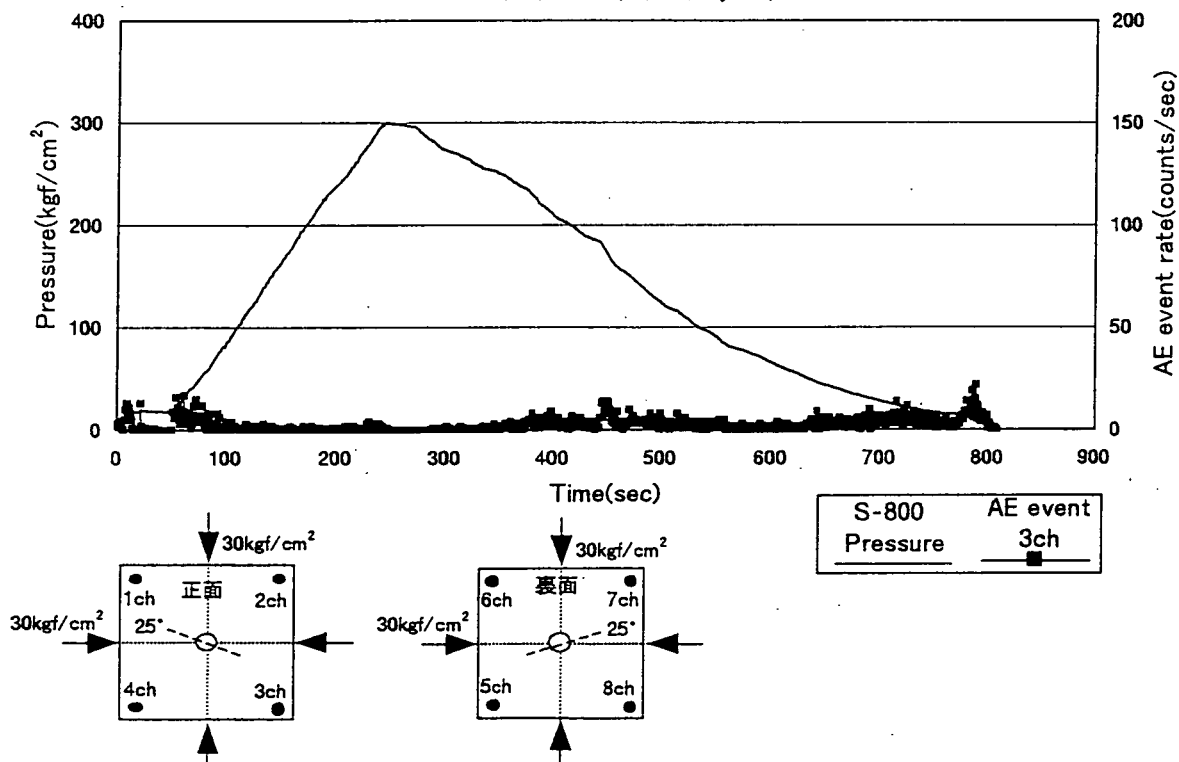


図4.6.4. 載荷圧とAEの発生数との関係

112S8-1

25° 水平圧力60kgf/cm²、垂直圧力60kgf/cm²

再開口(1回目)

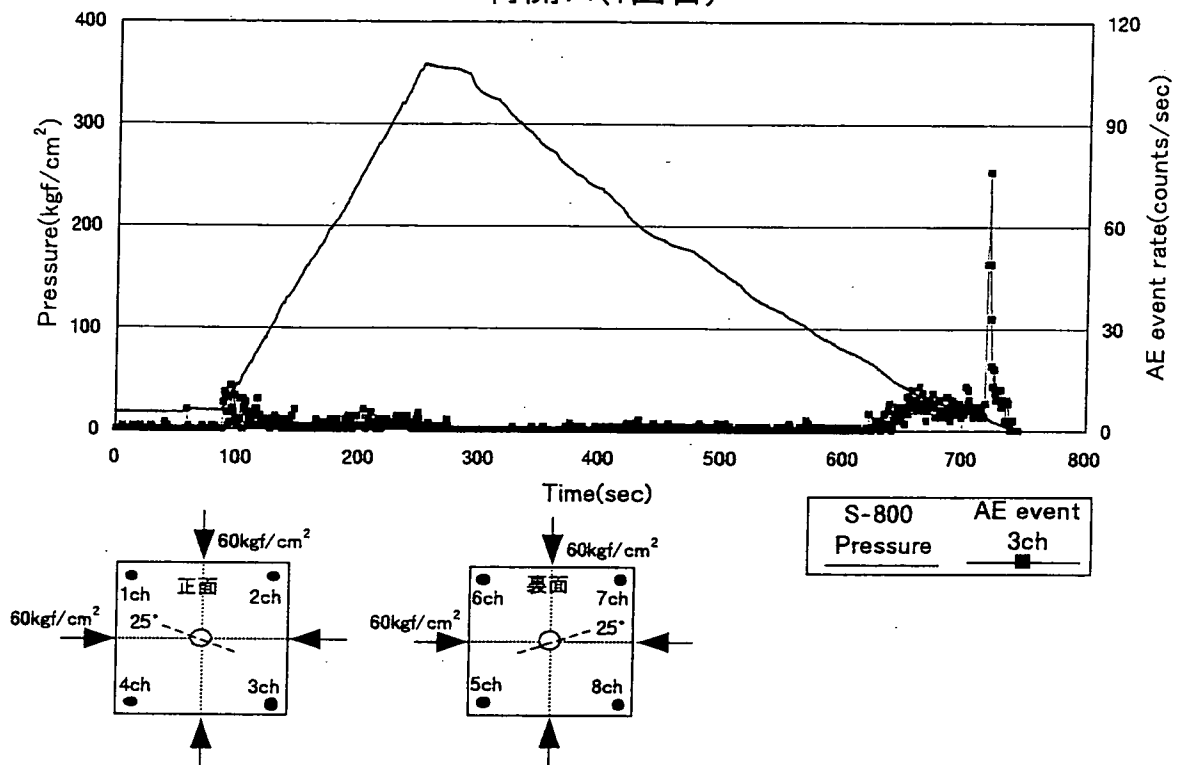


図4.6.5. 載荷圧とAEの発生数との関係

112S8-2

再開口(2回目)

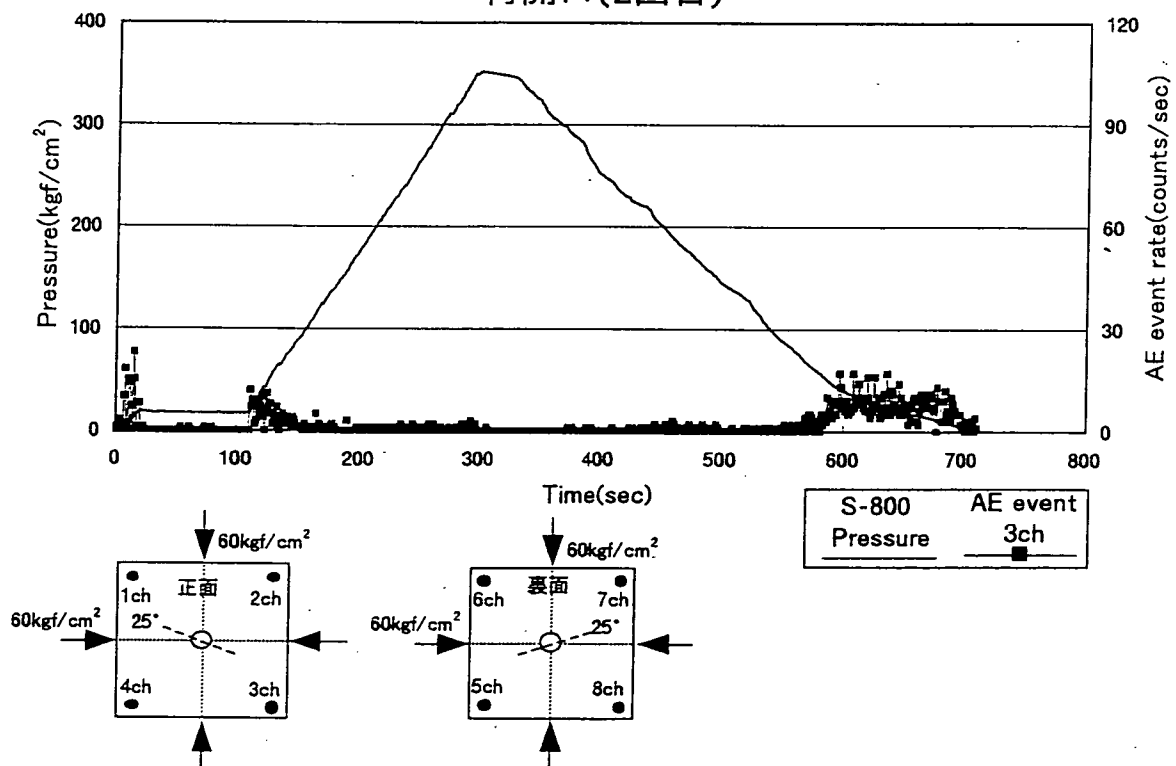


図4.6.6. 載荷圧とAEの発生数との関係

113S8-1

25° 水平圧力90kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(1回目)

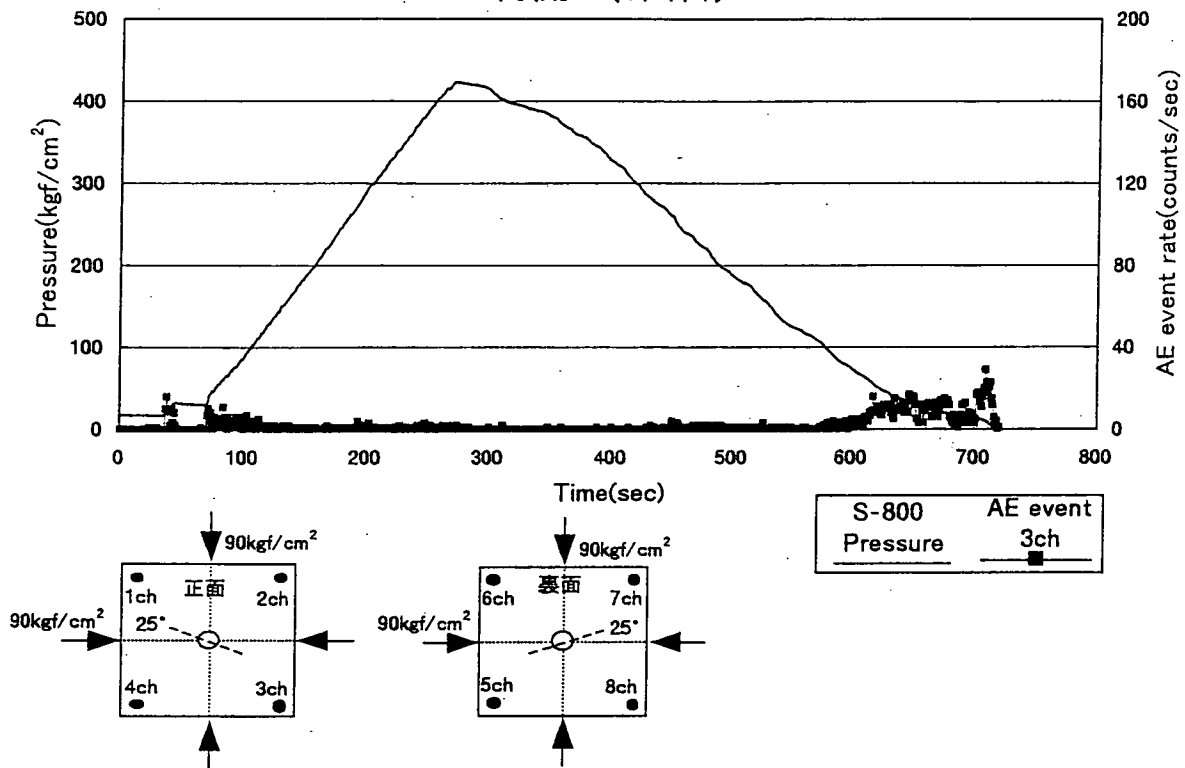


図4.6.7. 載荷圧とAEの発生数との関係

113S8-2

再開口(2回目)

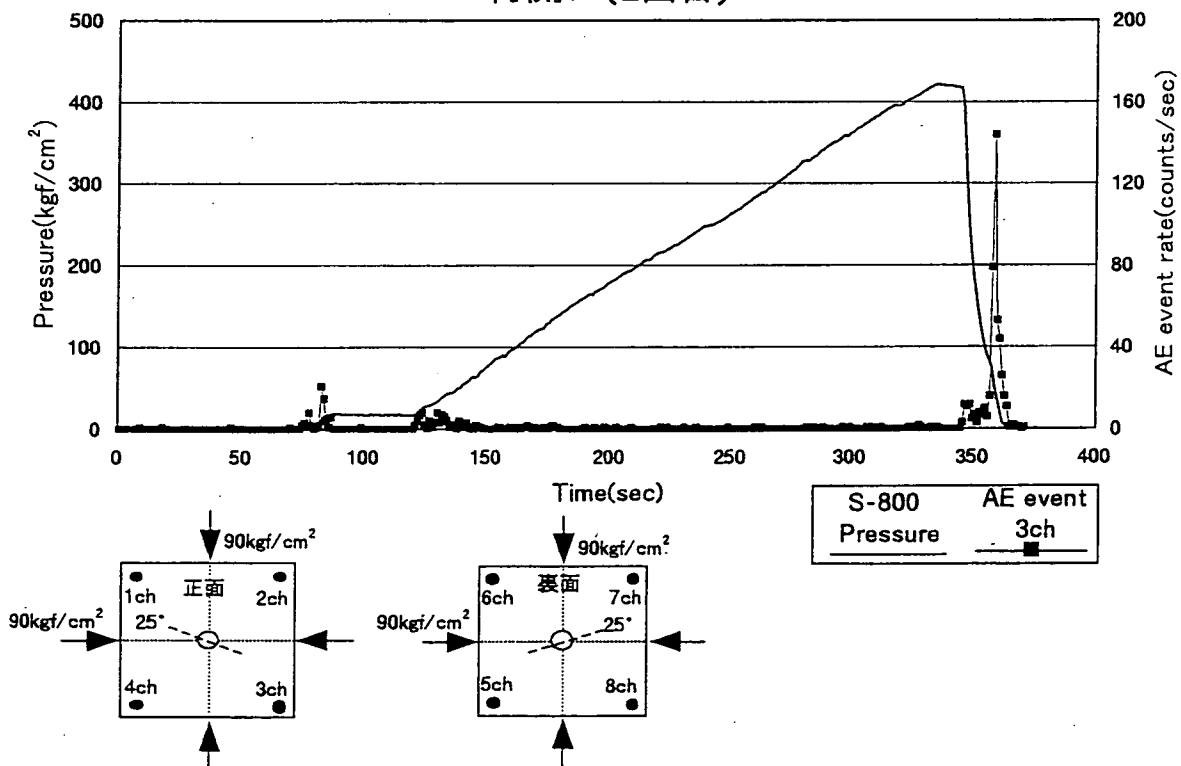


図4.6.8. 載荷圧とAEの発生数との関係

114S8-1

25° 水平圧力120kgf/cm²、垂直圧力120kgf/cm²

再開口(1回目)

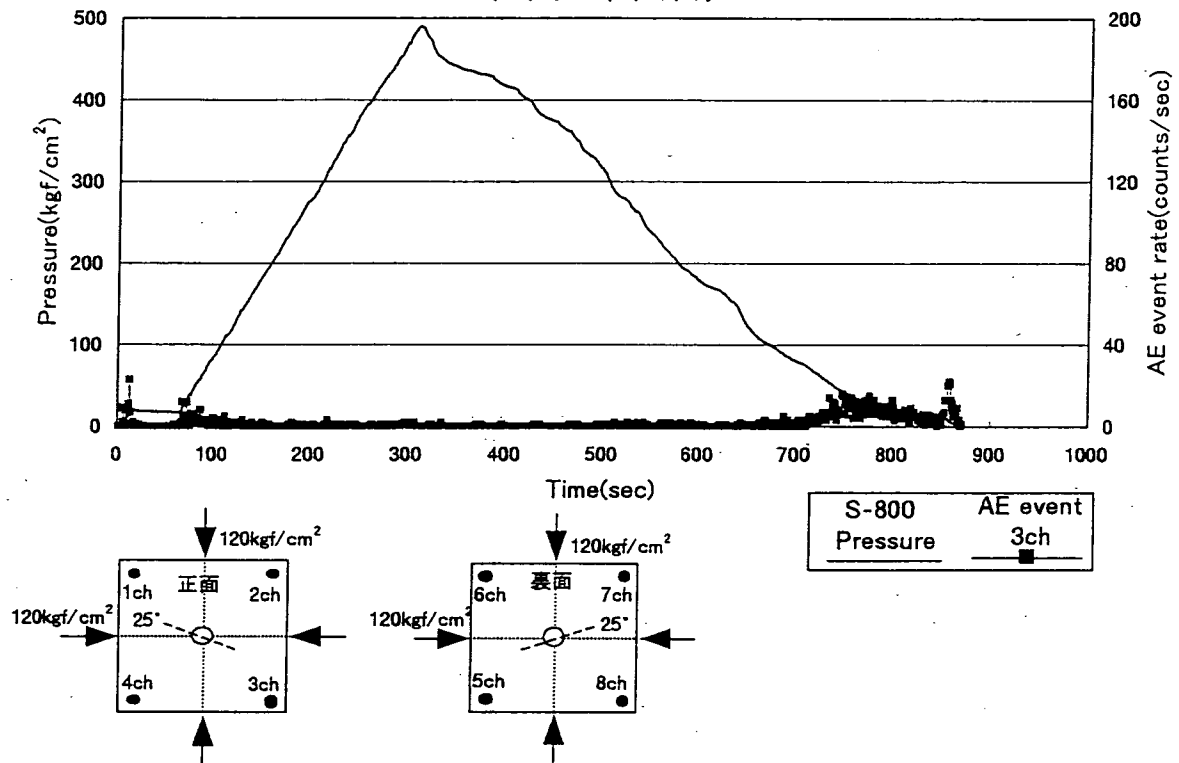


図4.6.9. 載荷圧とAEの発生数との関係

114S8-2

再開口(2回目)

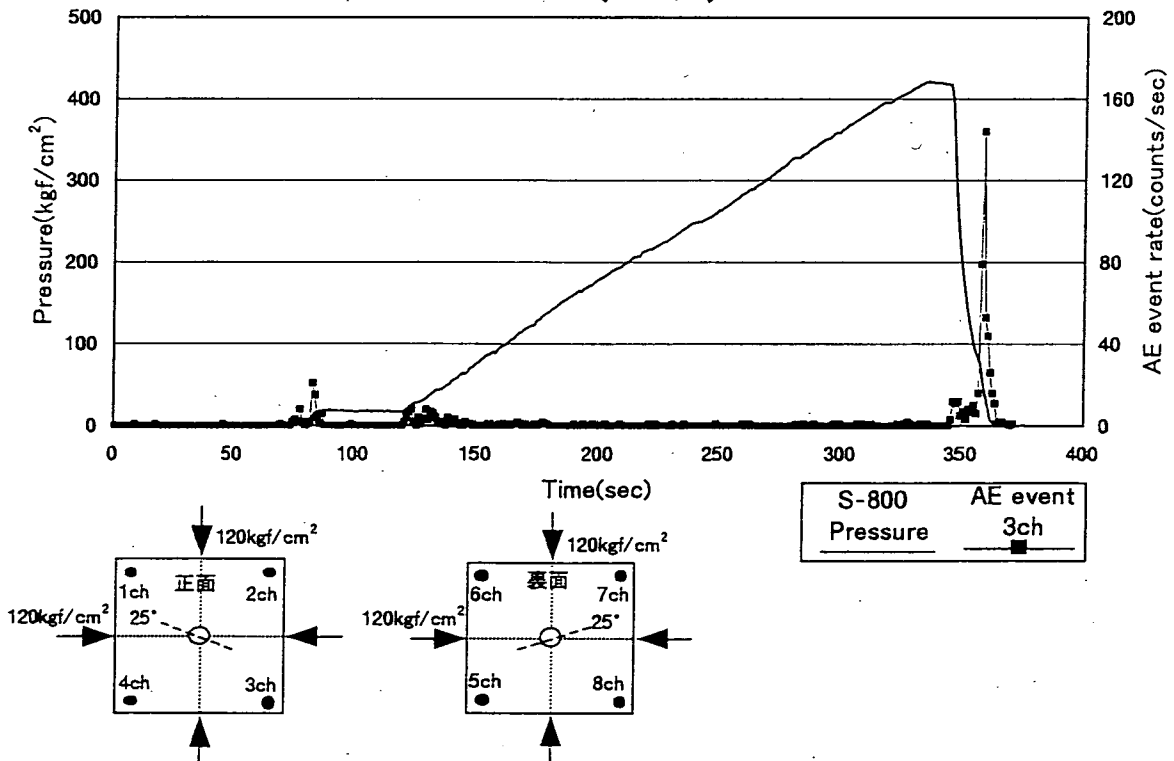


図4.6.10. 載荷圧とAEの発生数との関係

115S8-1

25° 水平圧力150kgf/cm²、垂直圧力150kgf/cm²

再開口(1回目)

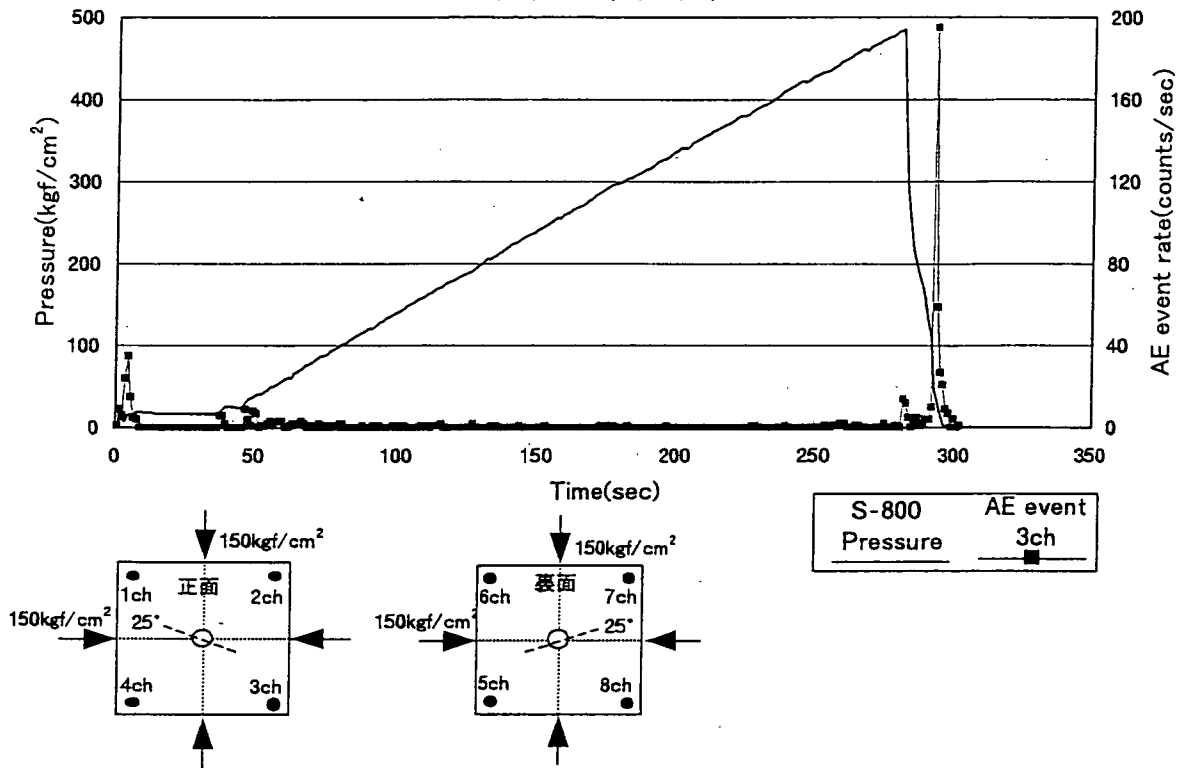


図4.6.11. 載荷圧とAEの発生数との関係

116S8-1

25° 水平圧力45kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(1回目)

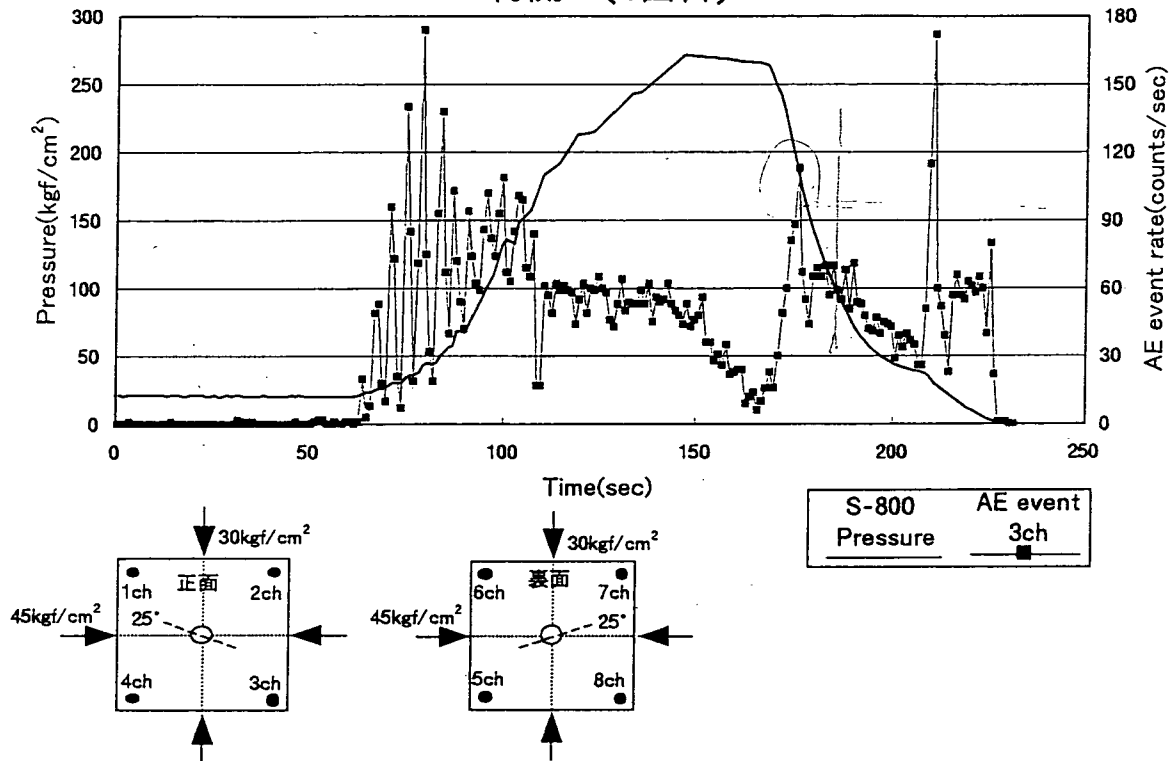


図4. 6. 12(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

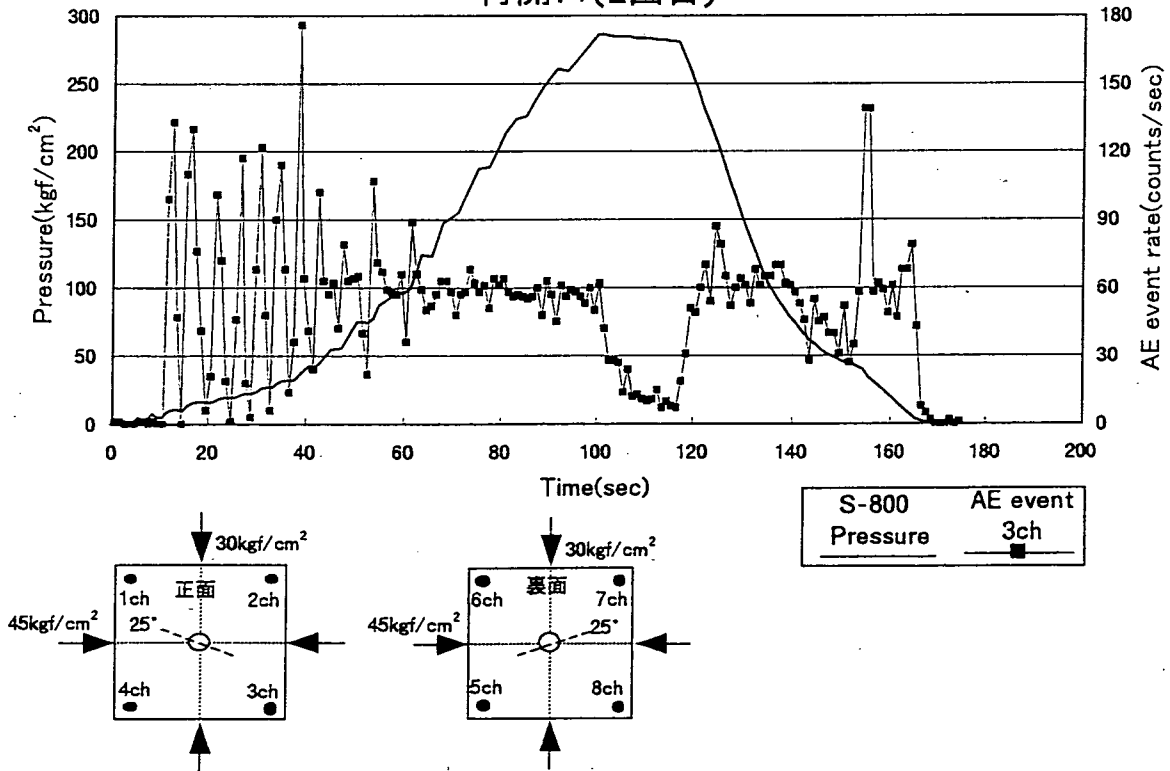


図4. 6. 12(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

116S8-1

25° 水平圧力45kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(3回目)

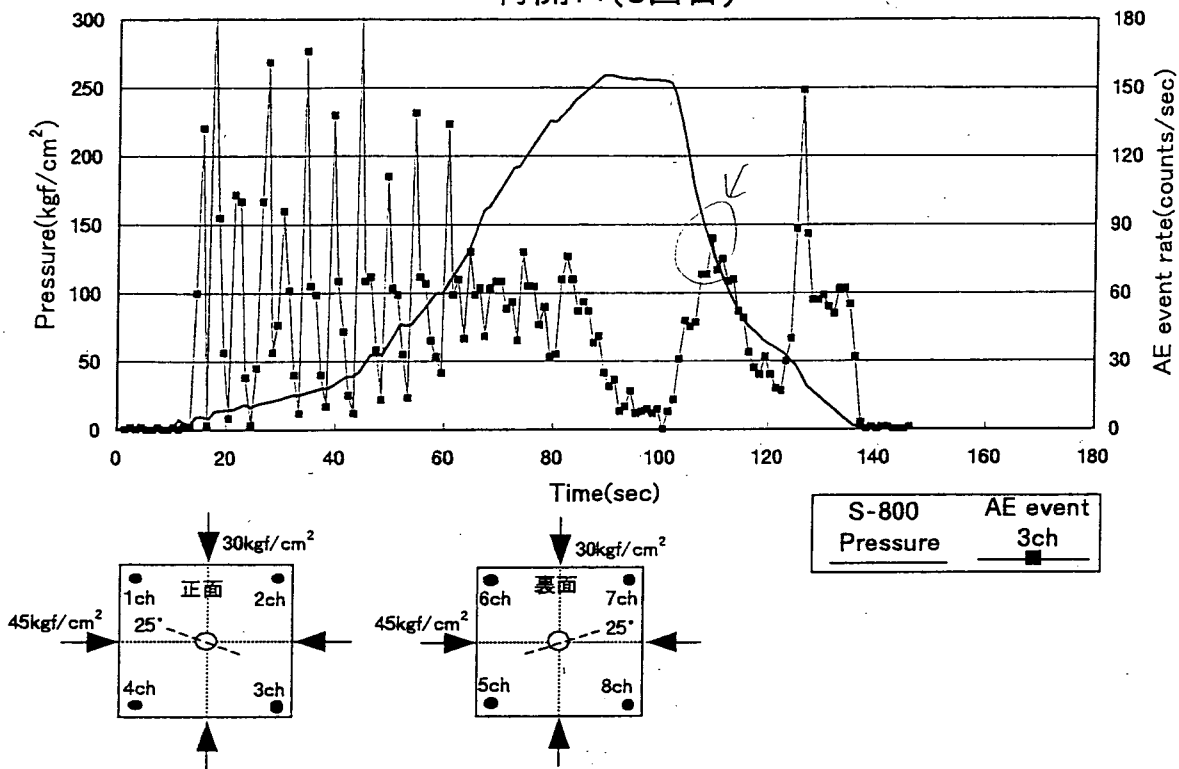


図4.6.12(c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (3回目)

117S8-2

25° 水平圧力75kgf/cm²、垂直圧力50kgf/cm²

再開口(1回目)

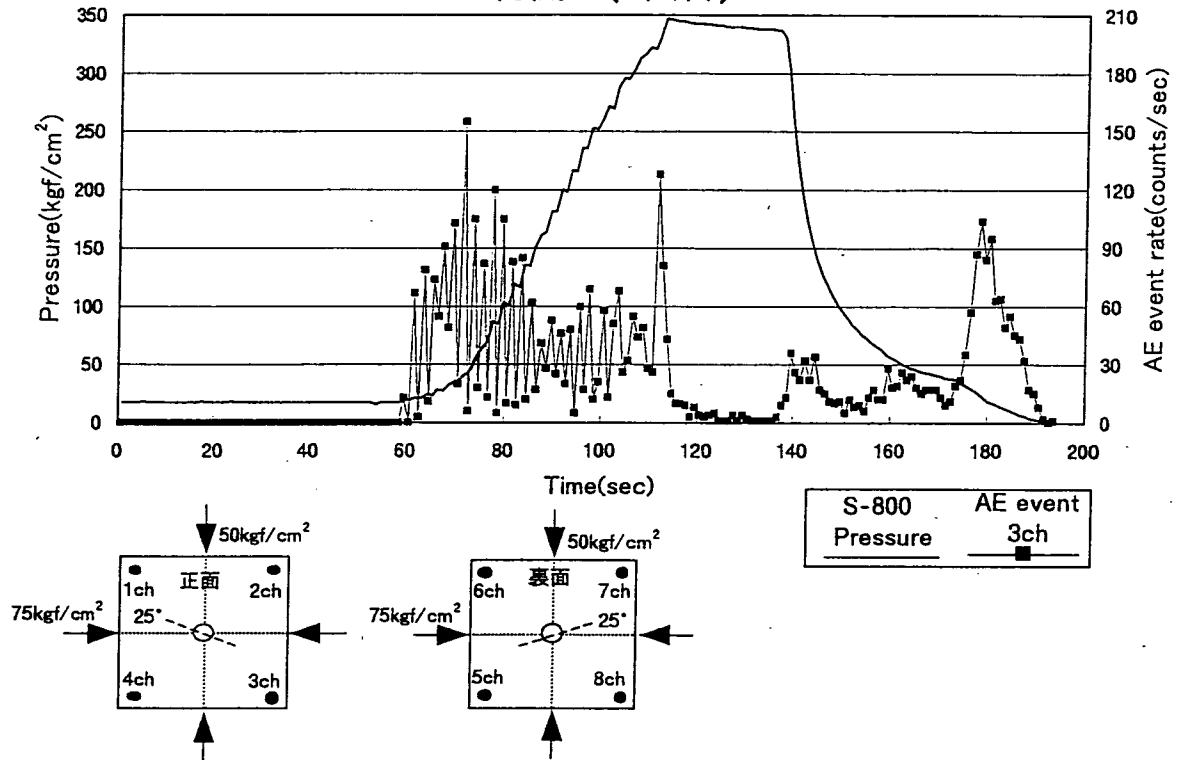


図4.6.13(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1回目)

再開口(2回目)

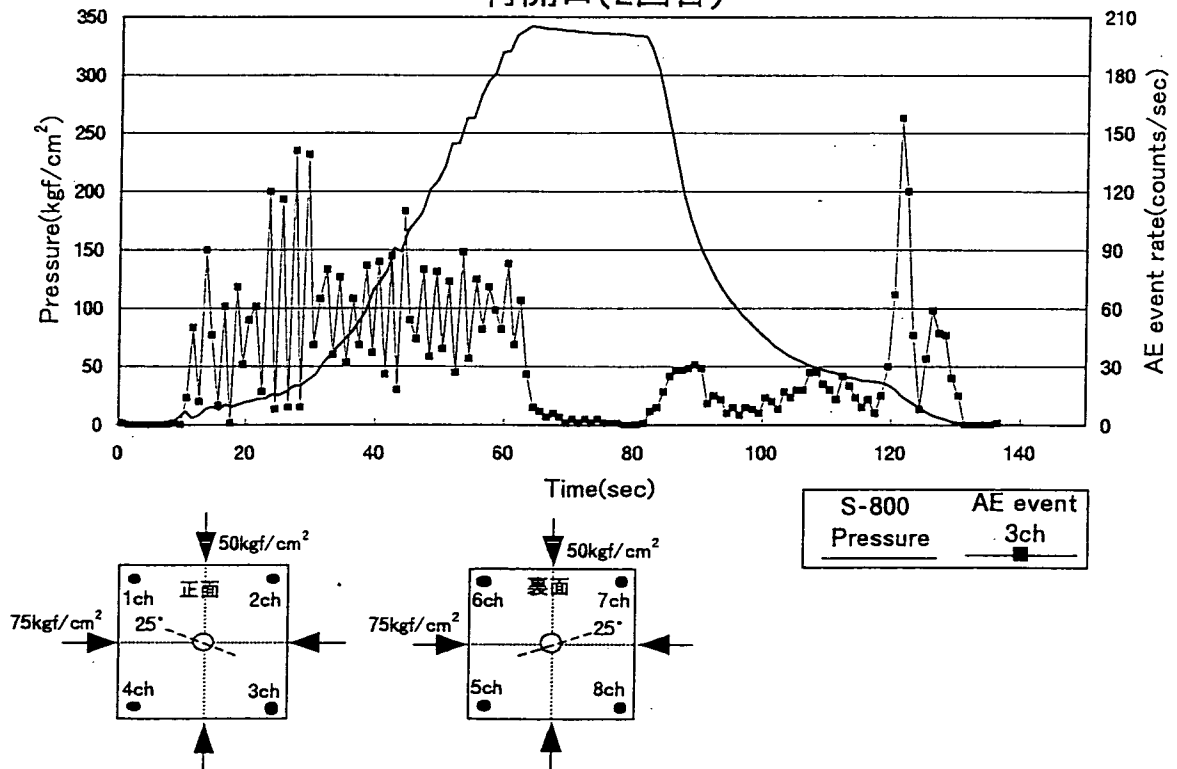


図4.6.13(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2回目)

118S8-1

25° 水平圧力105kgf/cm²、垂直圧力70kgf/cm²

再開口(1回目)

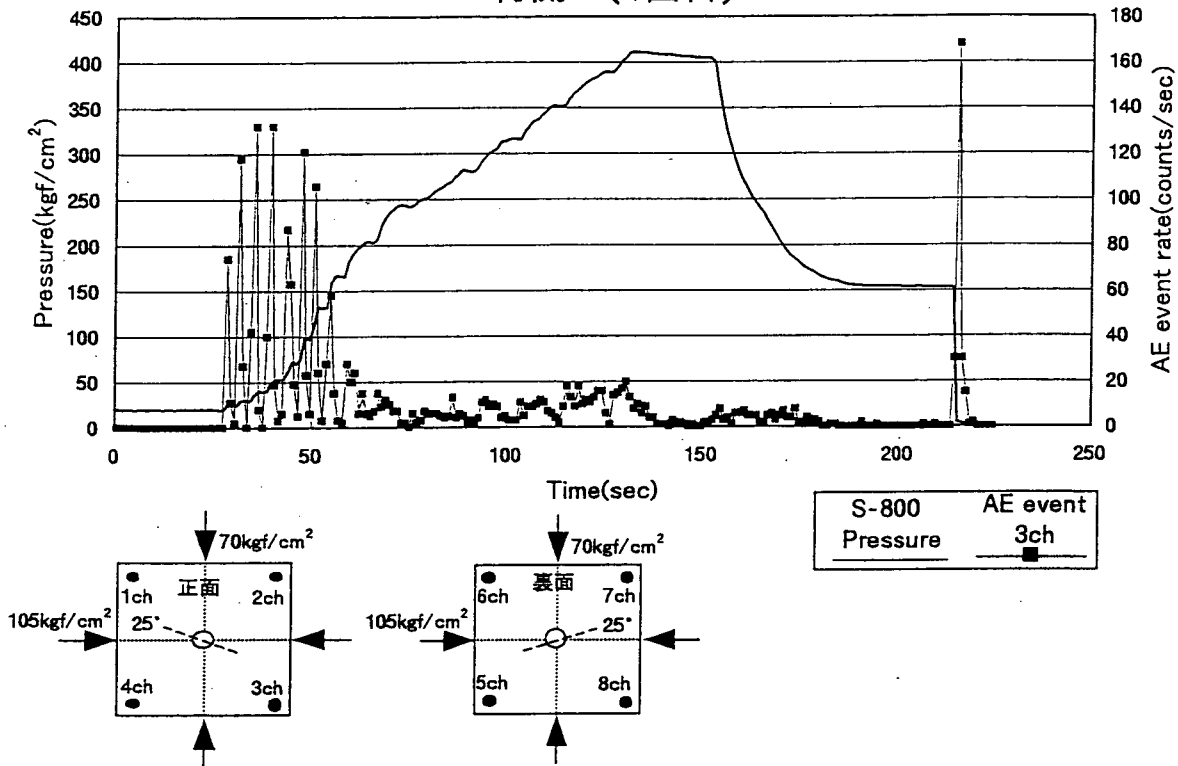


図4.6.14(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1回目)

再開口(2回目)

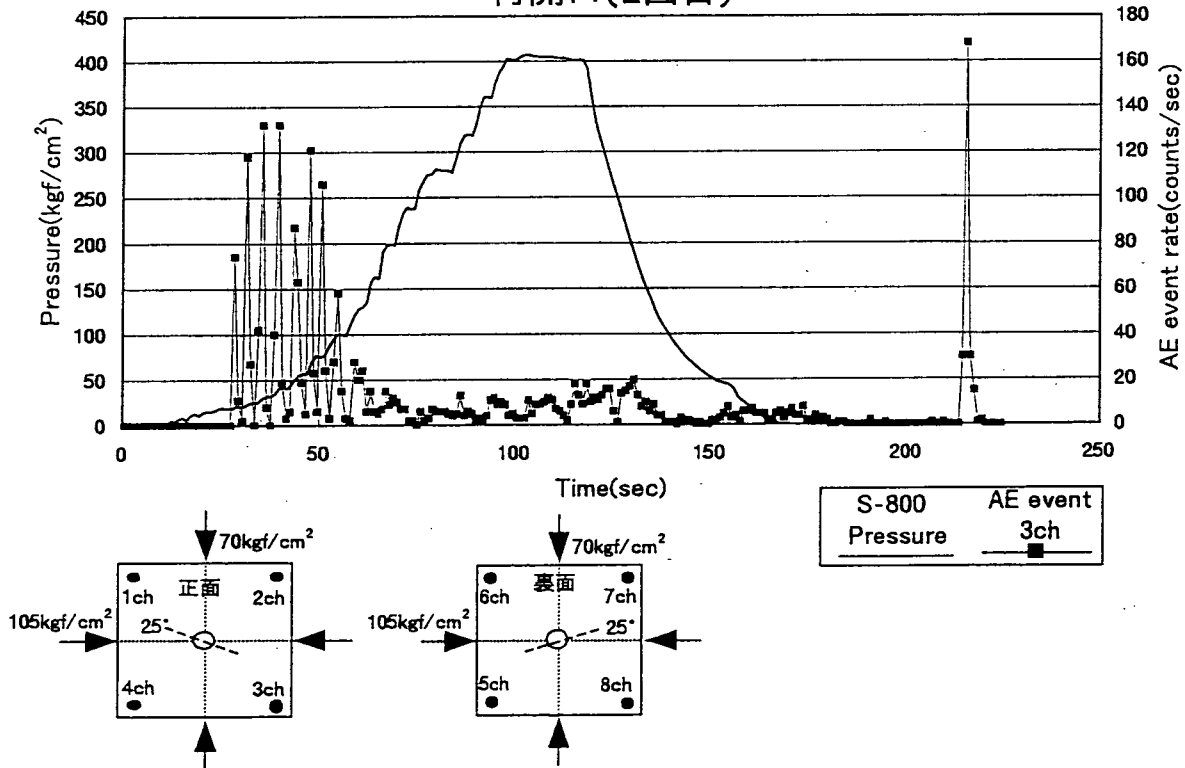


図4.6.14(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2回目)

119S8-2

25° 水平圧力135kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(1回目)

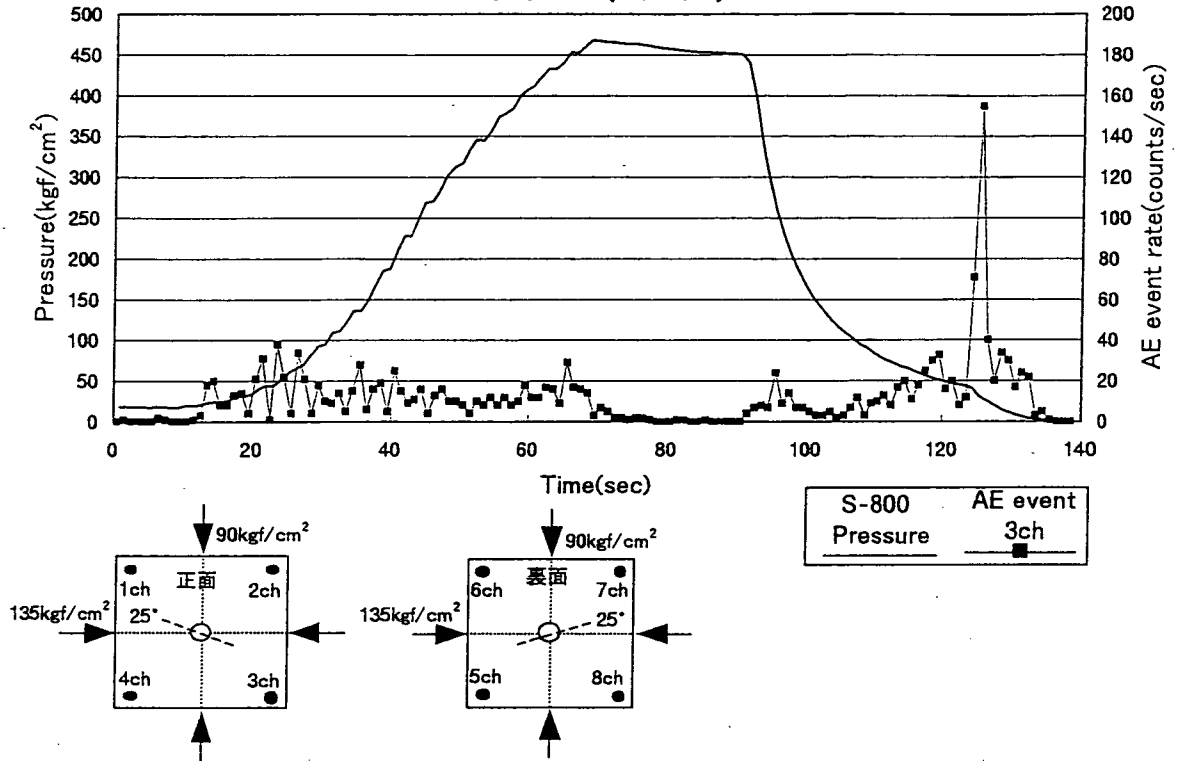


図4.6.15(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1回目)

再開口(2回目)

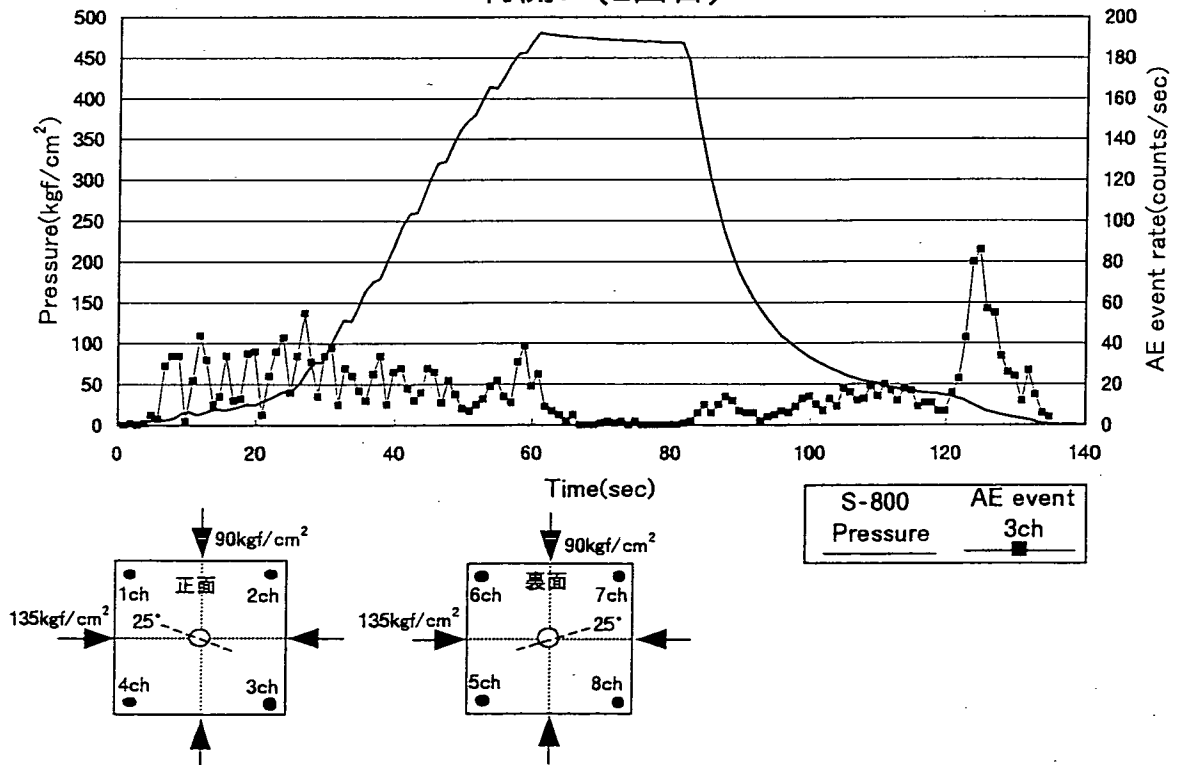


図4.6.15(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2回目)

121S8-1

135° 水平圧力30kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

破碎

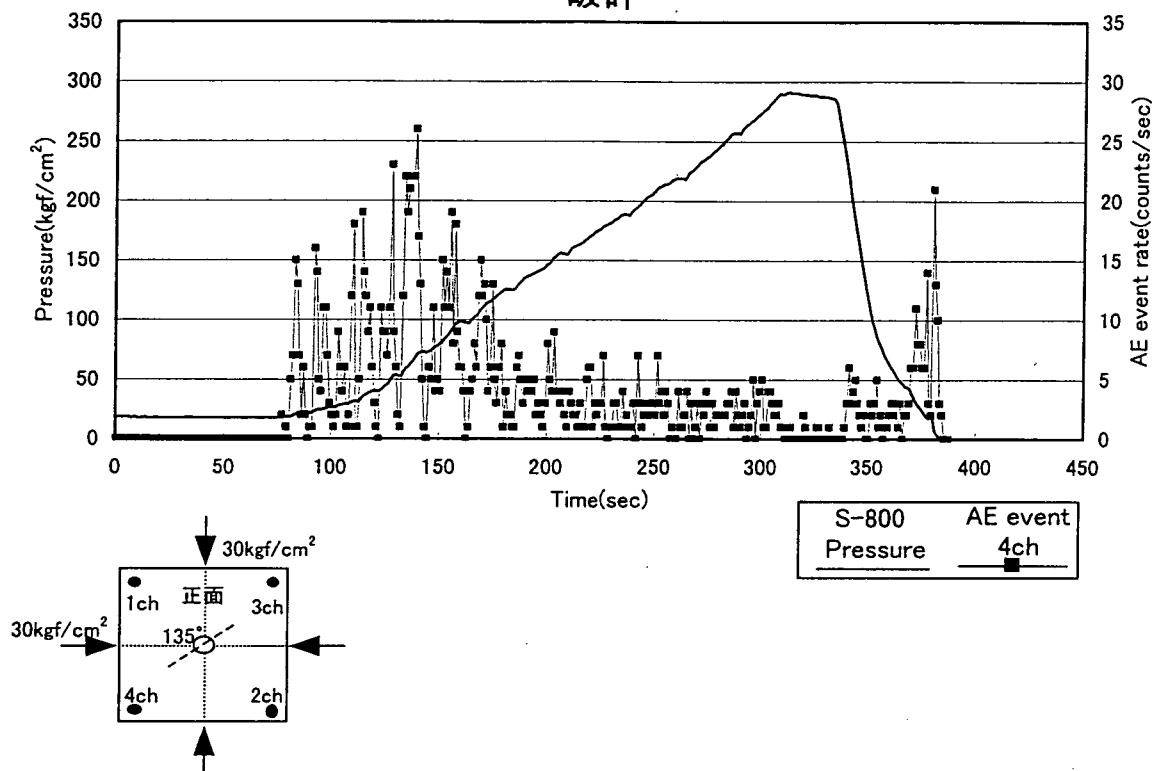


図4.6.16(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (破碎)

再開口(1回目)

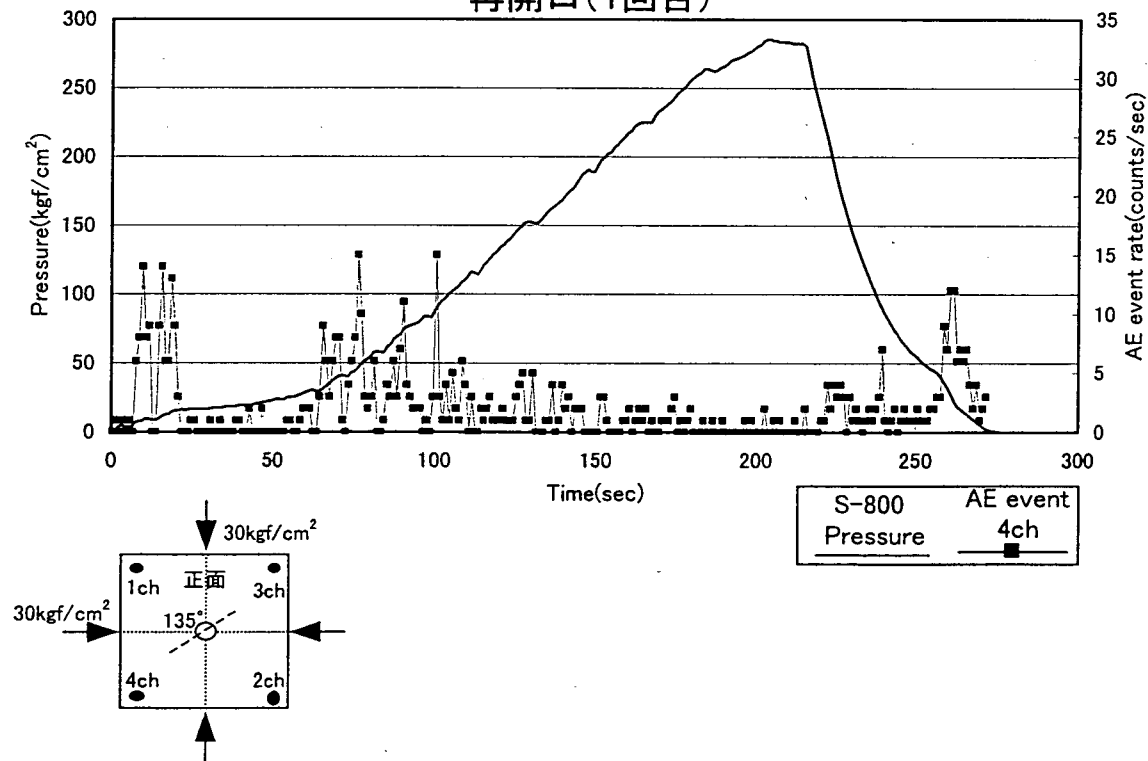


図4.6.16(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (再開口)

122S8-1

135° 水平圧力60kgf/cm²、垂直圧力60kgf/cm²

再開口(1回目)

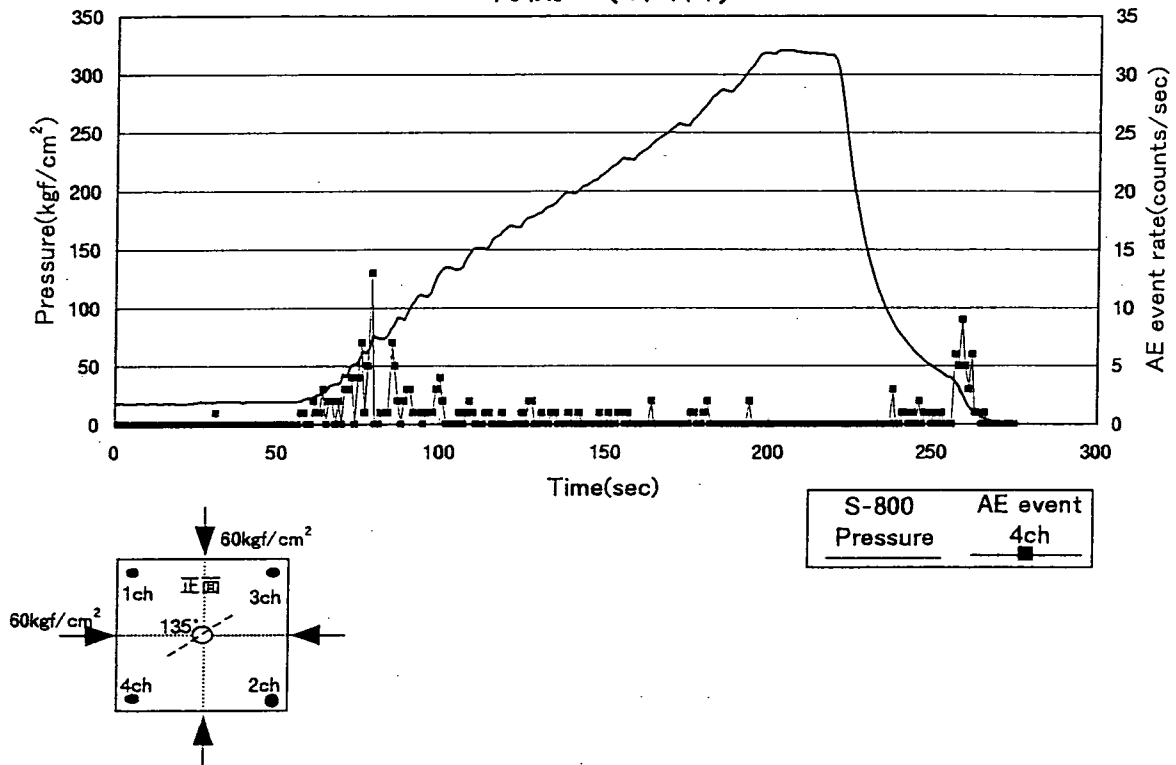


図4.6.17(a). 載荷圧とAEの発生数との関係(1回目)

再開口(2回目)

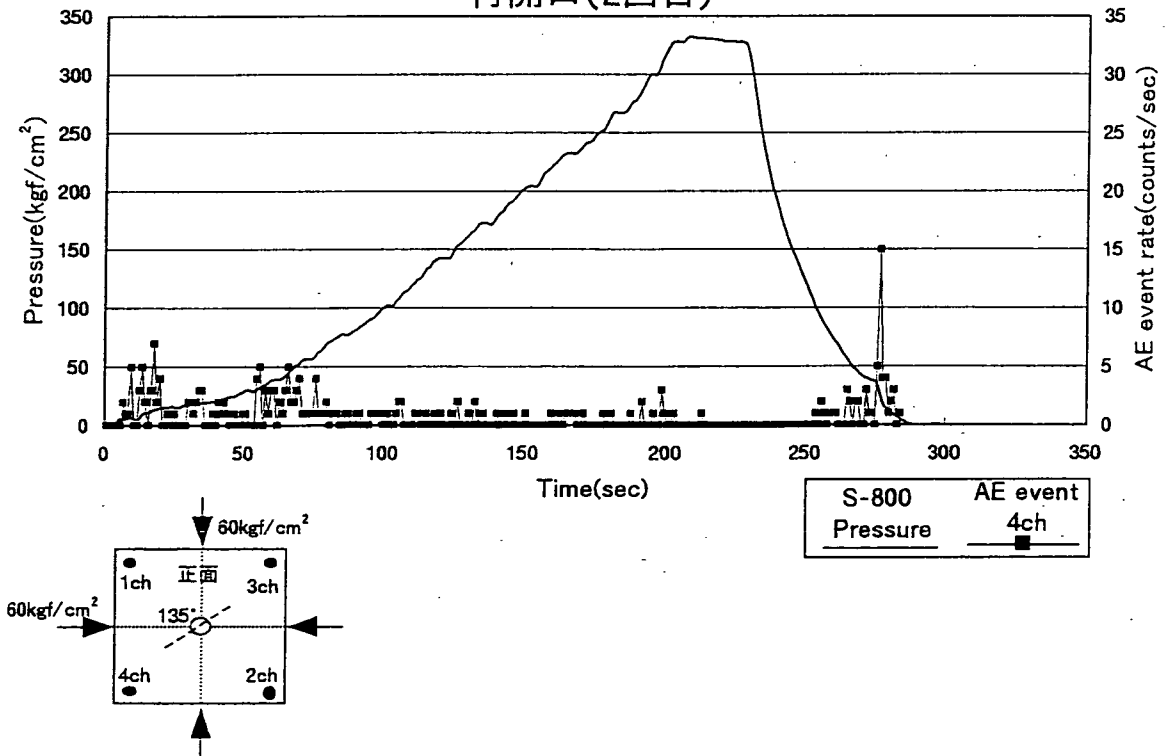


図4.6.17(b). 載荷圧とAEの発生数との関係(2回目)

123S8-1

135° 水平圧力90kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(1回目)

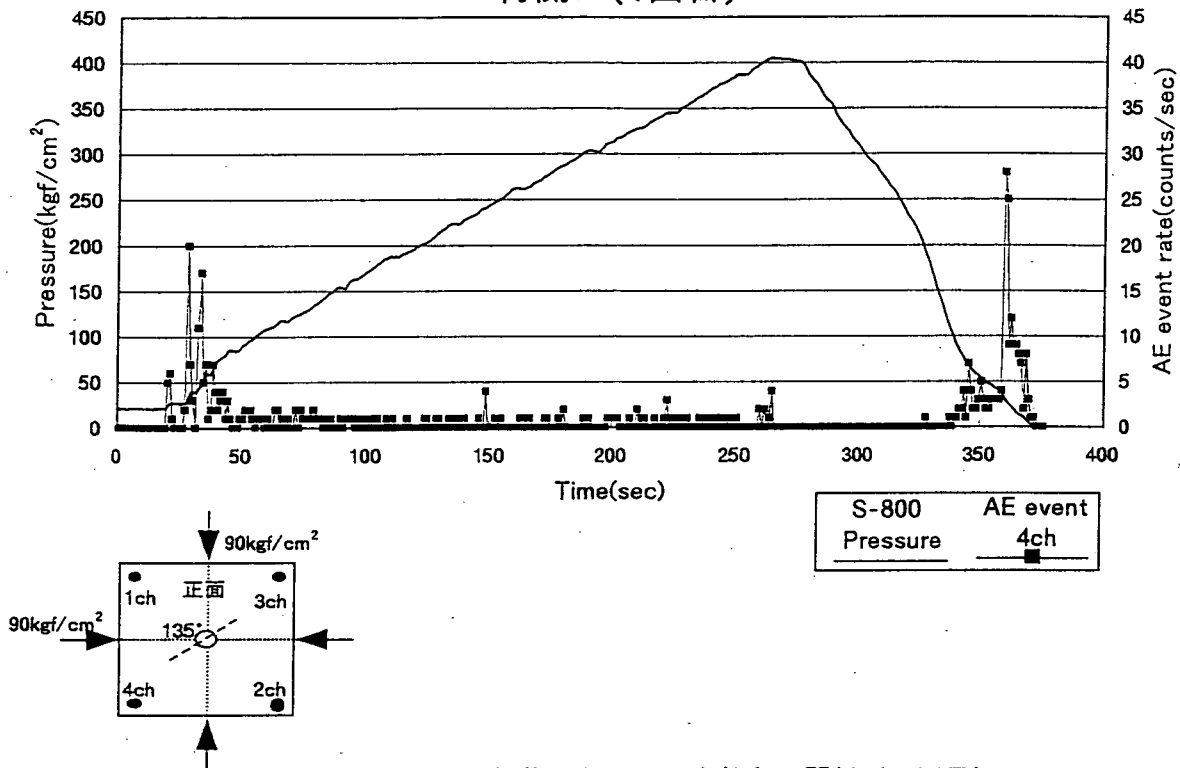


図4.6.18(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1回目)

再開口(2回目)

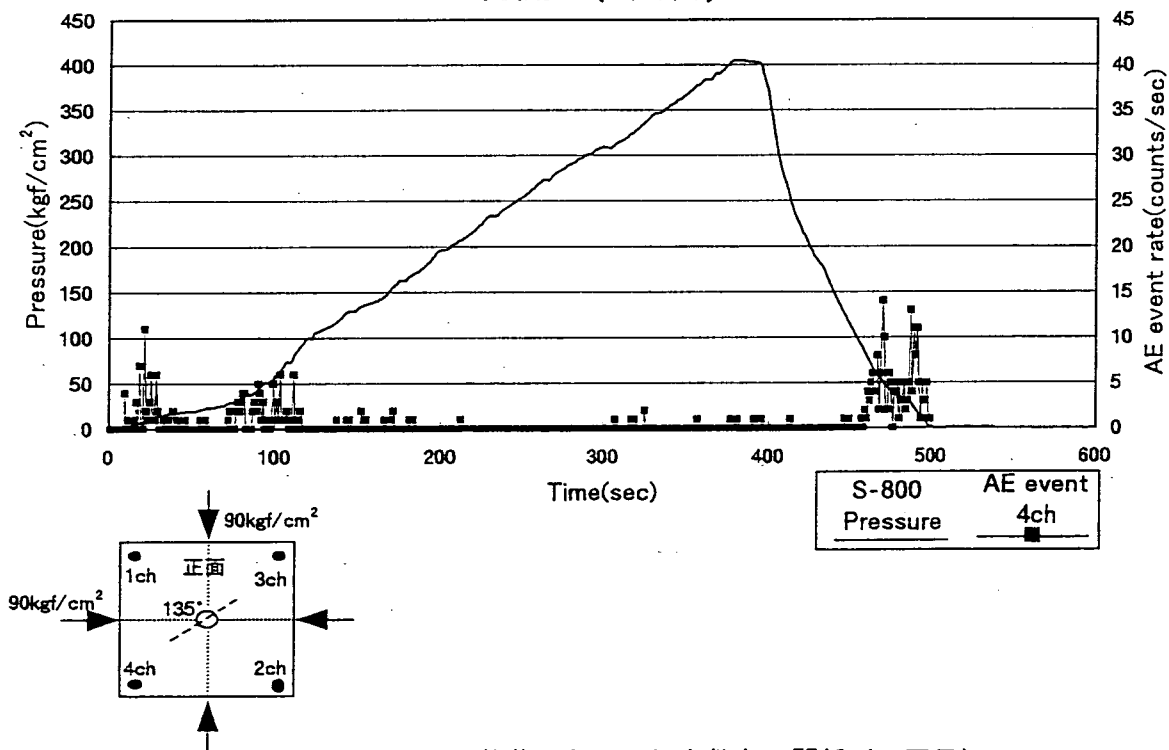


図4.6.18(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2回目)

124S8-1

135° 水平圧力120kgf/cm²、垂直圧力120kgf/cm²

再開口(1回目)

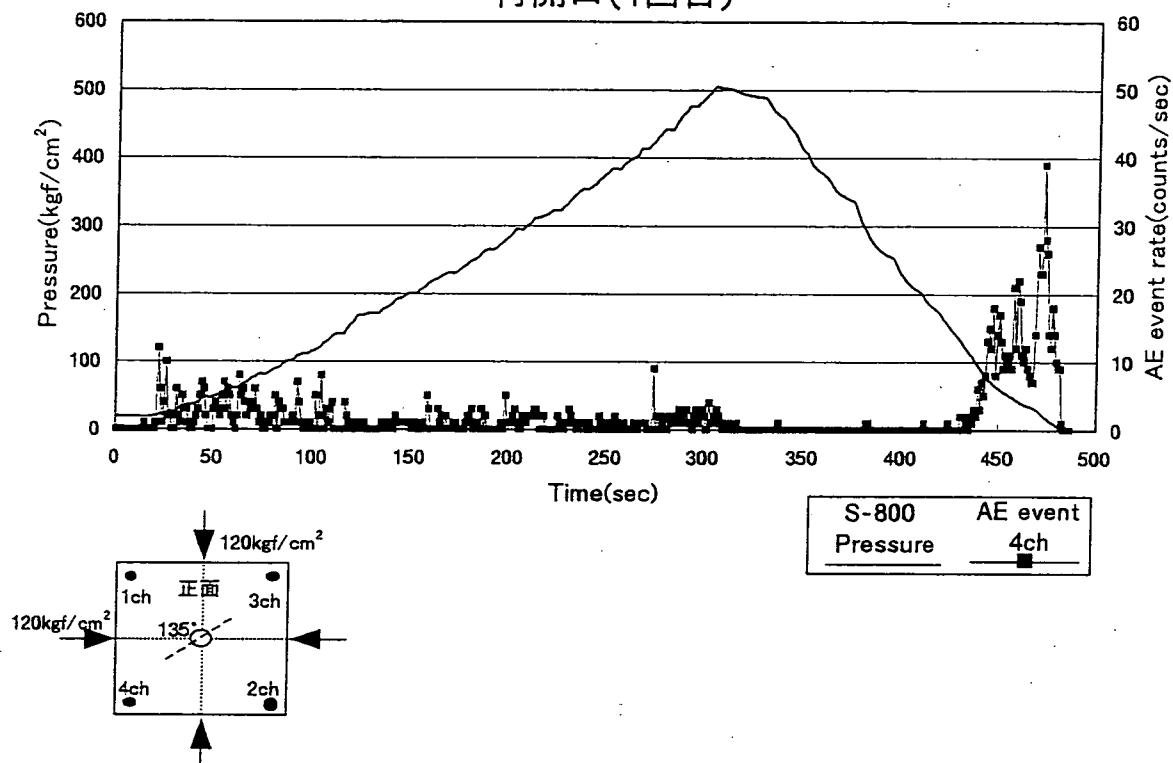


図4. 6. 19 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

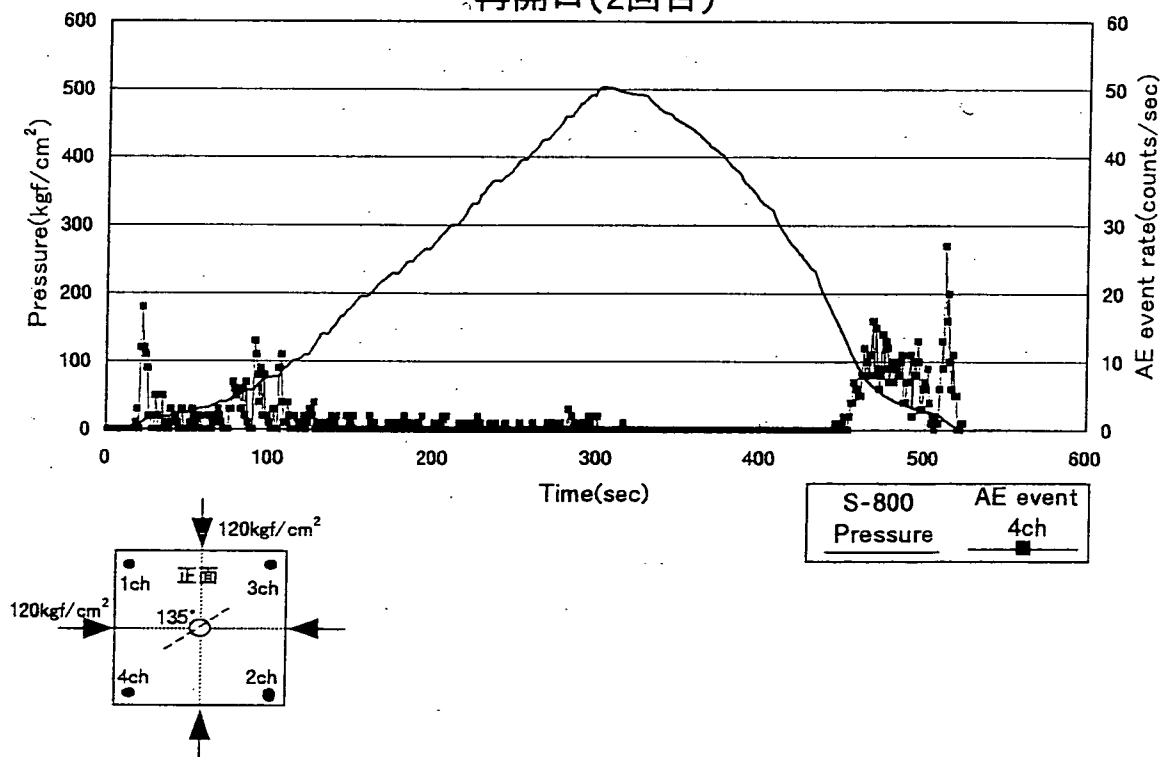


図4. 6. 19 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

126S8-1

135° 水平圧力45kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(1回目)

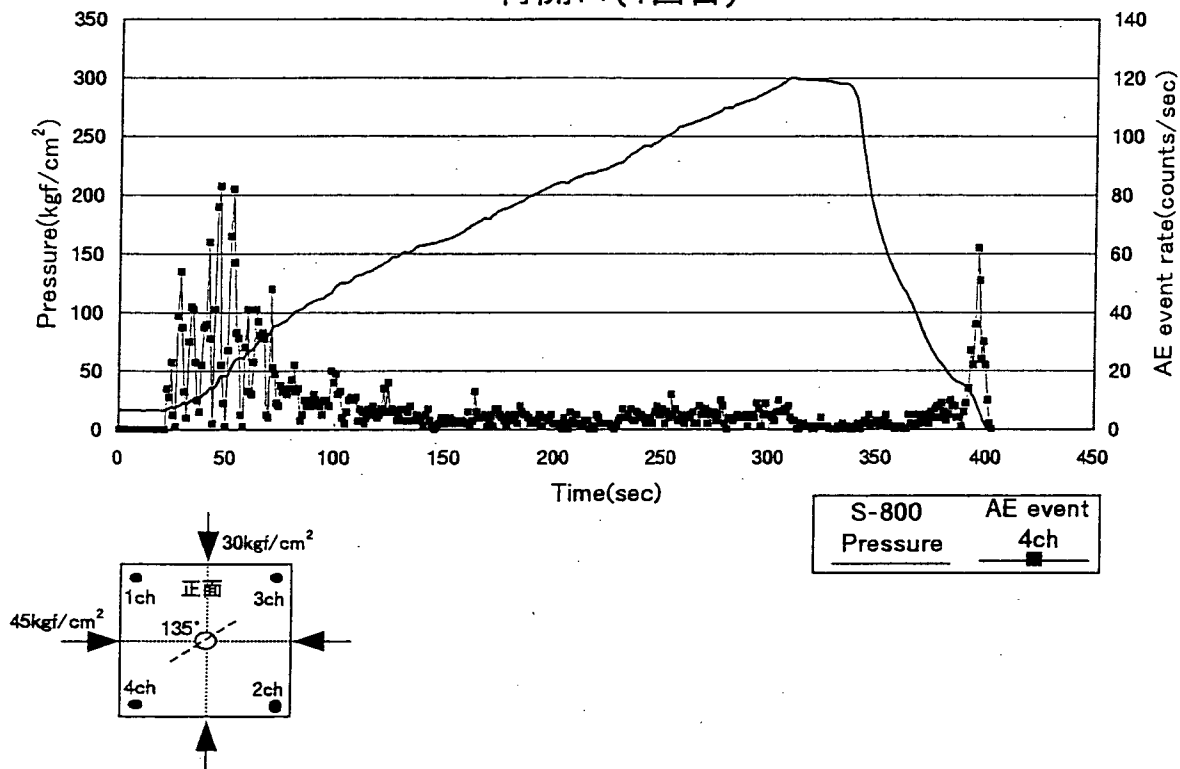


図4. 6. 20(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

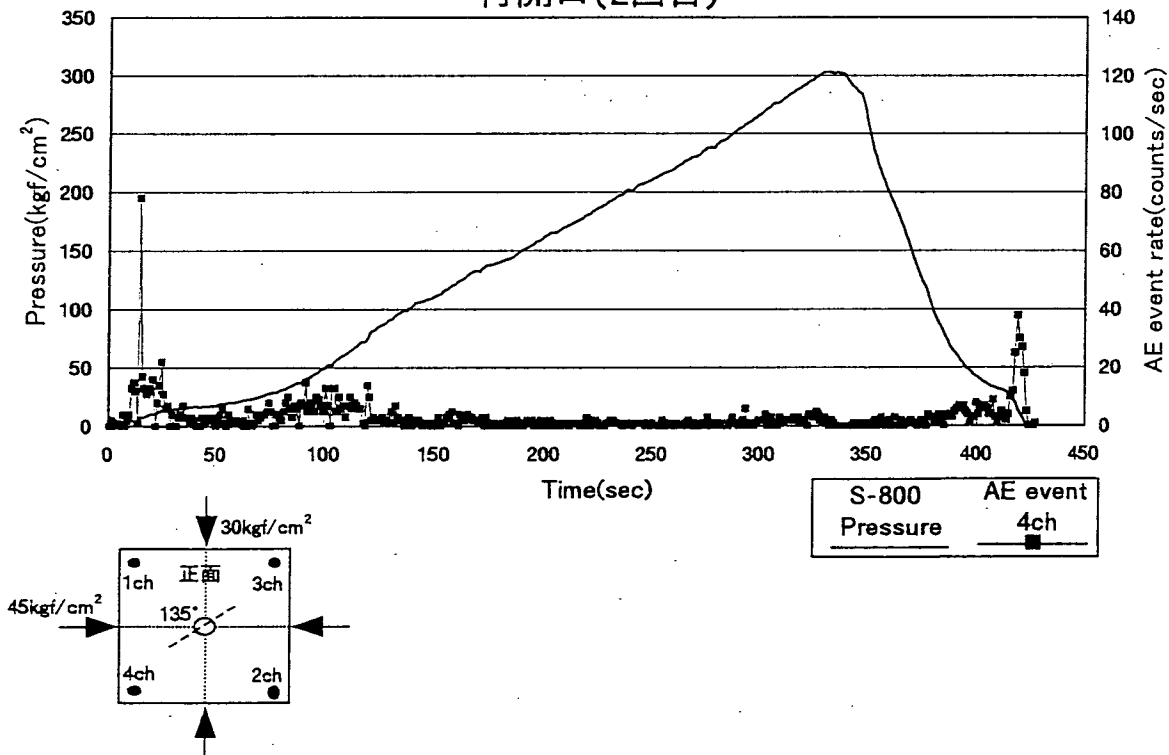


図4. 6. 20(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

127S8-1

135° 水平圧力75kgf/cm²、垂直圧力50kgf/cm²

再開口(1回目)

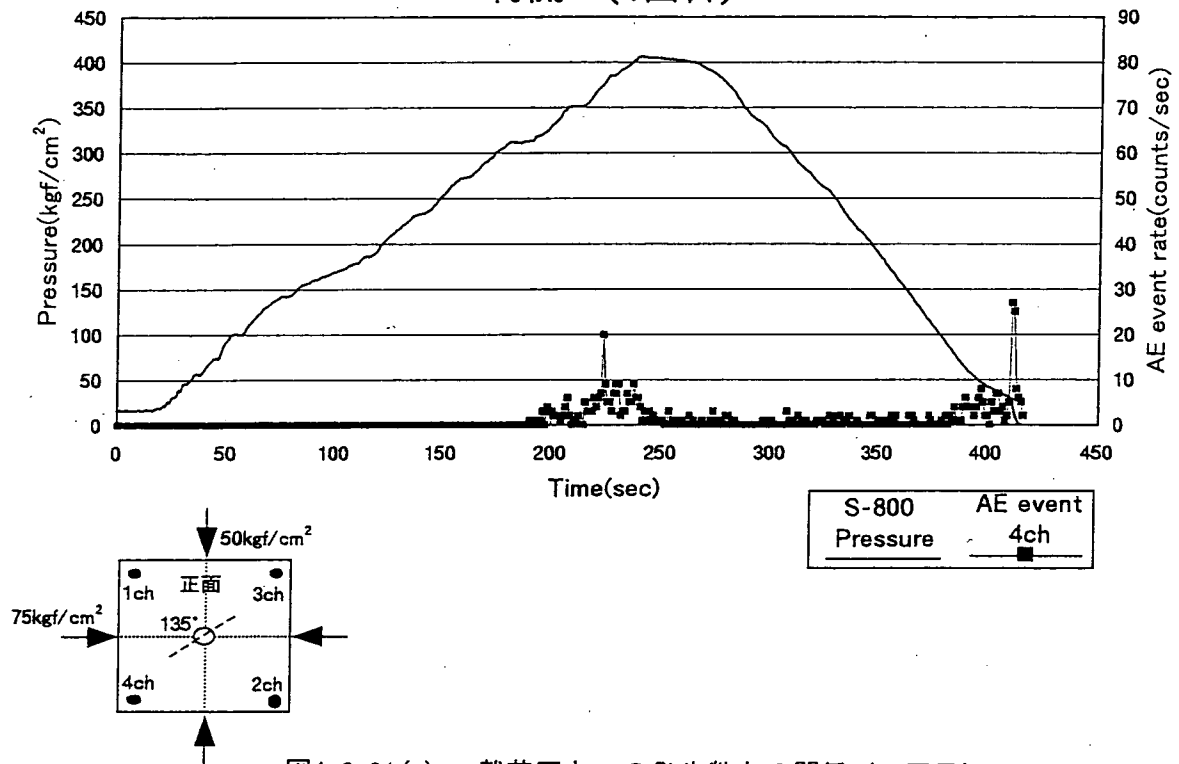


図4.6.21 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

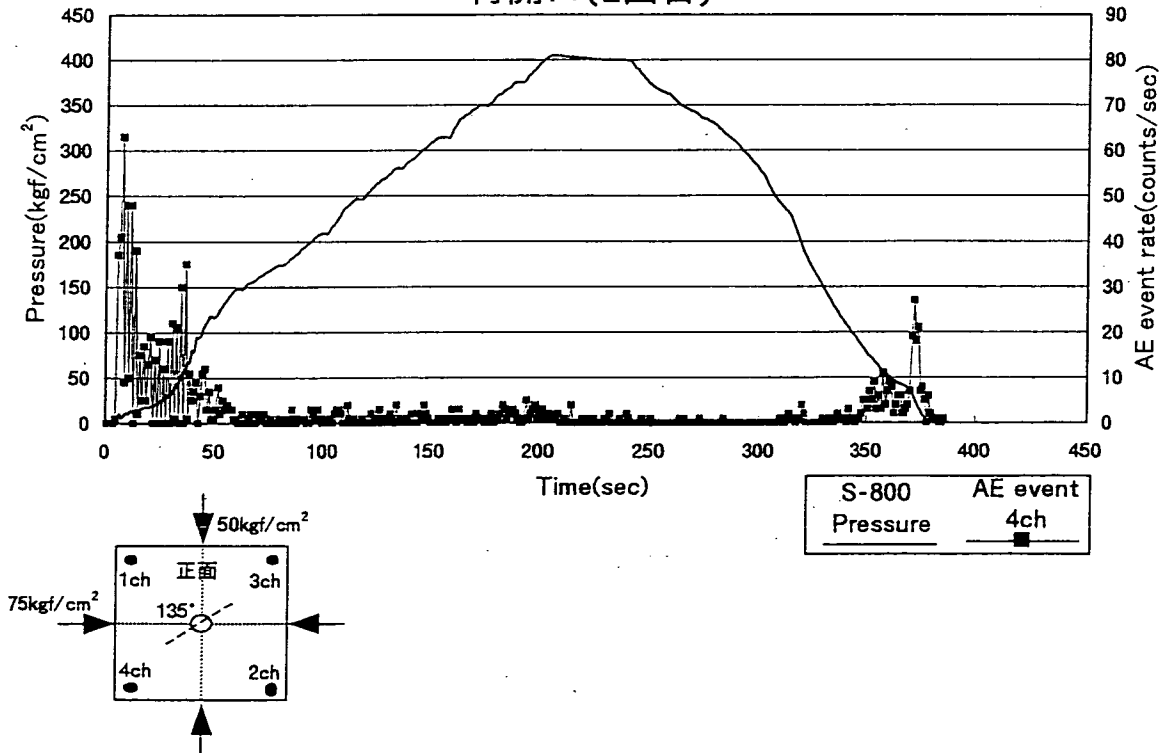


図4.6.21 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

128S8-1

135° 水平圧力105kgf/cm²、垂直圧力70kgf/cm²

再開口(1回目)

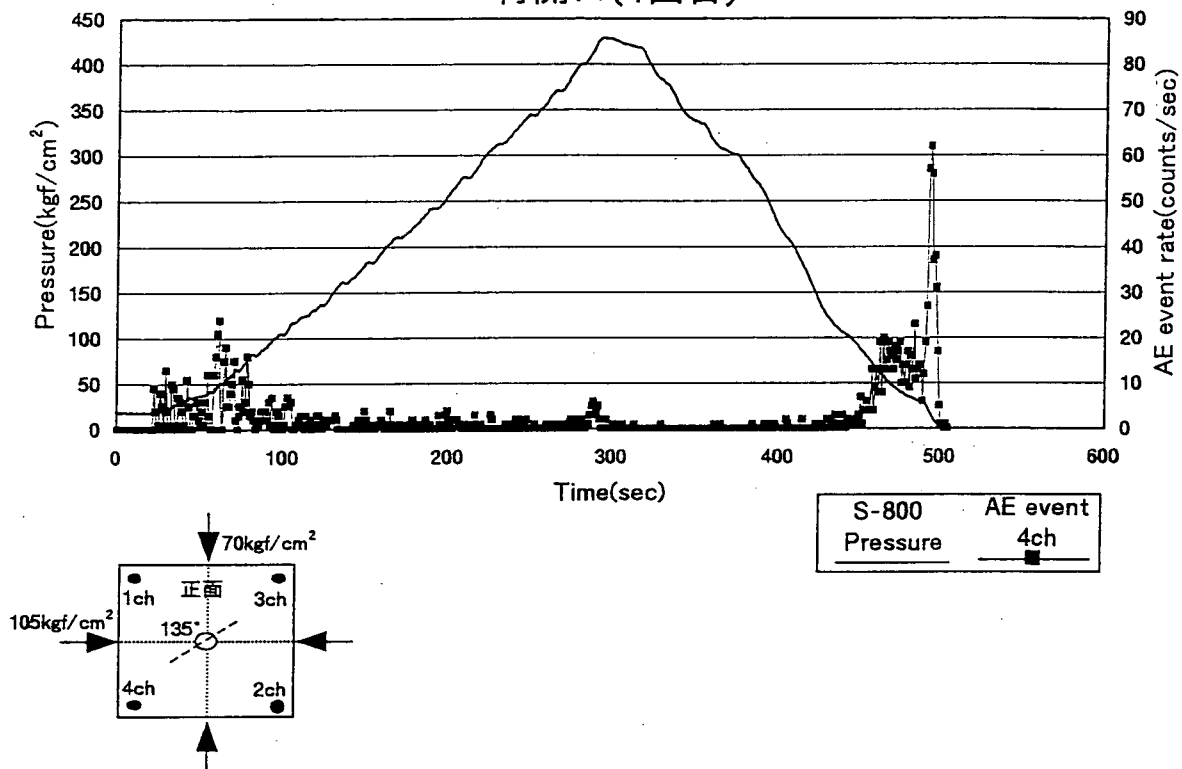


図4.6.22(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1回目)

再開口(2回目)

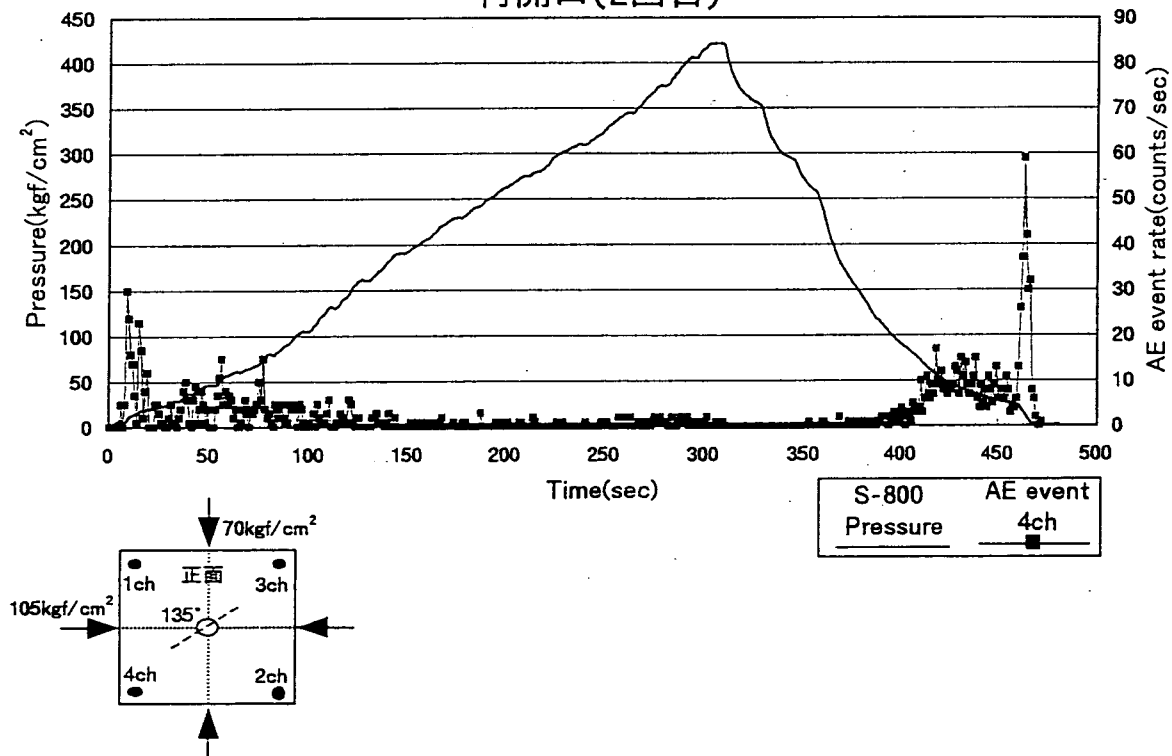


図4.6.22(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2回目)

129S8-1

135° 水平圧力135kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(1回目)

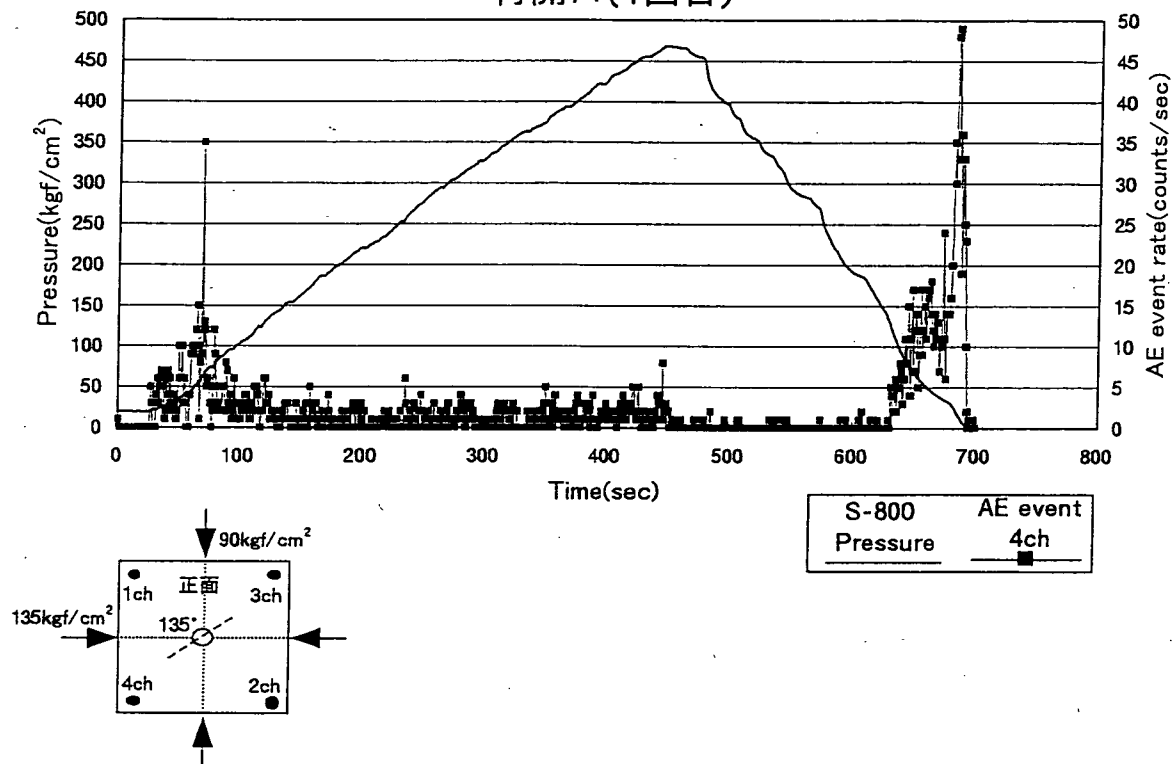


図4. 6. 23. 載荷圧とAEの発生数との関係

131S8-1

60° 水平圧力30kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

破碎

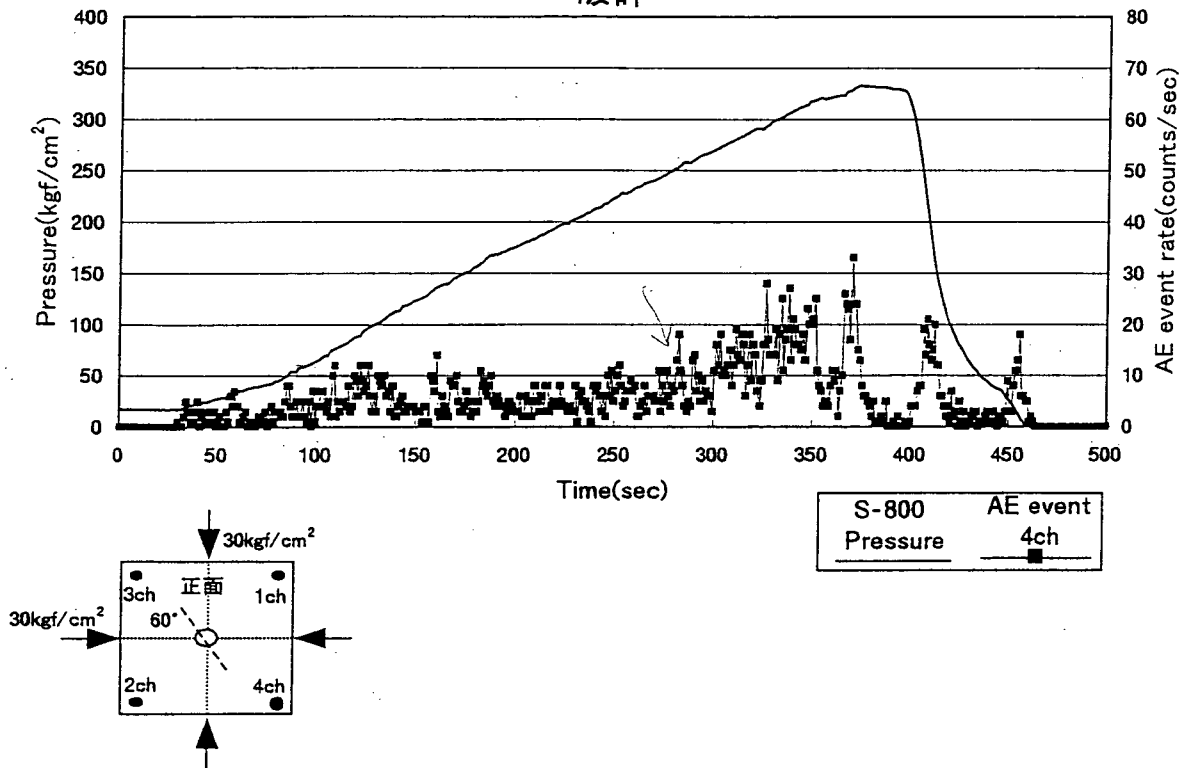


図4.6.24. 載荷圧とAEの発生数との関係

131S8-2

60° 水平圧力30kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(1回目)

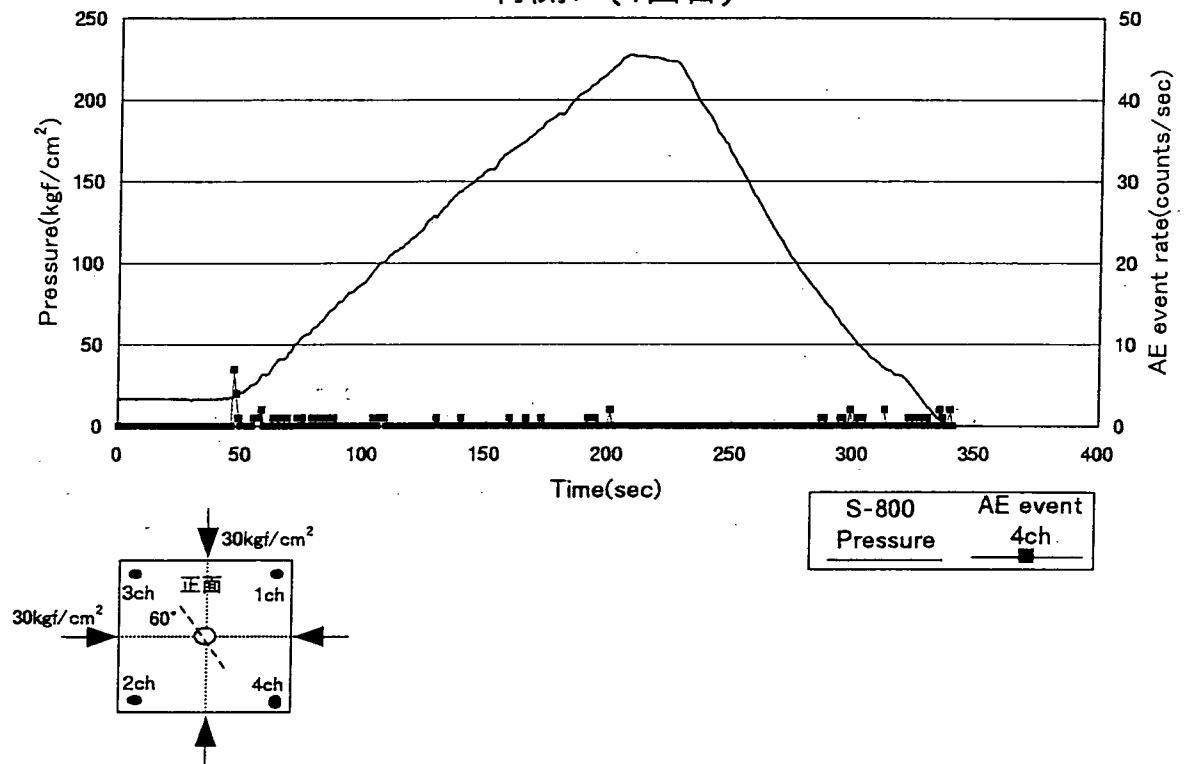


図4. 6. 25 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

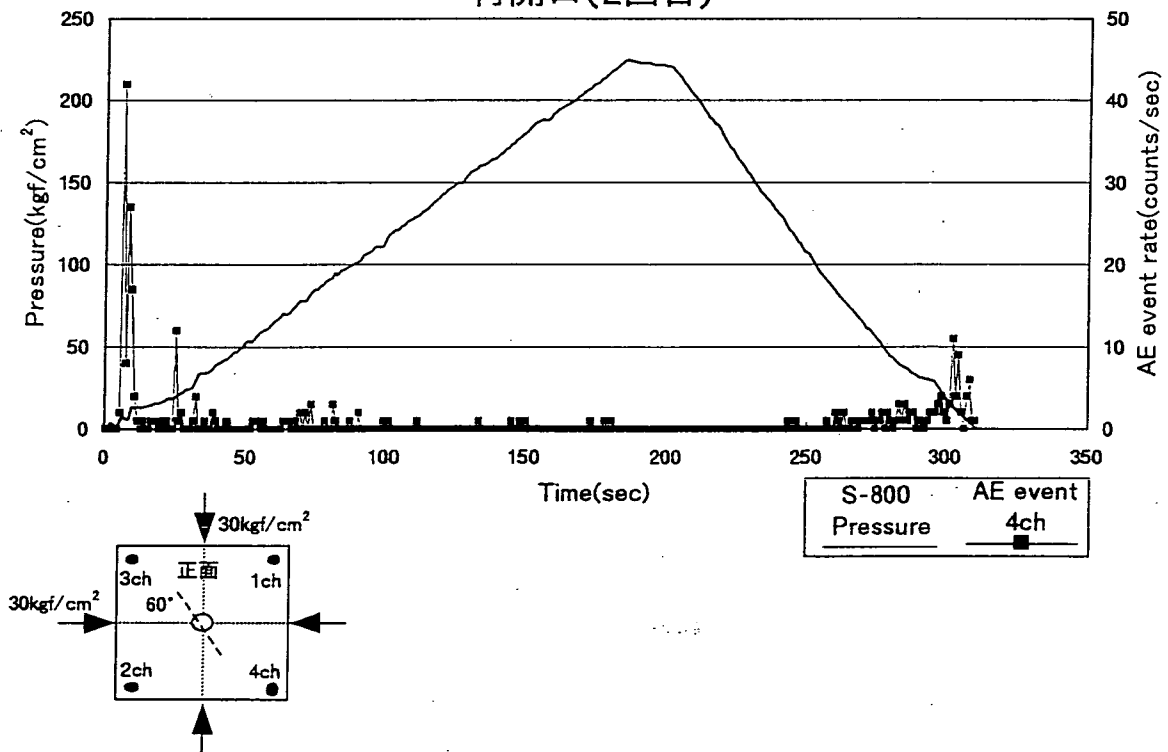


図4. 6. 25 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

132S8-1

60° 水平圧力60kgf/cm²、垂直圧力60kgf/cm²

再開口(1回目)

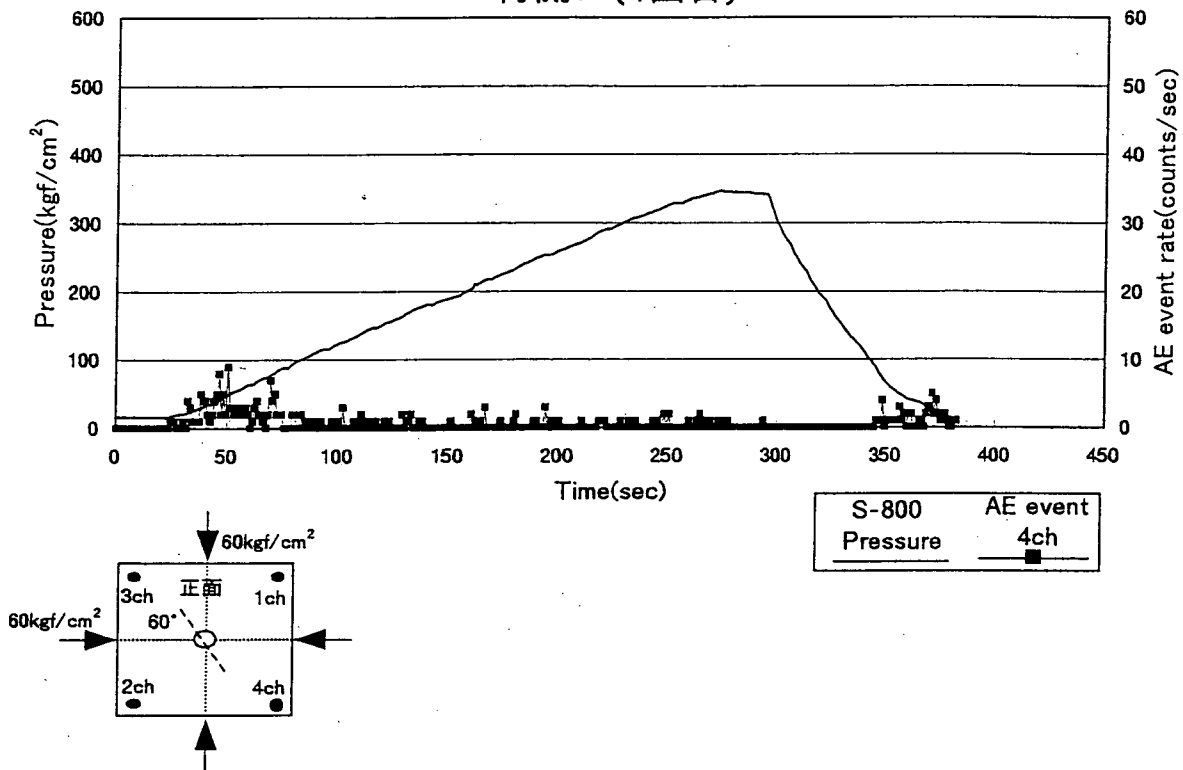


図4. 6. 26 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

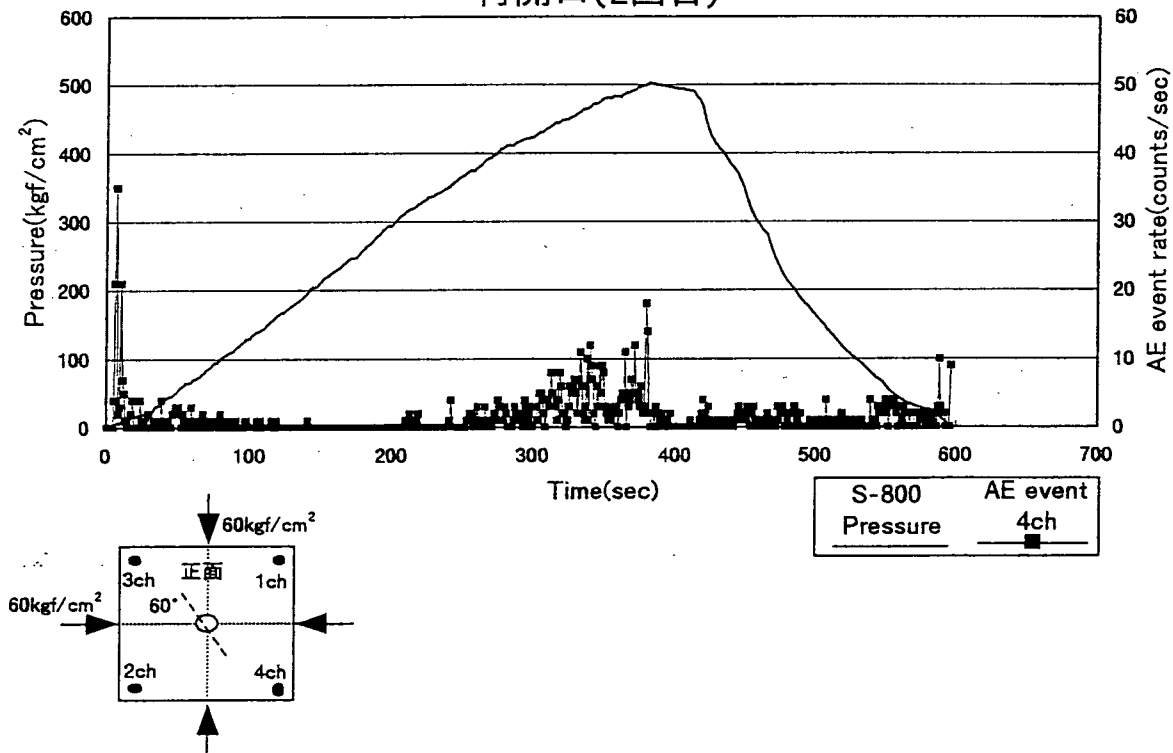


図4. 6. 26 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

133S8-1

60° 水平圧力90kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(1回目)

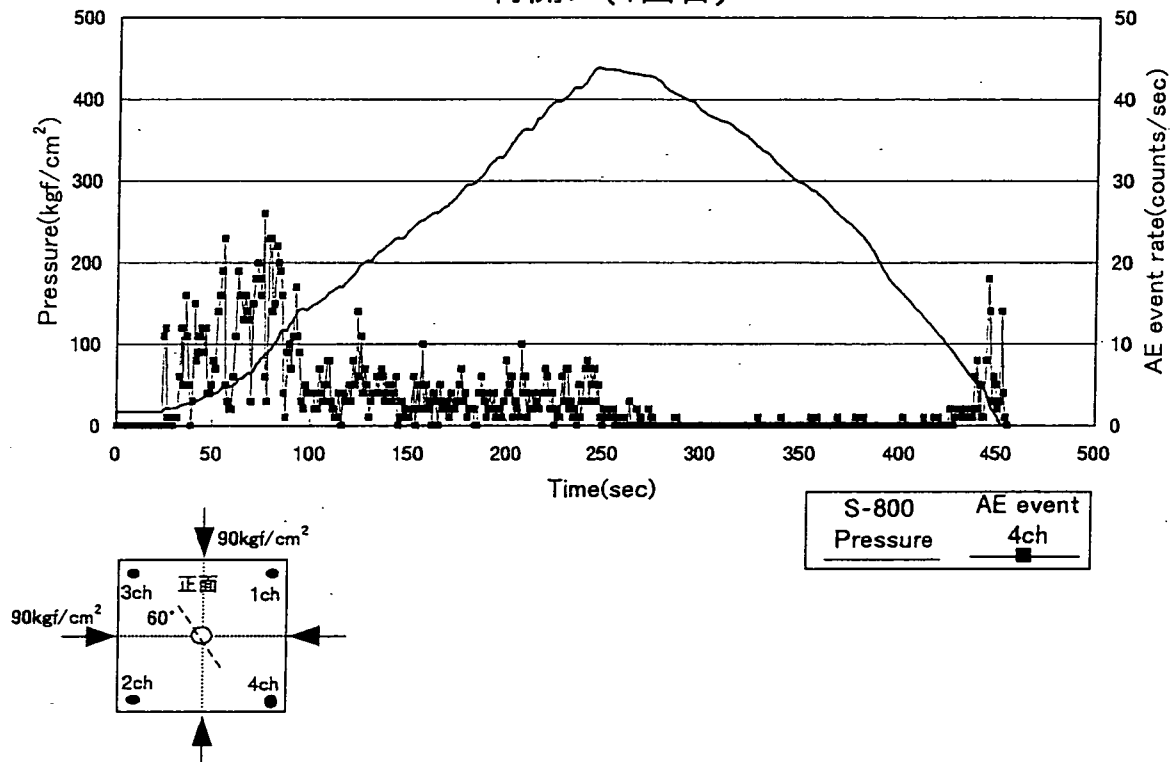


図4. 6. 27(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

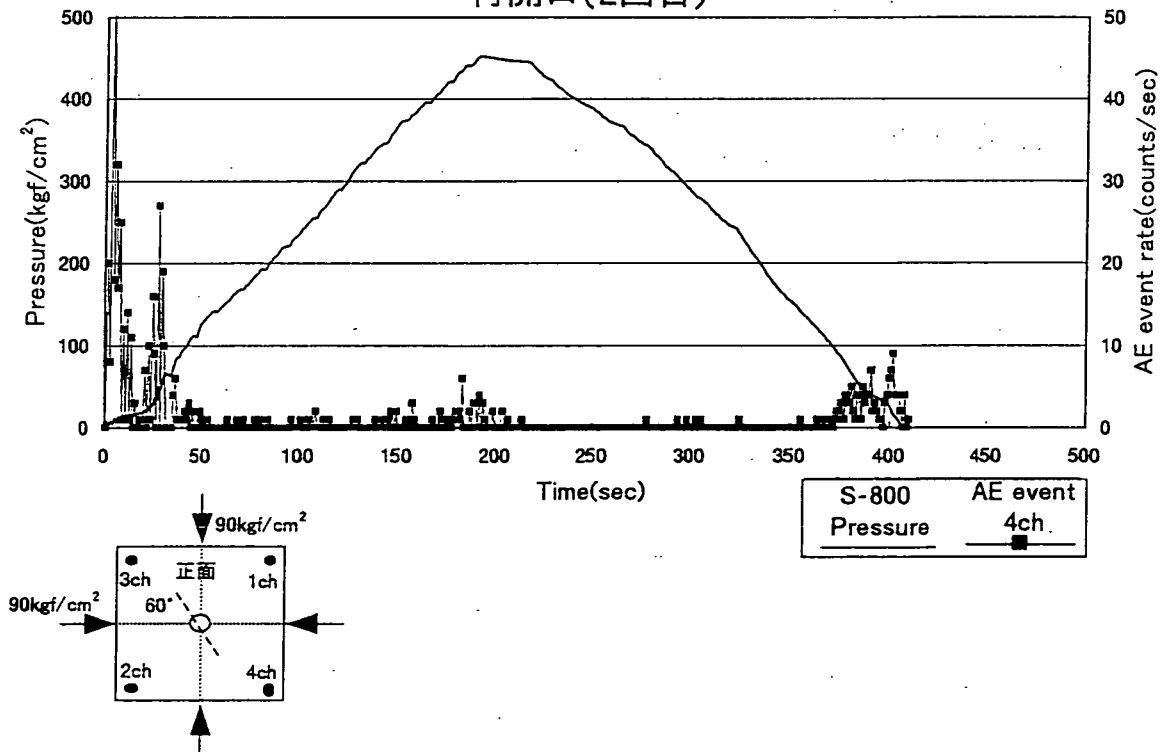


図4. 6. 27(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

134S8-1

60° 水平圧力120kgf/cm²、垂直圧力120kgf/cm²

再開口(1回目)

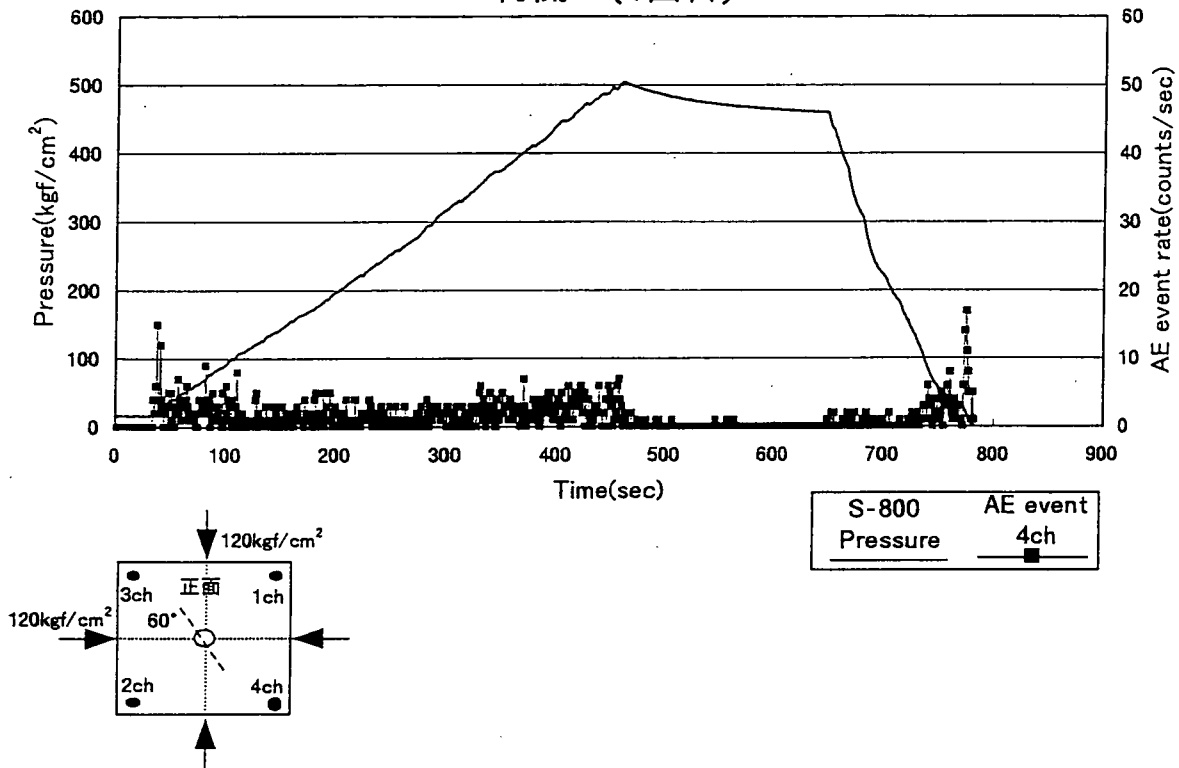


図4. 6. 28(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

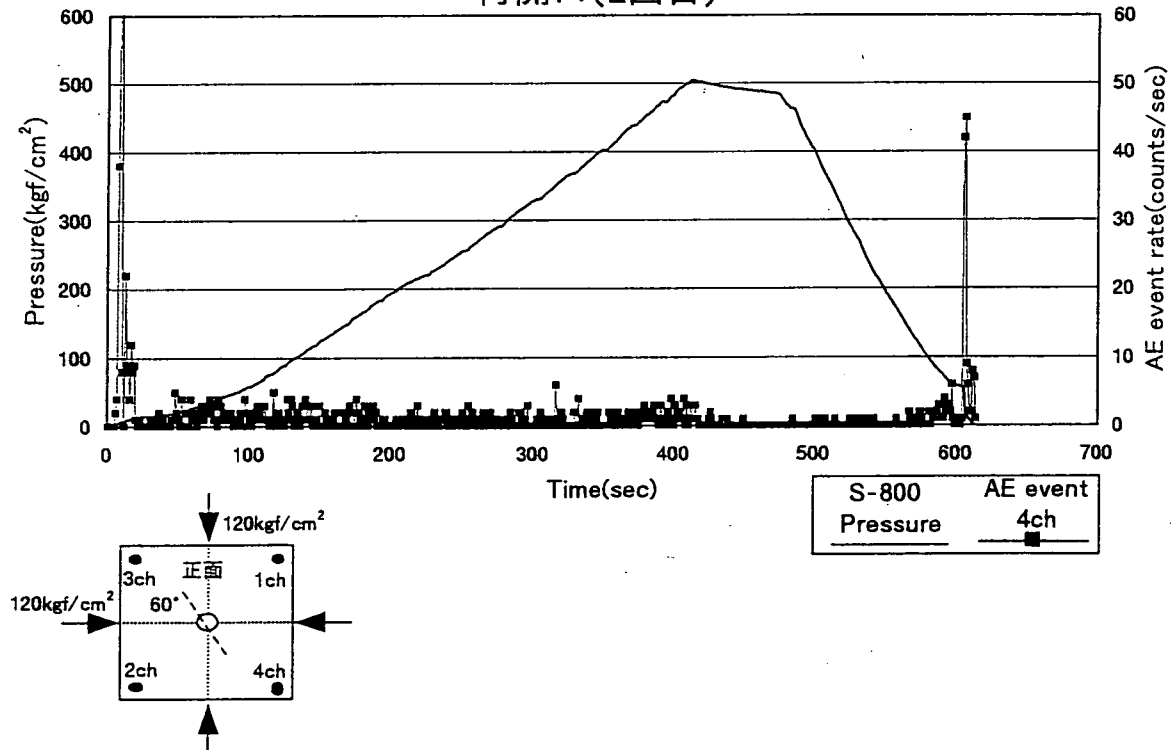


図4. 6. 28(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

134S8-2

60° 水平圧力120kgf/cm²、垂直圧力120kgf/cm²

再開口(1回目)

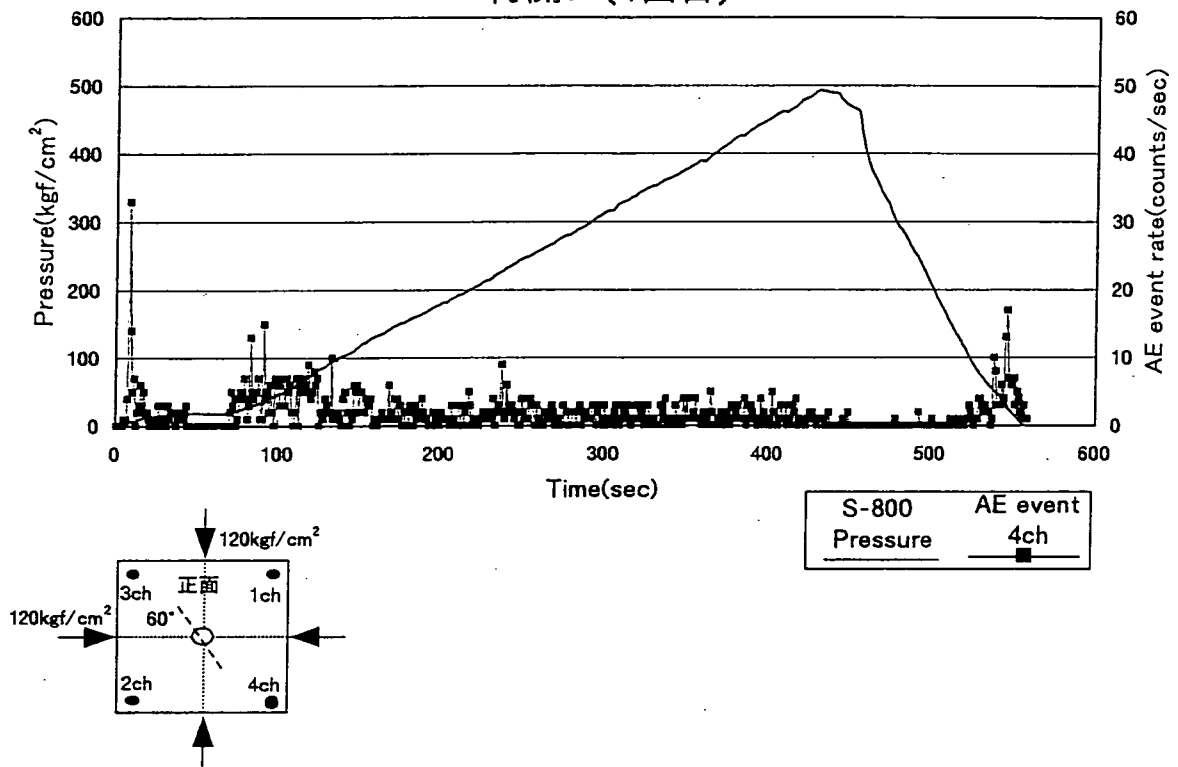


図4. 6. 29. 載荷圧とAEの発生数との関係

136S8-1

60° 水平圧力45kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(1回目)

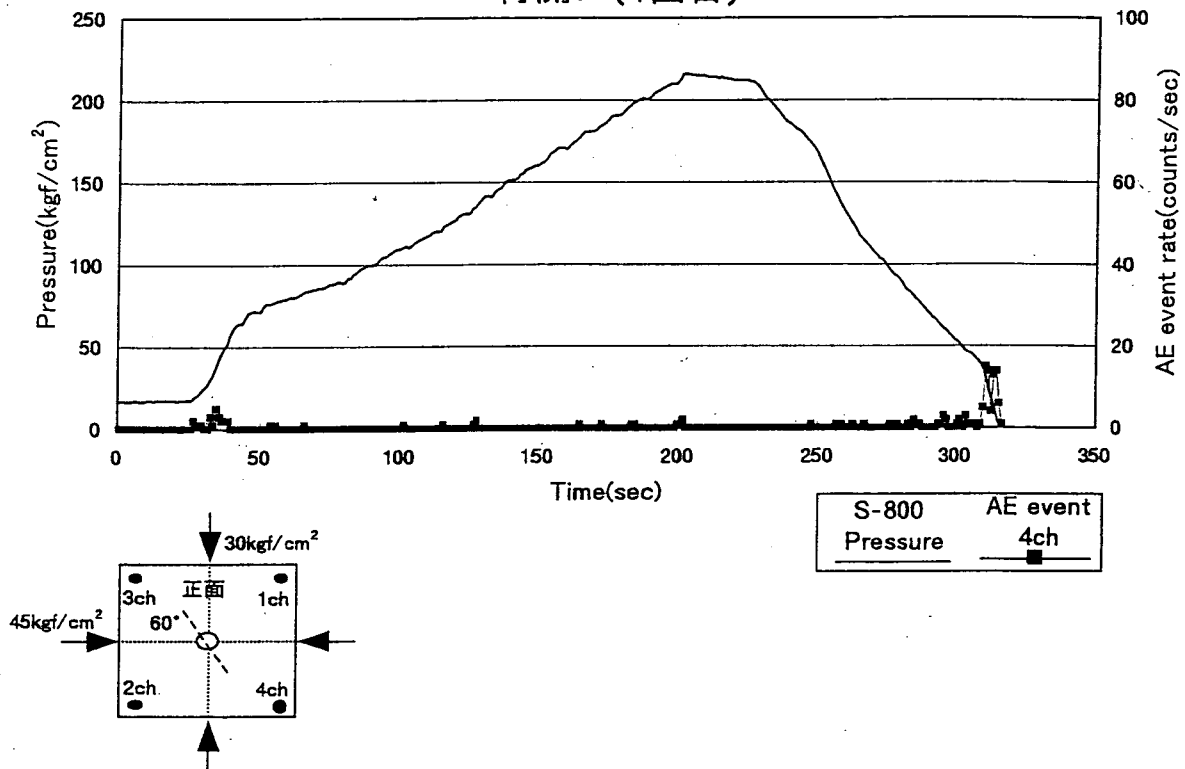


図4.6.30(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1回目)

再開口(2回目)

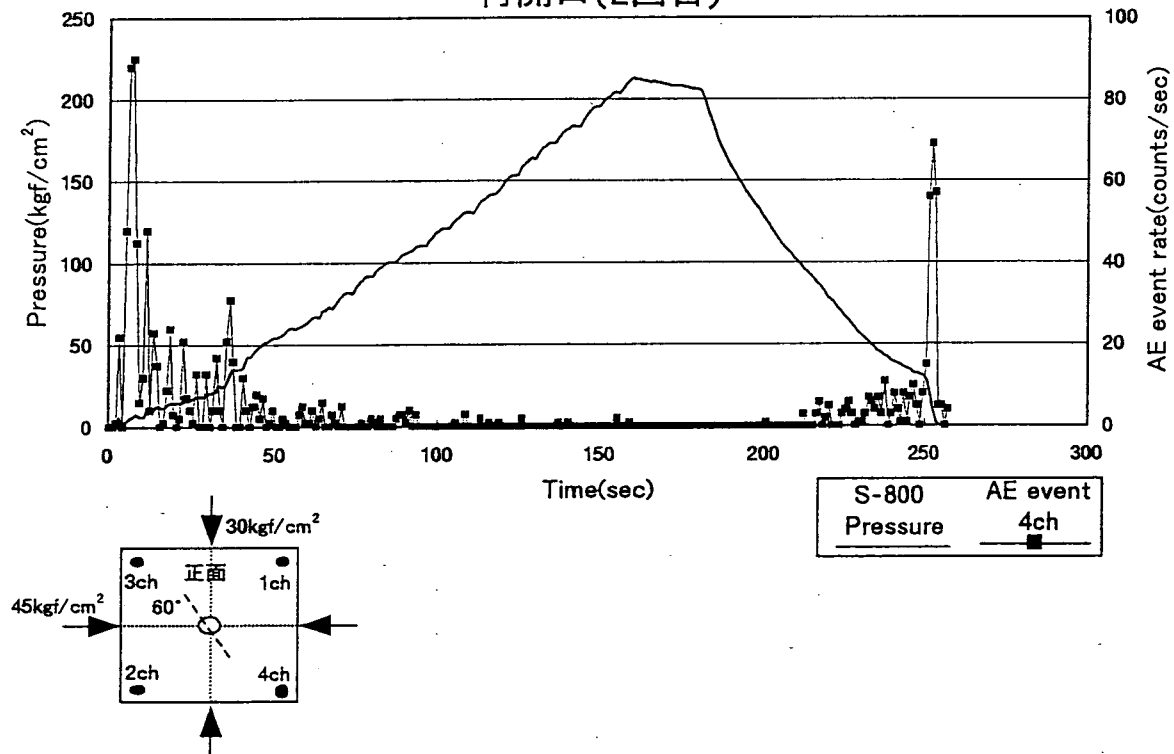


図4.6.30(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2回目)

137S8-1

60° 水平圧力75kgf/cm²、垂直圧力50kgf/cm²

再開口(1回目)

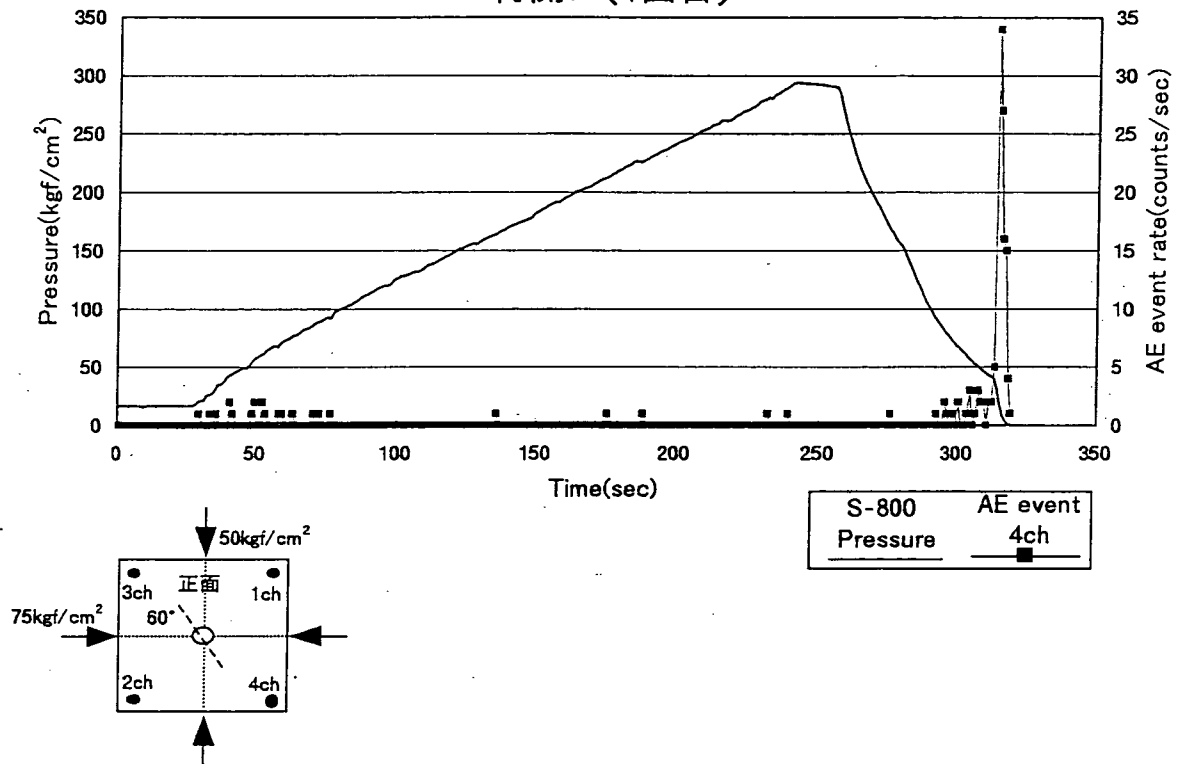


図4.6.31. 載荷圧とAEの発生数との関係

138S8-1

60° 水平圧力105kgf/cm²、垂直圧力70kgf/cm²

再開口(1回目)

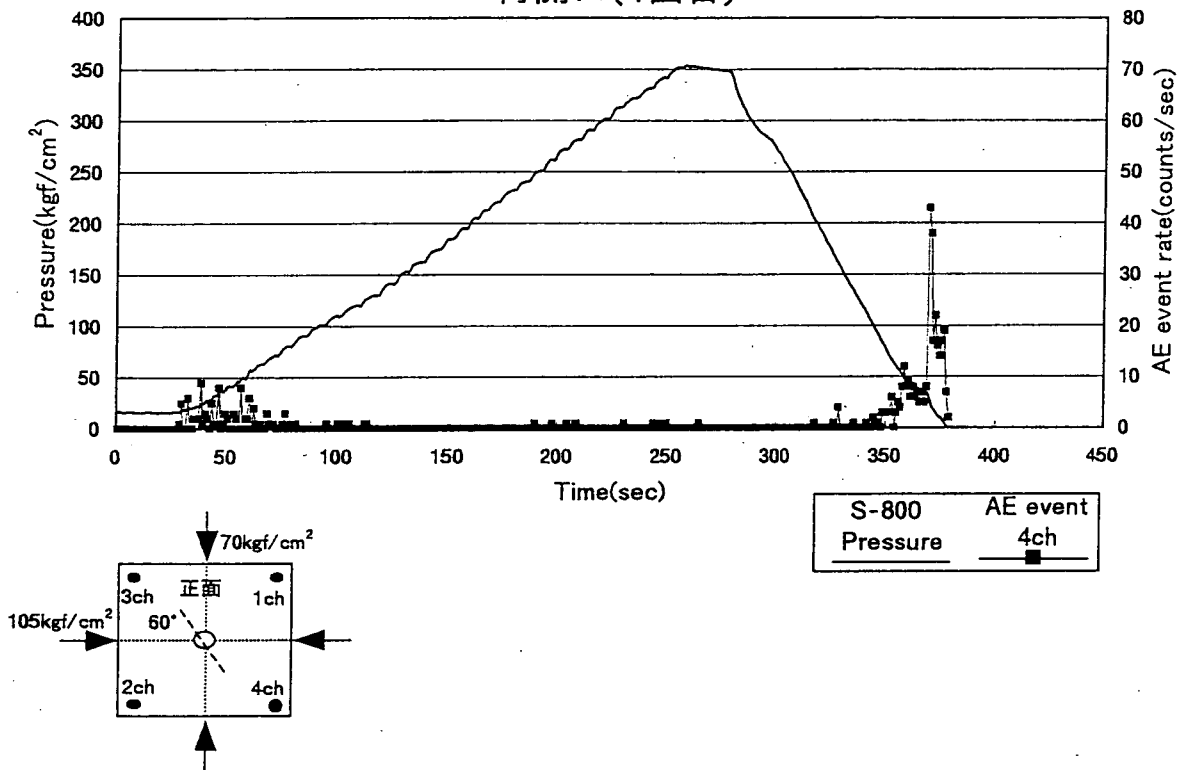


図4. 6. 32. 載荷圧とAEの発生数との関係

139S8-1

60° 水平圧力135kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(1回目)

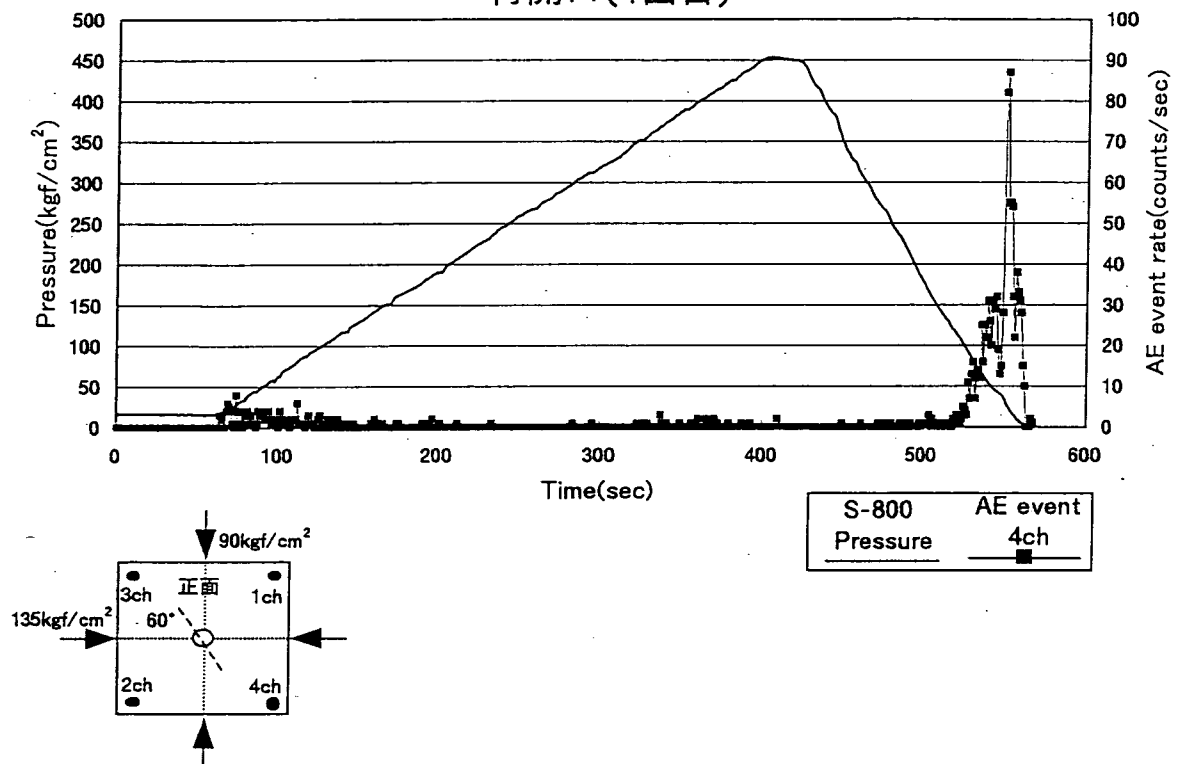


図4. 6. 33. 載荷圧とAEの発生数との関係

219S8-1

115° 水平圧力135kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

破碎

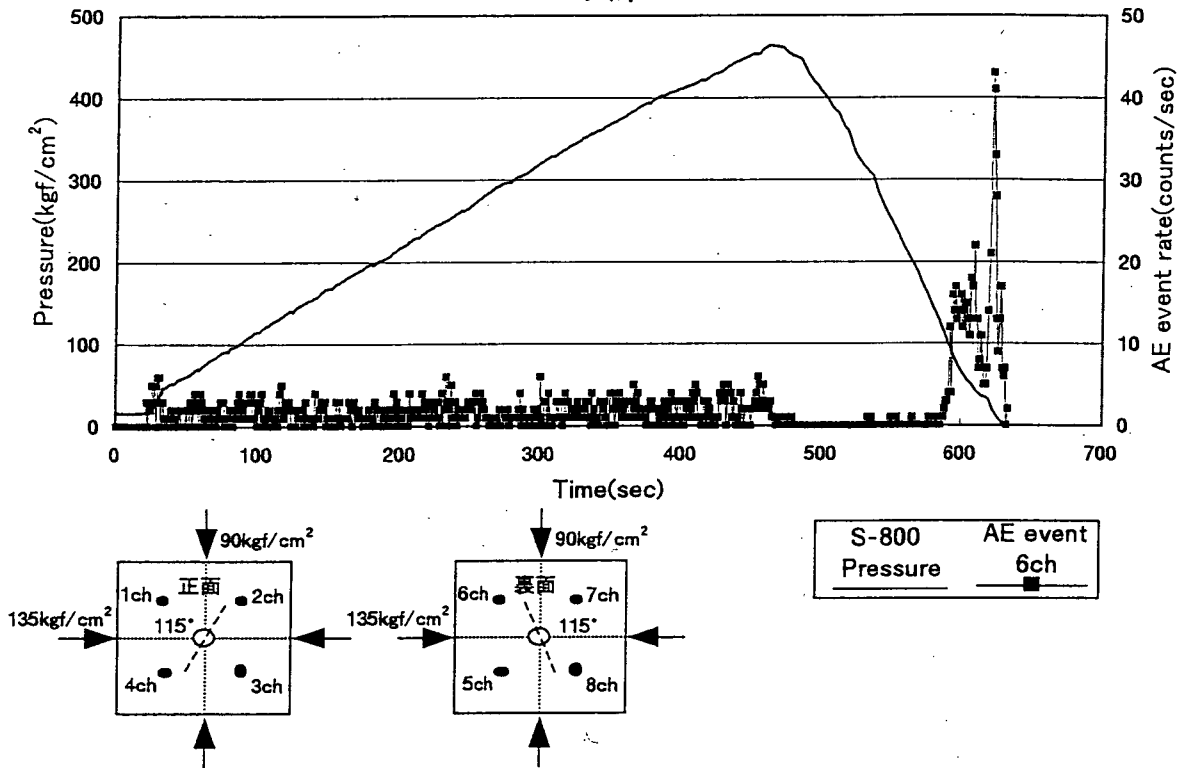


図4. 6. 34 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (破碎)

再開口(1回目)

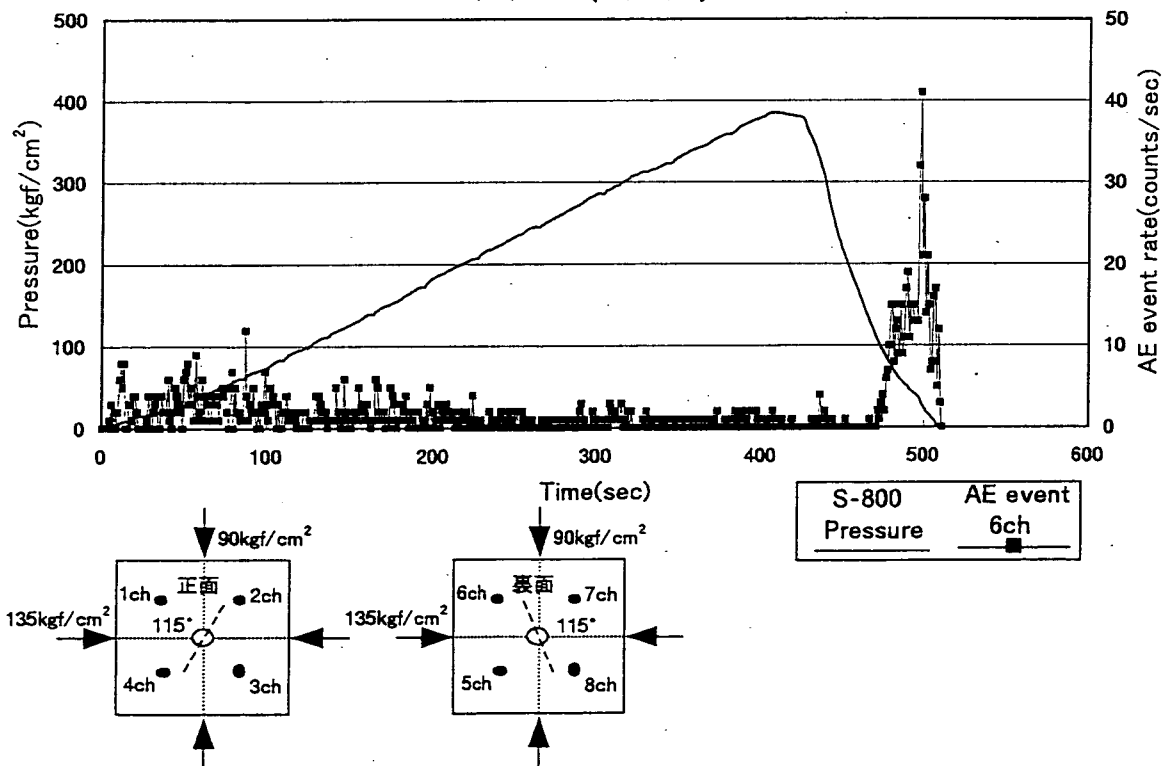


図4. 6. 34 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

219S8-1

115° 水平圧力135kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(2回目)

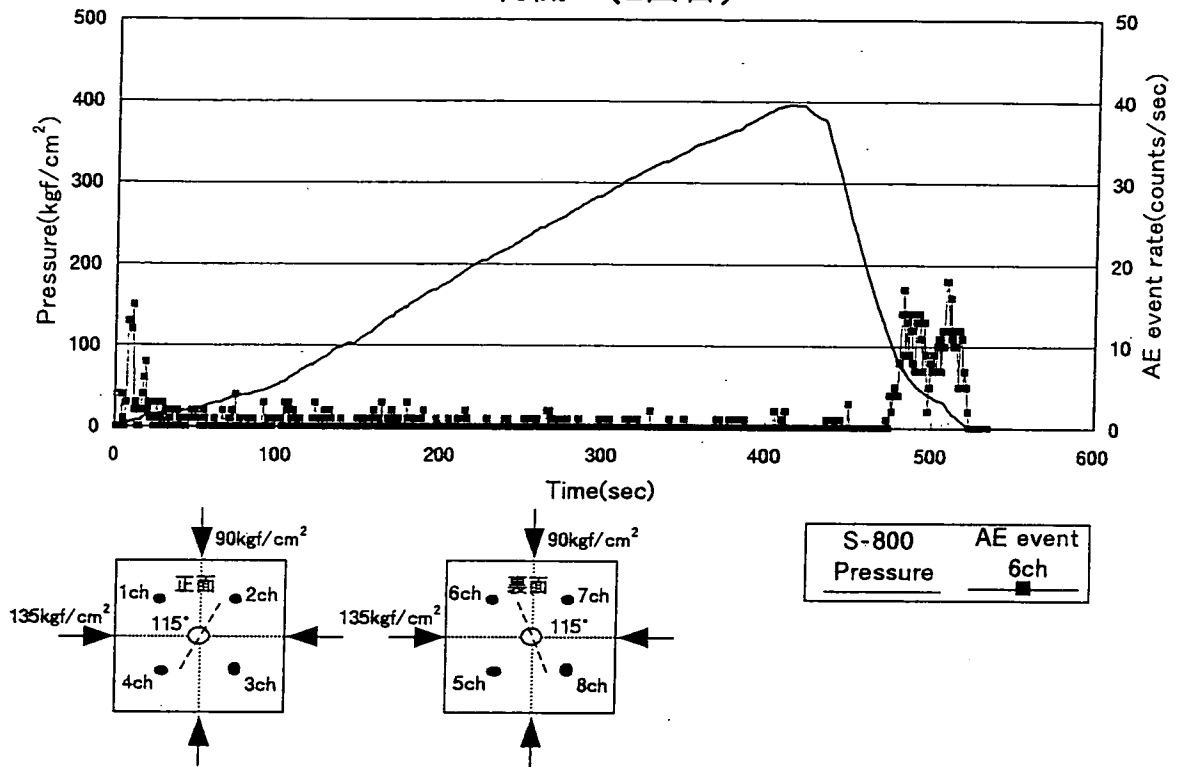


図4. 6. 34 (c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

218S8-2

115° 水平圧力105kgf/cm²、垂直圧力70kgf/cm²

再開口(1回目)

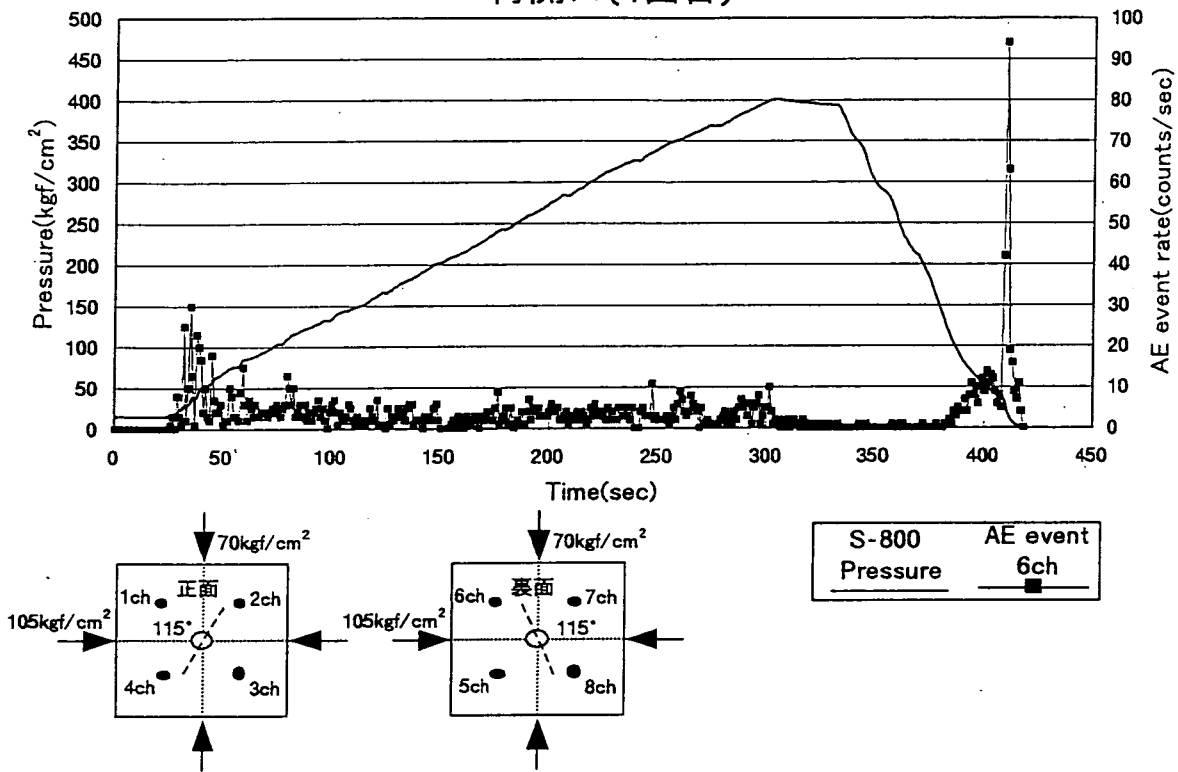


図4. 6. 35(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

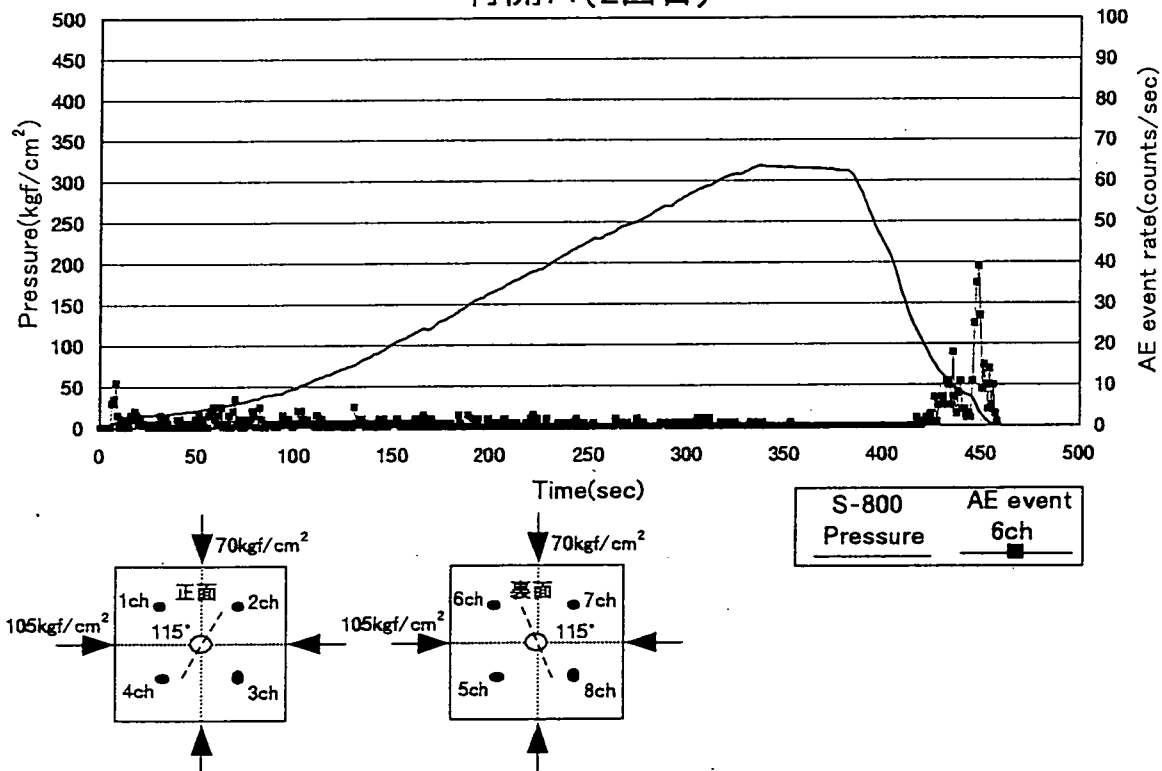


図4. 6. 35(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

218S8-2

115° 水平圧力105kgf/cm²、垂直圧力70kgf/cm²

再開口(3回目)

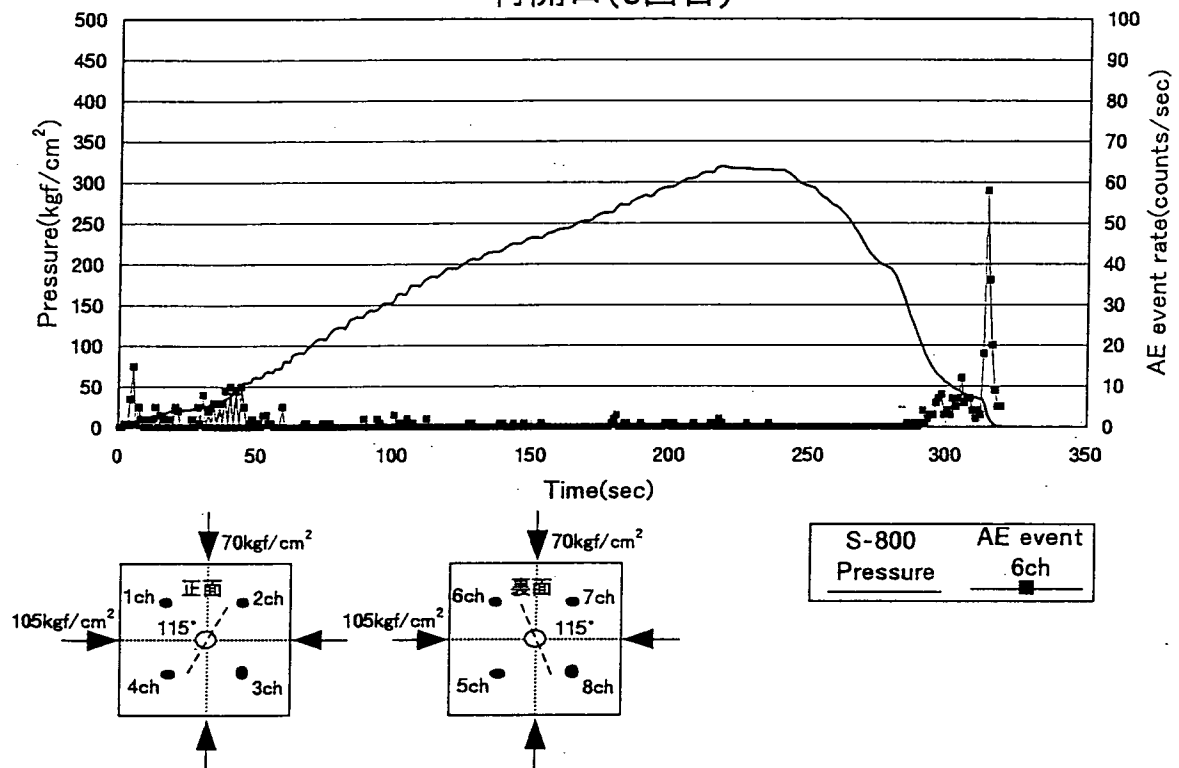


図4. 6. 35(c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (3回目)

217S8-1

115° 水平圧力75kgf/cm²、垂直圧力50kgf/cm²

再開口(1回目)

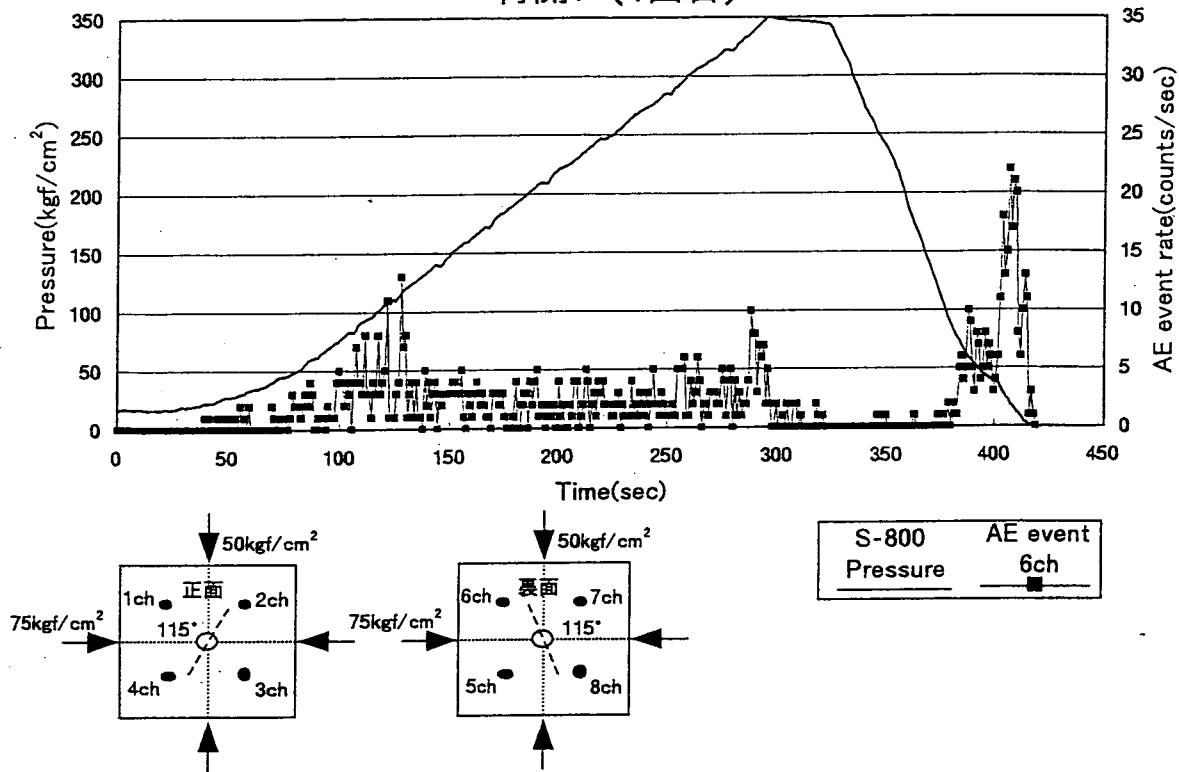


図4. 6. 36 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

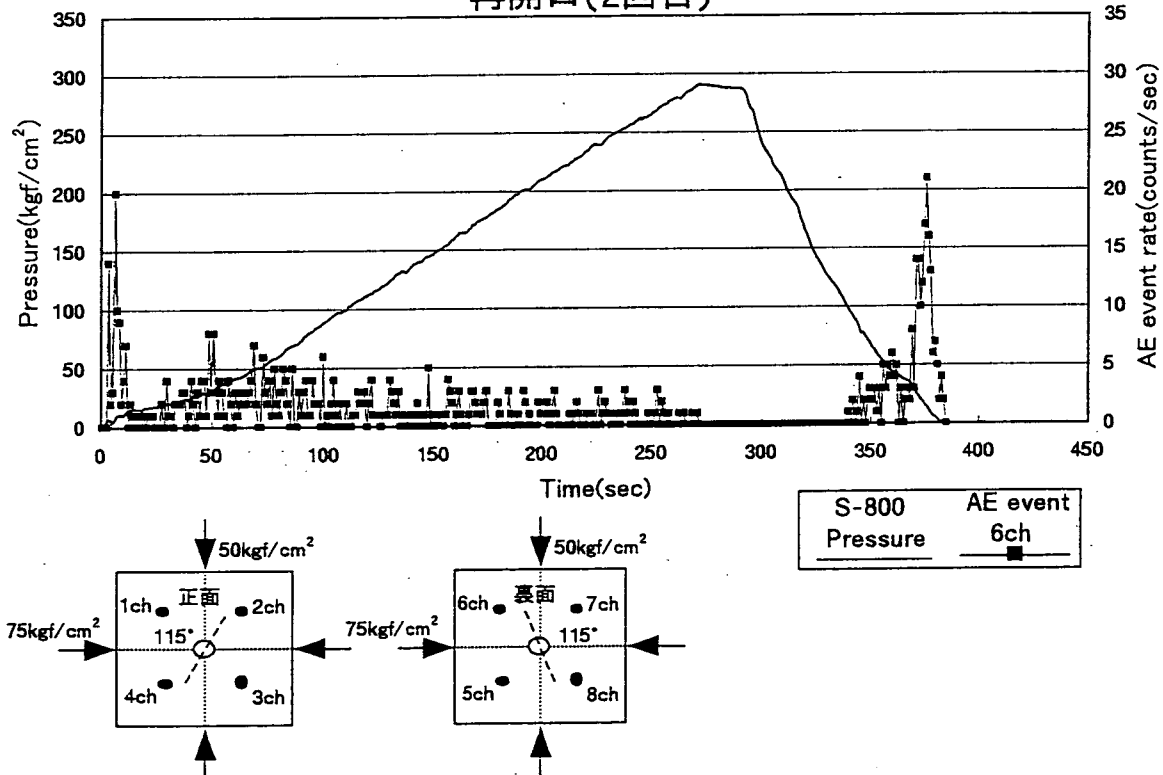


図4. 6. 36 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

217S8-1

115° 水平圧力75kgf/cm²、垂直圧力50kgf/cm²

再開口(3回目)

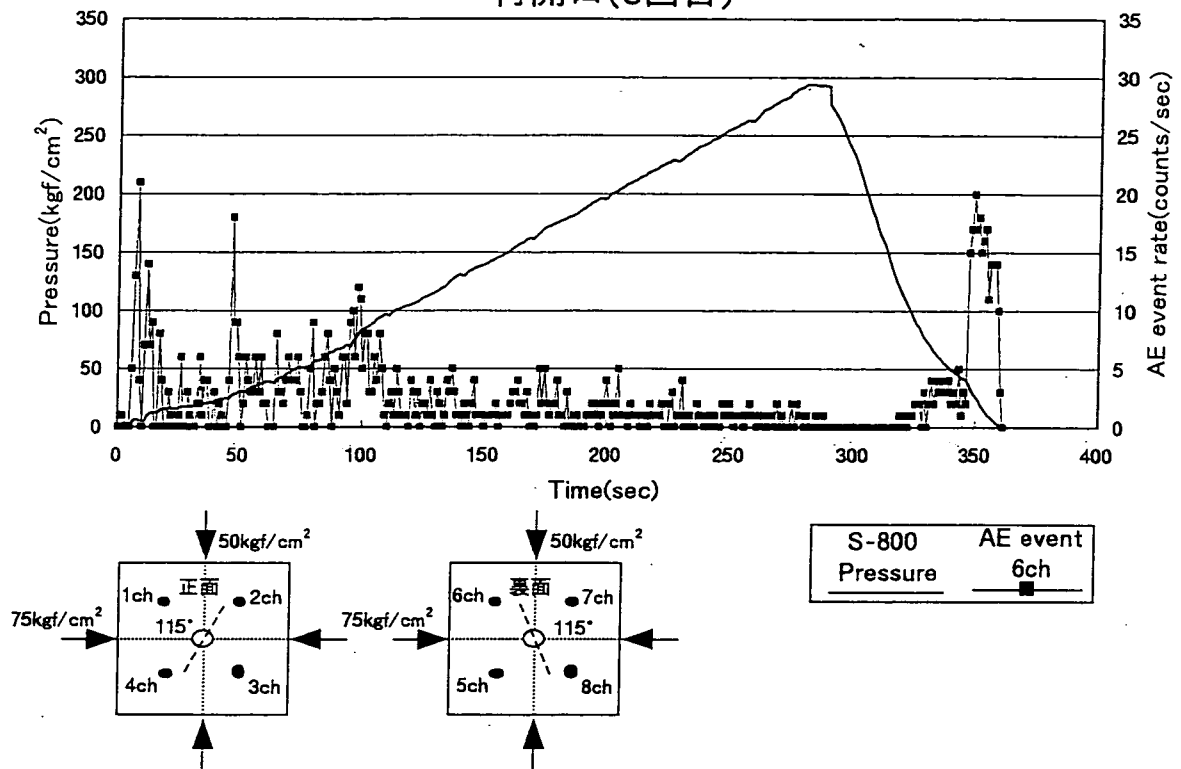


図4. 6. 36 (c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (3回目)

216S8-1

115° 水平圧力45kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(1回目)

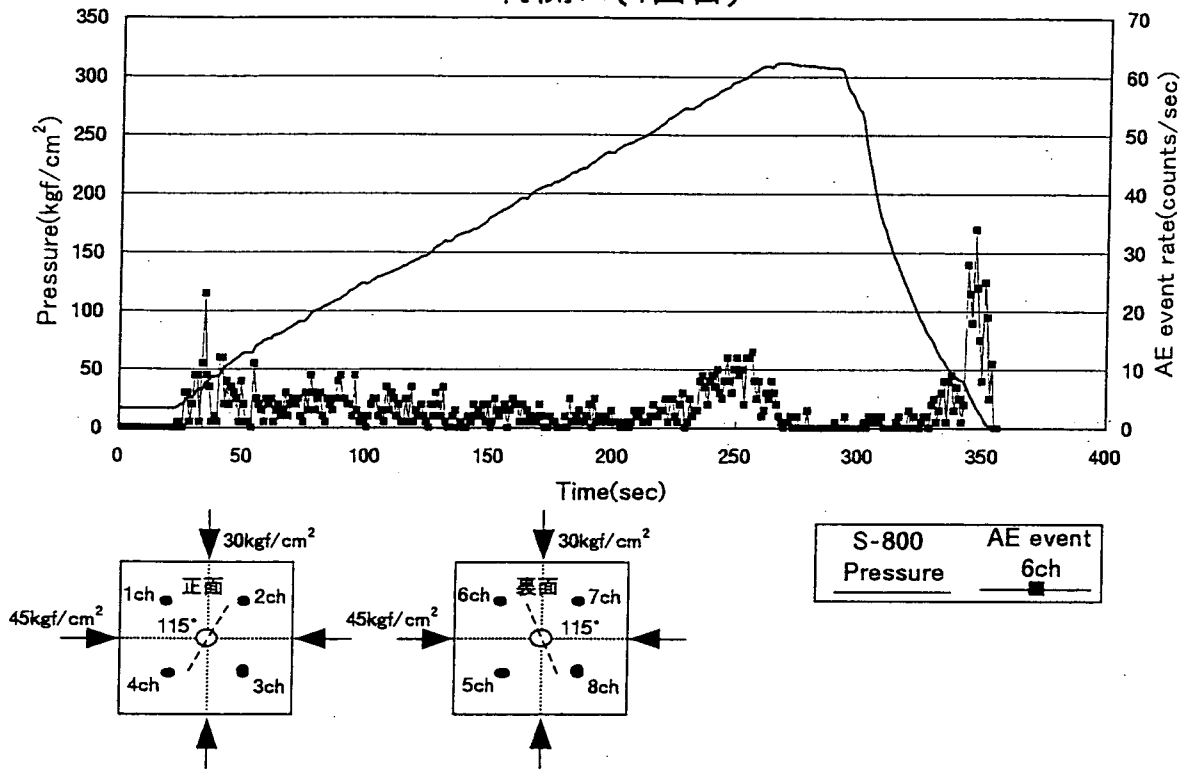


図4.6.37(a). 載荷圧とAEの発生数との関係(1回目)

再開口(2回目)

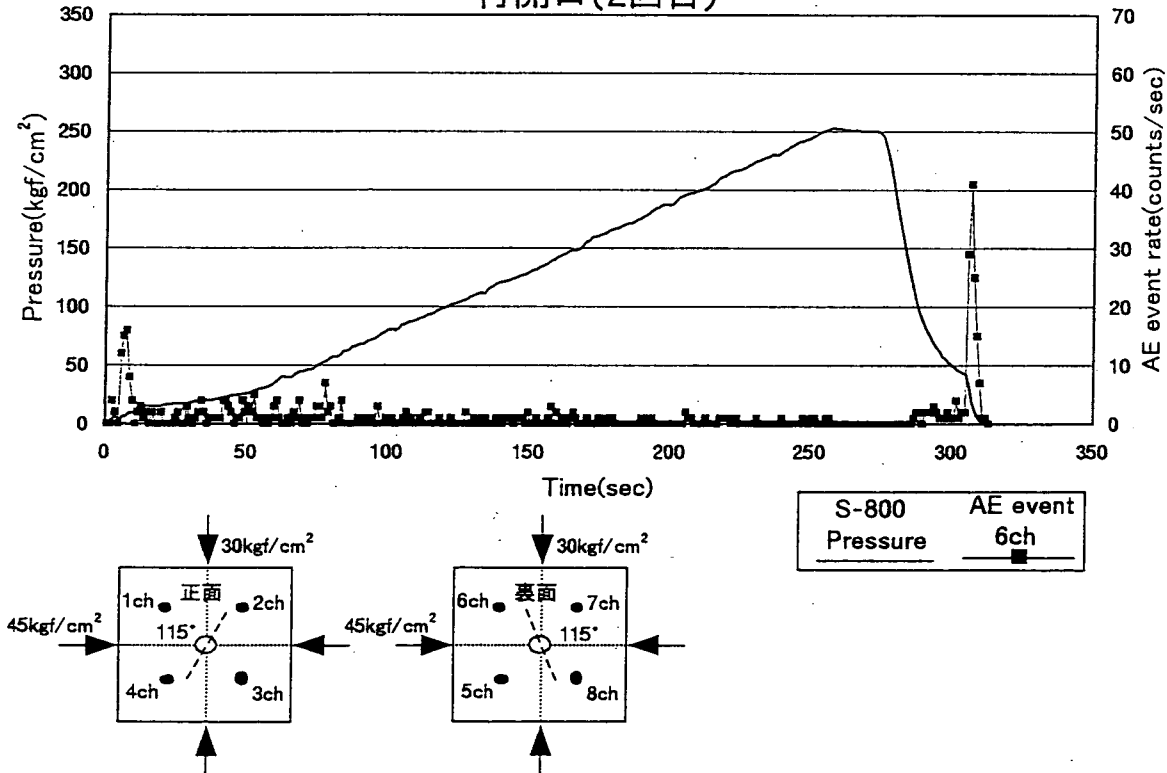


図4.6.37(b). 載荷圧とAEの発生数との関係(2回目)

216S8-1

115° 水平圧力45kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(3回目)

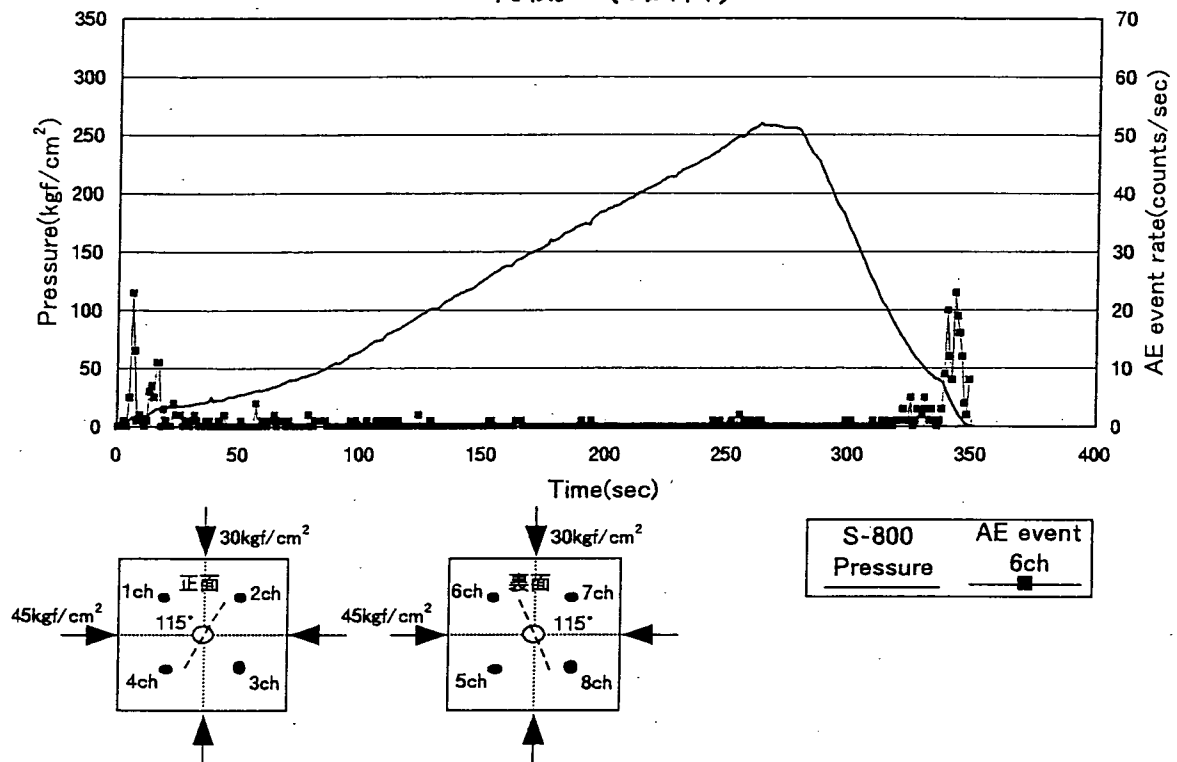


図4. 6. 37(c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (3回目)

211S8-1

115° 水平圧力30kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(1回目)

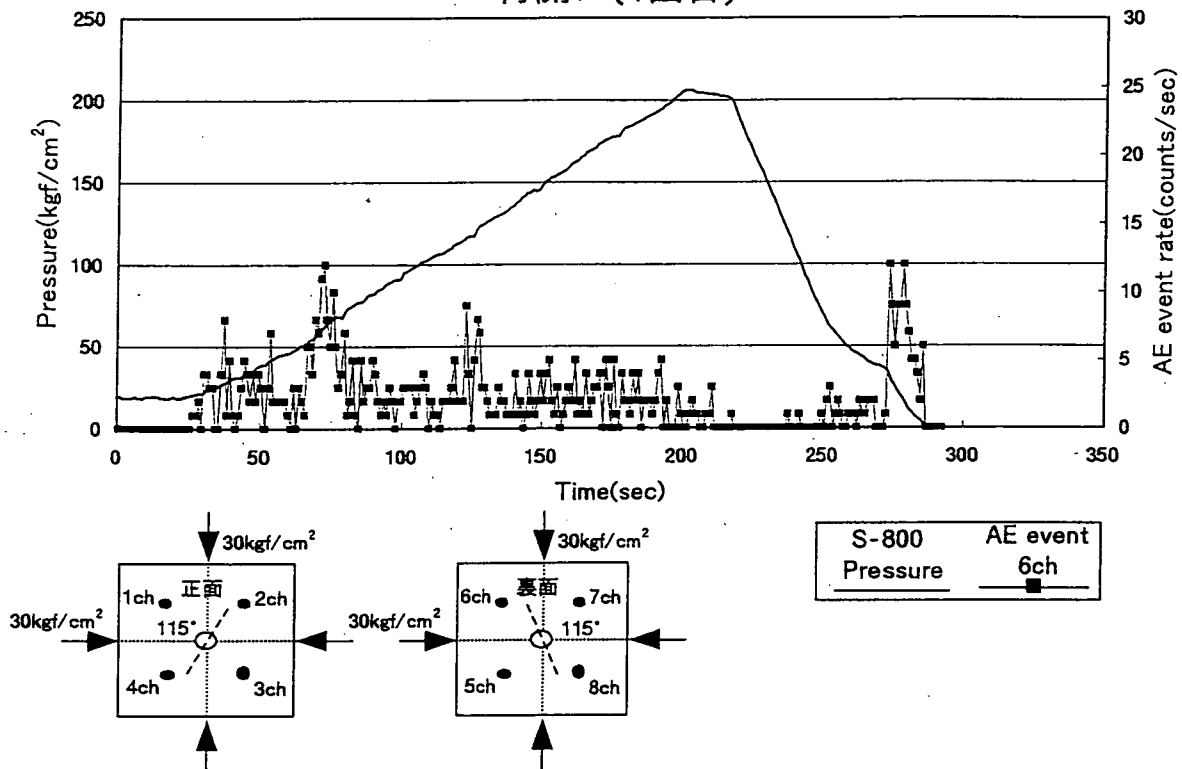


図4. 6. 38(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

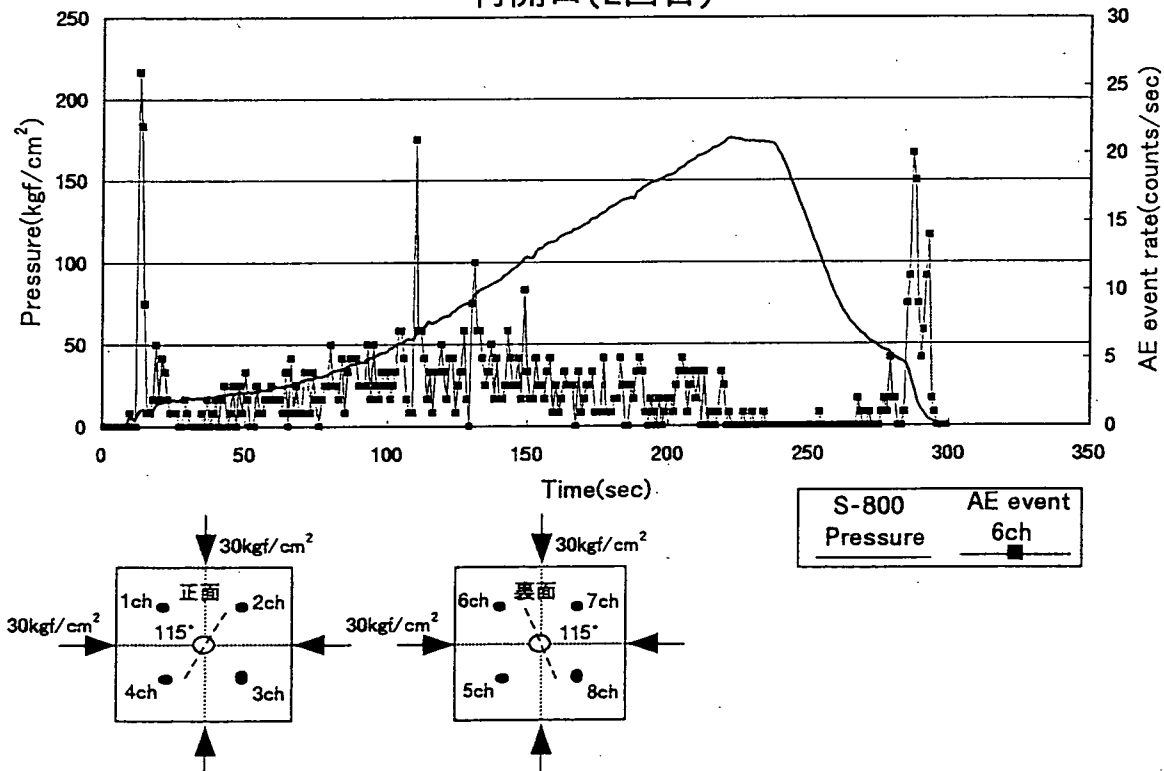


図4. 6. 38(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

211S8-1

115° 水平圧力30kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(3回目)

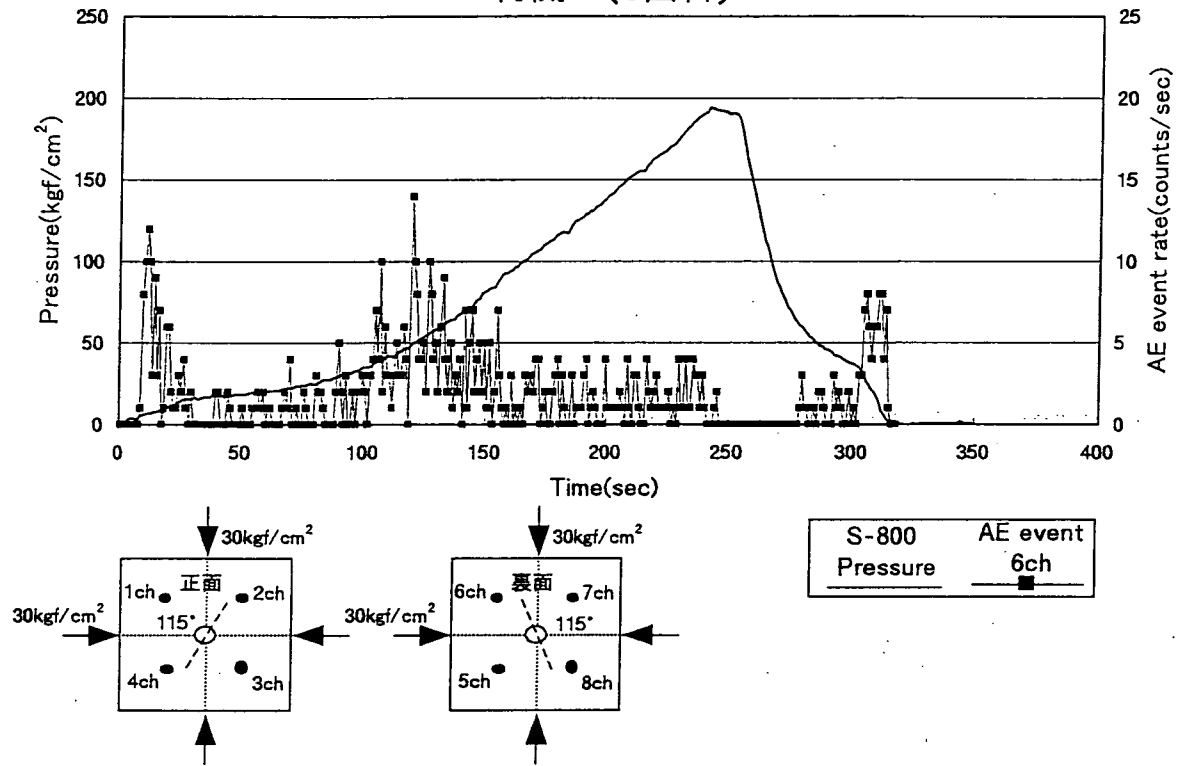


図4.6.38(c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (3回目)

212S8-2

115° 水平圧力60kgf/cm²、垂直圧力60kgf/cm²

再開口(1回目)

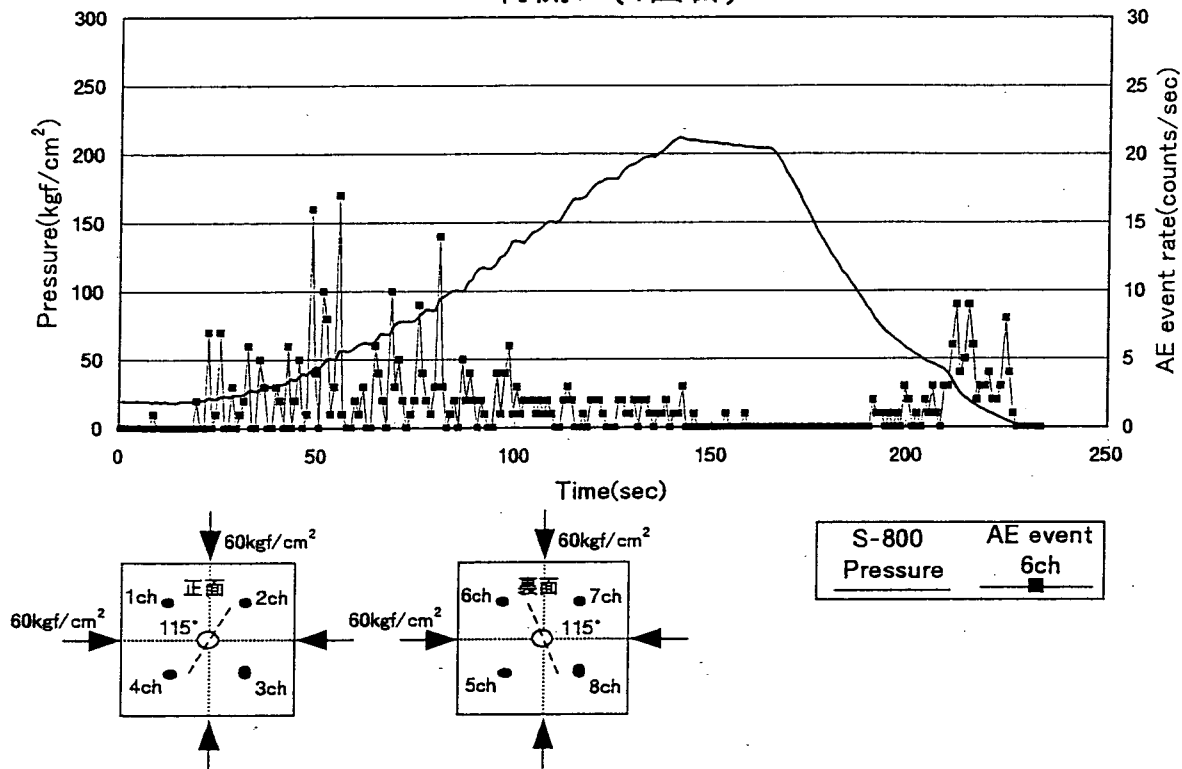


図4. 6. 39(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

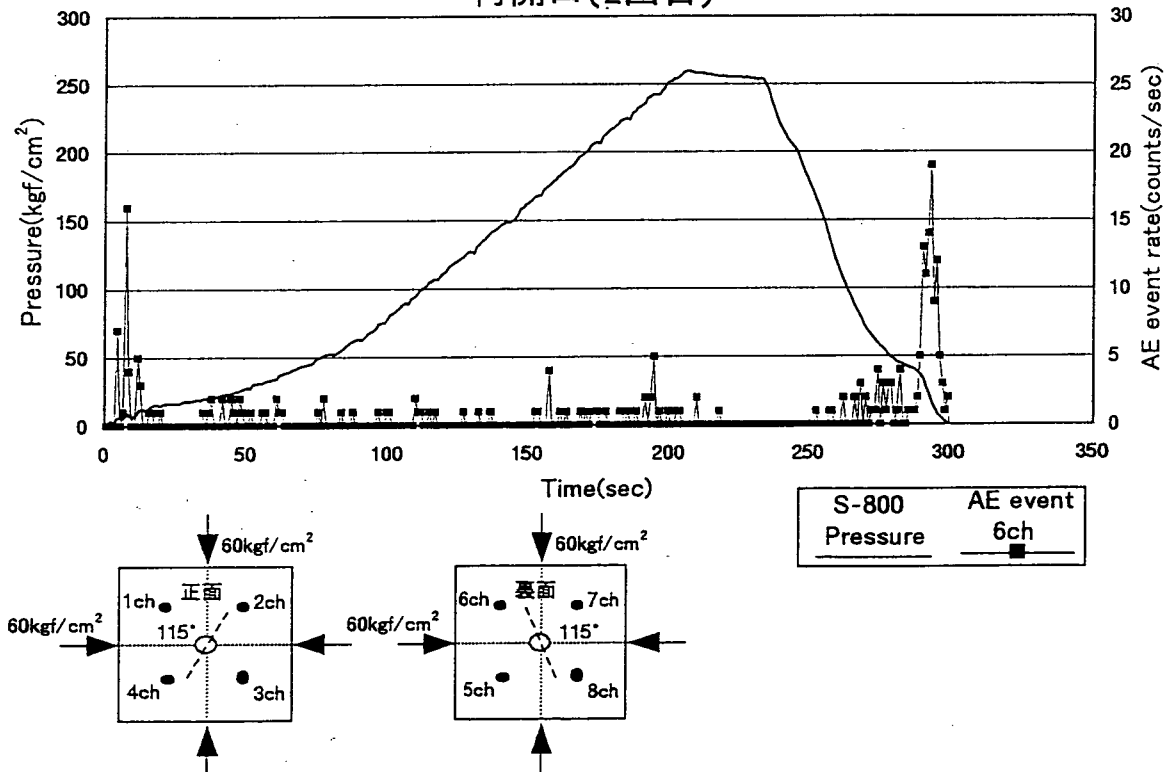


図4. 6. 39(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

212S8-2

115° 水平圧力60kgf/cm²、垂直圧力60kgf/cm²

再開口(3回目)

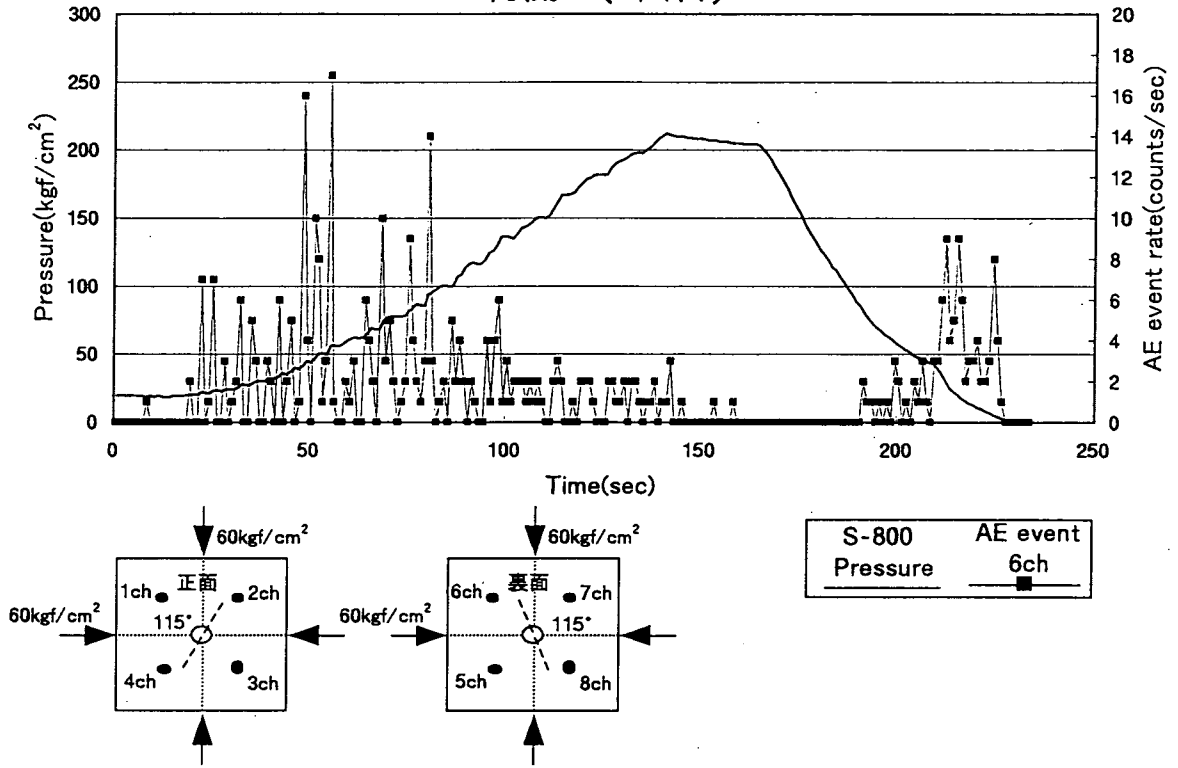


図4. 6. 39 (c). 载荷圧とAEの発生数との関係 (3回目)

213S8-1

115° 水平圧力90kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(1回目)

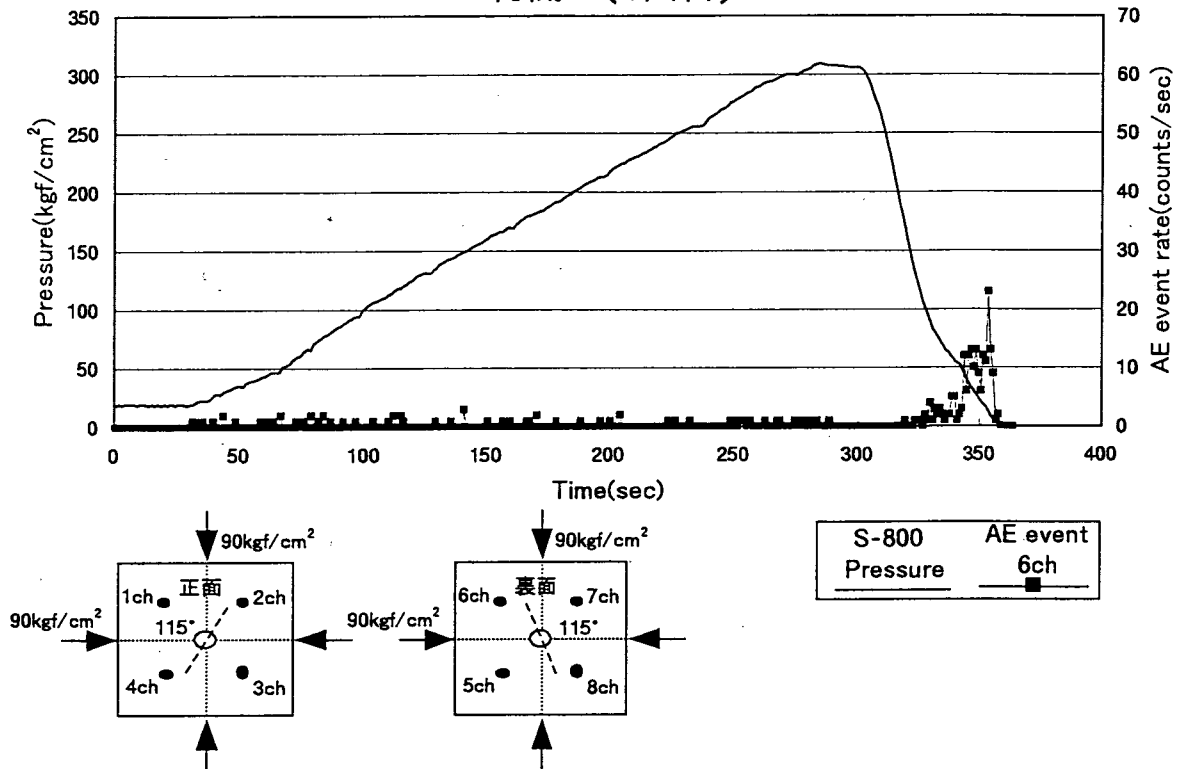


図4.6.40(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1回目)

再開口(2回目)

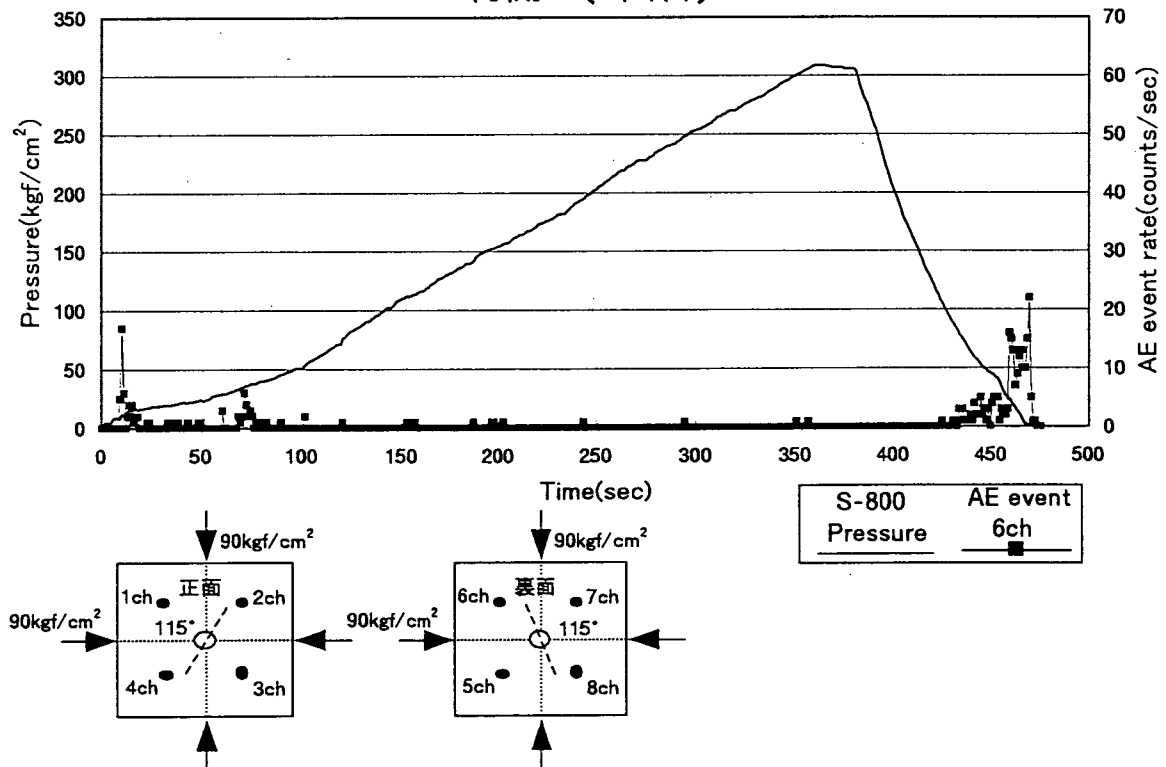


図4.6.40(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2回目)

213S8-1

115° 水平圧力90kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(3回目)

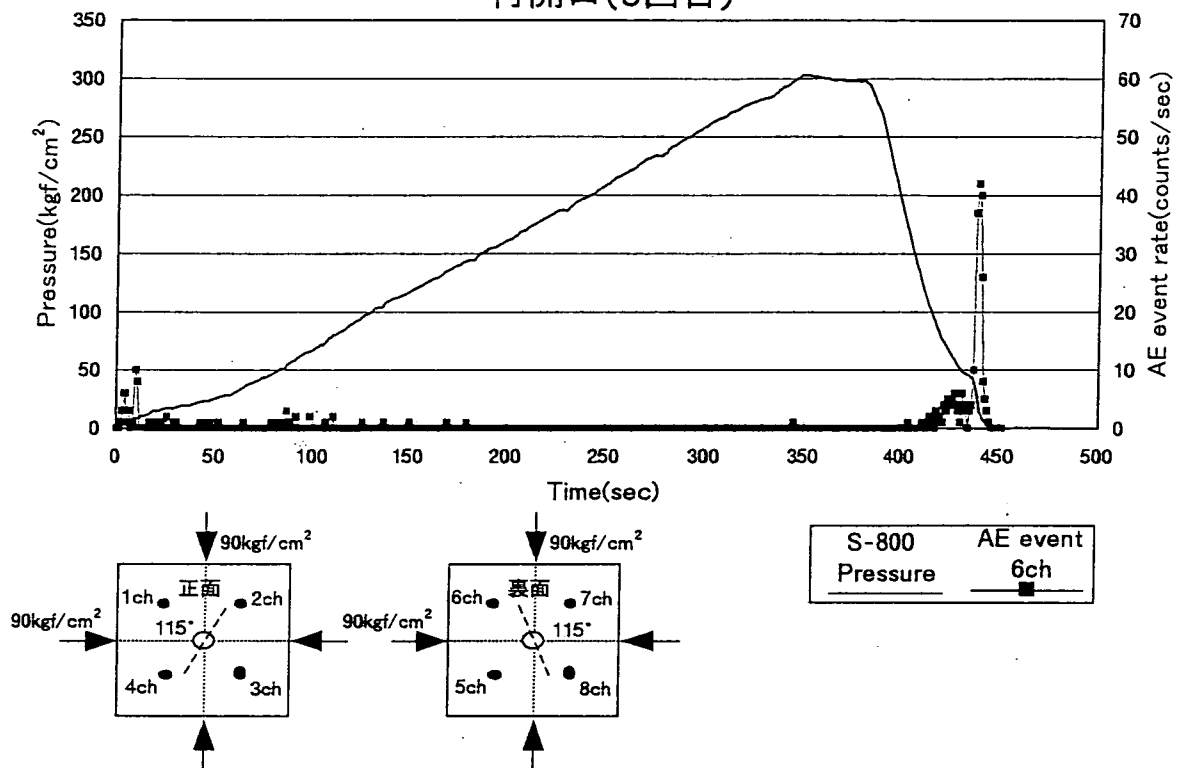


図4. 6. 40(c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (3 回目)

214S8-1

115° 水平圧力120kgf/cm²、垂直圧力120kgf/cm²

再開口(1回目)

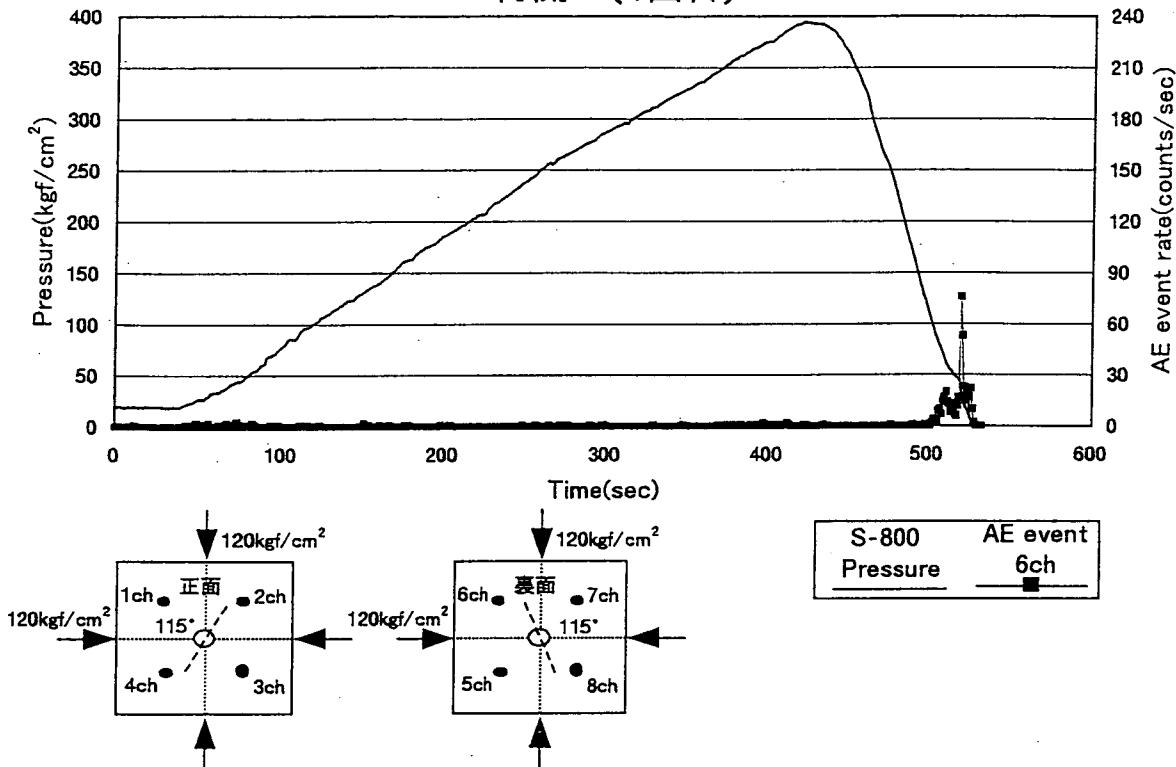


図4. 6. 41 (a). 载荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

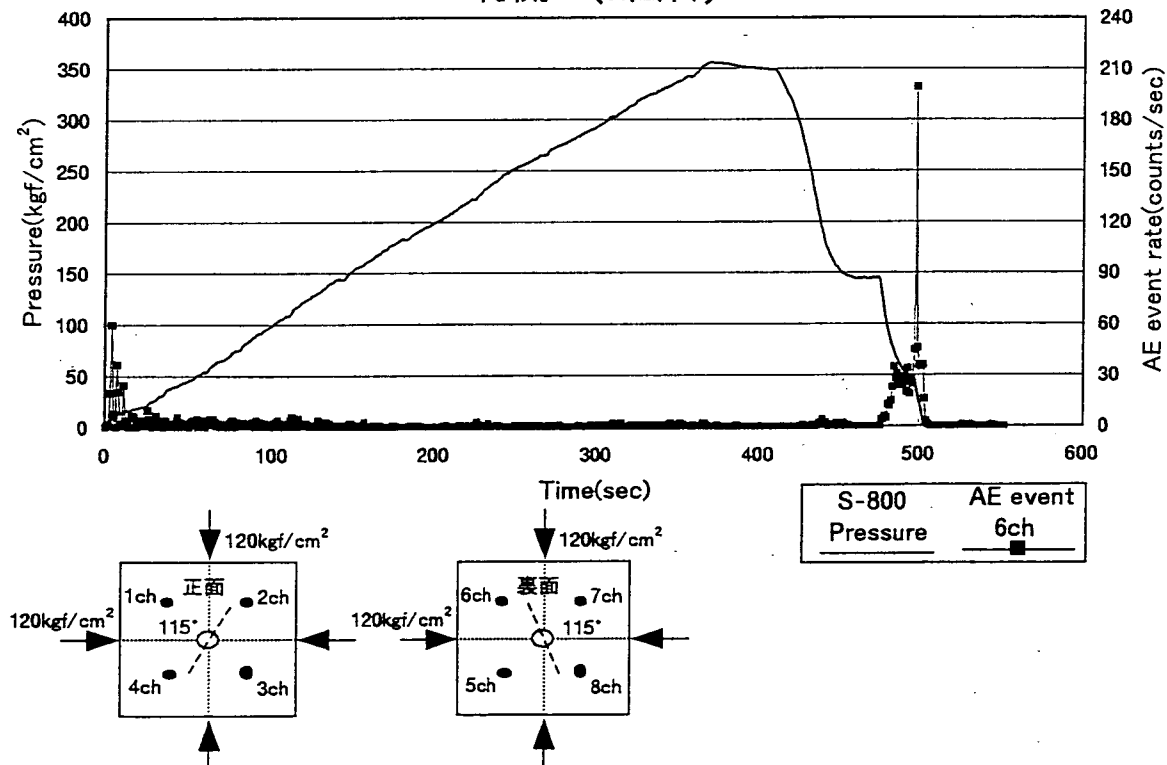


図4. 6. 41 (b). 载荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

214S8-1

115° 水平圧力120kgf/cm²、垂直圧力120kgf/cm²

再開口(3回目)

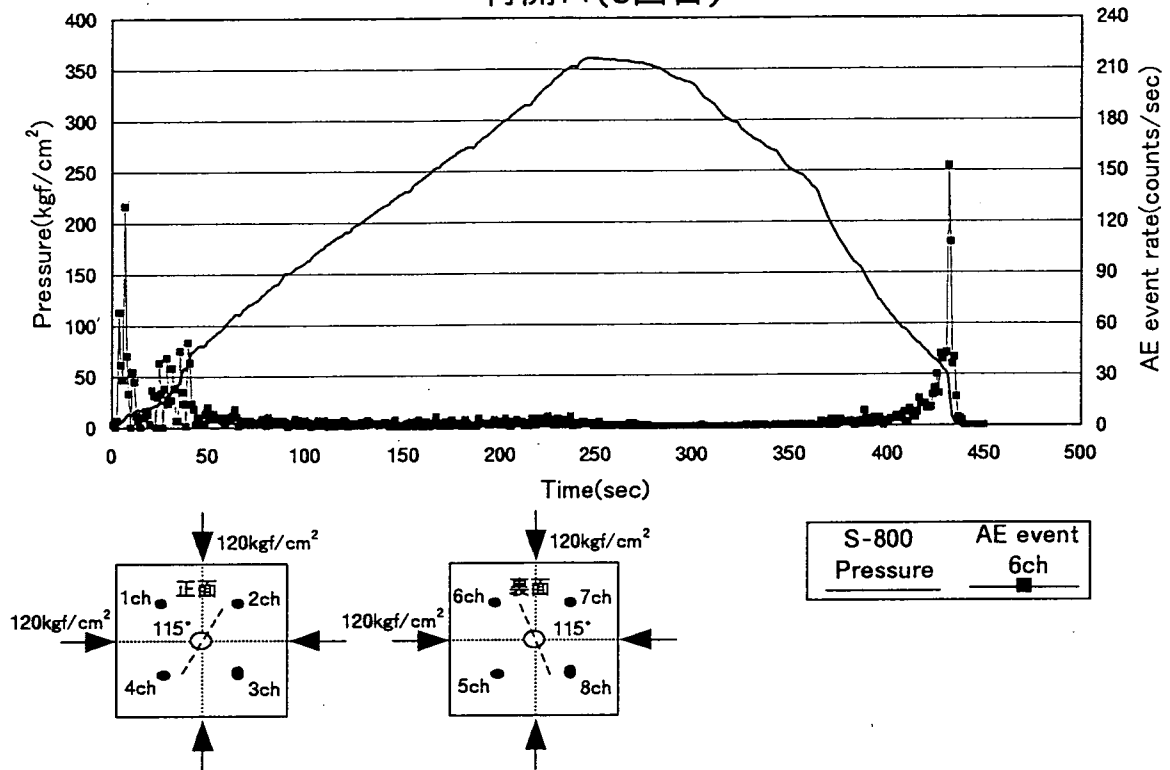


図4. 6. 41 (c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (3 回目)

215S8-1

115° 水平圧力150kgf/cm²、垂直圧力150kgf/cm²

再開口(1回目)

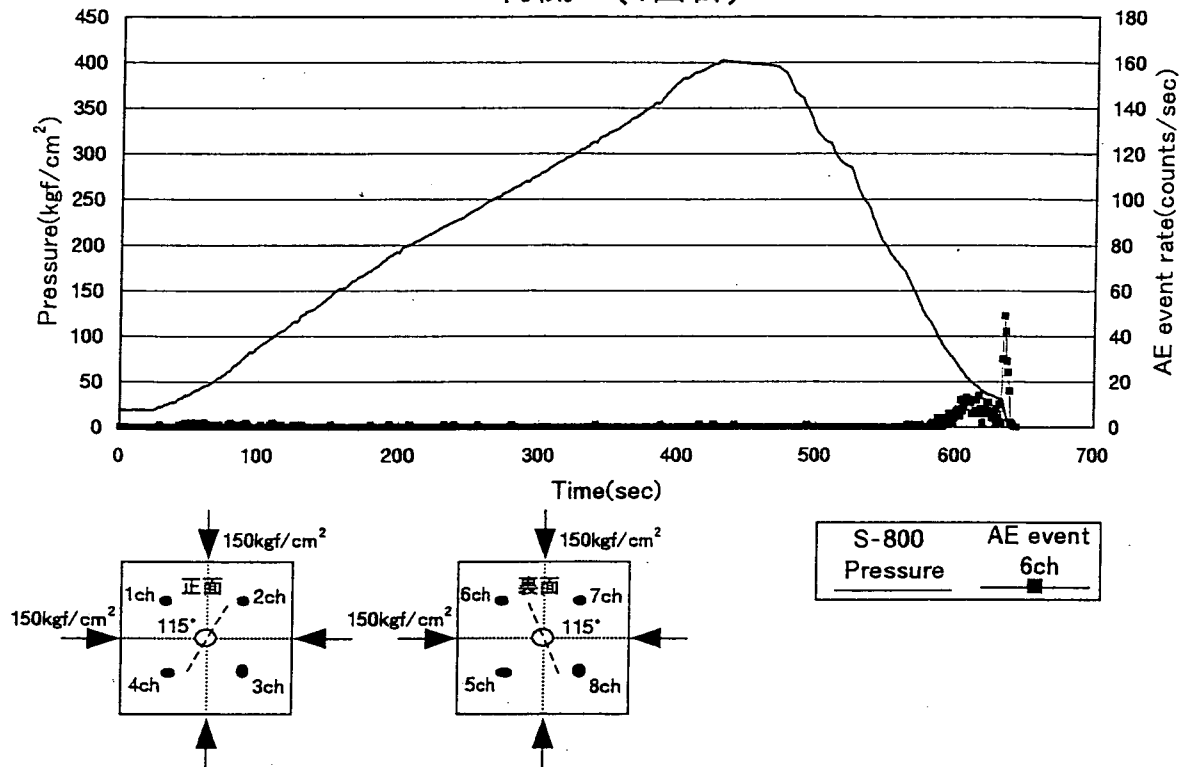


図4. 6. 42(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

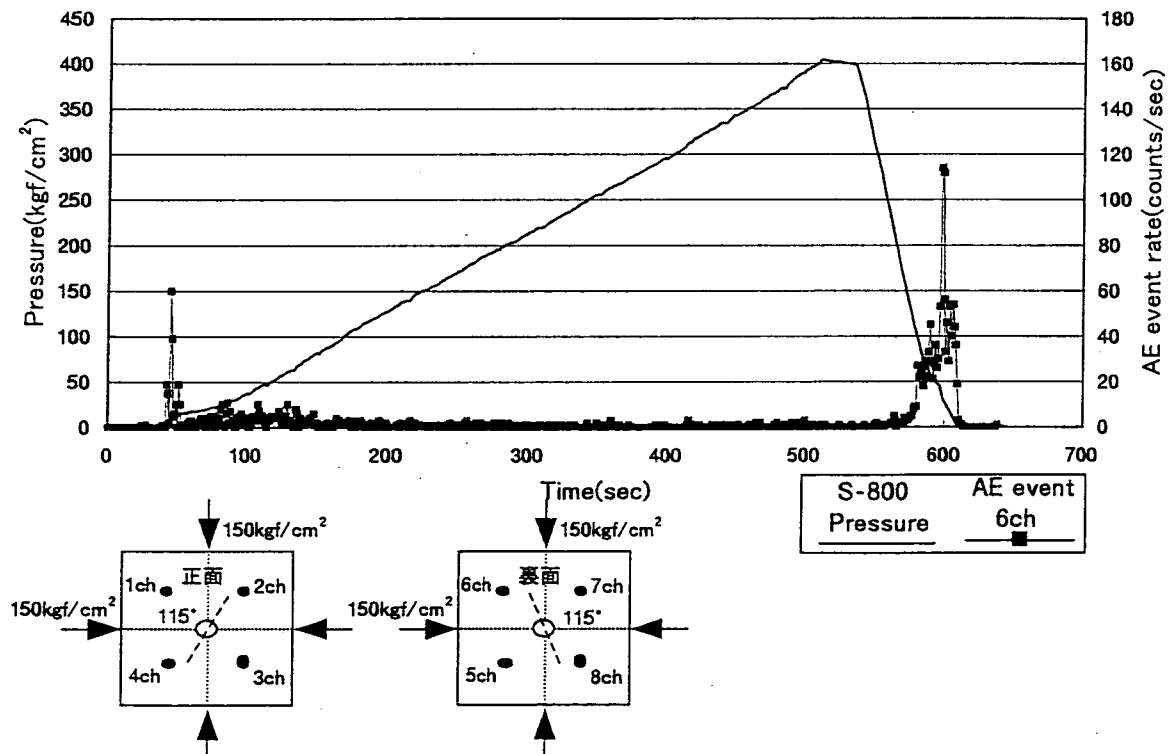


図4. 6. 42(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

226S8-1

45° 水平圧力45kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

破碎

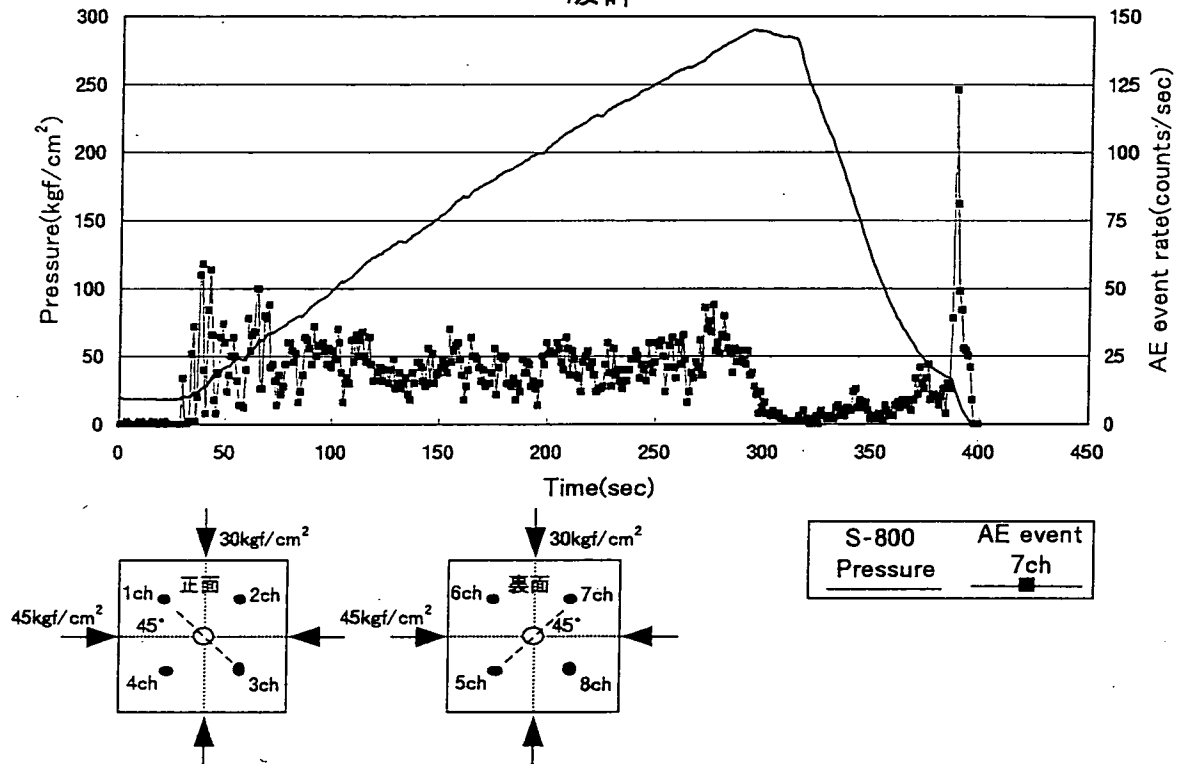


図4. 6. 43(a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (破碎)

再開口(1回目)

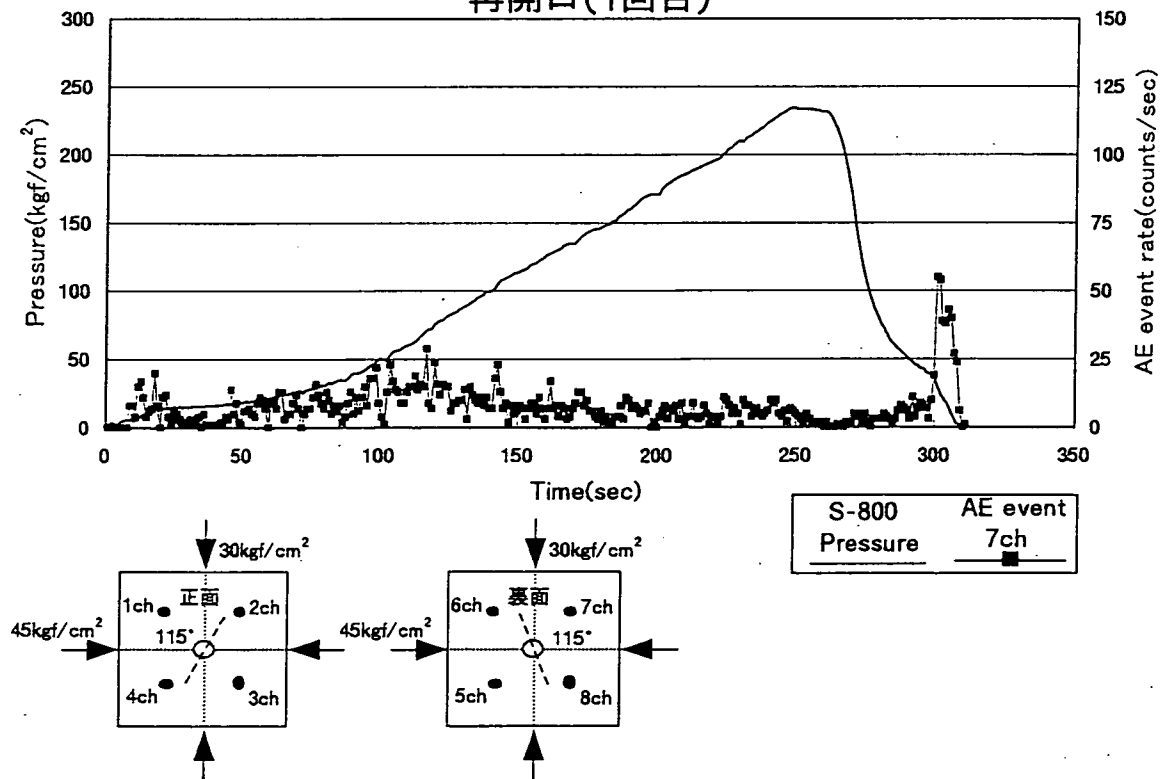


図4. 6. 43(b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

226S8-1

45° 水平圧力45kgf/cm²、垂直圧力30kgf/cm²

再開口(2回目)

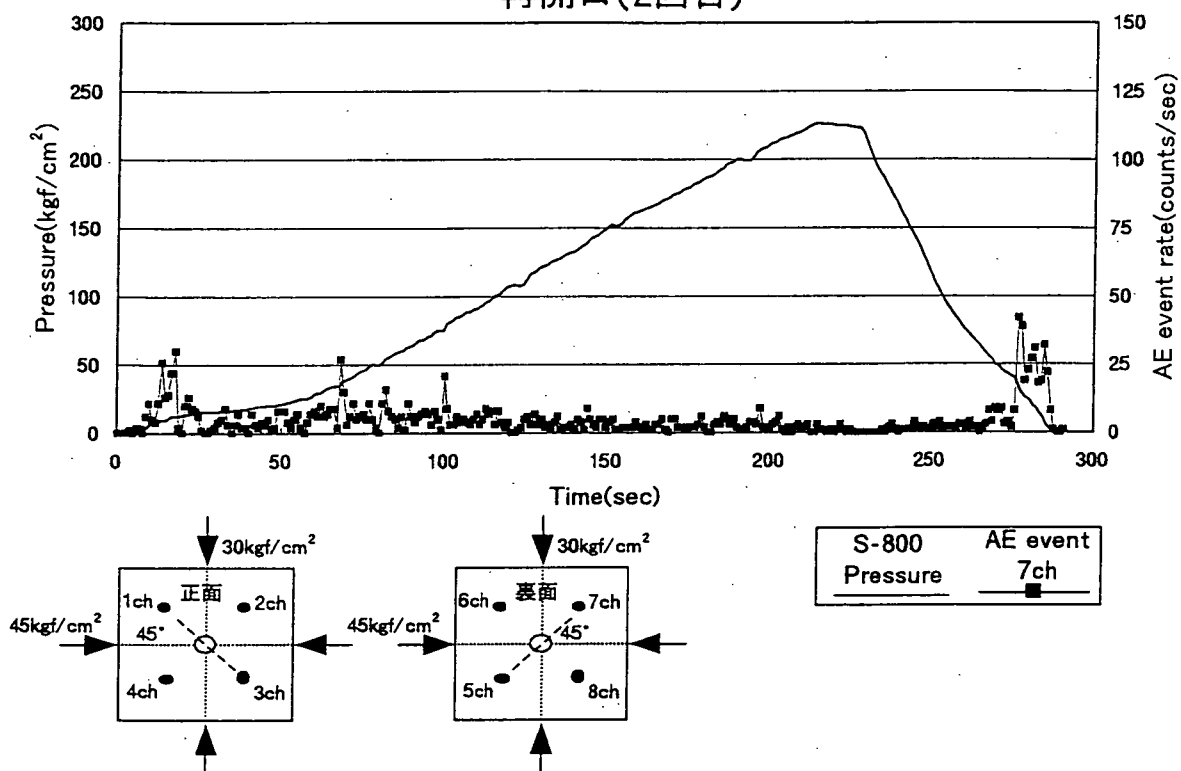


図4.6.43(c). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2回目)

227S8-2

45° 水平圧力75kgf/cm²、垂直圧力50kgf/cm²

再開口(1回目)

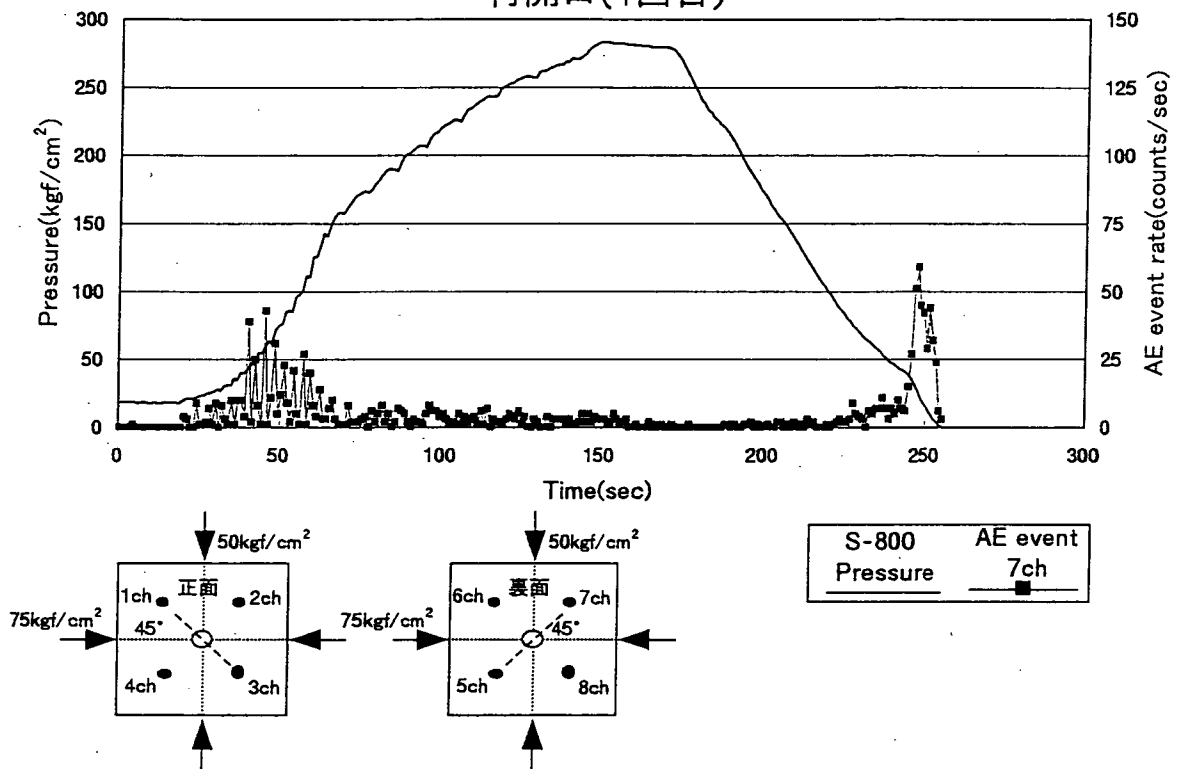


図4. 6. 44 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

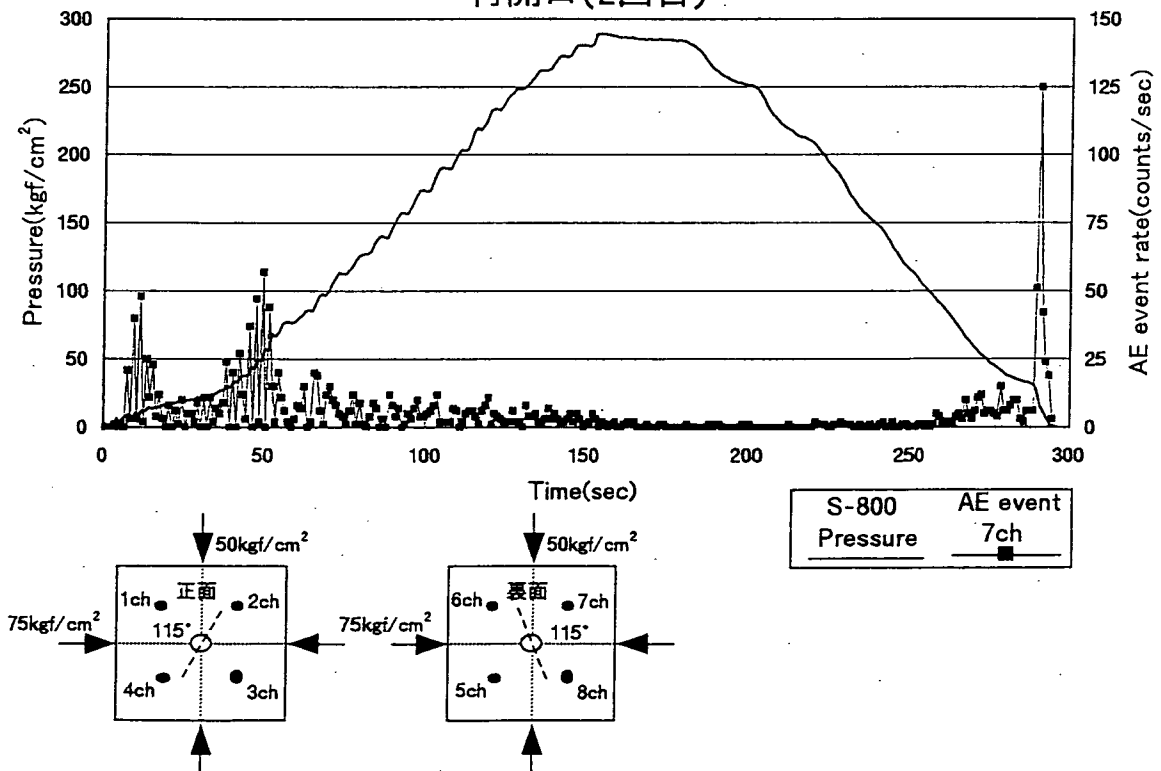


図4. 6. 44 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

228S8-1

45° 水平圧力105kgf/cm²、垂直圧力70kgf/cm²

再開口(1回目)

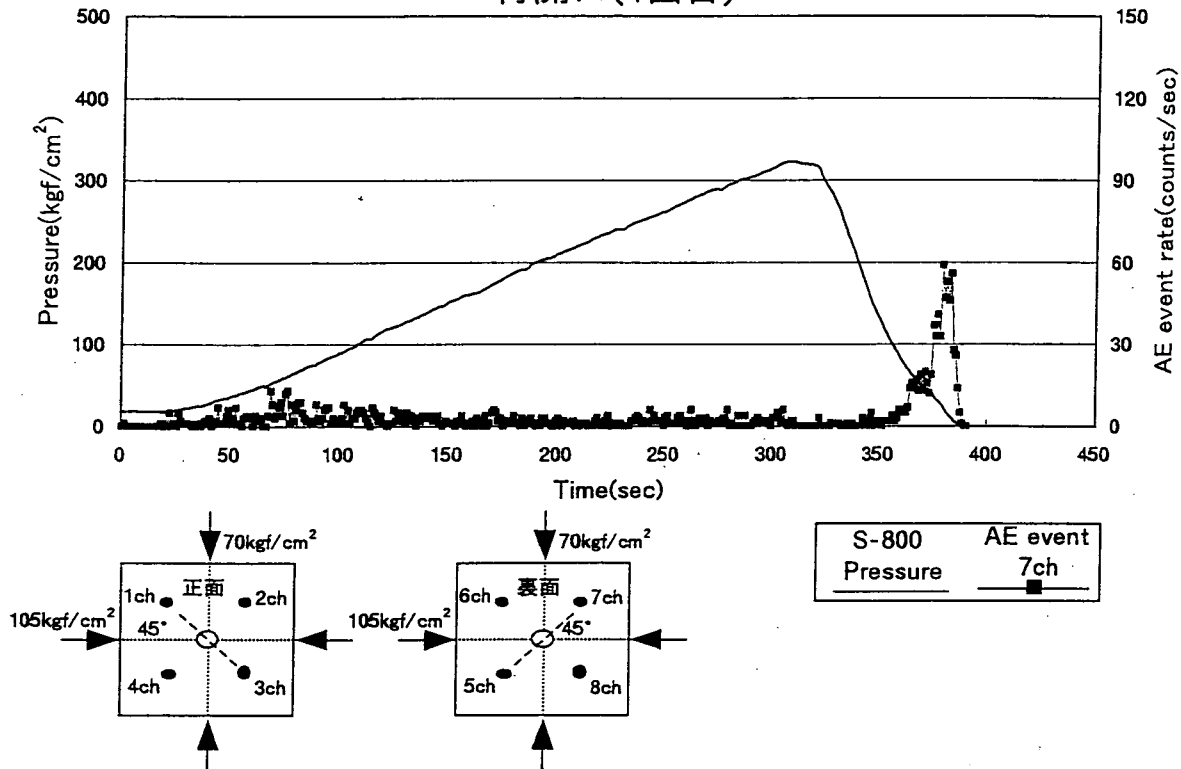


図4. 6. 45 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

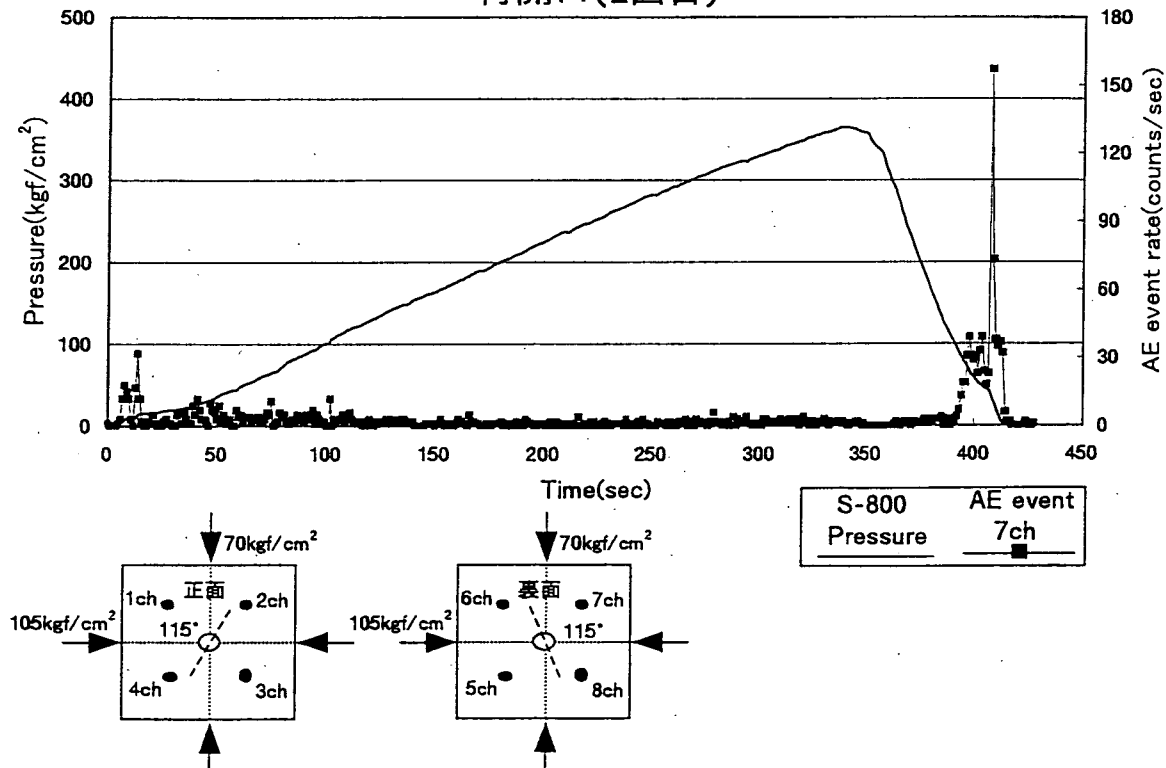


図4. 6. 45 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

229S8-1

45° 水平圧力135kgf/cm²、垂直圧力90kgf/cm²

再開口(1回目)

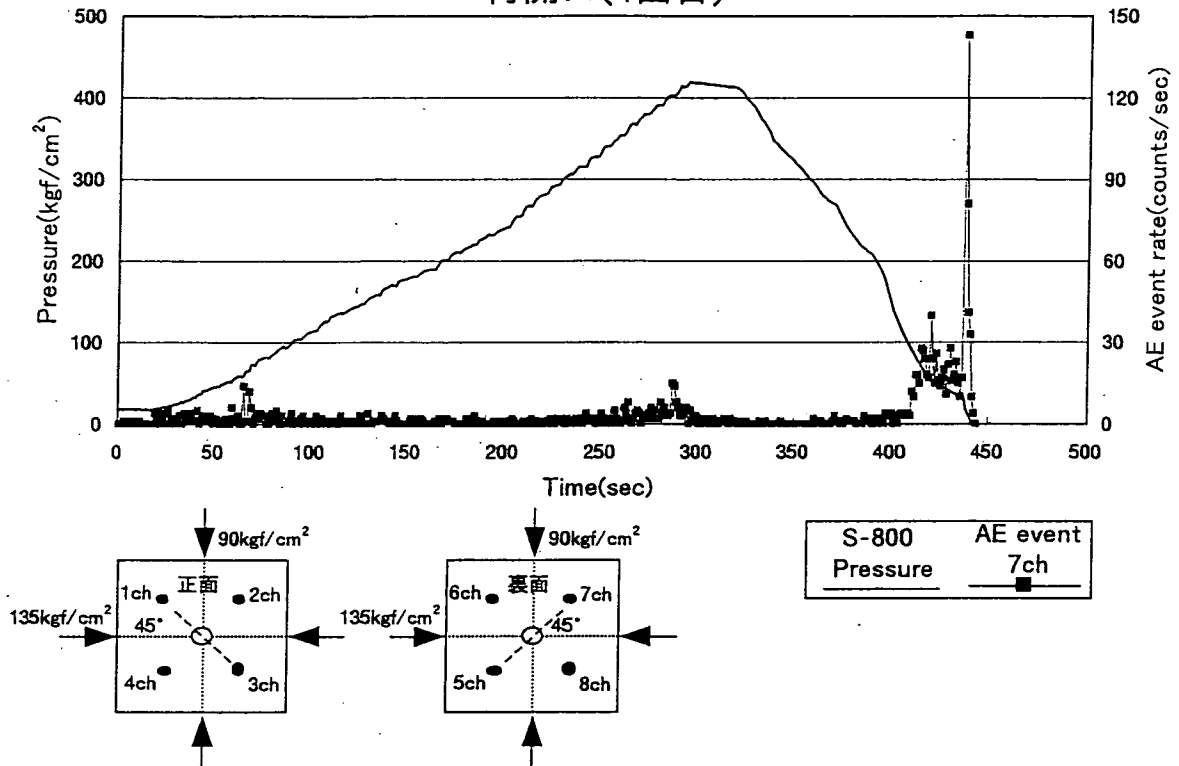


図4.6.46 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

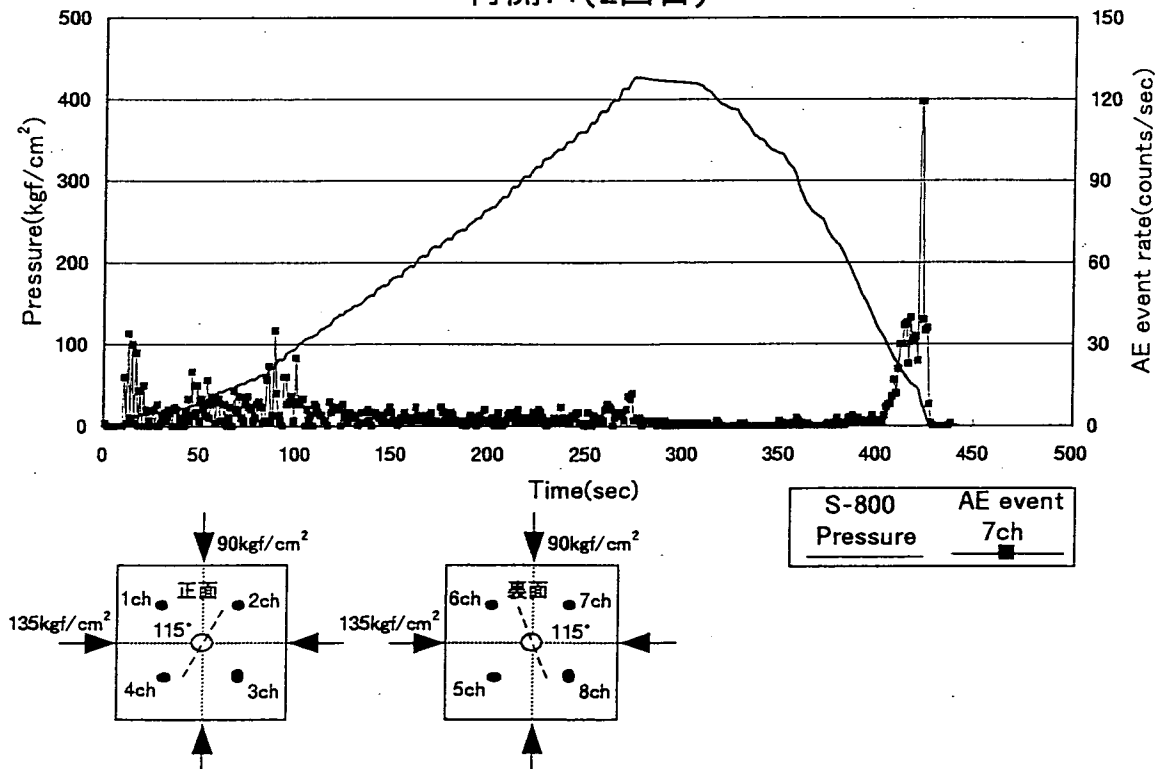


図4.6.46 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

225S8-1

45° 水平圧力150kgf/cm²、垂直圧力150kgf/cm²

再開口(1回目)

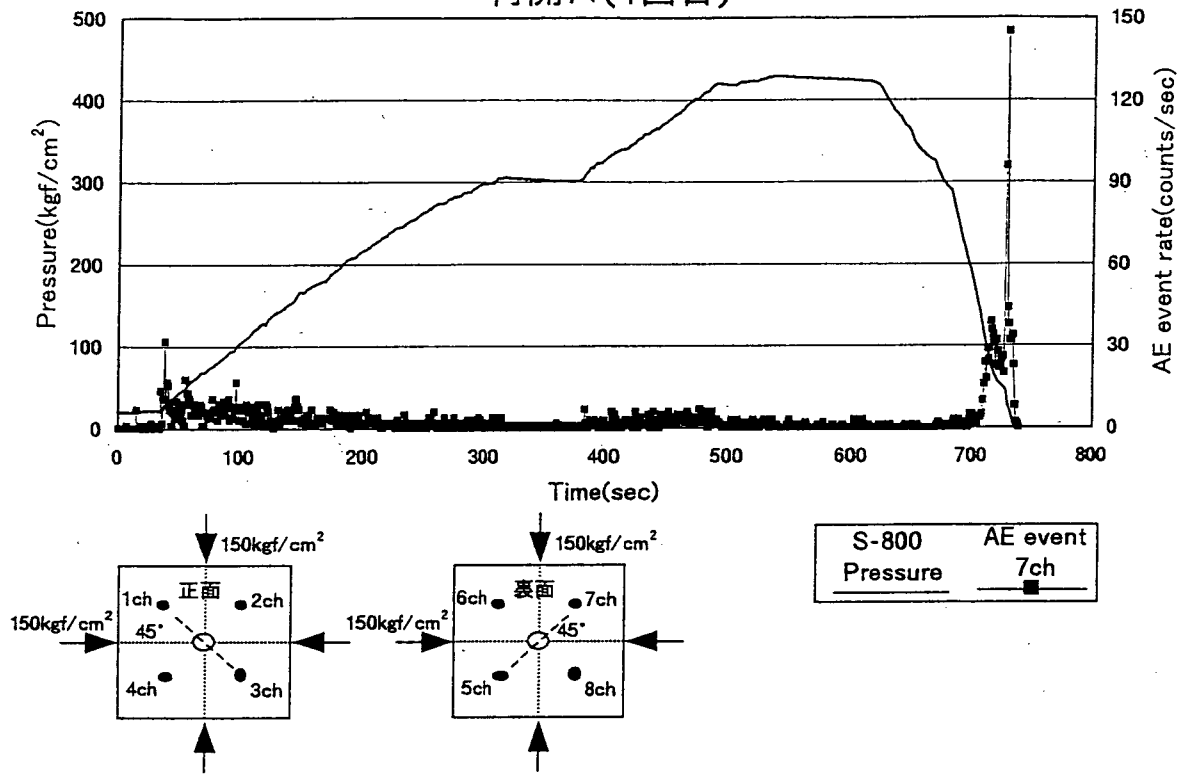


図4. 6. 47 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

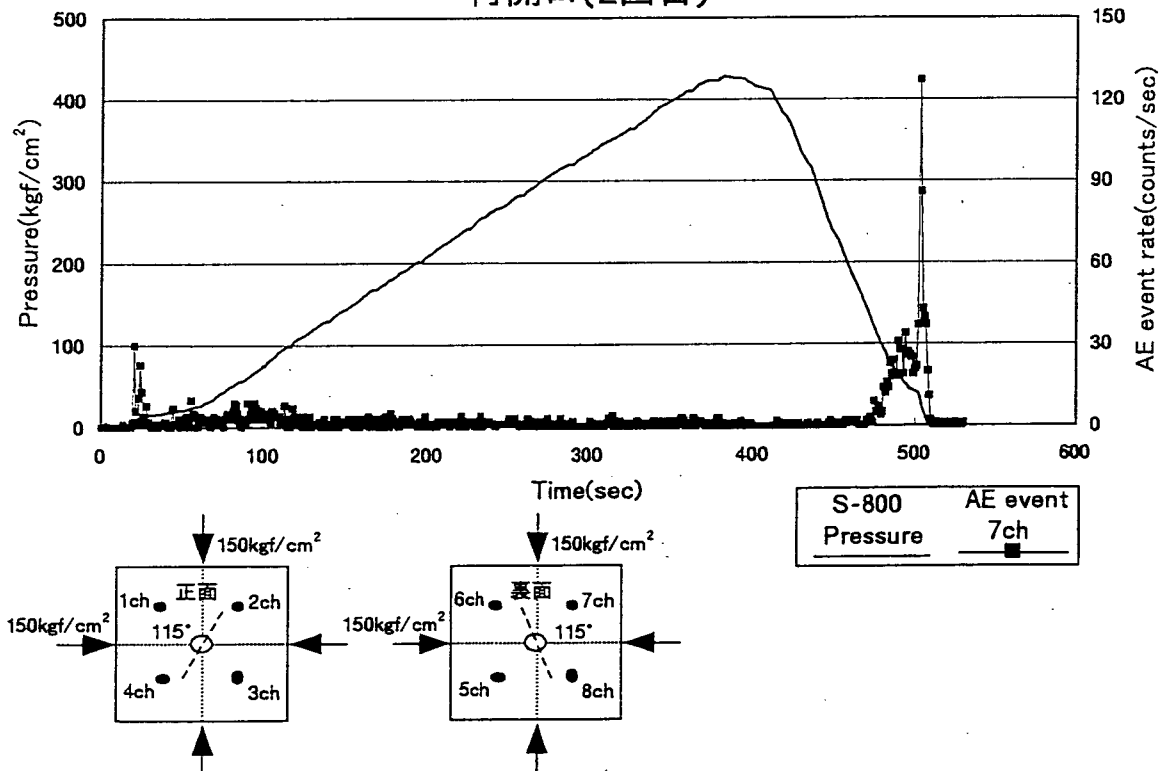


図4. 6. 47 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

224S8-2

45° 水平圧力120kgf/cm²、垂直圧力120kgf/cm²

再開口(1回目)

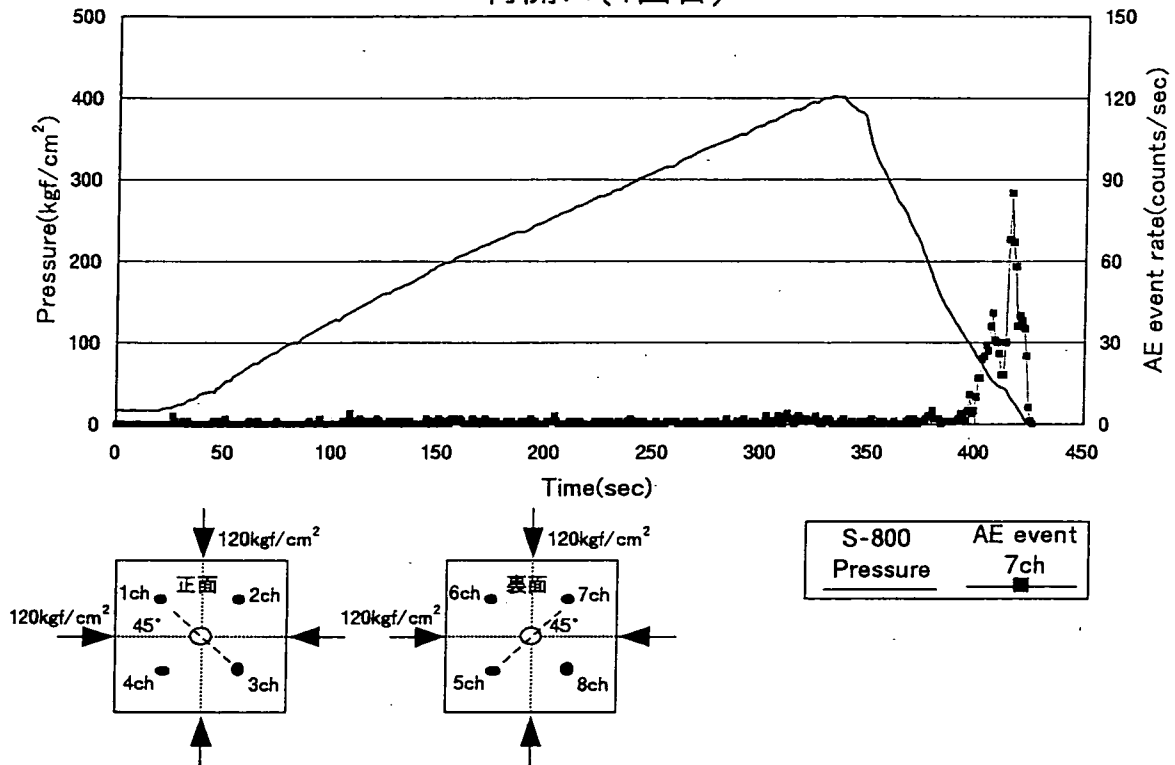


図4. 6. 48 (a). 載荷圧とAEの発生数との関係 (1 回目)

再開口(2回目)

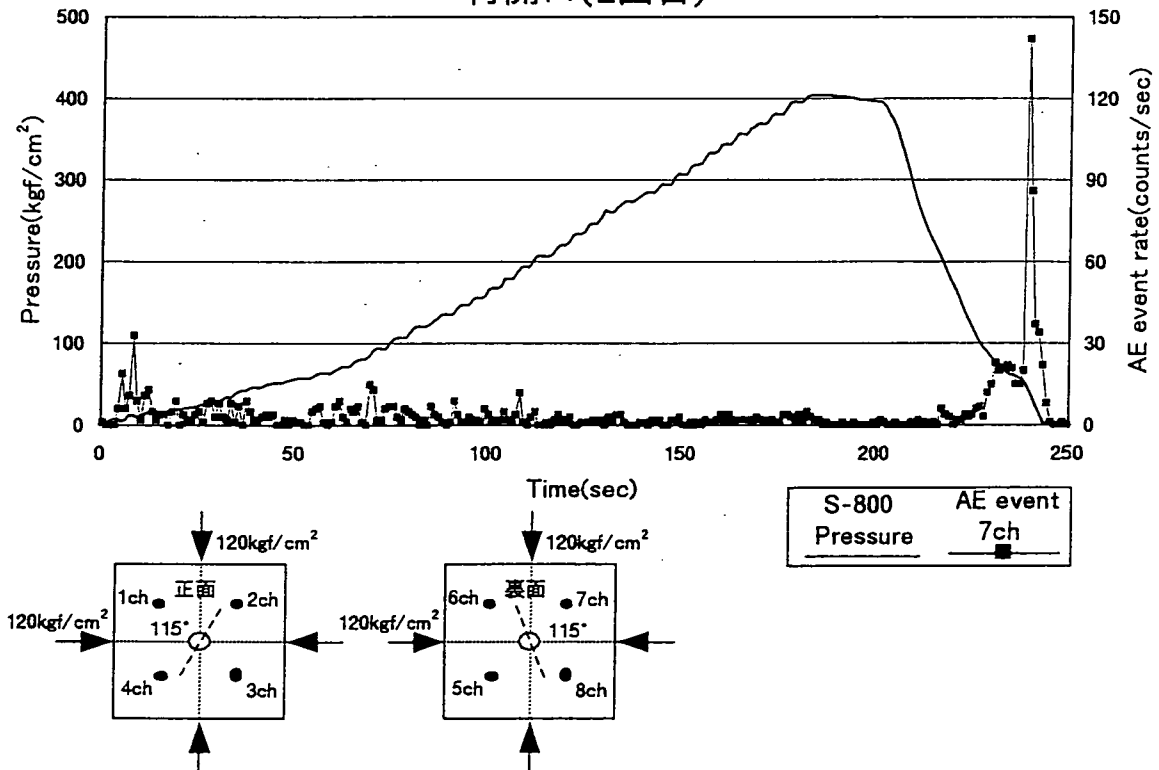


図4. 6. 48 (b). 載荷圧とAEの発生数との関係 (2 回目)

4.7. 室内破碎試験のシミュレーション

4.7.1. 载荷モデル

摩擦シェルと鋼管内壁の境界にせん断応力を負荷させたモデルを考える。ここで用いる解析モデルは図 4.7.1. に示す。この解析では、発生させた亀裂がモデル化されている。亀裂は通常の変位くい違い (DDM) 要素に分割される。有限要素法などの領域型の解析においては、鋼管内周境界より内側は空洞であるが、境界要素法においてはそこにも実質があり内周境界と接している DDM 要素の開口を抑えることになるので、空洞側にもダミーの DDM 要素が設けられている。なお、摩擦シェルと鋼管内壁の境界は仮想応力 (FSM) 要素としている。

摩擦シェルの外周境界の仮想応力要素は鋼管内载荷試験時に観測されたプレスケールの結果から得られた表面の凹凸の数に併せて 92 要素とした。また亀裂部分は摩擦シェル外周より内側の空洞部分の中心から摩擦シェル外周境界までを 26 のダミー要素に分割した。さらに、亀裂部分は 0.005m を 1 要素として亀裂の長さを調節しながら設定した。本来は、亀裂はその部分にあるが解析の場合は本来起こりうることの無い状態 (亀裂の上下の面が入れ替わる場合) が考えられるので、亀裂が開く瞬間までの長さを設定し繰り返し解析を行った。ここで、開く瞬間の値はダミー要素があり亀裂が無い状態での開口部の変位を読みそれを開く瞬間の値とした。

また、拘束圧を等圧と偏圧の 2 通りに変化させた。その比は、最大主応力 : 最小主応力 = 1 : 1 と 1 : 0 である。さらに、等圧の場合はせん断力を負荷させていない場合についても解析した (2 面破碎法に相当する)。ここで示す変位は開口部から $\pi/2$ の摩擦シェル外周における変位であり、

$$u_r(r=a, \theta=\frac{\pi}{2}) - u_r(r=a, \theta=-\frac{\pi}{2})$$

で表される。その他の境界条件は以下に示す。

- FSM要素数 : 92
- 载荷を行う要素数 : 92
- ポアソン比 : 0.25、 ヤング率 : 255000 MPa、 密度 : 2500 kg/m³
- 鋼管の内径 (=摩擦シェル内径) : 0.065 m
- $\lambda = L/a$ L : 亀裂の長さ m、 a : 摩擦シェル内径 m

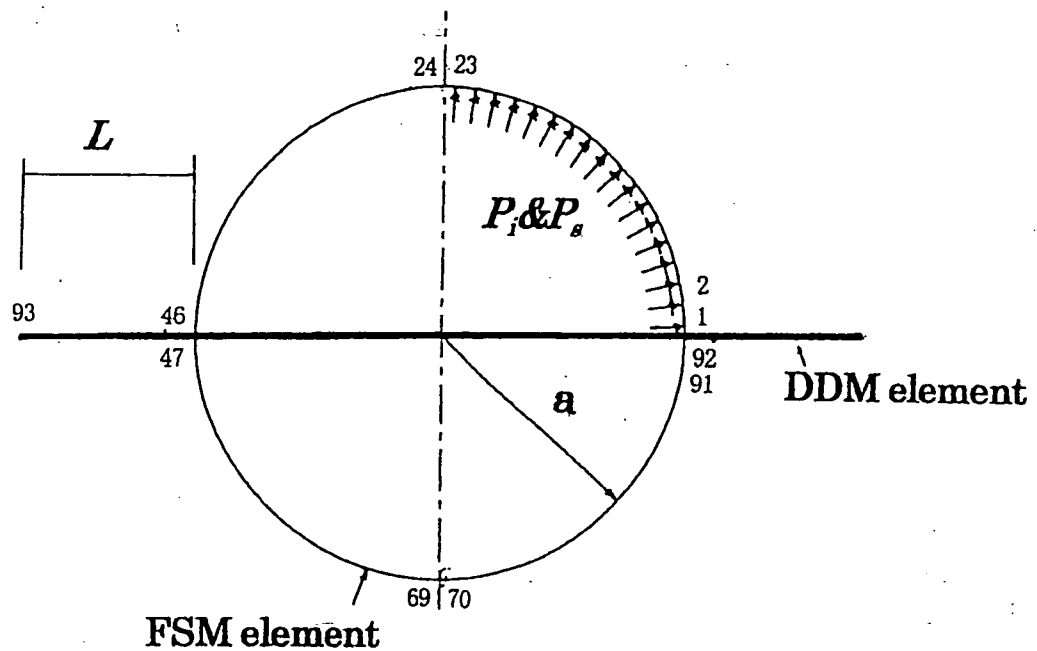


図 4.7.1. 解析モデル

4.7.2. 解析結果

図 4.7.2. には乾式一面破碎法による再開口試験において拘束圧を等圧にした場合、図 4.7.3. には拘束圧を偏圧にした場合の圧力-時間曲線を示す。また図 4.7.4. には摩擦シェルの外周境界にせん断力を負荷させていない場合（乾式二面破碎法）の圧力-時間曲線を示す。最後に図 4.7.5. に乾式一面破碎法と乾式二面破碎法の圧力-変位曲線の解析結果を縦軸、横軸とも無次元化して示す。これらの図に示す変位は亀裂に直交する方向の変位である。

図 4.7.2. ～4.7.4. を見ると、載荷圧を増加させると亀裂が開口し、亀裂が開口した後は圧力-変位曲線の傾きが変わっており、傾きの変わる折れ点はほぼ理論値通りとなっていることが分かる。

図 4.7.5. の一面破碎法と二面破碎法による結果を比較すると、亀裂が発生するまでの傾きはほぼ同じであるが、亀裂が伸展している過程では、一面破碎法の傾きの方が緩やかである。つまり、傾きの変化が大きい一面破碎法の方が折れ点を検出し易いと言える。

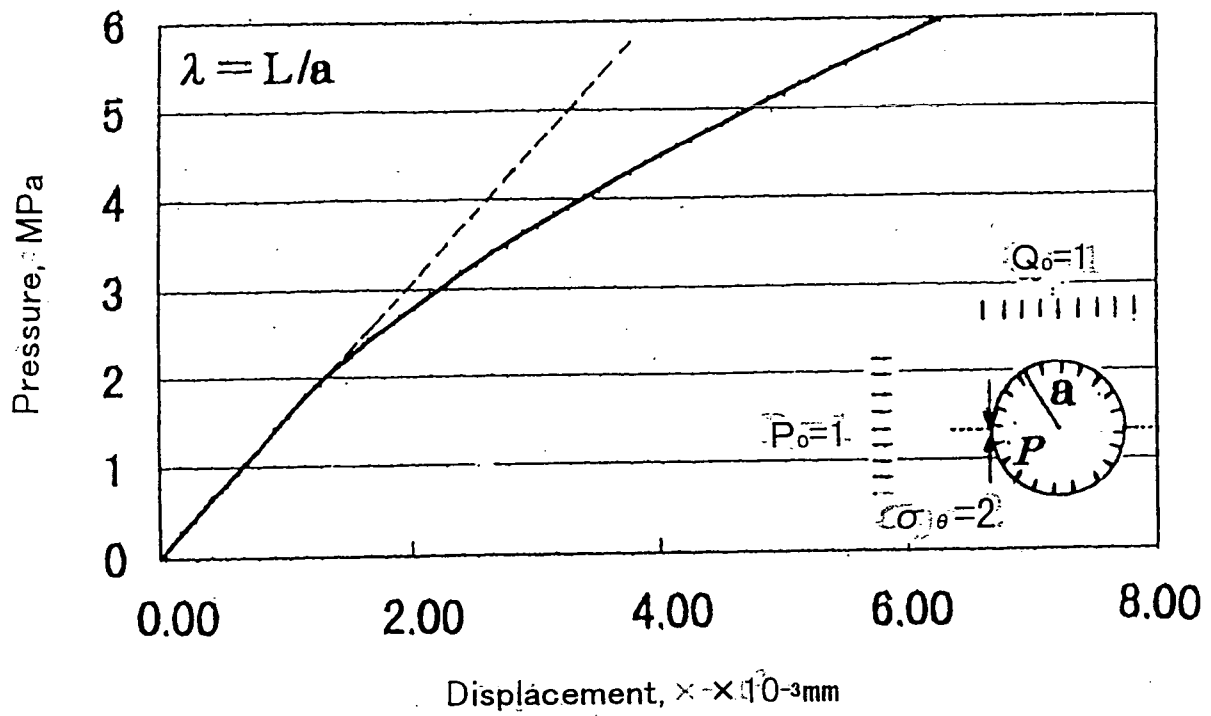


図4.7.2. 圧力-変位曲線（乾式一面破碎において拘束圧を等圧にした場合）

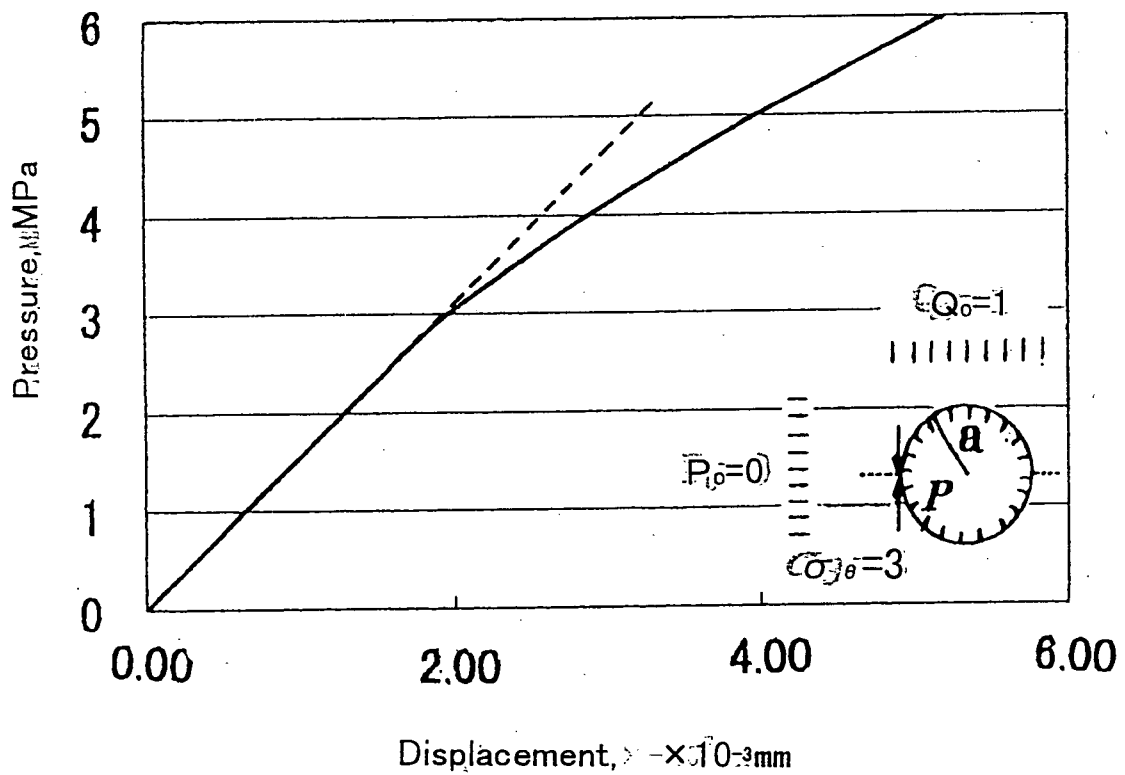


図4.7.3. 圧力-変位曲線（乾式一面破碎において拘束圧を偏圧にした場合）

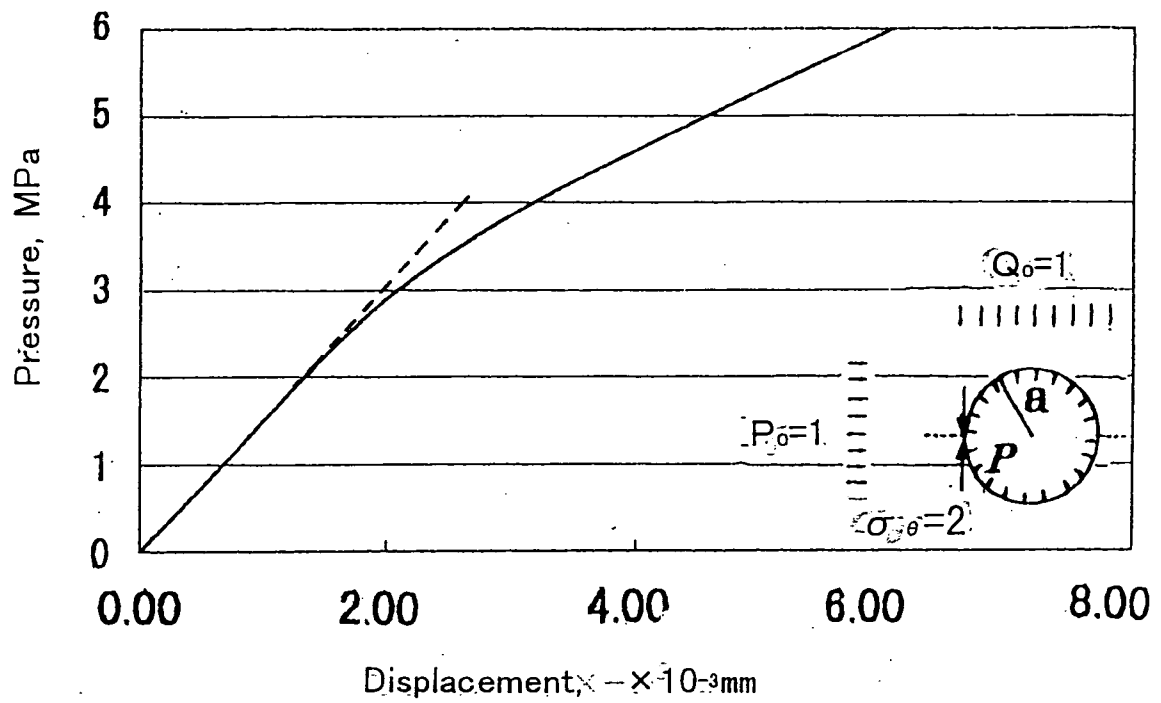


図4.7.4. 圧力-変位曲線（乾式二面破碎において拘束圧を等圧にした場合）

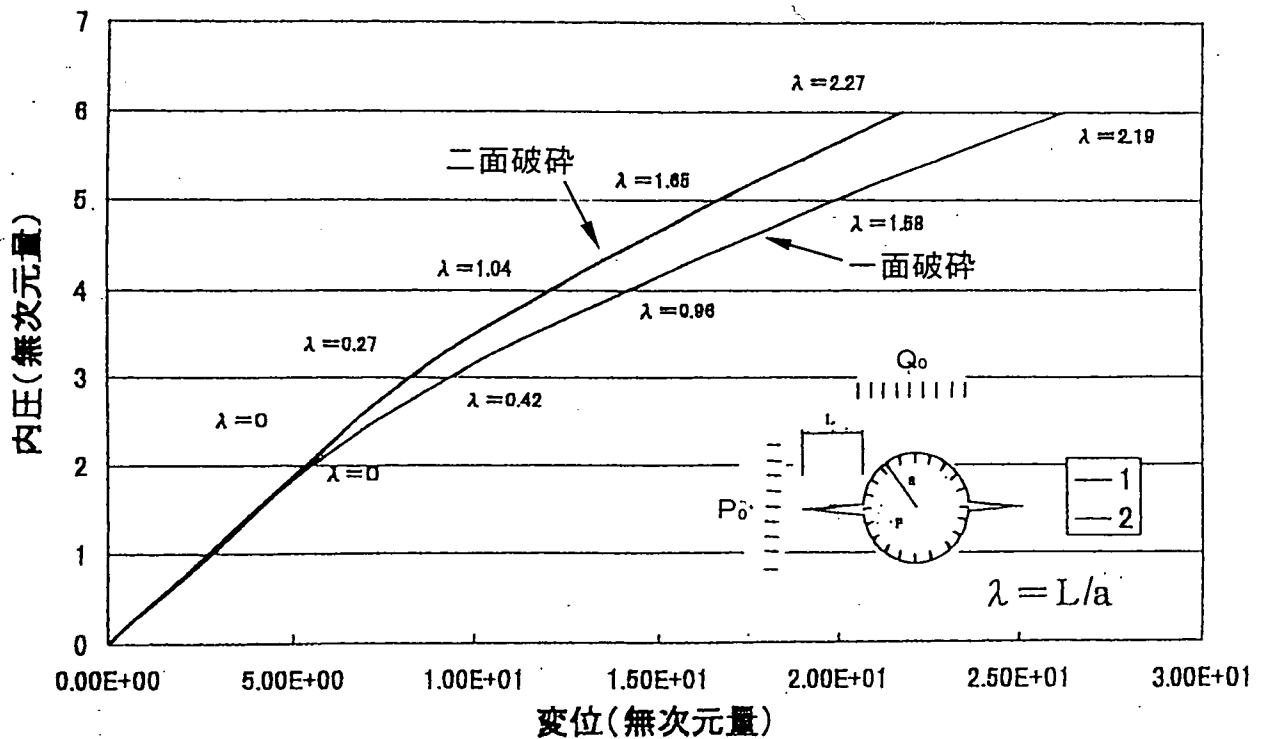


図4.7.5. 圧力-変位曲線の比較（乾式一面破碎と乾式二面破碎）

4.8. 拘束圧力と角度の算定

最後に同じ拘束条件下の3本の亀裂に対して行った載荷試験結果の圧力-変位曲線から得られた折れ点圧力を基に、式(8)を用いて拘束圧の逆算を行い、実際の拘束圧および偏圧載荷時の角度を比較した。

式(8)を目的関数 ϕ を用いて次の様書き直す。

$$\phi = (P_r)_{theo i} - (3Q - P) + 4(P - Q)\sin^2(\theta' - \alpha_i)$$

ここで、測定値： $(P_r)_{theo i}$, α_i ($i=1, 2, 3$)

未知量： P , Q , θ'

ただし、 $(P_r)_{theo i}$ は実測値 P_r から図 4.5.72 の図中に示された実測値と理論値との相関式から算出した値である。

この目的関数 ϕ を最小にする P 、 Q 、 θ をシンプレックス法により求めた。その結果は表 4.8.1.に示す。表 4.8.1.の拘束圧の結果は、拘束圧が小さいときに誤差がやや大きくなることはあるものの、概ね 10%以内となっている。偏圧に載荷したときの主応力方向の角度の結果は、1つのケースを除き、他は全て $\pm 10^\circ$ 以内であった。

以上から、本試験で用いた地殻応力測定装置 S-800 は、応力値、主応力の角度を共に精度良く測定することができるものと思われる。

表4.8.1(a). 計算結果一覽

供試体 番号	計算 番号	C h	P (kgf/cm ²)	Q (kgf/cm ²)	破砕面角度(°)			計算結果				
					25	135	60	P'		Q'		θ'
					(P r) theo, kgf/cm ²			値(kgf/cm ²)	誤差(%)	値(kgf/cm ²)	誤差(%)	値(誤差(°))
1	1-1	1	30	30	60	60	60	36	21	30	1	
		2						42	39	35	15	
	1-2	1	60	60	120	120	120	58	4	57	5	
		2						55	9	48	20	
	1-3	1	90	90	180	180	180	87	3	85	5	
		2						99	10	91	1	
	1-4	1	120	120	240	240	240	119	1	115	4	
		2						125	4	112	7	
	1-5	1	45	30	56	75	90	53	18	31	4	-4
		2						49	8	28	7	-4
	1-6	1	75	50	93	125	150	83	10	42	17	-6
		2						81	8	50	0	5
	1-7	1	105	70	130	175	210	102	3	64	9	-8
		2						99	5	75	7	2
	1-8	1	135	90	167	225	270	126	6	81	9	-3
		2						128	5	89	1	4

表4.8.1(b). 計算結果一覽

供試体 番号	計算 番号	C h	P (kgf/cm ²)	Q (kgf/cm ²)	破碎面角度(°)			計算結果				
					25	135	60	P'		Q'		θ'
					(P r) theo, kgf/cm ²			値(kgf/cm ²)	誤差(%)	値(kgf/cm ²)	誤差(%)	値(誤差(°))
2	2-1	1	30	30	60	60	60	34	14	17	42	
		2						27	11	26	12	
	2-2	1	60	60	120	120	120	67	11	51	14	
		2						55	8	49	18	
	2-3	1	90	90	180	180	180	94	4	90	0	
		2						106	18	92	3	
	2-4	1	120	120	240	240	240	127	6	115	4	
		2						132	10	126	5	
	2-5	1	150	150	300	300	300	151	1	145	3	
		2						160	7	158	5	
	2-6	1	45	30	94	75	60	48	7	41	37	6
		2						40	10	28	7	-1
	2-7	1	75	50	157	125	100	75	0	59	19	-14
		2						75	0	37	26	-4
	2-8	1	105	70	220	175	140	109	3	71	2	-5
		2						111	6	61	13	1
	2-9	1	135	90	283	225	180	145	7	106	18	-4
		2						134	1	97	7	-2

5. 結論

本試験ではまず、载荷によって鋼管内壁に加わる応力状態を調べる目的で実施した昨年度の鋼管内载荷試験結果とシミュレーション結果を補うために、ひずみゲージを昨年度よりも多く貼付した鋼管内の载荷試験を行った。その後、供試体を用いた室内試験では、2種類の供試体を用い、き裂再開口時の圧力-変位曲線の再現性の確認、実験から得られる圧力-変位曲線によって求められた折れ点と、Kirsch の式から得られる亀裂開口圧力との関係（とくに理論値が 150kgf/cm^2 以上になる場合）を明らかにするため、主応力比を一定に保ちながら拘束圧を色々と変化させて载荷試験を行った。また亀裂は3方向に発生させた。このとき、AE も同時に計測し、AE による亀裂開口圧力の検出の可能性について検討した。以上の結果、ここでは以下のことが分かった。

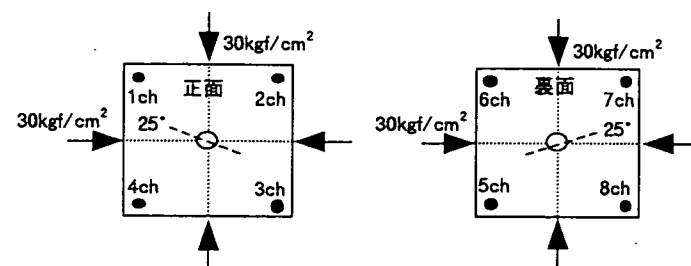
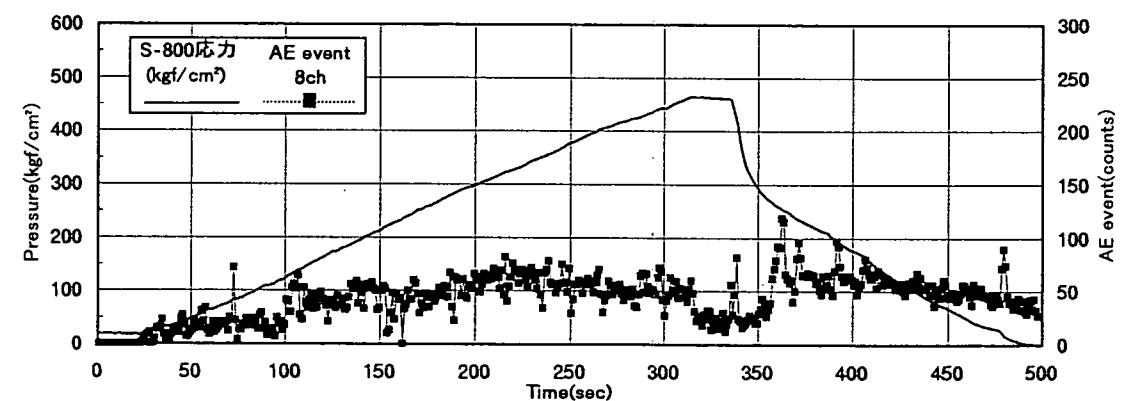
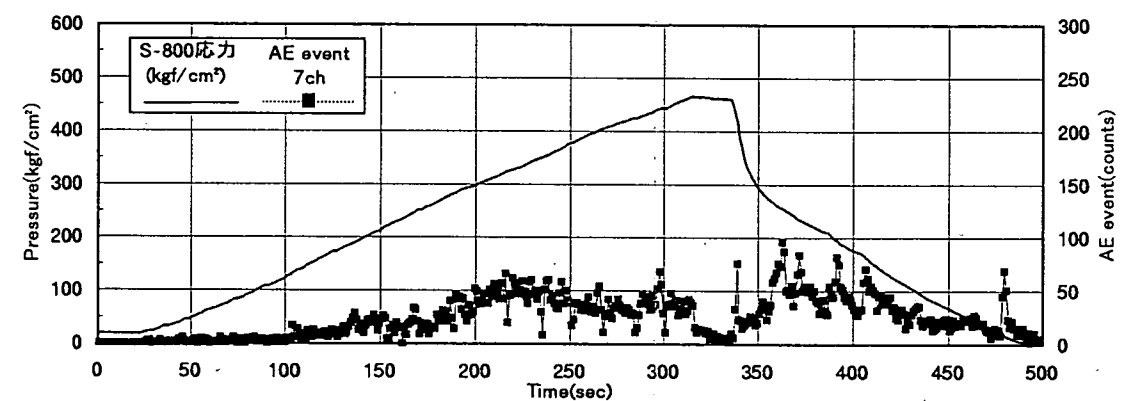
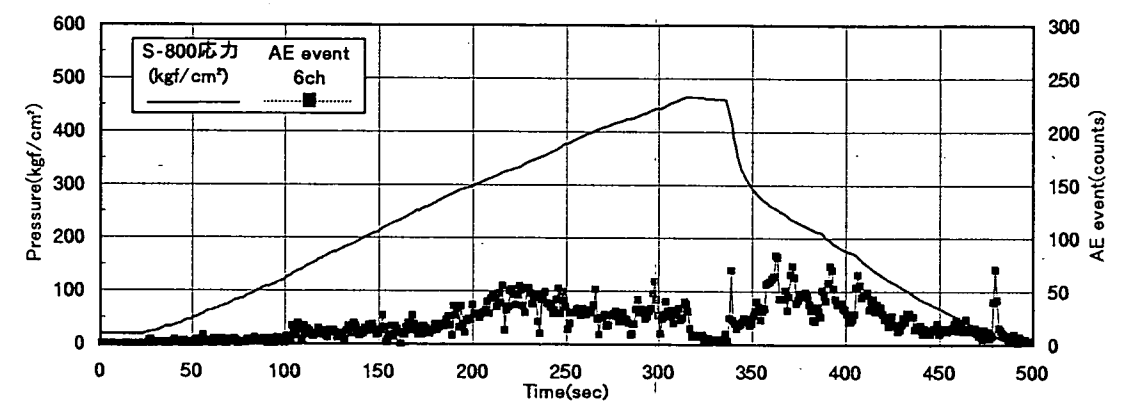
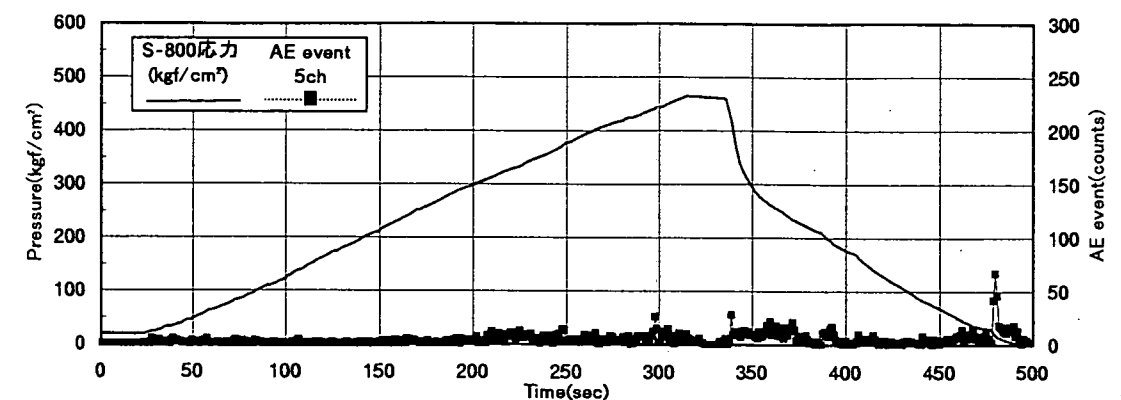
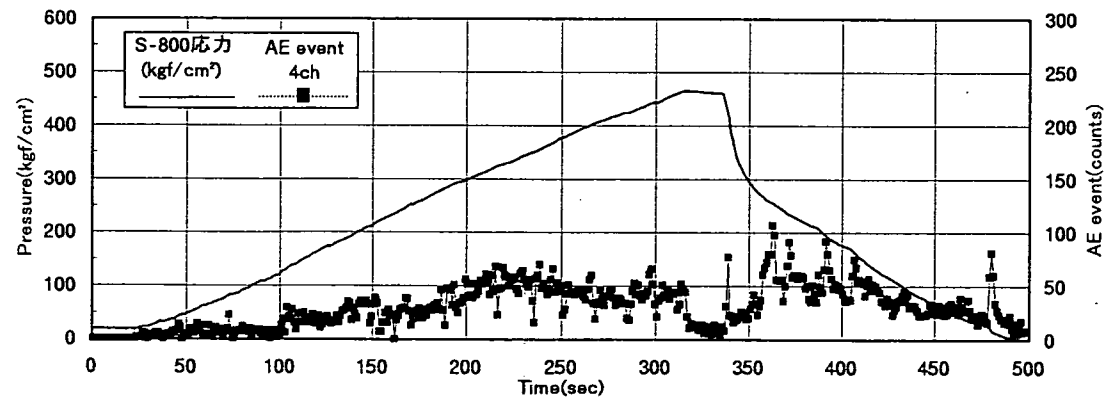
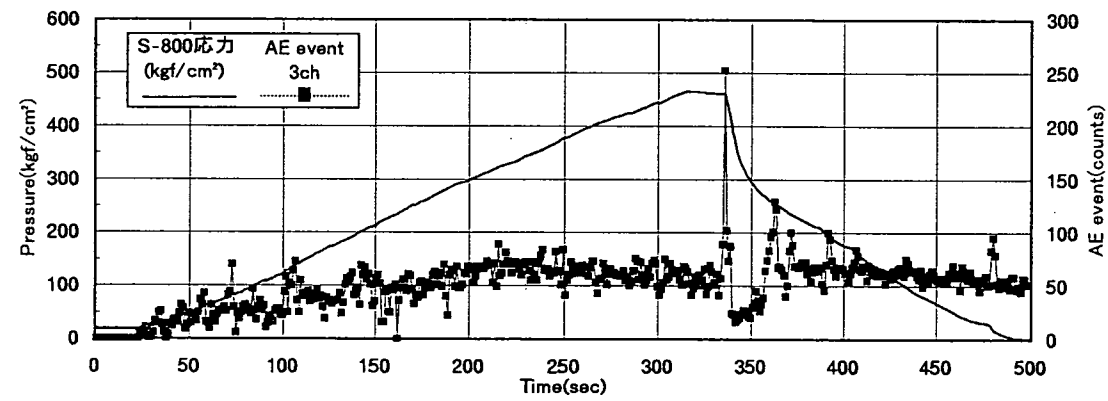
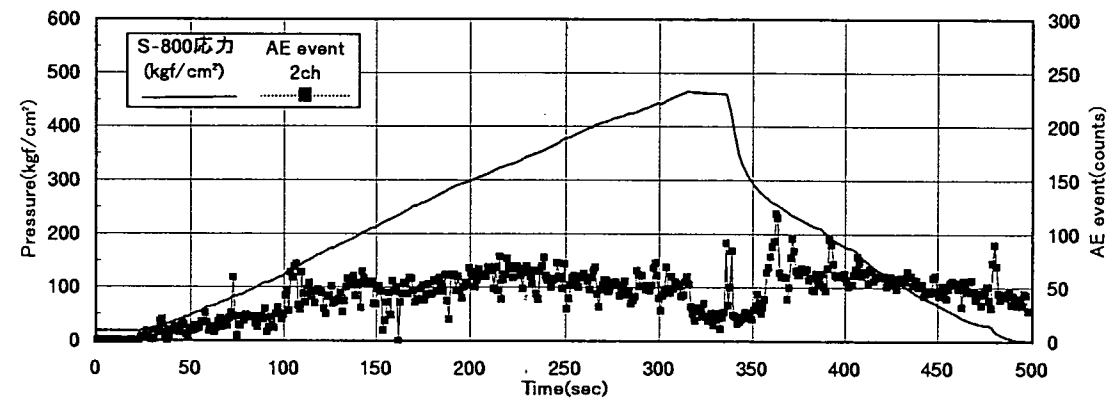
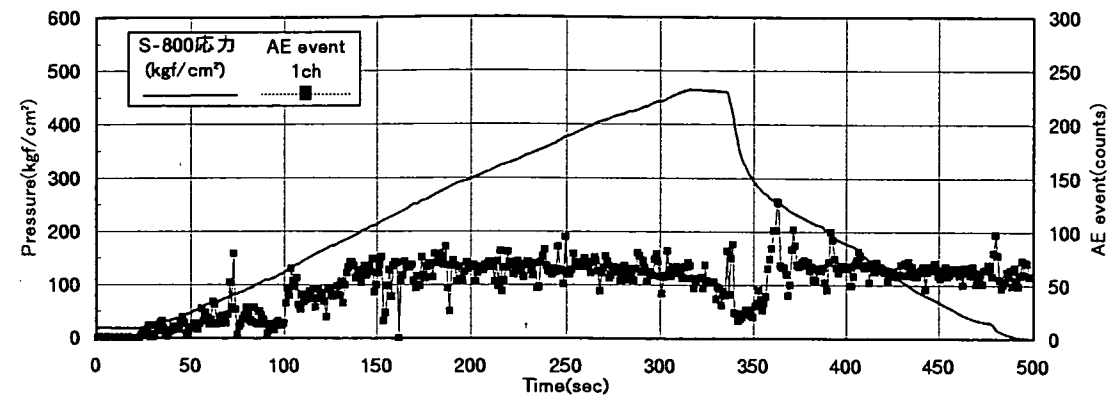
- (1) 昨年度行った鋼管内の载荷試験は、計測したひずみの実測値が少なく、実測値とシミュレーション結果との比較が曖昧であったが、本試験で得られた結果は昨年度の結果を補うことができ、試験結果はシミュレーションの結果と一致した（図 3.3.3.）。
- (2) 本年度のプロブの改良により、安定した再開口圧力を得ることができるようになったため、各拘束圧条件下で3回程度の繰り返し载荷を行う必要性はなくなった（図 4.5.1、図 4.5.2.）。
- (3) 試験時に計測した圧力-変位曲線の再開口圧力と、理論式から求めた再開口圧力との相関は、昨年理論値が 150kgf/cm^2 以上の場合に判断できなかったが、本試験では理論値の低圧部から高圧部まで、一定の関係を持つことが分かった（図 4.5.72.）。
- (4) 各供試体の拘束条件下で得られた折れ点圧力の実測値を用いて、拘束圧力と亀裂と主応力方向との角度を逆算した結果、プロブによる実測値と試験の設定値はほぼ一致した（表 4.5.2.）。
- (5) 载荷試験時に計測した AE は、試験時の設定をいくつか変化させることによって圧力の昇降時に亀裂の挙動をとらえているものと思われたが、亀裂発生、亀裂開口および再開口時の AE 特性をとらえるまでにはさらに詳細な計測条件の設定、波形の解析が必要である。

以上のことから、室内の供試体を用いる試験においては、この S-800 プロブが岩盤応力とその主応力方向を測定するために十分有効な装置であるということが判明した。今後は乾式破碎応力測定装置の利点を活かし、水圧破碎等では困難な活断層周辺岩盤等の現場で応力測定を行うべきである。

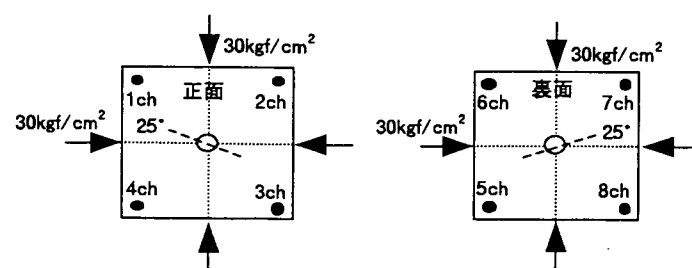
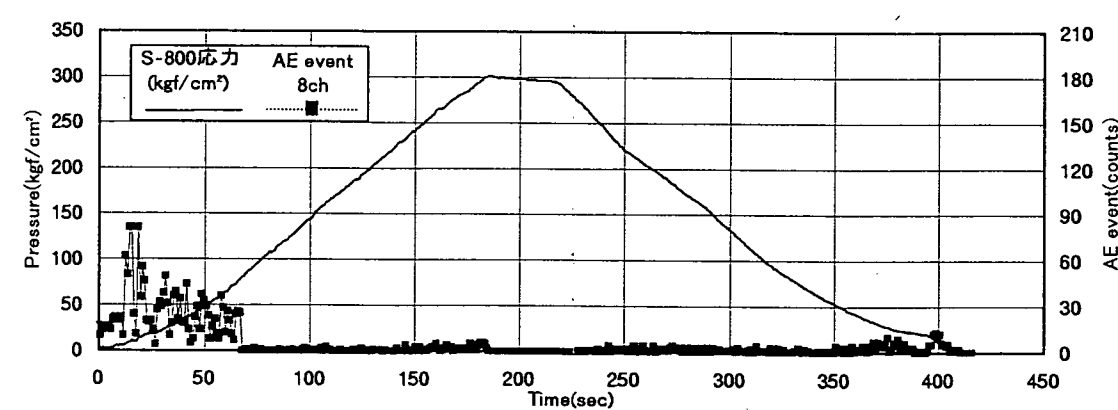
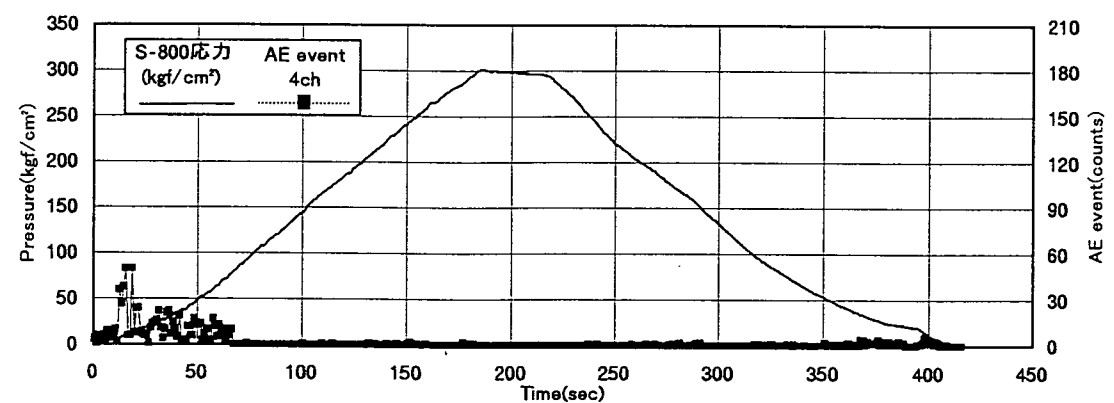
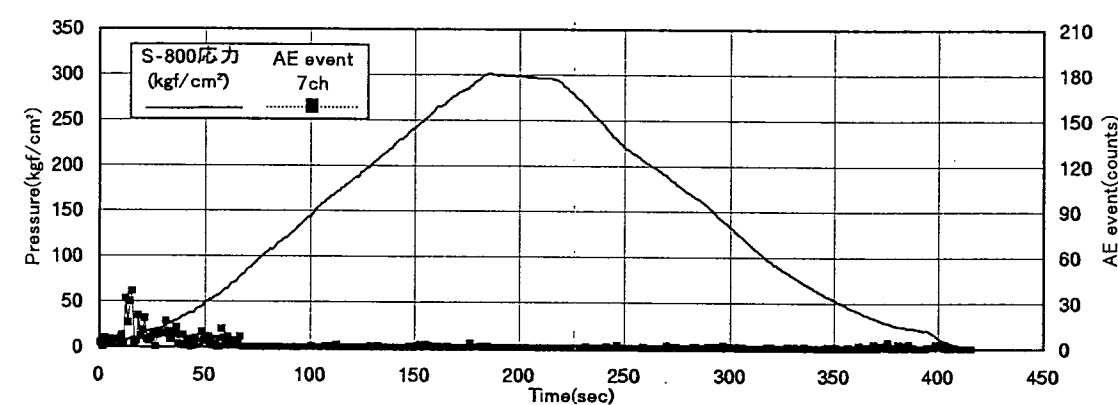
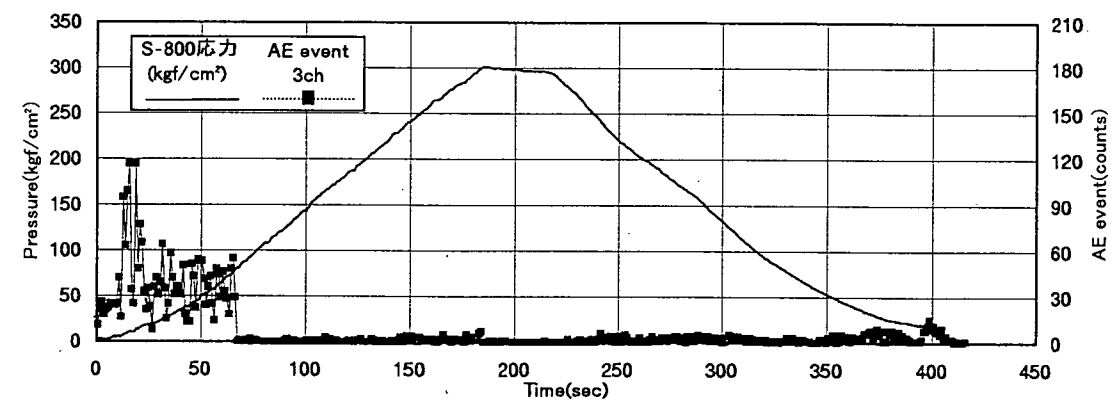
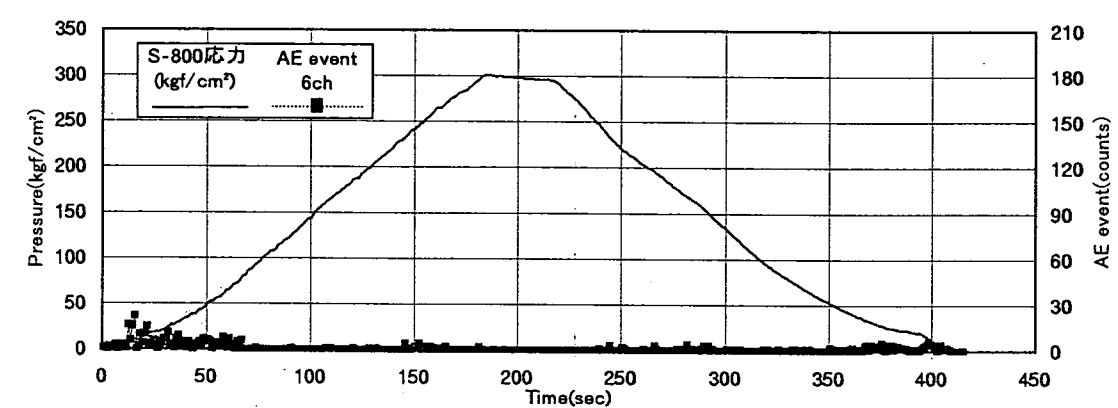
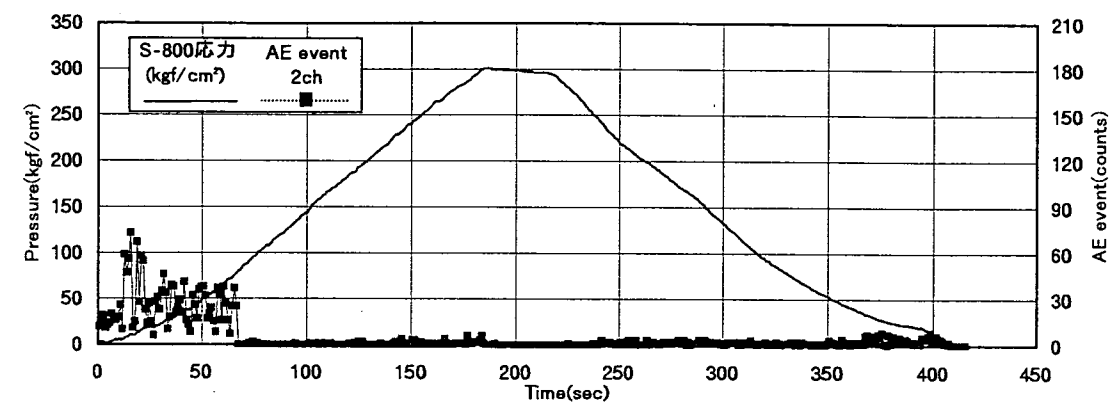
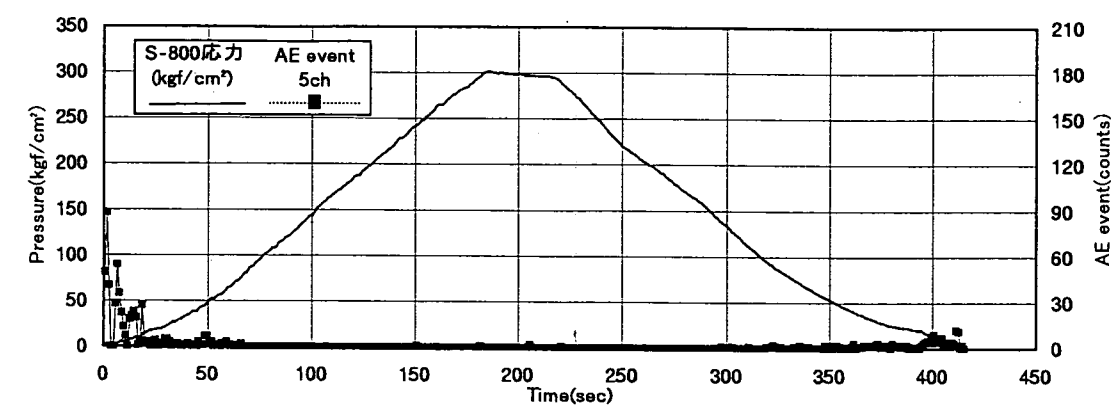
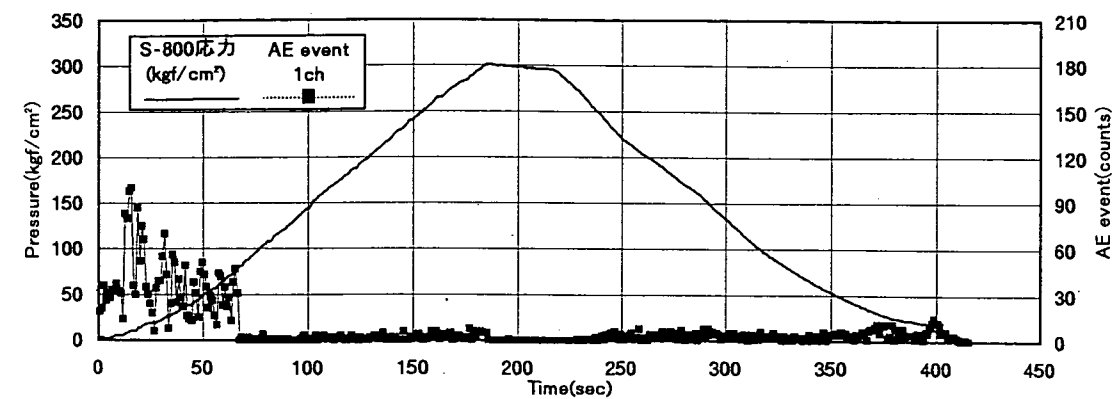
併せて測定精度を上げるために、より詳細なモデル解析と AE による亀裂開口圧力の検出についても詳細な検討を加える必要がある。

< 卷末資料1 >

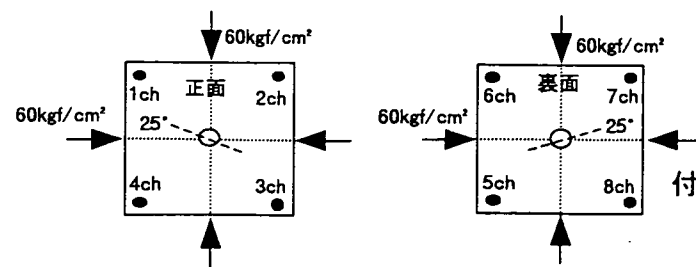
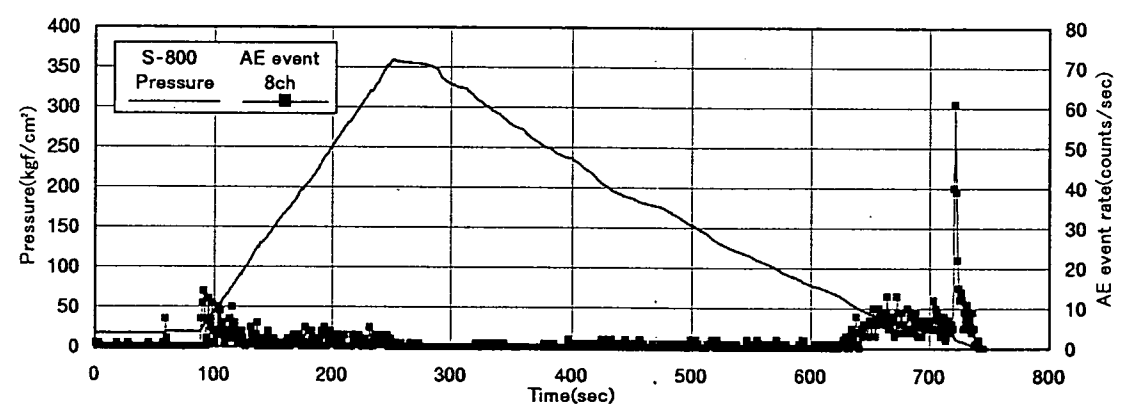
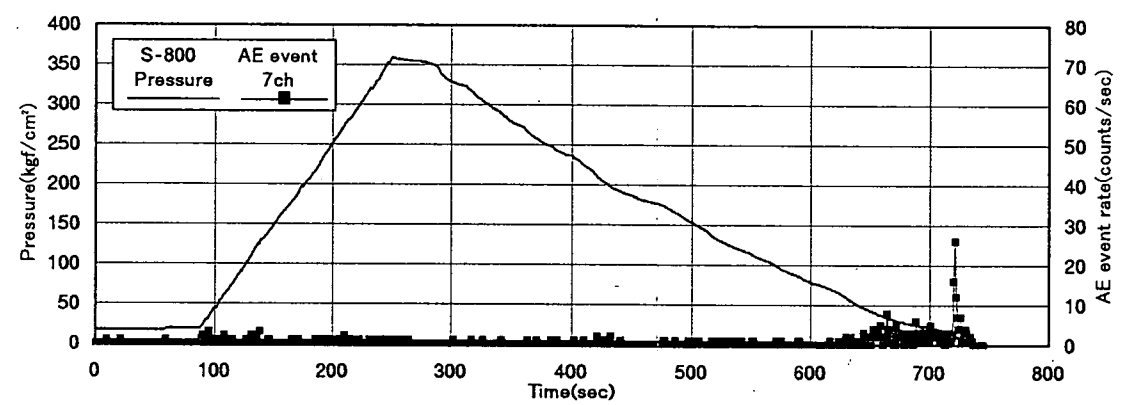
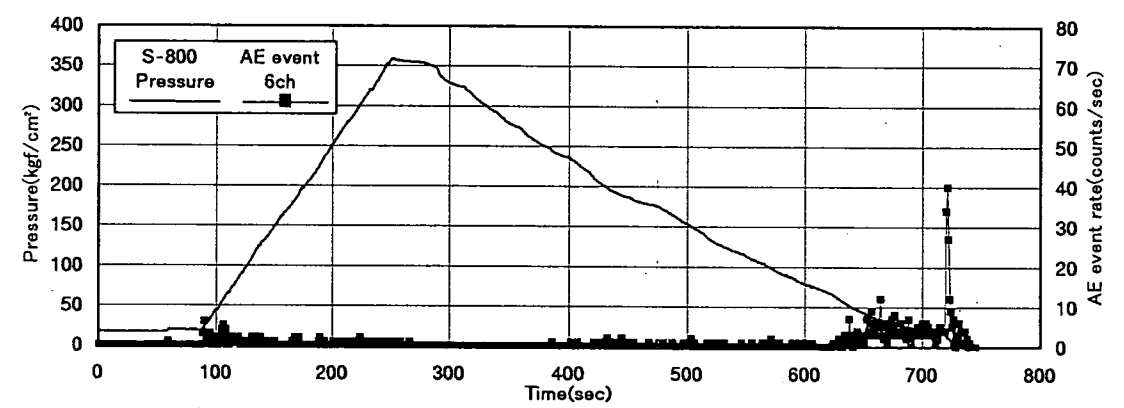
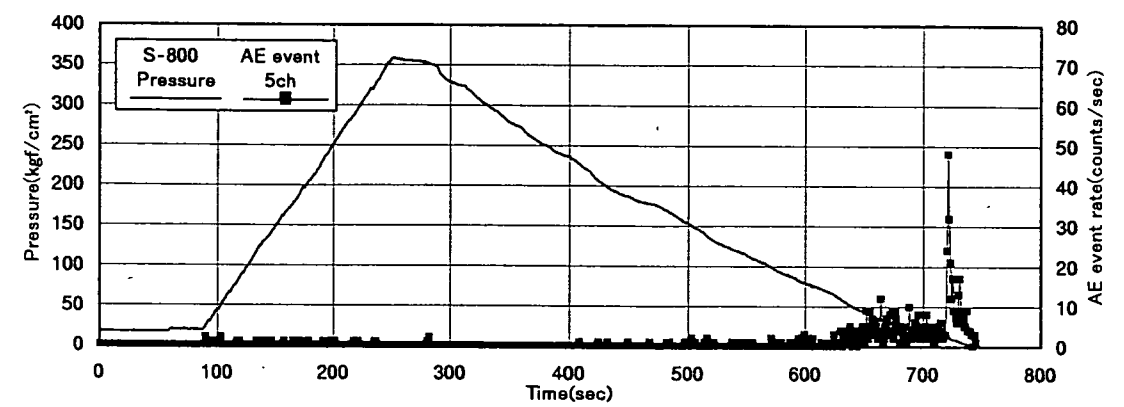
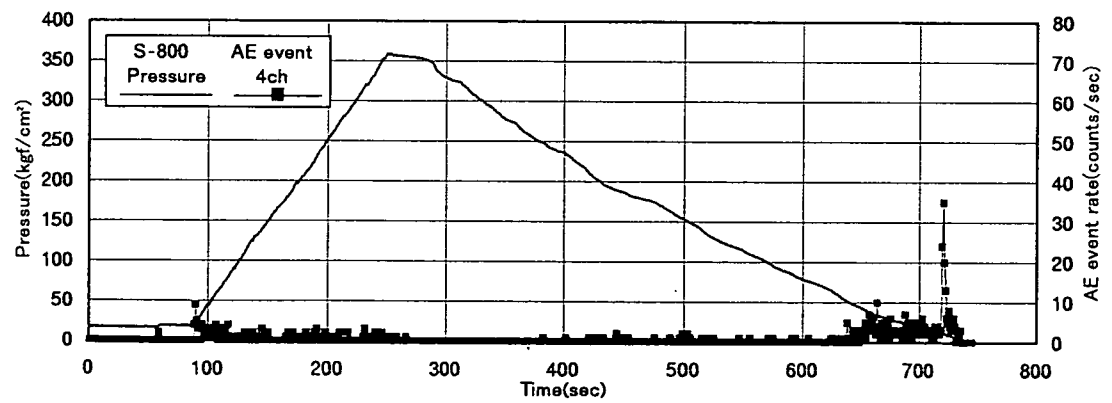
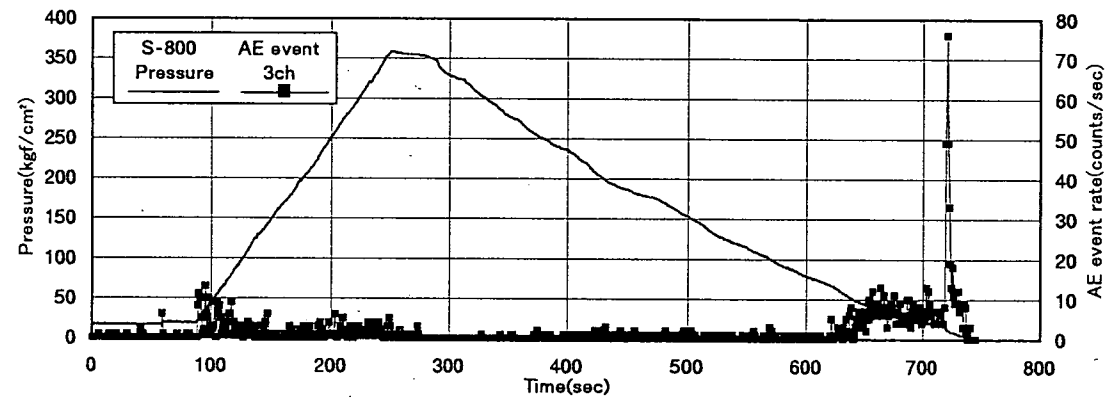
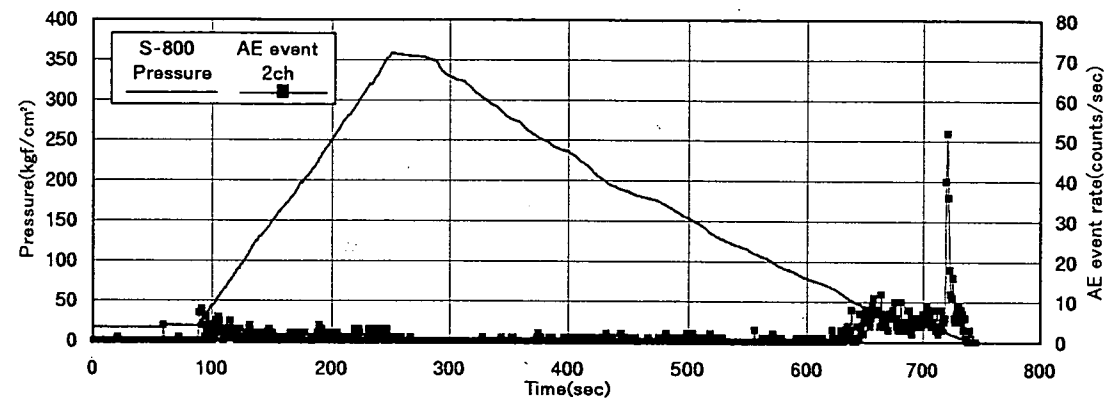
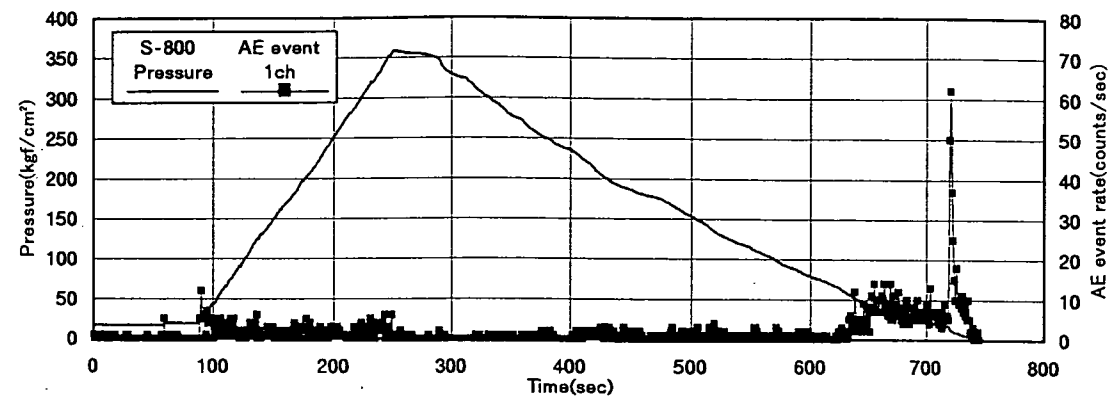
付図1～45



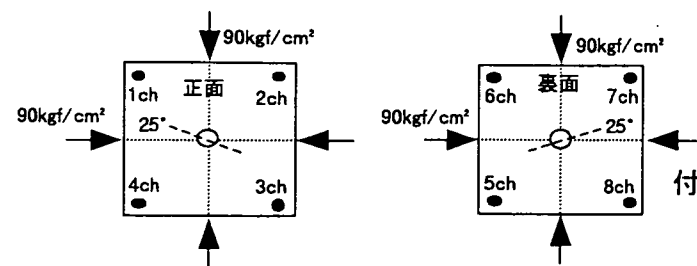
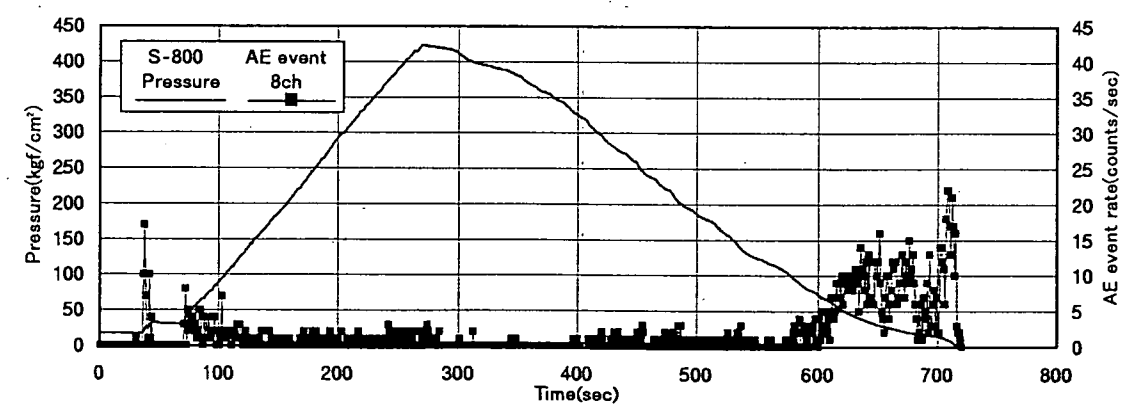
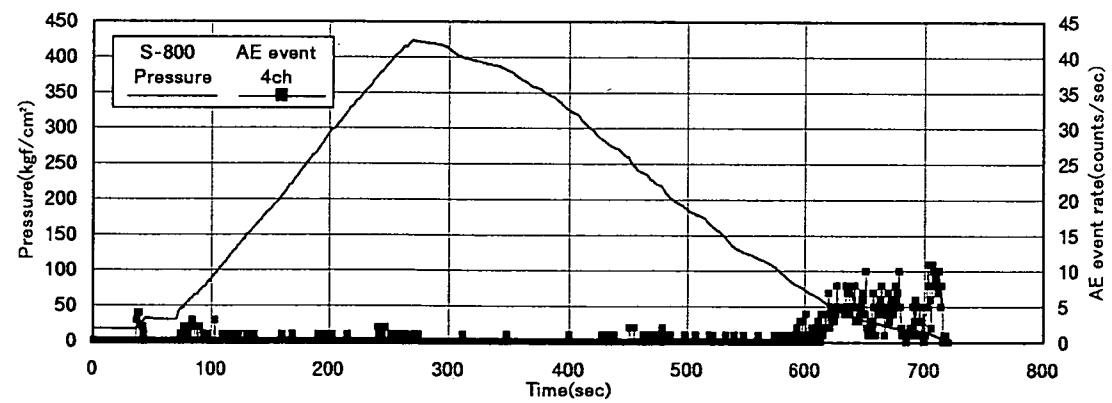
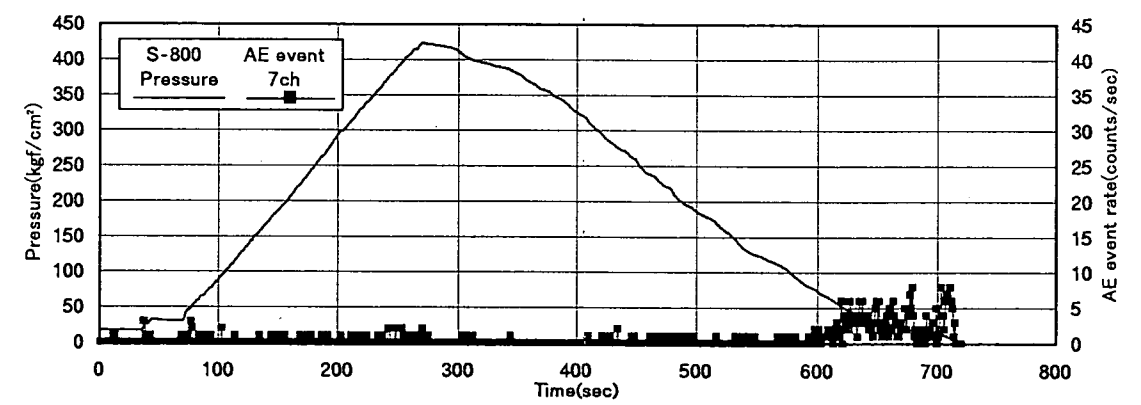
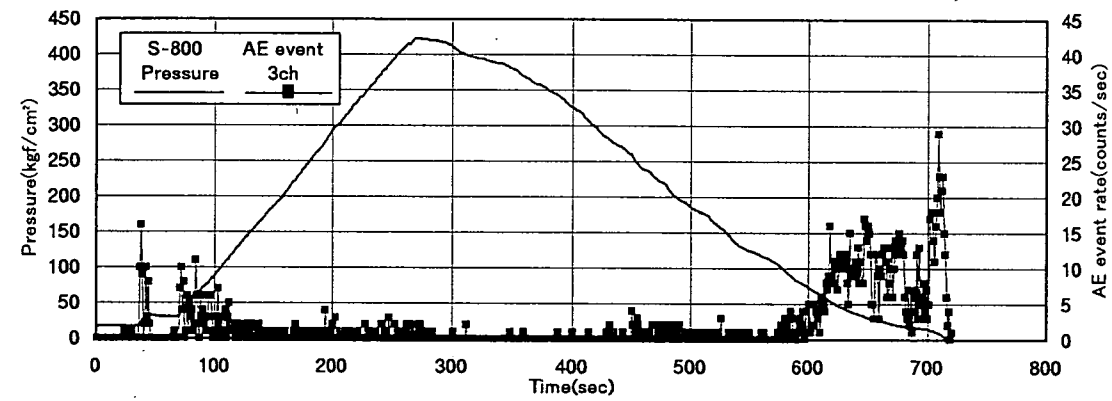
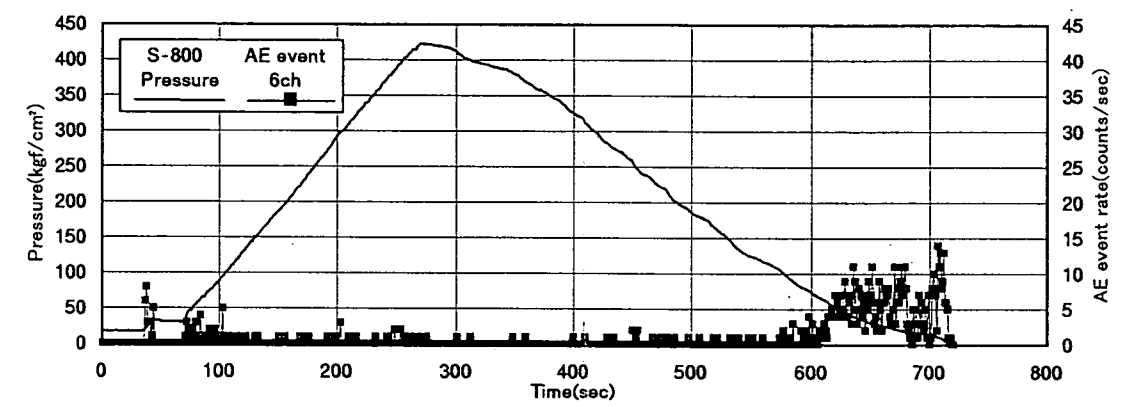
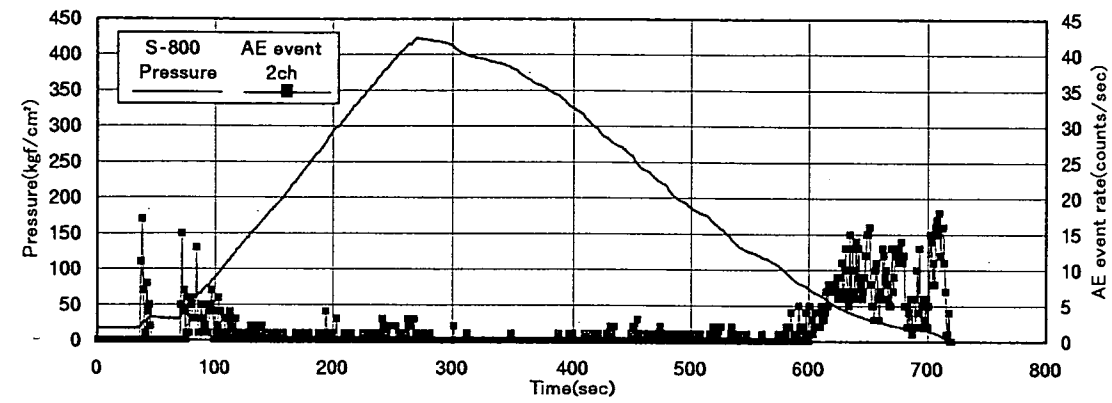
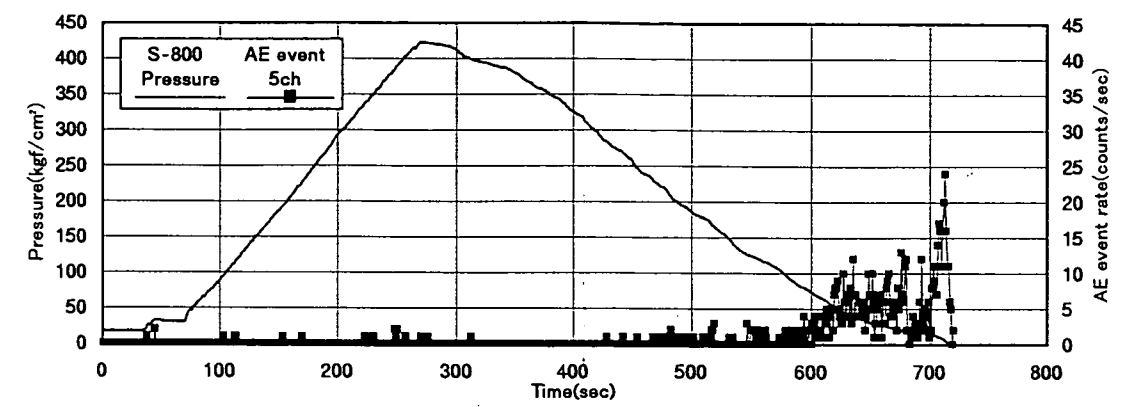
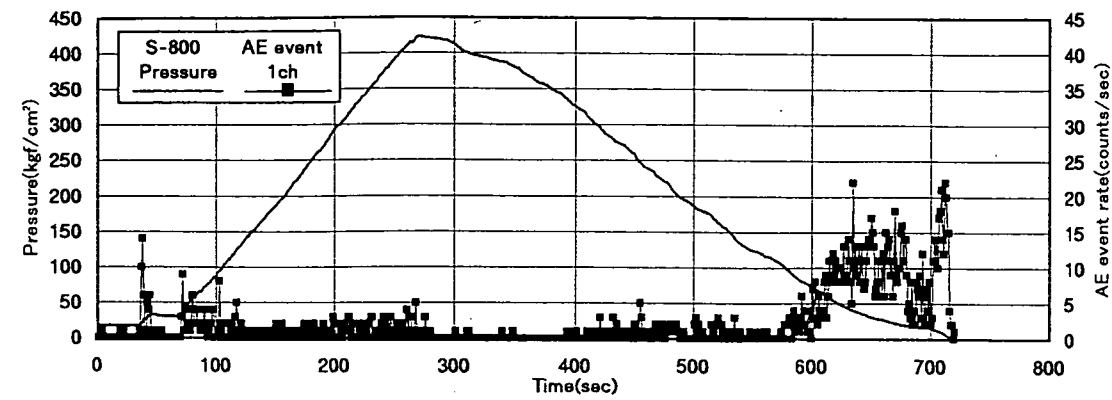
付図-1 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 111s8-1 破碎)



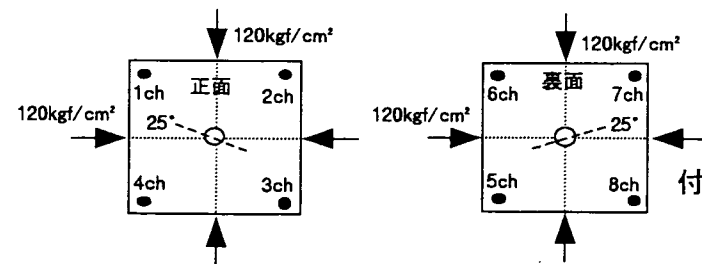
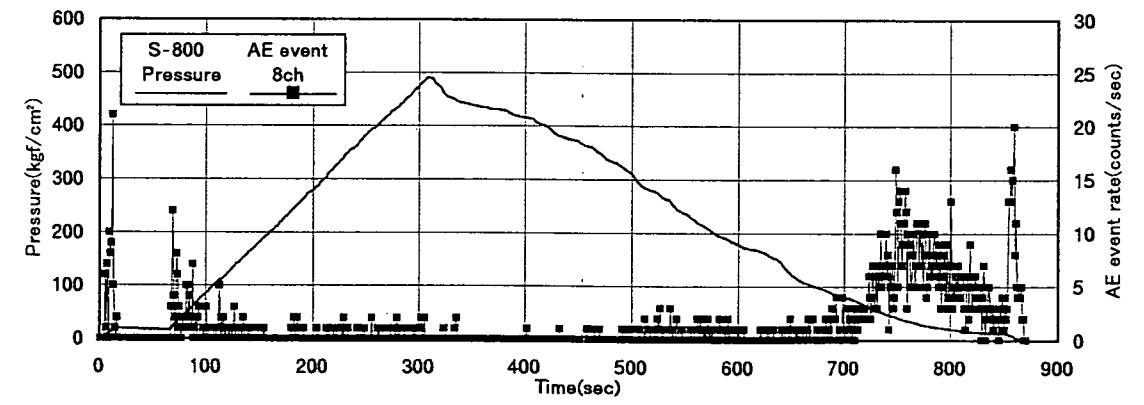
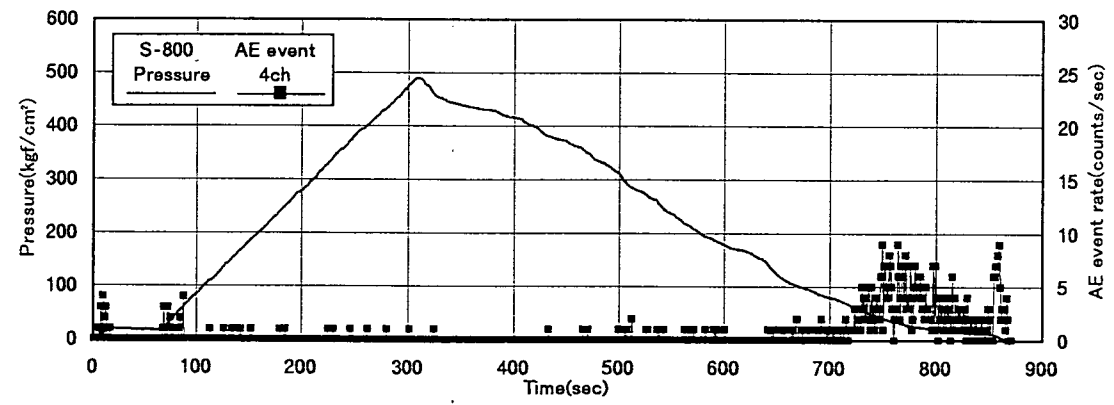
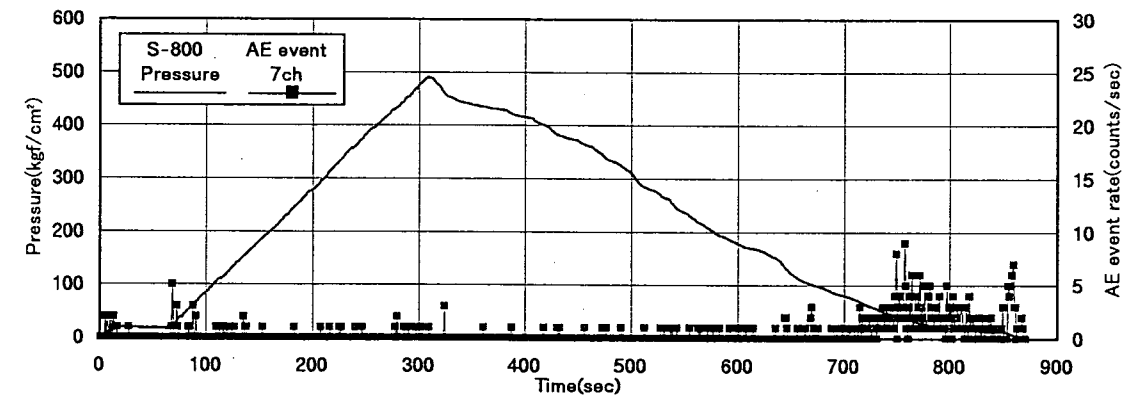
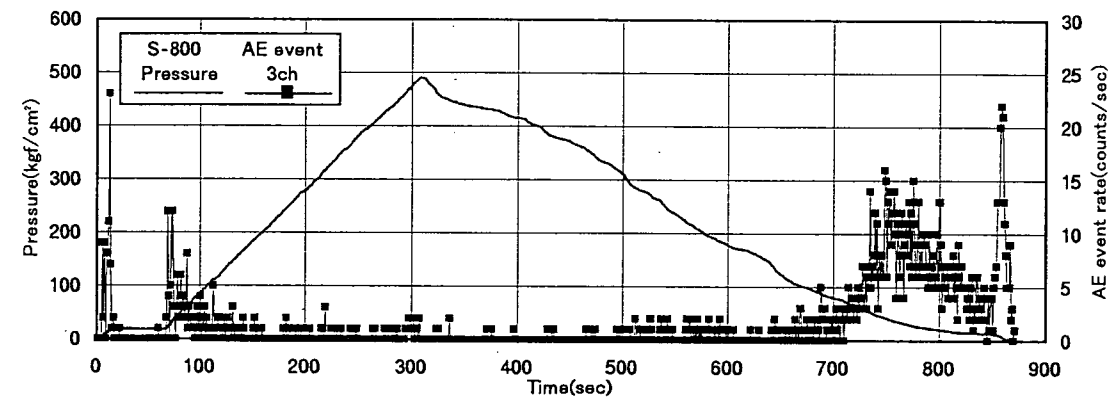
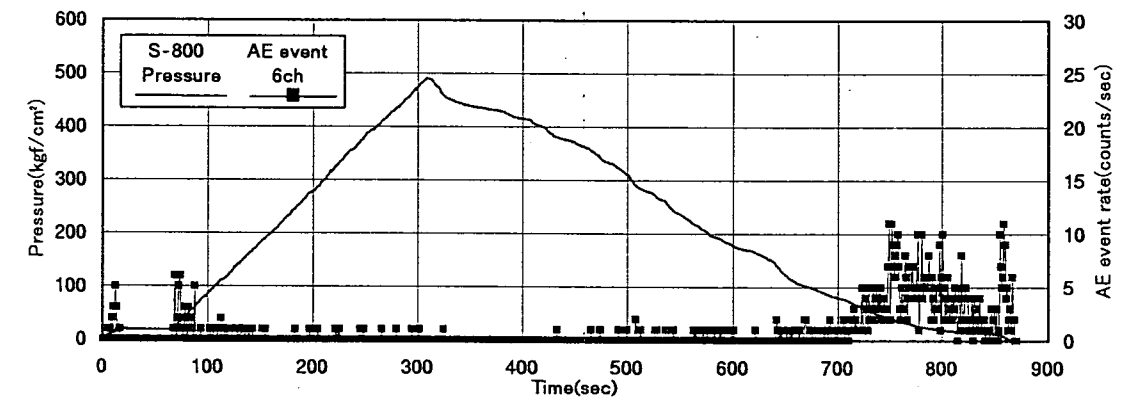
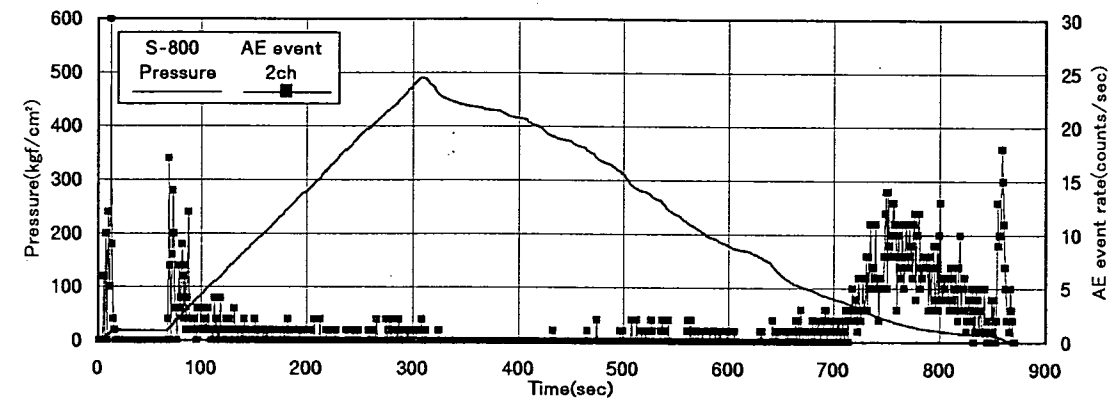
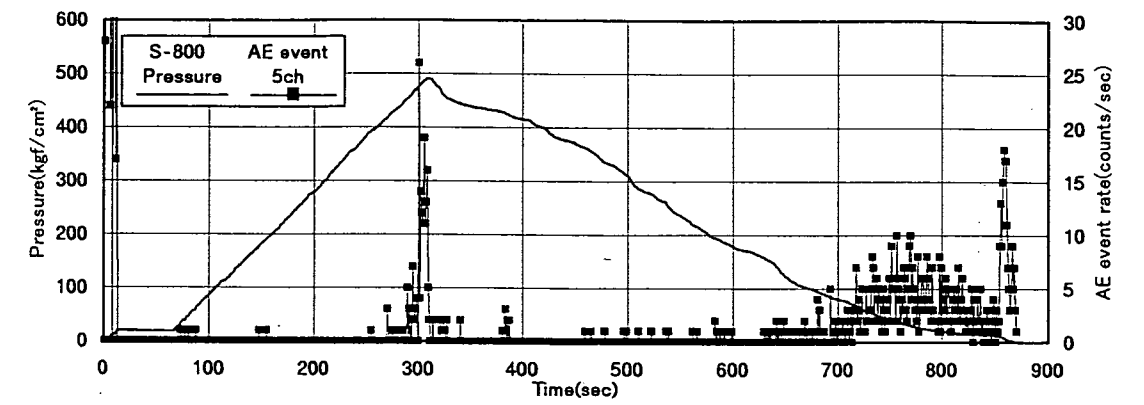
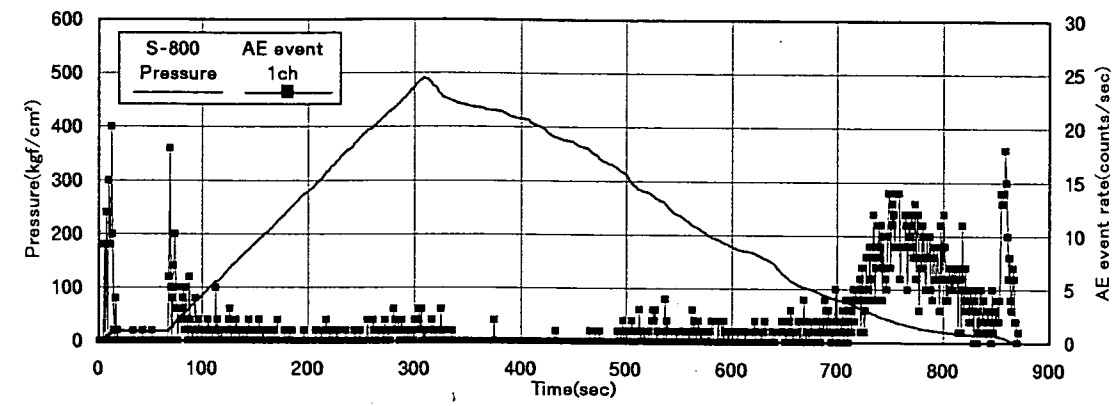
付図-2 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 111s8-1 再開1回目)



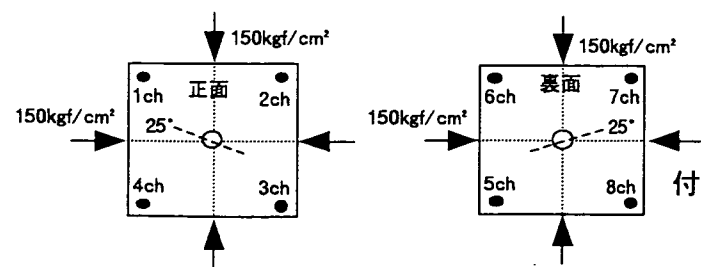
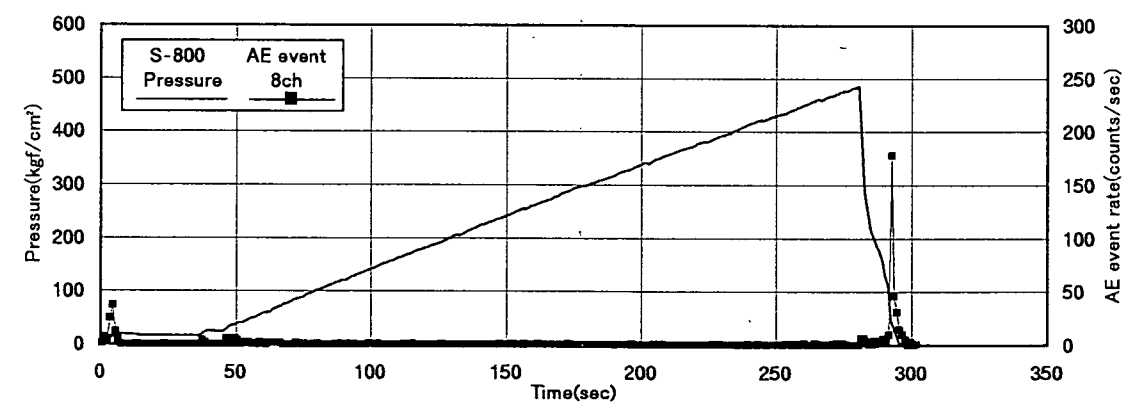
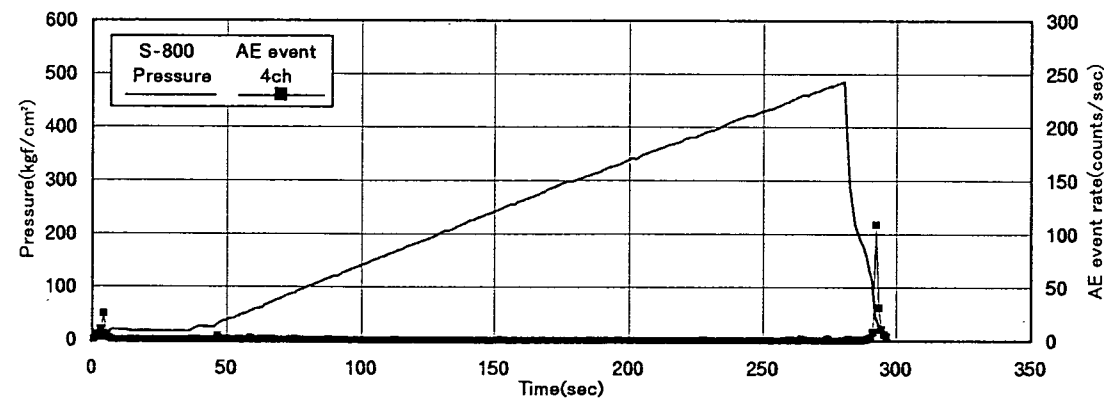
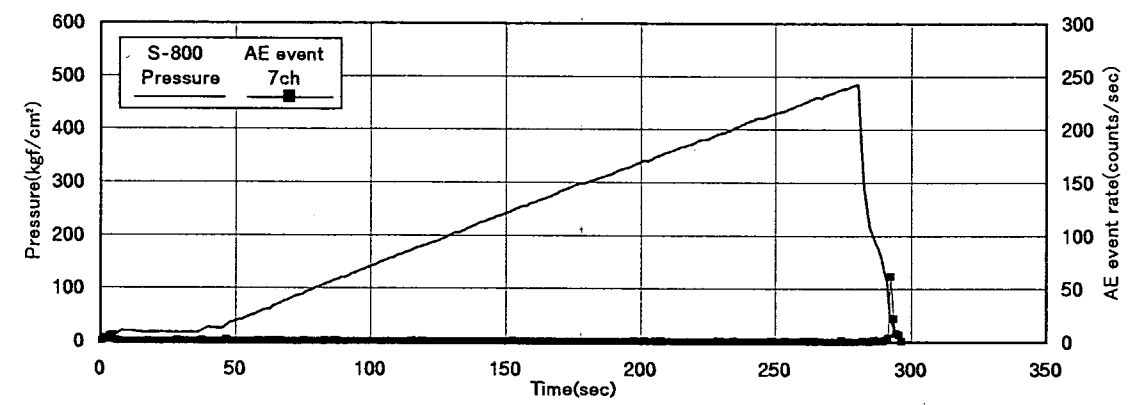
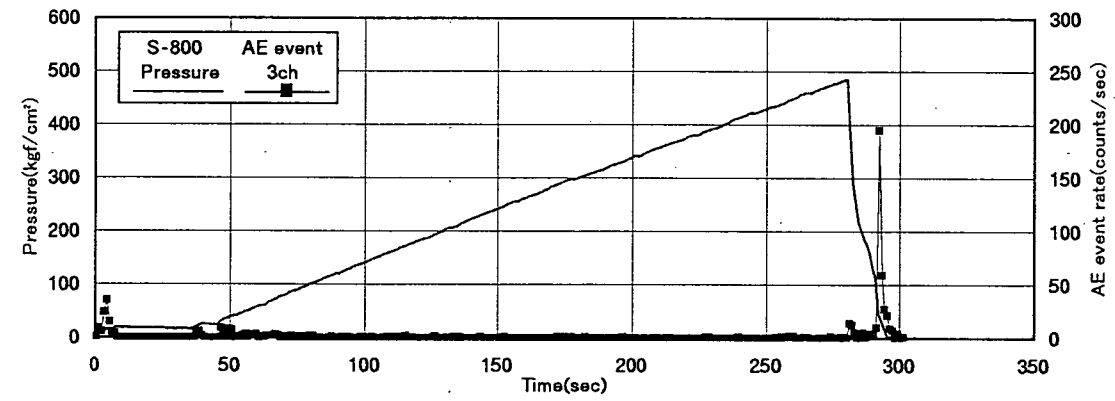
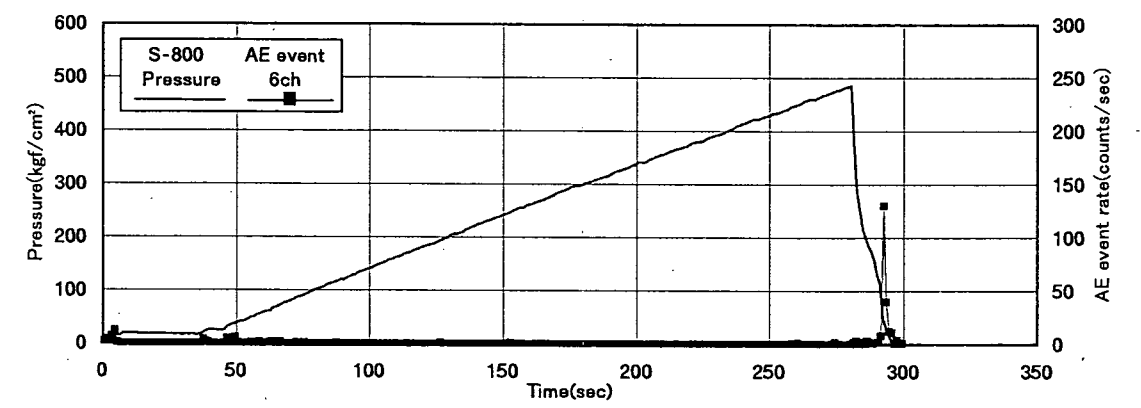
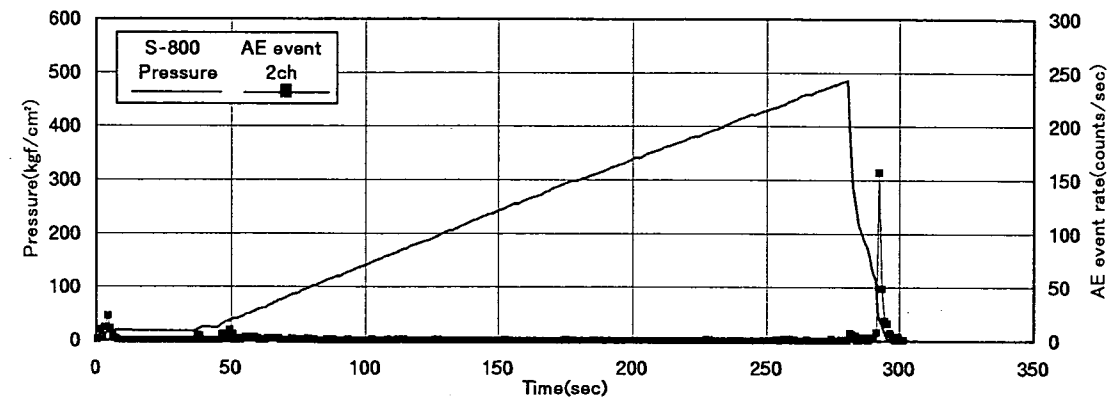
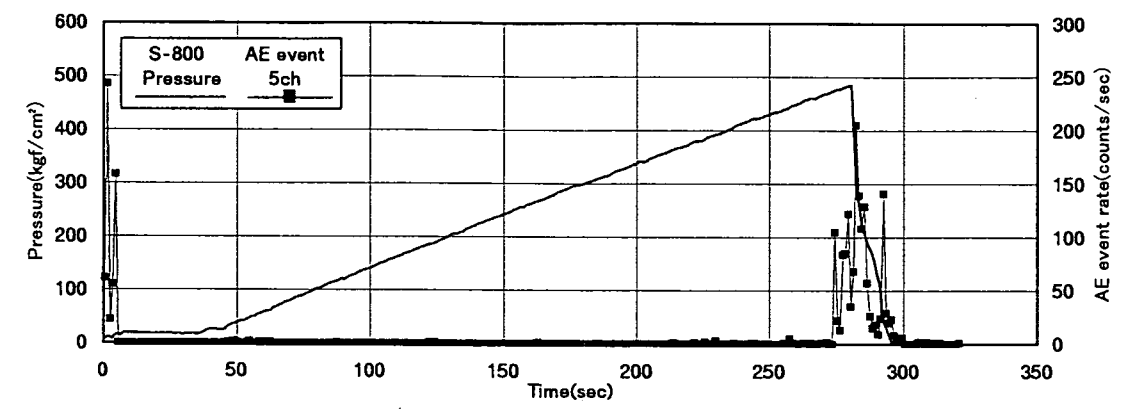
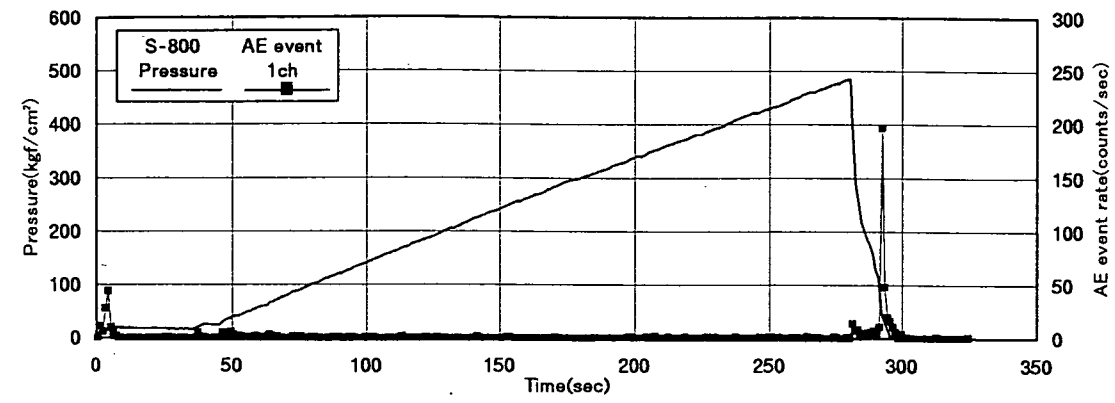
付図-3 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 112s8-1 再開口1回目)



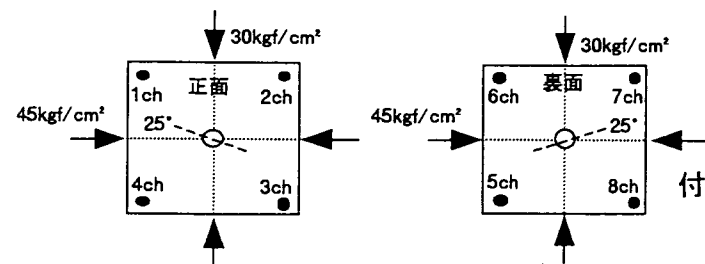
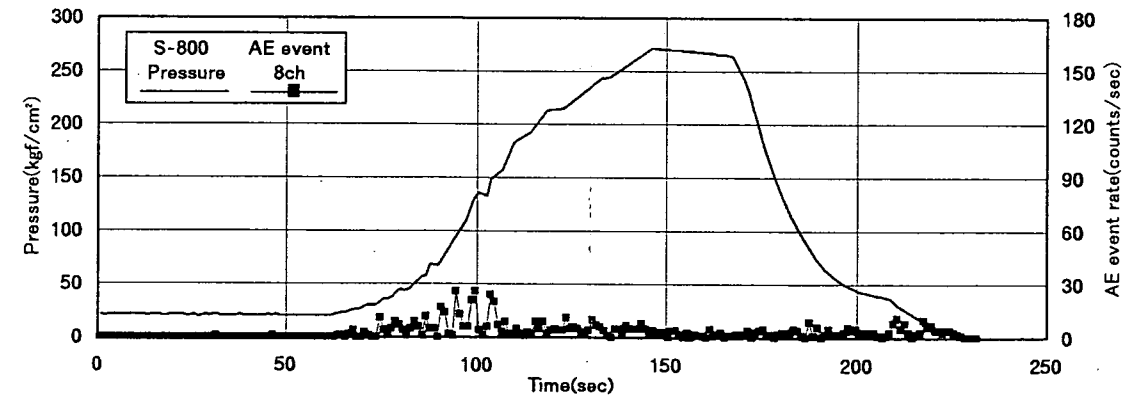
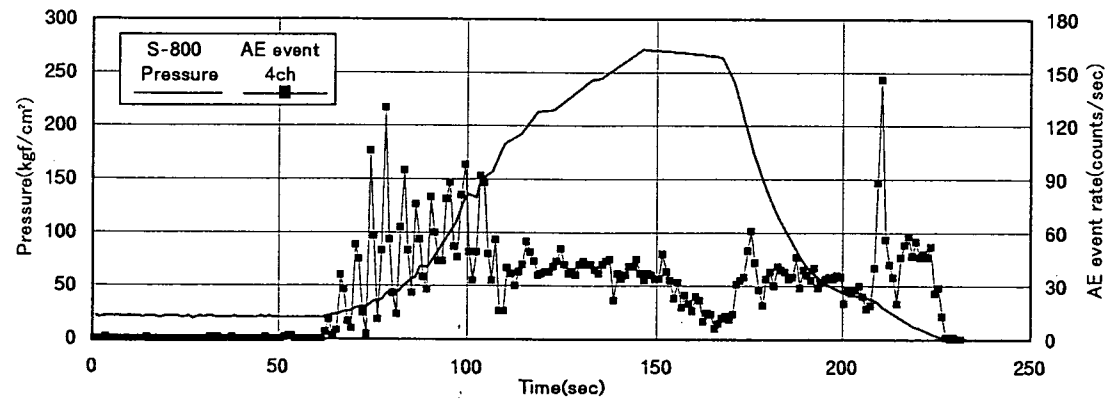
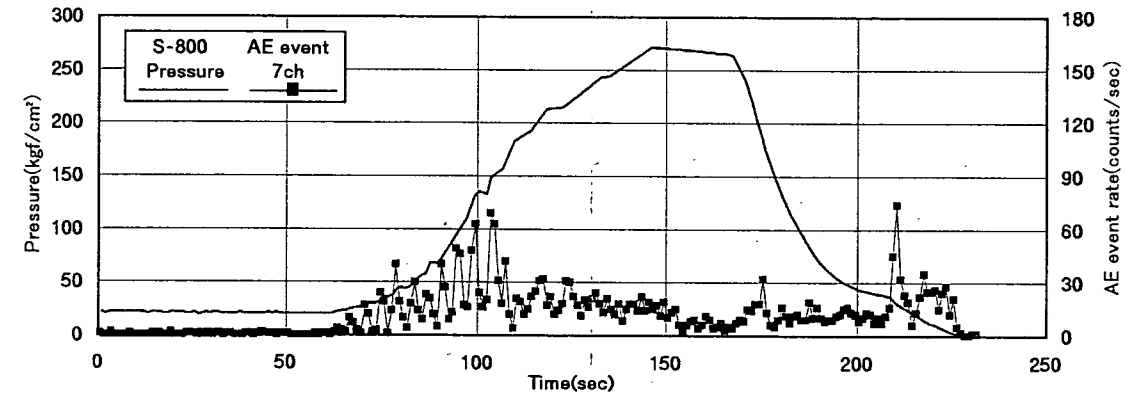
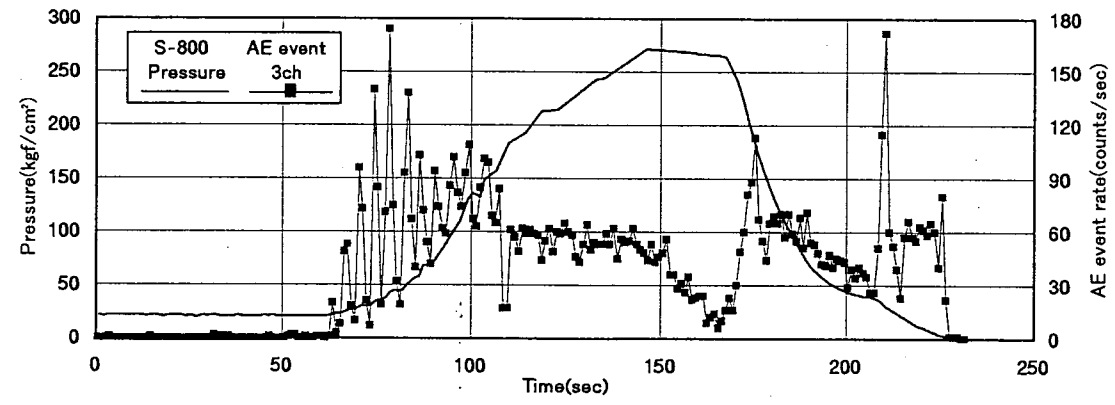
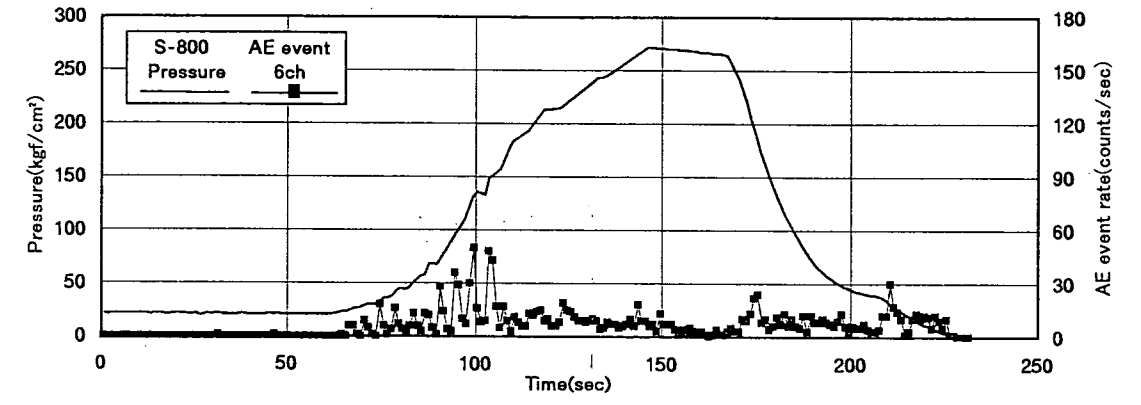
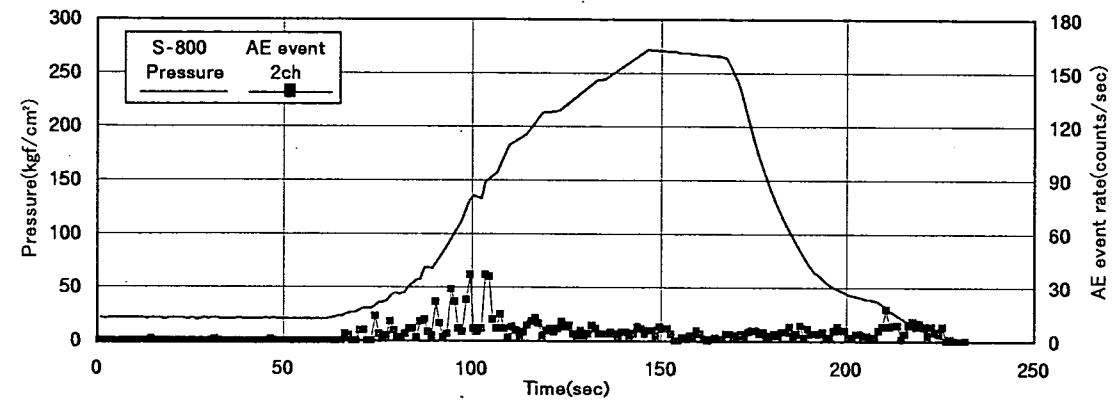
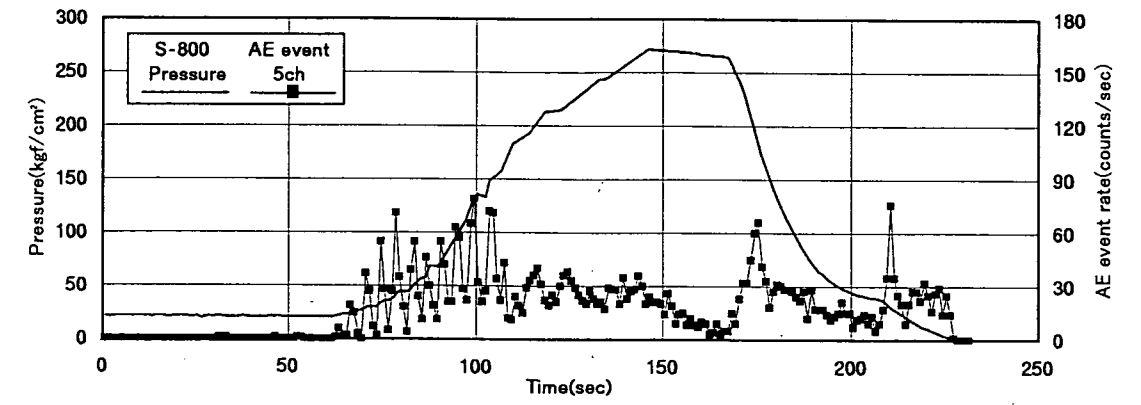
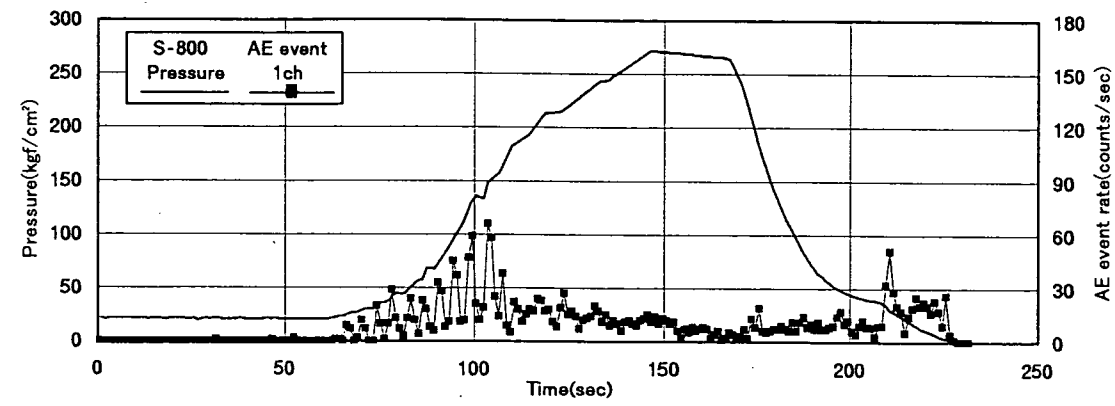
付図-4 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 113s8-1 再開口1回目)



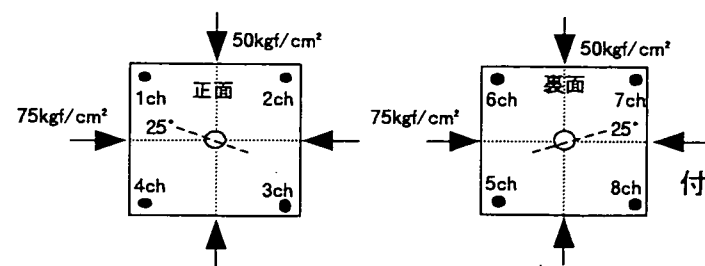
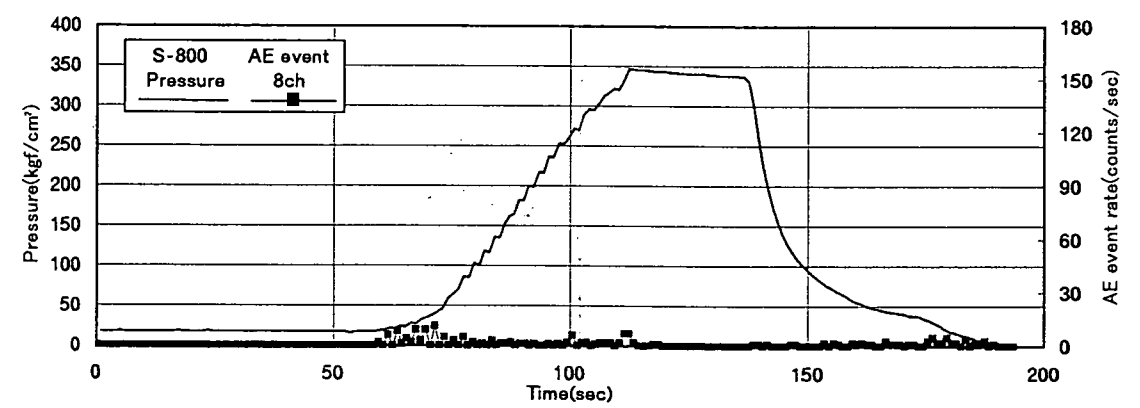
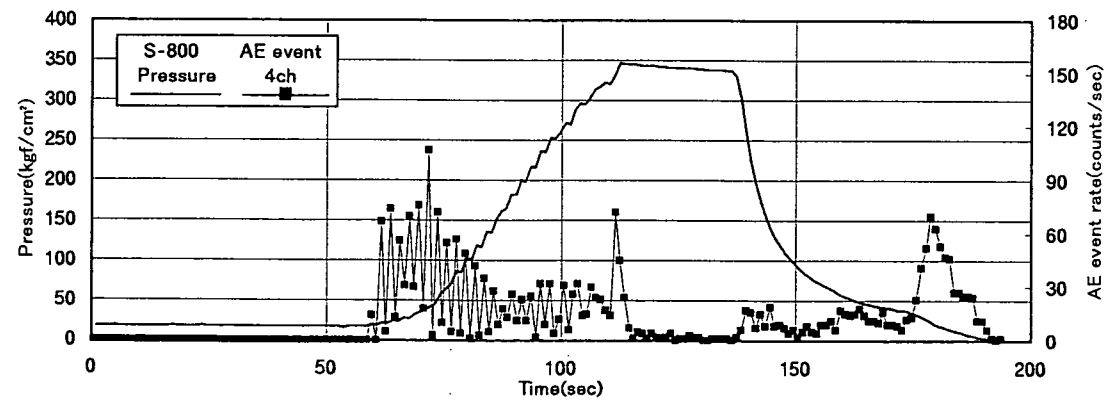
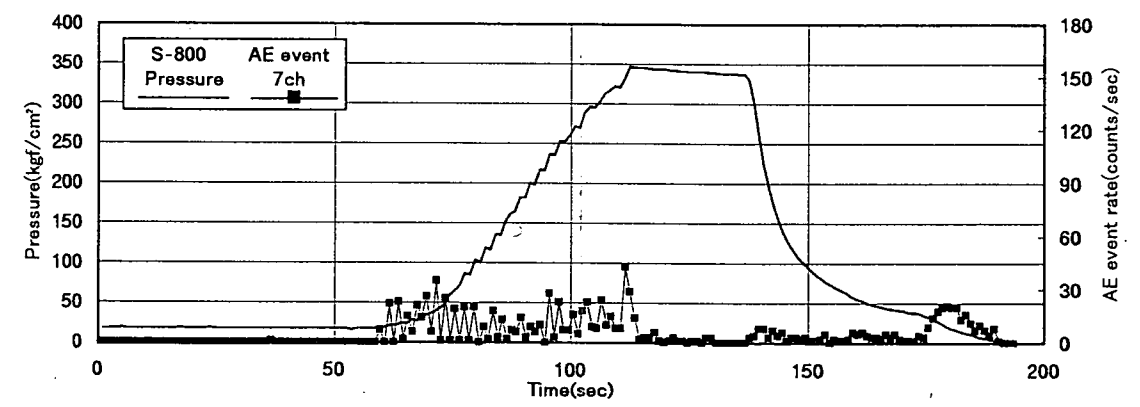
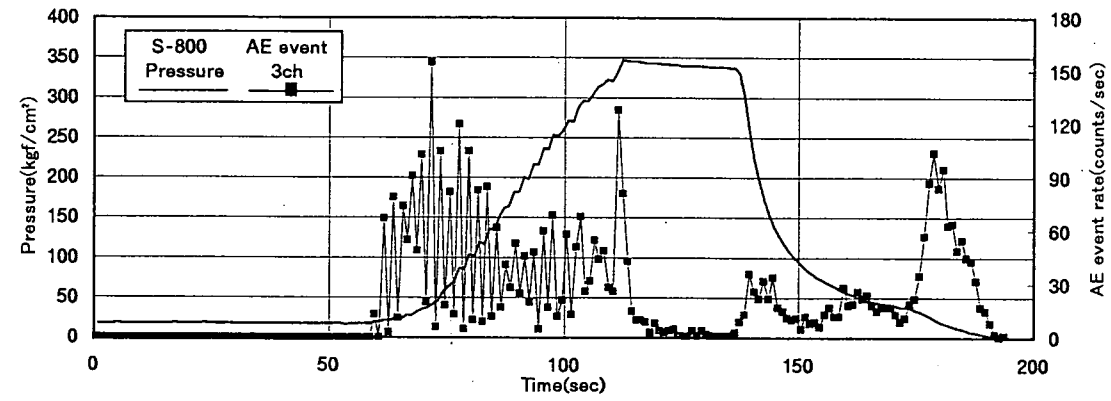
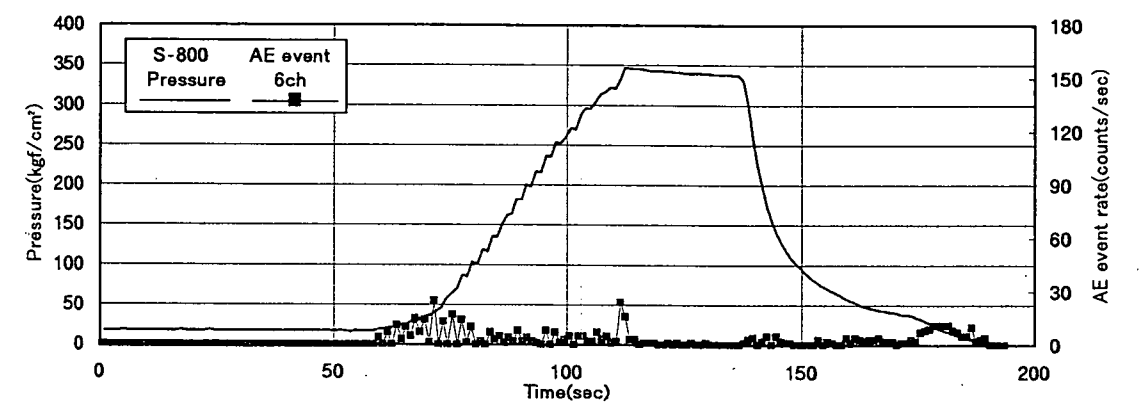
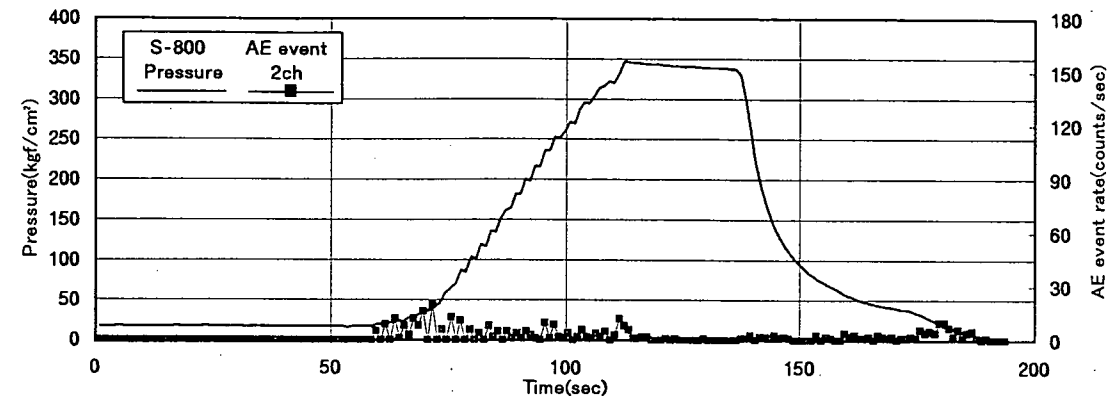
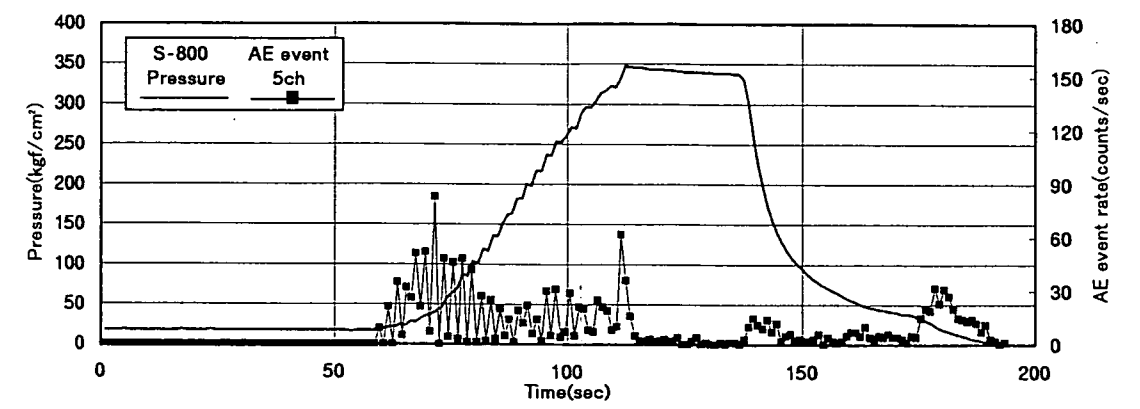
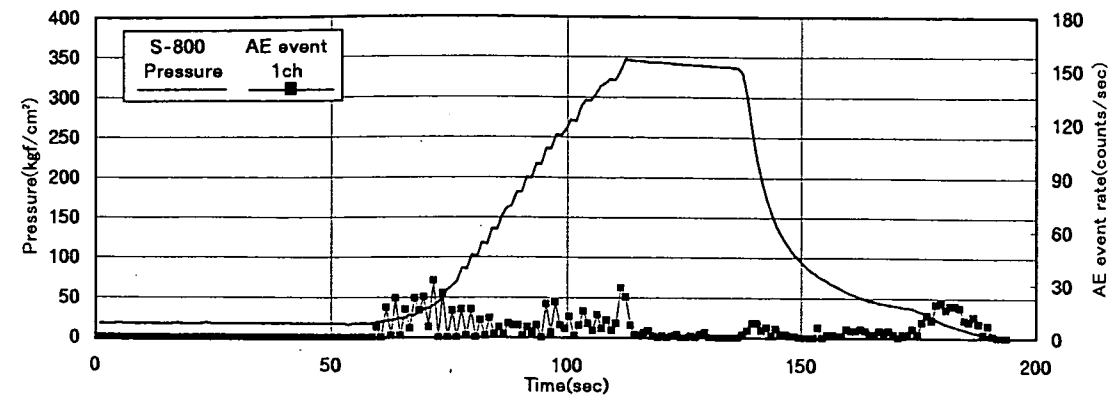
付図-5 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 114s8-1 再開口1回目)



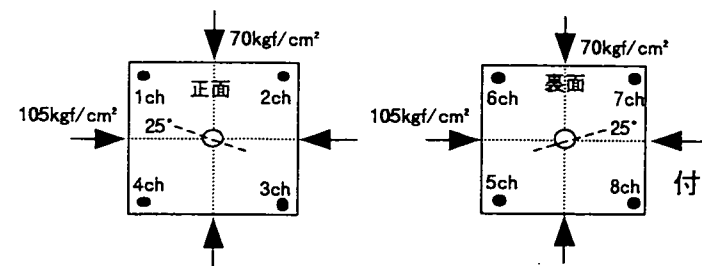
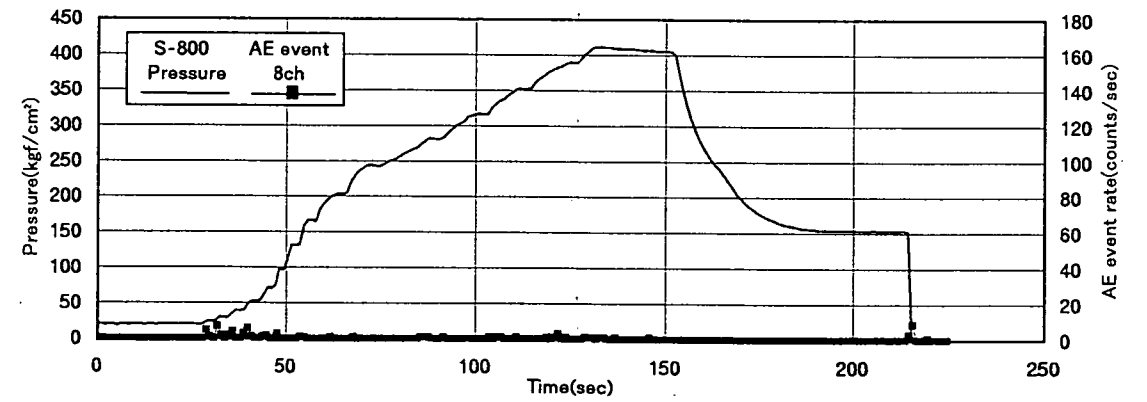
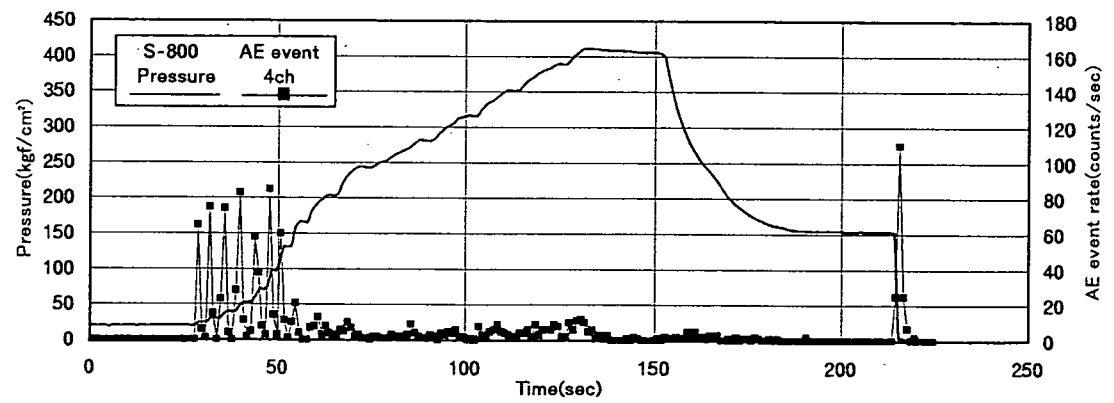
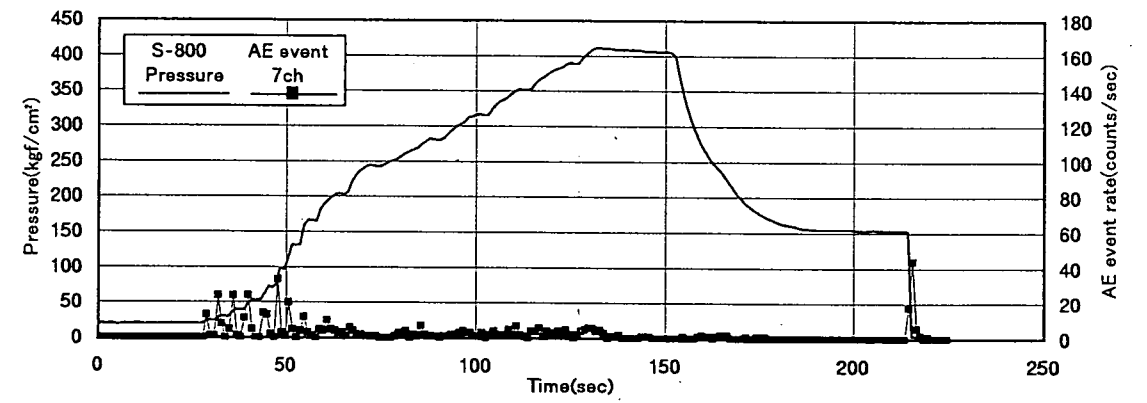
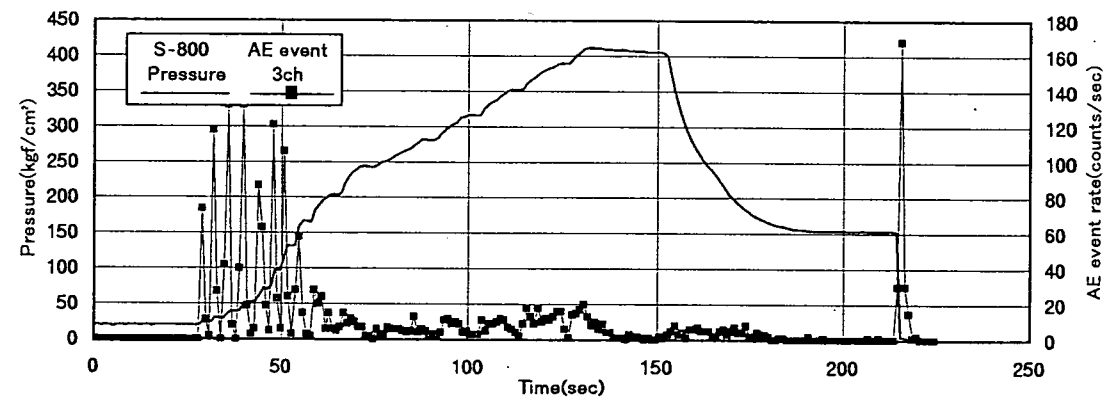
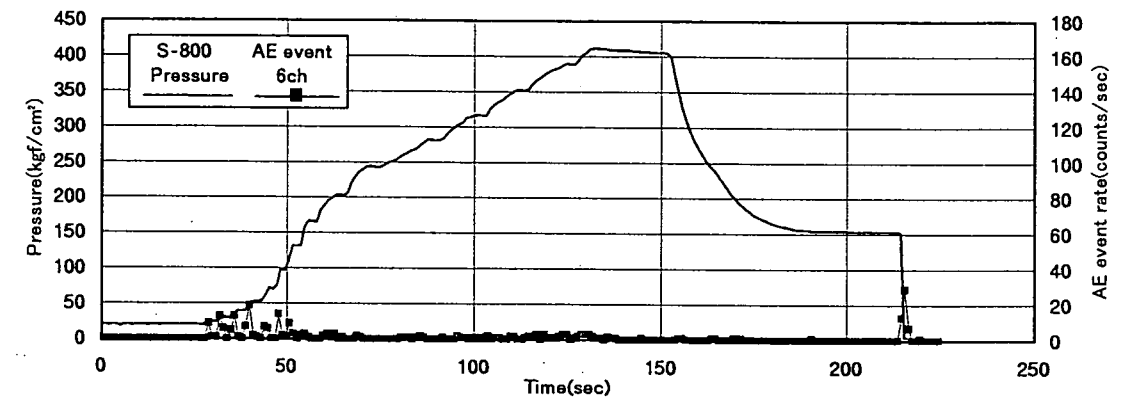
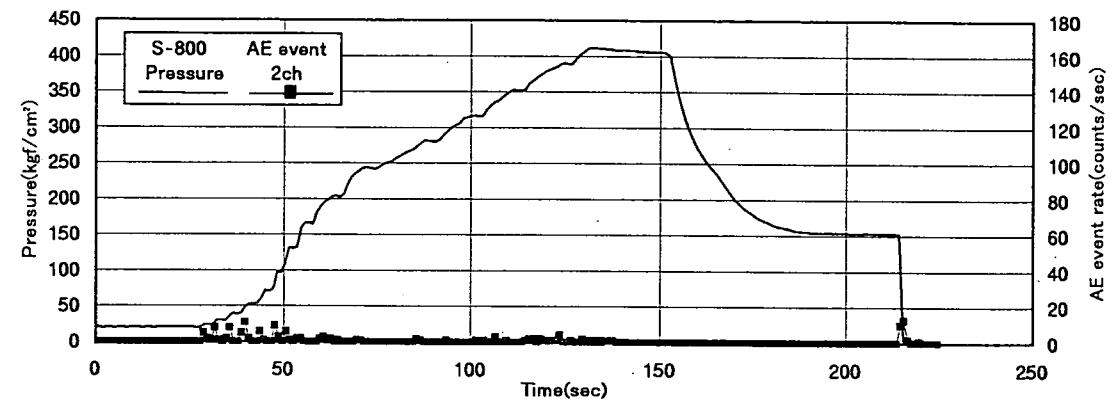
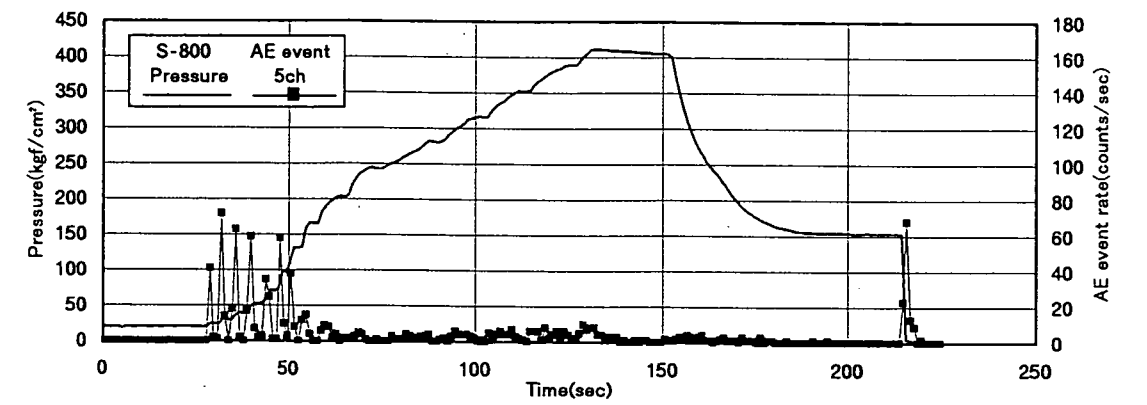
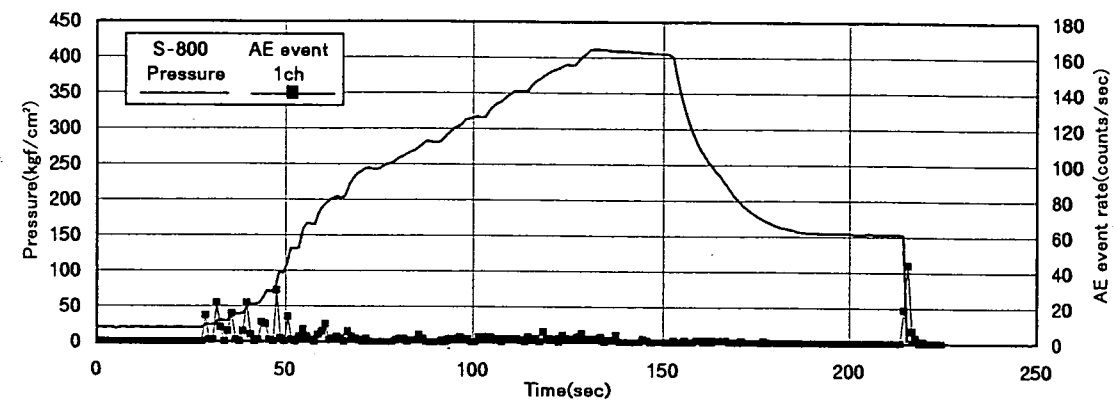
付図-6 载荷圧とAEの発生数との関係(試験 115s8-1 再開口1回目)



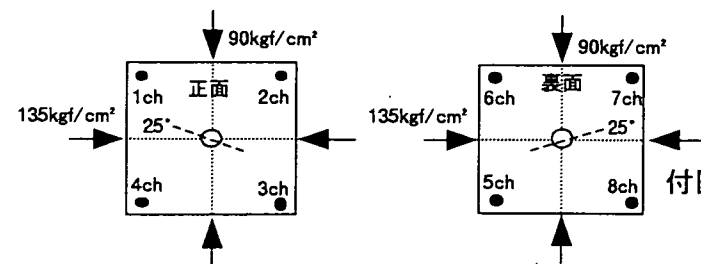
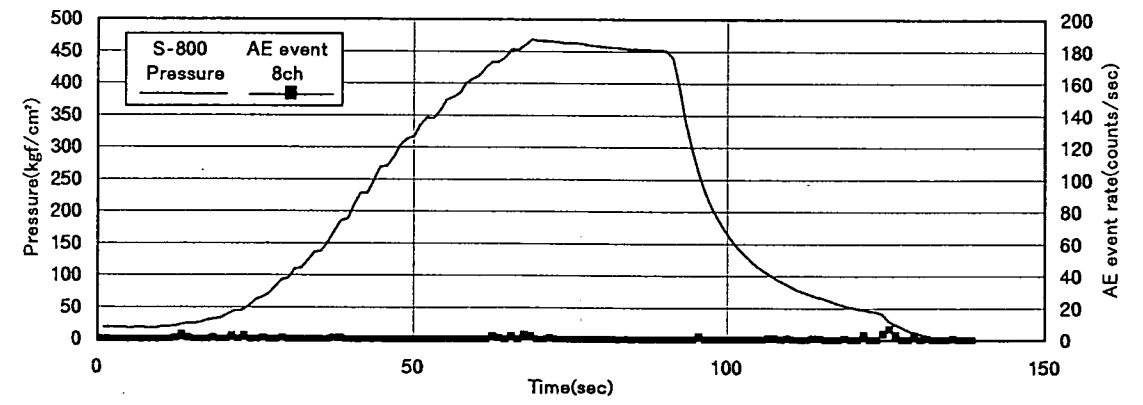
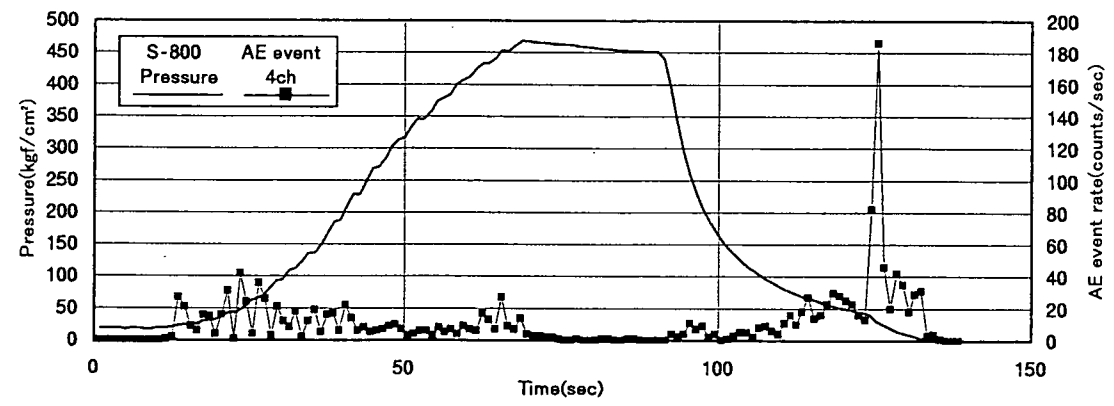
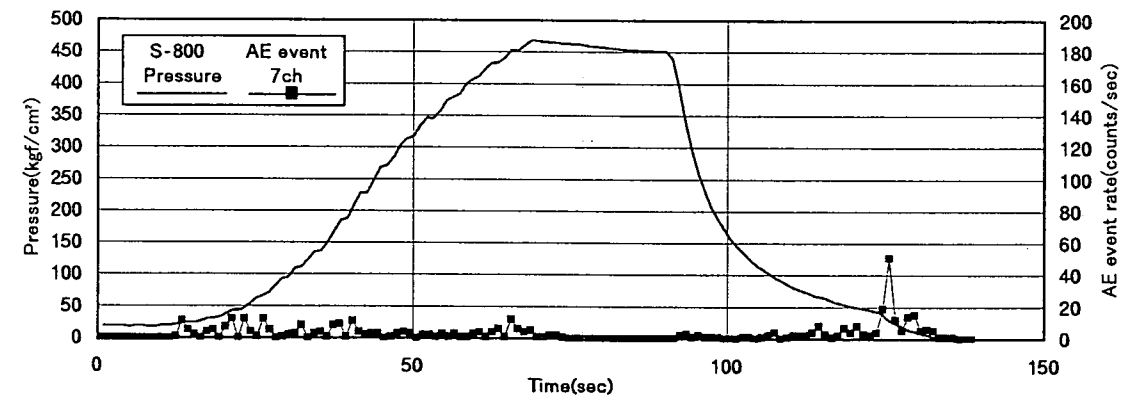
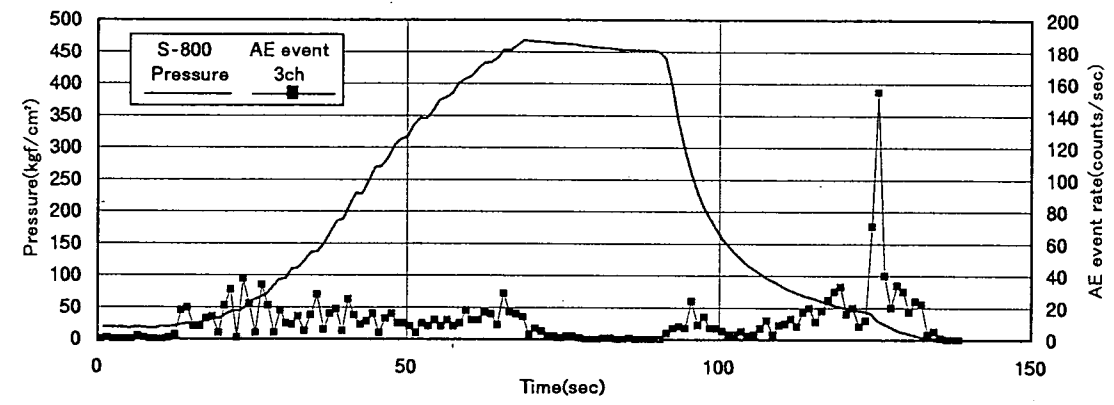
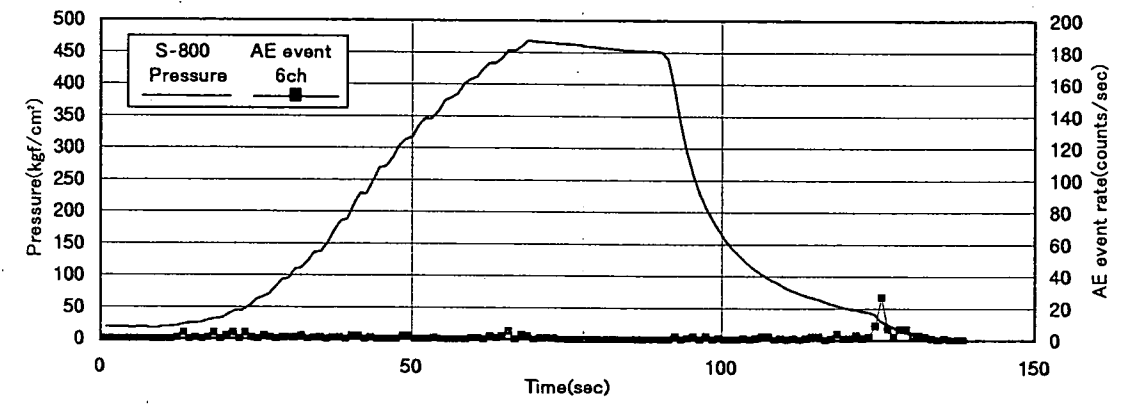
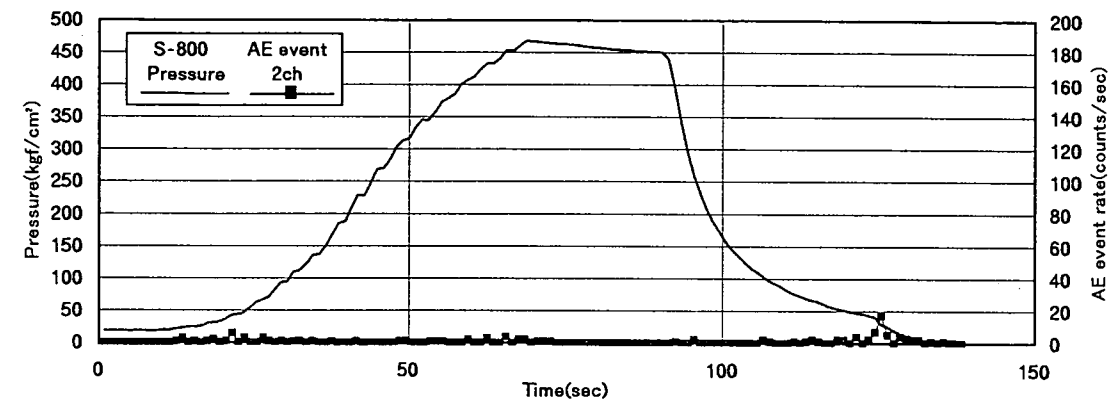
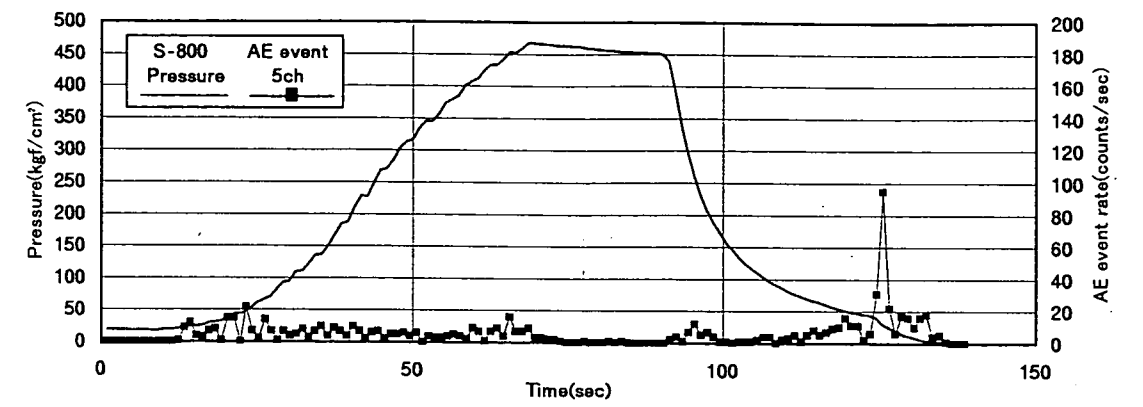
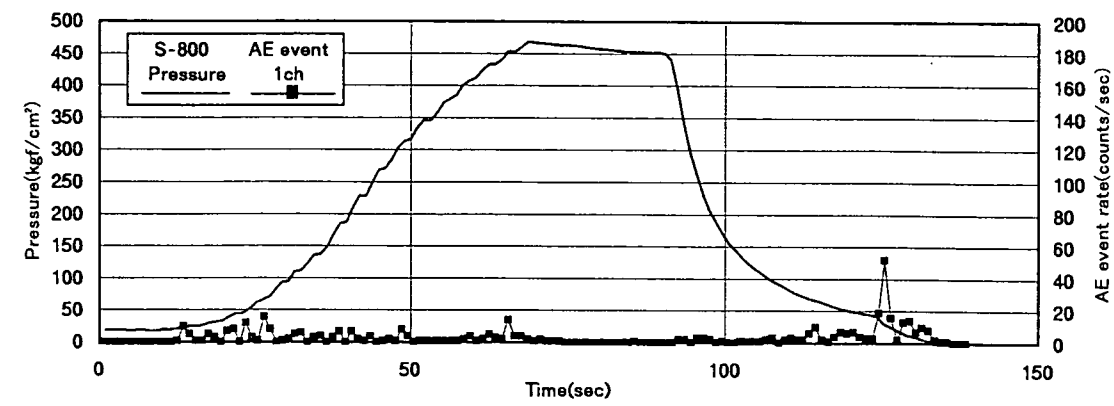
付図-7 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 116s8-1 再開口1回目)



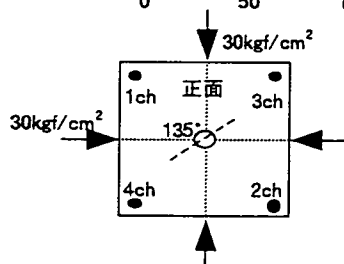
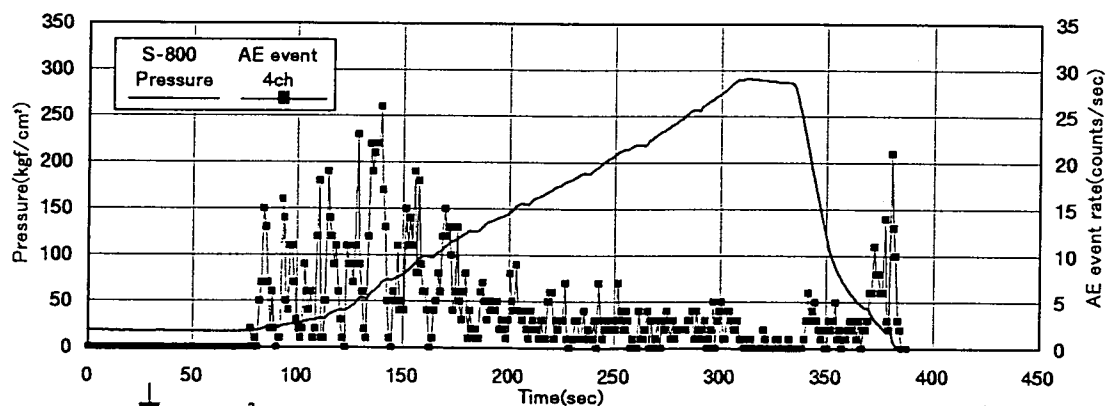
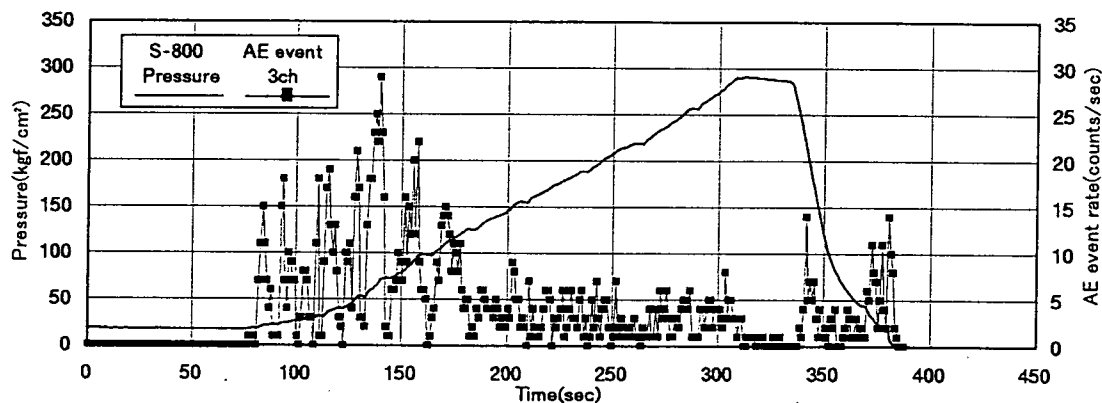
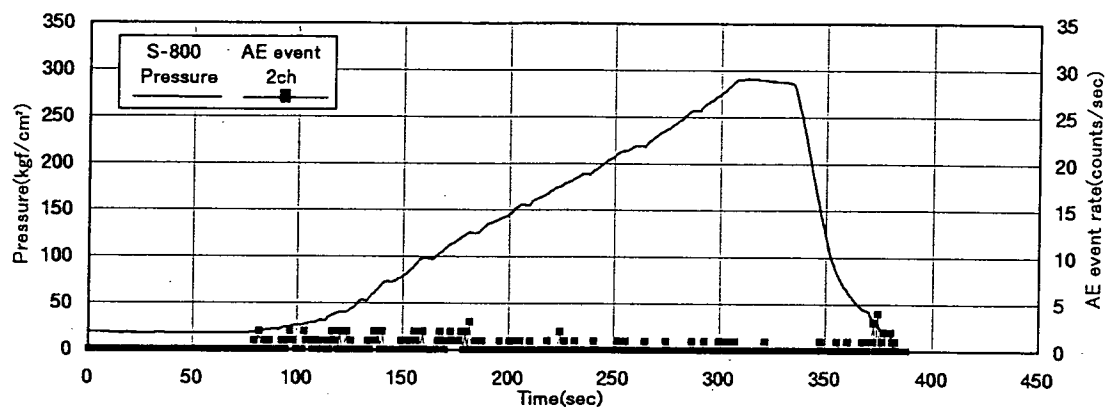
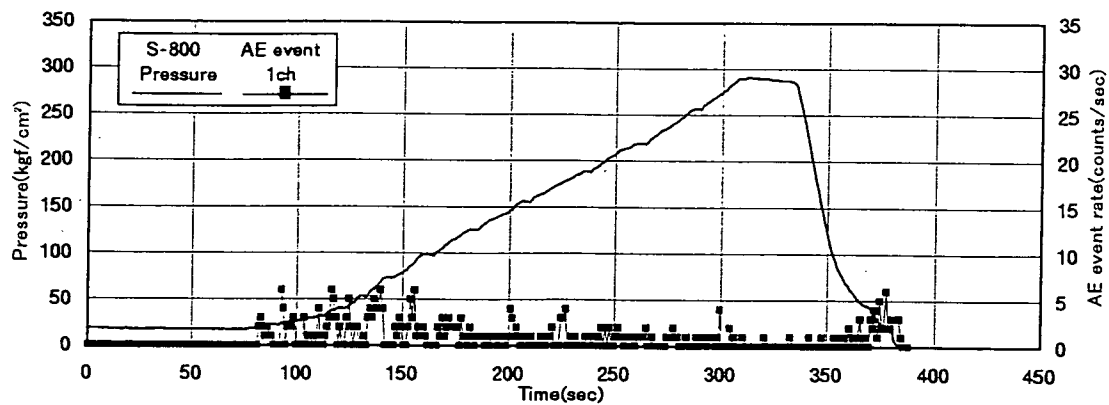
付図-8 荷重圧とAEの発生数との関係(試験 117s8-2 再開口1回目)



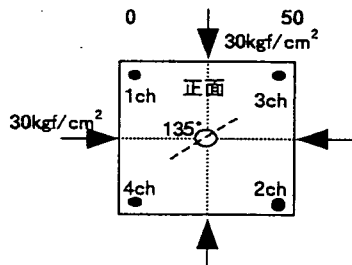
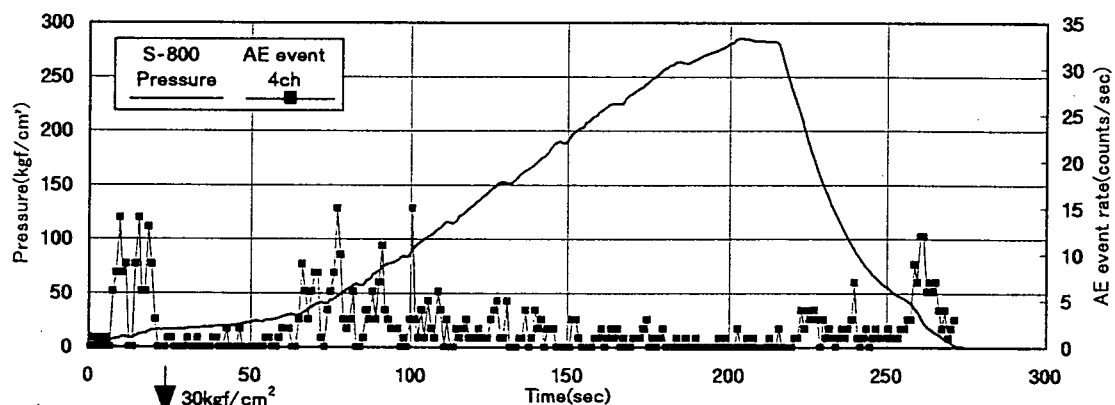
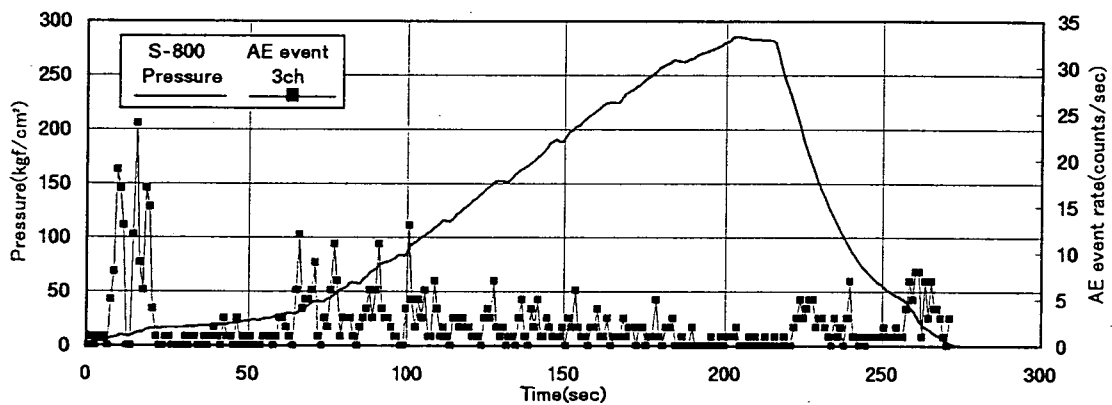
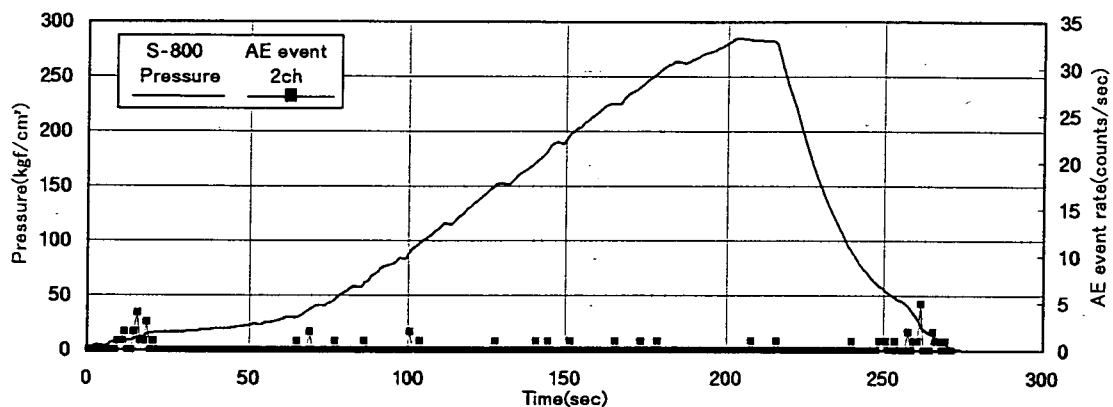
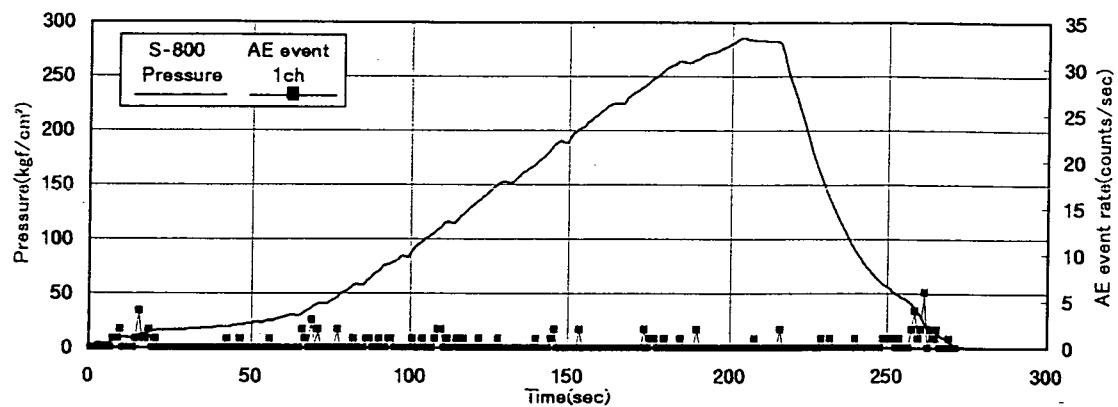
付図-9 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 118s8-1 再開口1回目)



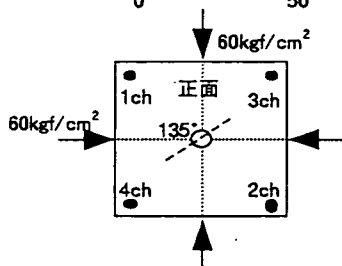
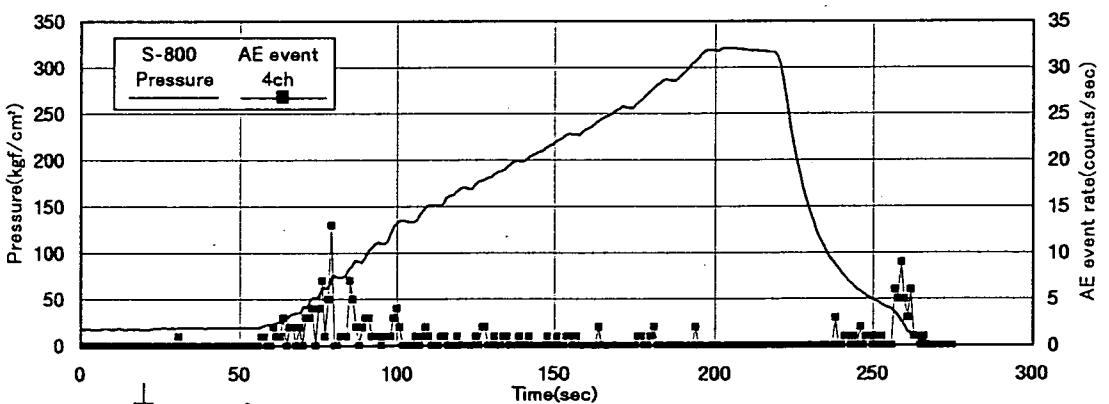
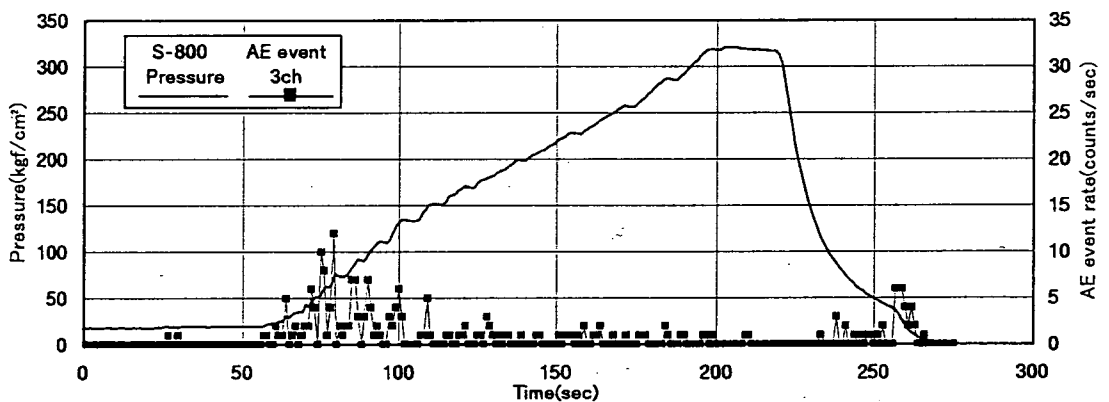
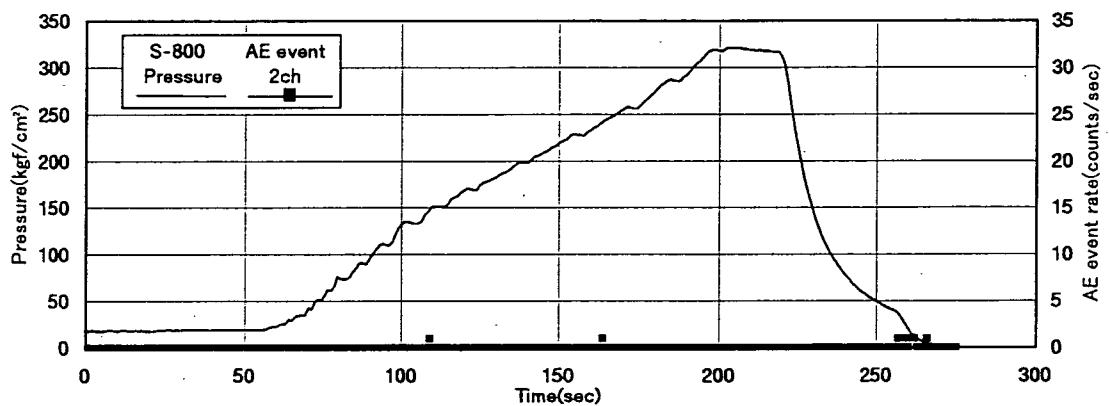
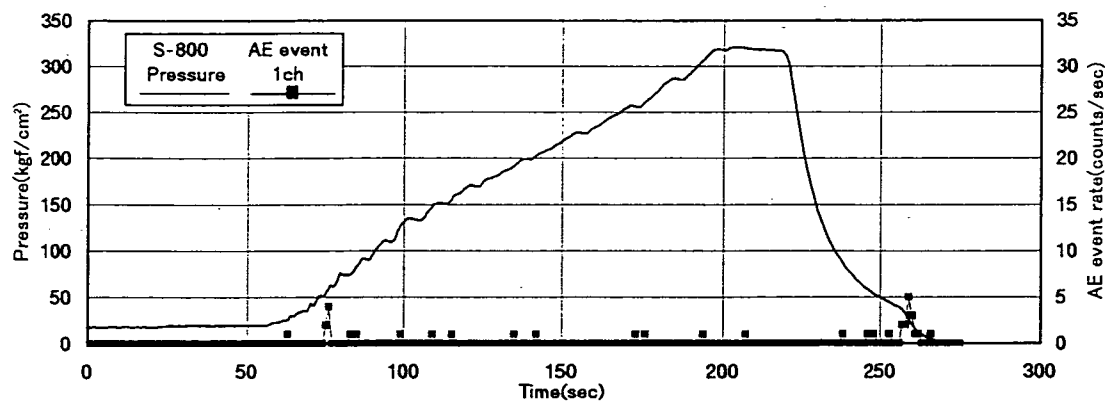
付図-10 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 119s8-2 再開口1回目)



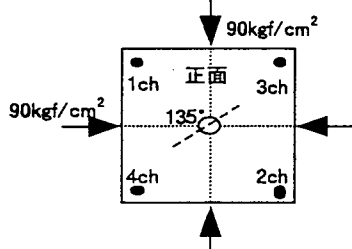
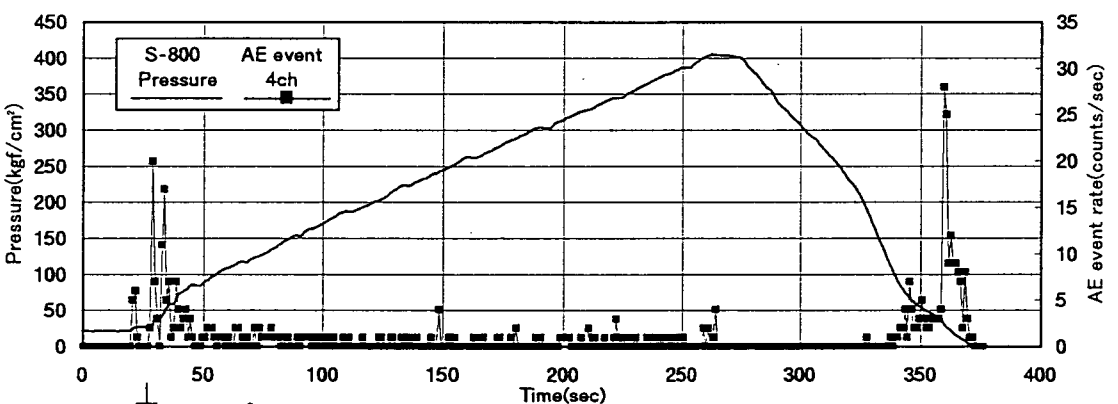
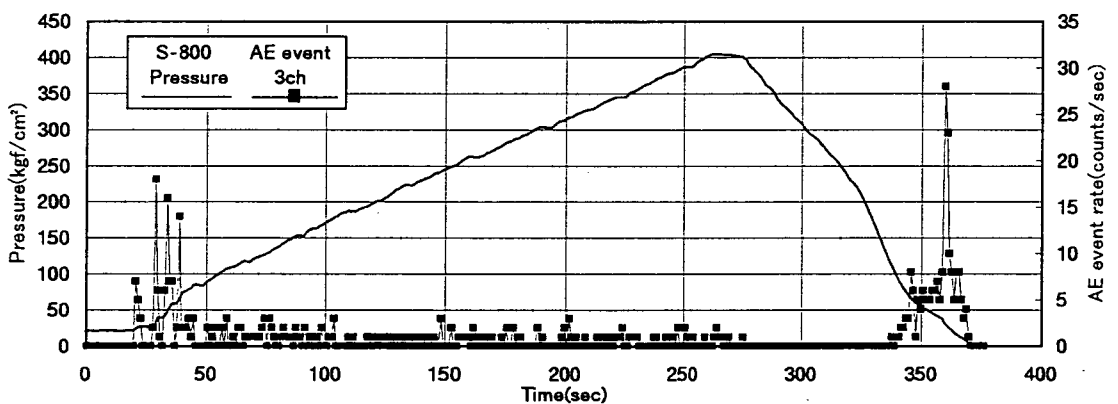
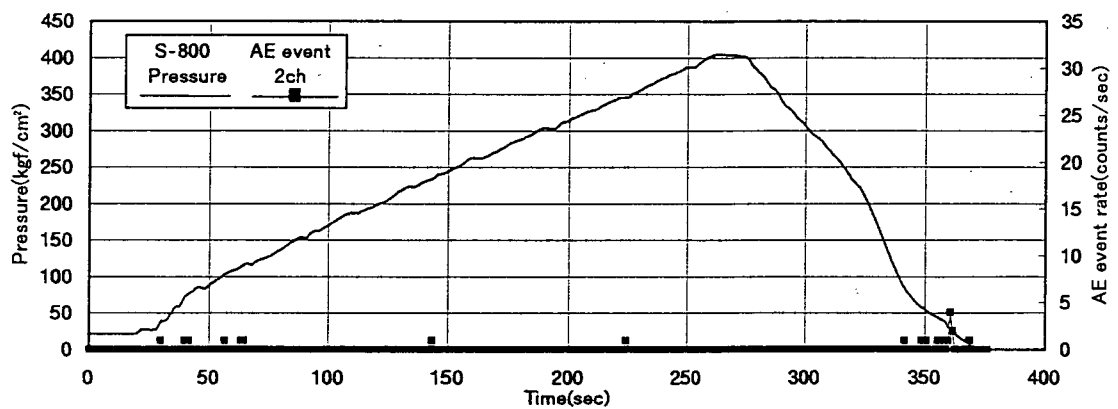
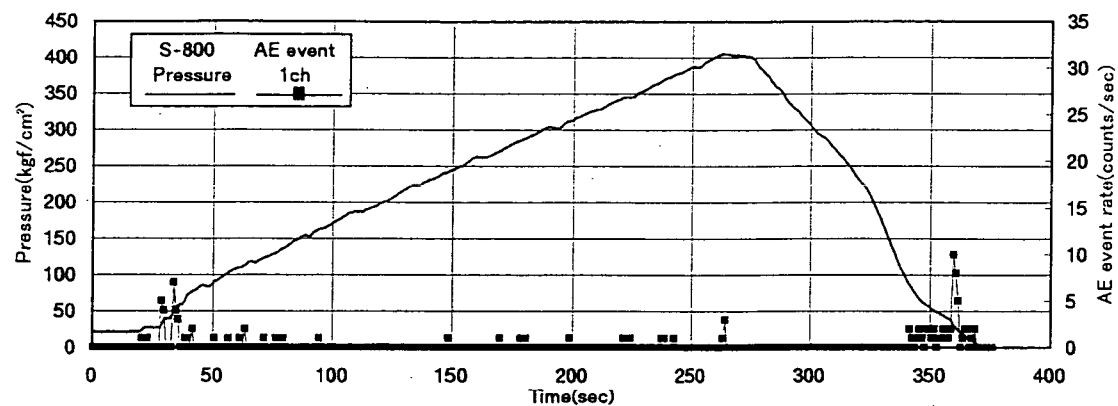
付図-11 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 121s8-1 破碎)



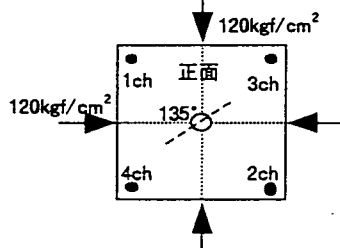
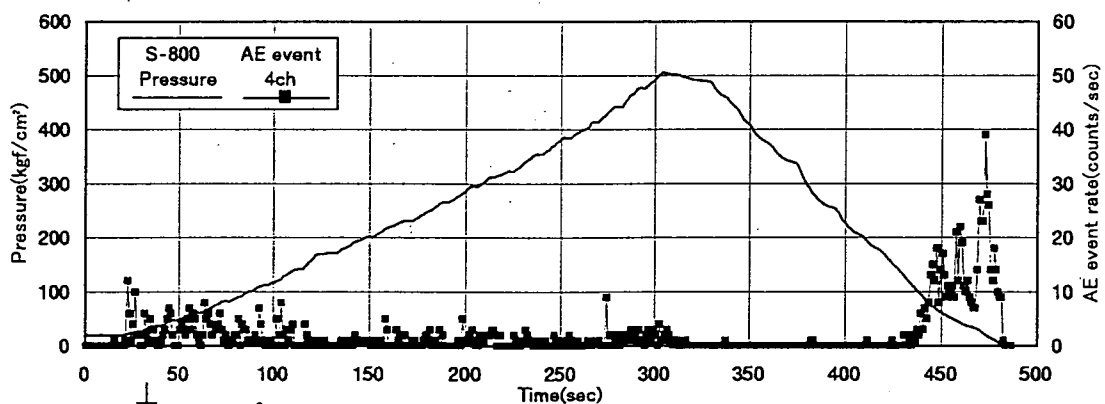
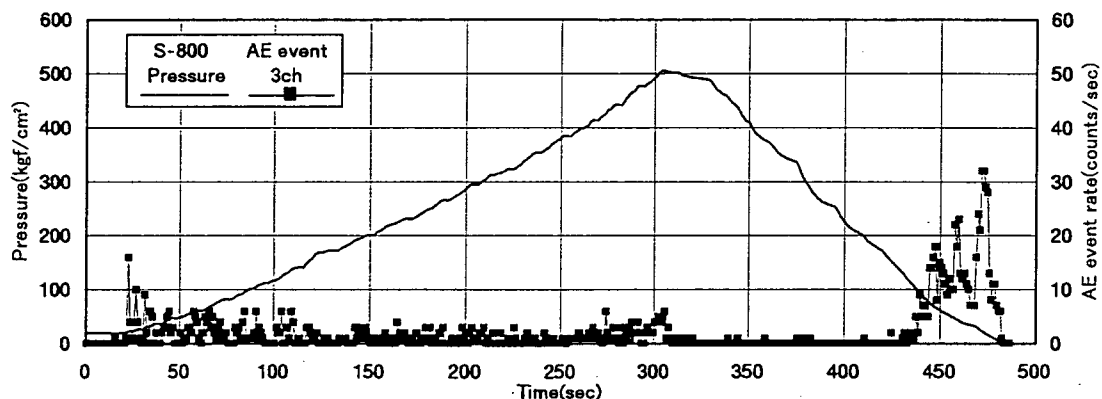
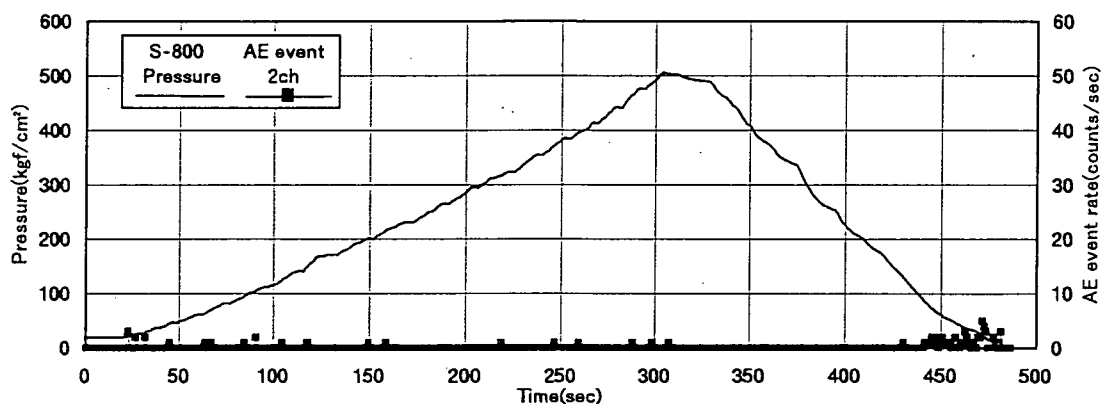
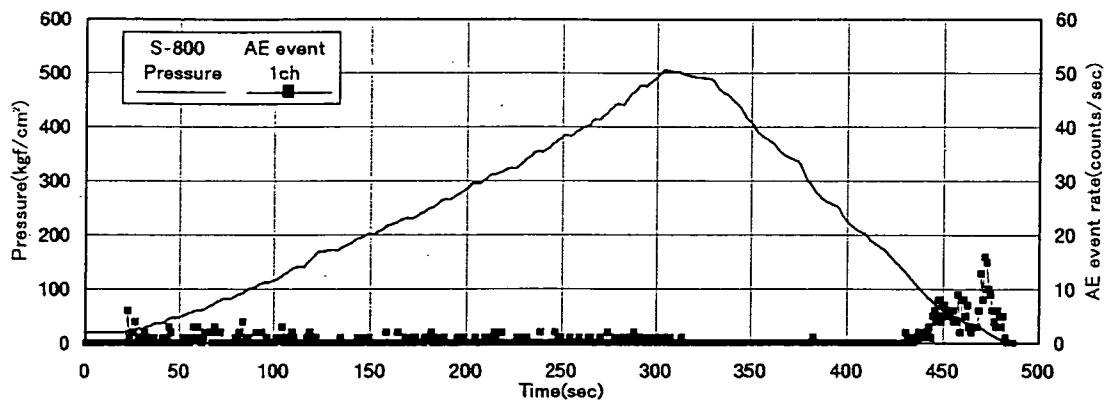
付図-12 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 121s8-1 再開口1回目)



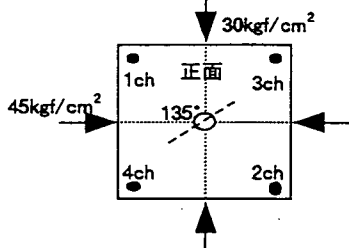
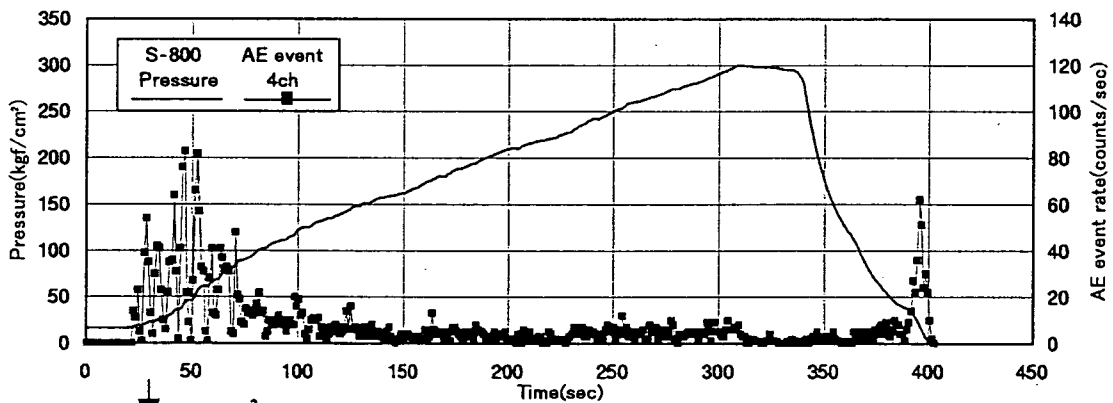
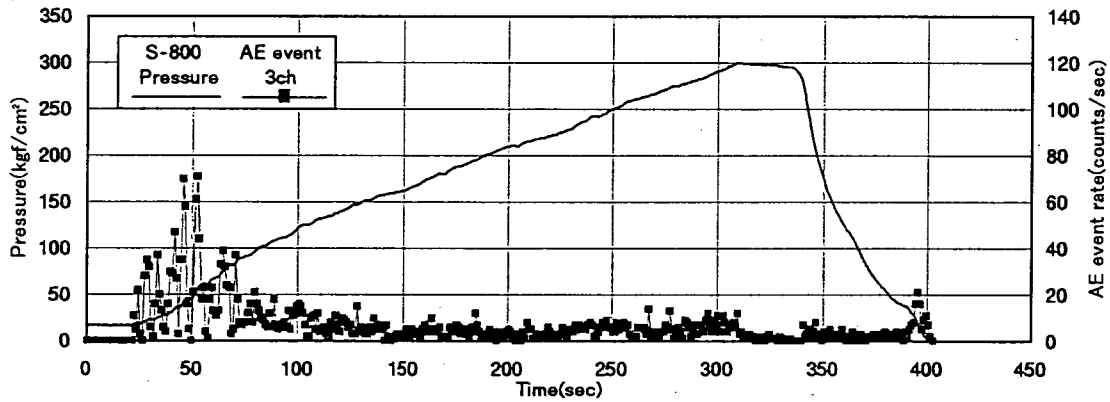
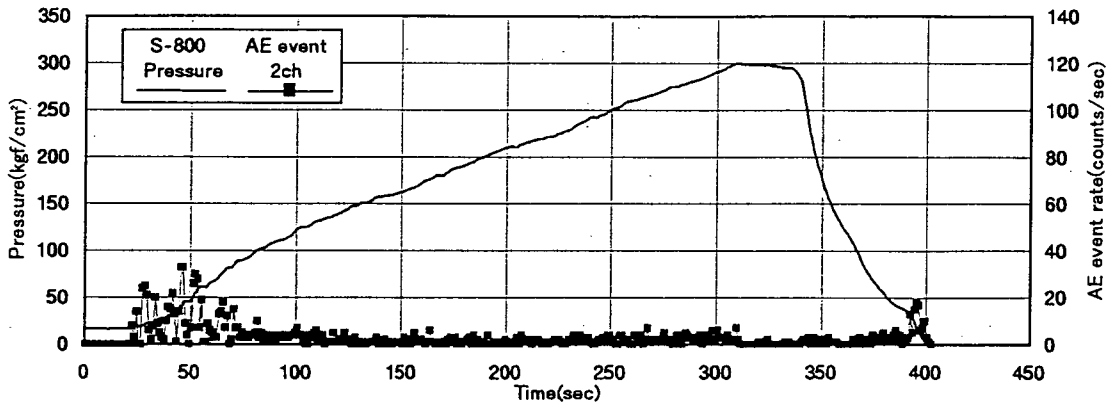
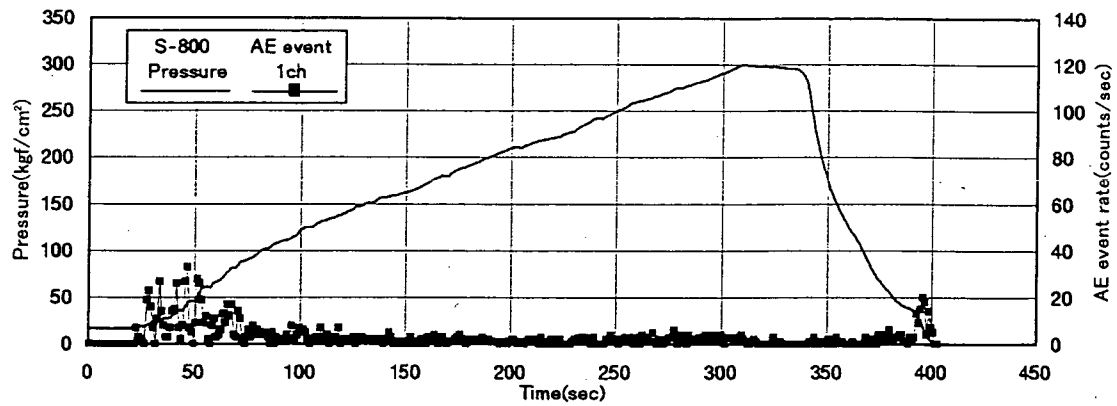
付図13 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 122s8-1 再開口1回目)



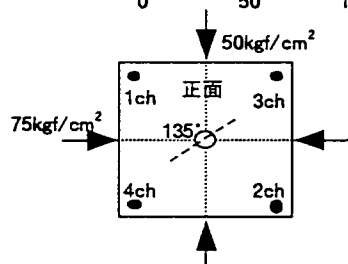
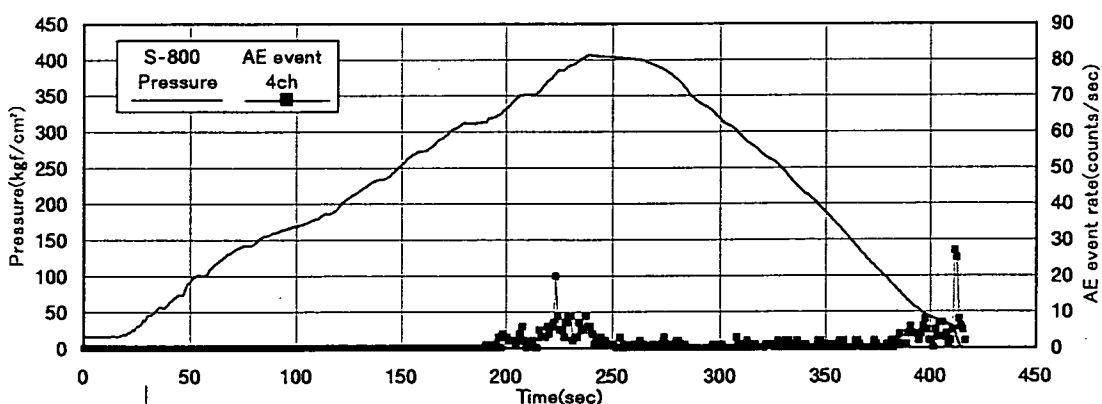
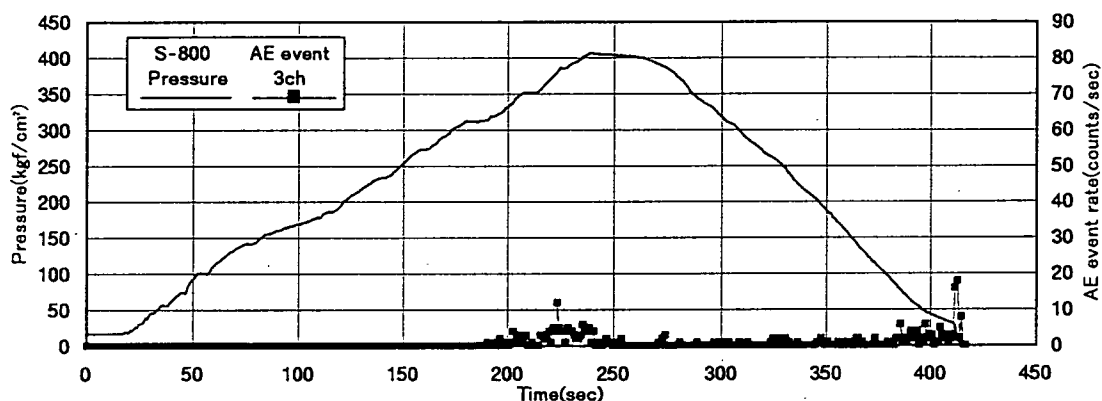
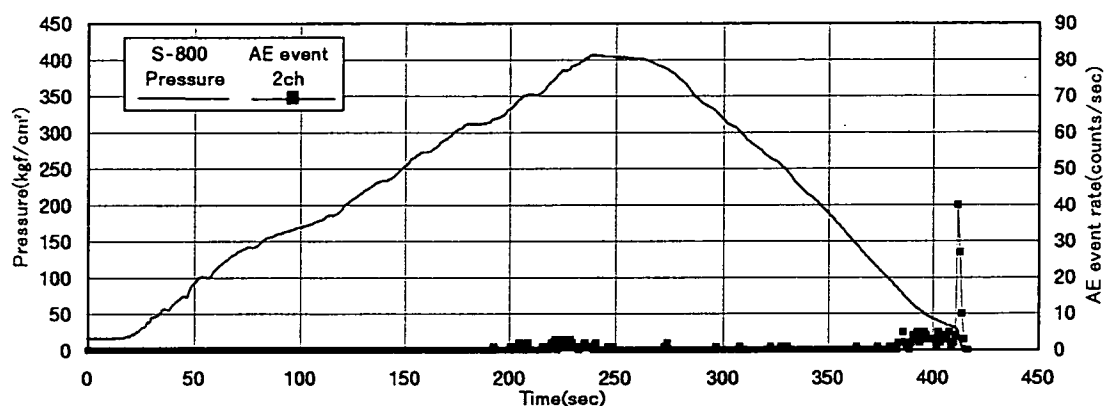
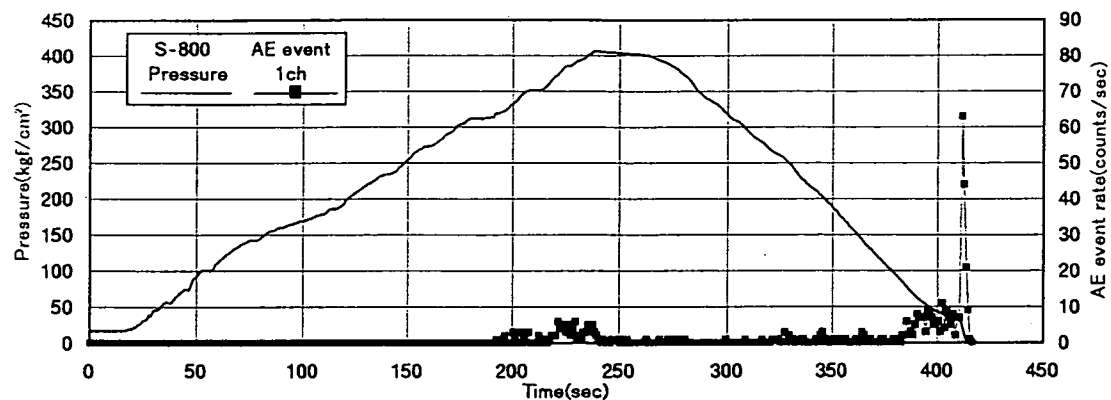
付図14 荷重圧とAEの発生数との関係(試験 123s8-1 再開口1回目)



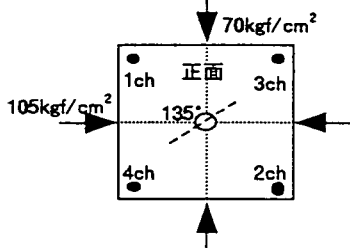
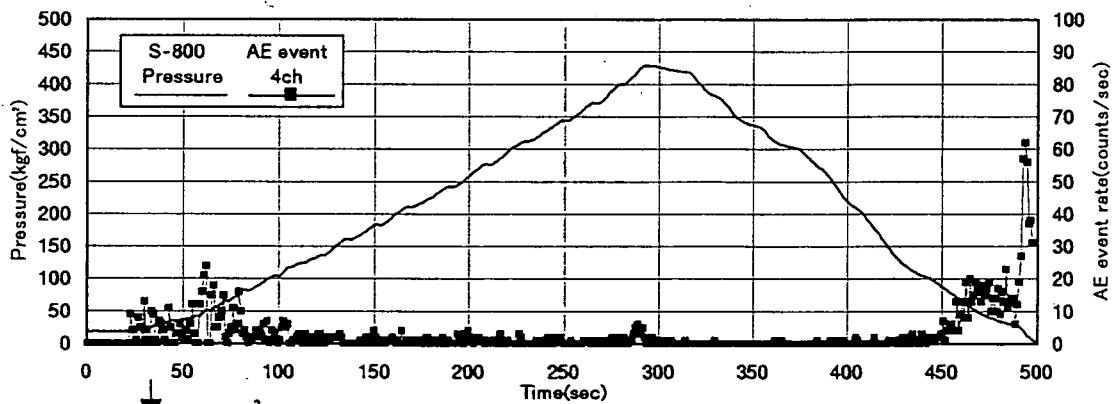
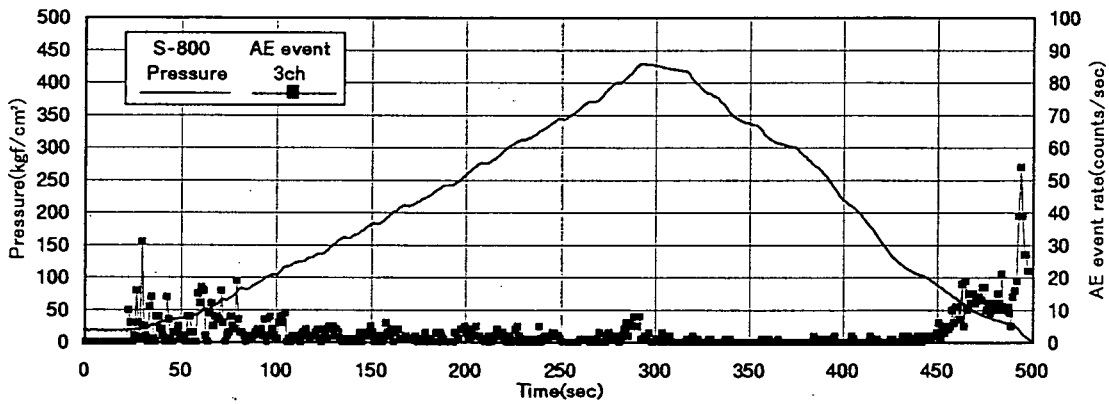
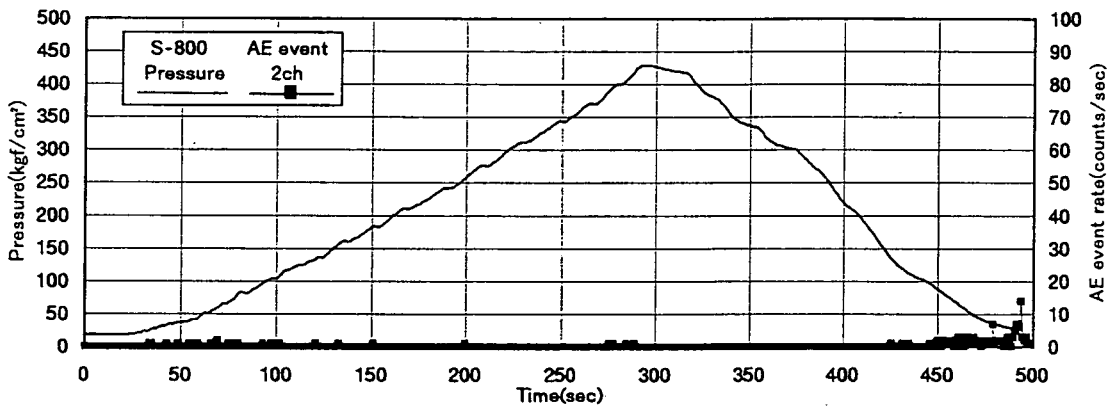
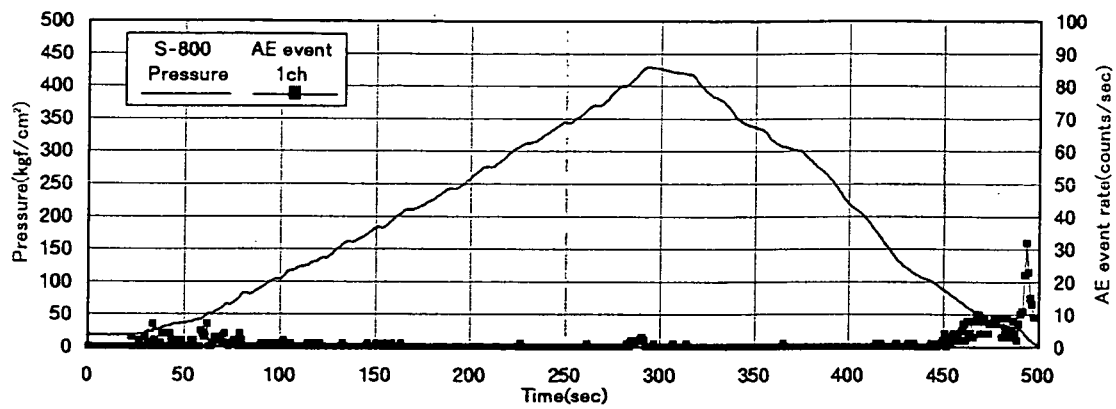
付図15 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 124s8-1 再開口1回目)



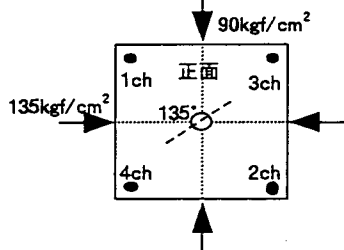
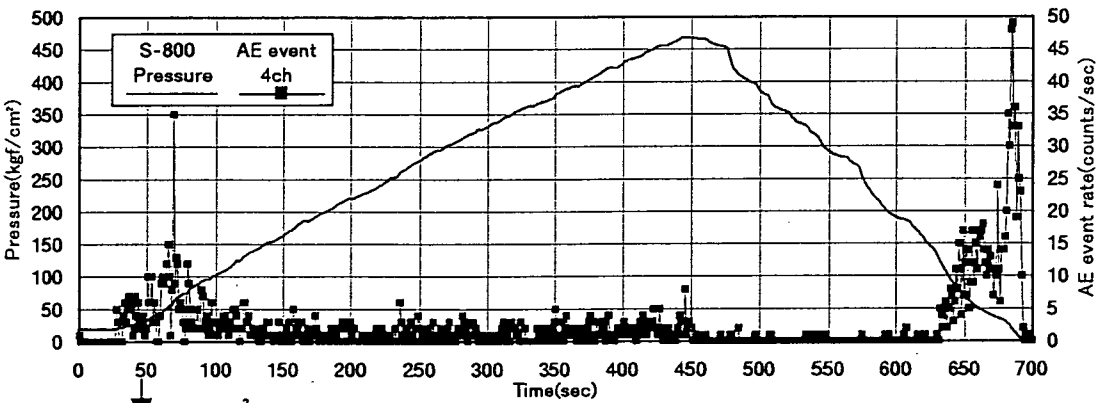
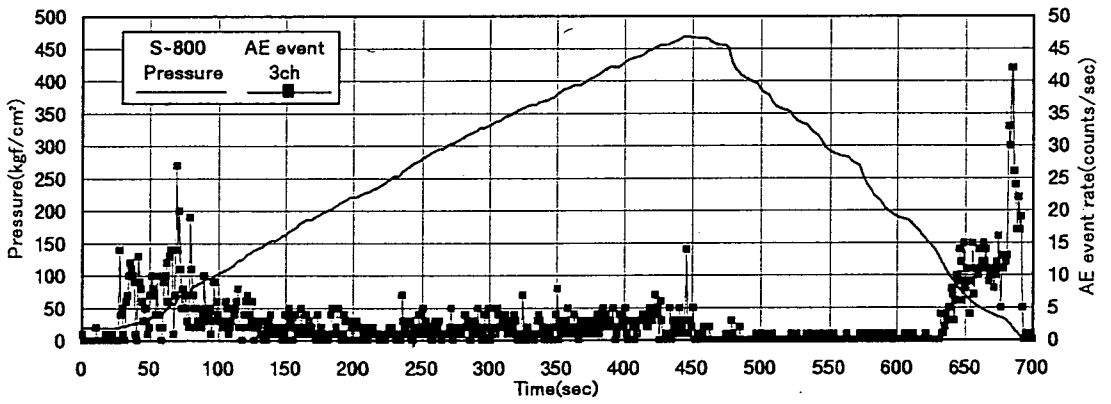
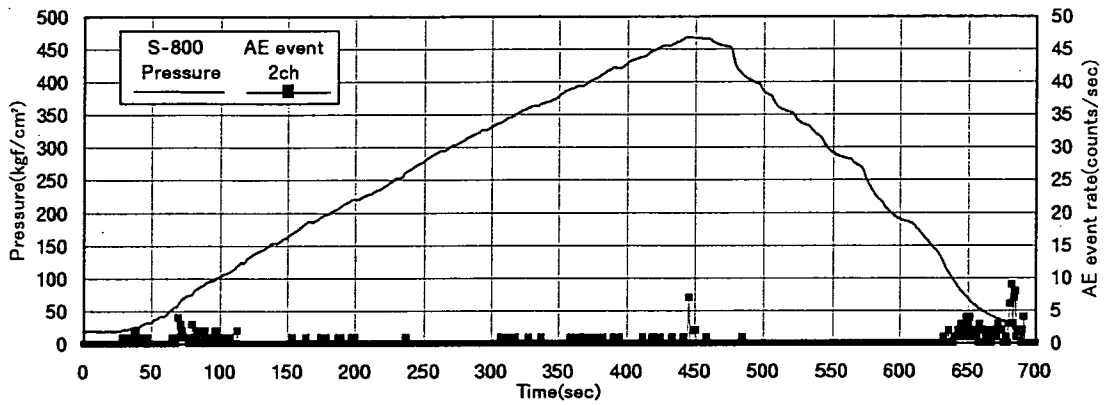
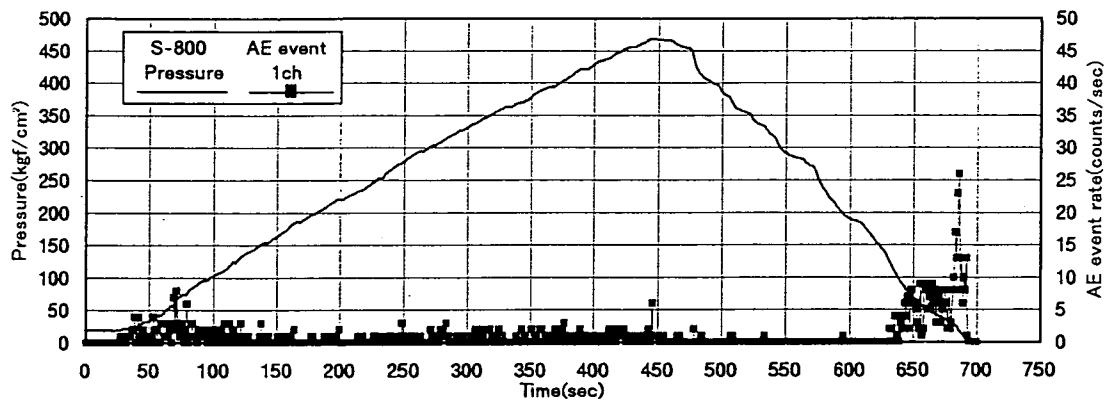
付図≡16 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 126s8-1 再開口1回目)



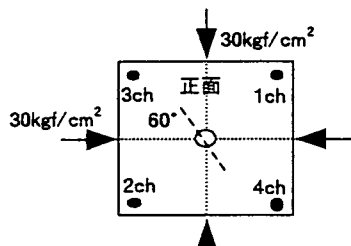
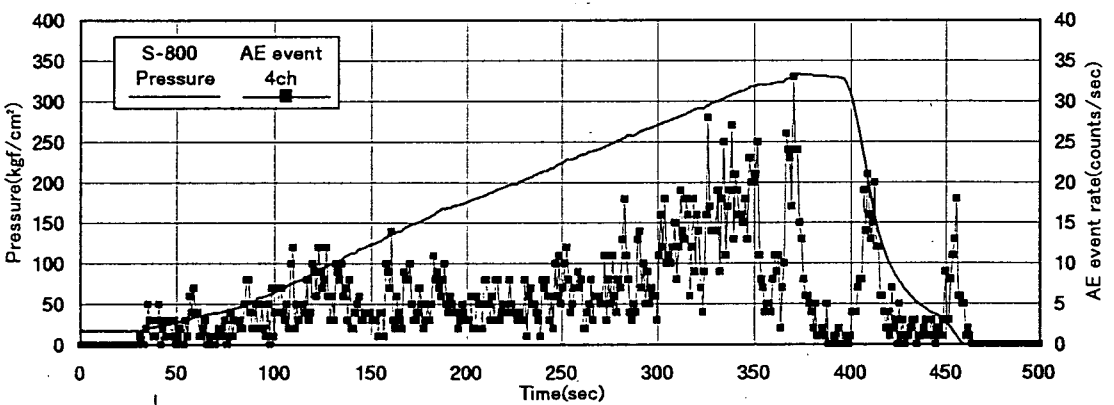
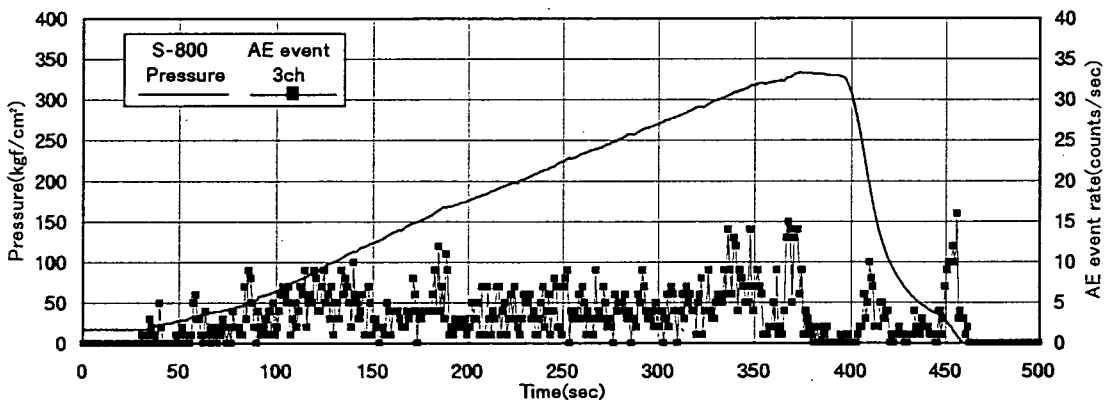
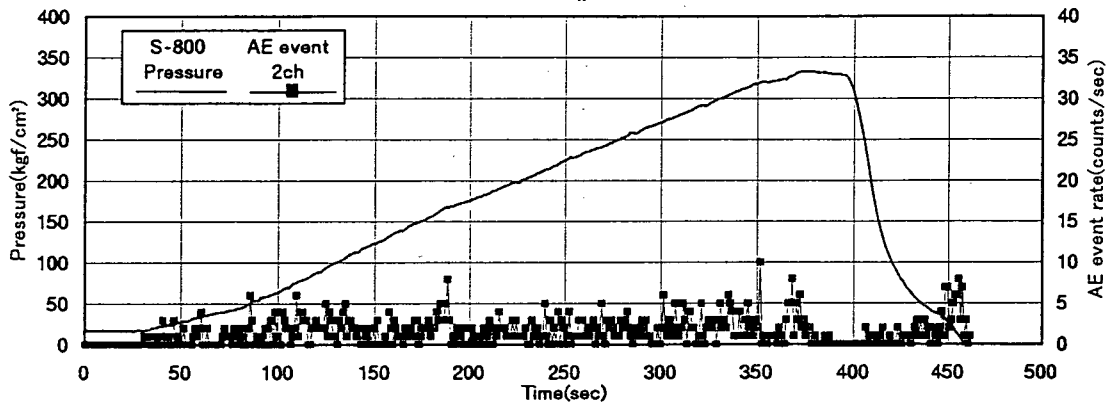
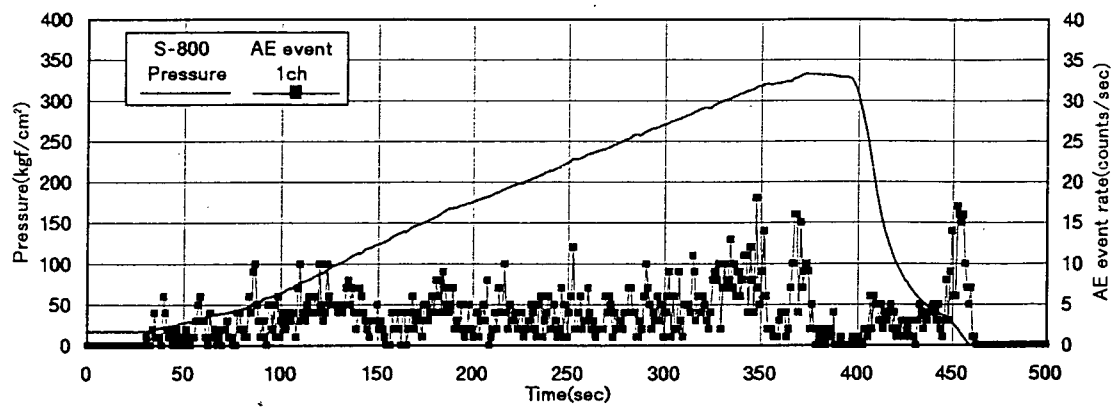
付図17 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 127s8-1 再開口1回目)



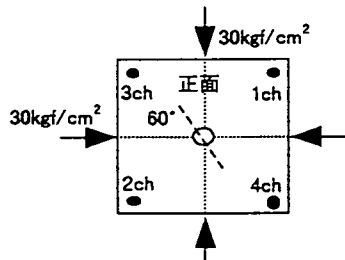
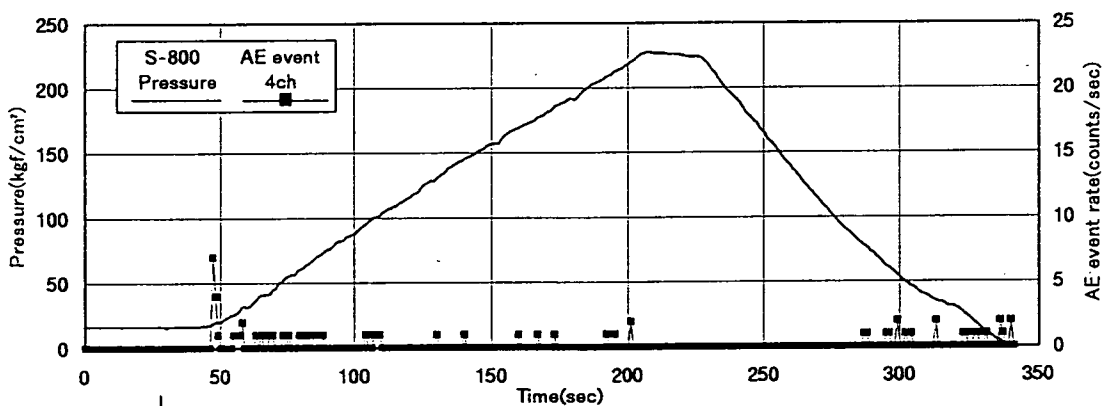
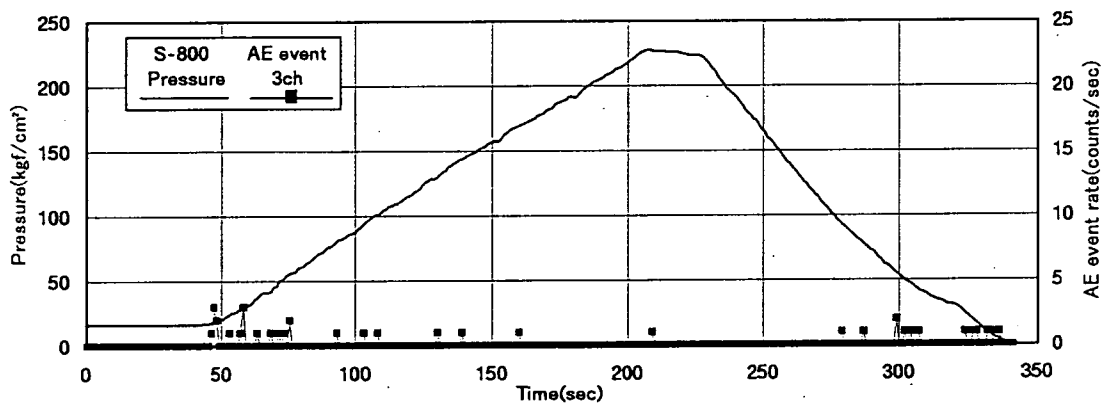
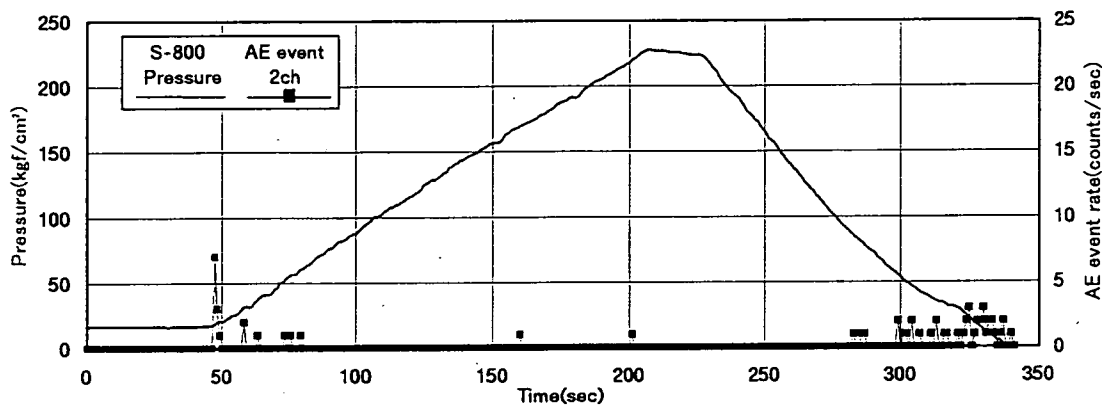
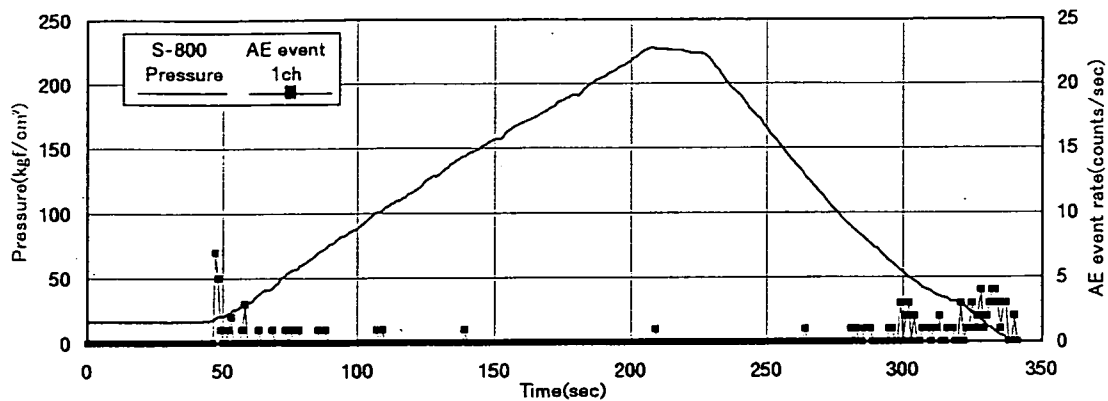
付図18 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 128s8-1 再開口1回目)



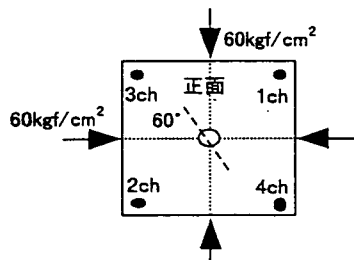
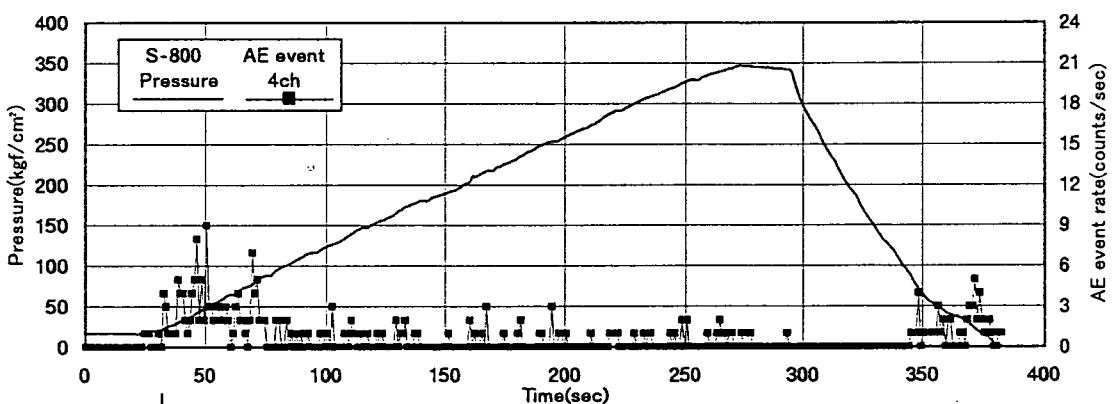
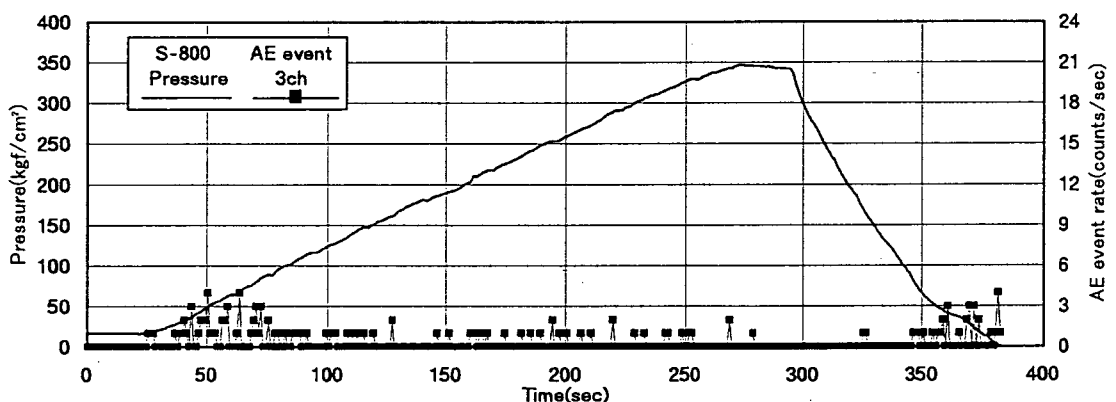
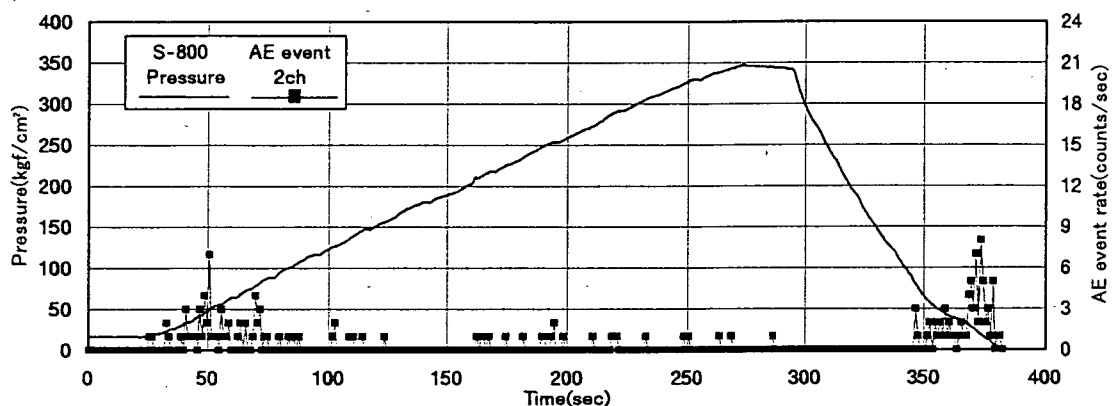
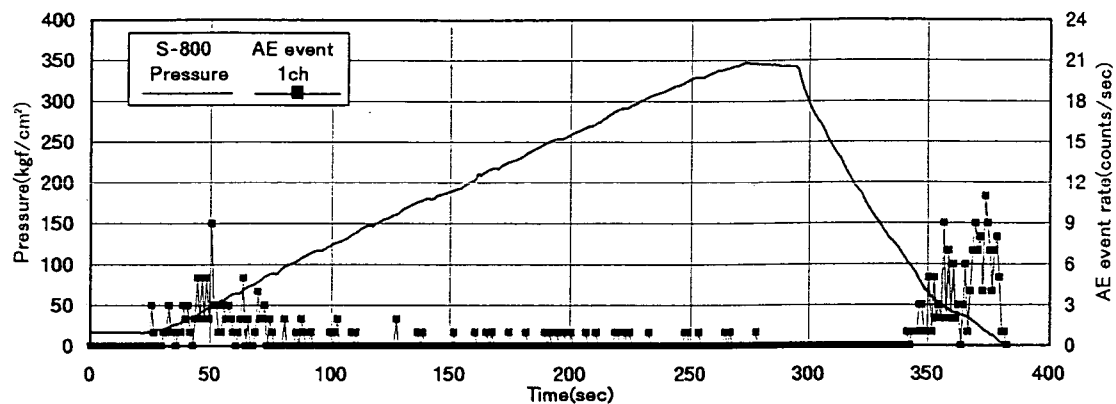
付図19 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 129s8-1 再開口1回目)



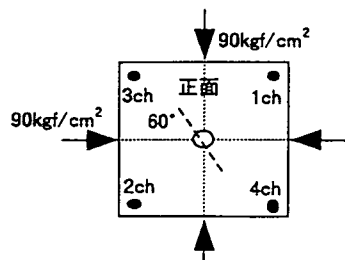
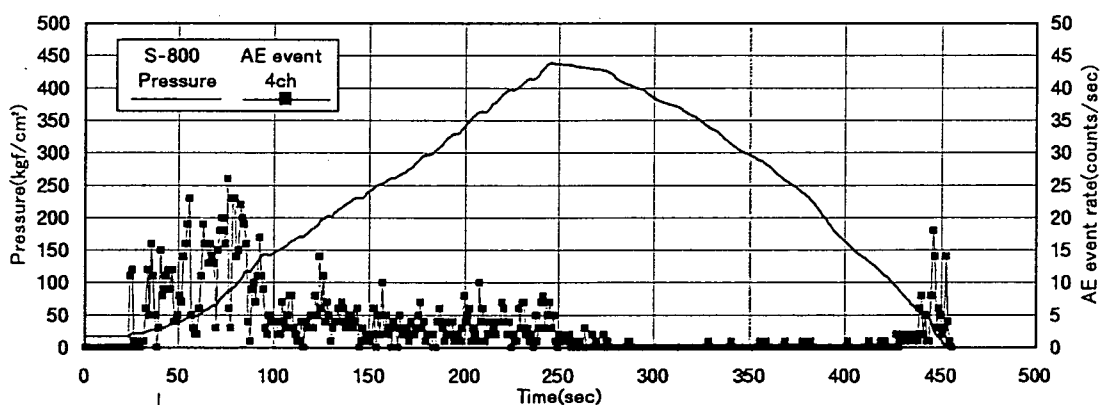
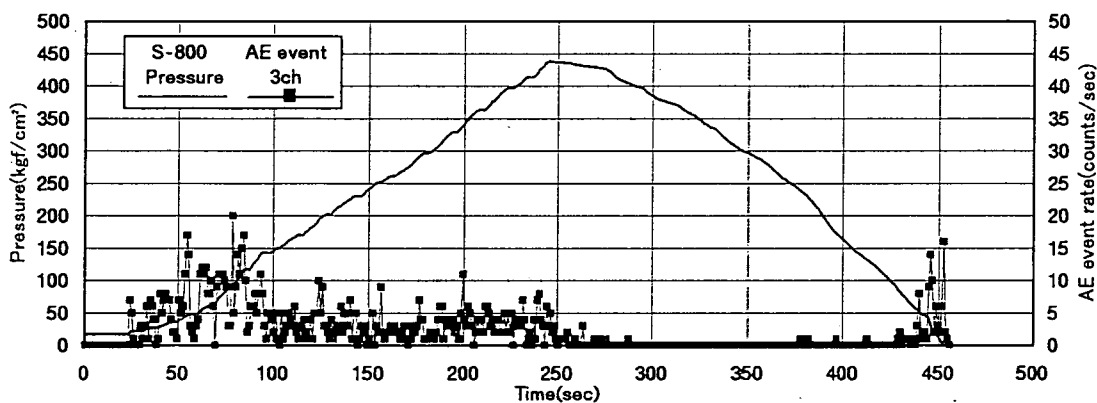
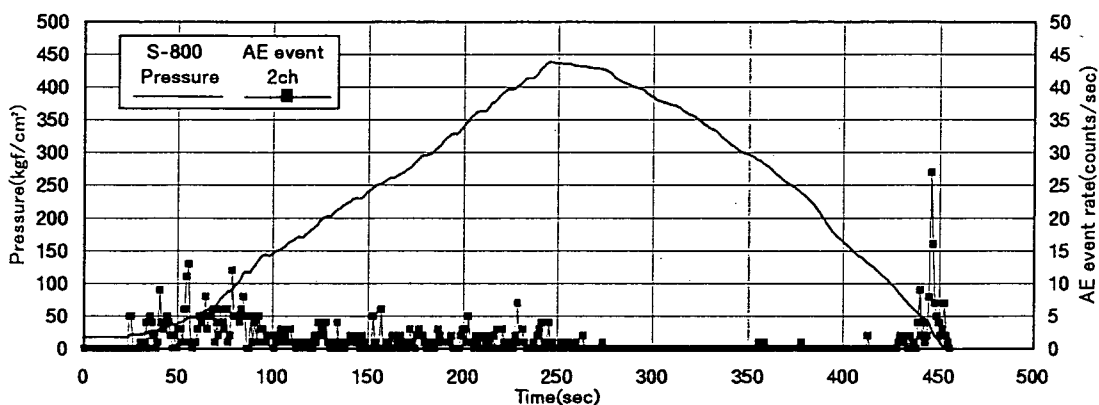
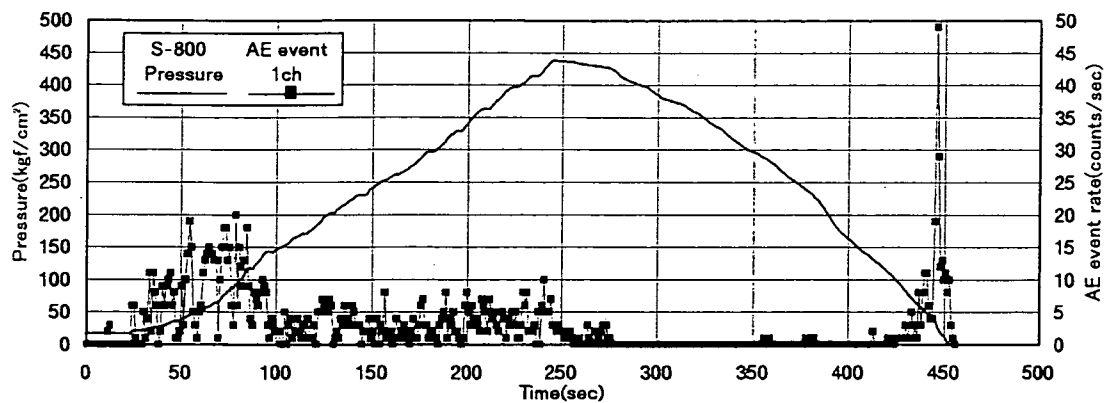
付図20 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 131s8-1 破碎)



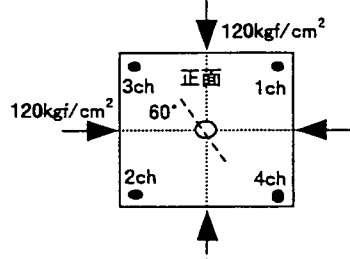
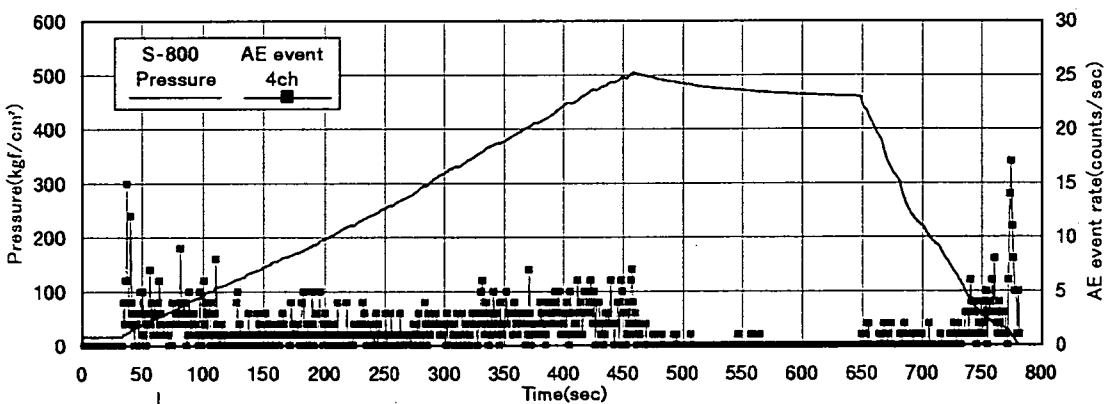
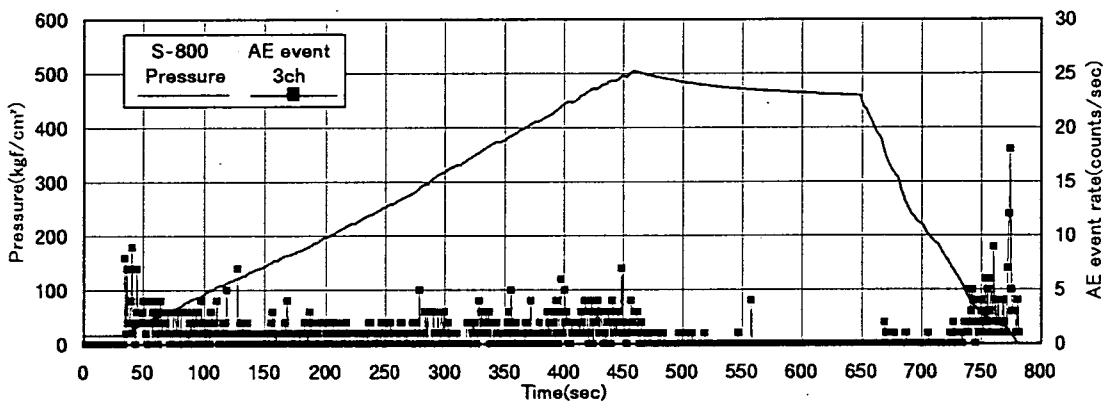
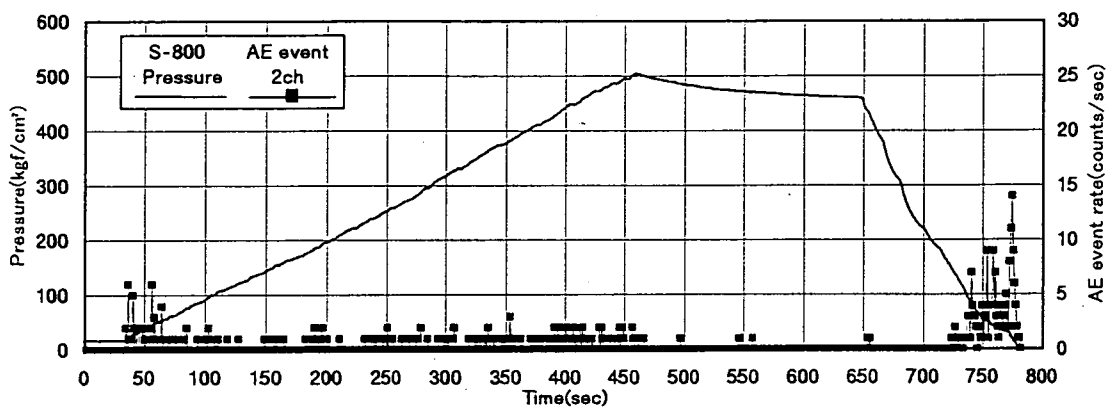
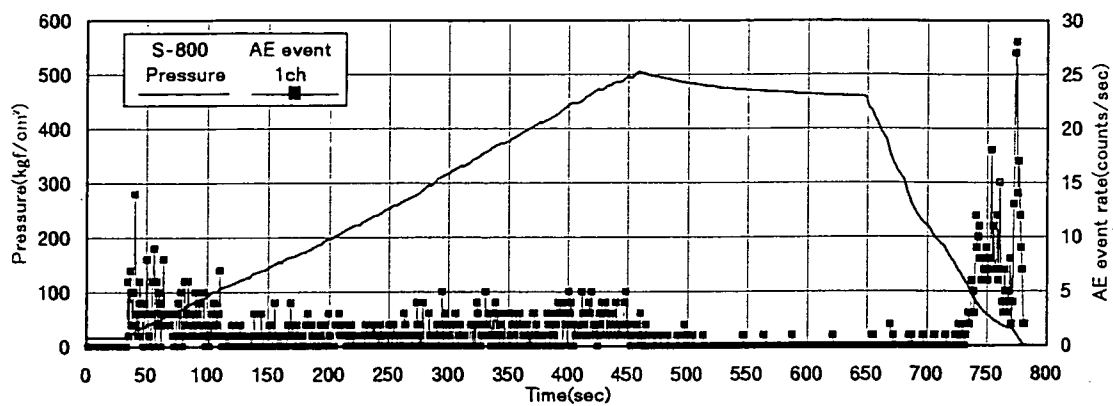
付図-21 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 131s8-2 再開口1回目)



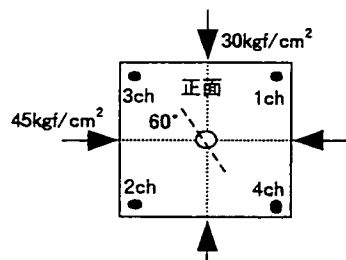
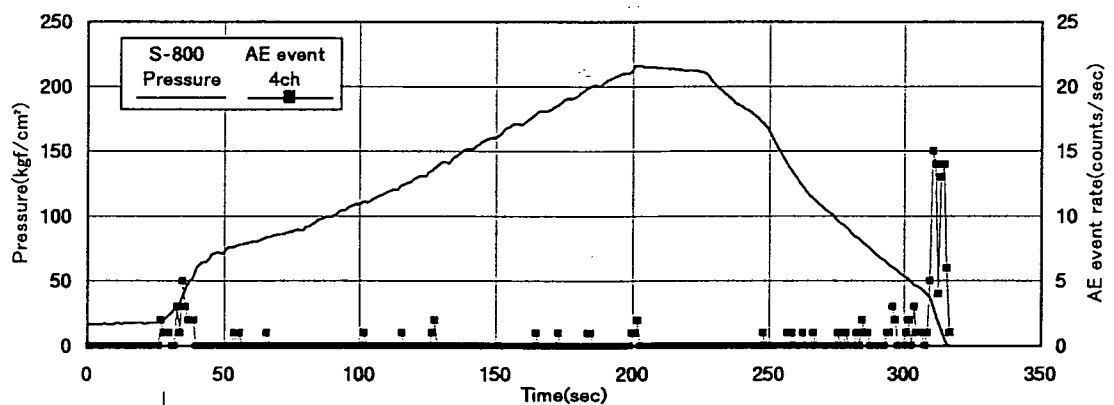
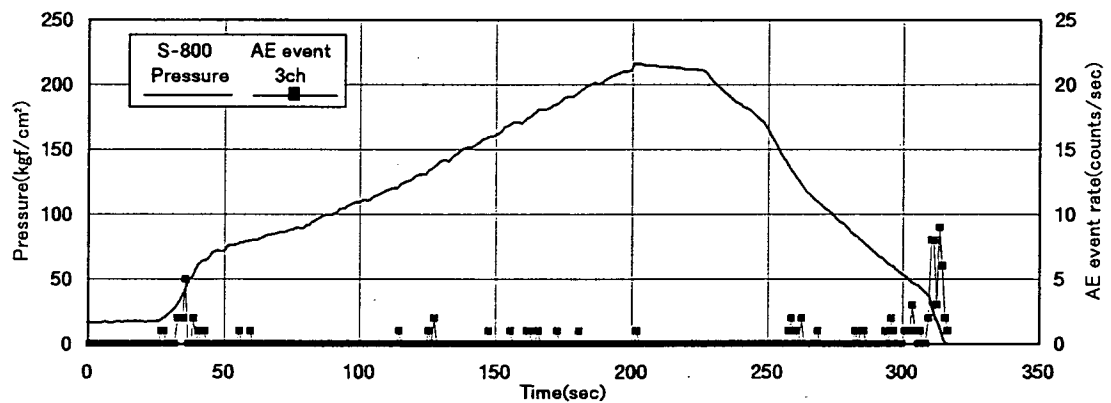
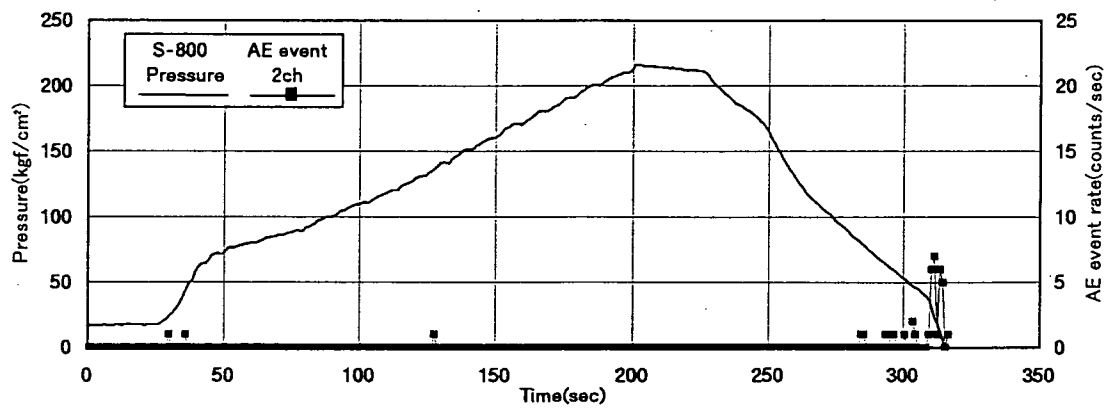
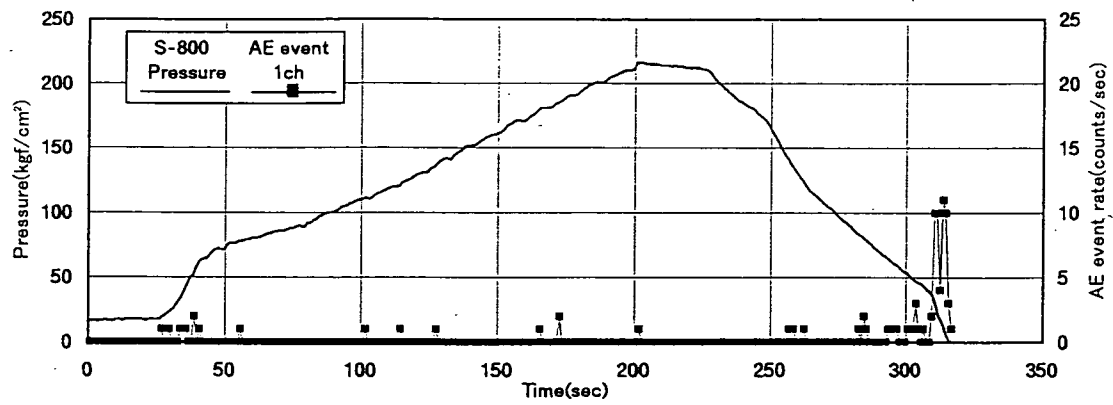
付図=22 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 132s8-1 再開口1回目)



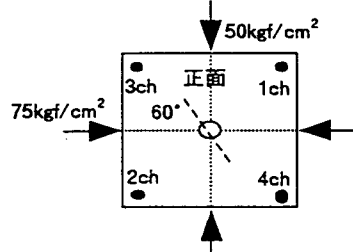
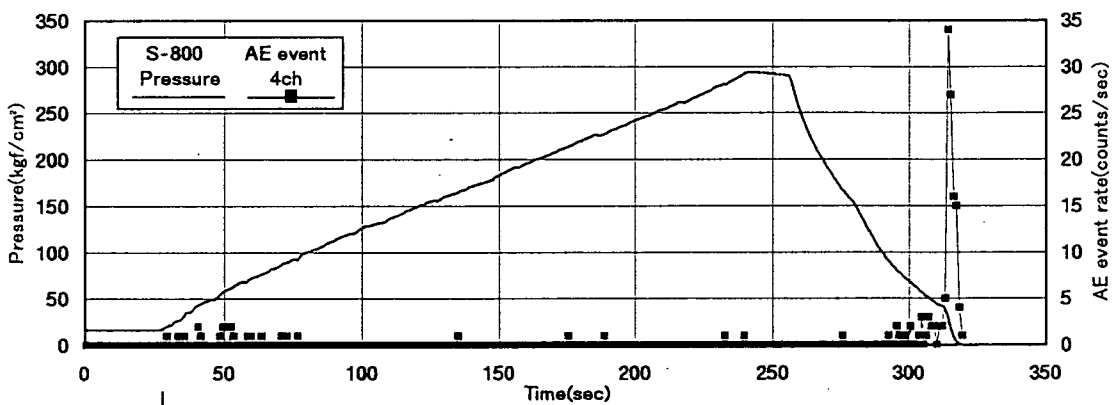
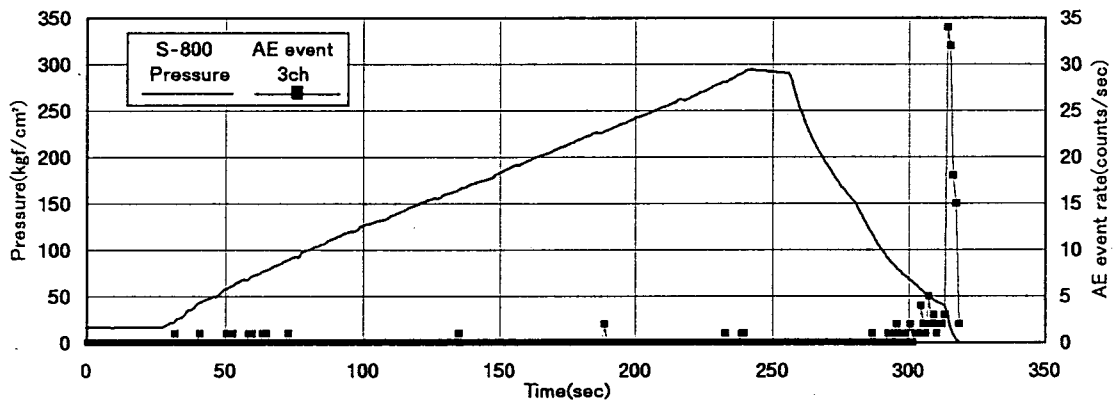
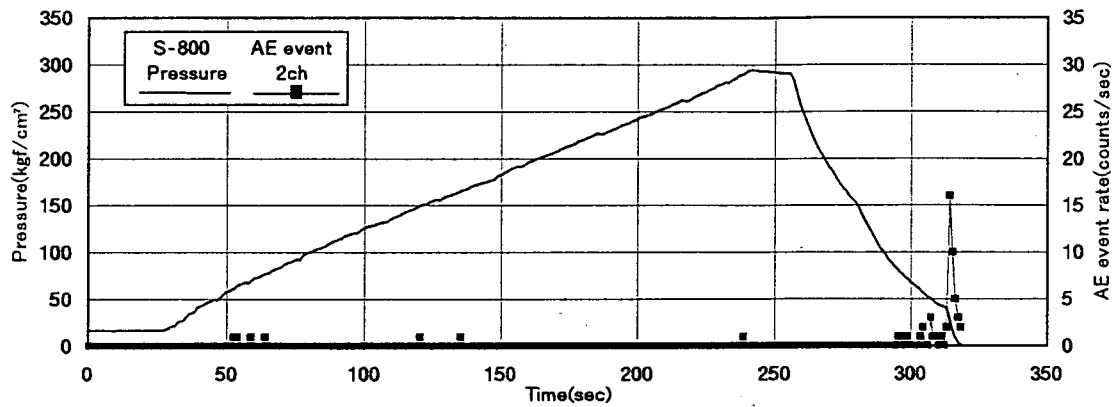
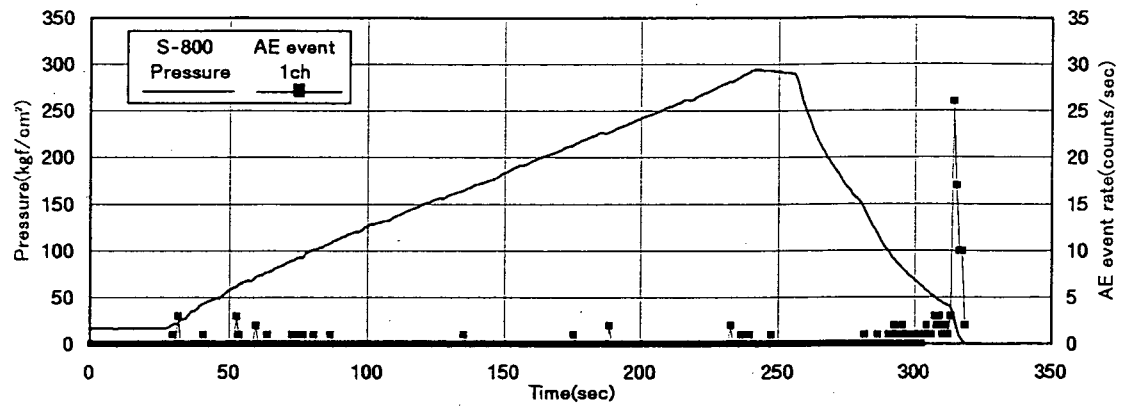
付図-23 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 133s8-1 再開口1回目)



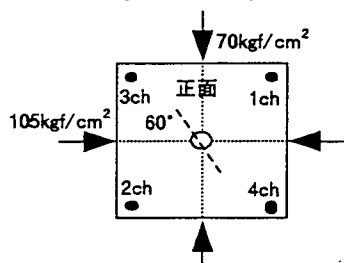
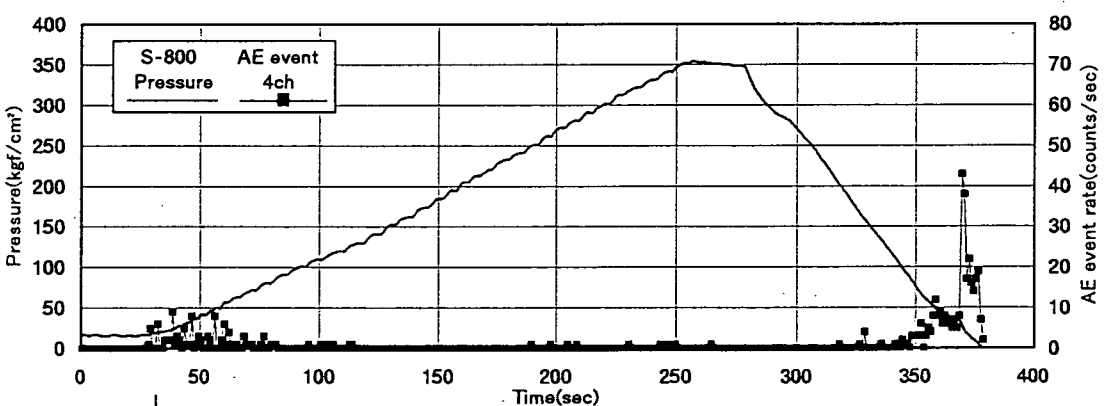
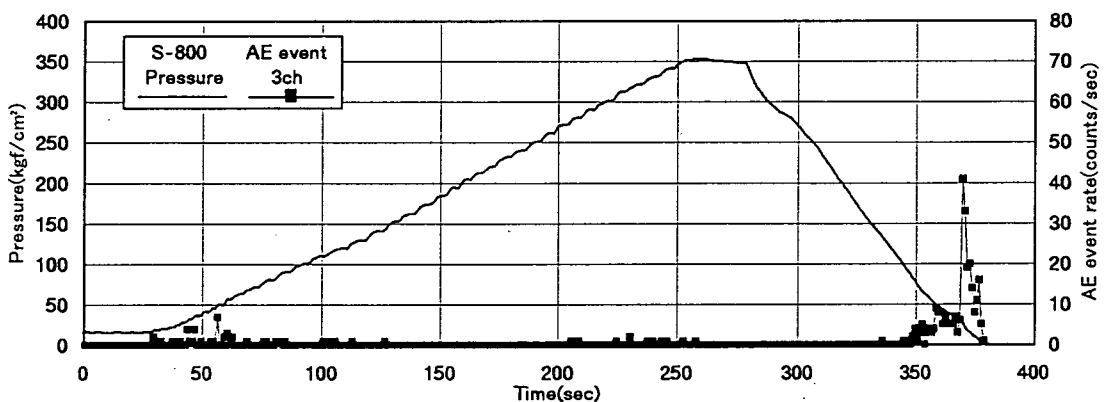
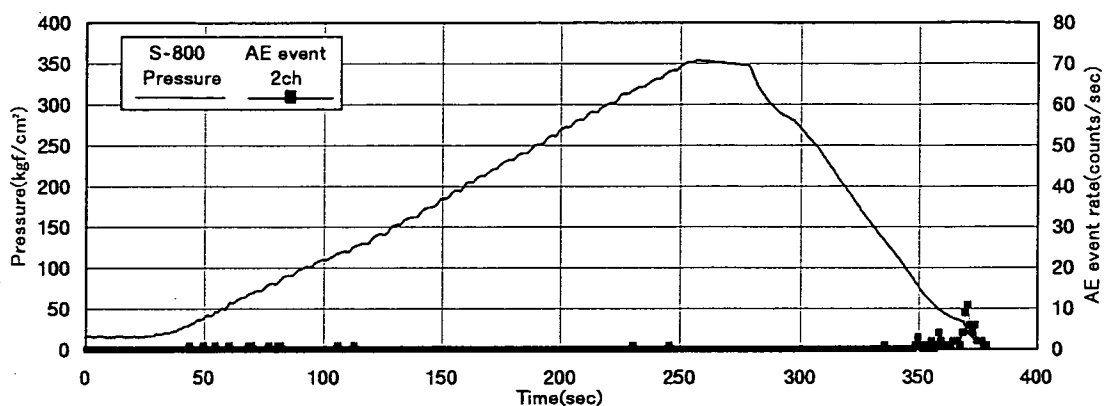
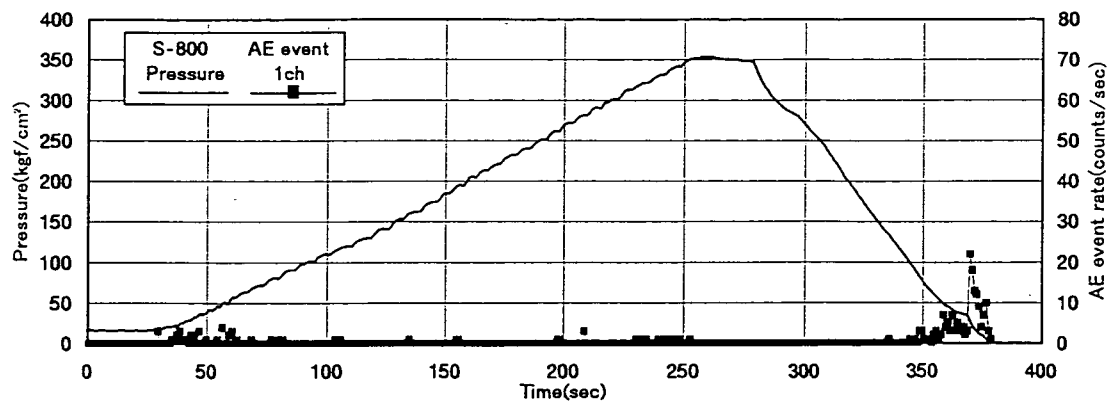
付図-24 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 134s8-1 再開口1回目)



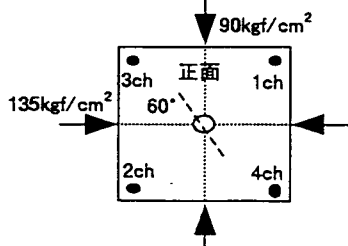
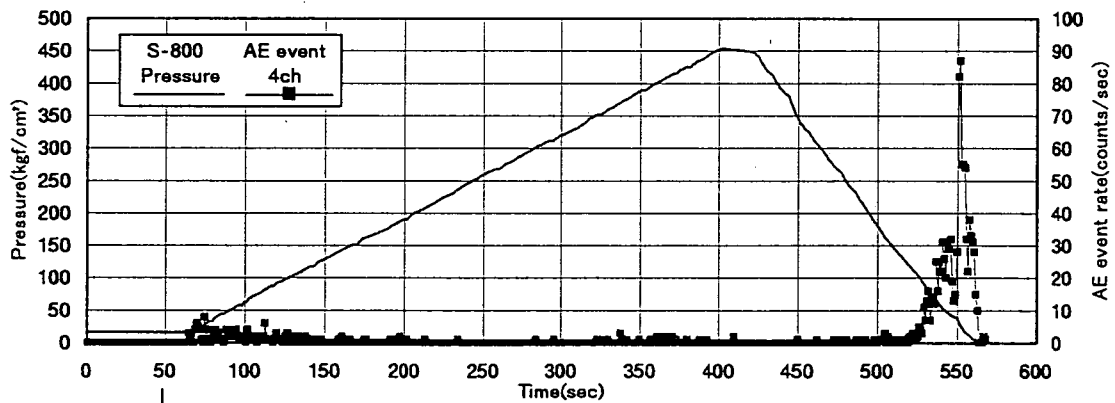
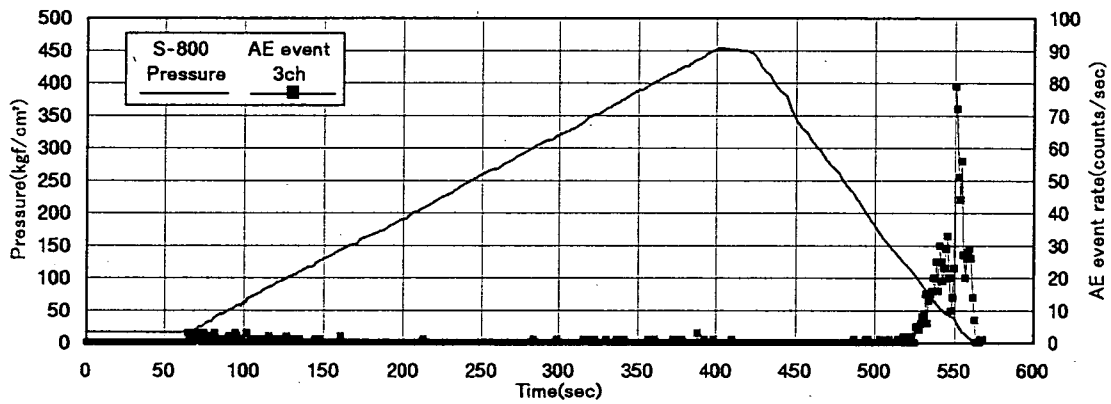
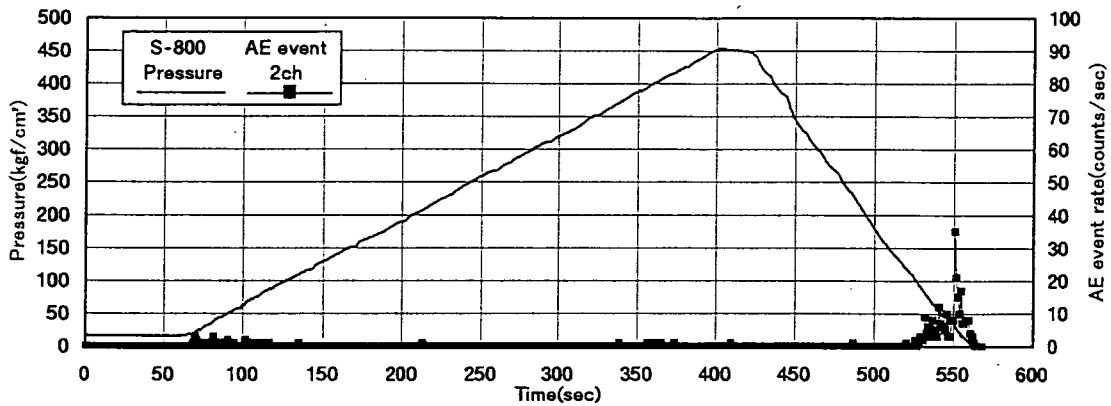
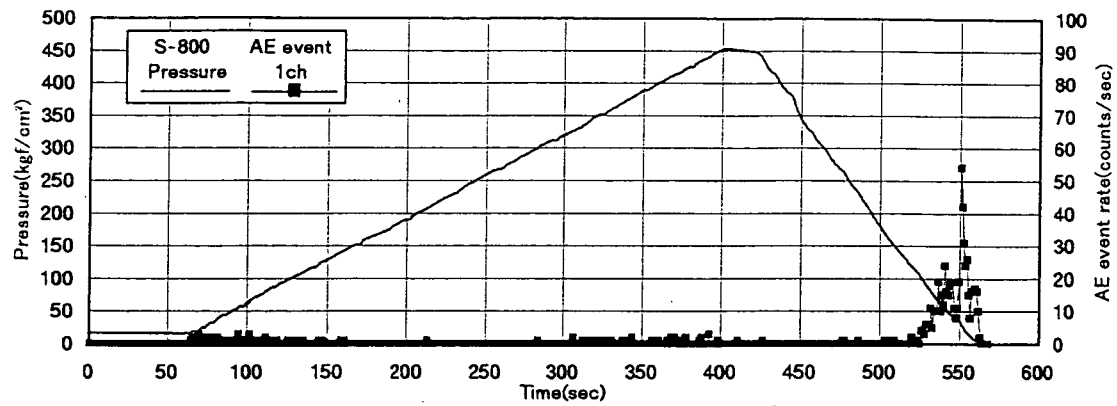
付図-25 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 136s8-1 再開口1回目)



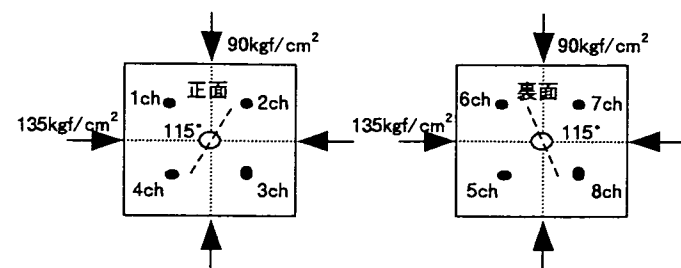
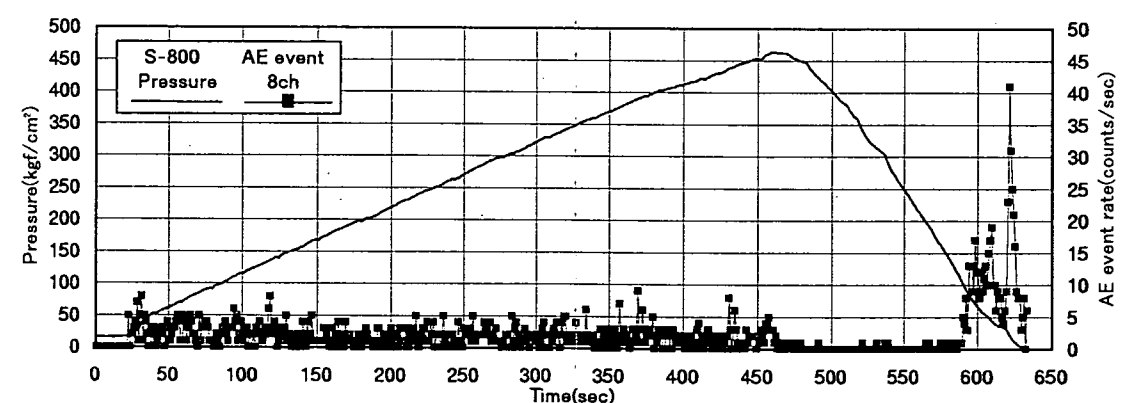
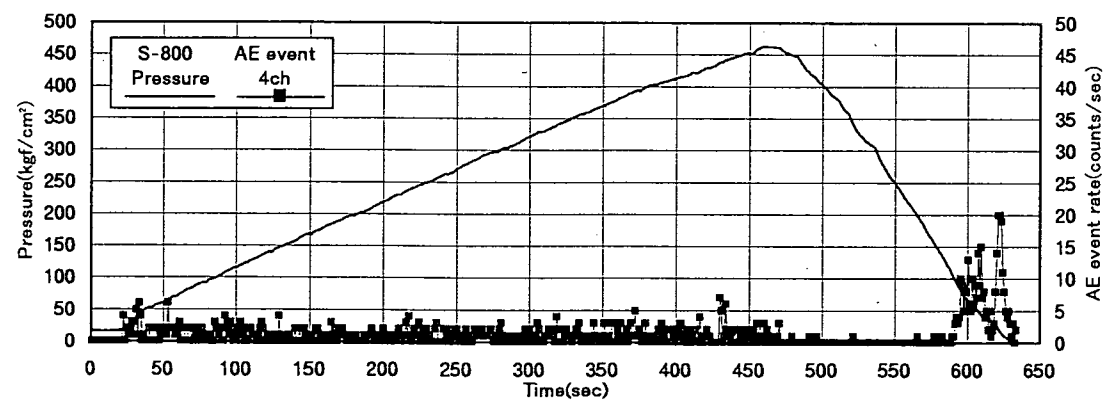
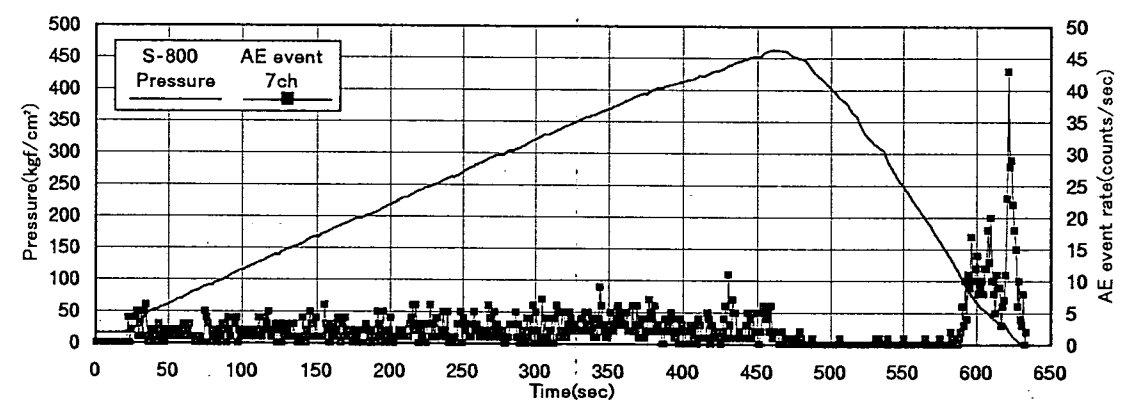
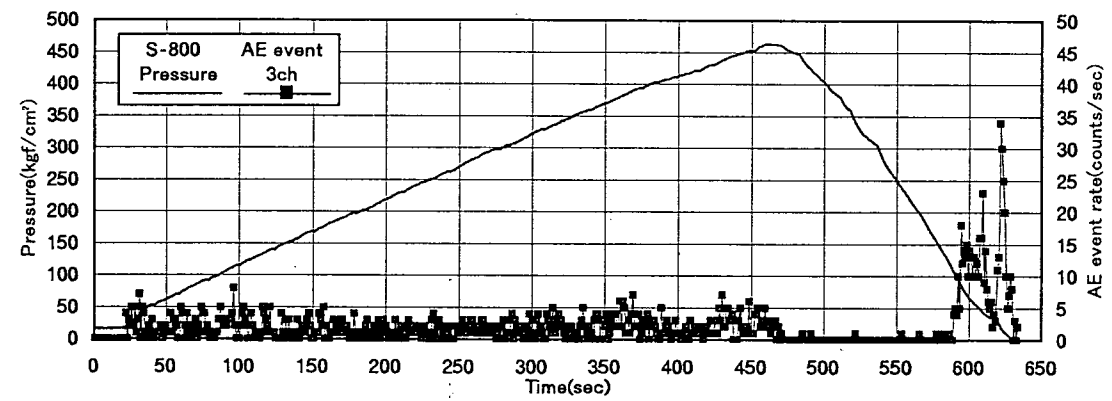
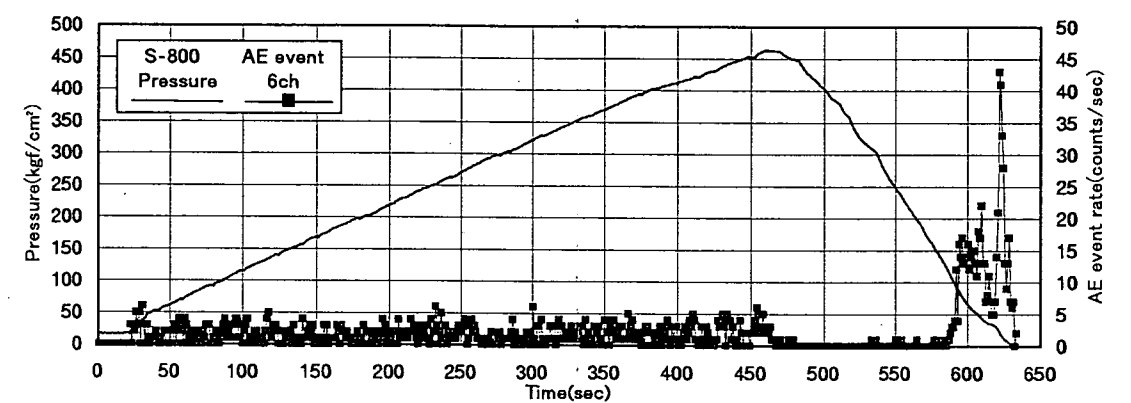
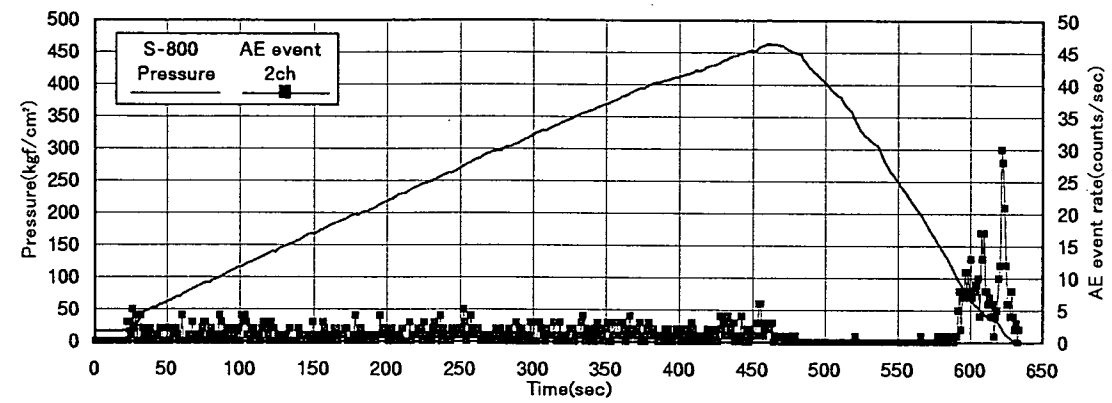
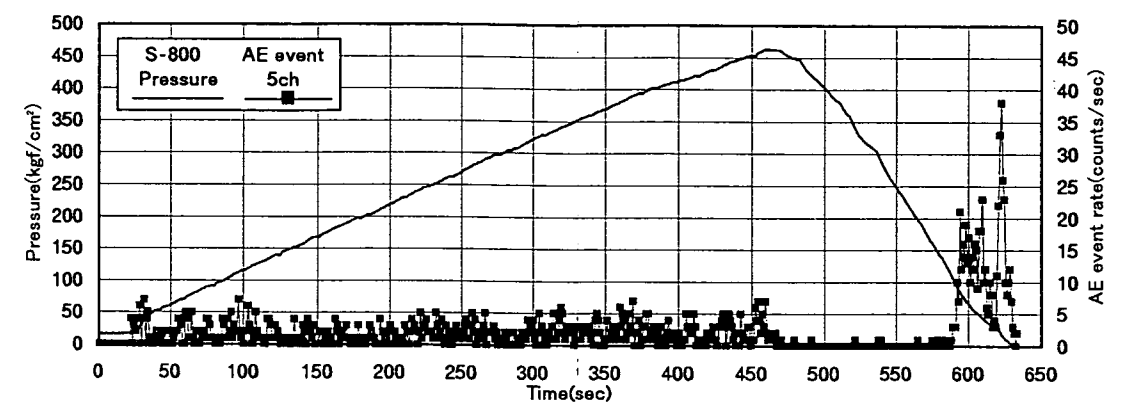
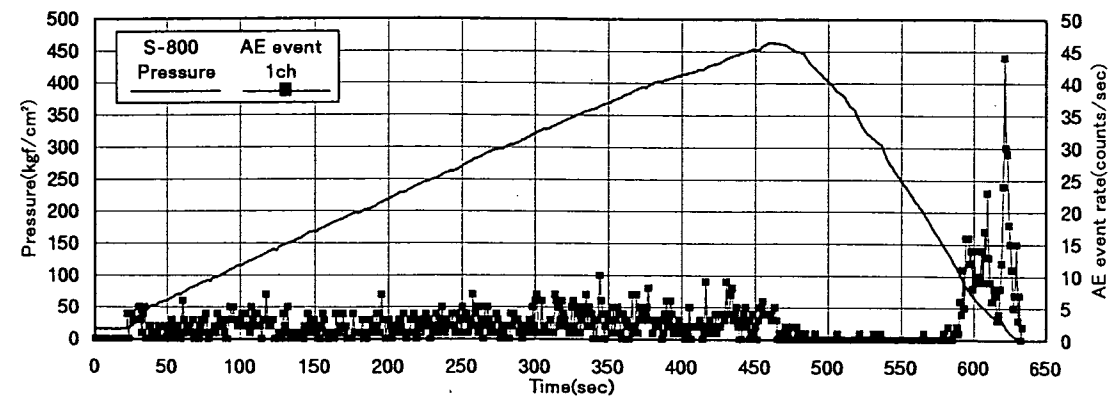
付図-26 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 137s8-1 再開口1回目)



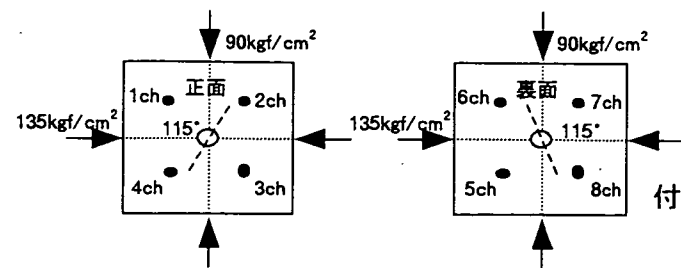
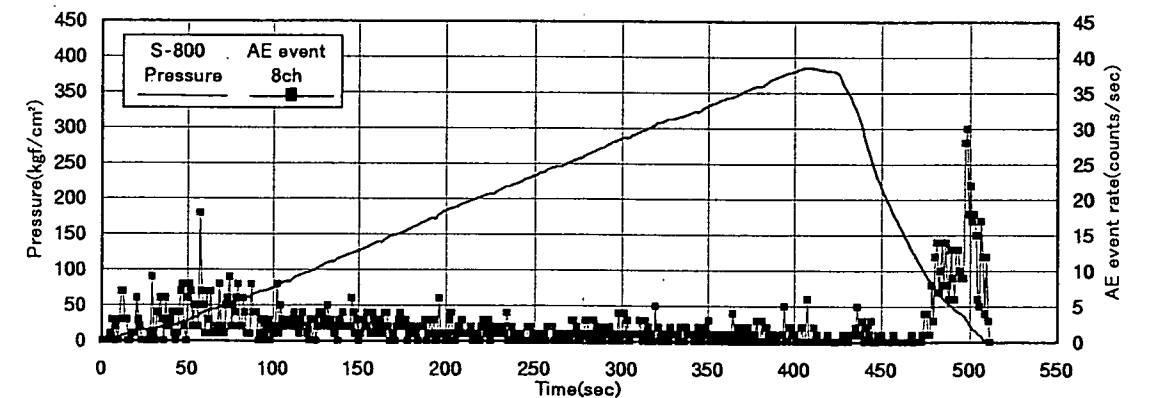
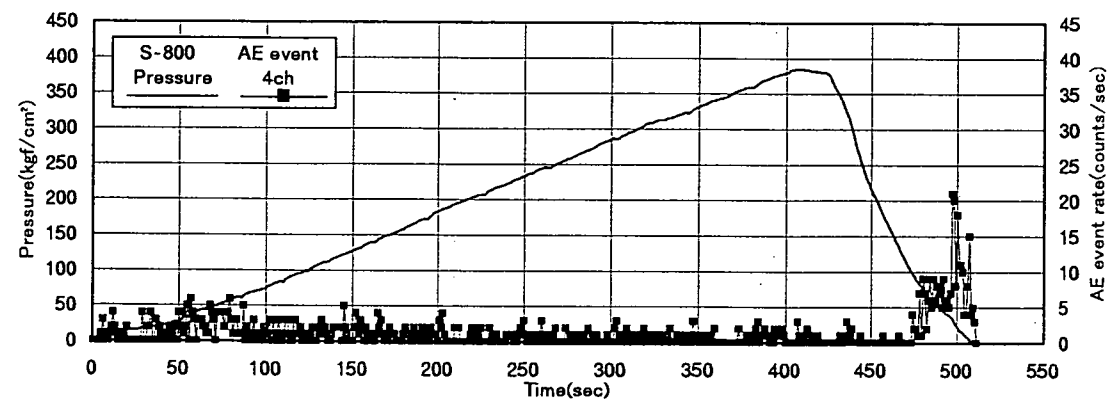
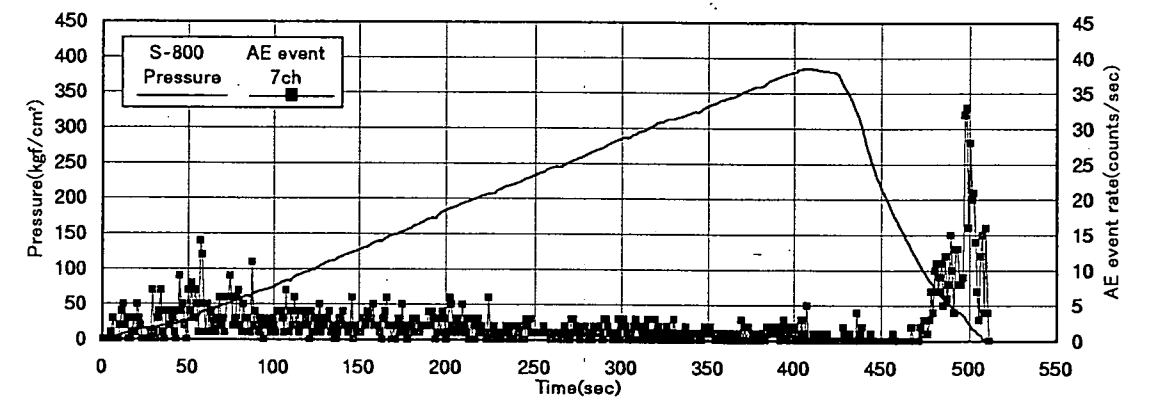
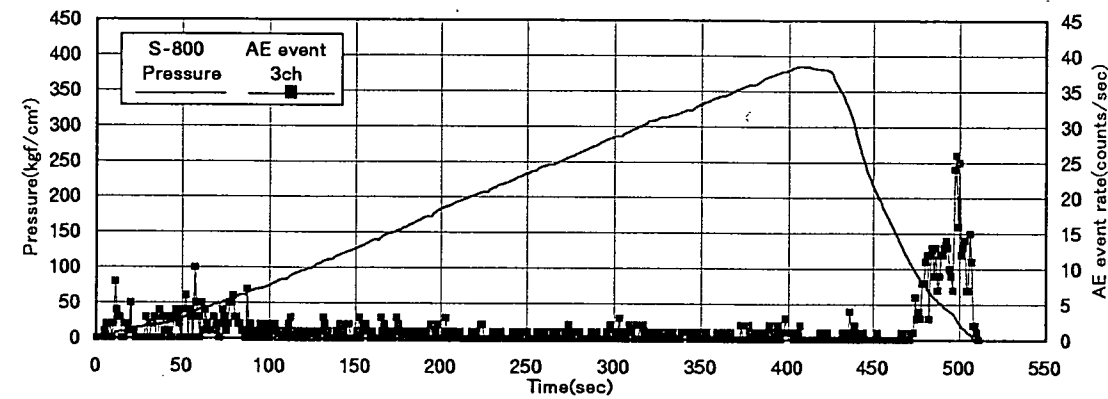
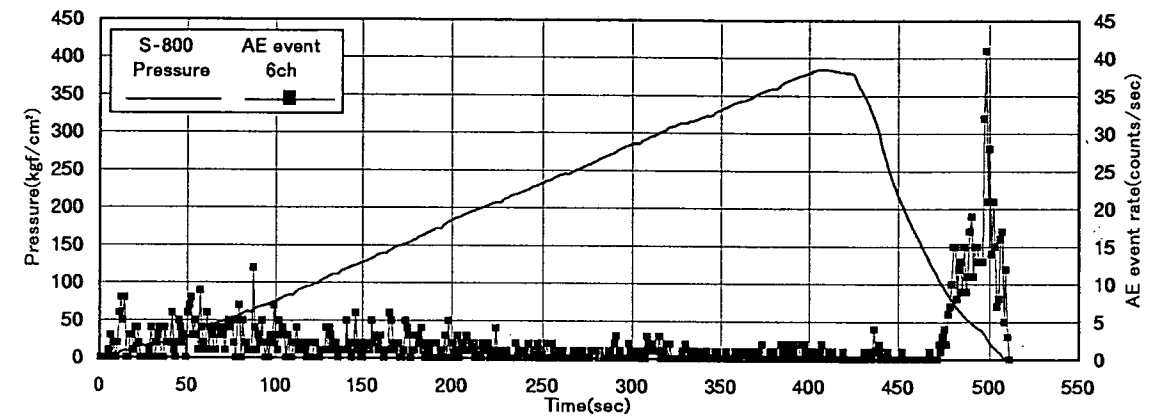
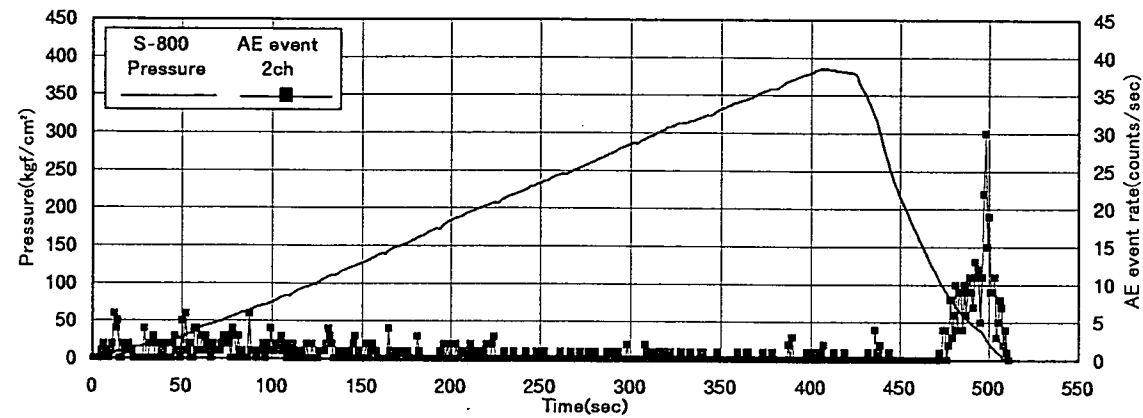
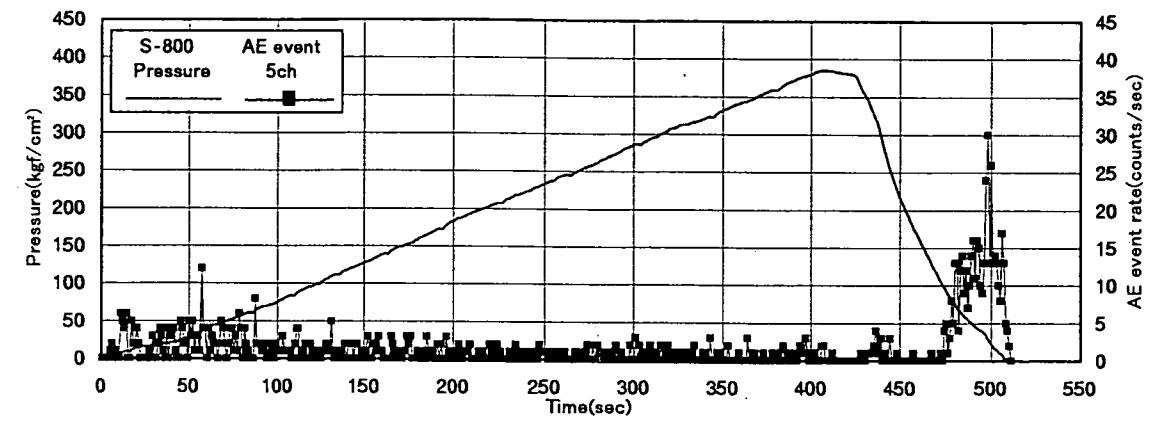
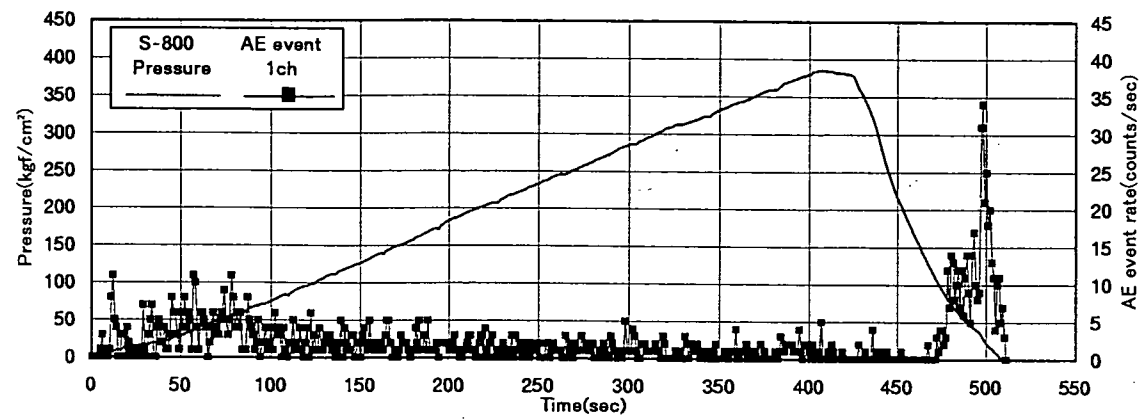
付図-27 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 138s8-1 再開口1回目)



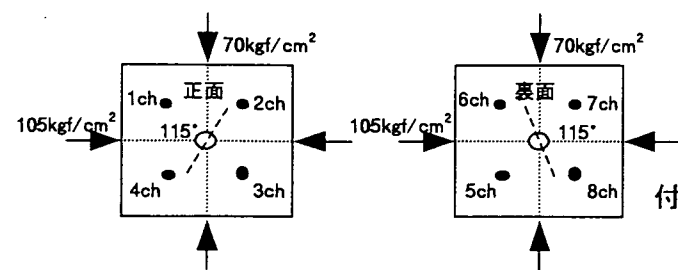
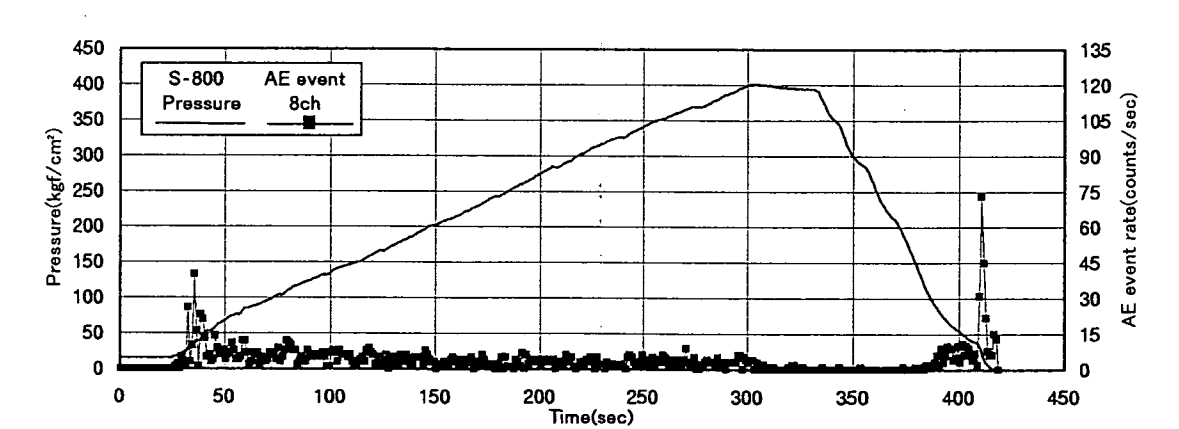
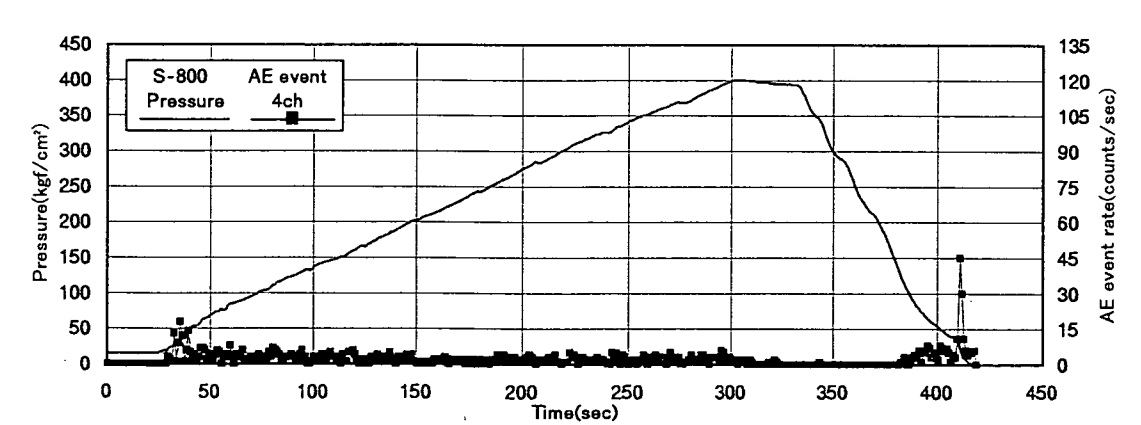
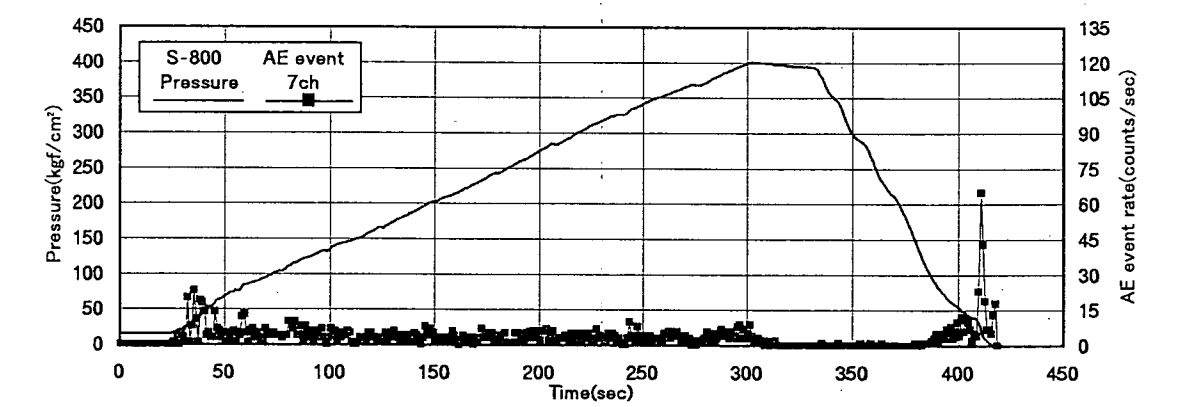
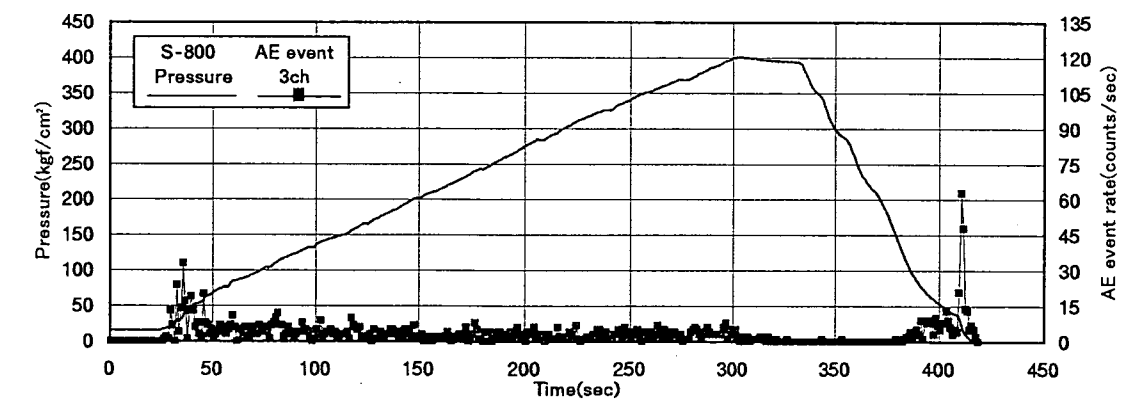
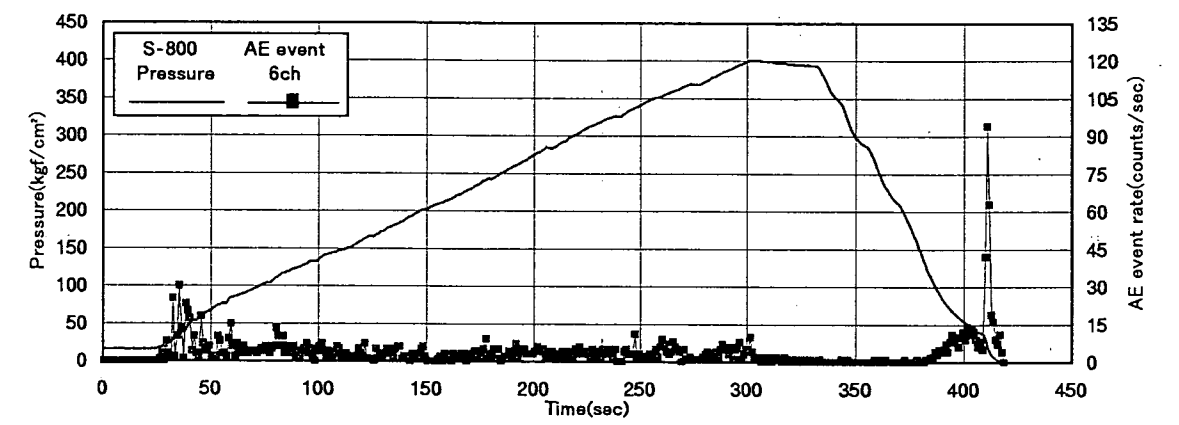
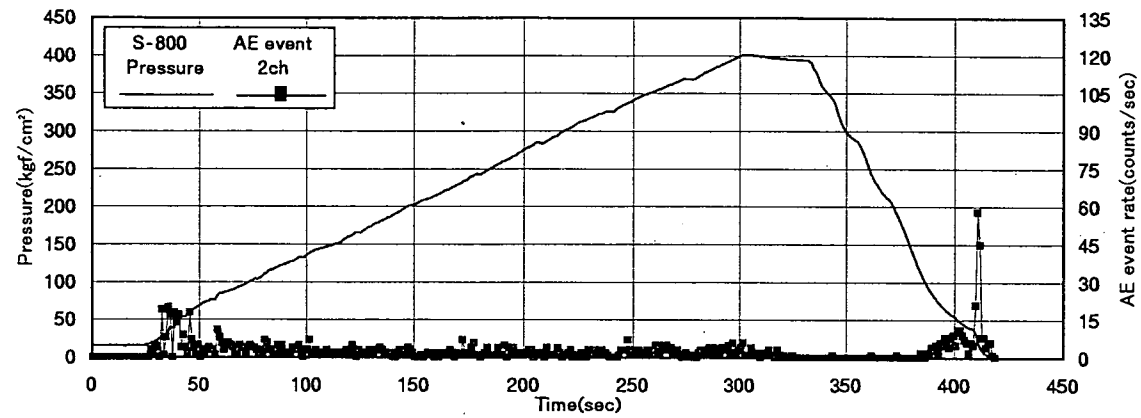
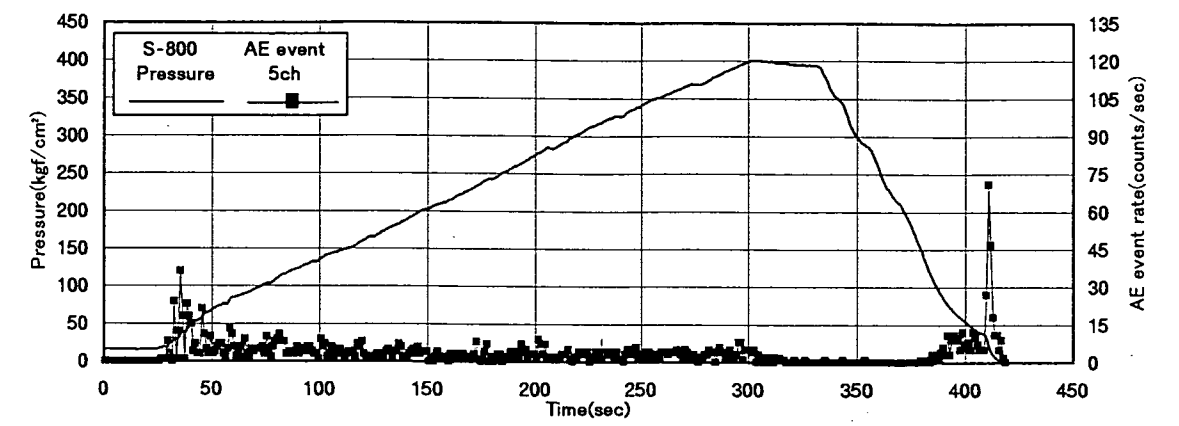
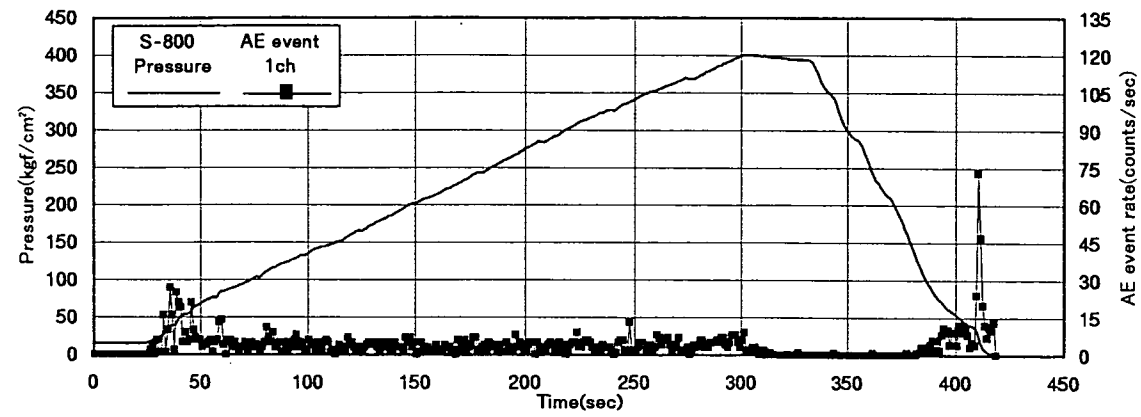
付図=28 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 139s8-1 再開口1回目)



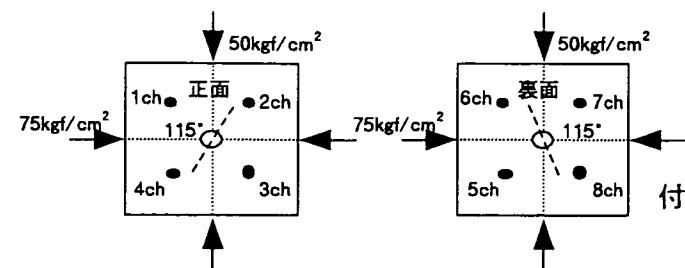
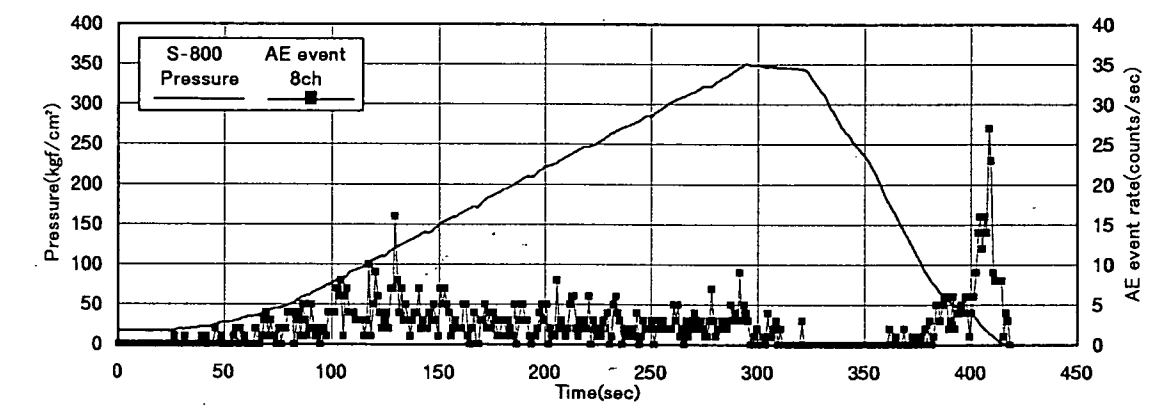
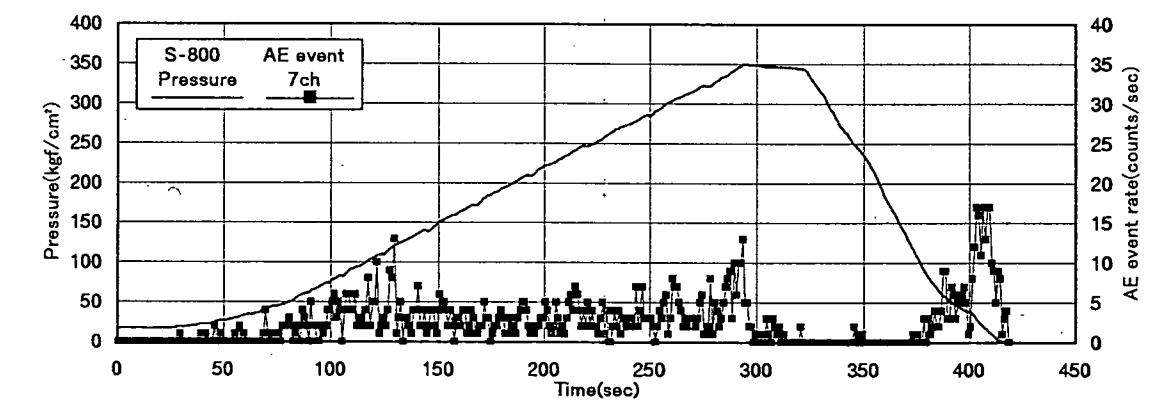
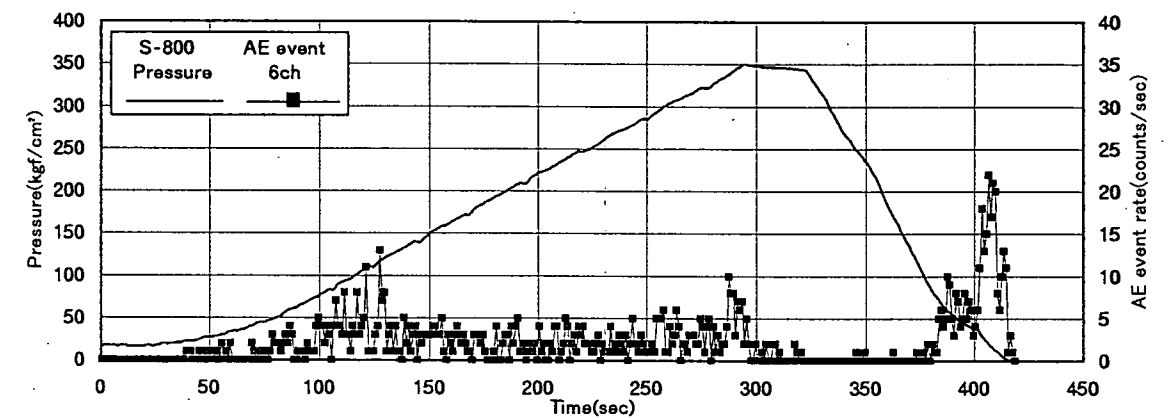
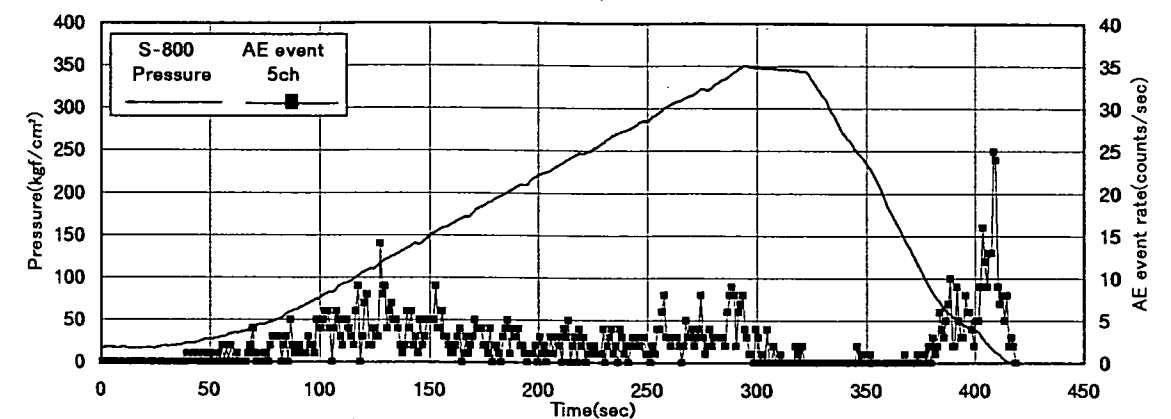
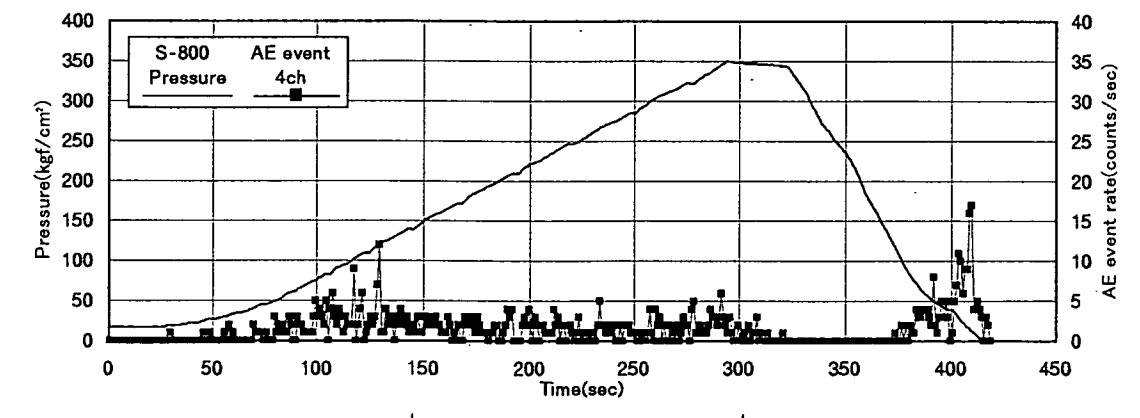
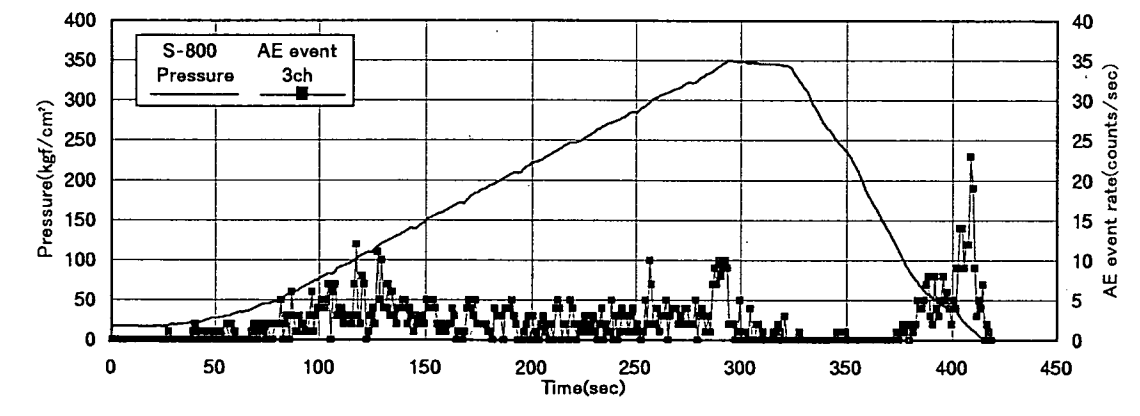
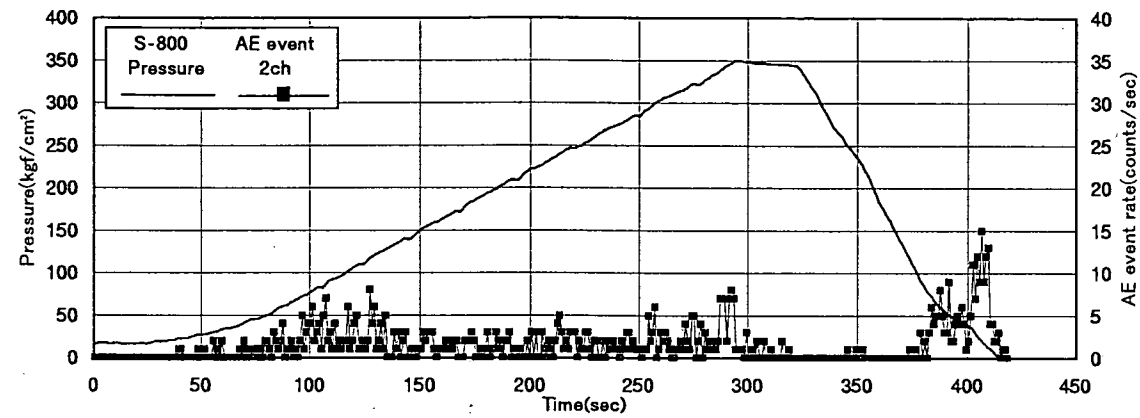
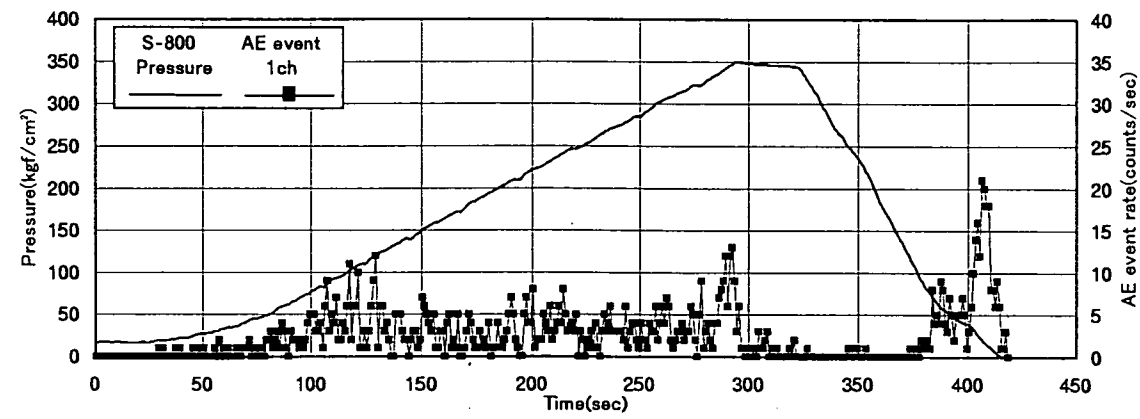
付図-29 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 219s8-1 破砕)



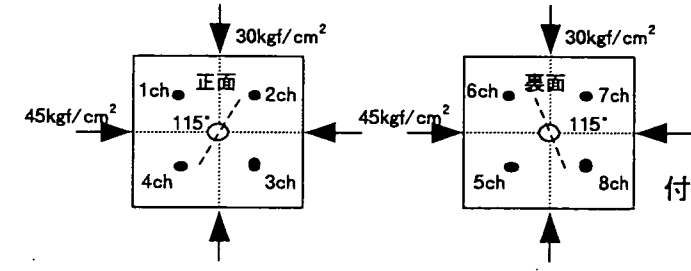
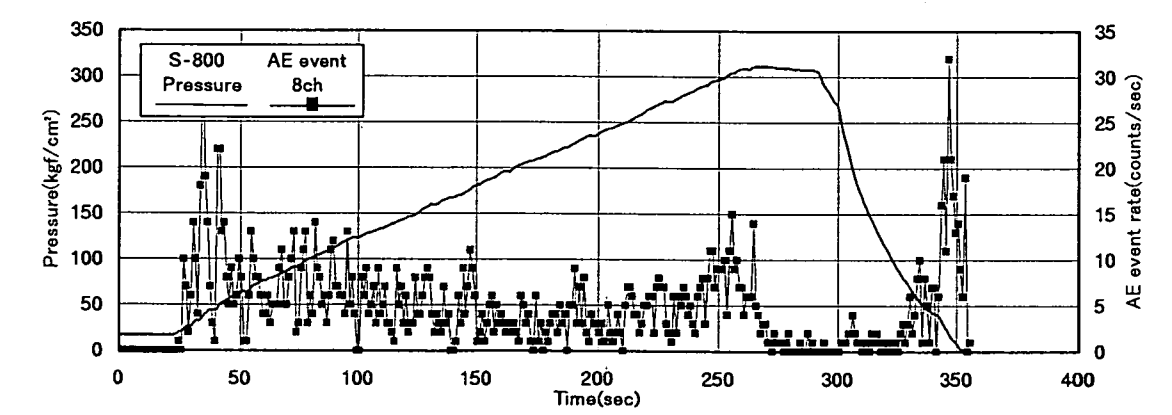
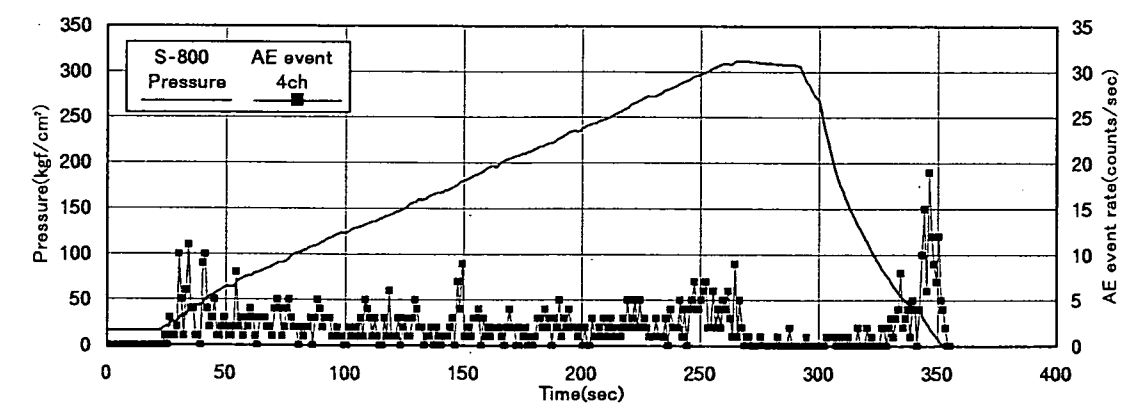
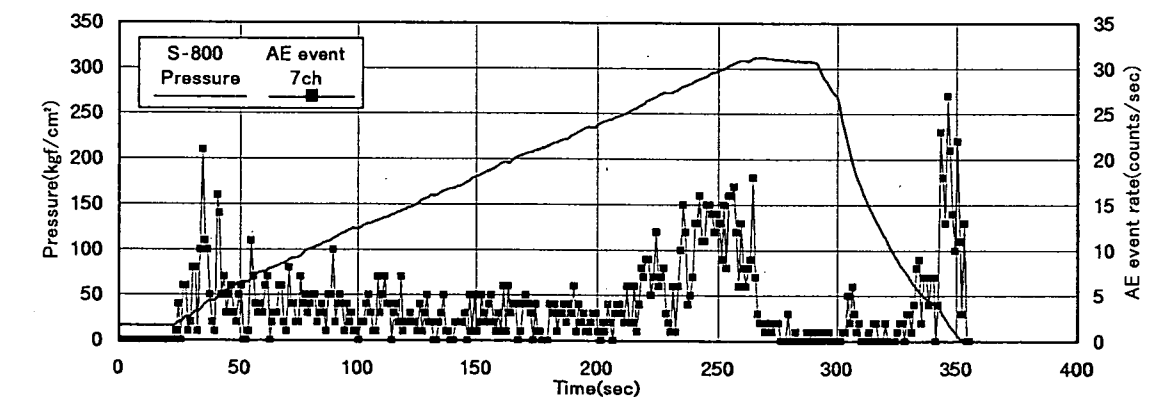
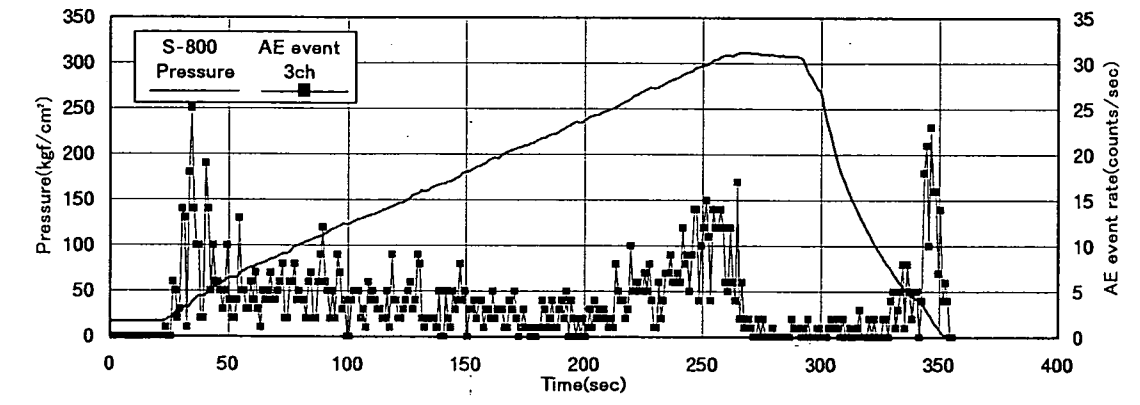
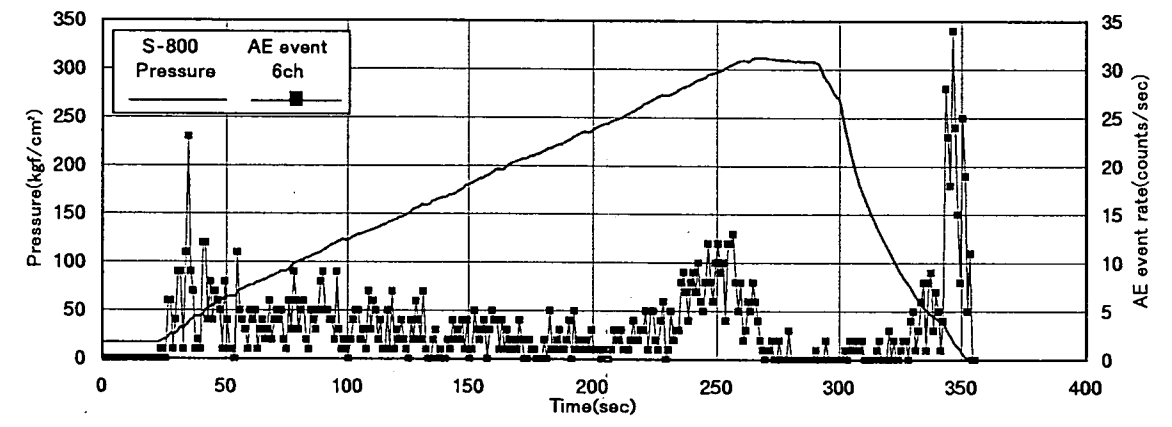
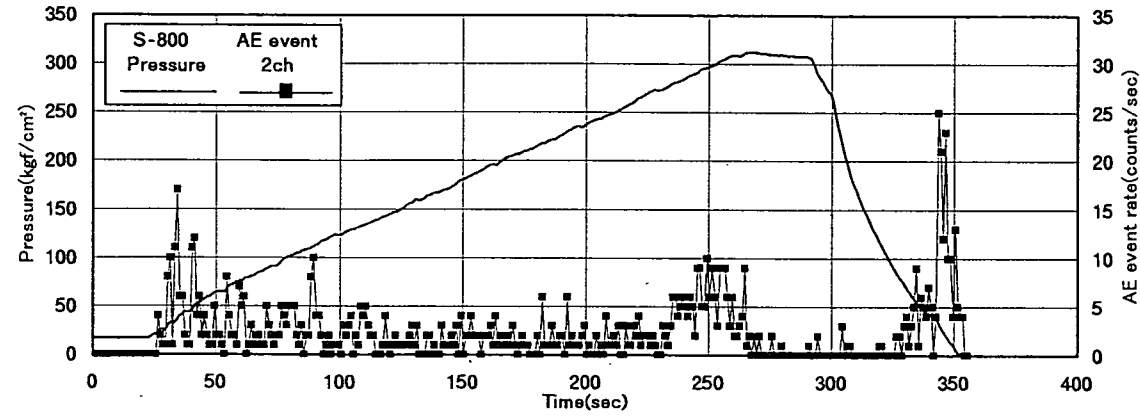
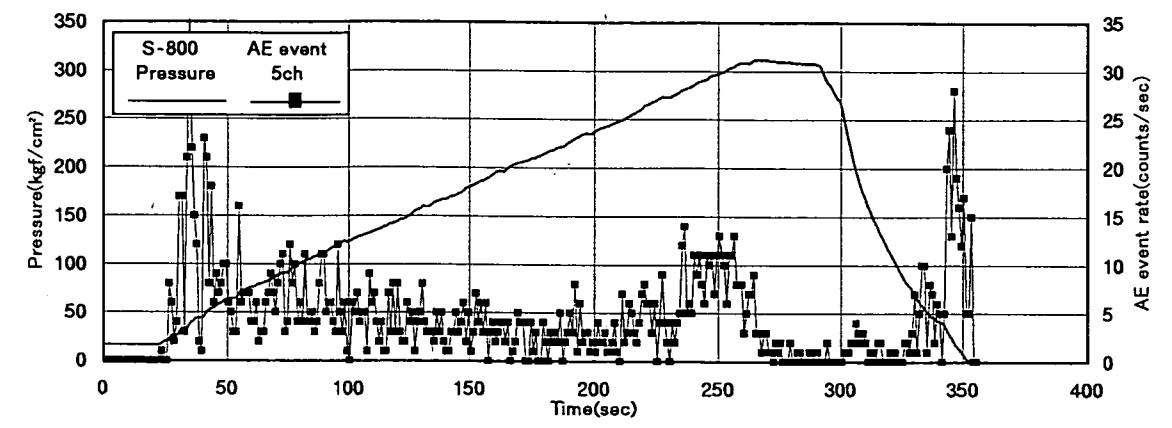
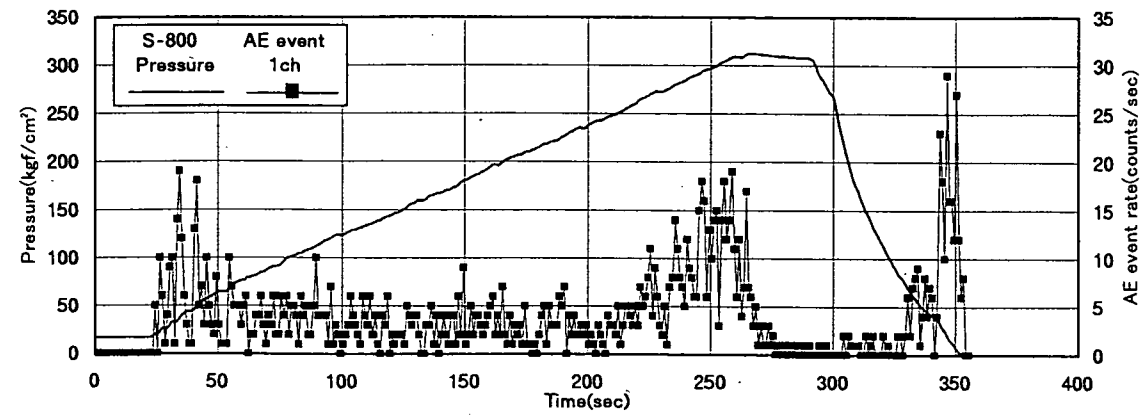
付図-30 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 219s8-1 再開口1回目)



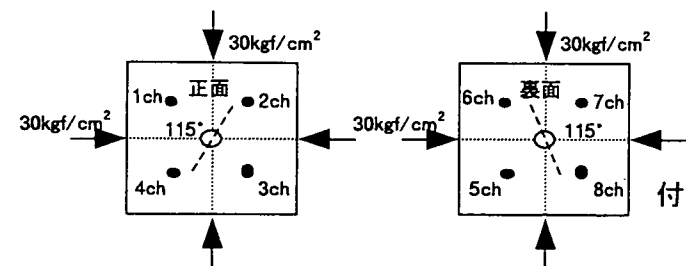
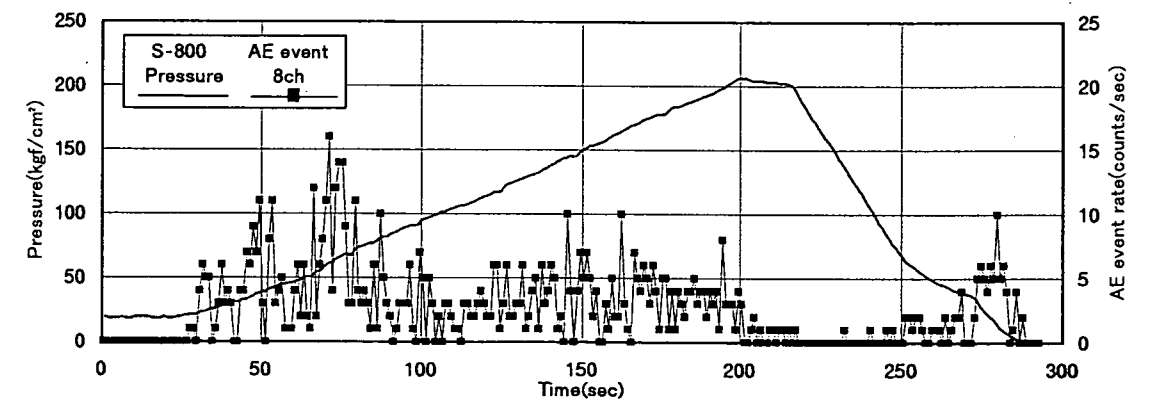
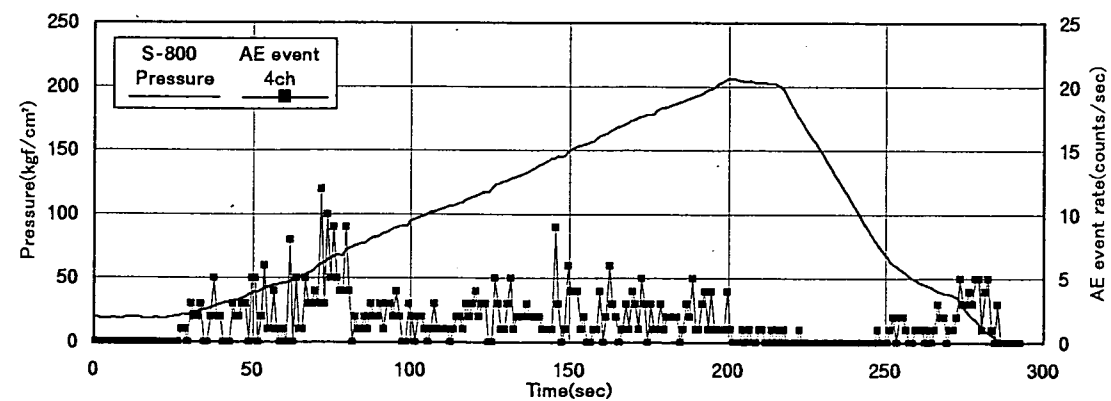
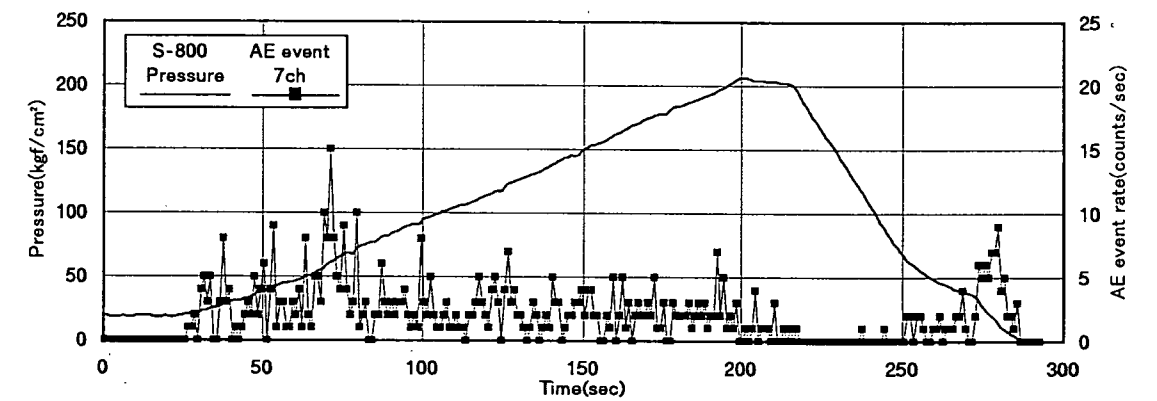
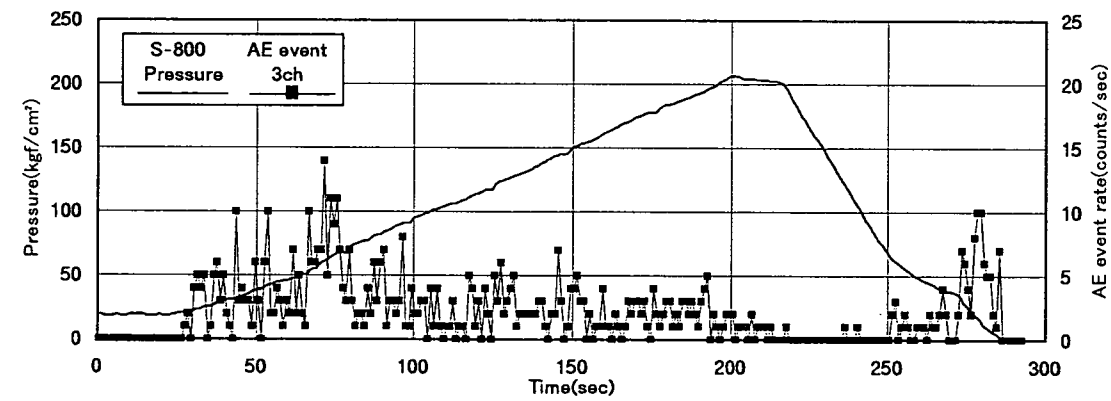
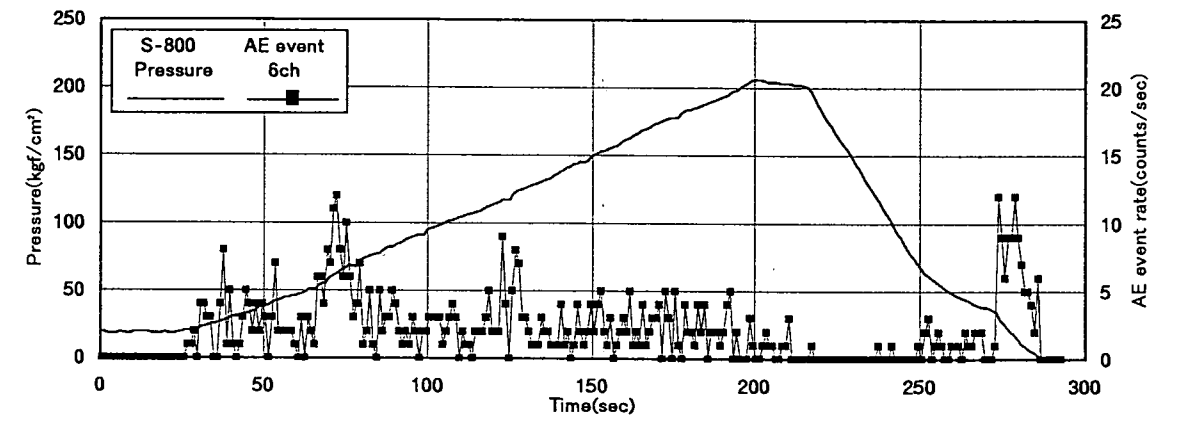
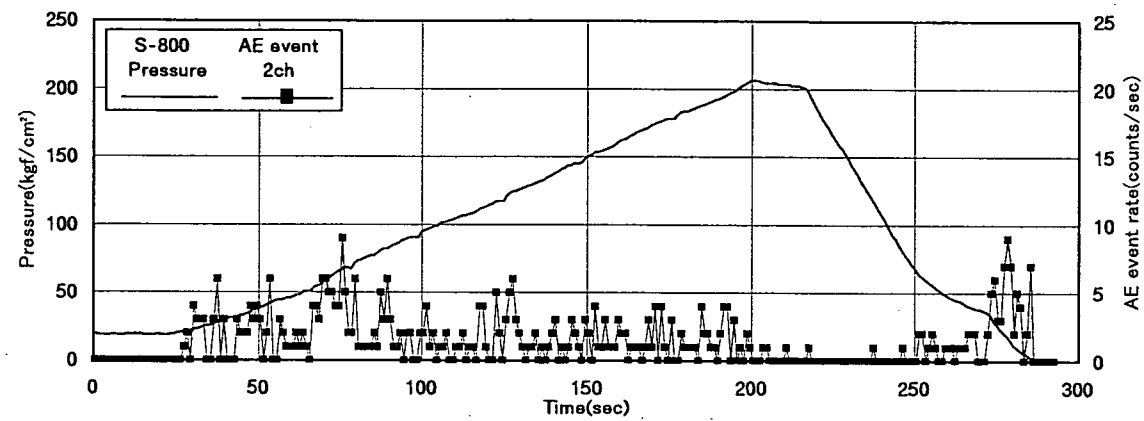
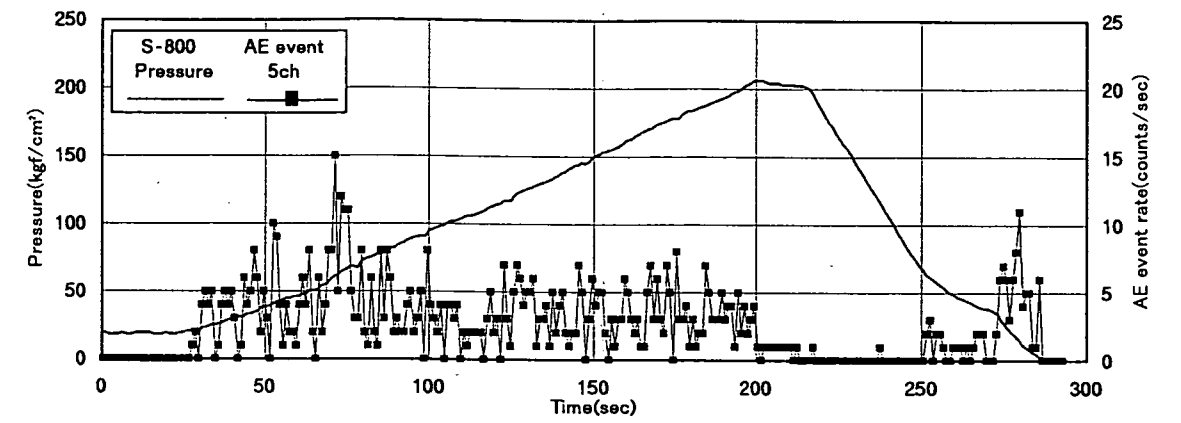
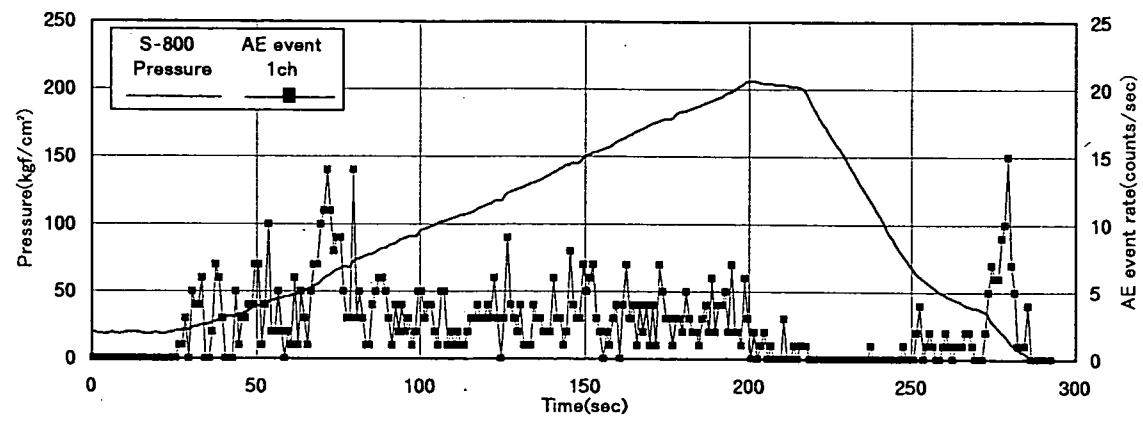
付図-31 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 218s8-2 再開口1回目)



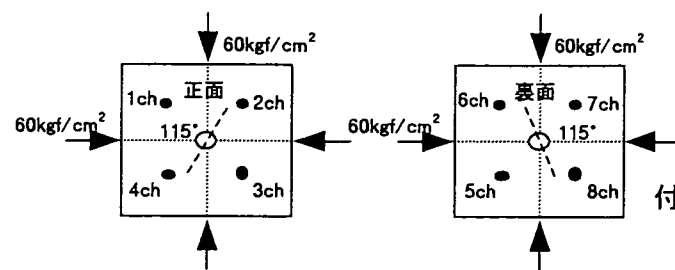
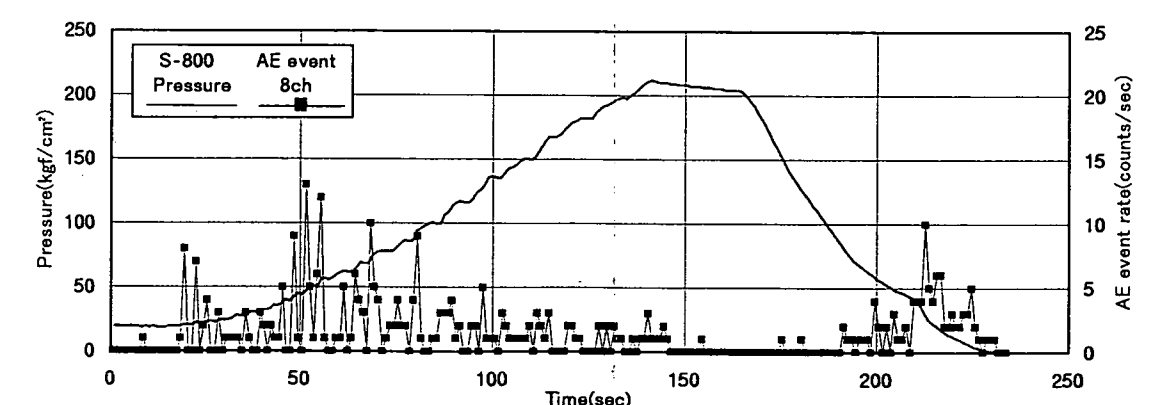
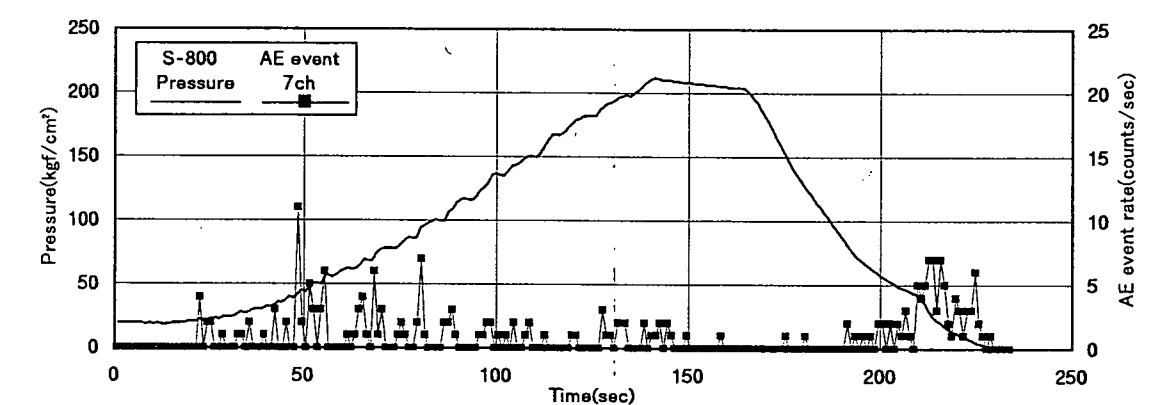
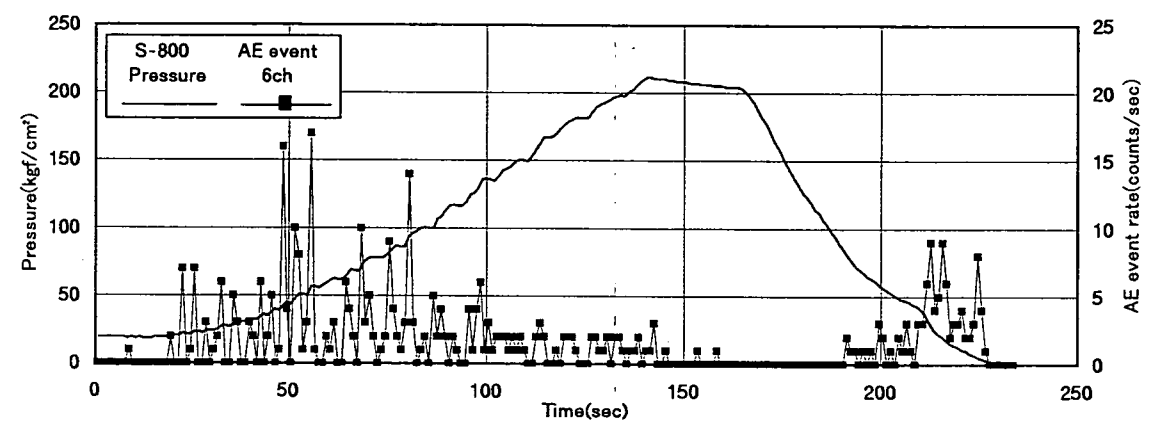
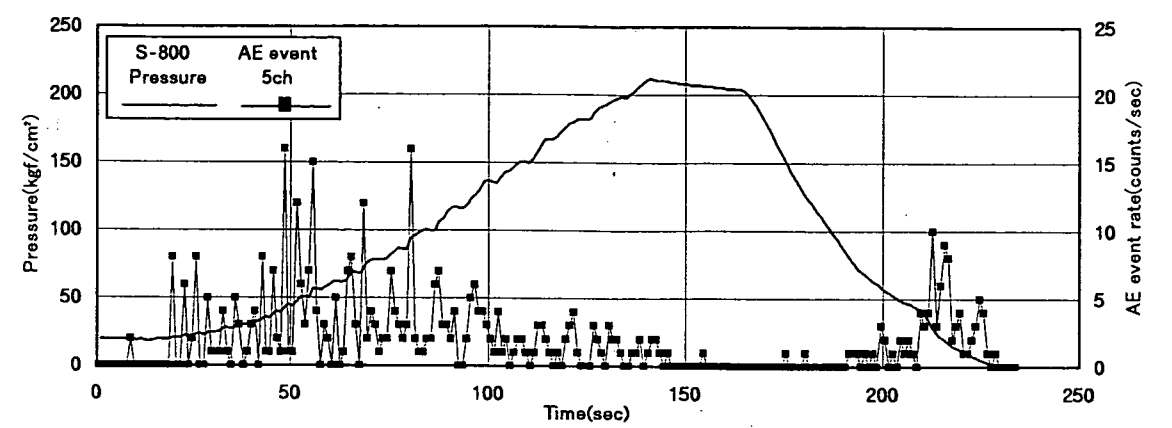
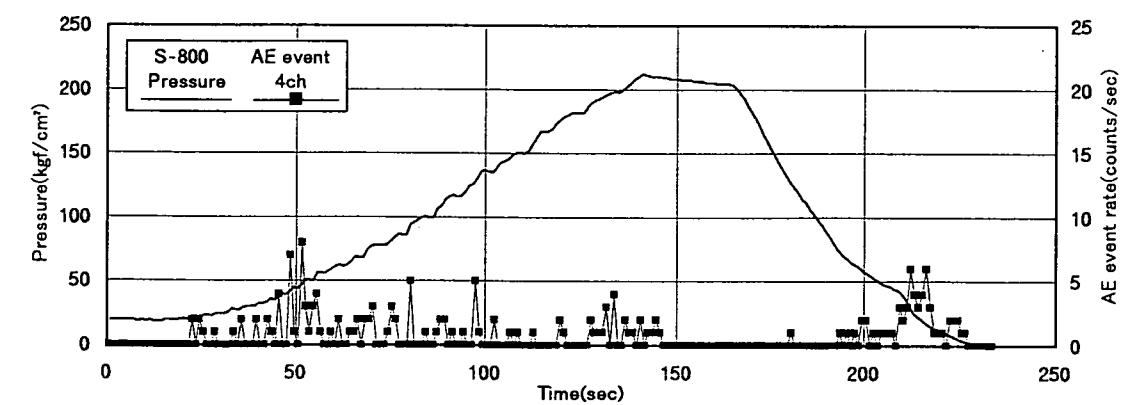
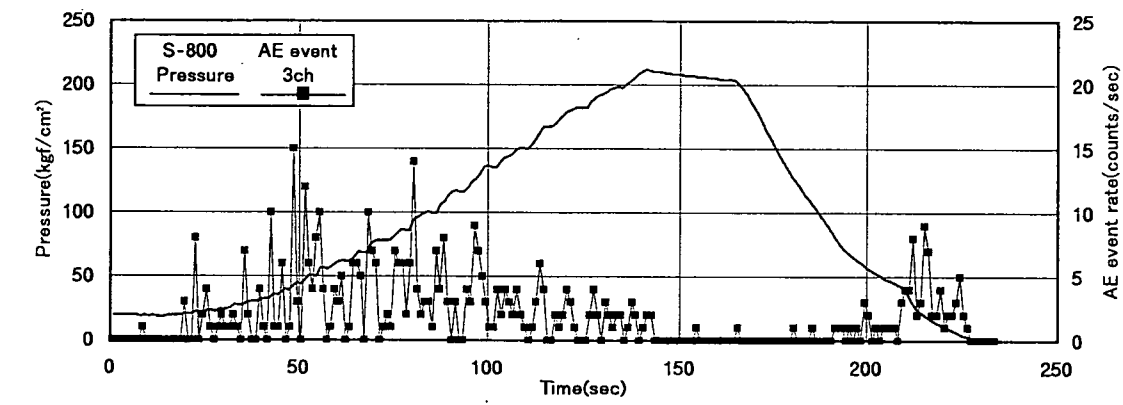
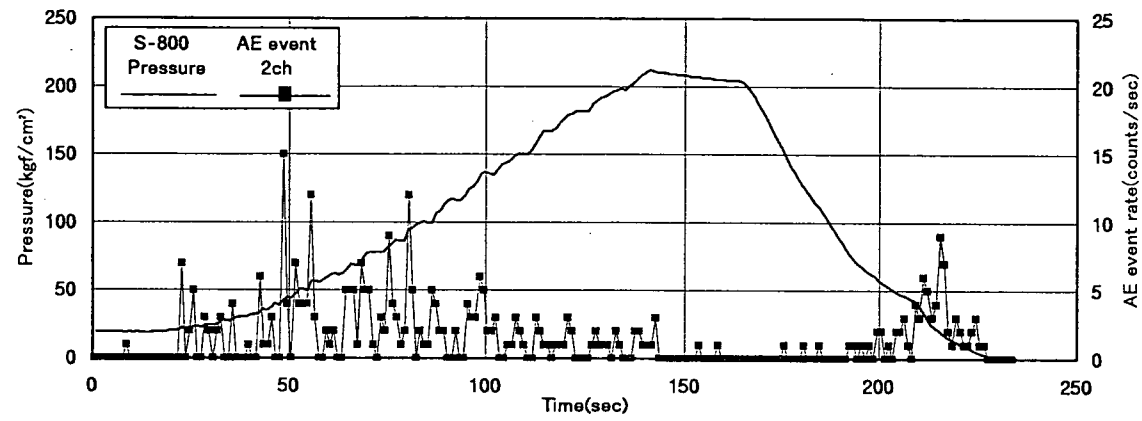
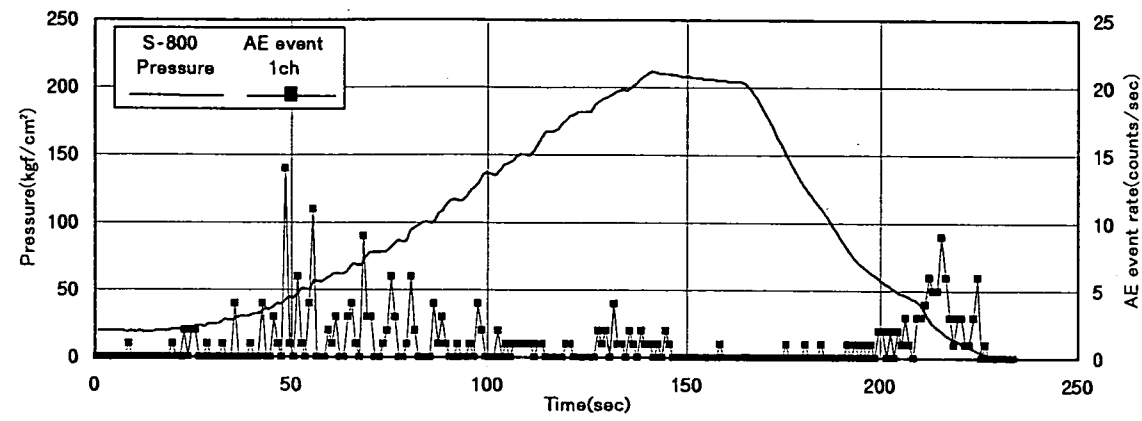
付図-32 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 217s8-1 再開口1回目)



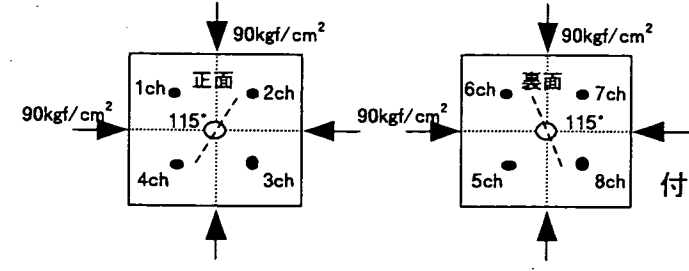
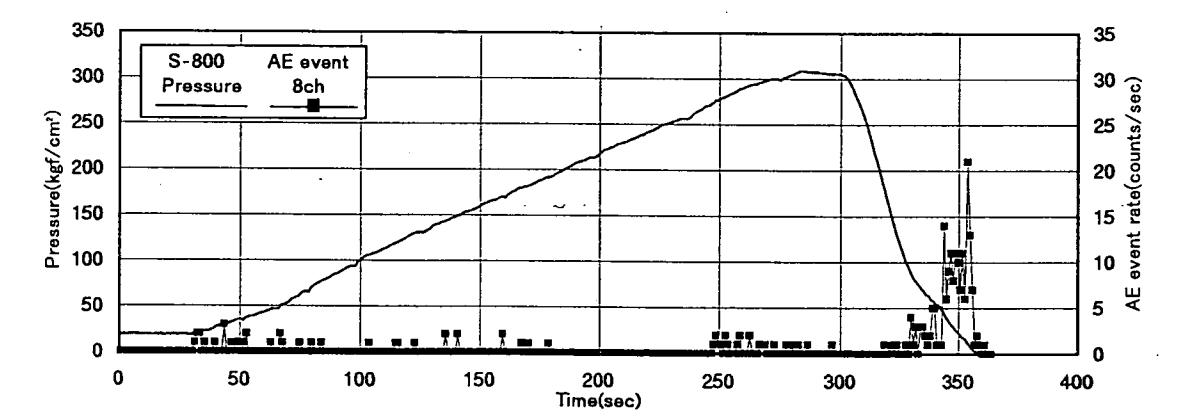
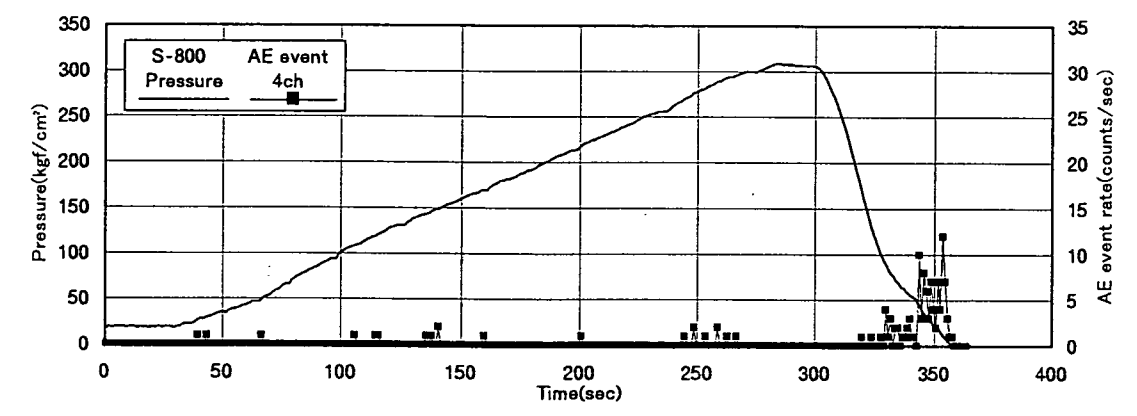
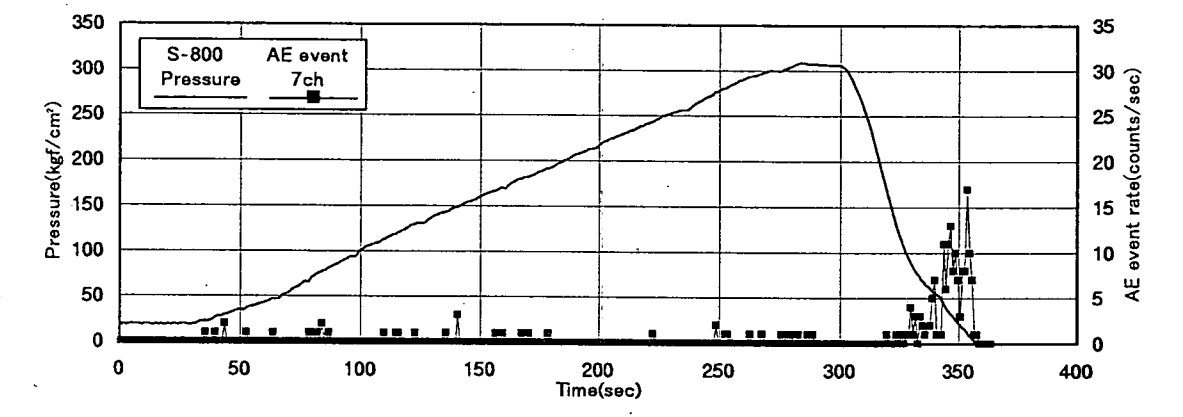
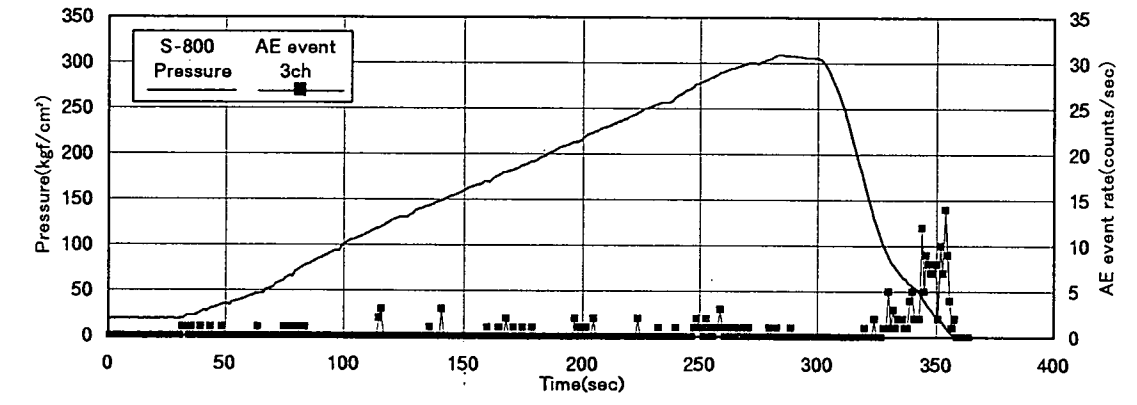
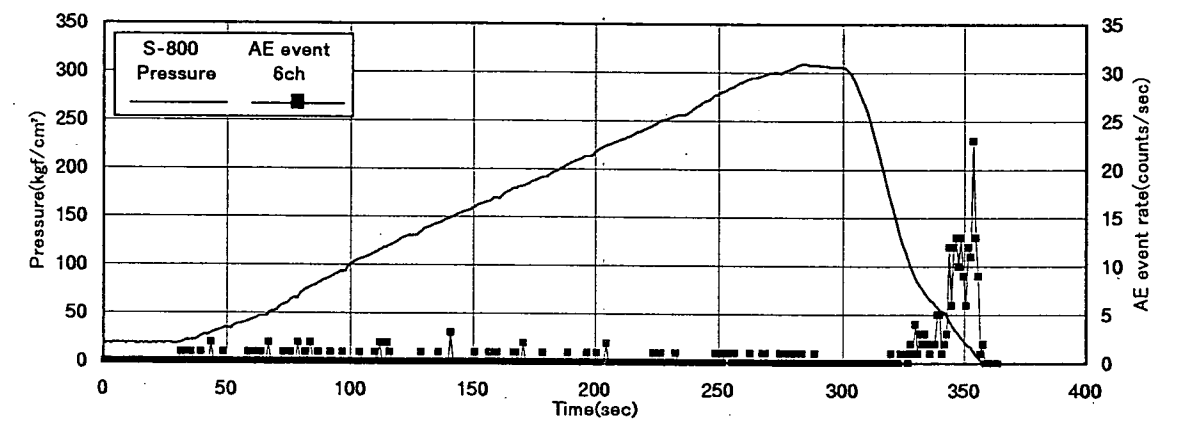
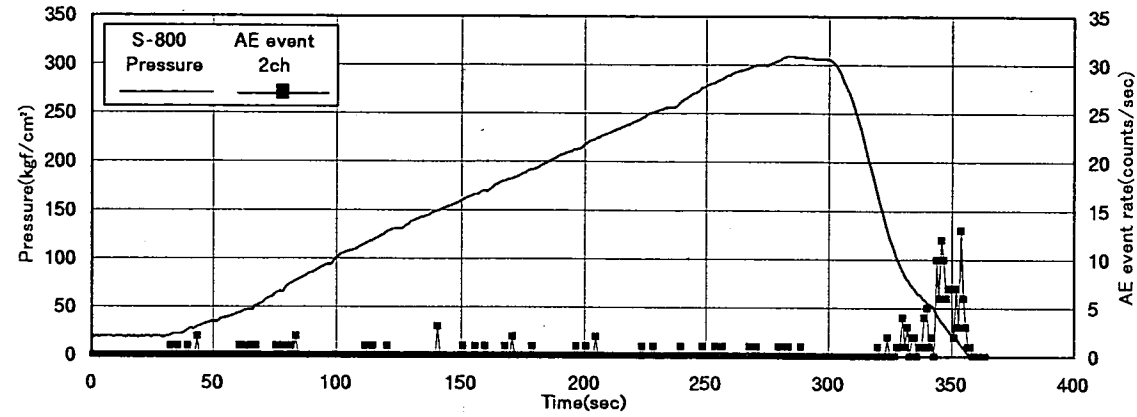
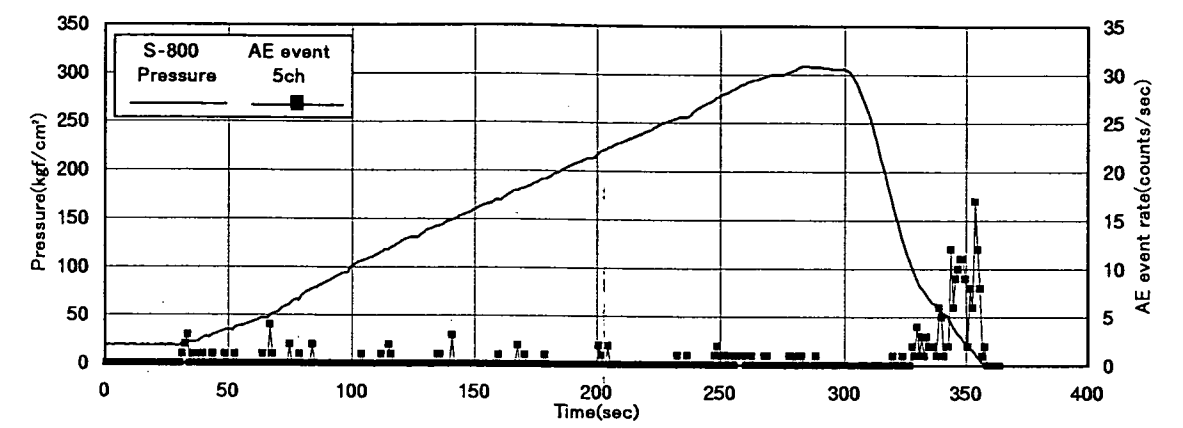
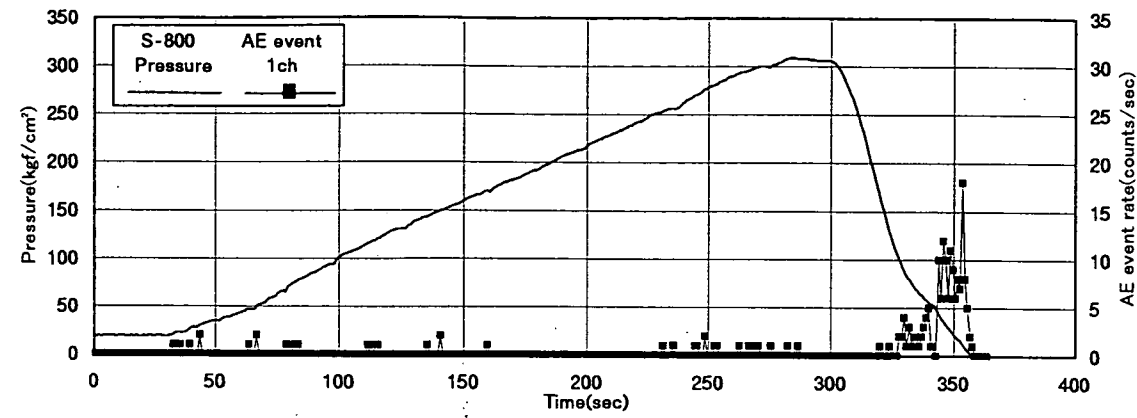
付図-33 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 216s8-1 再開口1回目)



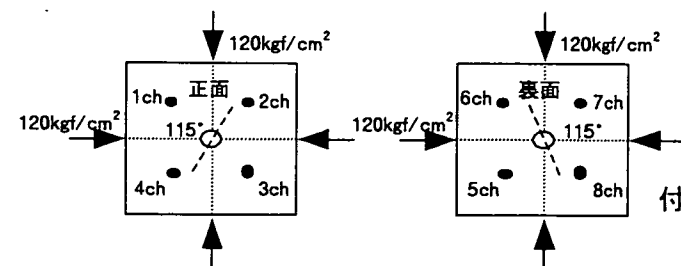
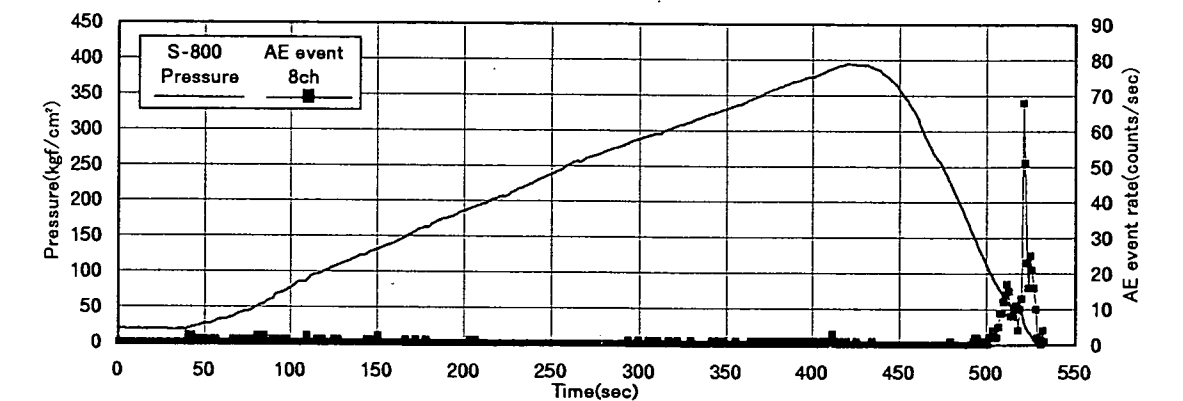
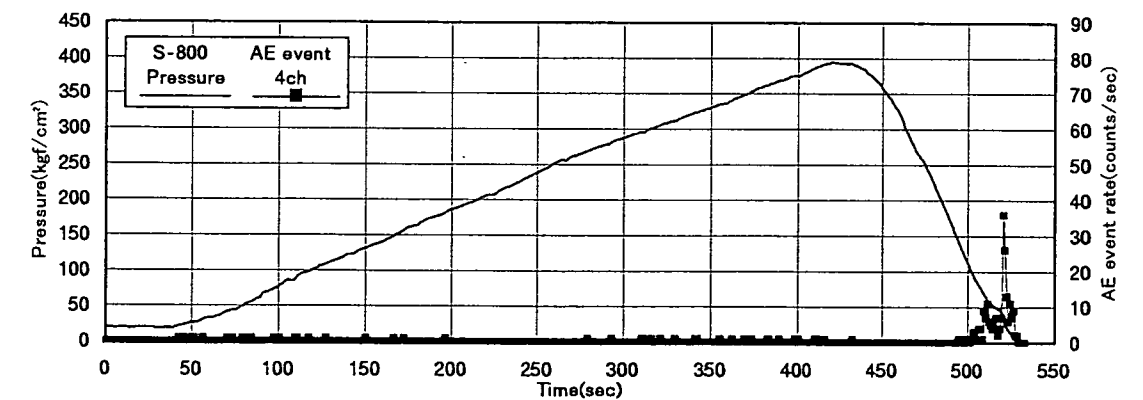
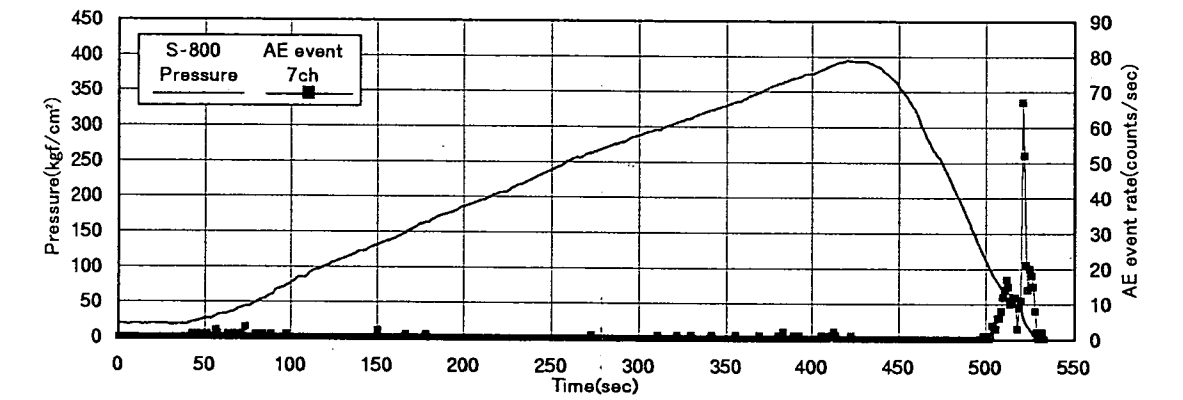
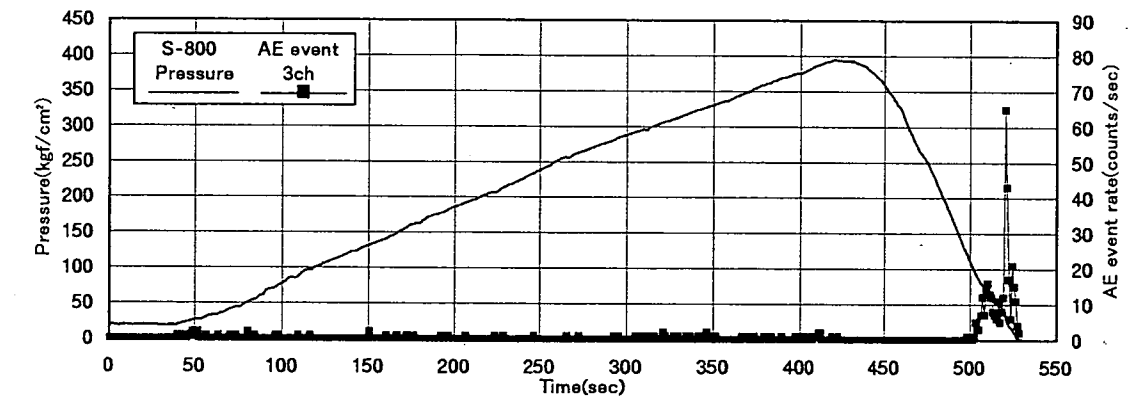
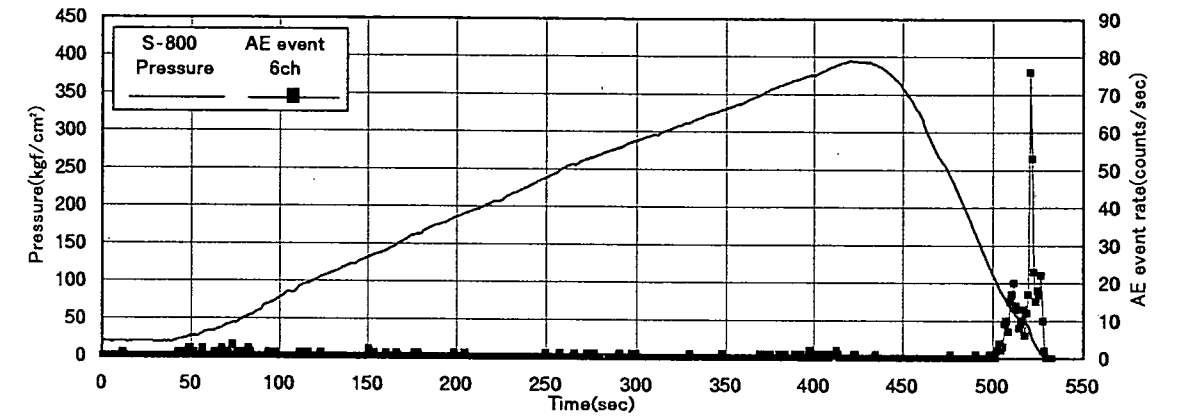
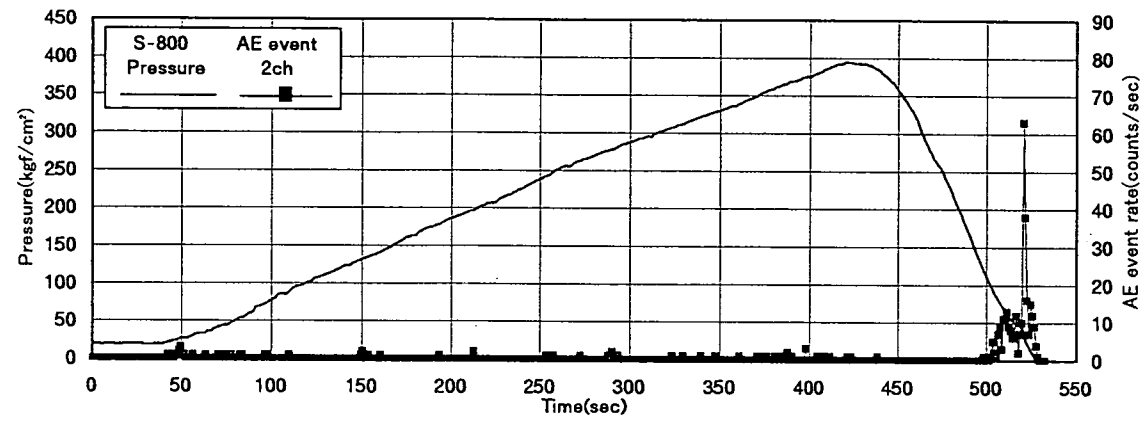
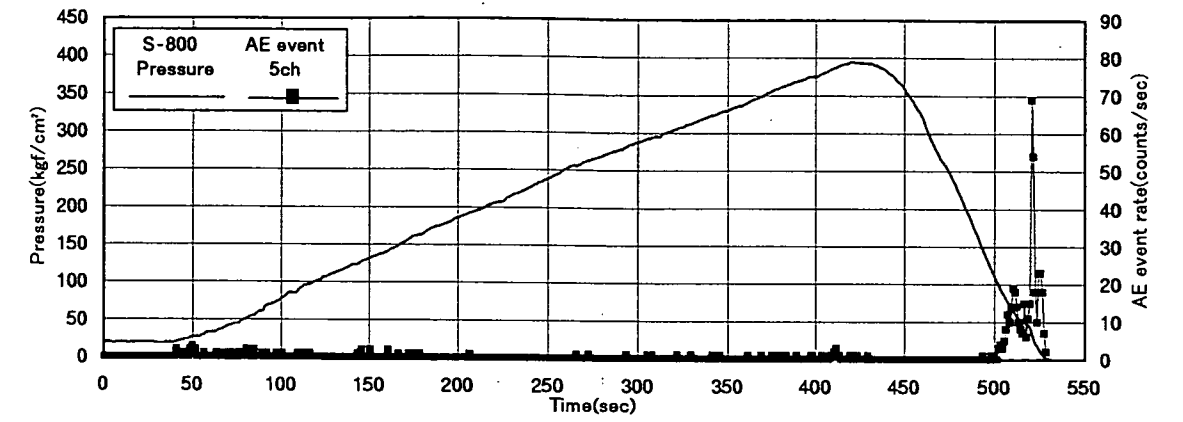
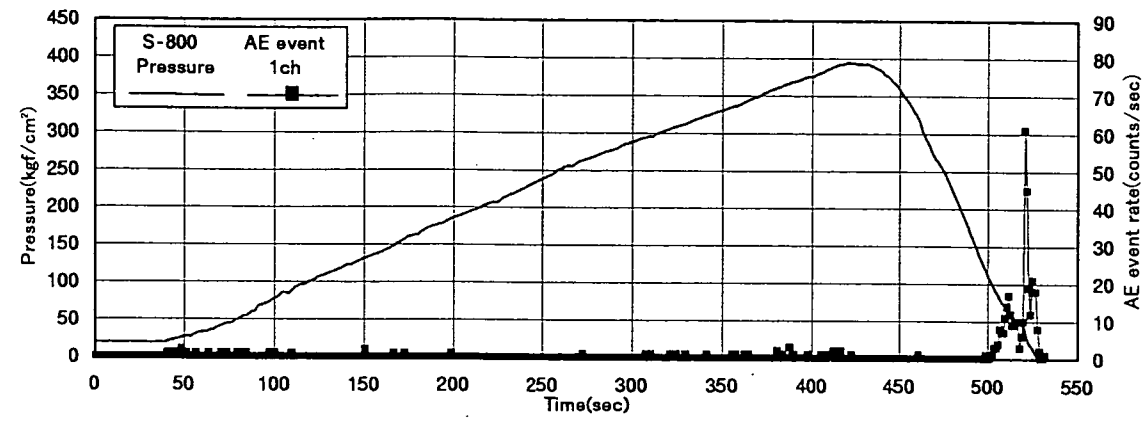
付図-34 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 211s8-1 再開口1回目)



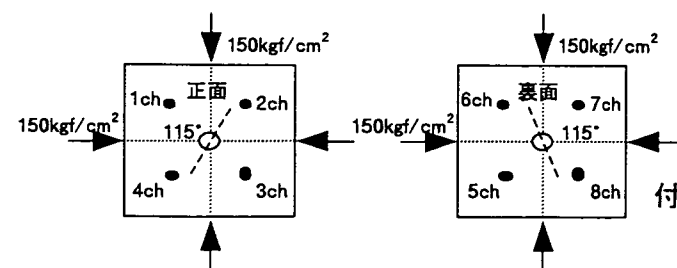
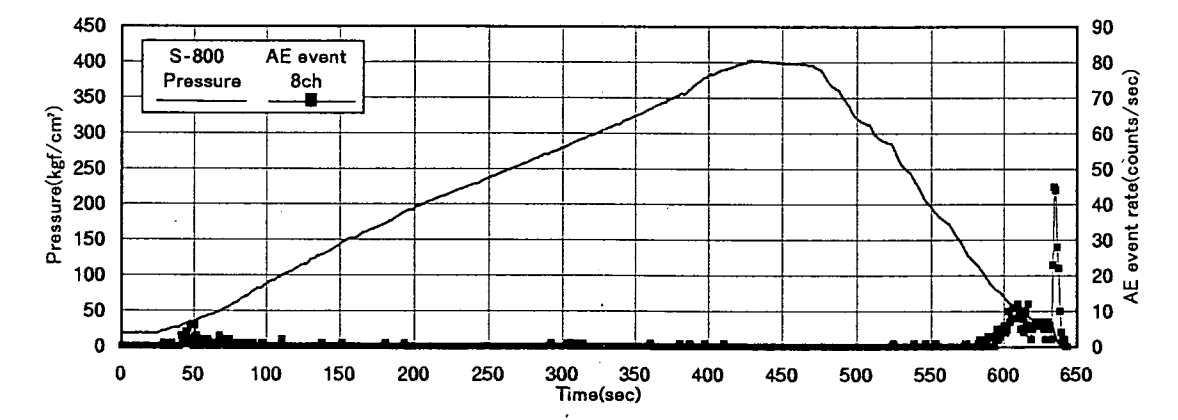
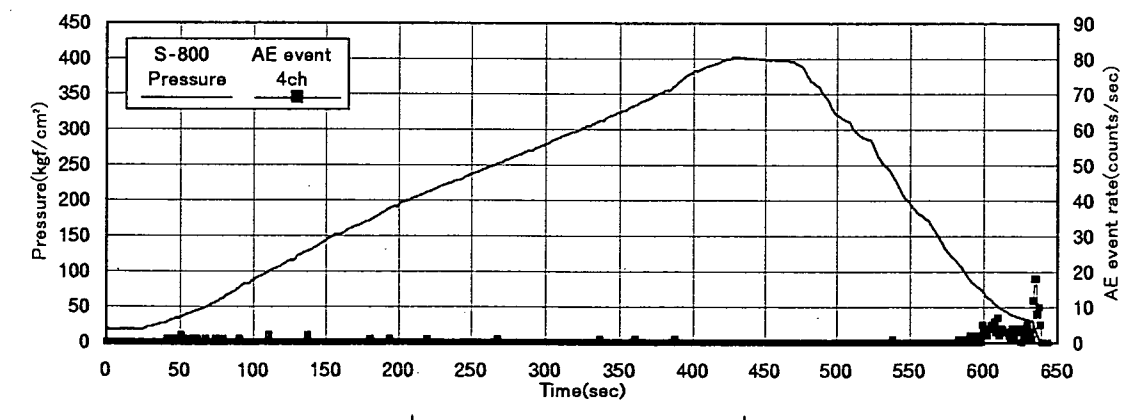
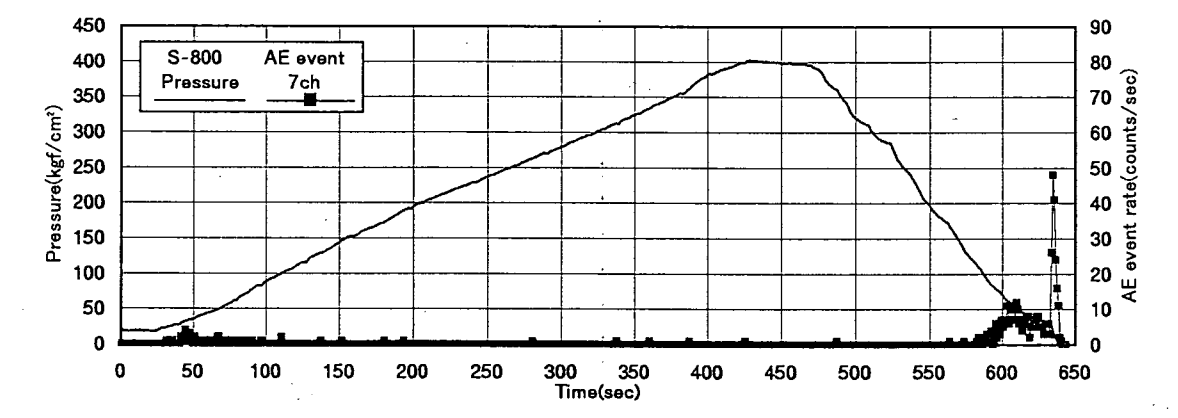
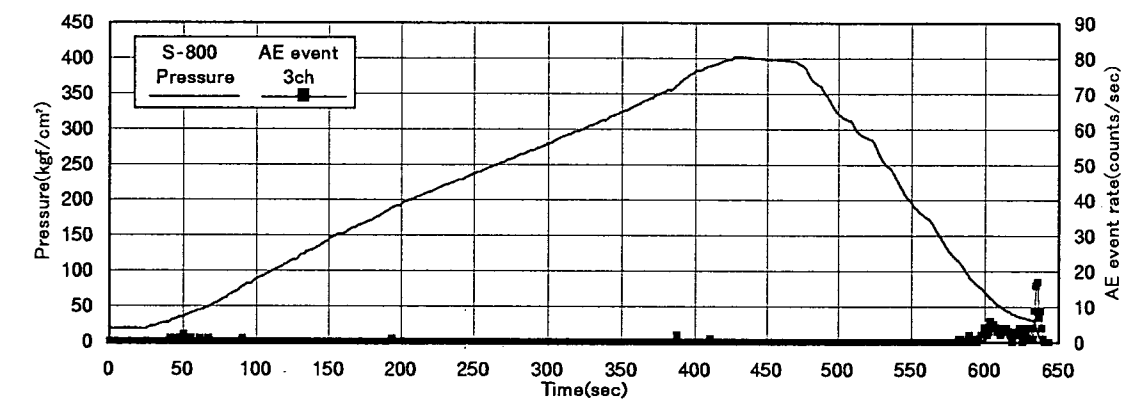
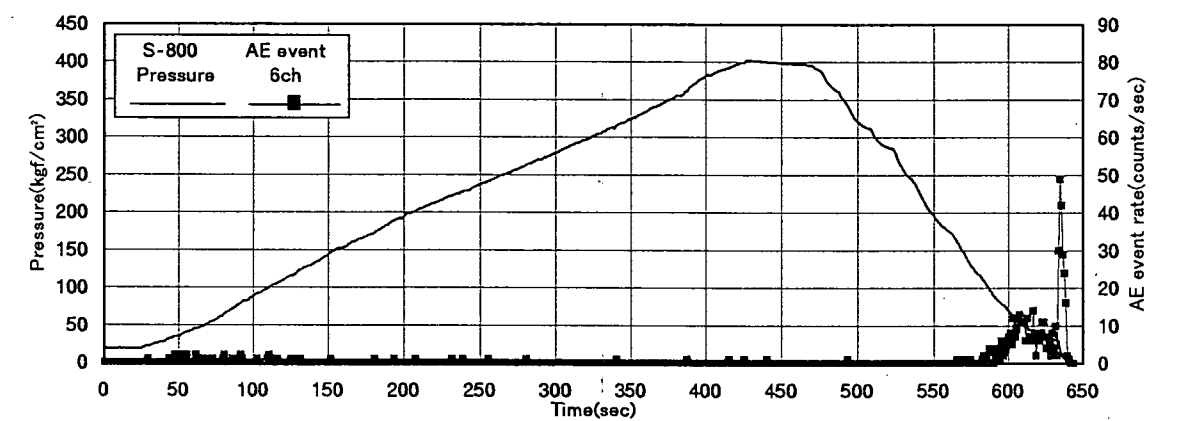
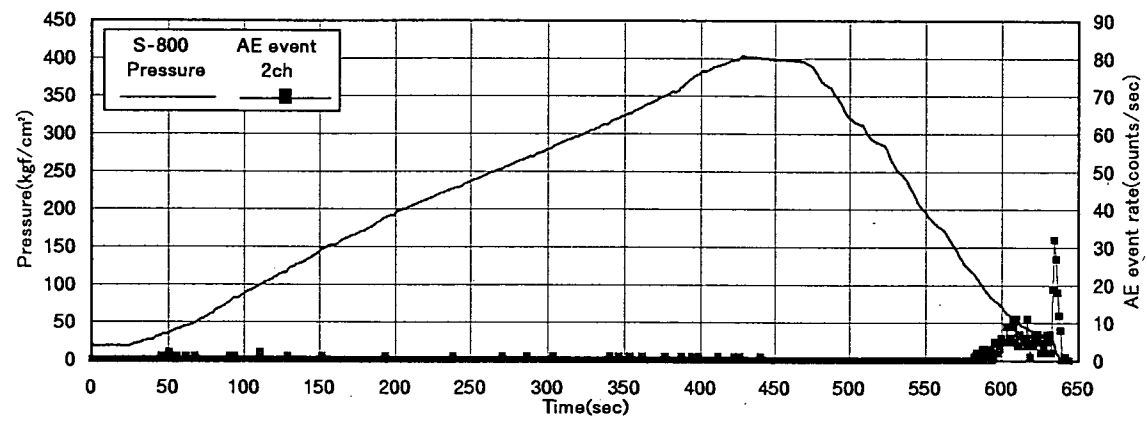
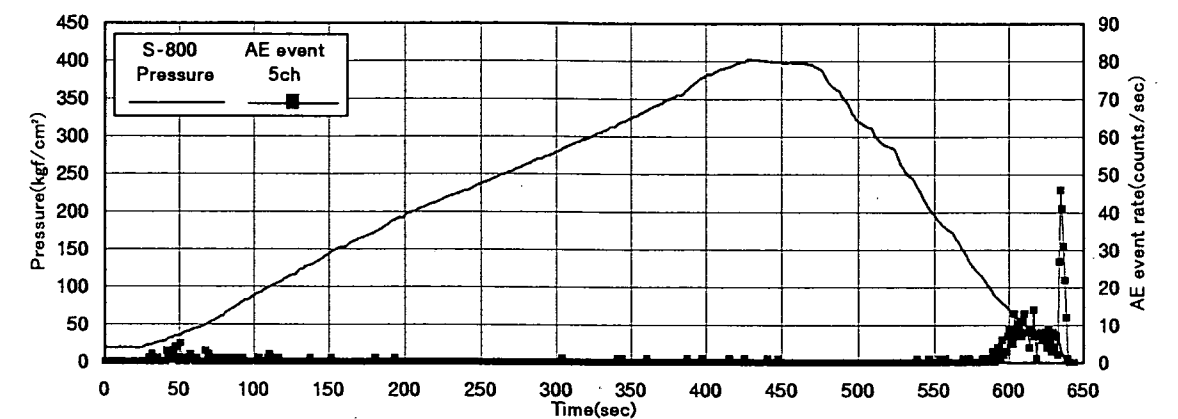
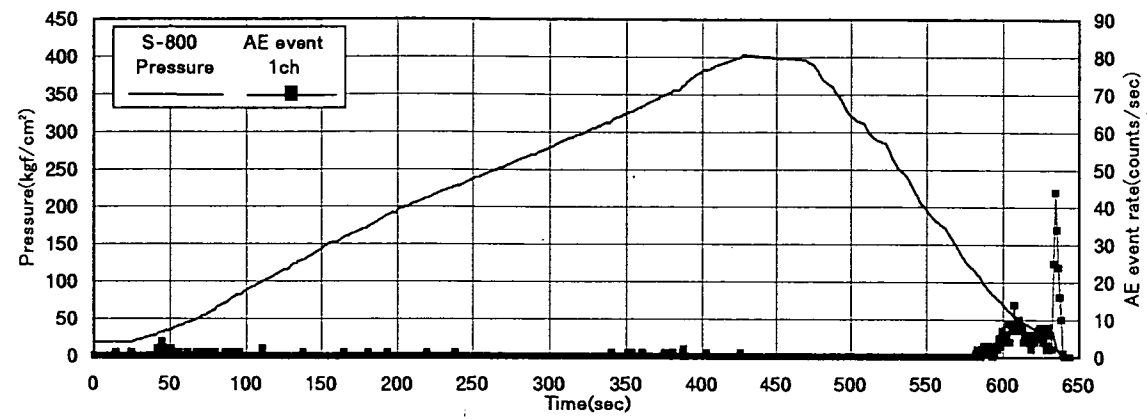
付図-35 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 212s8-2 再開口1回目)



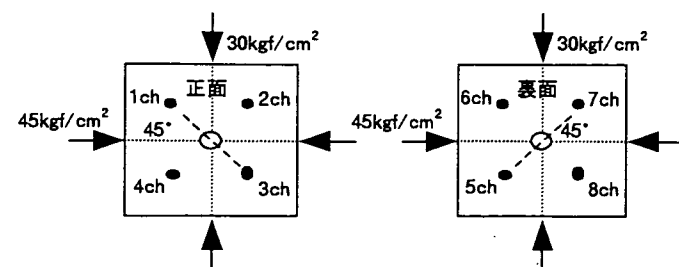
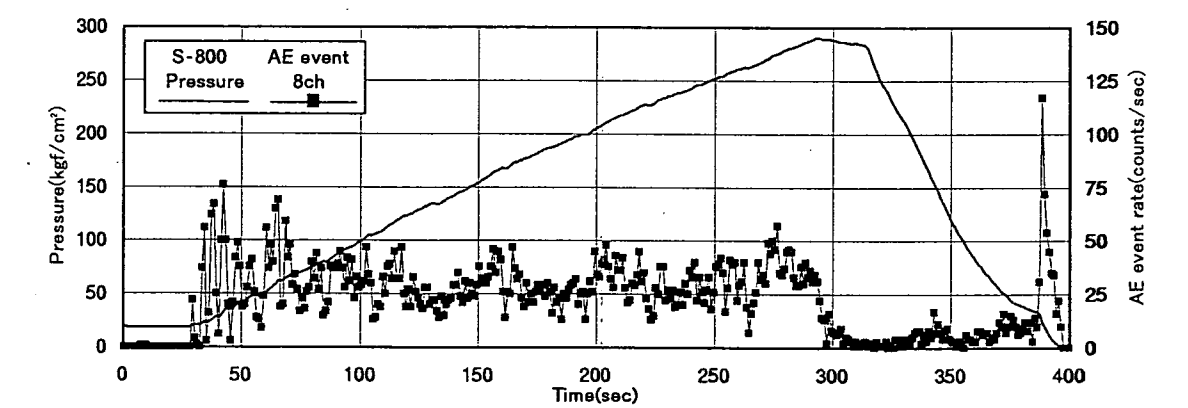
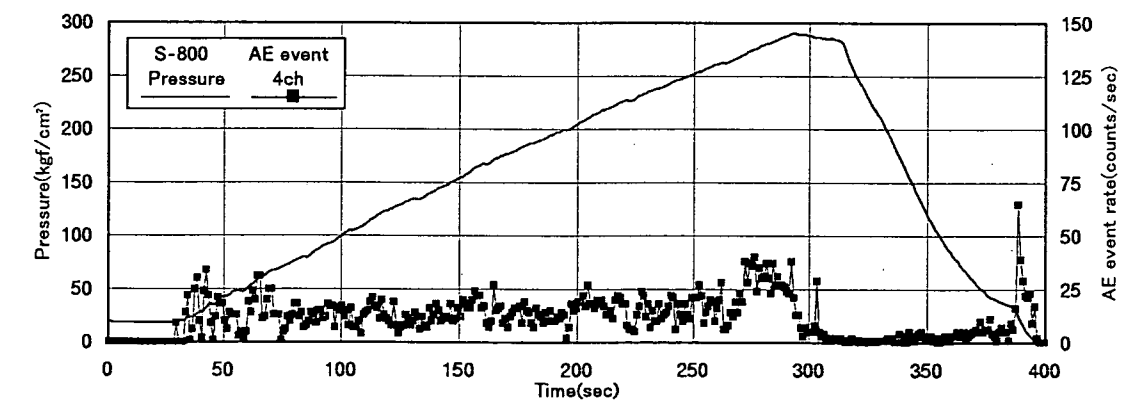
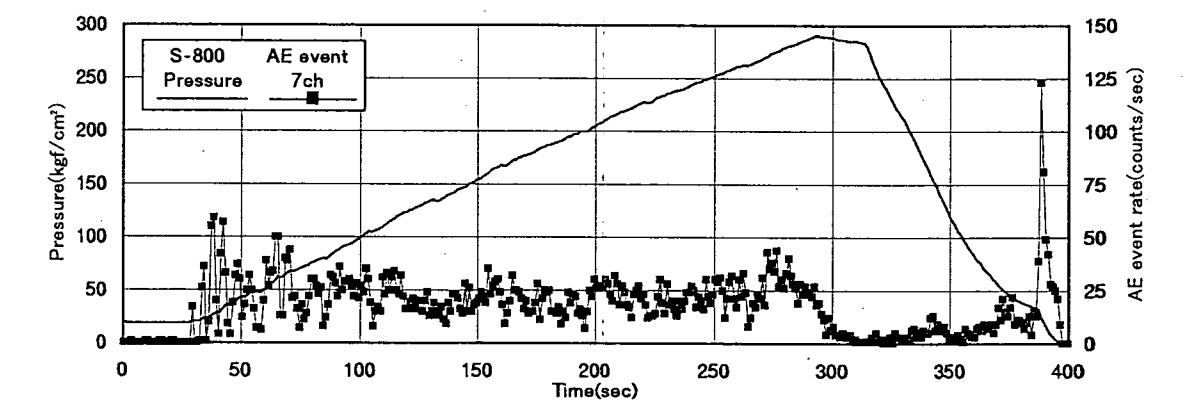
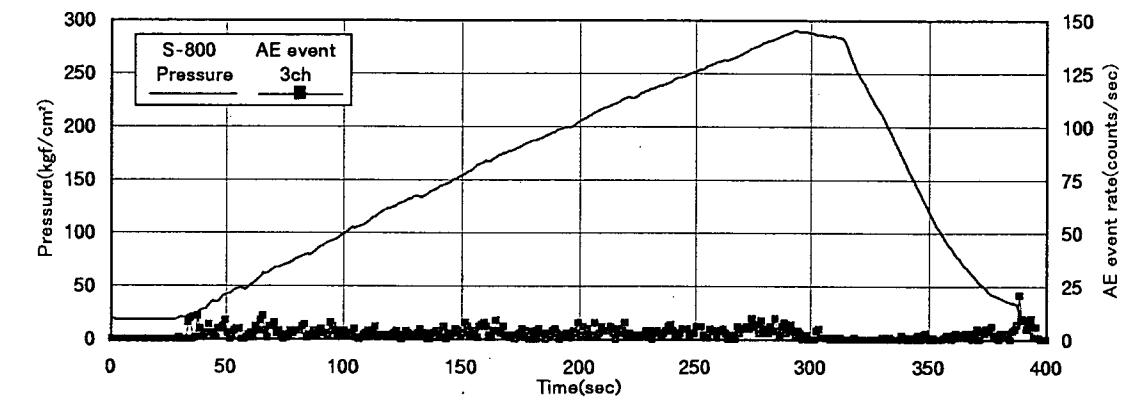
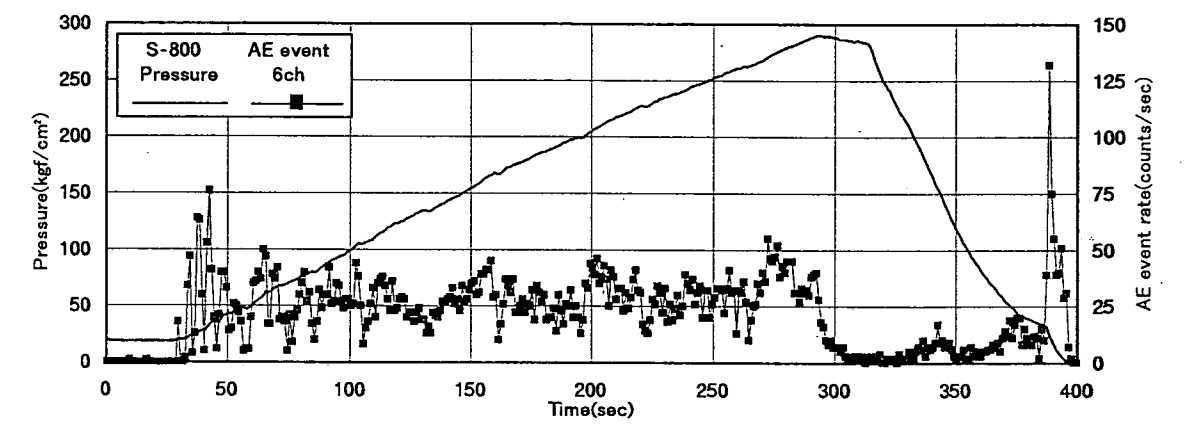
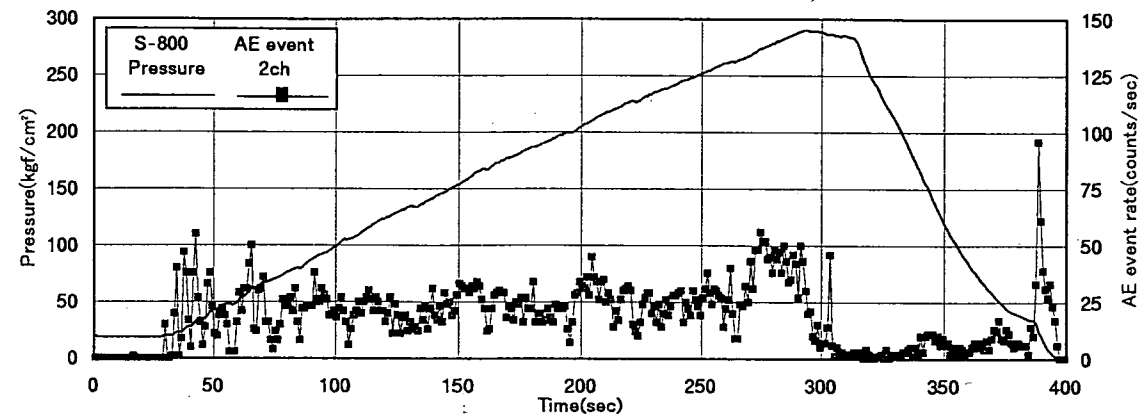
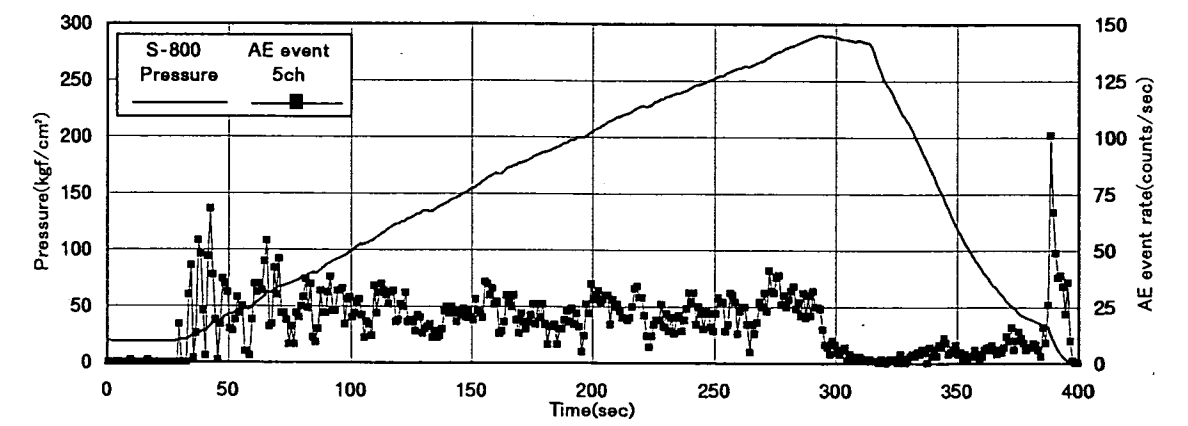
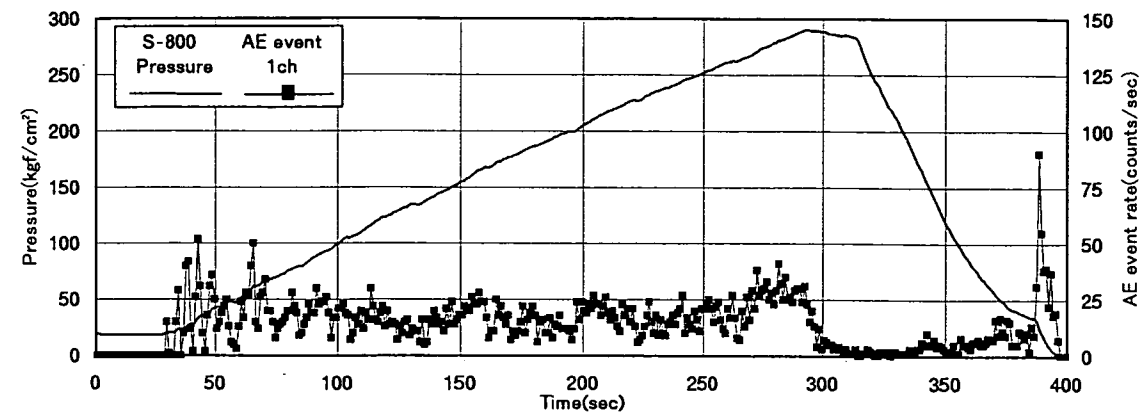
付図-36 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 213s8-1 再開口1回目)



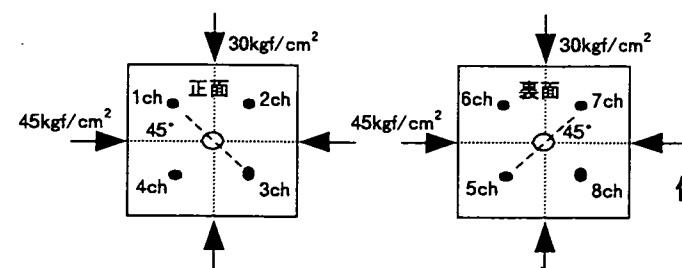
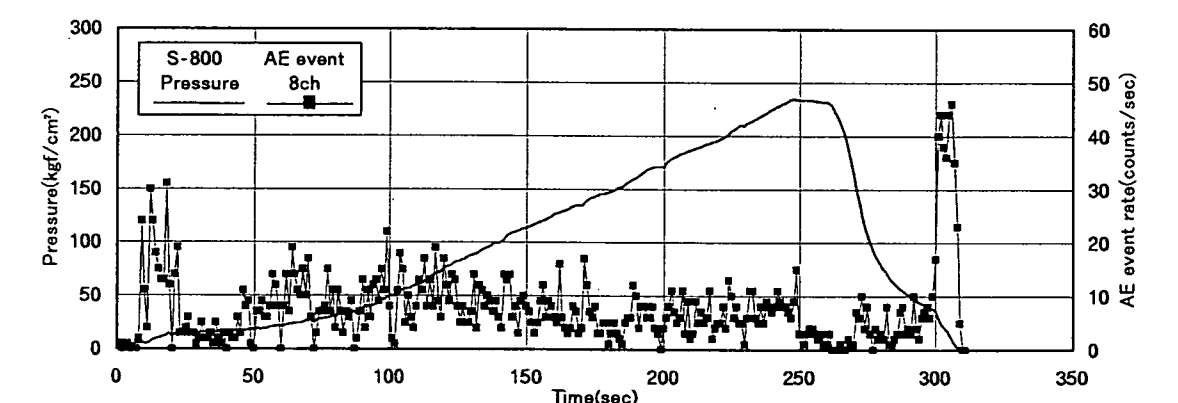
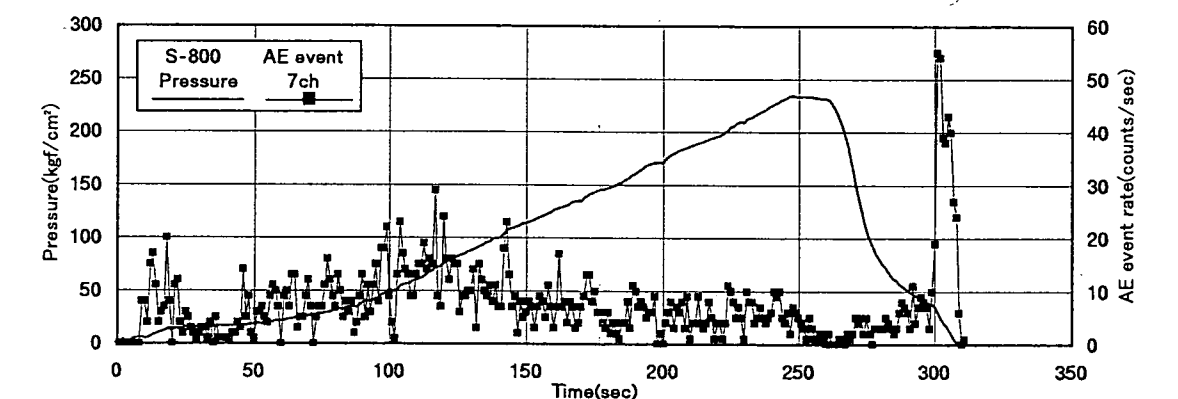
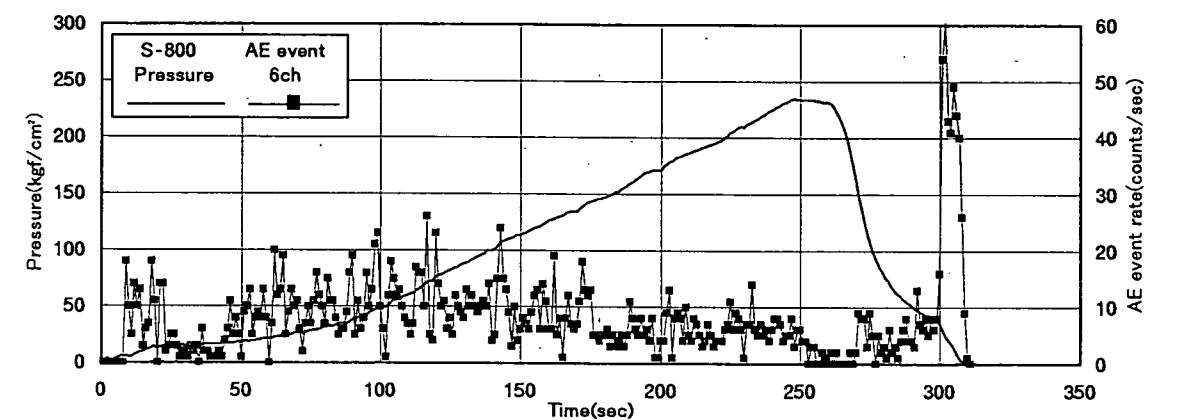
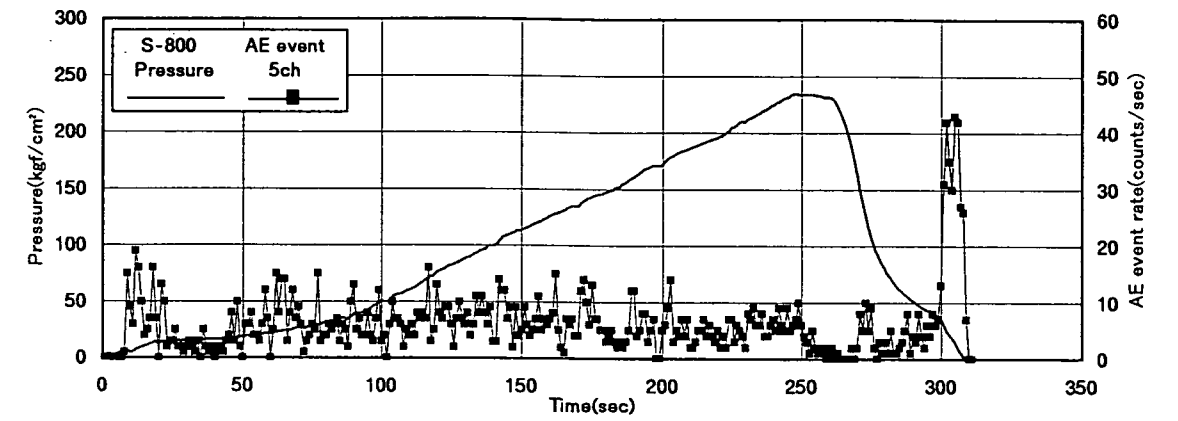
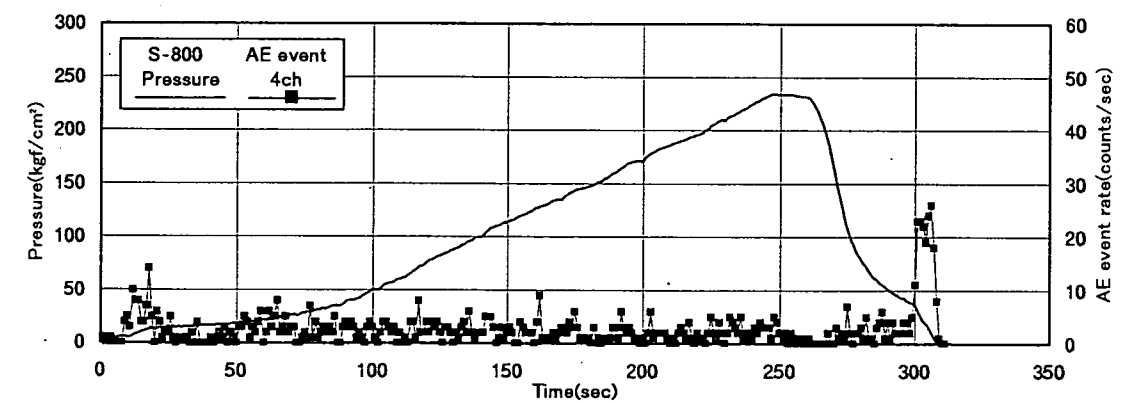
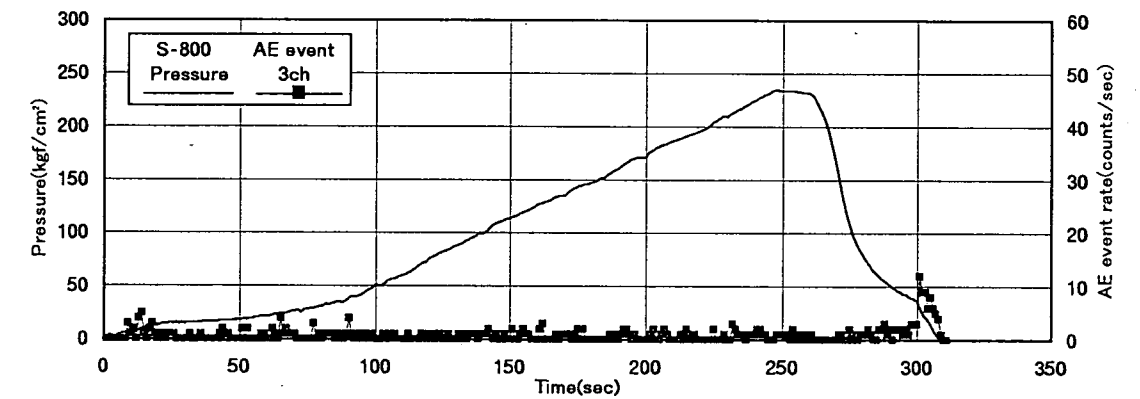
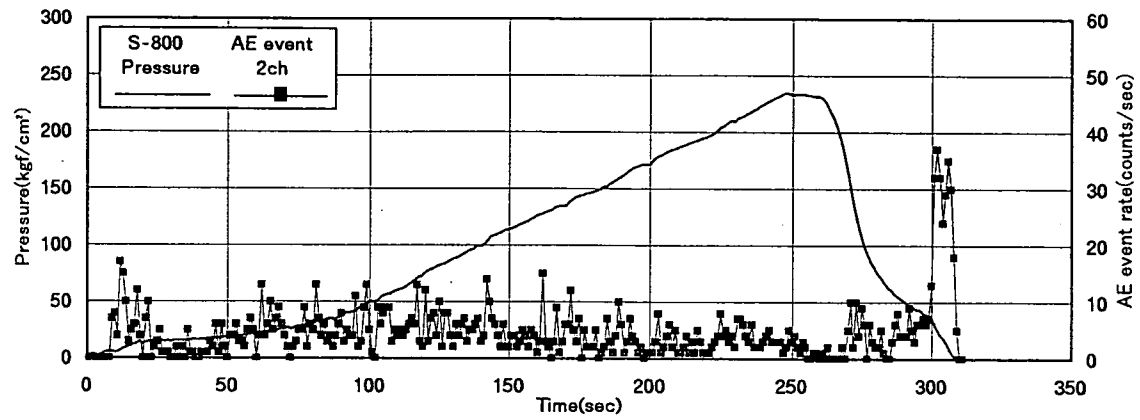
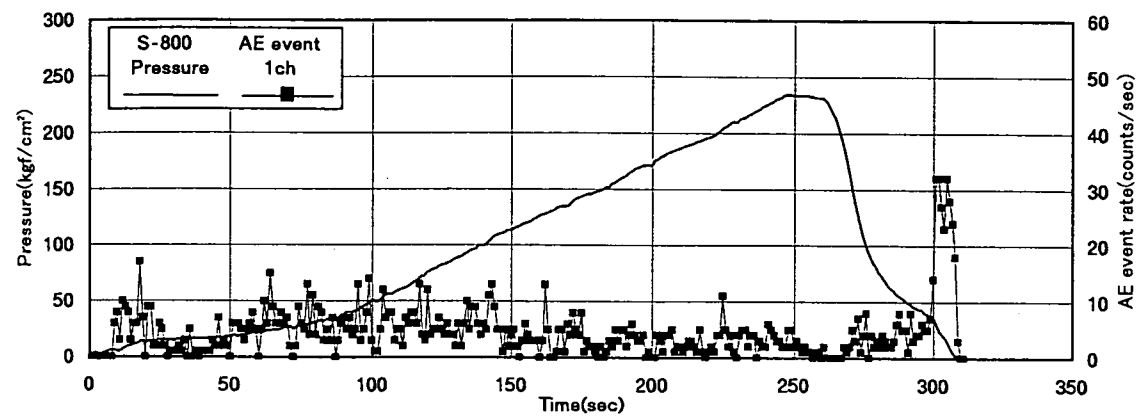
付図-37 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 214s8-1 再開口1回目)



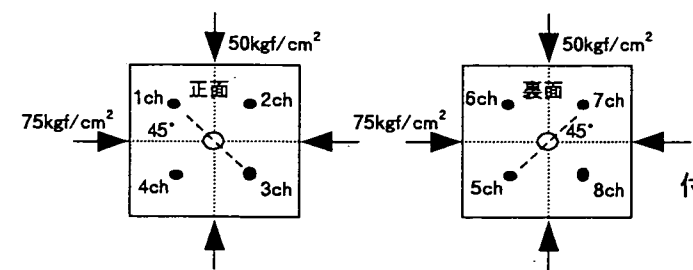
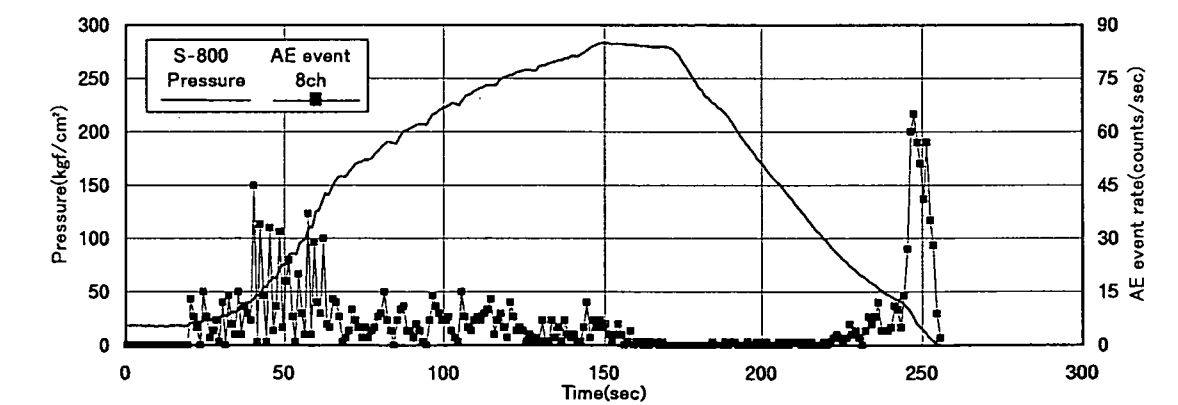
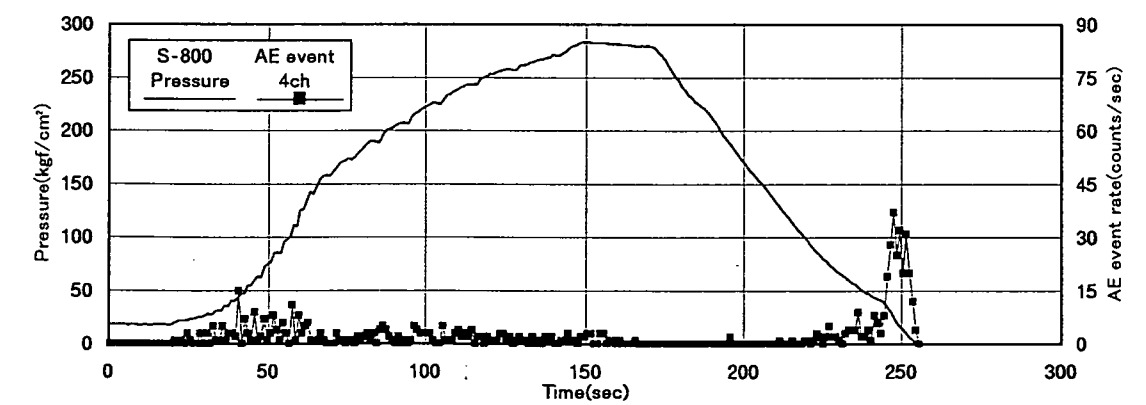
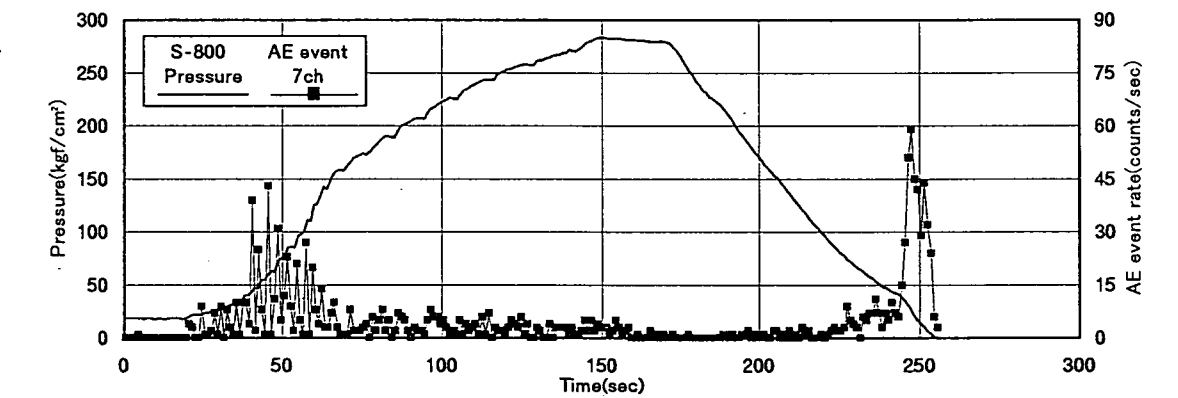
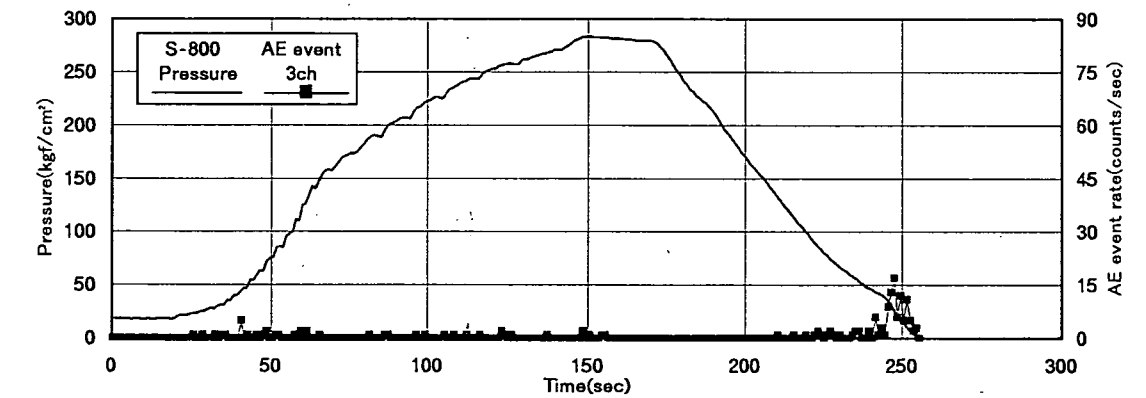
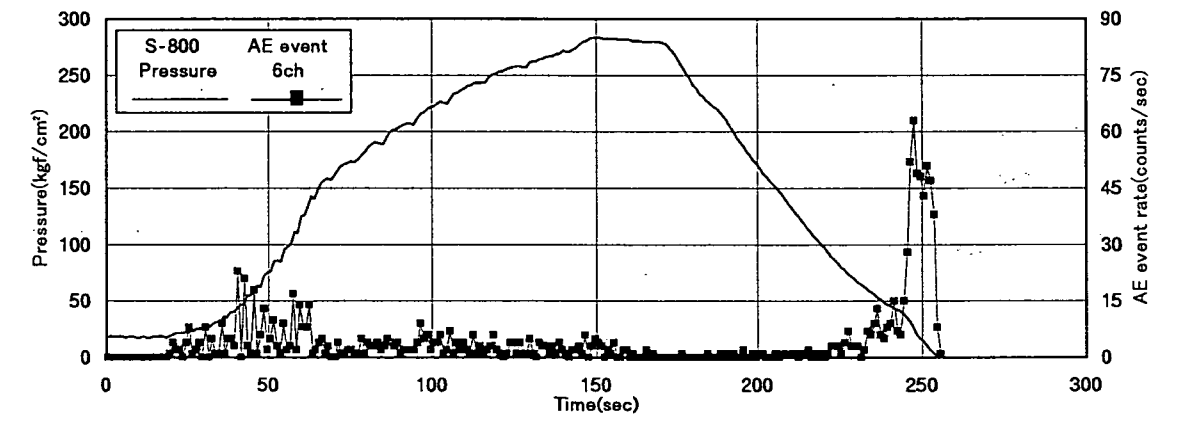
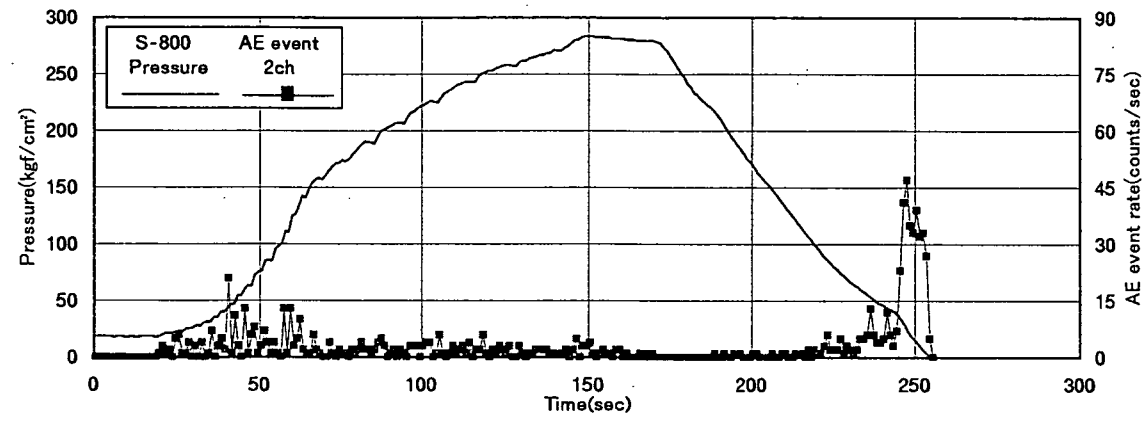
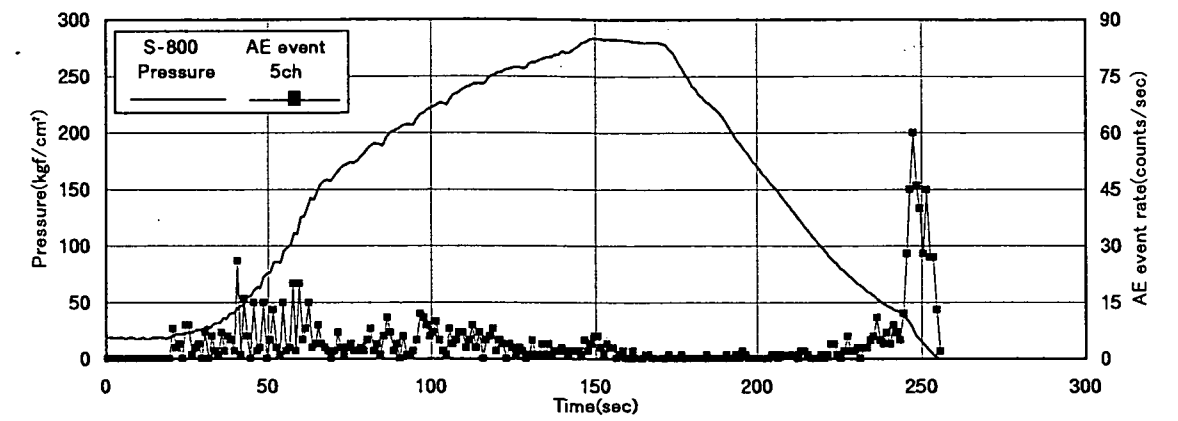
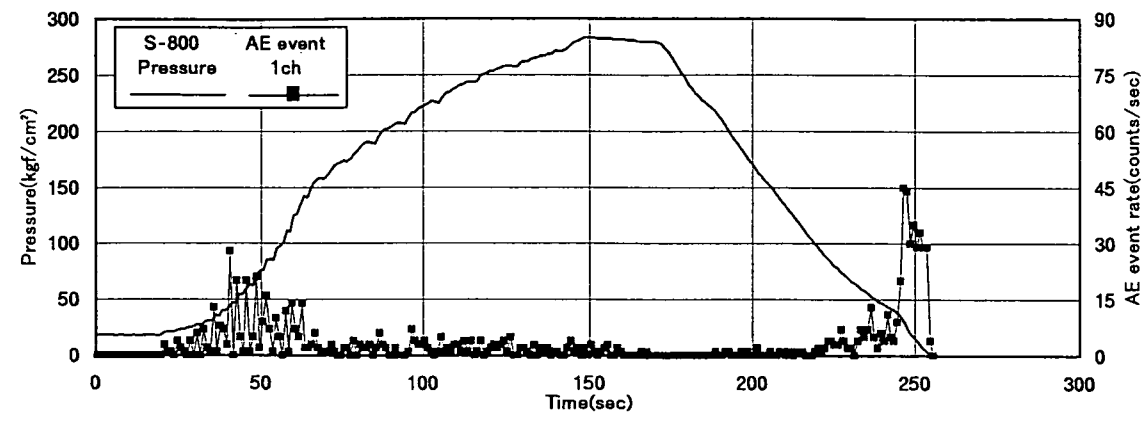
付図-38 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 215s8-1 再開口1回目)



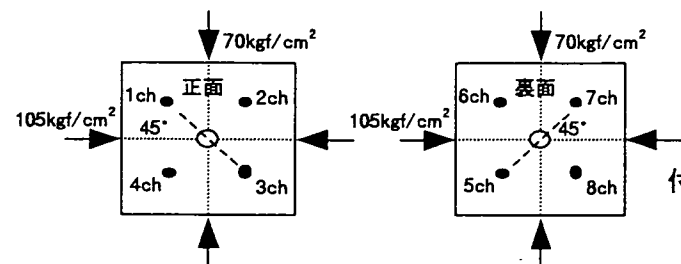
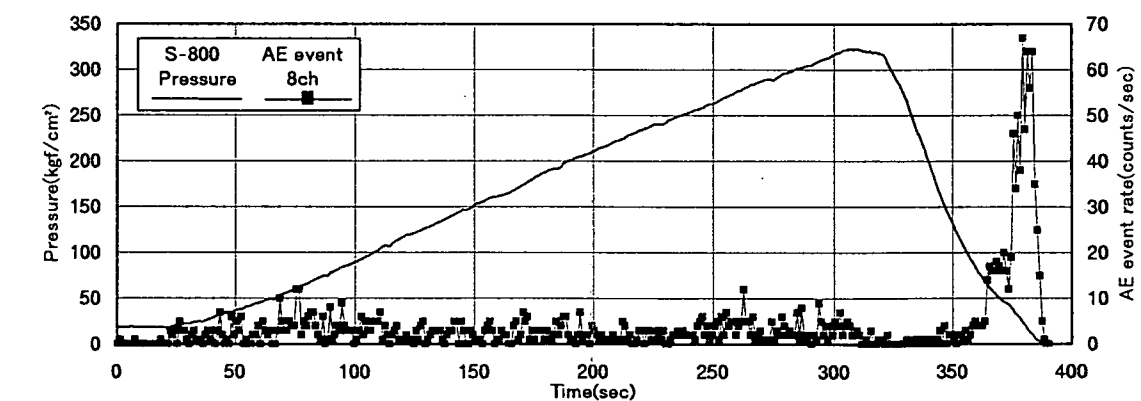
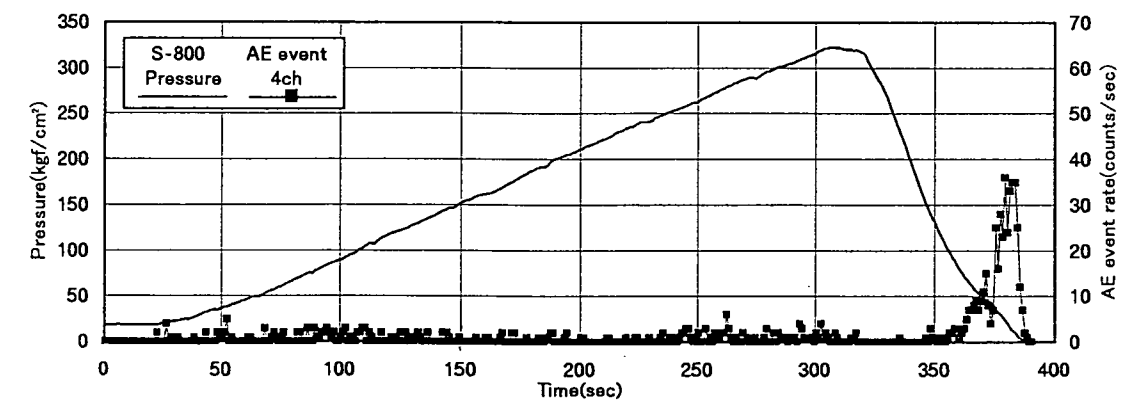
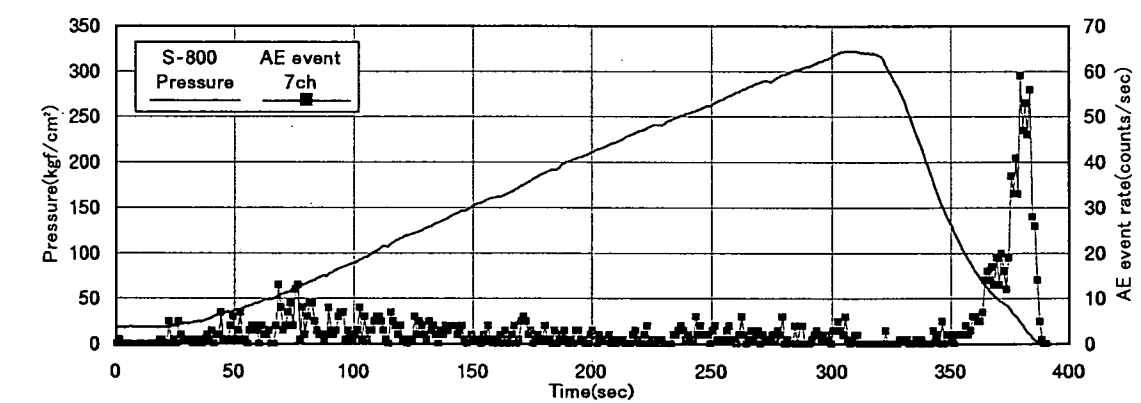
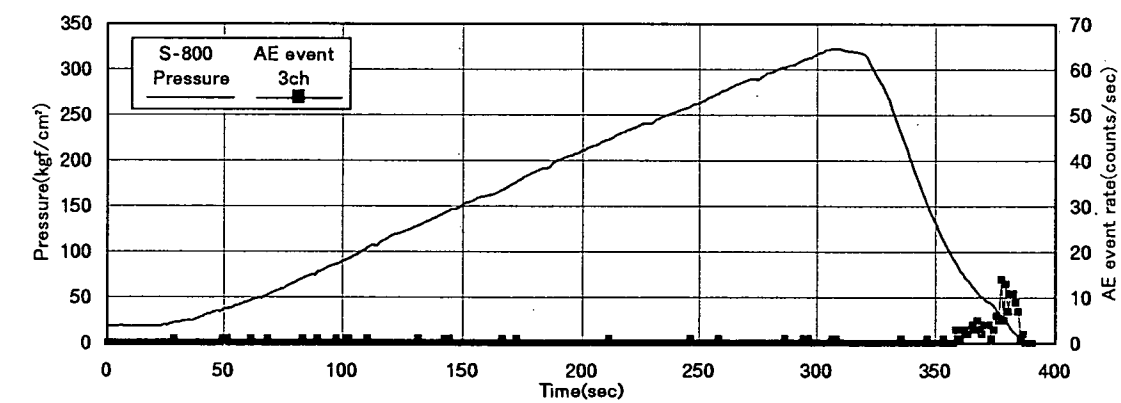
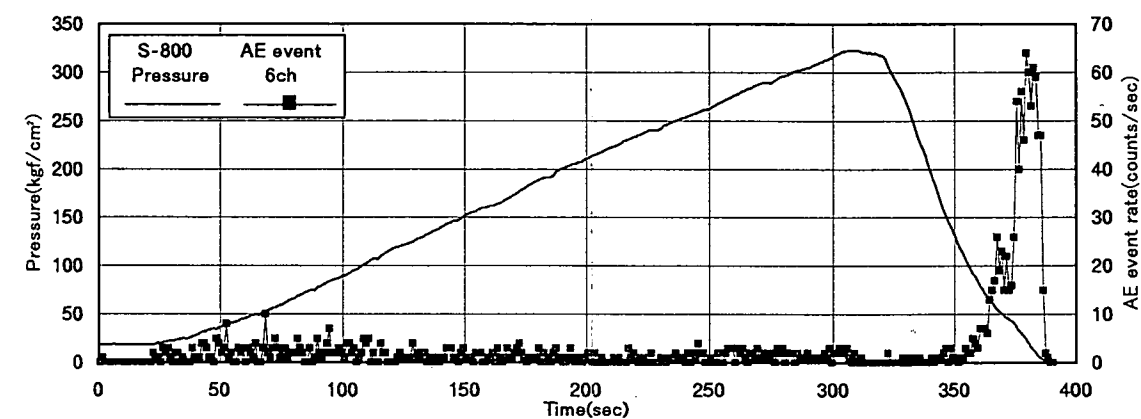
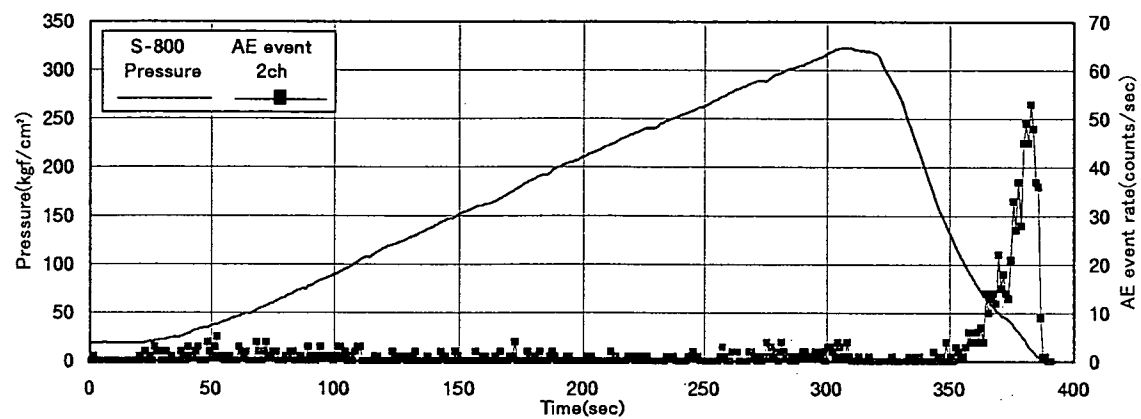
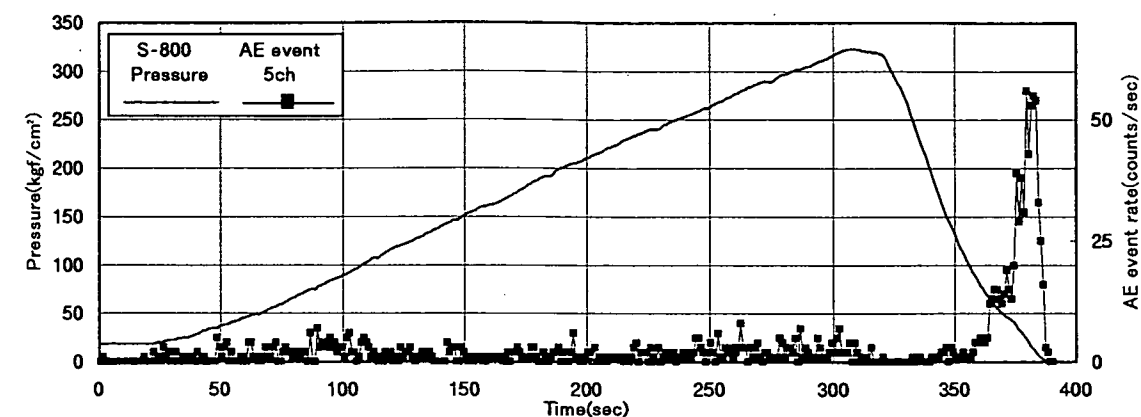
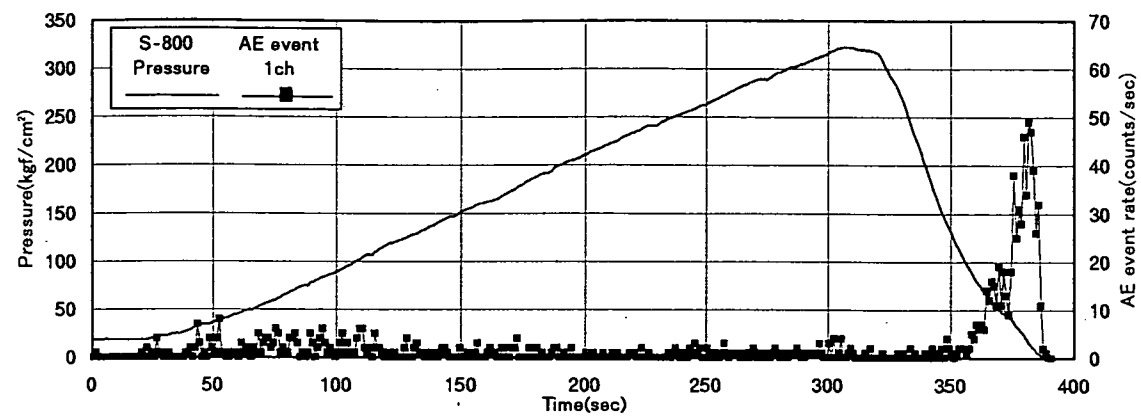
付図-39 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 226s8-1 破砕)



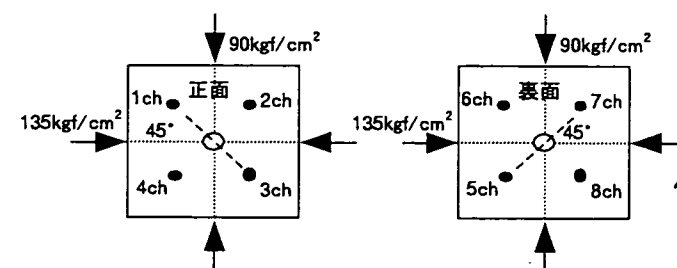
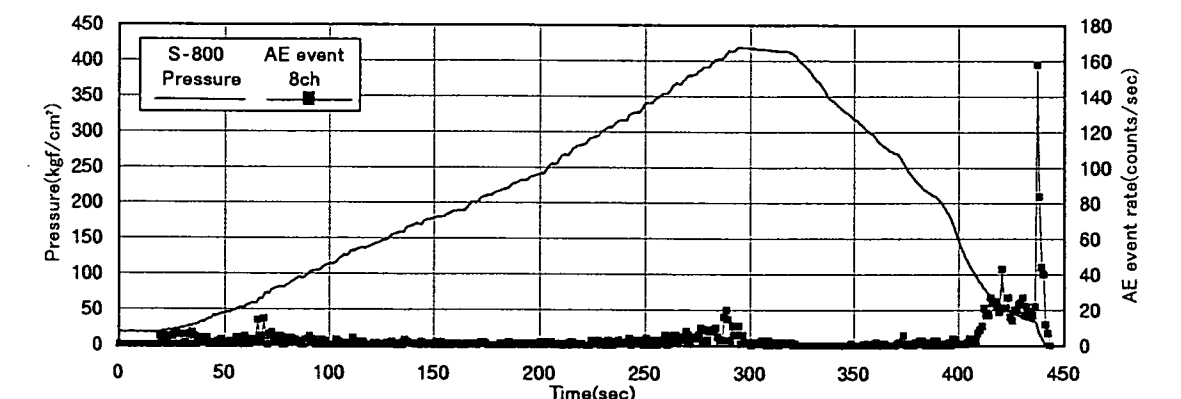
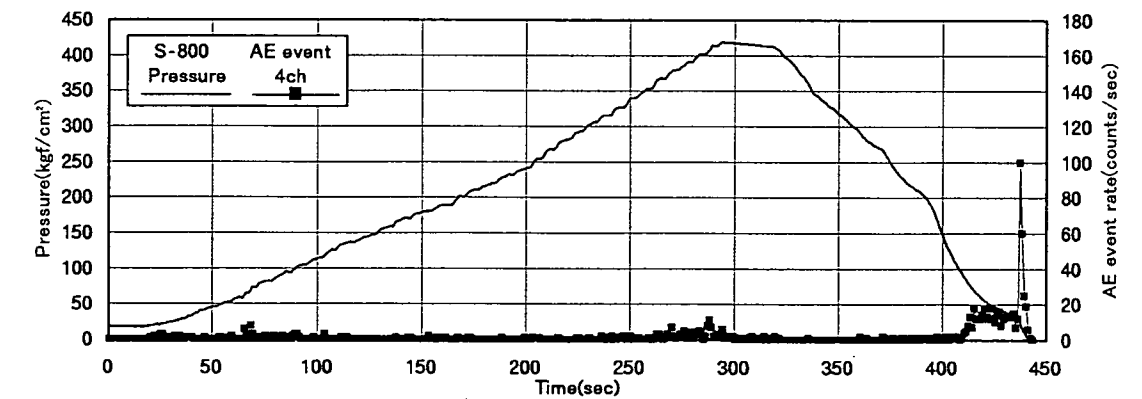
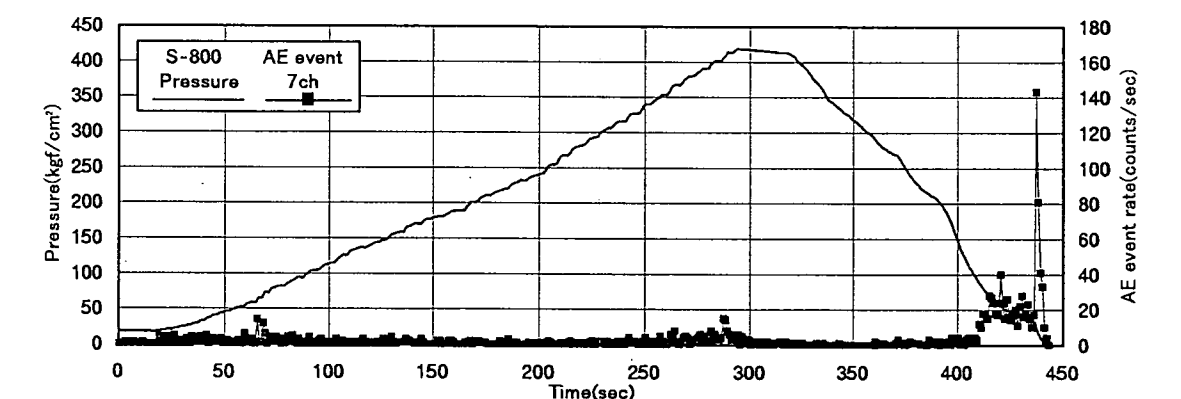
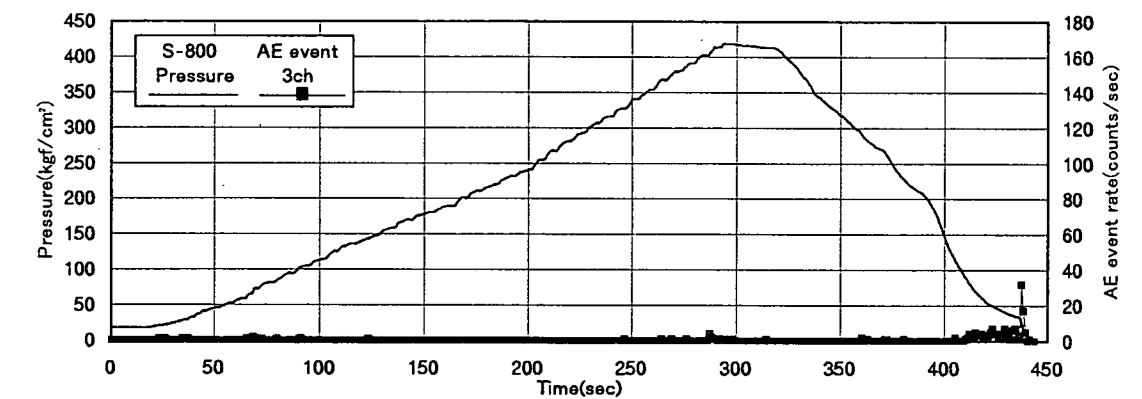
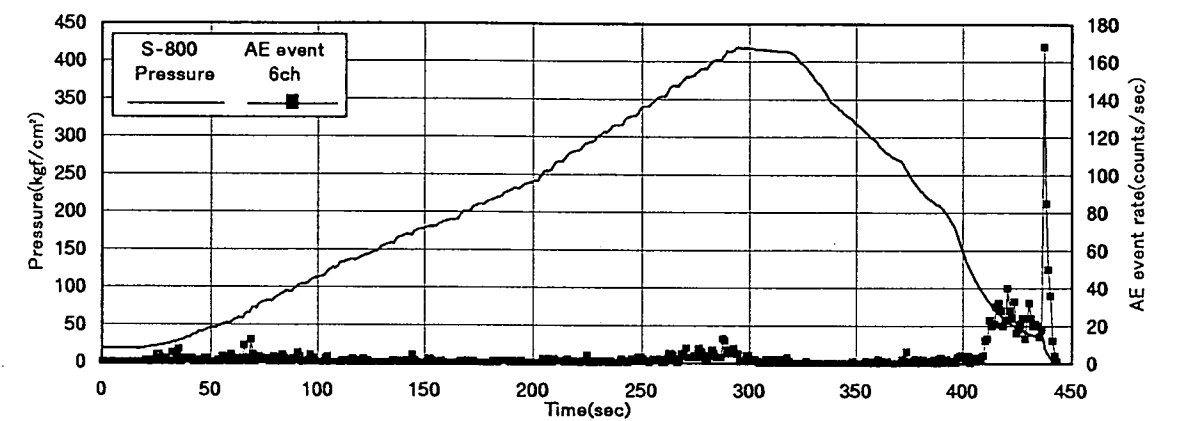
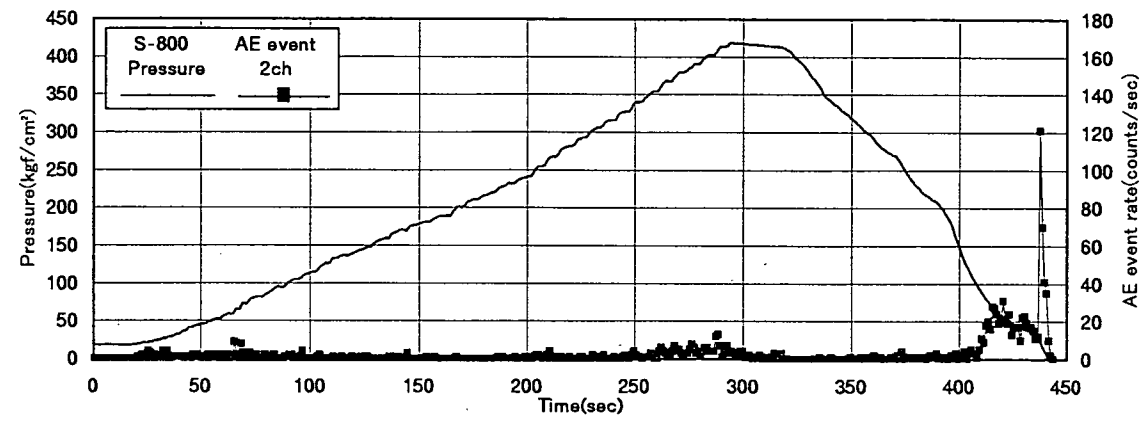
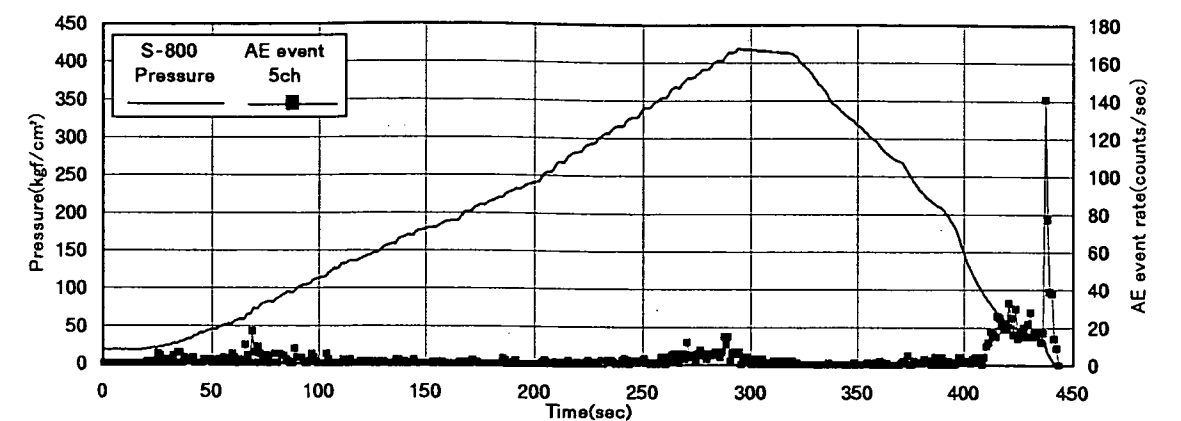
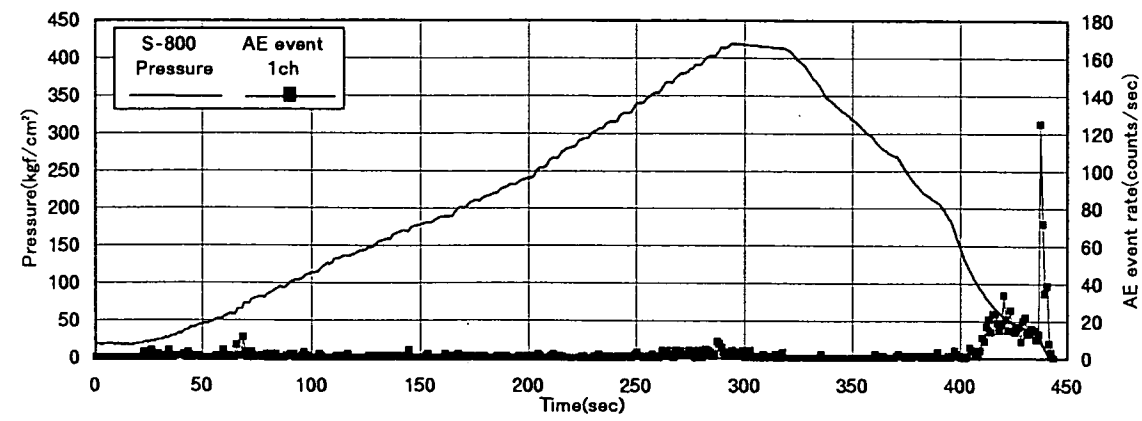
付図-40 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 226s8-1 再開口1回目)



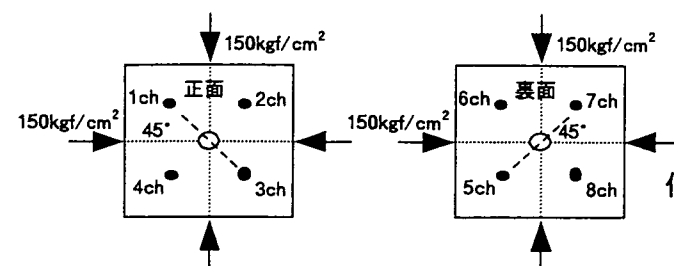
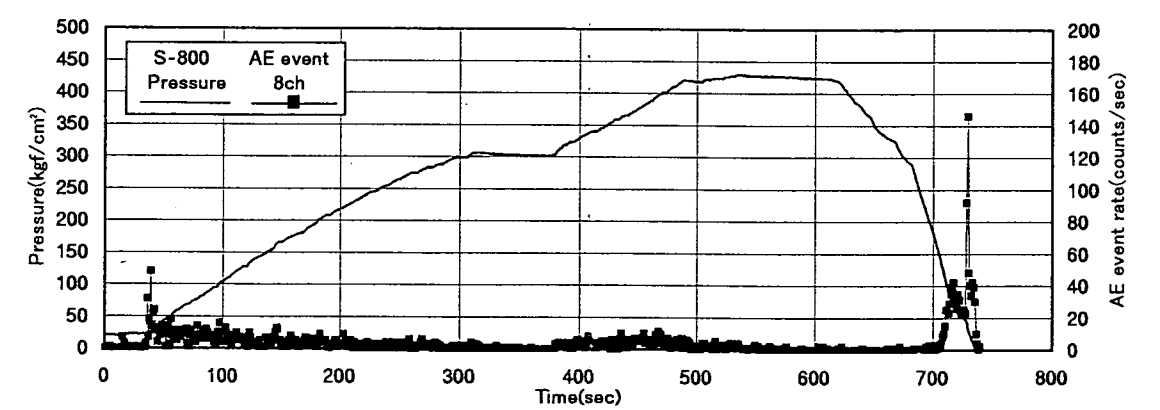
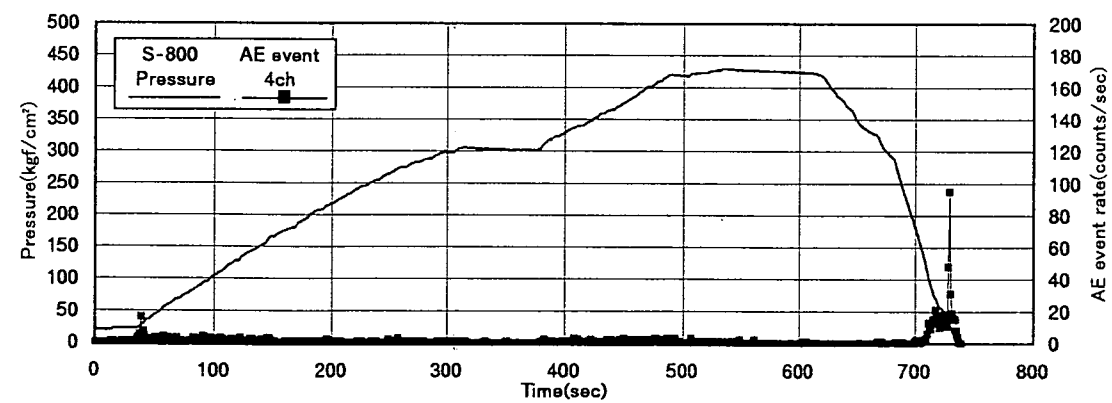
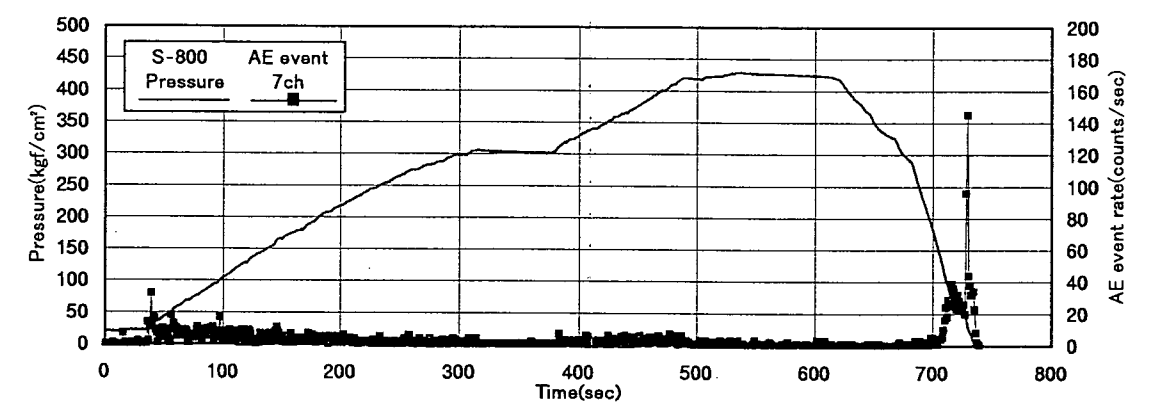
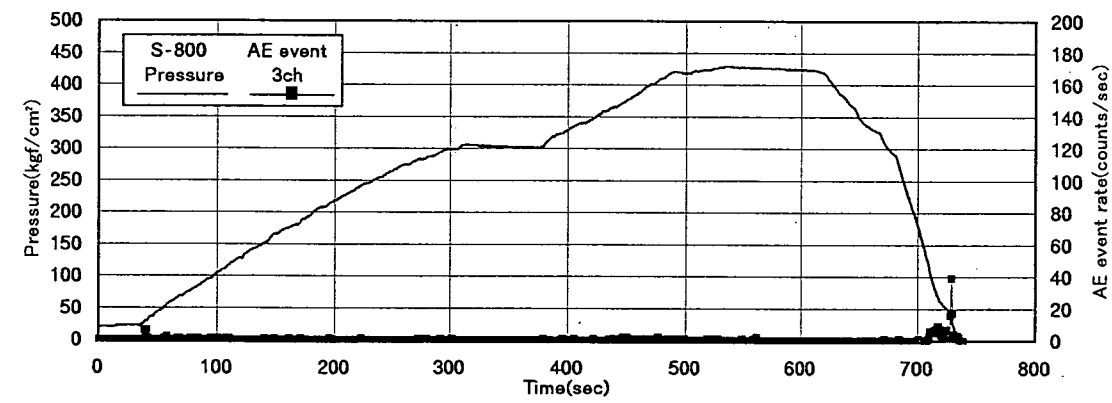
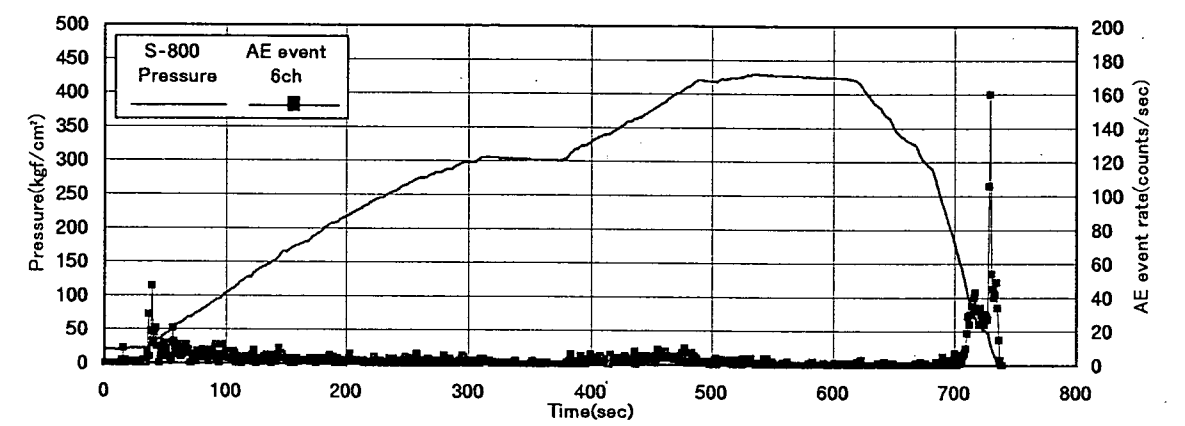
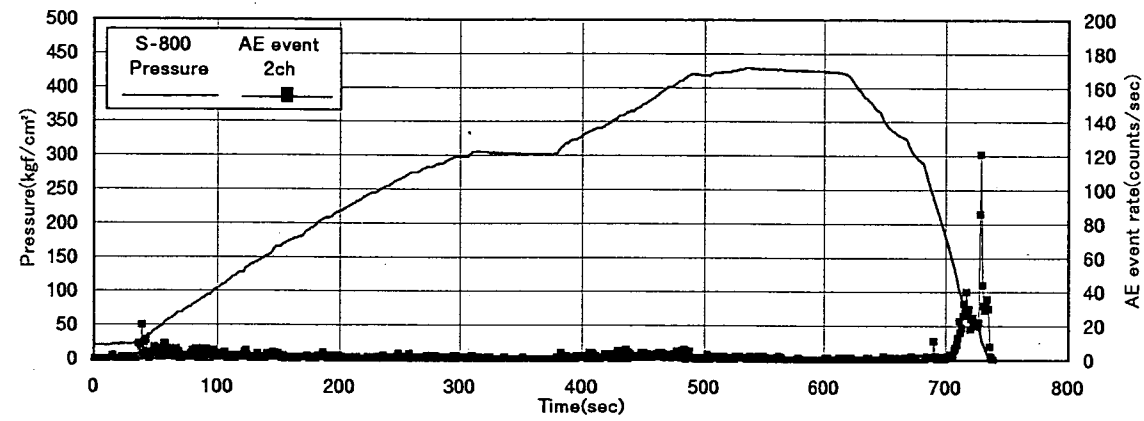
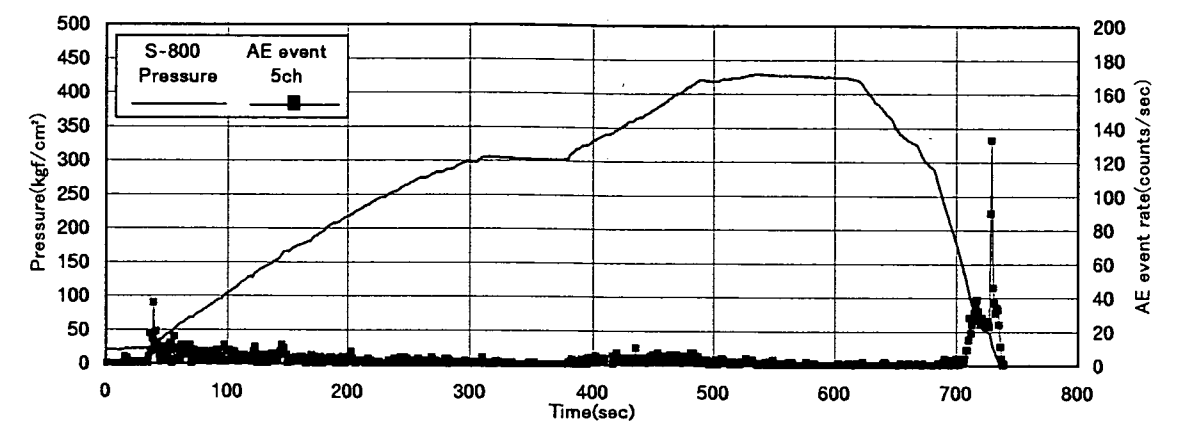
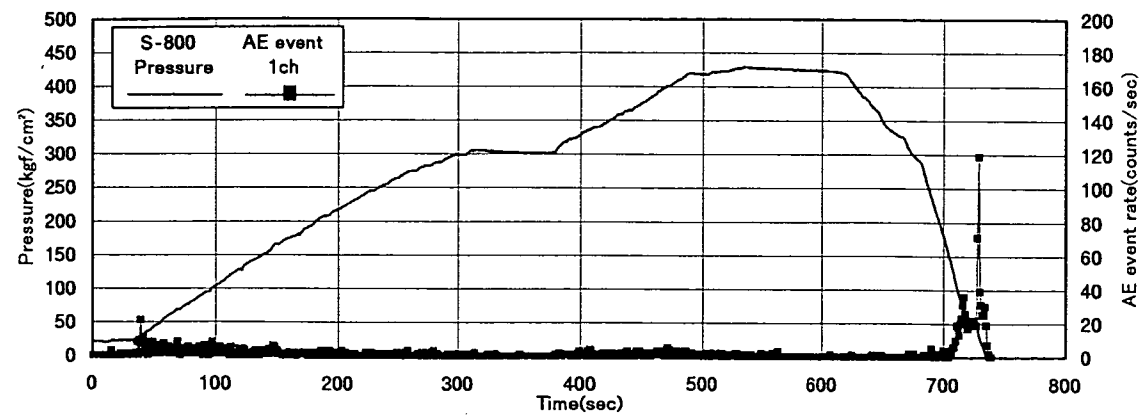
付図-41 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 227s8-2 再開口1回目)



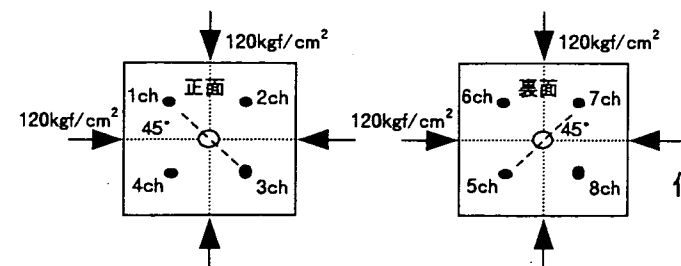
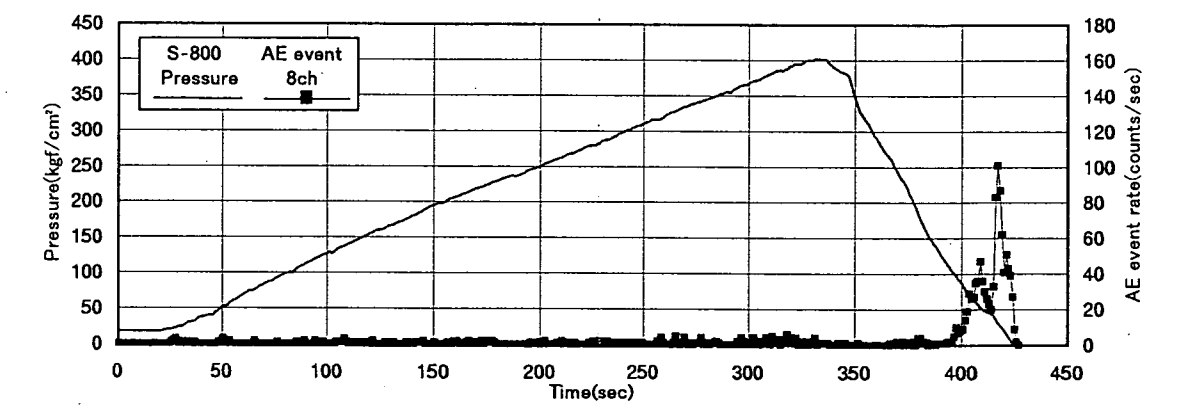
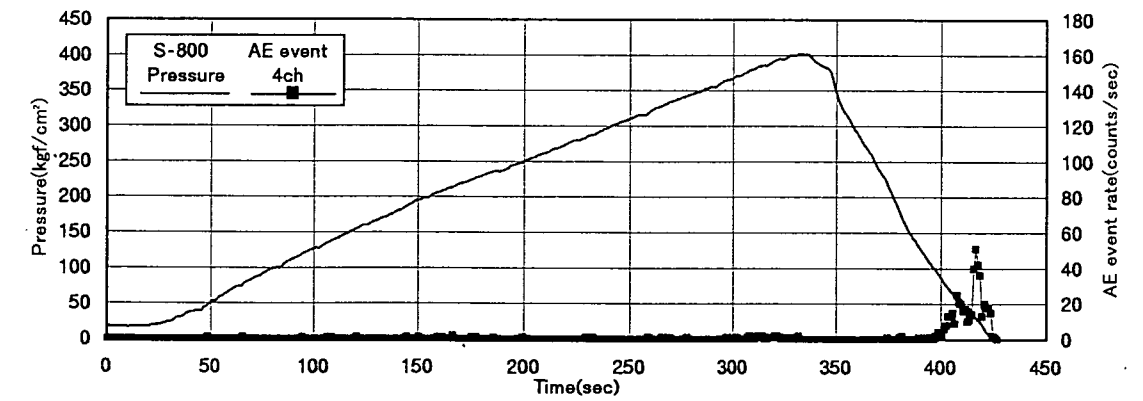
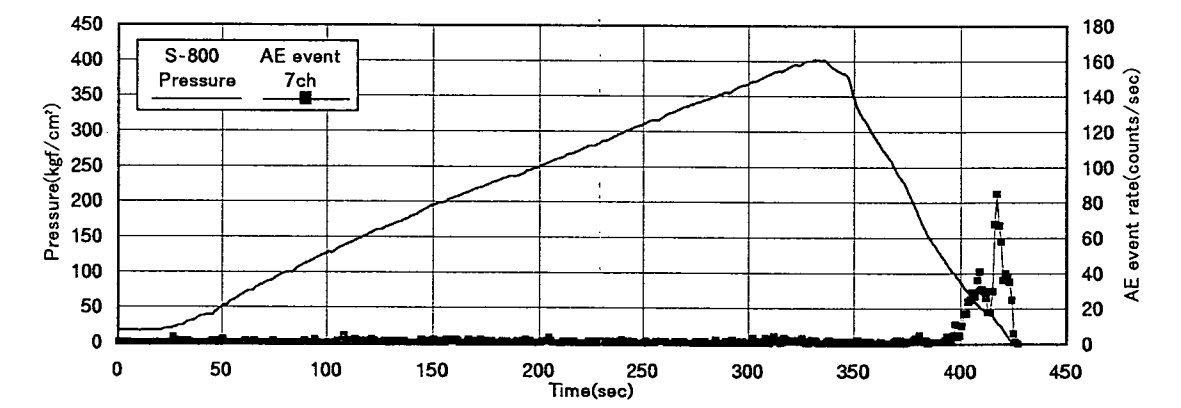
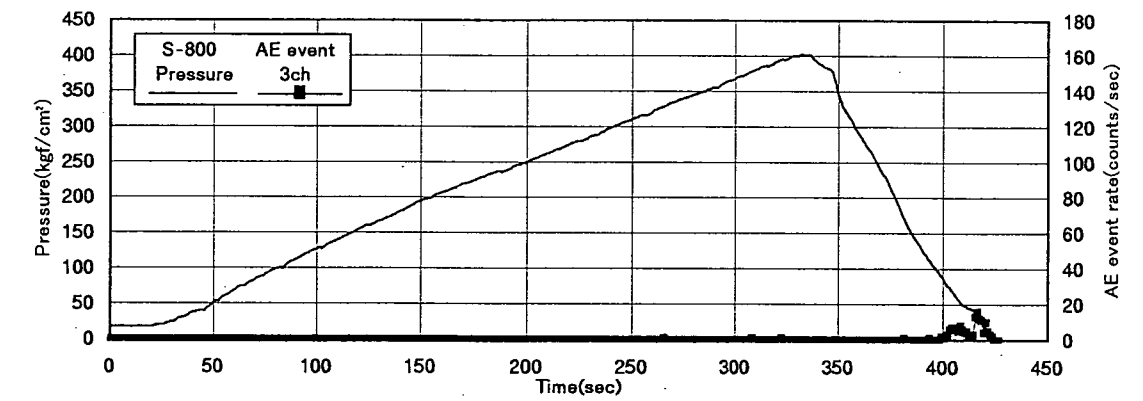
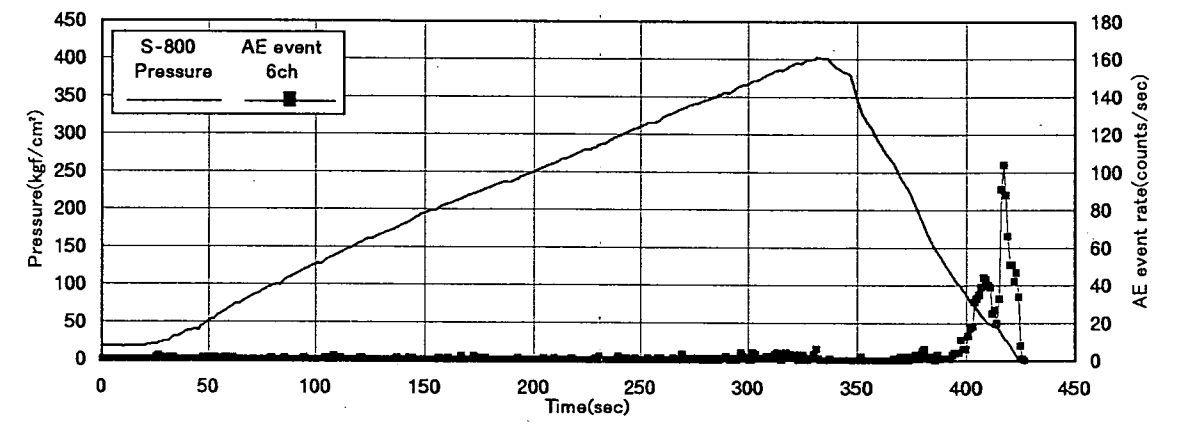
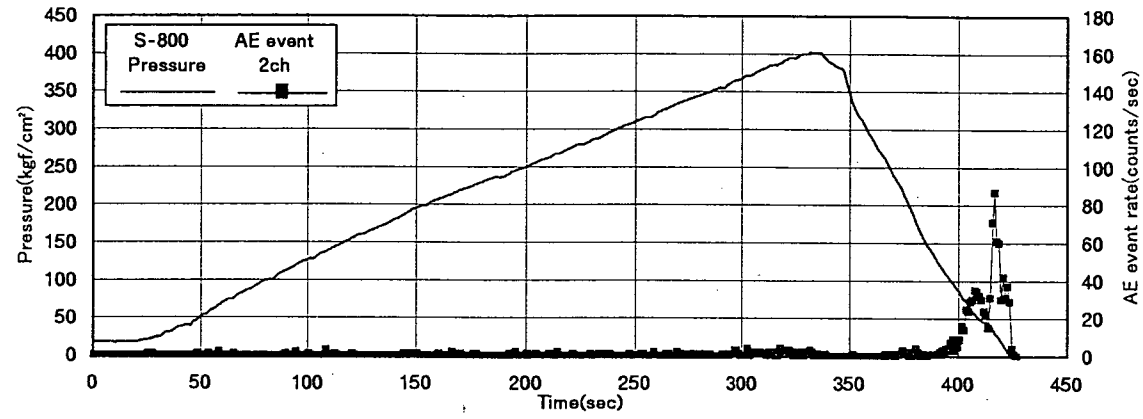
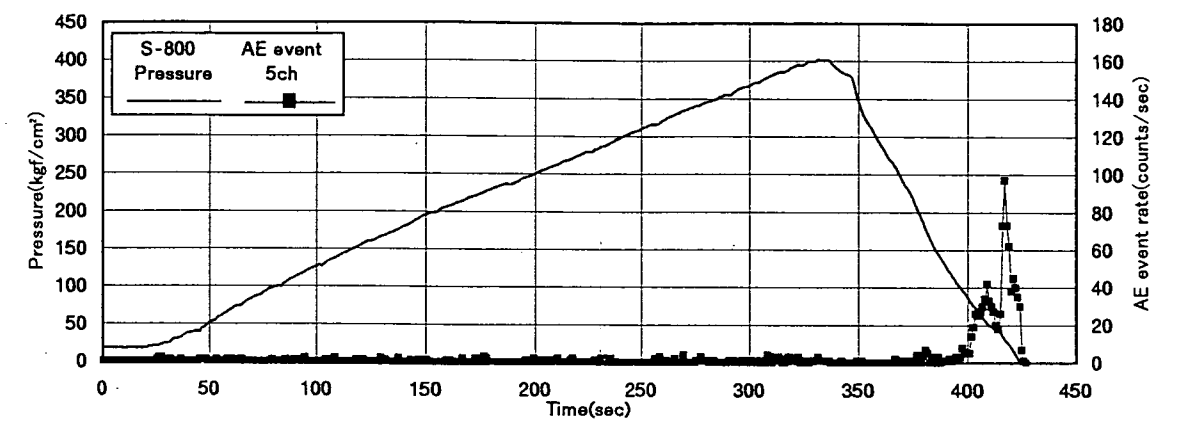
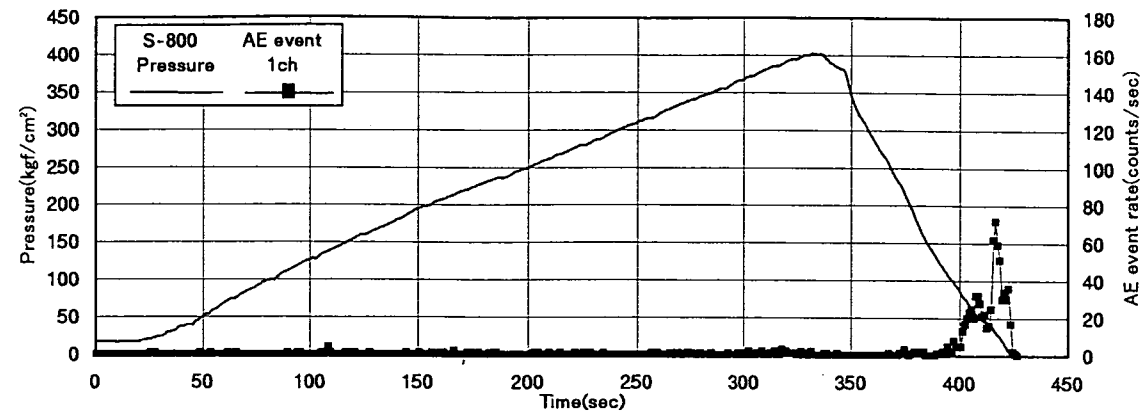
付図-42 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 228s8-1 再開口1回目)



付図-43 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 229s8-1 再開口1回目)



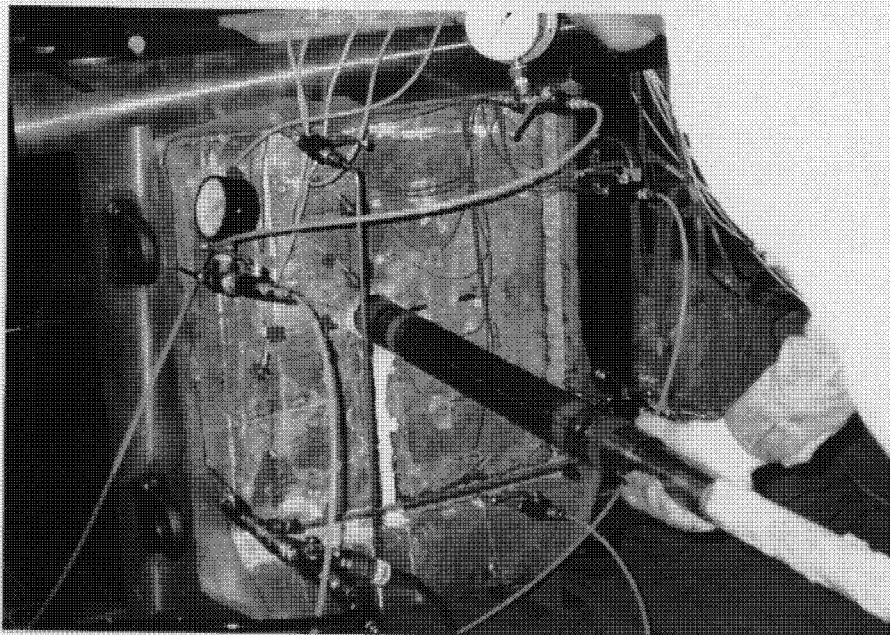
付図-44 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 225s8-1 再開口1回目)



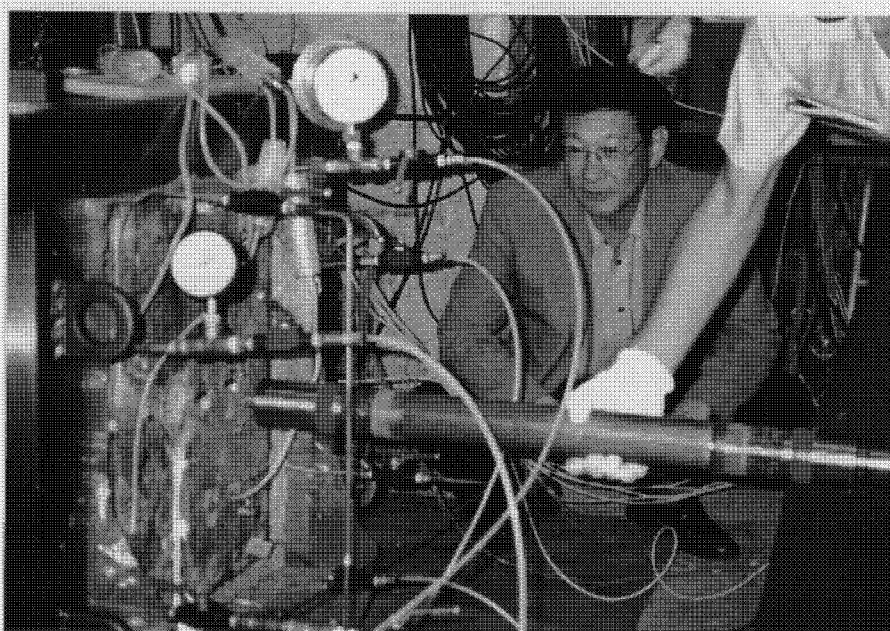
付図-45 載荷圧とAEの発生数との関係(試験 224s8-2 再開口1回目)

< 卷末資料2 >

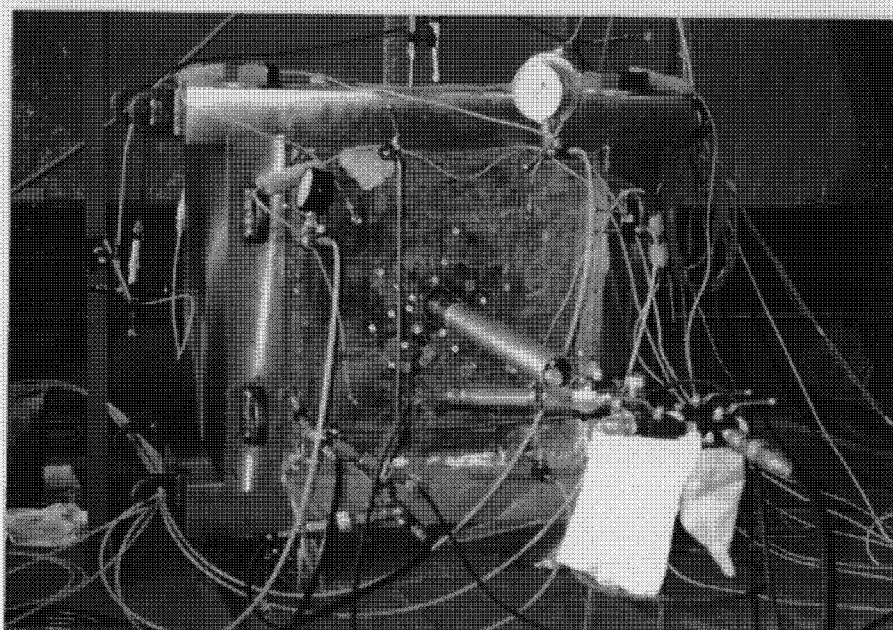
調査写真



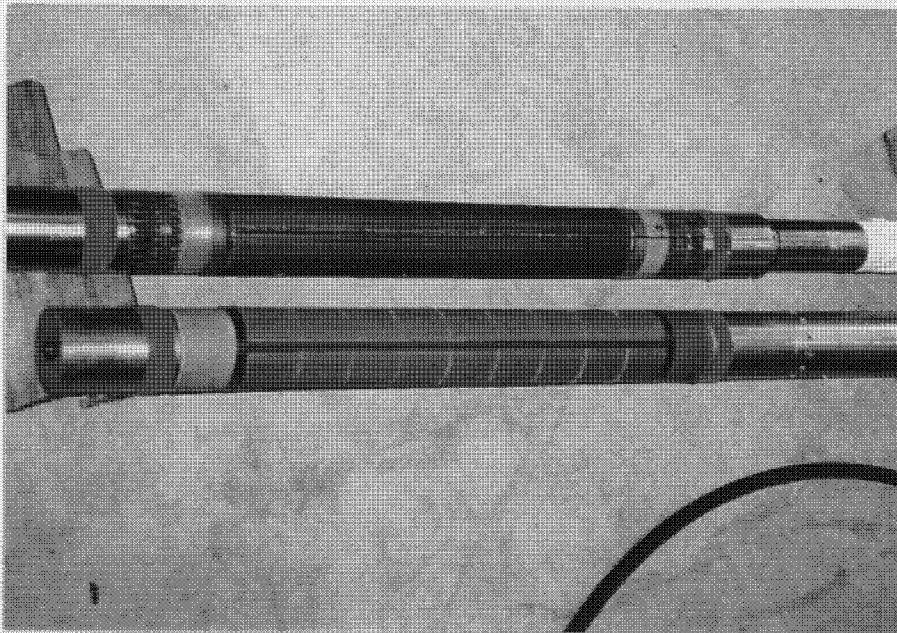
立方供試体に
S-800を挿入



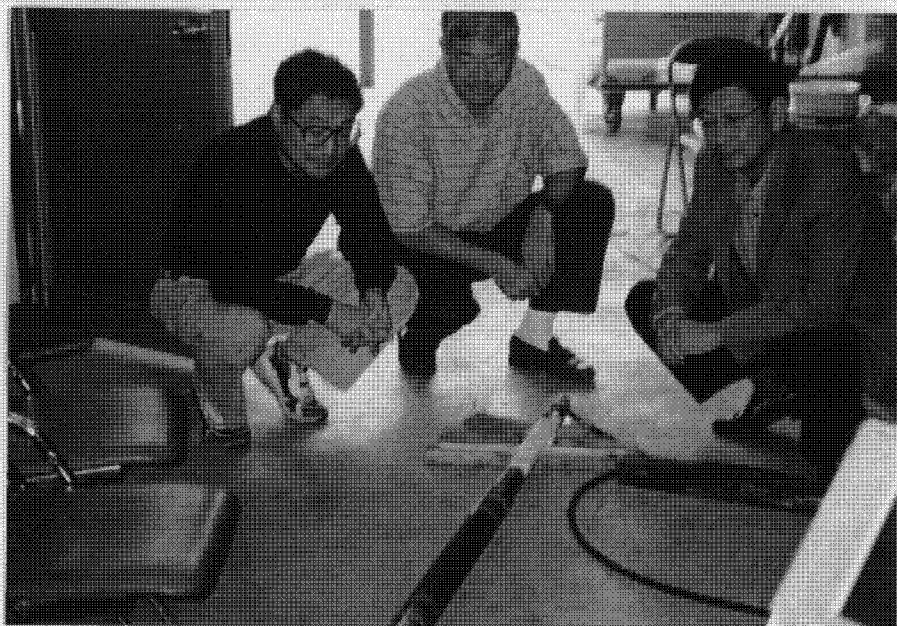
立方供試体に
S-800を挿入
(後方は水田教授)



立方供試体に
据えたS-500



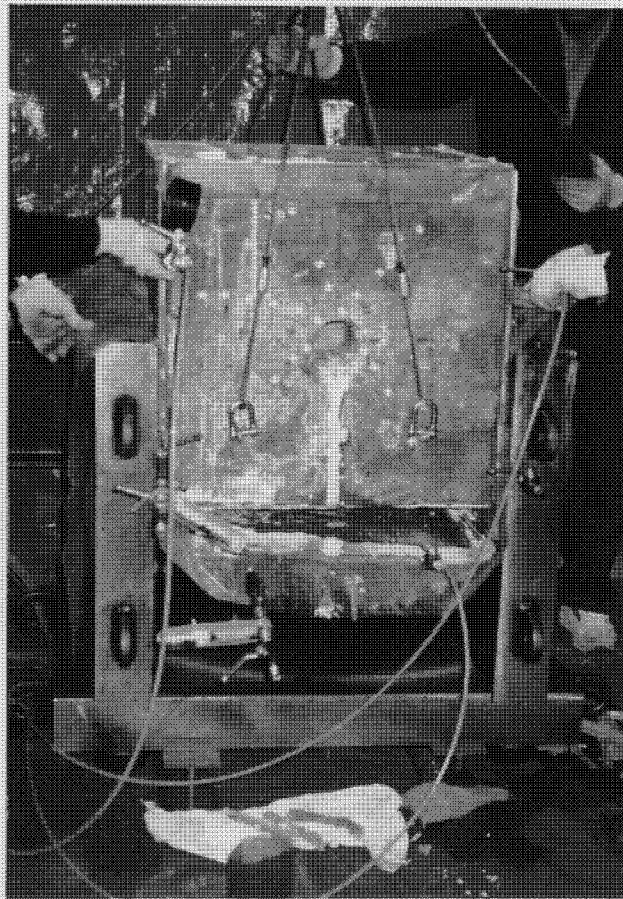
S-500プローブ
 (右 昨年の試験用)
 S-800プローブ
 (左 今年の試験用)



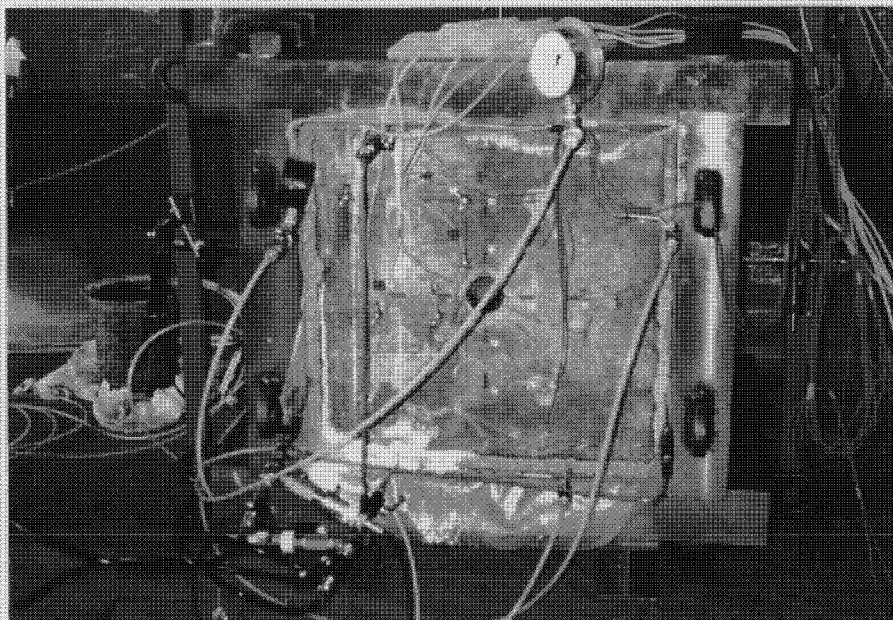
今年の試験用
 S-800プローブ
 (右 水田教授)
 (左 石田助教授)



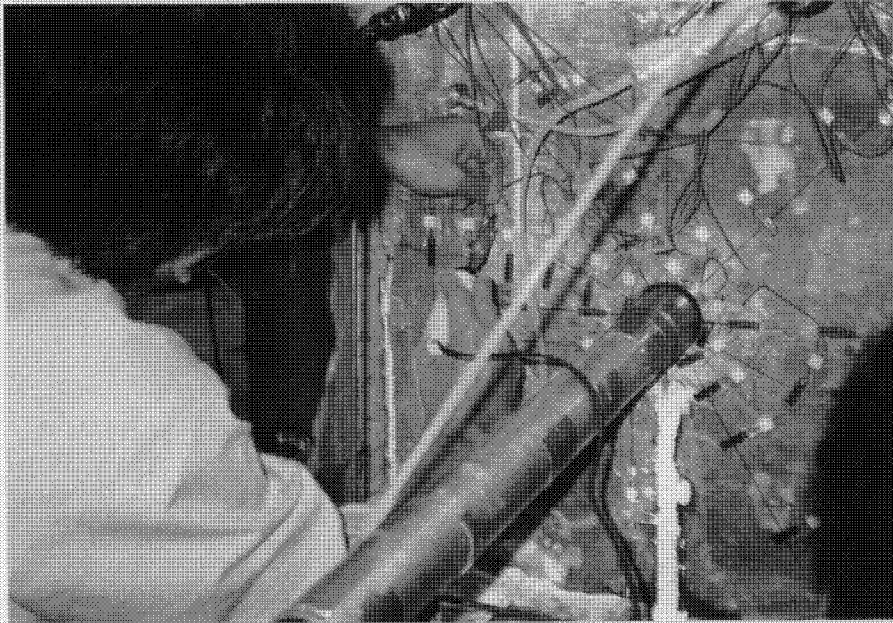
今年の試験用
 S-800プローブ



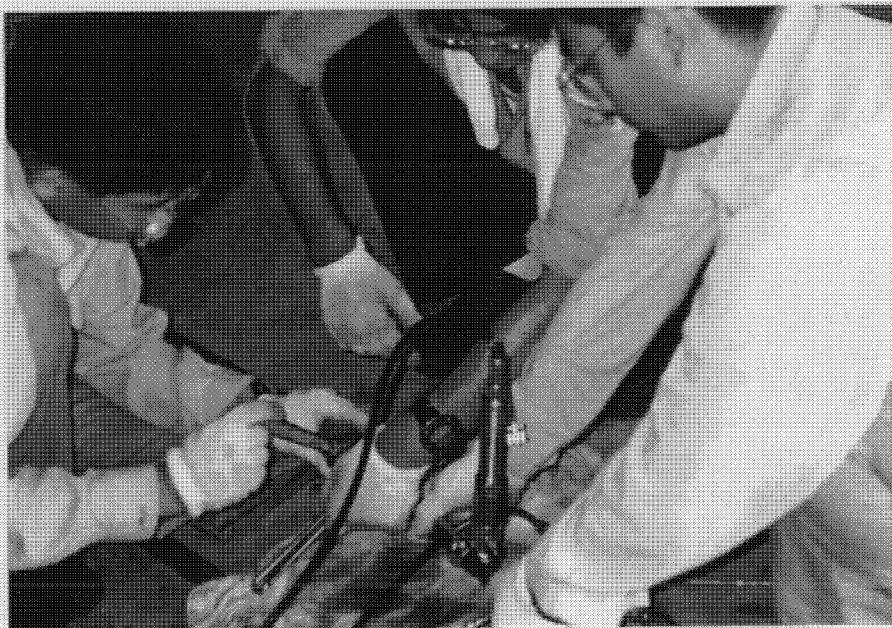
60×60×60cm
立方供試体を
載荷装置に
据え付ける作業



60×60×60cm
立方供試体を
据えた載荷装置



立方供試体に
歪ゲージを貼る



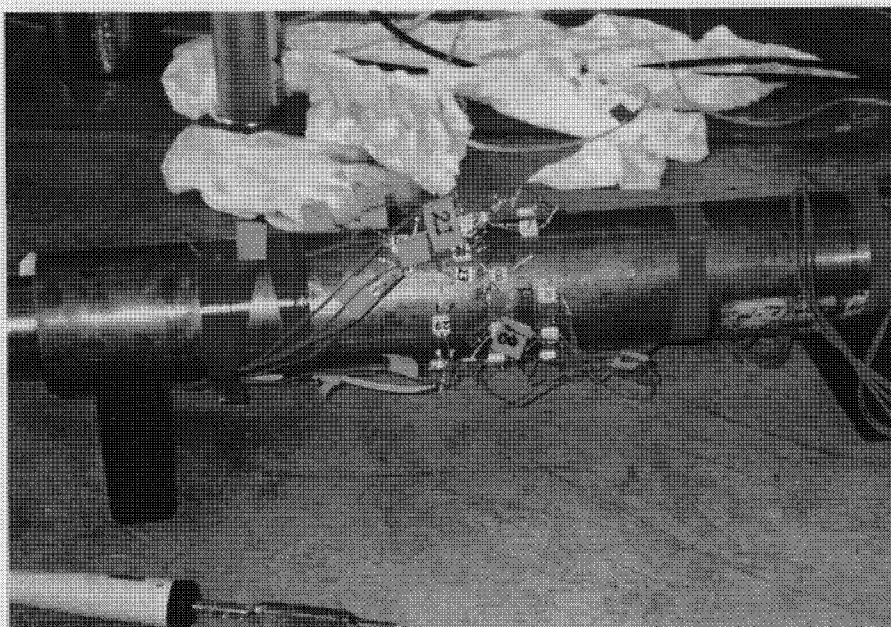
プローブの
油圧系統の配管



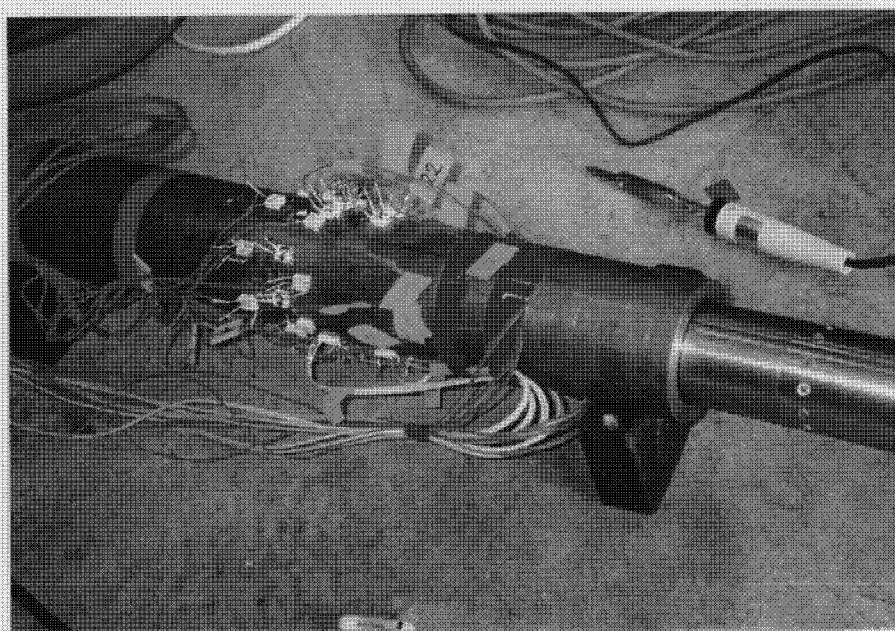
鋼管内载荷による
プレスケールでの
プローブ挙動把握



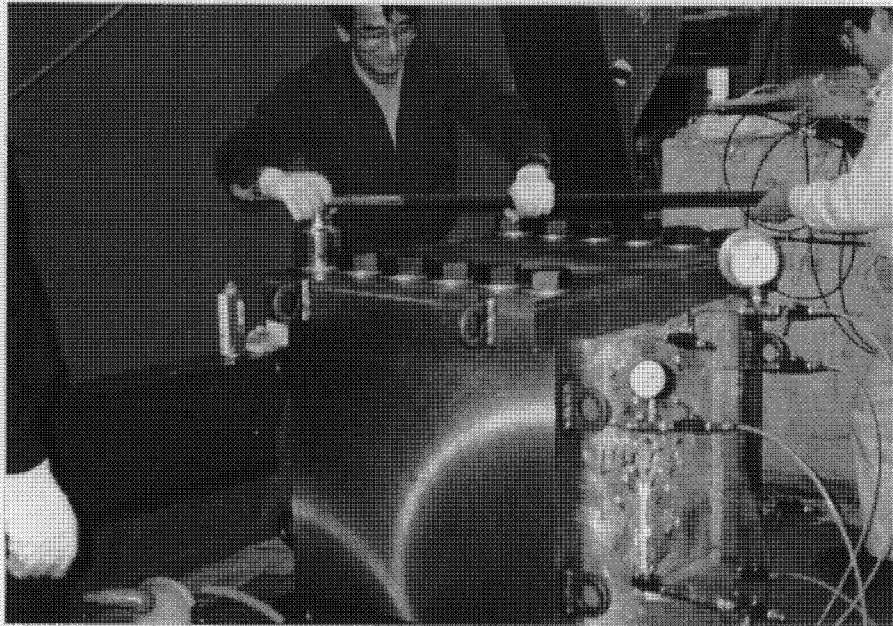
室内破碎試験に
おいて実施した
供試体内の型取り



鋼管内に
据えたS-800
(鋼管内載荷試験)



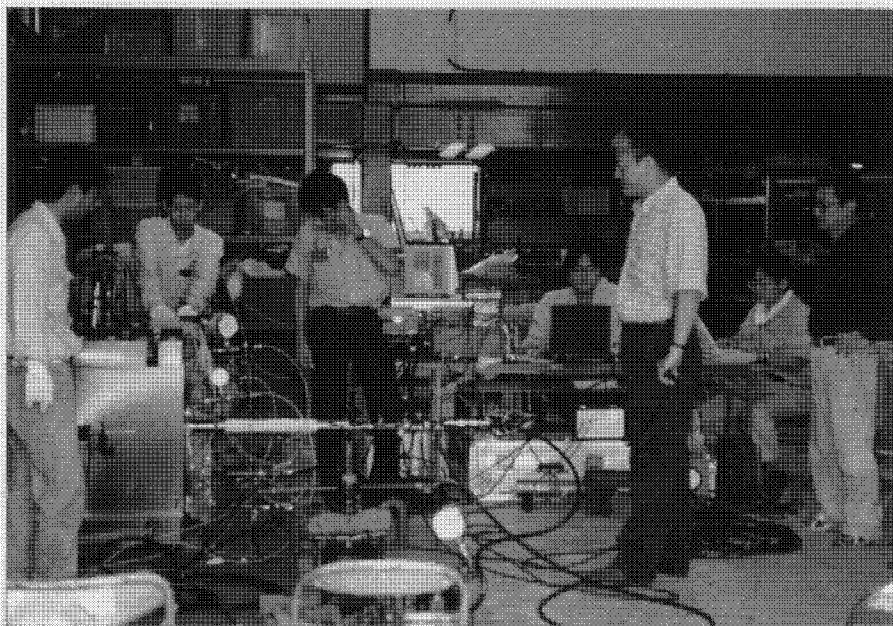
鋼管内に
据えたS-800
(鋼管内載荷試験)



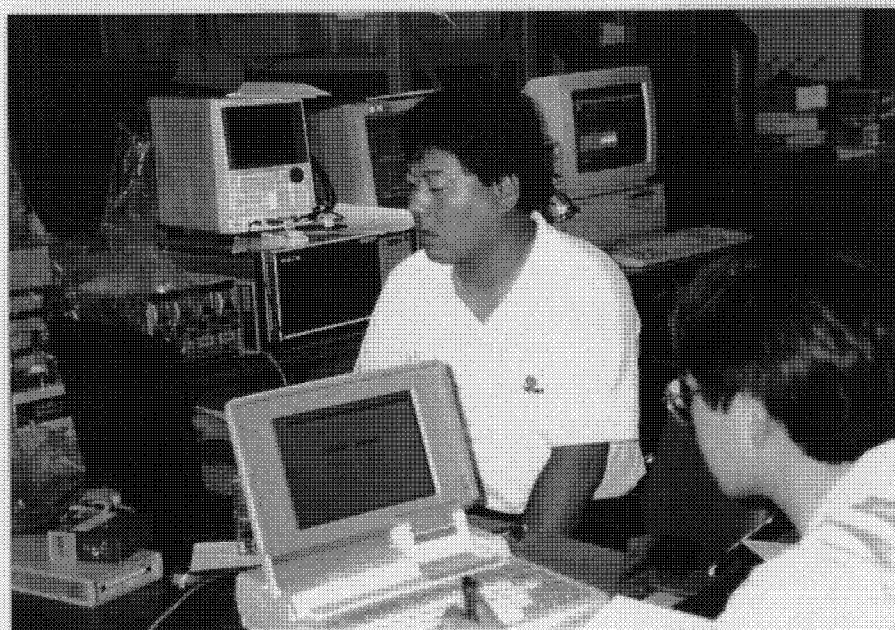
試験後試験装置
から供試体を
取り出す



試験後試験装置
から供試体を
取り出す



室内供試体試験中
(中央は石田助教授)



室内供試体試験中
(載荷重、AE計測中)