

高速実験炉「常陽」建物、機器・配管系の耐震性再評価

1997年7月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

高速実験炉「常陽」建物、機器・配管系の耐震性再評価

磯崎 和則^{*1}、富田 直樹^{*1}

要 旨

平成 7 年 1 月 17 日早朝に発生した兵庫県南部地震を契機に、原子力安全委員会及び科学技術庁原子力安全規制局原子炉規制課は、安全審査に用いられている耐震設計に関する関連指針類の妥当性の検討を行うとともに、昭和 56 年審査指針制定以前に建設された原子力施設に対して、昭和 56 年審査指針に基づく再評価を要請した。

高速実験炉「常陽」は、昭和 45 年 2 月に原子炉設置許可を受領した施設であるが、MK-Ⅲ冷却系改造に係る設置変更許可申請において、既に、昭和 56 年審査指針に基づく再評価を行っていることから、科学技術庁の要請対象施設となっていない。しかし、MK-Ⅲにおける評価は、改造範囲に限定されていることから、この範囲を拡大して耐震性の再評価を行った。

昭和 56 年審査指針の考え方に基づき策定された基準地震動及び静的地震力を用いた再評価の結果、建物、機器・配管系の構造健全性に問題ないことを再確認した。なお、これら耐震性評価における地盤内伝播解析、建物動的応答解析における解析モデルの諸条件は、JEAG4601の1987年版及び1991年版（追補版）に基づき設定している。また、これらの設定にあたっては、敷地における地盤調査結果及び実機の起振実験等に基づき設定しており、その諸定数の妥当性が確認されたもので、かつ、保守性が考慮されていることを技術的に確認した。

*1：大洗工学センター 実験炉部 原子炉第 2 課

Re-evaluation of Seismic Design for JOYO Buildings and Equipments

K. Isozaki*¹, N. Tomita*¹

Abstract

Hyougo-ken southern earthquake broke out in 1997/01/17. The Atomic Energy Safety Commission considered reasonable of the design guide for seismic design. And the Science and Technology Agency(STA) required reevaluation of atomic power facilities built by old design guide according to the new seismic design guide.

JOYO obtained the construction license in 1970/02. Heat transport system and buildings of JOYO was reevaluated by the new seismic design guide for the MK-III project. So, JOYO was not required reevaluation by STA. But, this evaluation of MK-III was limited to reconstruction area, and the seismic design was reevaluated extensively to confirm earthquake proof characteristics.

The structural integrity of buildings and equipments was confirmed by the result of reevaluation by the new seismic design guide. The analysis model conditions were established according to the 1987 and 1991 version of JEAG. This was done by ground investigation result and buildings vaibration test. It was made clear that the analysis model conditions were reasonable and conservative from a technical view point.

*1 : Maintenance Section, Experimental Reactor Division, OEC

目 次

1. 概 要	1
2. 耐震設計の経緯	2
2. 1 当初設置許可における耐震設計の考え方	2
2. 2 設置変更（その11）及び設置変更（その13）における耐震設計の考え方	2
2. 3 本耐震性評価における耐震設計の考え方	2
3. 耐震重要度分類の新旧比較	4
4. 設計用基準地震動及び建物入力地震動	8
5. 建物動的応答解析モデルと静的震度の算定方法	19
5. 1 建物動的応答解析モデル	19
5. 2 静的震度の算定方法	19
6. 建物動的応答解析結果と静的地震力	35
6. 1 建物動的応答解析結果	35
6. 2 静的地震力	35
7. 建物支持地盤の安定性	50
7. 1 支持力に対する安定性	50
7. 2 すべりに対する安定性	50
7. 3 沈下に対する安定性	51
7. 4 液状化に対する安定性	52
8. 建物の評価結果	58
8. 1 静的地震力に対する評価	58
8. 2 動的地震力に対する評価	59
9. 機器・配管系の動的加速度及び静的震度の新旧比較	66
9. 1 原子炉建物及び原子炉附属建物内機器・配管系	66
9. 2 主冷却機建物内機器・配管系	66
10. 原子炉格納容器の評価結果	71
10. 1 原子炉格納容器の仕様	71
10. 2 耐震評価	71
11. 排気筒の評価結果	79
11. 1 排気筒の仕様	79
11. 2 排気筒の評価条件	79
11. 3 排気筒の評価結果	81
12. 原子炉容器の評価結果	84
12. 1 評価部位	84
12. 2 地震荷重	84
12. 3 地震以外の荷重	84
12. 4 解析結果	85
12. 5 評価結果	85

13. 1次及び2次冷却系主配管の評価結果	94
13.1 荷重条件	94
13.2 評価結果	95
14. 動的機器の評価結果	98
14.1 制御棒駆動機構及び制御棒	98
14.2 他の動的機器	98
15. 耐震性評価の妥当性及び保守性について	101
15.1 概 要	101
15.2 地盤内伝播解析	101
15.3 建物動的応答解析	105
15.4 機器・配管系動的応答解析	107
16. まとめ	133
17. 参考文献	134

図リスト

図 4-1 設計用入力地震動の策定方法	9
図 4-2 設計用応答スペクトルの包絡関係 (S_1 (設計用最強地震) 減衰定数 5 %) ..	13
図 4-3 設計用応答スペクトルの包絡関係 (S_2 (設計用限界地震) 減衰定数 5 %) ..	14
図 4-4 設計用基準地震動 S_1 及び S_2 の時刻歴波形 (解放基盤表面)	16
図 4-5 原子炉建物及び原子炉附属建物基礎底面 (GL-31.8m) の 設計用入力地震動の時刻歴波形 (設計用入力地震動 S_2 及び EL CENTRO)	17
図 4-6 原子炉建物及び原子炉附属建物側面の設計用入力地震動 S_2 の時刻歴波形 .. (GL-25.08m、GL-12.95m、GL-4.3m、GL-0.0m)	18
図 5-1 原子炉建物、原子炉附属建物及び主冷却機建物の概略断面図	23
図 5-2 当初設置許可における原子炉建物及び原子炉附属建物の解析モデル	24
図 5-3 当初設置許可における主冷却機建物の解析モデル	24
図 5-4 本耐震性評価における原子炉建物及び原子炉附属建物の解析モデル	25
図 5-5 本耐震性評価における主冷却機建物の解析モデル	25
図 5-6 本耐震性評価における原子炉建物及び原子炉附属建物底面ばね	29
図 5-7 本耐震性評価における原子炉建物及び原子炉附属建物側面ばね	30
図 5-8 本耐震性評価における主冷却機建物底面ばね	31
図 5-9 本耐震性評価における主冷却機建物側面ばね	32
図 6-1 原子炉建物各質点の最大応答加速度	38
図 6-2 原子炉附属建物各質点の最大応答加速度	39
図 6-3 主冷却機建物各質点の最大応答加速度	40
図 6-4 原子炉建物の機器・配管系の設計用地震層せん断力係数 及び震度 (A s、A クラス)	45
図 6-5 原子炉附属建物の機器・配管系の設計用地震層せん断力係数 及び震度 (A s、A クラス)	46
図 6-6 主冷却機建物の機器・配管系の設計用地震層せん断力係数 及び震度 (A s、A クラス)	47
図 10-1 原子炉格納容器の全体図	76
図 12-1 原子炉容器の評価部位	86
図 12-2 建物-原子炉容器連成系の解析モデル	87

図15- 1 設計用基準地震動及び地盤・建物解析条件の設定フロー	110
図15- 2 解放基盤表面と内部基盤面の概念	111
図15- 3 地盤内伝播解析手法と S - R モデルにおける入力地震動の設定手法	111
図15- 4 解放基盤表面及び内部基盤面の地震波を逆増幅解析した例 (EL CENTRO 地震の地表面で観測された 地震波に基づく 1 次元波動理論による解析)	112
図15- 5 (1/2) 「常陽」敷地周辺の地質断面図 (A - A' 断面)	114
図15- 5 (2/2) 「常陽」敷地周辺の地質断面図 (B - B' 断面)	115
図15- 6 1 次元波動理論による地盤内伝播解析の概念	118
図15- 7 ある地盤の実測データとその地盤データに基づく 1 次元波動理論による解析結果の比較	119
図15- 8 「常陽」建設前の建設予定地周辺一帯における常時微動測定位置	120
図15- 9 「常陽」建設前の建設予定地周辺一帯での常時微動測定結果	121
図15- 10 第二使用済燃料貯蔵施設の増設の際に行われた 建物基礎底面付近の常時微動測定結果	122
図15- 11 地盤内伝播解析による地盤加速度応答スペクトル (減衰定数 1 %)	123
図15- 12 建物及び機器・配管系の耐震解析フロー	124
図15- 13 「常陽」の原子炉建物、原子炉附属建物及び主冷却機建物の概略断面図	125
図15- 14 理論解法による値から近似地盤ばねにする方法の概略図	126
図15- 15 「常陽」における地震観測位置 (S M A C 強震計)	128
図15- 16 機器・配管系の構造設計フロー	130
図15- 17 配管系の耐震解析モデルの設定例	131

表リスト

表 2-1 発電用原子炉施設の耐震設計と耐震設計に係る「常陽」設置変更の経歴	3
表 3-1(1/2) 耐震重要度分類の新旧比較	5
表 3-1(2/2) 耐震重要度分類の新旧比較	6
表 3-2 建物耐震重要度分類の新旧比較	7
表 4-1 敷地に与えた影響が大きいと考えられる主な地震	10
表 4-2 「新編日本の活断層－分布図と資料」を考慮した陸域の主な断層	11
表 4-3 地震動の設計用応答スペクトルのコントロールポイント（減衰定数 5 %）	12
表 4-4 「常陽」建物支持地盤の構造	15
表 5-1 原子炉建物及び原子炉附属建物モデルの諸定数	26
表 5-2 主冷却機建物モデルの諸定数	27
表 5-3 原子炉建物及び原子炉附属建物の地盤ばね定数（当初設置許可）	28
表 5-4 主冷却機建物の地盤ばね定数（当初設置許可）	28
表 5-5 各建物の近似地盤ばね定数（昭和56年審査指針（技術指針1991年版））	28
表 5-6 当初設置許可における建物の設計震度	33
表 5-7 「常陽」の建物支持地盤の構造	34
表 6-1 各建物の固有振動数	36
表 6-2 各建物の各質点における最大応答加速度	37
表 6-3 各建物の各要素における最大応答せん断力及び曲げモーメント (昭和56年審査指針)	41
表 6-4 設計用地震層せん断力係数及び震度（原子炉建物）	42
表 6-5 設計用地震層せん断力係数及び震度（原子炉附属建物）	43
表 6-6 設計用地震層せん断力係数及び震度（主冷却機建物）	44
表 6-7 静的地震力の算定結果 (原子炉建物、原子炉附属建物及び原子炉格納容器)	48
表 6-8 静的地震力の算定結果（主冷却機建物）	49
表 7-1 最大長期接地圧	54
表 7-2 最大短期接地圧	54
表 7-3 すべりに対する安全率	55

表 7-4 即時沈下量の算出結果	56
表 7-5 液状化に対する検討結果	57
表 8-1 静的地震力の算定結果 (原子炉建物、原子炉附属建物及び原子炉格納容器)	60
表 8-2 静的地震力の算定結果(主冷却機建物)	61
表 8-3 保有水平耐力の算出結果(静的)	62
表 8-4 建物の必要保有水平耐力に対する安全余裕	63
表 8-5 動的地震力と静的地震力との最大せん断力の比率 (原子炉建物及び原子炉附属建物)	64
表 8-6 動的地震力と静的地震力との最大せん断力の比率(主冷却機建物)	65
表 9-1 (1/2) 原子炉建物及び原子炉附属建物内 機器・配管系の動的加速度、静的震度の新旧比較	68
表 9-1 (2/2) 原子炉建物及び原子炉附属建物内 機器・配管系の動的加速度、静的震度の新旧比較	69
表 9-2 主冷却機建物内機器・配管系の動的加速度、静的震度の新旧比較	70
表 10-1 地震時に原子炉格納容器に発生するせん断力	77
表 10-2 地震時に原子炉格納容器に作用する曲げモーメント	77
表 10-3 原子炉格納容器に発生する応力	78
表 10-4 原子炉格納容器の総合評価結果	78
表 11-1 排気筒の解析モデル諸定数	83
表 11-2 排気筒の評価結果	83
表 12-1 原子炉容器及び炉内構造物モデルの諸定数	88
表 12-2 MK-I、IIにおける熱過渡事象の実績及び想定回数	89
表 12-3 MK-IIIにおける熱過渡事象及び想定回数(運転状態I)	90
表 12-4 MK-IIIにおける熱過渡事象及び想定回数(運転状態II、III、IV)	91
表 12-5 建物-原子炉容器連成系による固有値解析結果	92
表 12-6 地震時に原子炉容器に発生するモーメント	92
表 12-7 原子炉容器の評価結果	93
表 13-1 1次冷却系主配管の評価結果	96
表 13-2 2次冷却系主配管の評価結果	97
表 14-1 動的機器の評価結果	100
表 15-1 高速実験炉「常陽」建物支持地盤の構造	113

表15- 2 動的 3 軸圧縮試験及び孔内載荷試験結果で得られた減衰定数	116
表15- 3 地盤内伝播解析	117
表15- 4 高速実験炉「常陽」における起振実験結果	127
表15- 5 「常陽」の起振実験と解析結果における固有振動数と減衰	127
表15- 6 地震観測結果と本動的応答解析結果の增幅特性	129
表15- 7 配管系の設計用減衰定数	132
表15- 8 「常陽」における実機配管振動試験結果（減衰定数）	132

1. 概 要

平成 7 年 1 月 17 日早朝に発生した兵庫県南部地震は、多数の犠牲者を出すとともに、土木・建築構造物にも甚大な被害を引き起こした。これを受け、原子力安全委員会は、地震発生から 2 日後の平成 7 年 1 月 19 日に「平成 7 年兵庫県南部地震を踏まえた原子力施設耐震安全検討会」を設置し、安全審査に用いられている耐震設計に関する関連指針類の妥当性について検討を開始し、その妥当性を再確認している。また、科学技術庁原子力安全局原子炉規制課においては、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和 56 年 7 月 20 日原子力安全委員会決定）」（以下昭和 56 年審査指針という）の制定以前に建設された施設に対して、昭和 56 年審査指針に基づく再評価・検討を行うことを要請している。

高速実験炉「常陽」は、昭和 45 年 2 月に原子炉設置許可を受領した施設であり、その設計に用いられた地震動は、昭和 56 年審査指針の制定以前に策定されたものである。このため、「常陽」においては、兵庫県南部地震発生以前から、第二使用済燃料貯蔵施設の増設（平成元年 3 月許可）を契機に、昭和 56 年審査指針に基づき策定された大洗地区統一基準地震動 S_1 （設計用最強地震）及び S_2 （設計用限界地震）を用いて、その耐震性の妥当性の再検討を行っていた。

本報告書は、平成 7 年 10 月にこれら既に検討を行っていた建物を初めとして、兵庫県南部地震を受けて、その検討範囲を機器・配管系等まで拡大して、耐震性の再評価を行った結果についてまとめたものである。

2. 耐震設計の経緯

表2-1に発電用原子炉施設の耐震設計と耐震設計に係る「常陽」設置変更の経歴を示す。

2.1 当初設置許可における耐震設計の考え方

当初設置許可においては、法令化された唯一の耐震設計技術基準である電気事業法（昭和39年法令第170号）に基づき定められた「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（昭和40年6月通商産業省令第62号）」を参考にしている。なお、詳細な技術基準は、日本電気協会に設置されている原子力専門委員会及び電気技術基準調査委員会の承認（昭和45年5月及び同年7月）を得てとりまとめられたJEAG4601-1970「原子力発電所耐震設計技術指針」（以下、技術指針1970年版という）の原案である「原子力発電所耐震設計に関する調査報告書（昭和41年4月）」（以下、調査報告書という）を参考に耐震設計を行っている。

2.2 設置変更（その11）及び設置変更（その13）における耐震設計の考え方

設置変更（その11）及び設置変更（その13）においては、使用済燃料貯蔵施設及び廃棄物処理施設の建物の新設が設置変更申請に含まれていたため、現行の昭和56年審査指針を参考にしている。昭和56年審査指針は、昭和53年審査指針のうち、静的地震力の算定法等について、新たな知見により水平震度法から地震層せん断力係数法等に見直しされたものである。なお、詳細な技術基準は、JEAG4601-1987「原子力発電所耐震設計技術指針」⁽¹⁾（以下、技術指針1987年版という）を準用して耐震設計を行っている。

2.3 本耐震性評価における耐震設計の考え方

本耐震性評価においては、昭和56年審査指針を参考にしている。また、詳細な技術基準は、技術指針1987年版と平成3年12月に新たに追加されたJEAG4601-1991「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版」⁽²⁾（以下、技術指針1991年版という）を準用して耐震性が満足されていることを確認している。

表2-1 発電用原子炉施設の耐震設計と耐震設計に係る「常陽」設置変更の経歴

年 月	項 目
昭和33年 4月	原子力発電所安全基準委員会の設置（通商産業省の諮問機関）
〃 34年10月	原子力発電所安全基準委員会内に地震対策小委員会を設置
39年 7月	電気事業法（法律第170号）
〃 40年 6月	発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令 (通商産業省令第62号)
〃 41年 4月	「原子力発電所耐震設計に関する調査報告書（地震対策小委員会）」の発表
〃 43年 1月	日本電気協会による調査報告書の未解決な問題の審議継続 (通商産業省の依頼) 日本電気協会電気技術基準調査委員会原子力専門委員会内に耐震設計分科会を設置
〃 45年 2月	高速実験炉「常陽」の設置許可取得
〃 〃 4月	「軽水炉についての安全設計に関する審査指針（耐震設計も含む）」の公表
〃 〃 5月	JEAG4601-1970 「原子力発電所耐震設計技術指針」の発表
〃 53年 9月	「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針について」の公表 (地震動S ₁ 、S ₂ の設定に係る事項が含まれた)
〃 55年 7月	建築基準法施行令の改正
〃 56年 6月	建築基準法施行令の改正による新耐震基準の施行 (水平震度法から地震層せん断力係数法への変更を含む大規模な改正)
〃 〃 7月	「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針について」の公表 (静的地震力の算定法等について見直された)
〃 62年 8月	JEAG4601-1987 「原子力発電所耐震設計技術指針」の発表
平成元年 3月	高速実験炉「常陽」設置変更（その11）「使用済燃料貯蔵施設の増設」の許可取得
〃 3年 9月	高速実験炉「常陽」設置変更（その13）「廃棄物処理施設の設置等」の許可取得
〃 3年12月	JEAG4601-1991 「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版」の発表
〃 7年 9月	高速実験炉「常陽」設置変更（その15）「MK-III炉心への変更」の許可取得

3. 耐震重要度分類の新旧比較

「常陽」における耐震性評価は、耐震Aクラス以上の主要設備をその対象とするものとした。

表3-1～表3-2に評価対象設備、建物の当初設置許可及び昭和56審査指針の耐震クラス並びに具体的な検討ケースを示す。なお、表3-1における○印、●印、◎印の意味は、以下のとおりである。

○：新旧の動的加速度及び静的震度を比較検討したもの

本耐震性評価（新）及び当初設置許可（旧）の床応答スペクトルを用いて、機器・配管系の動的加速度を求めるとともに、静的震度の算定方法（5章「建物動的応答解析モデルと静的震度の算定方法」を参照）にしたがって、それぞれの静的震度を求め（6章「建物動的応答解析結果と静的地震力」を参照）、本耐震性評価における値が当初設置許可で用いた値に包絡されているかどうか比較検討したものである。

高速実験炉「常陽」では、6章に示すように、本耐震性評価における建物の動的加速度及び機器・配管系の静的震度が、当初設置許可における動的加速度及び静的震度にほぼ包絡されていることから、新旧の動的加速度及び静的震度を比較し、その結果、当初設置許可に包絡されている機器・配管系については、その耐震性の再評価を必要としないと判断し、強度評価を省略したものである。

●：強度評価を行いその構造健全性を確認したもの

新旧の動的加速度及び静的震度の比較検討の結果、当初設置許可における値を上回るものについて、詳細な強度評価を行い、その構造健全性を確認したものである。ただし、上記の比較・検討結果に係わらず、表3-1の備考が記載された機器・配管系については、備考に記載した理由により詳細な強度評価を行い、その構造健全性を確認した。

◎：動的機器の機能維持確認を行ったもの

動的機器については、機器の部材の構造健全性とは別に、その機能維持が要求されるところから、技術指針1991年版を準用して機能維持確認を行ったものである。

なお、建物については、MK-III炉心の設置変更許可及び設工認において耐震重要度分類の変更はないが、上位波及の観点からA_sクラスとして強度評価を行った。

表 3-1 (1/2) 耐震重要度分類の新旧比較

評価対象設備		重要度分類		具体的検討ケース入力地震動						備考
				強度評価			動的機能維持確認			
施設	機器名称	当初設置許可	S56年審査指針	静的	S ₁	S ₂	静的	S ₁	S ₂	
1. 原子炉本体	・原子炉容器 ・炉心構造物 ・炉心構成要素 ・炉上部機構 ・回転プラグ	A A A A A	A _s A _s A A A	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○	・MK-III設工認対象 ・ ・ ・
2. 原子炉冷却系統施設 ① 1次主冷却系	・主循環ポンプ ・オーバフローコラム ・主配管	A A A	A _s A _s A _s	○ ● ●	○ ● ●	○ ● ●	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	・配管系と連成 ・MK-III主中間熱交換器と接続されるため
② 2次主冷却系	・主循環ポンプ ・オーバフロータンク ・主配管	A A A	A _s A _s A _s	○ ○ ●	○ ○ ●	○ ○ ●	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	・MK-III主中間熱交換器および主冷却器に接続されるため
③ 1次補助冷却系	・補助中間熱交換器 ・補助電磁ポンプ ・主配管	A A A	A _s A _s A _s	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	
④ 2次補助冷却系	・補助冷却器 ・補助電磁ポンプ ・主配管	A A A	A A A	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	
⑤ オーバフロー系	・オーバフロータンク ・電磁ポンプ ・主配管	A A A	A A A	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	

注) ○: 新旧の動的加速度および静的震度を比較検討するもの

●: 強度評価を行いその構造健全性を確認するもの

◎: 動的機器の機能維持確認を行うもの

表 3-1 (2/2) 耐震重要度分類の新旧比較

評価対象設備		重要度分類		具体的検討ケース入力地震動						備考
				強度評価			動的機能維持確認			
施設	機器名称	当初設置許可	S56年審査指針	静的	S ₁	S ₂	静的	S ₁	S ₂	
3. 計測制御系統施設										
① 制御設備	・制御棒駆動機構 ・制御棒	A _s A _s	A _s A _s	○ ○	○ ○	○ ○	◎ ◎		◎ ◎	
② 計測設備	・中央制御盤	A	A _s	○	○	○				
4. 原子炉格納施設										
① 格納容器	・格納容器	A _s	A _s	●	●	●				一部動的加速度が上回るため
② 非常用換気設備	・排風機 ・フィルタユニット	A A	A _s A _s	○ ○	○ ○	○ ○	◎		◎	
③ 排気筒		A	A	●	●	●				念のため
5. その他の設備										
① 非常用電源系	・ディーゼル発電装置	A	A _s	○	○	○	◎		◎	
② 無停電電源系	・無停電電源設備	A	A _s	○	○	○				

注) ○: 新旧の動的加速度および静的震度を比較検討するもの

●: 強度評価を行いその構造健全性を確認するもの

◎: 動的機器の機能維持確認を行うもの

表 3 - 2 建物耐震重要度分類の新旧比較

評価対象建物	当初設置許可		上位波及確認*1		備考
	クラス	地震動	クラス	地震動*2	
原子炉建物	A		A	静的	*1: 上位波及確認は耐震 A s クラスで評価する。
原子炉附属建物	A	静的	A	S ₁	*2: S ₁ 、S ₂ は第二使用済燃料貯蔵施設の増設の際に使用した大洗地区統一地震動による
主冷却機建物	A	EL CENTRO	A	S ₂	

4. 設計用基準地震動及び建物入力地震動

高速実験炉「常陽」における建物の動的応答解析では、敷地内の地盤振動特性を考慮した建物基礎底面及び側面の入力地震動を策定し、これを各建物解析モデルの地盤ばね設定位置に入力している。入力地震動の策定にあたっては、建物のない自由地盤を想定して解放基盤表面（GL - 130m）に設計用基準地震動を入力し、一次元波動論に基づく地盤内伝播解析を行っている。

図4-1に当初設置許可で用いた設計用入力地震動と昭和56年審査指針に基づく設計用入力地震動の策定方法について示す。

設計用基準地震動の設定については、高速実験炉設置変更許可申請書添付書類6の追補2「第二使用済燃料貯蔵施設の耐震設計用地震の設定」に記述されている。なお、第二使用済燃料貯蔵施設の増設に係る許可を得てから約5年が経過しており、この間に「新編日本被害地震総覧（1987）」⁽³⁾、「新編日本の活断層分布図と資料（1991）」⁽⁴⁾等が、旧版の改訂という形で出されているため、これらを調査した。しかし、調査の結果、新たな知見により、第二使用済燃料貯蔵施設の際に設定した基準地震動S₁、S₂を変更するような歴史地震の改訂及び活断層の発見等がないため、本耐震性評価においても第二使用済燃料貯蔵施設で採用したものと同一の設計用基準地震動を用いている。

表4-1～表4-2に設計用基準地震動の設定の際に考慮した主な地震及び活断層を示す。

表4-3に設計用応答スペクトルのコントロールポイントを示す。また、図4-2～図4-3に設計用応答スペクトルの包絡関係を示す。

一次元波動論に基づく地盤内伝播解析には、表4-4に示した高速実験炉「常陽」建物支持地盤の構造における各層厚、単位体積重量及びせん断弾性係数を用いて行っている。

図4-4に解放基盤表面に設定した設計用基準地震動S₁及びS₂の時刻歴波形を示す。

図4-5に原子炉建物及び原子炉附属建物基礎底面（GL - 31.8m）の設計用入力地震動S₂及び当初設置許可で用いたEL CENTROの時刻歴波形を示す。

図4-6に原子炉建物及び原子炉附属建物側面（GL - 25.08m、GL - 12.95m、GL - 4.3m、GL - 0.0m）の設計用入力地震動S₂の時刻歴波形を示す。

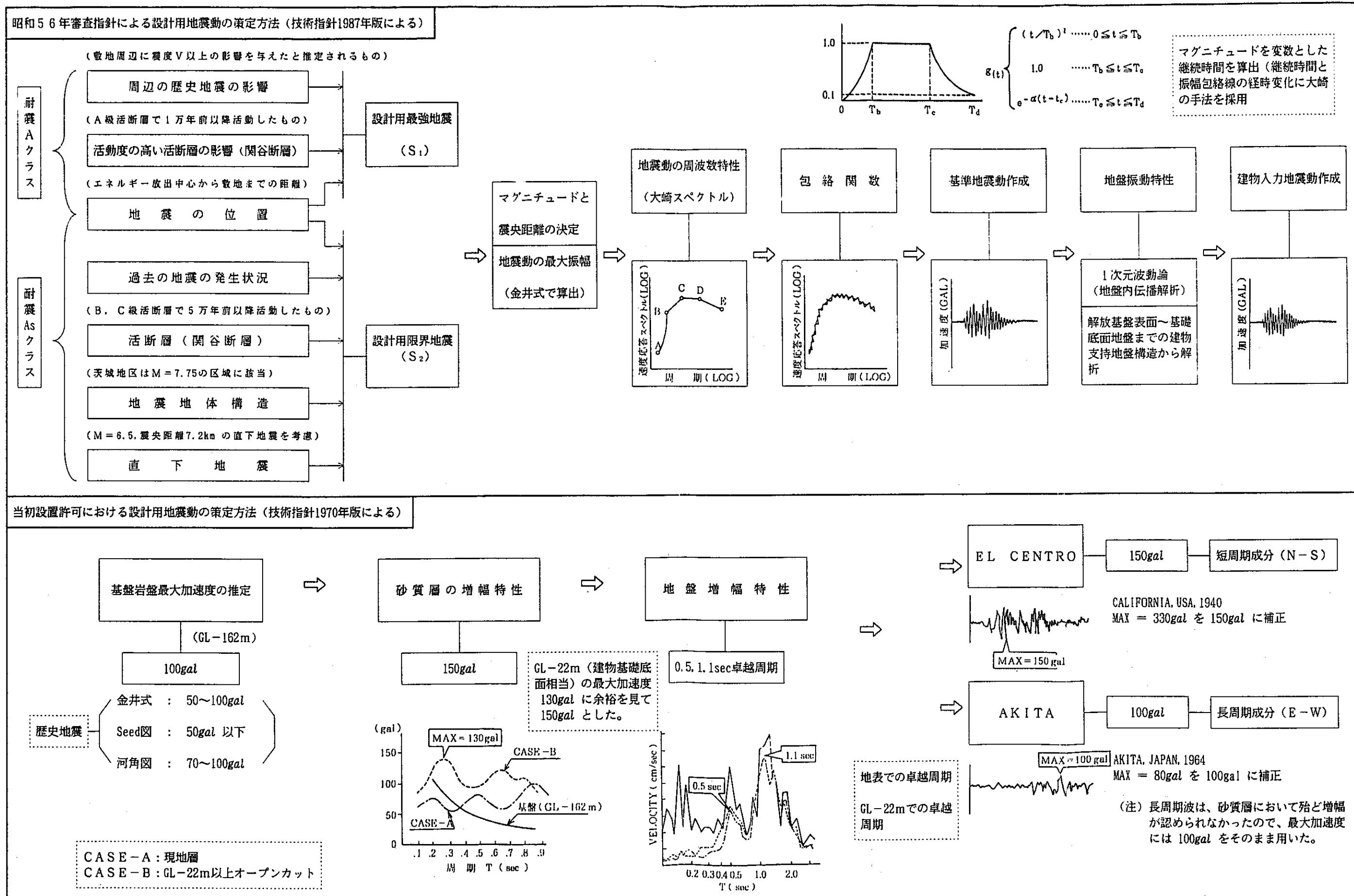


図 4-1 設計用入力地震動の策定方法

表4-1 敷地に与えた影響が大きいと考えられる主な地震

No	番号	年・月・日	北緯 (°)	東経 (°)	マグニチュード (M)	震央距離 (km)	震源深さ (km)	V _{max} (kine)	備考
1	312	1895. 1. 18	36.10	140.40	7.2	23	30 *1	8.87	霞ヶ浦付近
2	314	1896. 1. 9	36.50	141.00	7.3 (6.6)	48	30 *2	5.84 (2.19)	鹿島灘
3	149	1703. 12. 31	34.70	139.80	8.2	186	29	3.47	元禄地震
4	423	1921. 12. 8	36.00	140.20	7.0	43	50 *3	3.11	竜ヶ崎付近
5	430	1923. 9. 1	35.10 (35.20)	139.50 (139.30)	7.9	160 (163)	23	2.89 (2.87)	関東大地震
6	11	818. - -	35.20 (36~37)	139.30 (139~140)	7.9 (≥7.5)	163 (99)	23 (16)	2.80 (3.49)	関東諸国
7	134	1683. 6. 18	36.75	139.65	7.3 (6.5~7.0)	97	14 (11)	2.66 (1.80)	日光
8	459	1930. 6. 1	36.57	140.62	6.5	35	30	2.55	那珂川下流域
9	131	1677. 11. 4	37.00 (35.50)	141.50 (142.00)	7.4 (8.0)	118 (154)	15 (24)	2.29 (3.54)	磐城・常陸・安房・上総・下総
10	108	1649. 7. 30	35.70 (35.80)	139.75 (139.50)	7.1 (7.0±1/4)	95 (108)	12 (13)	2.07 (2.50)	武藏・下野
11	491	1938. 9. 22	36.40	141.02	6.5	45	30	2.04	鹿島灘
12	308	1894. 6. 20	35.70	139.80	7.0	92	11	1.89	東京湾北部
13	22	878. 11. 1	35.50	139.30	7.4	141	15	1.75	関東諸国
14	488	1938. 5. 23	36.65	141.58	7.0	102	0	1.65	塩屋崎沖
15	262	1855. 11. 11	35.65	139.80	6.9 (6.9±0.1)	96	10 (11)	1.55 (1.78)	江戸地震
16	103	1646. 6. 9	37.70 (38.10)	141.70 (140.65)	7.6 (6.5~6.7)	190 (204)	18 (9)	1.47 (0.37)	陸前
17	435	1924. 1. 15	35.50	139.20	7.3	148	14	1.41	丹沢山塊
18	135	1683. 10. 20	36.80 (36.90)	139.70	6.8 (7.0±1/4)	97 (105)	9 (13)	1.34 (2.21)	日光
19	432	1923. 9. 2	34.90	140.20	7.3	154	14	1.33	千葉県勝浦沖
20	492	1938. 11. 5	37.33	142.18	7.5	188	30	1.28	福島県東方沖

注) : (1) カッコ内の震源要素は、「新編日本被害地震総覧(1987)」に基づく値
 (2) 震源深さの不明なものについては、技術指針1987年版の次式を用いて求めた。

$$H = 1.0 \cdot 3.53 M - 1.435$$

ただし、*1~*3で示すものは、以下の文献より定めた。

*1: 霞ヶ浦付近の地震は、野口、宇佐美らにより30km

*2: 鹿島灘の地震は、海野により30km

*3: 竜ヶ崎付近の地震は、石橋により50km

表4-2 「新編日本の活断層－分布図と資料」を考慮した陸域の主な断層

断層名	断層中心までの距離 (km)	確実度	活動度	断層長さ (km)	最大速度 (kine)	マグニチュード (M)
関谷断層	約100	I	A	40	3.35	7.5
湯本・塩原断層群	約100	I	B	5	0.42	6.0
湯ノ岳断層	約90	II	B	6	0.56	6.1
荒川断層	約100	II	B	20	1.68	7.0
東京湾北縁	約85	II	B	16	1.85	6.9
東京湾北部断層	約95	II	B	5	0.45	6.0
元荒川構造帯 (綾瀬川断層)	約90	II～III	B	26	2.58	7.2
赤井断層	約100	II	C	5	0.42	6.0
大倉断層群	約100	II	C	2	0.16	5.3
井戸沢断層	約80	II		10	1.16	6.5
吾国山断層	約30	III		5.5	2.47	6.1
棚倉破碎帯西縁断層	約50	III		7	1.47	6.2
関口－黒磯	約50	III		10	2.23	6.5
関口－米平				10	2.23	6.5

注) : 1. 確実度 I : 活断層であることが確実なもの

II : 活断層であると推定されるもの

III : 活断層の疑いのあるリニアメント

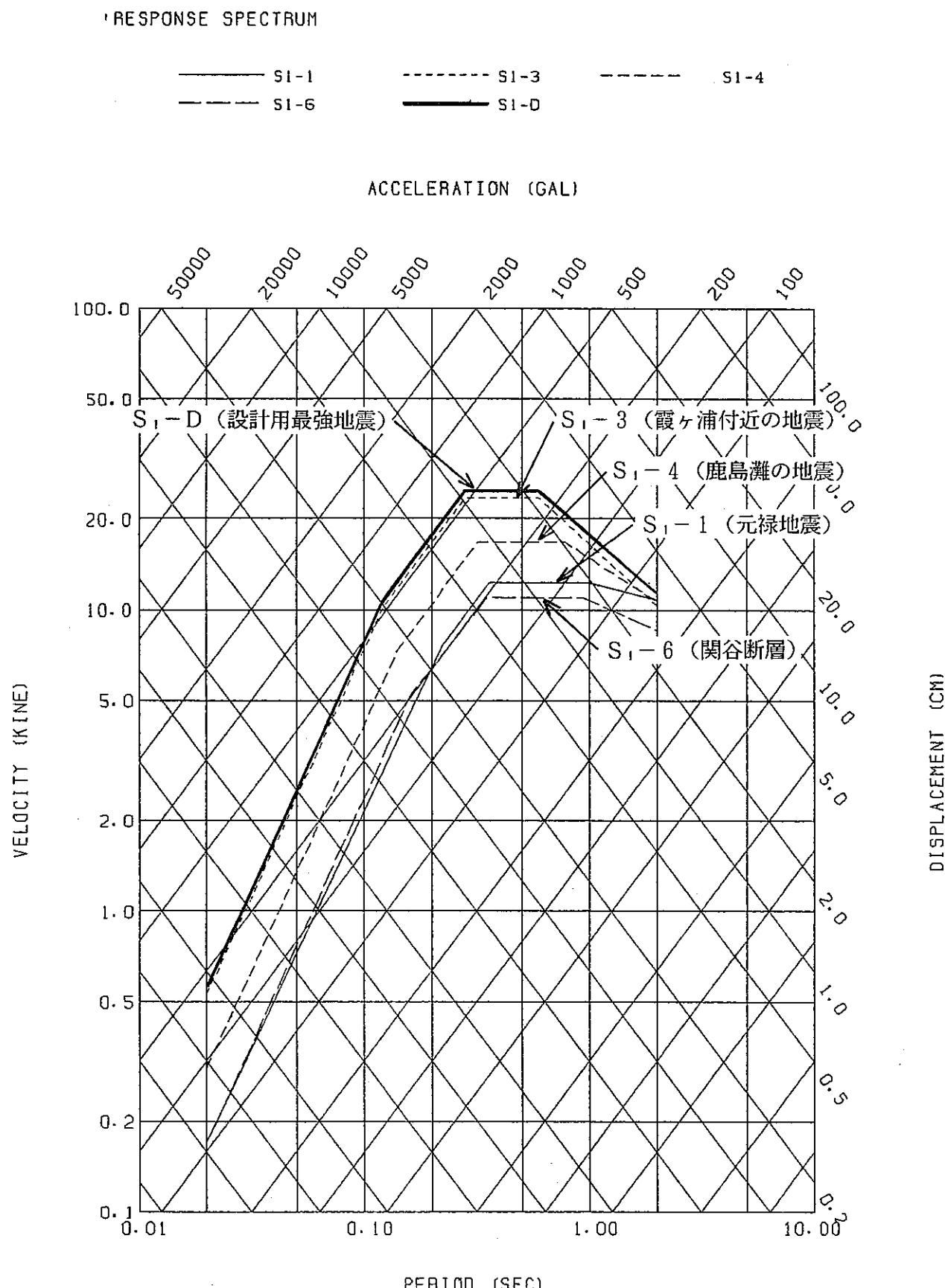
2. 活動度 A : 平均速度(認定に用いた第四紀の基準地形や第四紀層の変位量をその形成時から現在までの年数で割った値)が1m/1,000年以上10m/1,000年未満のもの

活動度 B : 平均速度が0.1m/1,000年以上1m/1,000年未満のもの

活動度 C : 平均速度が0.01m/1,000年以上0.1m/1,000年未満のもの

表 4-3 地震動の設計用応答スペクトルのコントロールポイント（減衰定数 5 %）

	地 震 名	マ グチ ニユ ー ド (M)	震 央 距 離 Δ (km)	コントロールポイント									
				A		B		C		D		E	
				T_A (s)	S_v (kine)	T_B (s)	S_v (kine)	T_C (s)	S_v (kine)	T_D (s)	S_v (kine)	T_E (s)	S_v (kine)
設 計 用 最 強 地 震	1703年元禄地震 (S_1 -1)	8.2	186	0.02	0.17	0.22	7.54	0.36	12.30	1.09	12.30	2.00	10.73
	1923年関東大地震 (S_1 -1)	7.9	160		0.14	0.20	5.63	0.35	10.22	1.04	10.22		8.65
	1895年霞ヶ浦付近の地震 (S_1 -3)	7.2	23		0.53	0.12	10.04	0.28	23.53	0.59	23.53		10.27
	1896年鹿島灘の地震 (S_1 -4)	7.3	48		0.30	0.14	7.26	0.32	16.71	0.78	16.71		10.63
	1921年竜ヶ崎付近の地震 (S_1 -5)	7.0	43		0.16	0.13	3.42	0.33	8.66	0.79	8.66		5.72
	関谷断層 (S_1 -6)	7.5	100		0.17	0.16	5.17	0.35	10.92	0.93	10.92		8.53
	S_1 - D	—	—		0.02	0.56	0.12	10.61	0.28	24.87	0.59	24.87	2.00
	818年関東諸国の地震	7.5	99	0.02	0.17	0.16	5.37	0.34	11.34	0.93	11.34	2.00	8.84
	1677年磐城・常陸・安房等の地震	8.0	154		0.18	0.20	6.94	0.35	12.20	1.04	12.20		10.29
設 計 用 限 界 地 震	関谷断層 (S_2 -1)	7.5	100	0.02	0.17	0.16	5.17	0.35	10.92	0.93	10.92	2.00	8.53
	地震地体構造 (S_2 -2)	7 3/4	50		0.58	0.14	14.09	0.32	31.64	0.72	31.64		18.18
	直下地震 (S_2 -3)	6.5	7.2		1.21	0.10	18.13	0.17	29.93	0.40	29.93		6.20
	S_2 - D	—	—	0.02	1.23	0.10	18.49	0.19	32.26	0.72	32.26	2.00	18.54
	東京湾北縁断層	6.9	85	0.02	0.09	0.13	2.39	0.34	6.15	0.84	6.15	2.00	4.61

図4-2 設計用応答スペクトルの包絡関係 (S_1 (設計用最強地震) 減衰定数 5 %)

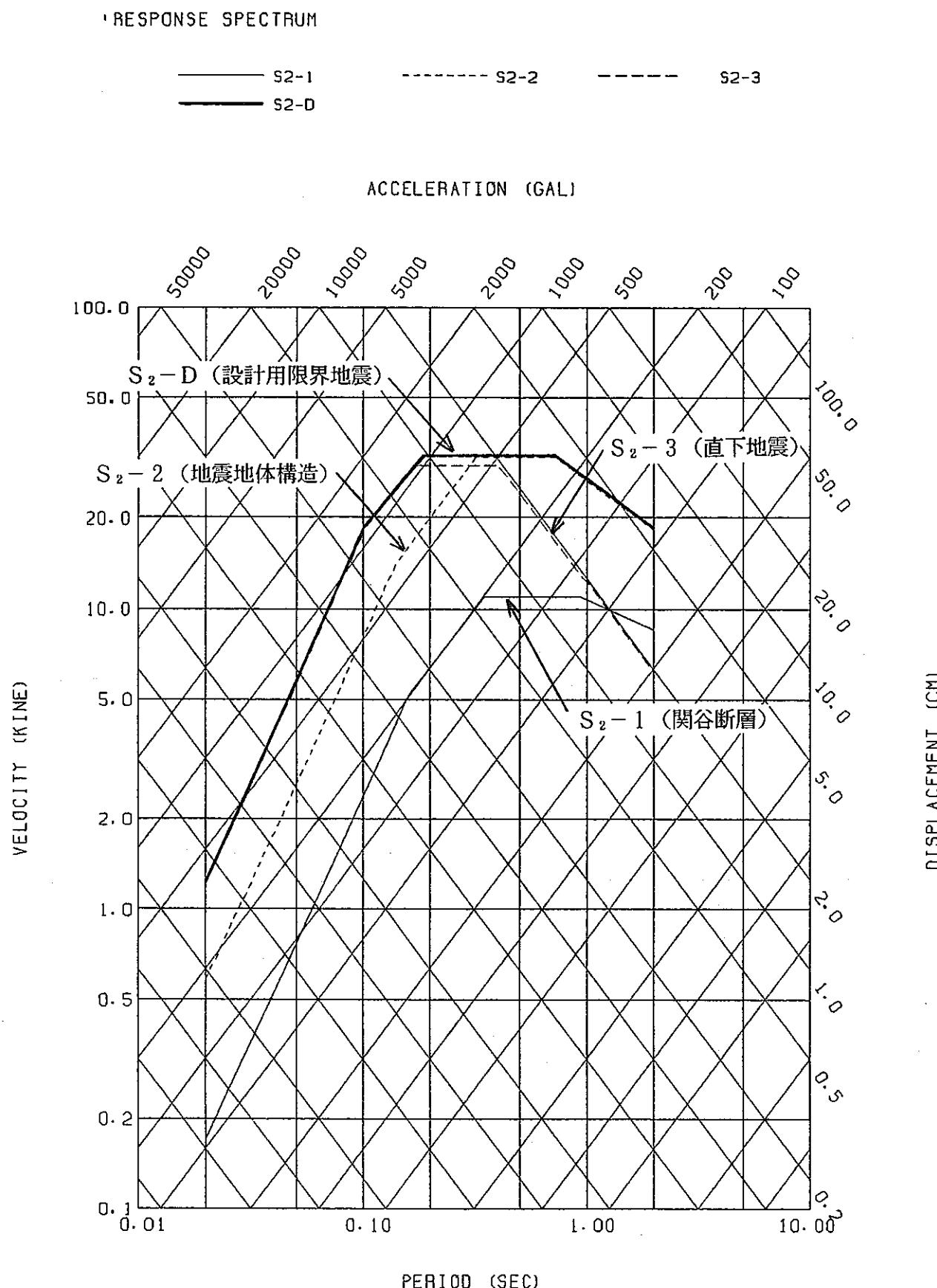
図4-3 設計用応答スペクトルの包絡関係 (S_2 (設計用限界地震) 減衰定数 5 %)

表 4-4 「常陽」建物支持地盤の構造

GL (m)	層厚 (m)	単位体積重量 γ (ton/m ³)	縦波速度 V_p (m/sec)	せん断波速度 V_s (m/sec)	せん断 ^{*1} 弾性係数 G (ton/m ²)	主な土質
0.0						
-5.0	5.0	1.88	500	120	2,760	盛土、ローム
-16.0	11.0	1.88			19,624	細砂～中砂
主冷基礎-20.0	6.0	1.93	700	320	20,146	粘土
-22.0						砂
-31.0	9.0	2.10	900	570	69,550	砂礫、細砂
附属基礎-31.8	4.0	1.91			43,009	
-35.0	6.0	2.00	1,600	470	45,036	細砂
-41.0						
-64.0	23.0	2.00	1,600	350	24,975	シルト質砂 細砂
-80.0	16.0	2.00	1,600	400	32,620	細砂、シルト湿り細砂
-114.0	34.0	2.00	1,600	470	45,036	細砂 シルト質細砂
	16.0	2.00	1,600	530	57,268	砂質泥岩

* 1 : せん断弾性係数Gは、 $G = \gamma \cdot V_s^2 / g$ より算出している。なお、gは重力加速度であり、 $g = 9.81 \text{m/sec}^2$ としている。

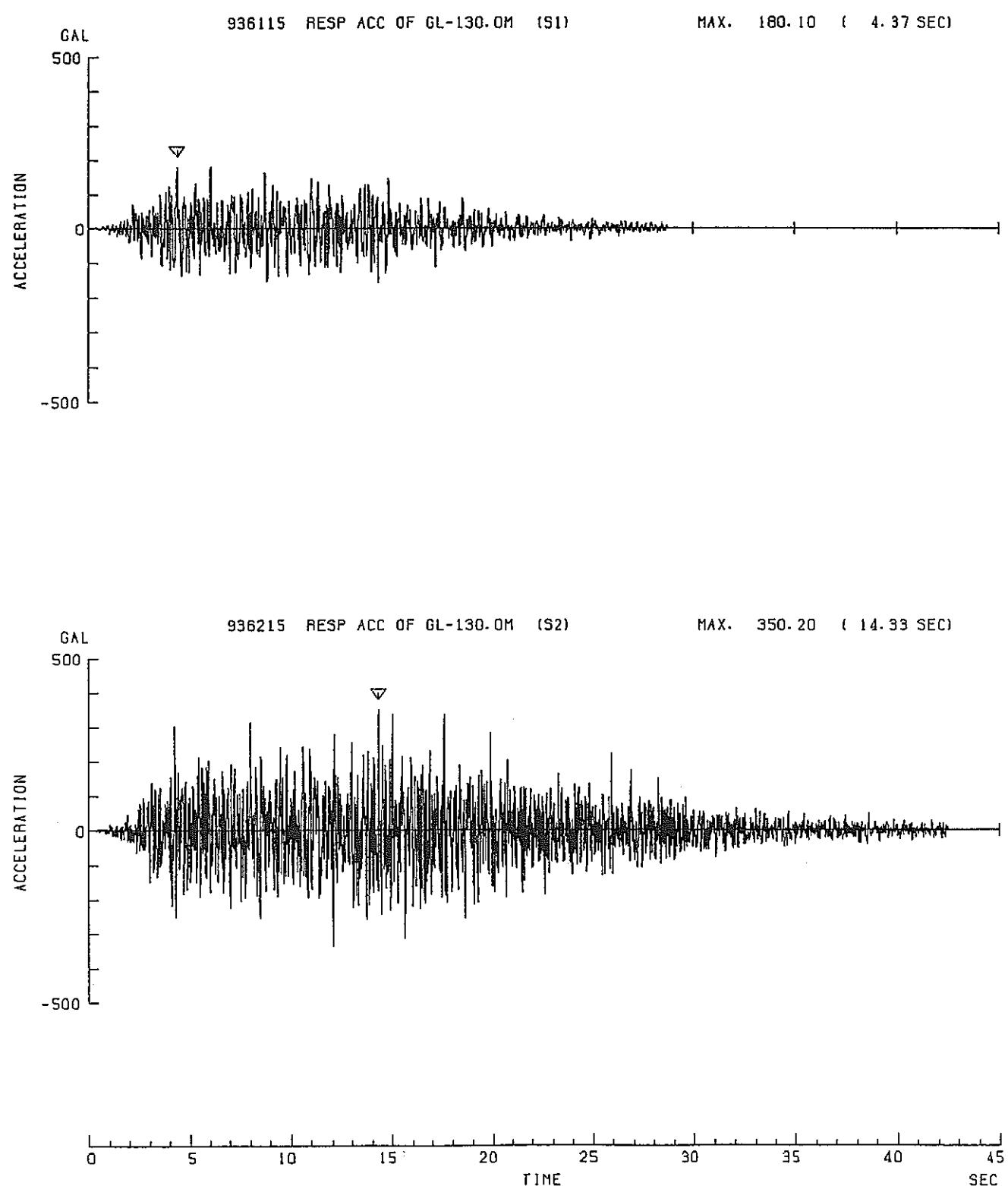


図 4-4 設計用基準地震動 S_1 及び S_2 の時刻歴波形（解放基盤表面）

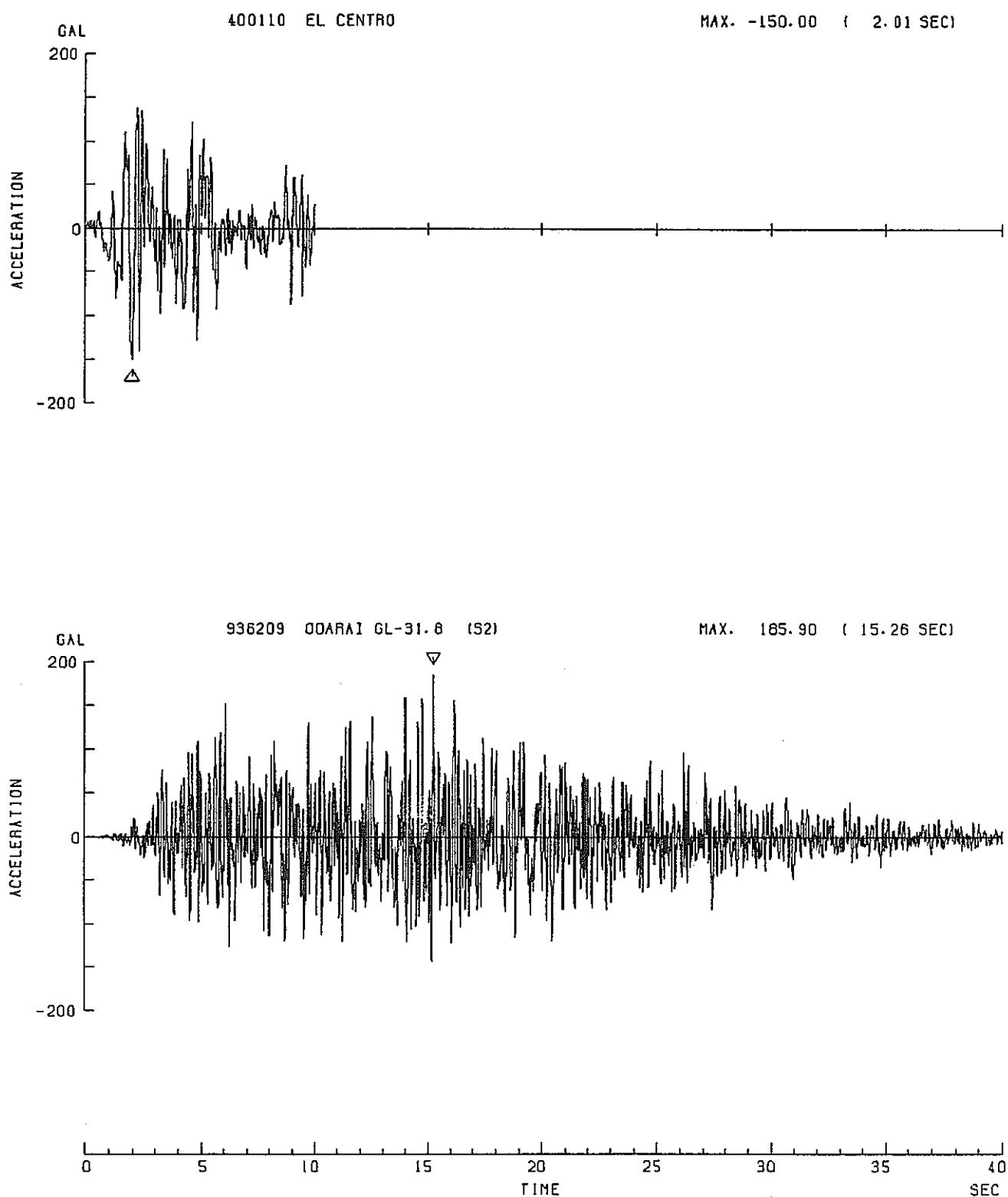


図4-5 原子炉建物及び原子炉附属建物基礎底面(GL-31.8m)の設計用入力地震動の時刻歴波形
(設計用入力地震動S₂ 及びEL CENTRO)

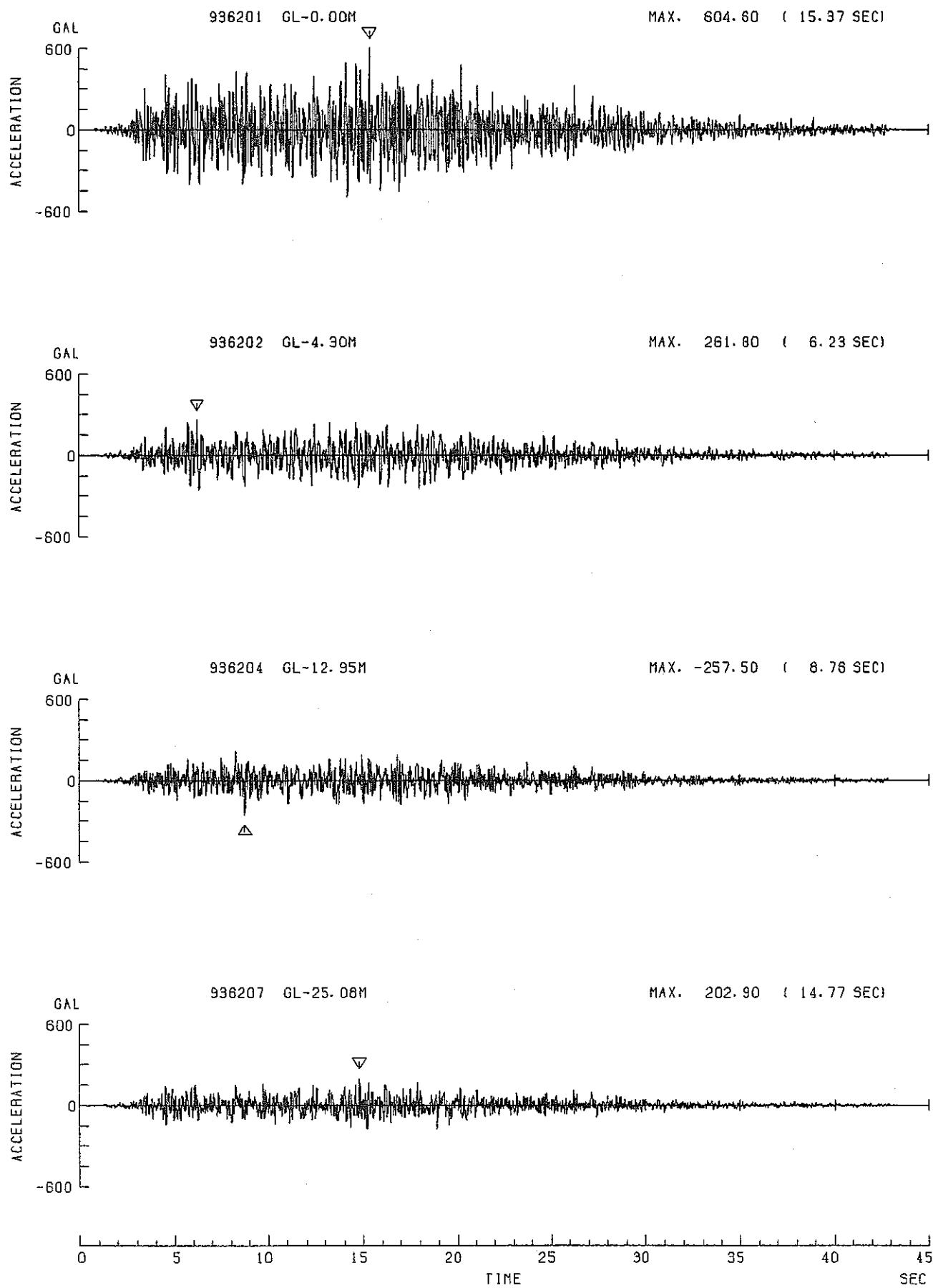


図 4-6 原子炉建物及び原子炉附属建物側面の設計用入力地震動 S_z の時刻歴波形
(GL-25.08m、GL-12.95m、GL-4.3m、GL-0.0m)

5. 建物動的応答解析モデルと静的震度の算定方法

5.1 建物動的応答解析モデル

本耐震性評価の機器・配管系に用いる設計用床応答スペクトル及び時刻歴応答波形は、昭和56年審査指針に基づき策定され、第二使用済燃料貯蔵施設の耐震設計で採用した設計用基準地震動 S_1 及び S_2 を用いて、原子炉建物及び主冷却機建物の動的応答解析を行い策定している。

図5-1に原子炉建物、原子炉附属建物及び主冷却機建物の概略断面図を示す。

5.1.1 当初設置許可における建物動的応答解析モデル

当初設置許可における建物動的応答解析モデルは、調査報告書及び技術指針1970年版を参考に建物埋込み効果を考慮しないスウェイ・ロッキングモデル（以下、S-Rモデルという）の地盤-建物連成系モデルを用いている。図5-2に原子炉建物及び原子炉附属建物の解析モデルを示す。また、図5-3に主冷却機建物の解析モデルを示す。表5-1及び表5-2に各建物モデルの諸定数を示す。表5-3及び表5-4に各建物の地盤ばね定数を示す。

5.1.2 本耐震性評価における建物動的応答解析モデル

本耐震性評価における建物動的応答解析モデルは、技術指針1987年版及び1991年版を準用して建物埋込み効果を考慮したS-Rモデルの地盤-建物連成系モデルを用いている。図5-4に原子炉建物および原子炉附属建物の解析モデルを示す。また、図5-5に主冷却機建物の解析モデルを示す。表5-1及び表5-2に各建物モデルの諸定数を示す。

S-Rモデルに用いた地盤ばねは、技術指針1991年版の近似地盤ばねの算定法を用いて算定している。表5-5及び図5-6～図5-9に算定した各建物の近似地盤ばね定数を示す。

5.2 静的震度の算定方法

本耐震性評価の静的地震力の算定においては、建築基準法施行令の改正による新耐震基準の施行（昭和56年6月）とともに見直しされた昭和56年審査指針を採用している。これは、当初設置許可において用いられた地下、地上の区別なく水平震度を算定する方法（水平震度法）から、地震時における地下部分の応答加速度が埋込み深さによって小さくなる効果を考慮した地下震度と地震力に「層」という考え方を取り入れた方法（地震層せん断力係数法）を採用したものである。

5.2.1 当初設置許可における静的地震力の算定方法

当初設置許可における静的地震力の算定は、調査報告書及び技術指針1970年版を参考に行っている。

(1) 建物

建物の静的地震力は、表5-6の方法により算定した震度より求めている。

(2) 機器・配管系

機器・配管系の静的地震力は、建物から求められた震度をそれぞれ20%増加させた震度より求めている。

5.2.2 昭和56年審査指針における静的地震力の算定方法

昭和56年審査指針における静的地震力の算定は、その詳細な技術基準として技術指針1987年版及び1991年版を準用して行っている。

(1) 建物

① 静的地震力の算定（地上部分）

各建物の静的地震力は、以下の方法により求めた地震層せん断力係数 C_1 から算定している。

(a) 静的地震力を算定する上で基準面は、原則として地表面としている。ただし、原子炉建物については、原子炉附属建物と基礎マットを同一としているが、基礎マット上面から独立した構造物で直接地盤と接していないため、静的地震力の算定の基準面を基礎マット上面としている。

(b) 基準面より上部の水平地震力については、建物の各部分の高さに応じ、当該高さの部分が支える部分に作用する全体の地震力として下式より算定している。

$$\text{地震層せん断力 } Q_1 = C \cdot W_1$$

$$\text{地震層せん断係数 } C = n \cdot Z \cdot C_1$$

$$\text{せん断力係数 } C_1 = R t' \cdot A_i \cdot C_0$$

W_1 : 当該部分が支える重量

n : 重要度に応じた係数 (Aクラス3.0、Bクラス1.5、Cクラス1.0)

Z : 地震地域係数 (1.0)

$R t'$: 振動特性係数 = $\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot R t$ (0.9)

β_1 : 硬質地盤における入力の補正係数 (1.0)

β_2 : 動的相互作用による応答の補正係数 (0.9)

R_t : 昭和56年審査指針に規定されている振動特性係数(1.0)

A_1 : 地震層せん断力係数の高さ方向の分布係数

C_0 : 標準せん断力係数(0.2)

振動特性係数 R_t' は、昭和56年審査指針に規定されている振動特性係数 R_t の補正方法に代わって、最新の知見と経験の蓄積による方法として提案されている技術指針1991年版の補正方法を採用したものである。これは、動的相互作用による応答の低減効果を考慮し、建物支持地盤のせん断波速度 V_s をパラメータとした硬質地盤における入力の補正係数 β_1 及び建物支持地盤のせん断波速度 V_s と建物の埋込み深さ H_d をパラメータとした動的相互作用による応答の補正係数 β_2 に応じて算定する方法である(ここで建物支持地盤は、基礎マットより下の地盤とし、建物支持地盤が成層をなす場合には、 V_s を成層補正した等価な V_s で評価している)。

表5-7の高速実験炉「常陽」の建物支持地盤の構造から基礎マットより下の建物支持地盤は、原子炉附属建物で $V_s = 530\text{m/sec} \sim 350\text{m/sec}$ (層厚により重み付けした平均値440m/sec)、埋込み深さ31.8mである。また、主冷却機建物で $V_s = 530\text{m/sec} \sim 320\text{m/sec}$ (層厚により重み付けした平均値450m/sec)、埋込み深さ20mである。この結果、硬質地盤における入力の補正係数 β_1 は1.0、動的相互作用による応答の補正係数 β_2 は0.7となり、振動特性係数 R_t' は0.7となる。しかし、当初設置許可における建物の構造種別と支持地盤による水平震度低減係数である0.9を保持する意味で、保守的に振動特性係数 R_t' を0.9としている。

地震層せん断力係数の高さ方向の分布係数 A_1 は、モーダル法により求めている。

② 地下部分に作用する地震力

建物の地下部分に作用する地震力は、当該部分の固定荷重と積載荷重の和に下式の水平震度を乗じて算定している。

$$\text{水平震度 } K = 0.1 \cdot n \cdot (1 - H/40) \cdot Z \cdot \alpha$$

n : 重要度に応じた係数(Aクラス3.0、Bクラス1.5、Cクラス1.0)

H : 地下の各部分の基準面からの深さ(m)(深さが20mを超えるときは20mとする。)

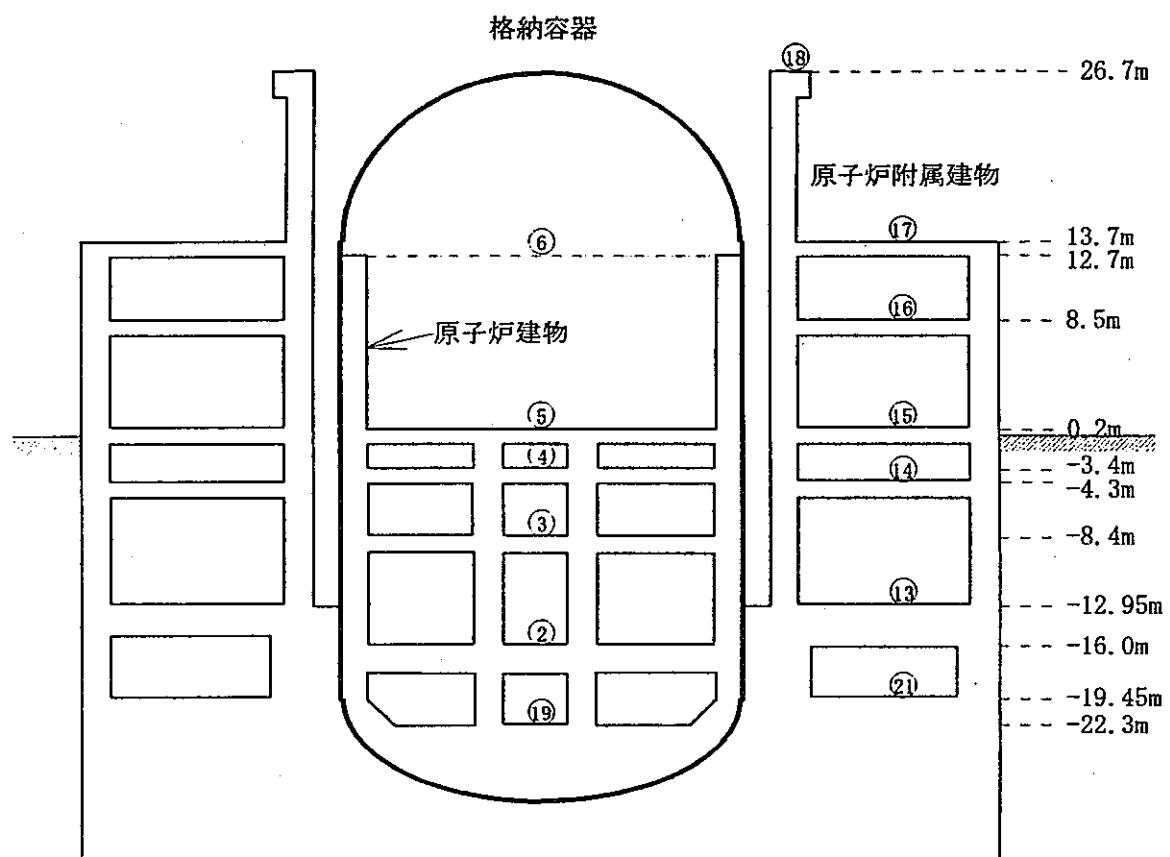
Z : 地震地域係数(1.0)

α : 建物側方地盤の影響を考慮した水平地下震度の補正係数
(原子炉附属建物は1.5、主冷却機建物は1.0)

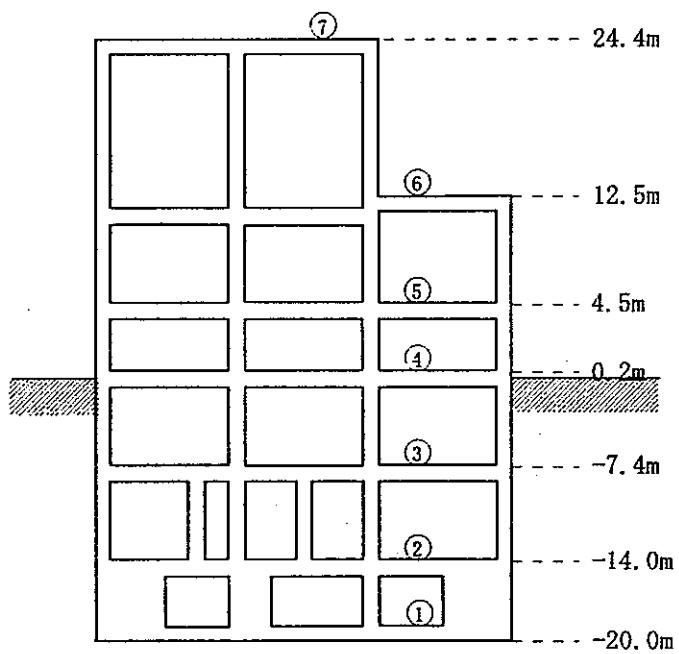
建物側方地盤の影響を考慮した水平地下震度の補正係数 α は、昭和56年審査指針に規定されていないが、最新の知見と経験の蓄積による方法として提案されている技術指針1991年版の補正方法を採用したものである。この補正係数 α は、建物側方地盤が軟質な場合に側方地盤が加力側に働き、地震層せん断力係数が地下部で増加することを考慮して、地下部の震度に地上部分から作用するせん断力の影響を想定して乗じるものである（ここで建物側方地盤は、基礎マット下面より上の地盤とし、地盤が成層をなす場合には、 V_s を層厚により重み付けした平均値 V_s で評価している）。

(2) 機器・配管系

機器・配管系の地震力は、建物から求められた地震層せん断力係数及び地下震度をそれぞれ20%増加させた層せん断力係数及び地下震度より求めている。



原子炉建物および原子炉附属建物



主冷却機建物

図中の丸付き数字は、解析モデルの質点番号の位置

図 5-1 原子炉建物、原子炉附属建物及び主冷却機建物の概略断面図

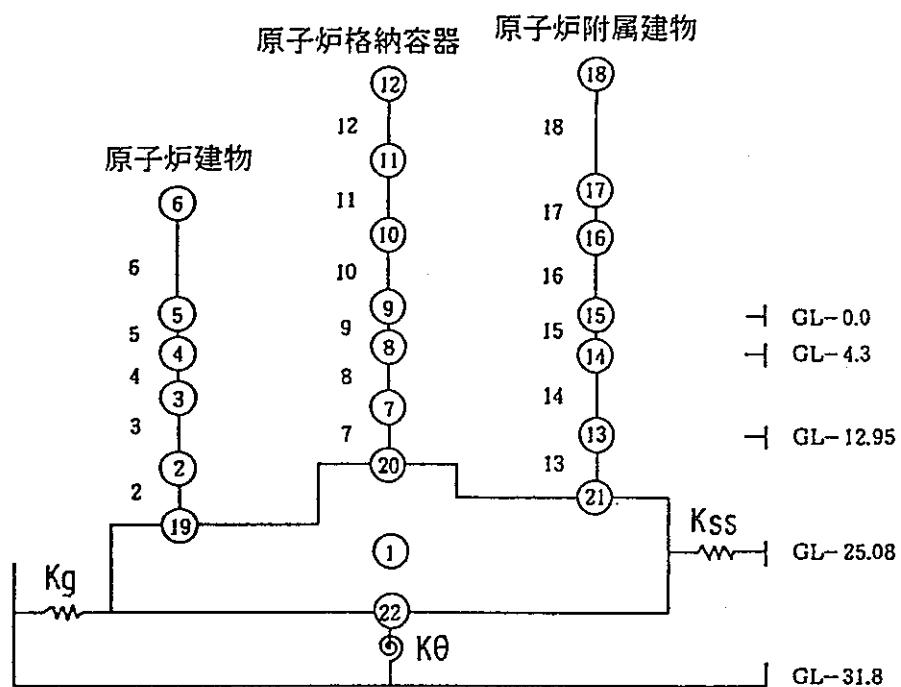


図 5-2 当初設置許可における原子炉建物及び原子炉附属建物の解析モデル

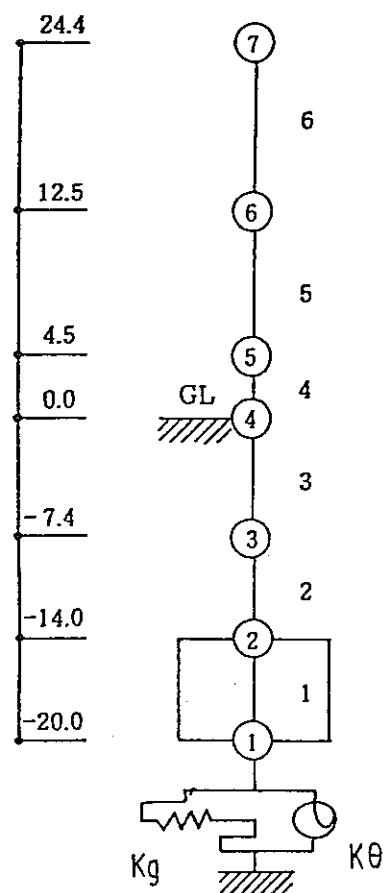


図 5-3 当初設置許可における主冷却機建物の解析モデル

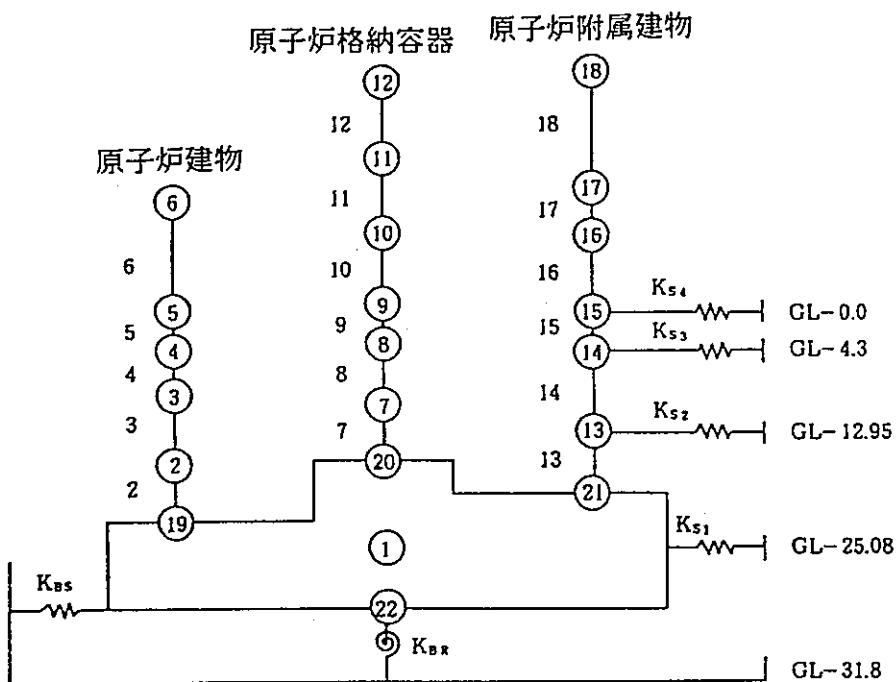


図 5-4 本耐震性評価における原子炉建物及び原子炉附属建物の解析モデル

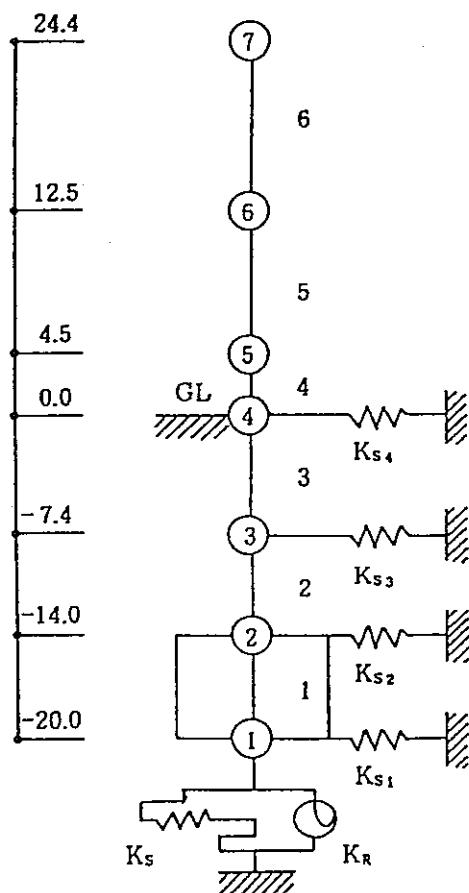


図 5-5 本耐震性評価における主冷却機建物の解析モデル

表 5-1 原子炉建物及び原子炉附属建物モデルの諸定数

建物	質点番号	重量回転慣性	重量	基礎底面からの高さ	要素番号	質点間距離	縦弾性係数	横弾性係数	断面2次モーメント	有効断面積
		$I_w \times 10^5$ (t・m ²)	W (ton)	Z (m)		L (m)	E_k $\times 10^6$ (t/m ²)	G_k $\times 10^5$ (t/m ²)	I_k $\times 10^3$ (m ⁴)	A_k (m ²)
基礎① 重心		196.93	4126.4 85038.6	6.72						
原子炉建物	⑯					2.78				
	⑰	3.19	6038.2	15.80	2	6.30	2.11	9.02	13.36	107.9
	⑱	2.70	4126.4	23.40	3	7.60	2.11	9.02	12.56	101.8
	⑲	2.12	4469.7	28.40	4	5.00	2.11	9.02	13.20	96.8
	⑳	1.89	2926.2	32.00	5	3.60	2.11	9.02	6.87	63.5
	㉑	1.04	1203.7	44.50	6	12.50	2.11	9.02	2.69	15.5
格納容器	㉒					9.38				
	㉓				7	6.05	21.10	81.20	0.2160	1.101
	㉔		209.1	22.15	8	7.10	21.10	81.20	0.2160	1.101
	㉕				9	3.85	21.10	81.20	0.2160	1.101
	㉖		141.2	29.25	10	7.56	21.10	81.20	0.2160	1.101
	㉗		208.0	33.10	11	7.95	21.10	81.20	0.0887	0.501
	㉘		142.2	40.66	12	8.83	21.10	81.20	0.0280	0.341
	㉙									
	㉚					5.63				
	㉛				13	6.50	2.11	9.02	226.56	354.5
	㉜	50.87	18599.7	18.85	14	8.65	2.11	9.02	180.01	286.6
原子炉附属建物	㉝	47.82	15978.2	27.50	15	4.50	2.11	9.02	179.81	275.4
	㉞	38.24	12769.5	32.00	16	8.30	2.11	9.02	44.29	148.8
	㉟	26.15	9157.0	40.30	17	5.20	2.11	9.02	42.64	122.8
	㉟	15.17	5856.2	45.50	18	13.00	2.11	9.02	5.61	24.0
	㉟	1.06	868.0	58.50						

表 5 - 2 主冷却機建物モデルの諸定数

質点番号	重量回転慣性	重量	基礎底面からの高さ	要素番号	質点間距離	縦弾性係数	横弾性係数	断面2次モーメント	有効断面積
	$I_w \times 10^5$ (t・m ²)	W (ton)	Z (m)		L (m)	$E_k \times 10^6$ (t/m ²)	$G_k \times 10^5$ (t/m ²)	$I_k \times 10^3$ (m ⁴)	A k (m ²)
①	10.00	13098.1	0.00						
②	10.50	14000.0	6.00	1	6.00	2.10	9.00	114.900	1835.8
③	8.08	9006.0	12.60	2	6.60	2.10	9.00	37.060	159.7
④	7.72	8121.8	20.00	3	7.40	2.10	9.00	29.640	132.7
⑤	1.07	1402.5	24.50	4	4.50	2.10	9.00	5.920	79.8
⑥	3.91	4213.6	32.50	5	8.00	2.10	9.00	4.210	60.1
⑦	0.43	691.0	44.40	6	11.90	2.10	9.00	0.638	13.9

表 5 - 3 原子炉建物及び原子炉附属建物の地盤ばね定数（当初設置許可）

ばねの種類	ばね定数 (Soft~Hard)
回転ばね K_θ (ton・m/rad)	(5.740 ~ 11.50) × 10 ⁹
側面ばね K_{ss} (ton/m)	(0.636 ~ 1.270) × 10 ⁷
水平ばね K_g (ton/m)	(1.240 ~ 2.480) × 10 ⁷

表 5 - 4 主冷却機建物の地盤ばね定数（当初設置許可）

ばねの種類	ばね定数 (Soft~Hard)	
	X方向 (長辺)	Y方向 (短辺)
水平ばね K_g (ton/cm)	(0.459 ~ 0.918) × 10 ⁵	
回転ばね K_θ (ton・cm/rad)	(0.206 ~ 0.412) × 10 ¹²	(0.349 ~ 0.689) × 10 ¹¹

表 5 - 5 各建物の近似地盤ばね定数（昭和 56 年審査指針（技術指針1991年版）

	原子炉建物及び原子炉附属建物			主冷却機建物		
	地盤ばね	実数部	虚数部	地盤ばね	実数部	虚数部
底面ばね	水平ばね $K_s \times 10^6$ (ton/m)	4.433	$1.104 \times f$	水平ばね $K_s \times 10^6$ (ton/m)	4.710	$0.984 \times f$
	回転ばね $K_\theta \times 10^9$ (t・m/rad)	3.907	$0.292 \times f$	回転ばね $K_\theta \times 10^9$ (t・m/rad)	1.220	$0.031 \times f$
側面ばね	GL-25.80m $K_{s1} \times 10^5$ (ton/m)	27.400	$23.11 \times f$	GL-20.00m $K_{s1} \times 10^5$ (ton/m)	2.299	$2.893 \times f$
	GL-12.95m $K_{s2} \times 10^5$ (ton/m)	7.820	$12.04 \times f$	GL-14.00m $K_{s2} \times 10^5$ (ton/m)	4.723	$5.943 \times f$
	GL-4.30m $K_{s3} \times 10^5$ (ton/m)	3.010	$6.030 \times f$	GL-7.40m $K_{s3} \times 10^5$ (ton/m)	4.391	$6.034 \times f$
	GL-0.00m $K_{s4} \times 10^5$ (ton/m)	0.023	$1.402 \times f$	GL-0.00m $K_{s4} \times 10^5$ (ton/m)	0.388	$1.933 \times f$

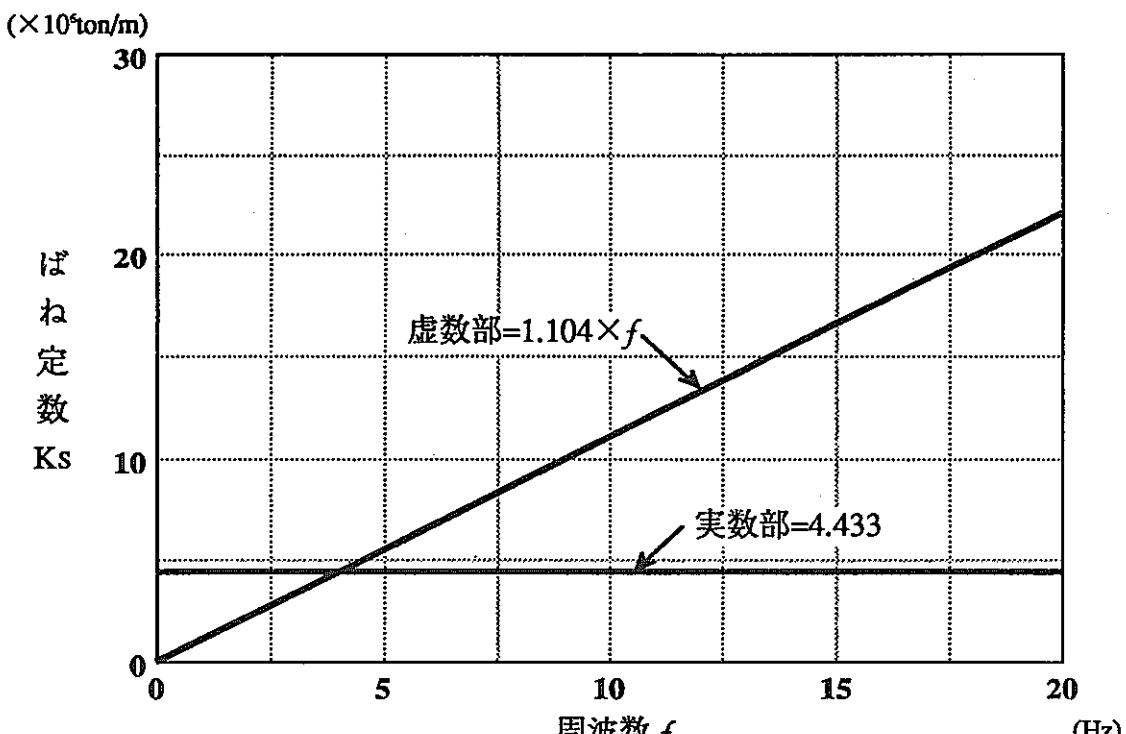
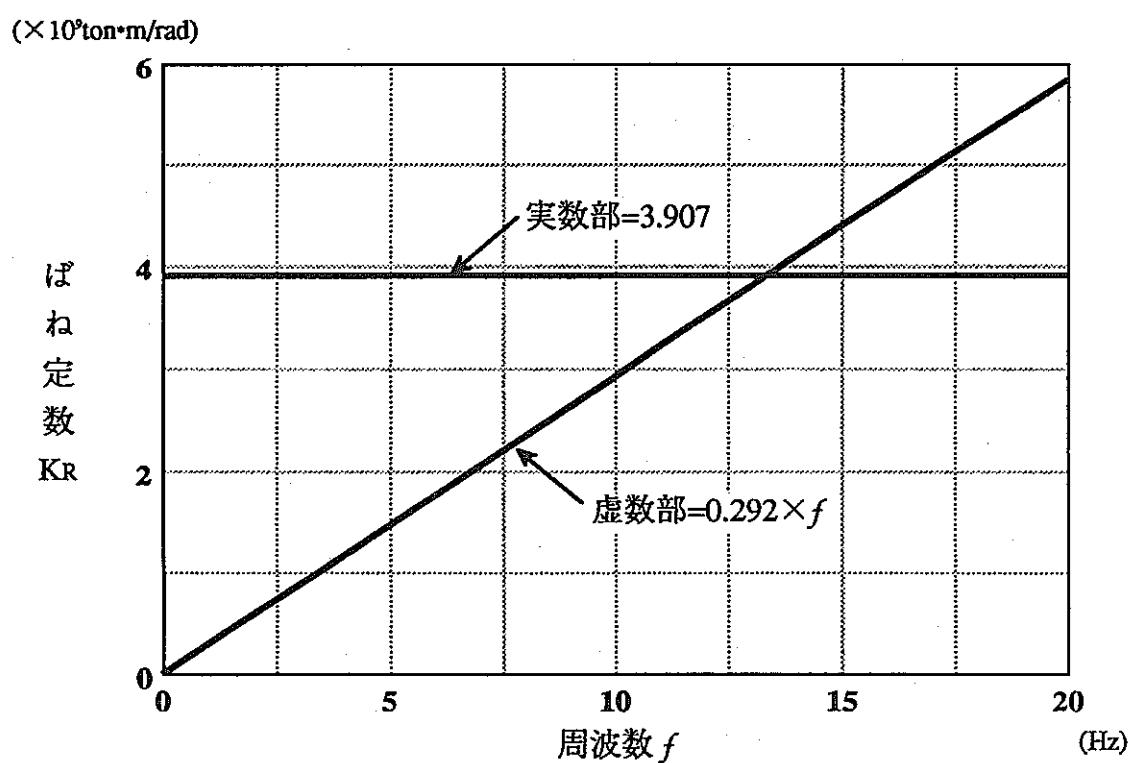
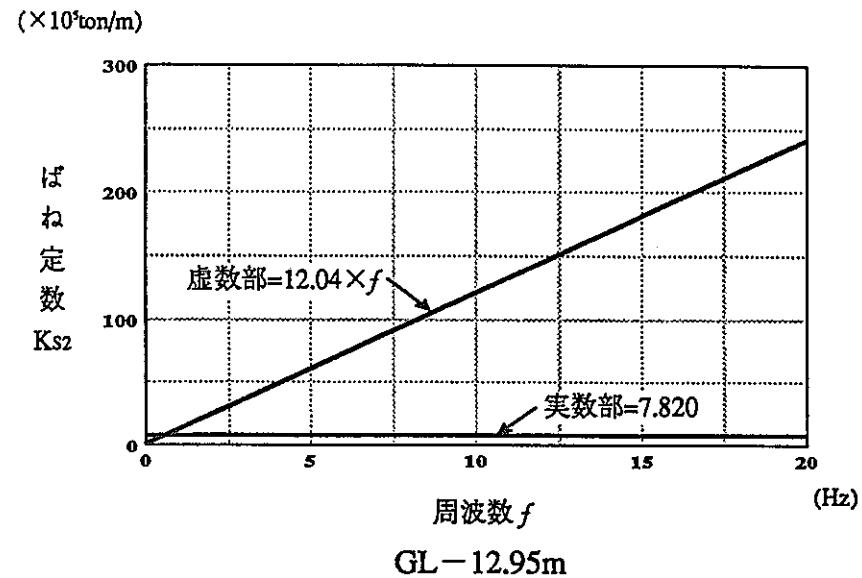
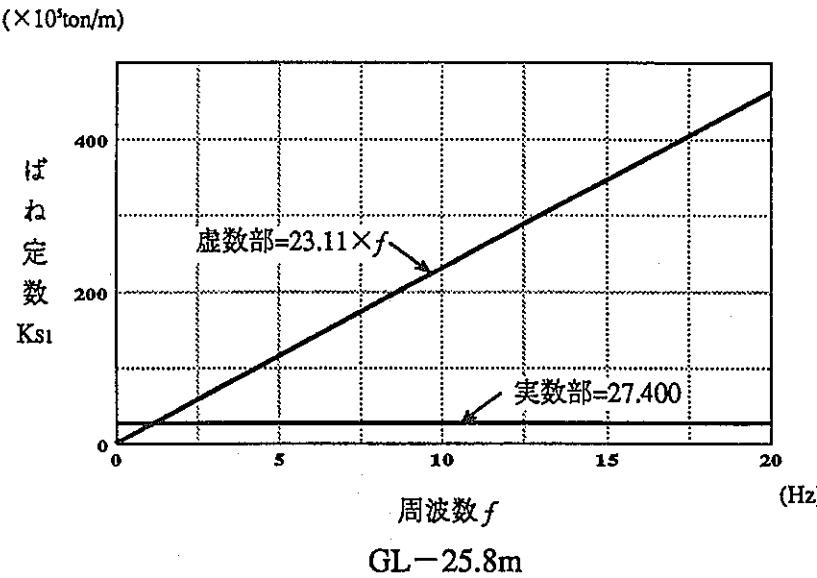
水平ばね K_s 回転ばね K_R

図 5 - 6 本耐震性評価における原子炉建物及び原子炉附属建物底面ばね



- 30 -

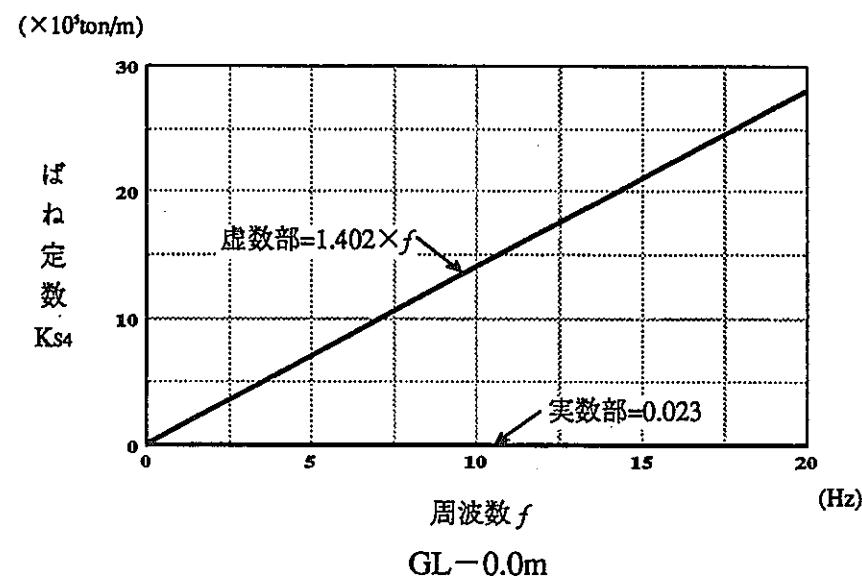
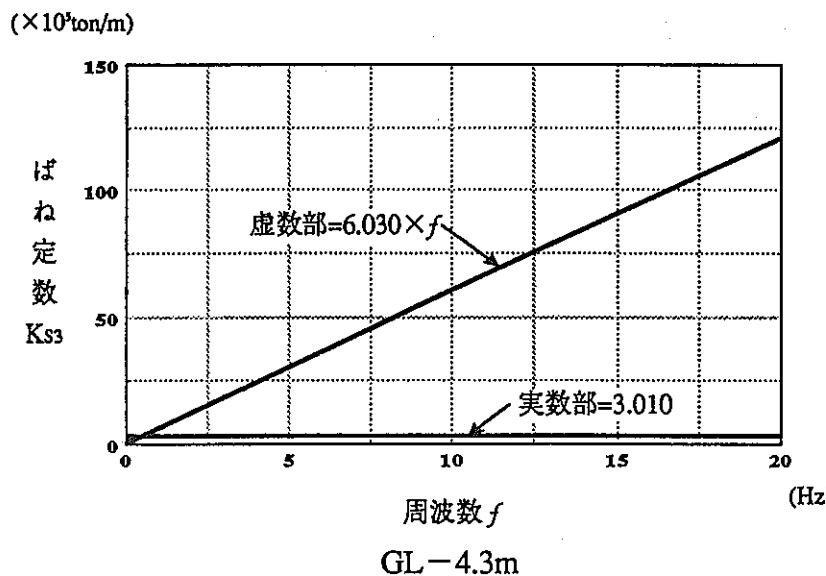


図 5 - 7 本耐震性評価における原子炉建物及び原子炉附属建物側面ばね

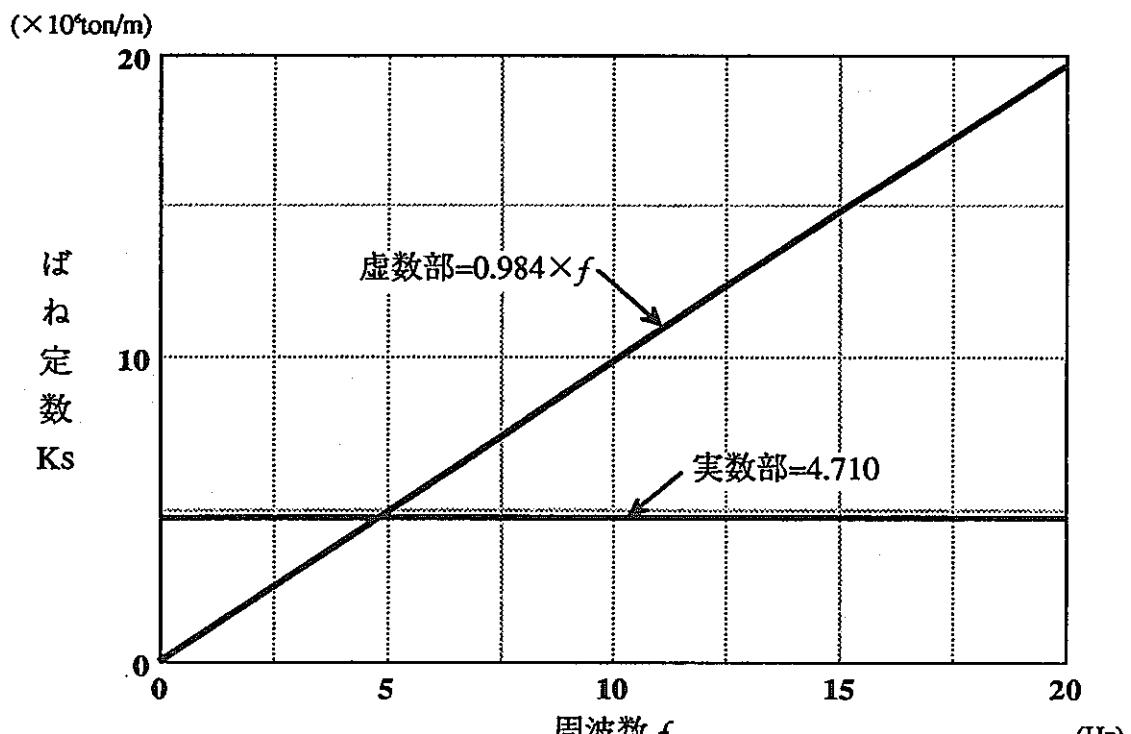
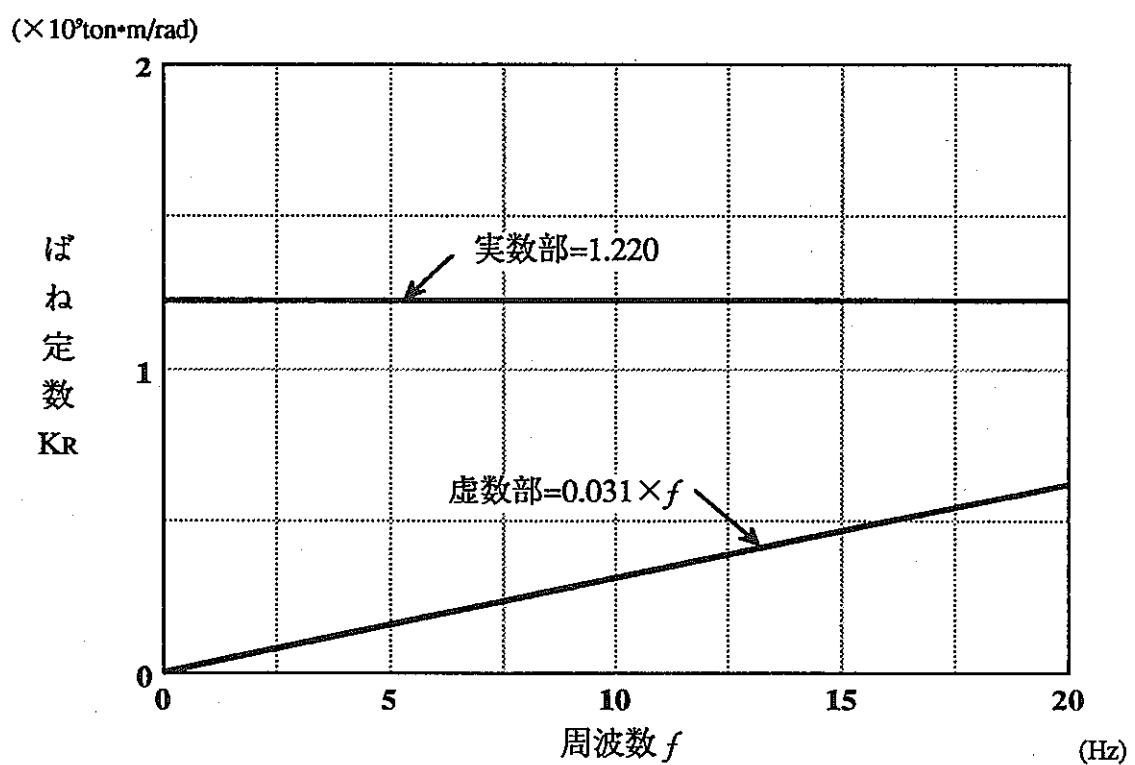
水平ばね K_s 回転ばね K_R

図 5 - 8 本耐震性評価における主冷却機建物底面ばね

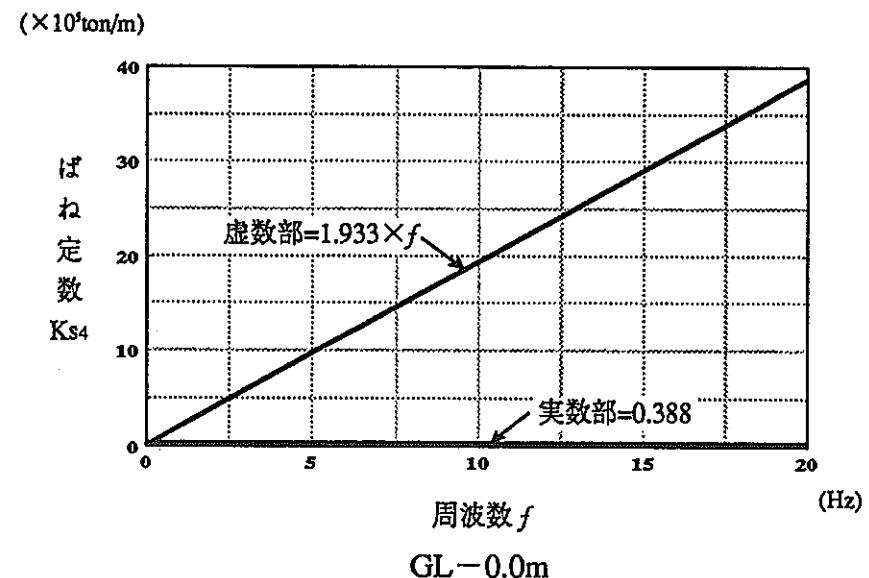
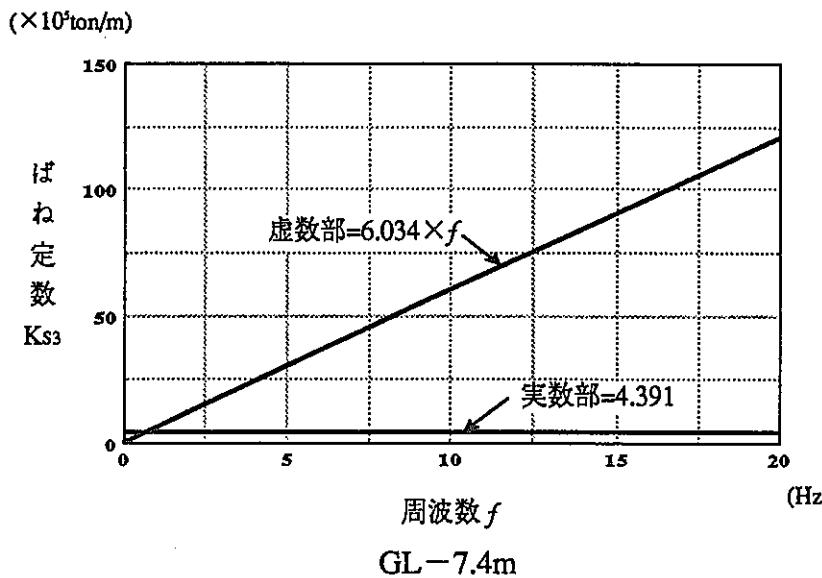
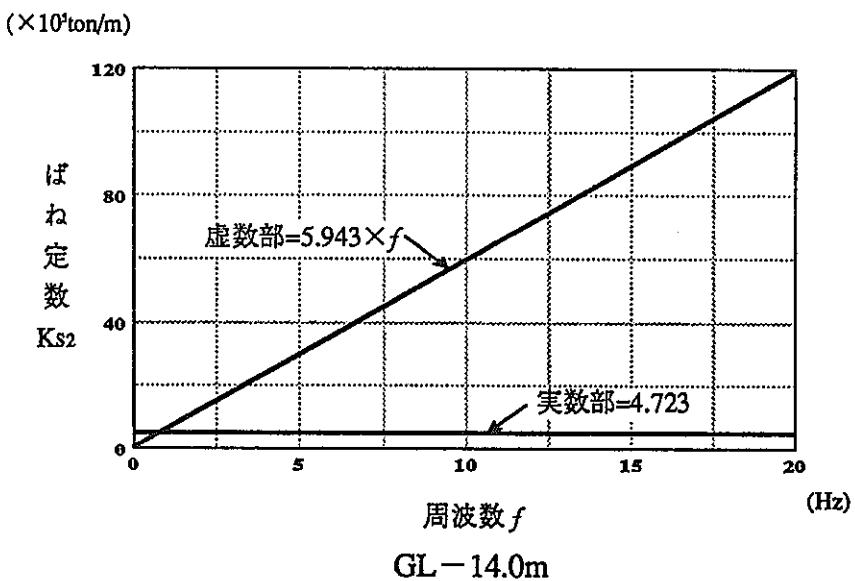
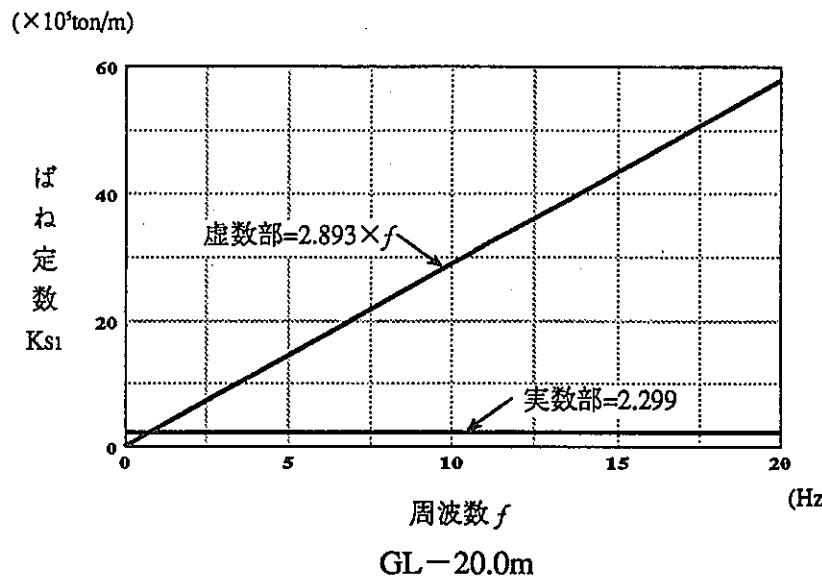


図 5 - 9 本耐震性評価における主冷却機建物側面ばね

表 5 - 6 当初設置許可における建物の設計震度

耐震クラス	水平震度	鉛直震度	備 考
A	3.0 C ₀ または建物の据付位置の最大応答震度 (α_B/g)	± 1.5 C _v	水平、鉛直方向は同時に加える
B	1.5 C ₀	0	
C	1.0 C ₀	0	

- 注) (1) C₀ は、建築基準法に定められた標準震度であるが、建物の構造種別と地盤種別の低減係数のみを考慮することが認められており、また高さを計る基準面としては建物の基礎底面を採用している。C₀ は、基礎底面において 0.2 とし、基礎底面から 4 m 高さ毎に 0.01 を加算していく（施行令第 88 条を参考）。また、「常陽」の地盤は、第 2 種地盤に該当しており、第 2 種地盤上の鉄筋コンクリート造建物に対する水平震度低減係数である 0.9 を採用し、C₀ に考慮している。
- (2) α_B は、動的解析により求めた構造物応答加速度の最大値としている。
- (3) C_v は、C₀ の基礎底面の値と同一のもので、建物の高さによる増加は考えないとしている。

表 5-7 「常陽」の建物支持地盤の構造

GL (m)	密度 γ (tf/m ³)	V_p (m/sec)	せん断波 速度 V_s (m/sec)	ポアソン比 ν	主な土質
0.0					
-5.0	1.88	500	120	0.47	盛土、ローム
-16.0	1.88	700	320	0.37	細砂～中砂 粘土 砂
主冷却基礎-20.0	1.93				
-22.0	2.10	900	570	0.47	砂礫、細砂
-31.0					
附属基礎-31.8	1.91				
-35.0	2.00	1600	470	0.45	細砂
-41.0	2.00	1600	350	0.475	シルト質砂 細砂
-64.0	2.00	1600	400	0.47	細砂、シルト湿り細砂
-80.0	2.00	1600	470	0.45	細砂 シルト質細砂
-114.0	2.00	1600	530	0.44	砂質泥岩

*) : 建物側方地盤の影響を考慮した水平地下震度の補正係数 α

(1) 原子炉附属建物

原子炉附属建物の重み付けした平均値 V_s は下式より算出している。

$$[120\text{m/sec} \times (5\text{m}/31.8\text{m}) + 320\text{m/sec} \times ((22\text{m}-5\text{m})/31.8\text{m}) + 570\text{m/sec} \times ((31\text{m}-22\text{m})/31.8\text{m}) + 470\text{m/sec} \times ((31.8\text{m}-31\text{m})/31.8\text{m})] = 363\text{m/sec} \approx 360\text{m/sec}$$

建物側方地盤の影響を考慮した水平地下震度の補正係数 α は、下式より算出している。

$$(0.295/(500\text{m/sec}-200\text{m/sec})) \times (500\text{m/sec}-360\text{m/sec}) + 1.295 = 1.43 \approx 1.5$$

(2) 主冷却機建物

主冷却機建物の重み付けした平均値 V_s は下式より算出している。

$$[120\text{m/sec} \times (5\text{m}/20\text{m}) + 320\text{m/sec} \times ((20\text{m}-5\text{m})/20\text{m})] = 270\text{m/sec}$$

建物側方地盤の影響を考慮した水平地下震度の補正係数 α は、主冷却機建物のような建物の埋込み深さ (H_d) が20m以下の場合、 $\alpha = 1.0$ としている。

6. 建物動的応答解析結果と静的地震力

6.1 建物動的応答解析結果

表6-1に各建物の固有振動数を示す。

表6-2及び図6-1～図6-3に各建物の各質点における最大応答加速度を示す。

表6-3に各建物の各要素における最大応答せん断力及び曲げモーメントを示す。

この結果、本耐震性評価における各建物の最大応答加速度は、当初設置許可における各建物の最大応答加速度で包絡されている。したがって、当初設置許可の際ににおいて建物の健全性が確認されている「常陽」において、特に、昭和56年審査指針に基づく耐震性評価を行う必要はないと考えられるが、最新の評価手法及び安全裕度の考え方を取り入れた技術指針1987年版及び技術指針1991年版に基づく耐震性評価を行っている。その結果を7章の建物支地盤の安定性及び8章の建物の評価結果に示す。

6.2 静的地震力

表6-4～表6-6及び図6-4～図6-6に昭和56年審査指針に基づく設計用地震層せん断力係数及び震度を示す。

表6-7～表6-8に昭和56年審査指針に基づく各建物の静的地震力を示す。

なお、表6-7～表6-8の層せん断力 Q_i 及び転倒モーメント M_i は、構造計算指針・同解説（日本建築センター）を用いて以下の通り算出している。

*1：層せん断力 Q_i は、下式より算出している。

(1) 地上部の層せん断力

$$Q_i = C_i \cdot W_i \quad W_i : \text{鉛直震度考慮した階重量}$$

(2) 地下部の層せん断力

$$Q_i = Q_A + K \cdot W_i \quad Q_A : \text{地上1階～2階の層せん断力}$$

*2：転倒モーメント M_i は、層せん断力 Q_i を用いて下式より算出している。

$$M_i = Q_i \cdot h_i \quad h_i : i \text{階の階高}$$

表 6 - 1 各建物の固有振動数

(単位 : Hz)

モード	原子炉建物、格納容器、原子炉附属建物			主冷却機建物		
	昭和56年 審査指針	当初設置許可		昭和56年 審査指針	当初設置許可	
		軟地盤	硬地盤		軟地盤	硬地盤
1次	2.71	2.85	3.92	3.34	2.13	2.91
2次	4.98	6.49	6.71	7.46	6.41	8.55
3次	7.63	6.99	9.26	16.95	9.80	10.53
4次	10.99	10.87	11.36	20.00	13.89	14.08
5次	13.70	12.99	13.16	27.03	19.23	19.23

表 6 - 2 各建物の各質点における最大応答加速度

(単位 : gal)

原子炉建物、原子炉格納容器、原子炉附属建物					主冷却機機建物				
建物	質点番号	昭和 56 年審査指針		当初設置許可	質点番号	昭和 56 年審査指針		当初設置許可	
		S ₁	S ₂			S ₁	S ₂	軟地盤	硬地盤
原子炉建物	②	104	174	—	①	128	273	525	300
	①	93	129	—	②	103	210	519	319
	⑯	88	117	245	③	142	229	525	394
	②	84	113	314	④	219	307	569	506
	③	110	141	372	⑤	280	403	688	569
	④	139	188	412	⑥	403	652	925	831
	⑤	161	220	441	⑦	736	1183	1300	1625
	⑥	263	361	608	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
原子炉格納容器	②	104	174	—	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
	①	93	129	—	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
	⑯	78	107	284	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
	⑦	108	159	294	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰
	⑧	165	295	314	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
	⑨	200	367	343	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲
	⑩	262	497	431	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳
	⑪	335	654	519	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑
	⑫	407	805	608	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒
原子炉附属建物	②	104	174	—	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕
	①	93	129	—	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖
	㉑	83	113	255	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗
	㉒	85	116	294	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘
	㉓	102	134	363	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙
	㉔	122	168	382	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚
	㉕	163	249	441	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛
	㉖	187	295	470	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜
	㉗	258	423	598	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝
	㉘	㉚	㉛	㉜	㉜	㉝	㉞	㉟	㉟

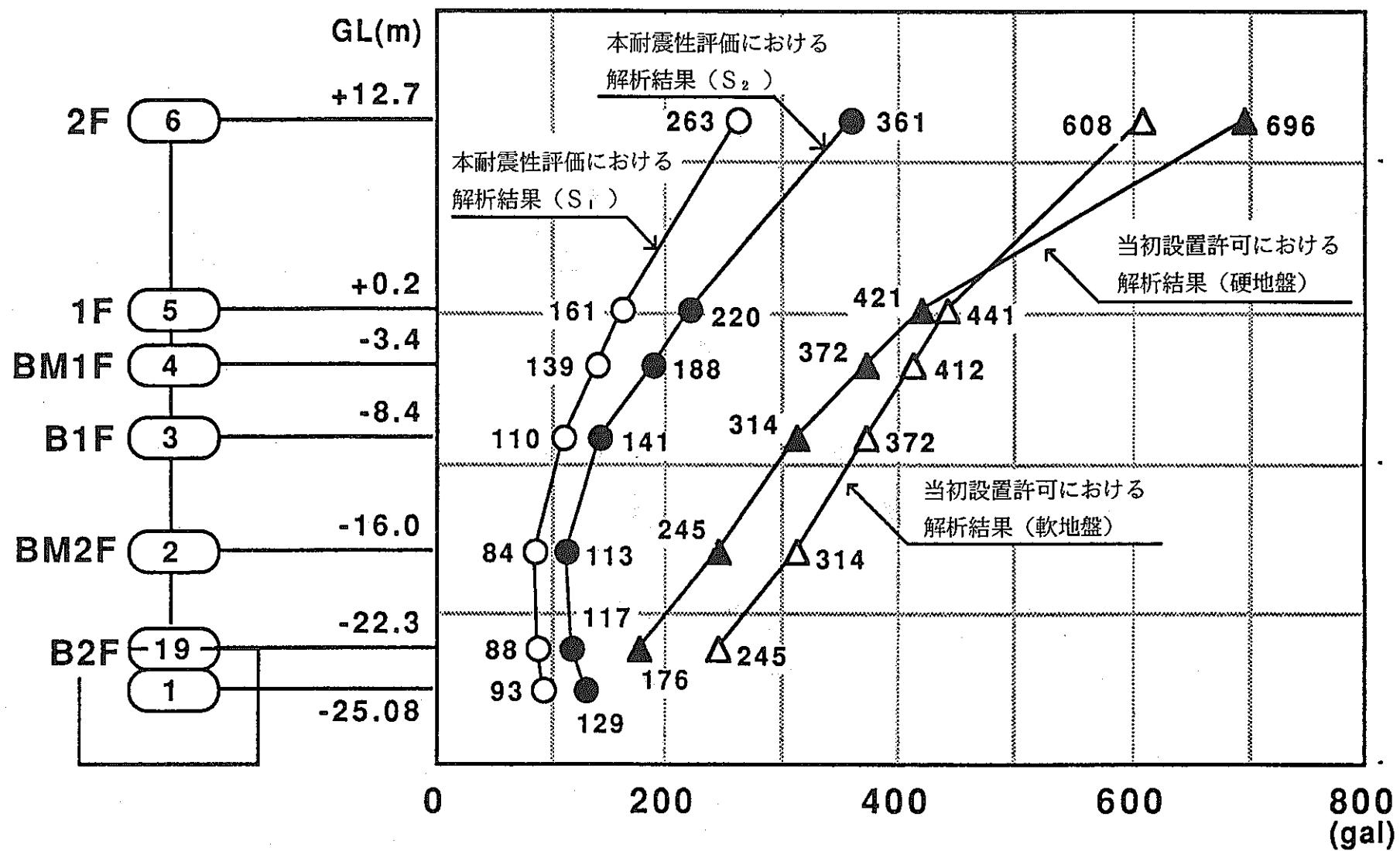


図 6-1 原子炉建物各質点の最大応答加速度

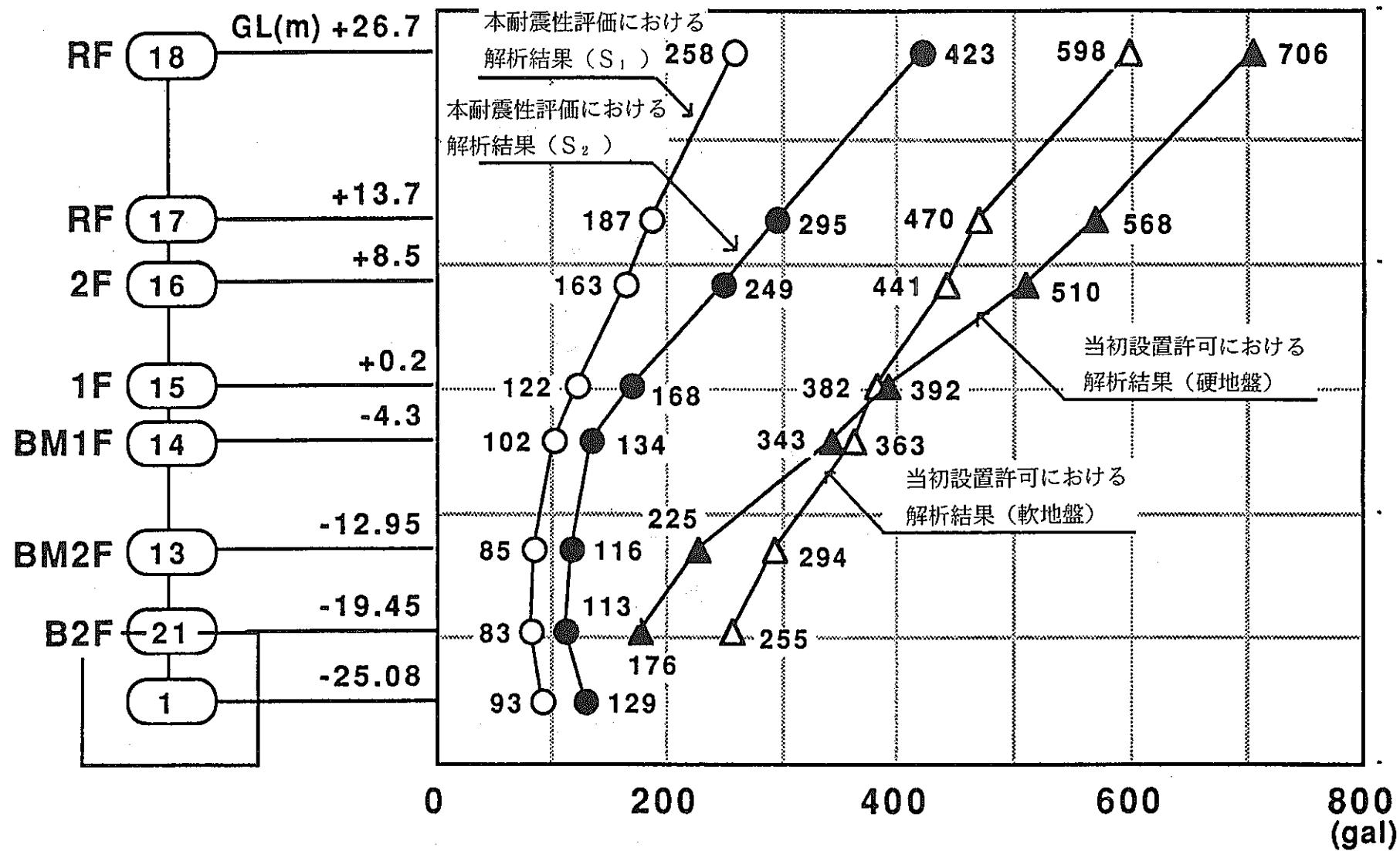


図 6-2 原子炉附属建物各質点の最大応答加速度

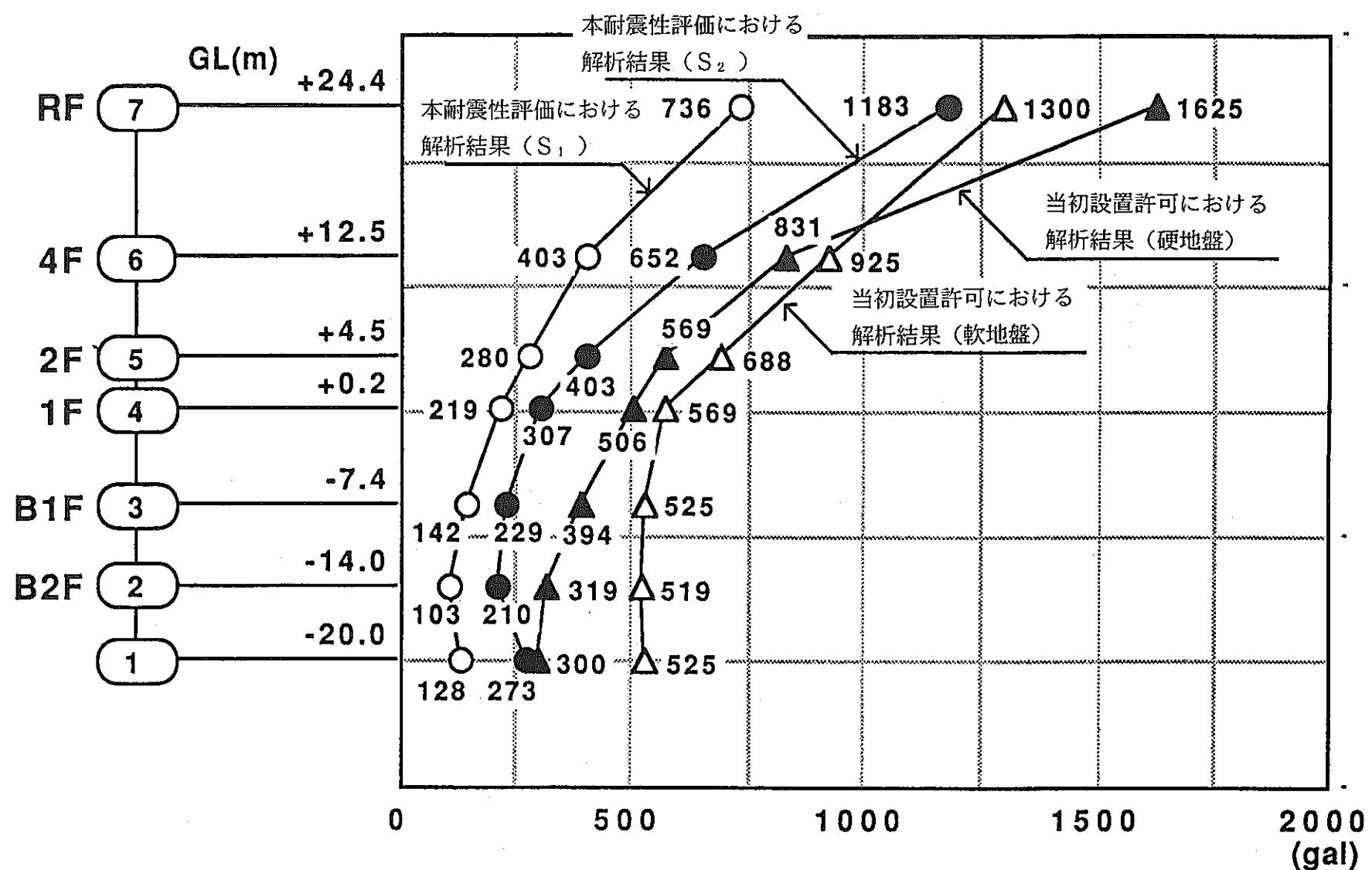


図 6-3 主冷却機建物各質点の最大応答加速度

表 6-3 各建物の各要素における最大応答せん断力及び曲げモーメント（昭和 56 年審査指針）

原子炉建物、格納容器、原子炉附属建物			主冷却機建物							
建物	要素番号	せん断力 (×100) (t)		曲げモーメント (×10 ⁴) (t・m)		要素番号	せん断力 (×100) (t)		曲げモーメント (×10 ⁴) (t・m)	
		S ₁	S ₂	S ₁	S ₂		S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
原子炉建物	1	131.7	226.9	34.60	53.62	1	106.7	165.4	20.35	29.31
	2	23.1	28.7	4.82	6.25	2	74.5	97.5	13.47	20.43
	3	18.9	24.8	3.23	4.27	3	47.6	72.3	8.25	13.42
	4	14.3	19.0	1.67	2.20	4	25.7	41.2	4.43	7.25
	5	8.0	10.5	0.85	1.15	5	22.2	35.7	3.13	5.15
	6	3.2	4.4	0.46	0.66	6	5.0	8.4	0.70	1.17
原子炉格納容器	1	131.7	226.9	34.60	53.62					
	7	1.8	3.3	0.39	0.74					
	8	1.6	2.9	0.28	0.55					
	9	1.3	2.5	0.17	0.34					
	10	0.9	1.7	0.12	0.24					
	11	0.5	1.0	0.06	0.11					
	12	0.2	0.4	0.02	0.03					
原子炉附属建物	1	131.7	226.9	34.60	53.62					
	13	81.4	131.6	15.20	27.00					
	14	55.7	78.9	12.71	21.21					
	15	38.0	64.3	8.52	14.04					
	16	28.5	45.1	5.40	8.74					
	17	13.3	21.7	1.84	2.92					
	18	2.3	3.8	0.36	0.58					

表 6-4 設計用地震層せん断力係数及び震度（原子炉建物）

(単位 : G)

耐震重要度分類	レベル	①	②	③	④	⑤	⑥	
		B2F GL-22.30	BM2F GL-16.00	B1F GL-8.40	BM1F GL-3.40	1F GL+0.20	2F GL+12.70	
層せん断力分布係数 A ₁	層せん断力分布係数 A ₁		1.0000	1.0857	1.1430	1.2259	1.4391	
	せん断力係数 ^{*1} C ₁		0.1800	0.1954	0.2057	0.2207	0.2590	
As	水平	建物	0.540	0.586	0.617	0.662	0.777	
		機器	0.648	0.704	0.741	0.794	0.933	
	鉛直	建物	0.30					
		機器	0.36					
	動的	水平	基準地震動 S ₂ に基づく床応答スペクトル又は時刻歴による					
		鉛直	基準地震動 S ₂ の最大加速度の 1/2 の値 0.179					
A	静的	水平	建物	0.540	0.586	0.617	0.662	0.777
		機器	0.648	0.704	0.741	0.794	0.933	
	鉛直	建物	0.30					
		機器	0.36					
	動的	水平	基準地震動 S ₁ に基づく床応答スペクトル又は時刻歴による					
		鉛直	基準地震動 S ₁ の最大加速度の 1/2 の値 0.092					
B	静的水平	建物	0.270	0.293	0.309	0.331	0.389	
		機器	0.324	0.352	0.370	0.397	0.466	
	動的水平	機器	基準地震動 S ₁ に基づく床応答スペクトル又は時刻歴の 1/2 の値					
C	静的水平	建物	0.180	0.195	0.206	0.221	0.259	
		機器	0.216	0.235	0.247	0.265	0.311	

* 1 : せん断力係数 C₁ = R t' · A₁ · C₀

表 6-5 設計用地震層せん断力係数及び震度（原子炉附属建物）

(単位 : G)

耐震重要度分類	レベル	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)		(7)	
		B2F GL-19.45	BM2F GL-12.95	BM1F GL-4.30	1F GL+0.20		2F GL+8.50		RF GL+13.70	
		層せん断力分布係数A ₁	—	—	—	—	1.0000	1.0667	1.2654	—
せん断力係数 ^{*1} C ₁		—	—	—	—	—	0.1800	0.1920	0.2270	—
As	静的	水平	建物	0.231	0.304	0.402	0.450	0.540	0.576	0.683
			機器	0.277	0.365	0.482	0.540	0.648	0.691	0.820
	鉛直	建物	0.30							
		機器	0.36							
	動的	水平	機器	基準地震動S ₂ に基づく床応答スペクトル又は時刻歴による						
				基準地震動S ₂ の最大加速度の1/2の値 0.179						
A	静的	水平	建物	0.231	0.304	0.402	0.450	0.540	0.576	0.683
			機器	0.277	0.365	0.482	0.540	0.648	0.691	0.820
	鉛直	建物	0.30							
		機器	0.36							
	動的	水平	機器	基準地震動S ₁ に基づく床応答スペクトル又は時刻歴による						
				基準地震動S ₁ の最大加速度の1/2の値 0.092						
B	静的水平	建物	0.116	0.152	0.201	0.225	0.270	0.288	0.342	—
		機器	0.139	0.182	0.241	0.270	0.324	0.346	0.410	—
	動的水平	機器	基準地震動S ₁ に基づく床応答スペクトル又は時刻歴の1/2の値							
C	静的水平	建物	0.077	0.102	0.134	0.150	0.180	0.192	0.228	—
		機器	0.092	0.122	0.161	0.180	0.216	0.230	0.273	—

* 1 : せん断力係数C₁ = R t' · A₁ · C₀

表 6-6 設計用地震層せん断力係数及び震度（主冷却機建物）

(単位 : G)

耐震重要度分類	レベル		②	③	④	⑤	⑥	⑦	
			B2F GL-14.00	B1F GL- 7.40	1F GL+ 0.20	2F GL+ 4.50	4F GL+12.50	RF GL+24.40	
	層せん断力分布係数 A_1	—	—	—	1.0000	1.0650	1.1220		
As	せん断力係数 ^{*1} C_1	—	—	—	0.1800	0.1917	0.2020		
A	静的	水平	建物	0.195	0.245	0.30	0.540	0.575	0.606
			機器	0.234	0.294	0.36	0.648	0.690	0.727
	的	鉛直	建物	0.30					
			機器	0.36					
B	動的	水平	機器	基準地震動 S_2 に基づく床応答スペクトル又は時刻歴による					
				基準地震動 S_2 の最大加速度の1/2 の値 0.179					
	静的	水平	建物	0.195	0.245	0.30	0.540	0.575	0.606
			機器	0.234	0.294	0.36	0.648	0.690	0.727
	的	鉛直	建物	0.30					
			機器	0.36					
C	動的	水平	機器	基準地震動 S_1 に基づく床応答スペクトル又は時刻歴による					
				基準地震動 S_1 の最大加速度の1/2 の値 0.092					
	静的	水平	建物	0.098	0.122	0.15	0.270	0.288	0.303
			機器	0.117	0.147	0.18	0.324	0.345	0.364
	的	動的水平	機器	基準地震動 S_1 に基づく床応答スペクトル又は時刻歴の1/2 の値					
C	静的	水平	建物	0.065	0.082	0.10	0.180	0.192	0.202
			機器	0.078	0.098	0.12	0.216	0.230	0.242

* 1 : せん断力係数 $C_1 = R t' \cdot A_1 \cdot C_0$

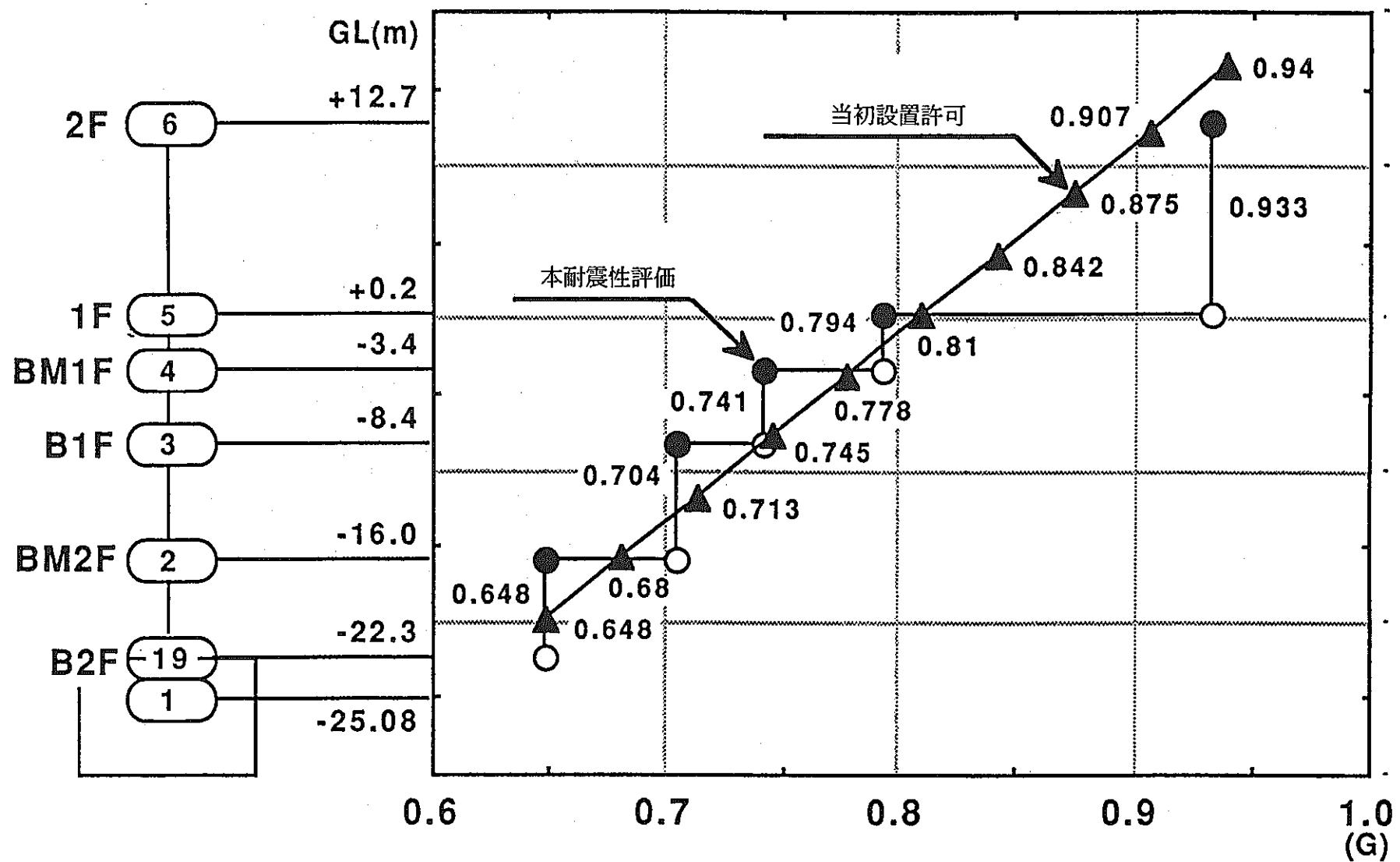


図 6-4 原子炉建物の機器・配管系の設計用地震層せん断力係数及び震度（A s、A クラス）

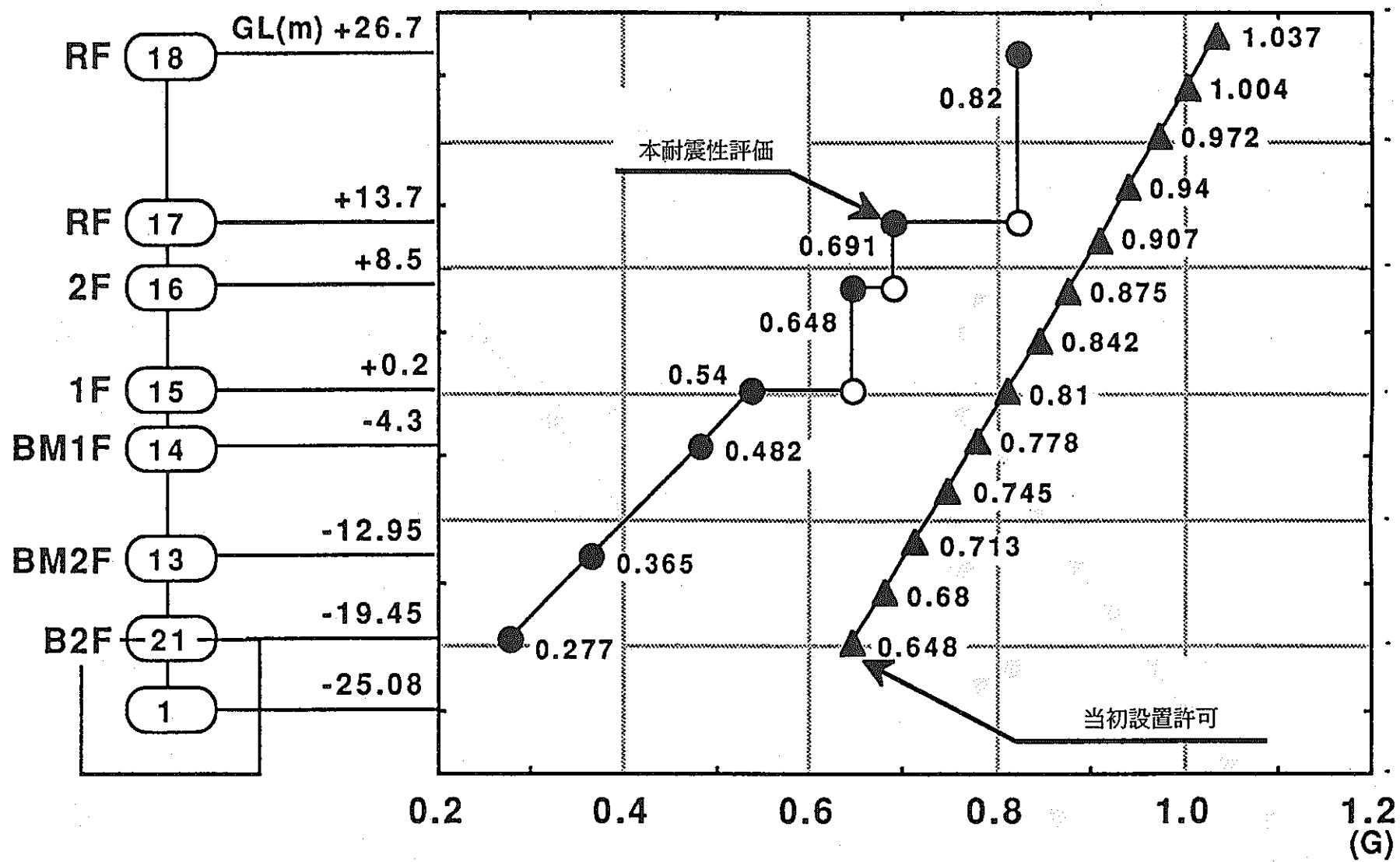


図 6-5 原子炉附属建物の機器・配管系の設計用地震層せん断力係数及び震度 (A s、A クラス)

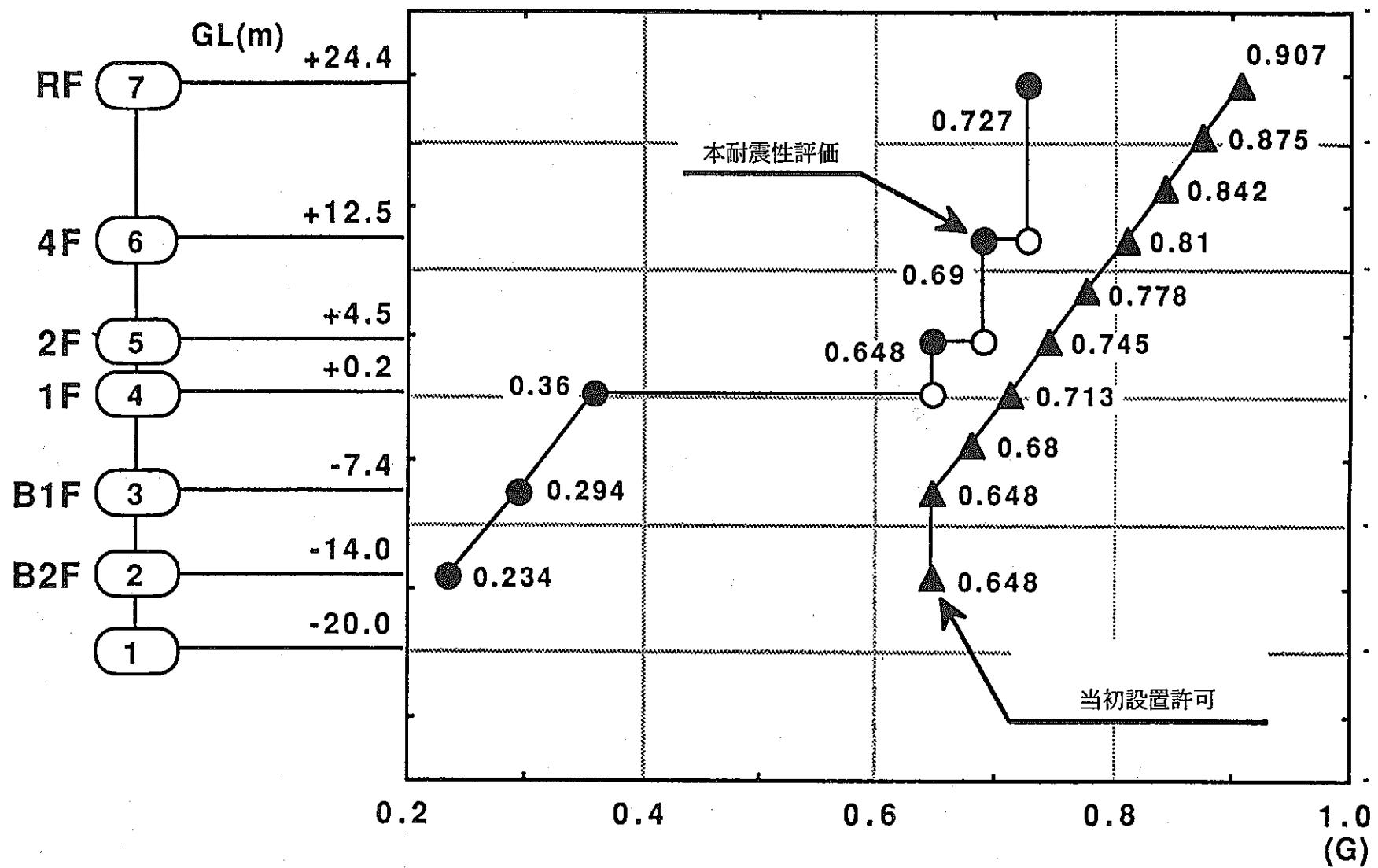


表 6-7 静的地震力の算定結果（原子炉建物、原子炉附属建物及び原子炉格納容器）

階 高 (m) G L (m) 重量位置	重 量 (t)		層せん断力 分布係数 A _i	層せん断力 係 数 C _i 地下部分は 震 度 K _i	層せん断力 Q _i ^{*1} (t)	転 倒 モーメント M _i ^{*2} ×10 ⁴ (t・m)
	階重量 W _i	鉛直震度考 慮の階重量 W _i × C _v + W _i				
原子 炉 建 物	⑥ +12.7					
	12.50	1, 203.7	1, 564.8	1.4391	0.777	1, 215.8
	⑤ +0.2					
	3.60	2, 926.2	3, 804.1	1.2259	0.662	3, 554.2
	④ -3.4					
	5.00	4, 469.7	5, 810.6	1.1430	0.617	6, 897.8
	③ -8.4					
	7.60	4, 126.4	5, 364.3	1.0857	0.586	9, 694.7
	② -16.0					
原子 炉 格 納 容 器	6.30	6, 038.2	7, 849.7	1.0000	0.540	13, 172.5
	-22.3					
小 計		18, 764.2	24, 393.5	—	—	—
原子 炉 附 属 建 物	⑫ +25.64					
	8.83	43.5	56.6	1.6486	0.890	50.4
	⑪ +16.81					
	7.95	95.2	123.8	1.4718	0.795	143.4
	⑩ +8.86					
	7.56	142.2	184.9	1.3154	0.710	259.4
	⑨ +1.30					
	3.85	208.0	270.4	1.1661	0.630	400.5
	⑧ -2.55					
	7.10	141.2	183.6	1.0998	0.594	486.7
原子 炉 格 納 容 器	⑦ -9.65					
	6.05	209.1	271.8	1.0000	0.540	589.2
	-15.7					
小 計		839.2	1, 091.1	—	—	—
原子 炉 附 属 建 物	⑯ +26.70					
	13.00	868.0	1, 128.4	1.2654	0.683	770.7
	⑮ +13.70					
	5.20	5, 856.2	7, 613.1	1.0667	0.576	5, 035.1
	⑭ +8.50					
	8.30	9, 157.0	11, 904.1	1.0000	0.540	11, 148.6
	-0.20	12, 769.5	16, 600.4	—		
	4.50				0.450	18, 618.8
	⑬ -4.30	15, 978.2	20, 771.7	—	0.402	26, 969.0
	8.65				0.304	44. 5802
	-12.95	18, 599.7	24, 179.6	—	0.231	34, 319.6
	6.50				0.225	86. 2100
合 计	⑫ -19.45	—	—			
	5.63	85, 038.6	110, 550.2	—		
	-25.08					
原子 炉 格 納 容 器	6.72	4, 126.4	5, 364.3	—		
	-31.80					
小 計		152, 393.6	198, 111.8	—	—	—
合 计		171, 997.0	223, 596.4	—	74, 162.1	149. 9249

表 6-8 静的地震力の算定結果（主冷却機建物）

階 高 (m) G L (m) 重量位置	重 量 W (t)		層せん断力 分布係数 A _i	層せん断力 係 数 C _i 地下部分は 震 度 K	層せん断力 Q _i *1 (t)	転 倒 モーメント M _i *2 ×10 ⁴ (t・m)	
	階重量 W _i	鉛直震度考 慮の階重量 W _i × C _v + W _i					
主 冷 却 機 建 物	⑦ +24.4 11.90	691.0	898.3	1.1220	0.606	544.4	0.6478
	⑥ +12.5 8.00	4,213.6	5,477.7	1.0650	0.575	3,666.2	3.5808
	⑤ +4.5 4.50	1,402.5	1,823.3	1.0000	0.540	4,427.6	5.5732
	④ -0.2 1.40	8,121.8	10,558.3	—	0.300	7,595.1	11.1936
	③ -7.4 6.60	9,006.0	11,707.8	—	0.245	10,463.5	18.0995
	② -14.0 6.00	14,000.0	18,200.0	—	0.195	17,332.9	28.4992
	① -20.0	13,098.1	17,027.5	—	—	—	—
	合 計	50,533.0	65,692.9	—	—	—	—

層せん断力 Q_i 及び転倒モーメント M_i は、構造計算指針・同解説（日本建築センター）を用いて以下の通り算出している。

*1：層せん断力 Q_i は、下式より算出している。

(1) 地上部の層せん断力

$$Q_i = C_i \cdot W_i \quad W_i : \text{鉛直震度考慮した階重量}$$

(2) 地下部の層せん断力

$$Q_i = Q_A + K \cdot W_i \quad Q_A : \text{地上 1 階～2 階の層せん断力}$$

*2：転倒モーメント M_i は、層せん断力 Q_i を用いて下式より算出している。

$$M_i = Q_i \cdot h_i \quad h_i : i \text{ 階の階高}$$

7. 建物支持地盤の安定性

7.1 支持力に対する安定性

原子炉建物及び原子炉附属建物の基礎地盤の支持力は、建設予定地点の基礎地盤における地耐力試験によれば、短期許容支持力 $180\text{ton}/\text{m}^2$ 、長期許容支持力 $90\text{ton}/\text{m}^2$ が十分期待できると評価されている。また、原子炉設置変更許可申請書の添付書類6によれば、「支持地盤層での地耐力試験や土質試験を実施した結果と建物の基礎の根入れ深さや基礎底面の横巾を考慮すると、長期支持力は $1,000\text{ton}/\text{m}^2$ 以上が期待できるので、建物の重量及び地震荷重に対しては十分余裕のある地耐力が確保されている」と記述されている。なお、「常陽」設置地盤掘削後の基礎地盤面における地耐力試験では、短期許容支持力 $282\text{ton}/\text{m}^2$ 、長期許容支持力 $222\text{ton}/\text{m}^2$ の支持力があるとの結果が得られている。

一方、主冷却機建物基礎地盤の支持力は、建設予定地点の基礎地盤における地耐力試験によれば、短期許容支持力で $150\text{ton}/\text{m}^2$ 、長期許容支持力で $75\text{ton}/\text{m}^2$ が十分期待されると評価されている。

表7-1及び表7-2に建物の長期接地圧及び短期接地圧の算定結果を示す。

原子炉建物及び原子炉附属建物の最大長期接地圧は、 $62.5\text{ton}/\text{m}^2$ であり、長期許容支持力 $90\text{ton}/\text{m}^2$ を十分下回っている。また、短期接地圧においても、静的地震力 $147.2\text{ton}/\text{m}^2$ 、動的地震力 $106.2\text{ton}/\text{m}^2$ と、いずれも短期許容支持力 $180\text{ton}/\text{m}^2$ を十分下回っている。

主冷却機建物の最大長期接地圧は、 $27.5\text{ton}/\text{m}^2$ であり、短期許容支持力 $75\text{ton}/\text{m}^2$ を十分下回っている。また、短期接地圧においても、静的地震力 $69.8\text{ton}/\text{m}^2$ 、動的地震力 $85.6\text{ton}/\text{m}^2$ と、いずれも短期許容支持力 $150\text{ton}/\text{m}^2$ を十分下回っている。

以上より、「常陽」の支持地盤は、建物の支持力に対して十分な安定性を有していると判断できる。

7.2 すべりに対する安定性

建物のすべりは、JEAG4601-1987「原子力発電所耐震設計技術指針」（以下技術指針1987年版という）の5.2.6項「建屋の安定性の検討」を参考に、次のように評価している。

地盤のすべり抵抗に関しては、設置地盤の孔内せん断試験による粘着力及び内部摩擦角を用いて算出している。

$$\text{基礎地盤のすべりに対するせん断抵抗力 } Q_u = C \cdot A + W \cdot \tan \Theta$$

C : 基礎底面と地盤との間の粘着力 (ton/m^2)

原子炉建物及び原子炉附属建物基礎地盤 : 2 ton/m²

主冷却機建物基礎地盤 : 0 ton/m²

A : 底面の有効載荷面積 (m²)

W : 建物重量 (ton)

$\tan \Theta$: 内部摩擦角より求まる値

原子炉建物及び原子炉附属建物基礎地盤内部摩擦角 : 36.5°

" $\tan \Theta$: 0.74

主冷却機建物基礎地盤内部摩擦角 : 44.0°

" $\tan \Theta$: 0.966

表 7-3 に建物のすべりに対する安全率の算定結果を示す。

建物のすべりに対する安全率は、静的地震力において最も安全率が低く、原子炉建物及び原子炉附属建物で1.66、主冷却機建物で2.56と評価した。また、動的解析では、原子炉建物及び原子炉附属建物で4.73、一方、主冷却機建物で2.42と評価した。この結果、安全率は、評価基準値の目安である安全率1.5以上が確保されている。

以上より、「常陽」の支持地盤は、建物のすべりに対して十分な安定性を有していると判断できる。

7.3 沈下に対する安定性

地盤の沈下に関しては、即時沈下及び圧密沈下について評価した。

(1) 即時沈下

即時沈下量は、「建築基礎構造設計指針、日本建築学会」(1988年版)⁽⁵⁾の4.3節沈下量の計算より、下図のような有限厚さの地層上の基礎として算定している。

表 7-4 より、基礎底面地盤から解放基盤面までの98.2m(原子炉建物及び原子炉附属建物)、110m(主冷却機建物)の地層の即時沈下量は、それぞれ59.4mm、21.4mmと算出された。これに対して、鉄筋コンクリート造でべた基礎の許容即時沈下量は、最大80mmとされている。

即時沈下量(S_E)は、

$$S_E = \mu_H \frac{q \times \sqrt{A}}{E}$$

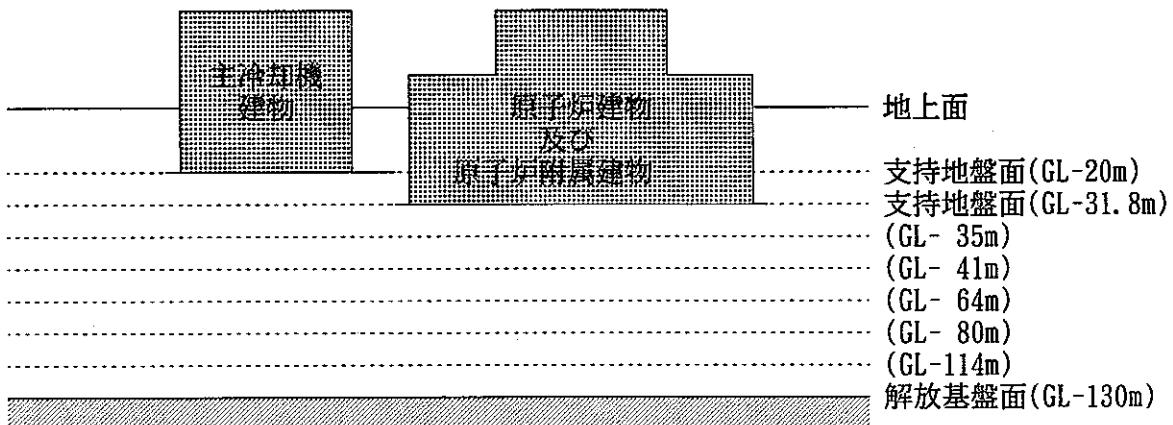
μ_H : 地盤の沈下係数

E : 地盤のヤング係数 (ton/m²)

基礎底面以深の地盤の各層厚さによって重み付けした値を用いた。

q : 基礎の平均荷重密度 (ton/m^2)

A : 基礎底面積 (m^2)



(2) 圧密沈下

「常陽」設置地盤の平板載荷試験結果では、短期許容支持力が $282\text{ton}/\text{m}^2$ 、長期許容支持力は $222\text{ton}/\text{m}^2$ と評価されている。また、原子炉建物及び原子炉附属建物、主冷却機建物の支持地盤層の圧密降伏応力は、設置地盤が一様な成層地盤であることから、第二使用済燃料貯蔵施設の増設の際の地盤圧密試験結果を参考に用いれば、約 $165\sim200\text{ton}/\text{m}^2$ の範囲にある。なお、圧密降伏応力は、下位の層ほど大きくなる傾向を示している。

これに対して、原子炉建物及び原子炉附属建物の最大短期接地圧は、 $147.2\text{ton}/\text{m}^2$ であり、圧密降伏応力を十分下回っていることから、十分弾性範囲にある。

以上より、「常陽」の支持地盤は、建物の沈下に対して十分な安定性を有していると判断できる。

7.4 液状化に対する安定性

「常陽」の支持地盤のG L - 35m付近は、地下水に浸されている細砂の層がある。したがって、技術指針1987年版の3.3.5項「物性の表示方法と設計への適用」を参考に評価している。技術指針1987年版では、ゆるい砂地盤から密な砂地盤までの地盤に対しての液状化判定法が提案されている。

これによると、液状化応力比 (R) は、

$$R = a [N_1^{0.5} + (b N_1)^n + c - 14.8 \cdot f (D_{50})]$$

N_1 : 基準化N値 $N_1 = 2.5N / (1.5 + \sigma_v')$

N : 実測N値

 σ_v' : 有効上載圧 (kg/cm^2)

$$f(D_{50}) = 0.225 \log(D_{50}/0.35) \quad : 0.04 \leq D_{50} \leq 0.6 \text{mm}$$

$$f(D_{50}) = 0.05 \quad : 0.6 \leq D_{50} \leq 1.5 \text{mm}$$

a, b, c, n は定数で下表による。

軸ひずみ振幅 ϵ_{DA}	N _{eq}	a	b	c	d
2 %	10	0.0639	0.0346	0.312	3.21
	20	0.0584	0.0336	0.312	2.80
	30	0.0554	0.0318	0.312	2.78
5 %	10	0.0760	0.0420	0	4.77
	20	0.0676	0.0368	0	4.52
	30	0.0631	0.0345	0	4.00

N_{eq} : 繰り返し回数 (=20回) , $\epsilon_{DA} = 5\%$

地震時の液状化安全率は、液状化応力比 (R) と地震時最大せん断応力比 (L) から次の式によって求められる。なお、地震時最大せん断応力比は、地盤内に発生する最大せん断応力度を有効上載圧 (σ_v') で除した値である。

$$\text{液状化安全率} = \frac{R}{L}$$

表7-5に液状化に対する検討結果を示す。この結果、安全率は、1.0以上を十分上回っている。また、N値20~30以上の密な砂地盤で過去の地震で液状化が生じた例もない。以上より、「常陽」の支持地盤で液状化が生じることはないと判断できる。

表 7-1 最大長期接地圧

建物	建物重量 W (ton)	基礎部 底面積 A (m ²)	基礎底 せん断力 Q (ton)	基礎底転 倒モーメント $M \times 10^4$ (ton・m)	接地長 L_g (m)	接地率 η	最大長期 接地圧 σ_{max} (ton/m ²)	長期許容 支持力 (ton/m ²)
原子炉建物 及び 原子炉附属建物	171,997	2,750	—	—	—	—	62.5	90.0
主冷却機建物	50,533	1,836	—	—	—	—	27.5	75.0

表 7-2 最大短期接地圧

解析 手法	鉛 直 度 K_v (G)	方 向	建物重量 $W + K_v W$ (ton)	基礎部 底面積 A (m ²)	基礎底 せん断力 $Q \times 10^2$ (ton)	基礎底転 倒モーメント $M \times 10^4$ (ton・m)	接地長 L_g (m)	接地率 η	最大短期 接地圧 σ_{max} (ton/m ²)	短期許容 支持力 (ton/m ²)	
原子炉建物 及び 原子炉附属建物	静的	0.300	東	223,596	2,750	741.62	149.93	50.0	1.00	147.2	180.0
		-0.300	西	120,398		570.48	115.33	46.3	0.93	102.1	
		0.300	南	223,596		741.62	149.93	55.0	1.00	140.7	
		-0.300	北	120,398		570.48	115.33	53.8	0.98	91.8	
	S_2	0.179	東	202,784		329.02	74.27	50.0	1.00	106.2	
		-0.179	西	141,210		226.90	53.62	50.0	1.00	75.0	
		0.179	南	202,784		329.02	74.27	55.0	1.00	103.2	
		-0.179	北	141,210		226.90	53.62	55.0	1.00	72.4	
	静的	0.300	東	65,693	1,835	173.33	28.50	67.0	1.00	49.7	150.0
		-0.300	西	35,373		133.33	21.92	67.0	1.00	30.1	
		0.300	南	65,693		173.33	28.50	27.4	1.00	69.8	
		-0.300	北	35,373		133.33	21.92	22.5	0.82	57.3	
		0.179	東	59,578		189.27	33.23	67.0	1.00	48.7	
		-0.179	西	41,488		165.40	29.31	67.0	1.00	36.8	
		0.179	南	59,578		189.27	33.23	24.4	0.89	82.0	
		-0.179	北	41,488		165.40	29.31	19.9	0.73	85.6	

注) : 接地圧は、「建築基礎構造設計指針、日本建築学会」(1988年版)の5.2節独立フーチング基礎より算定した。

表 7-3 すべりに対する安全率

解析手法		鉛直震度 K_v (G)	方 向	建物重量 $W + K_v W$ (ton)	有効 載荷面積 A (m ²)	基礎底 せん断力 Q (ton)	すべり抵抗 Q_u (ton)	すべり安全率 Q_u/Q
原子炉建物および原子炉附属建物	静的	0.300	東	223,596	2,750	74,162	170,961	2.31
		-0.300	西	120,398		57,048	94,595	1.66
		0.300	南	223,596		74,162	170,961	2.31
		-0.300	北	120,398		57,048	94,595	1.66
	S_2	0.179	東	202,784		32,902	155,560	4.73
		-0.179	西	141,210		22,690	109,995	4.85
		0.179	南	202,784		32,902	155,560	4.73
		-0.179	北	141,210		22,690	109,995	4.85
主冷却機建物	静的	0.300	東	65,693	1,835	17,333	63,459	3.66
		-0.300	西	35,373		13,333	34,170	2.56
		0.300	南	65,693		17,333	63,459	3.66
		-0.300	北	35,373		13,333	34,170	2.56
	S_2	0.179	東	59,578		18,927	57,552	3.04
		-0.179	西	41,488		16,540	40,077	2.42
		0.179	南	59,578		18,927	57,552	3.04
		-0.179	北	41,488		16,540	40,077	2.42

表 7-4 即時沈下量の算出結果

地層	基礎底面から の深度 (m)	層厚 (m)	ヤング係数 E (ton/m ²)	沈下係数 μ_H	平均荷重 度 q (ton/m ²)	沈下量 (mm)		
原子 炉 建 物 、附 属 建 物	H ₂	-3.2	3.2	24,800	23,388	62.5	59.4	
	H ₃	-9.2	6.0	26,100				
	H ₄	-32.2	23.0	14,700				
	H ₅	-48.2	16.0	19,200				
	H ₆	-82.2	34.0	26,100				
	H ₇	-98.2	16.0	33,000				
主 冷 却 機 建 物	H ₁	-11.0	2.0	11,000	24,605	0.447	27.5	21.4
			9.0	40,900				
	H ₂	-15.0	4.0	24,800				
	H ₃	-21.0	6.0	26,100				
	H ₄	-44.0	23.0	14,700				
	H ₅	-60.0	16.0	19,200				
	H ₆	-94.0	34.0	26,100				
	H ₇	-110.0	16.0	33,000				

ヤング係数 (E) は、横弾性係数 (G) との間に下式の関係があることから、地盤の横弾性係数測定結果より算定した。

$$E = 2G(1+\nu) \cdot \beta$$

$$2G(1+\nu) = E_0$$

E₀ : 微小ひずみレベル ($1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$) のヤング係数 (ton/m²)

G : 横弾性係数 (ton/m²)

$$r \cdot V_s^2$$

$$G = \frac{g}{r \cdot V_s^2}$$

r : 単位体積重量 (ton/m³)

V_s : せん断波速度 (m/sec)

g : 重力加速度 (m/sec²)

ν : ポアソン比

β : 補正係数 (微小ひずみレベルのヤング係数 (E₀) を通常の設計荷重におけるひずみレベルに対応するヤング係数 (E) とするための低減係数)

この係数は、長期接地圧が 62.5 ton/m²におけるひずみ範囲は、 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-2} \%$ であると想られる。よって、保守的にひずみを $1 \times 10^{-1} \%$ と仮定すると、弾性係数とひずみの関係からその補正係数は、0.2となる。

沈下係数 (μ_H) は、基礎底面以深の地盤の各層厚さからポアソン比 ν を重み付けした値を用いた。重み付けしたポアソン比 ν は、0.457であるが、保守的に0.45を用いた。また、各建物の L/B 及び H/ \sqrt{A} は、以下の値を用いた。

原子炉建物及び原子炉附属建物

$$\frac{L}{B} = \frac{55}{50} = 1.1$$

$$\frac{H}{\sqrt{A}} = \frac{98.2}{\sqrt{2750}} = 1.87$$

主冷却機建物

$$\frac{L}{B} = \frac{67}{27.4} = 2.45$$

$$\frac{H}{\sqrt{A}} = \frac{110}{\sqrt{1836}} = 2.57$$

表 7-5 液状化に対する検討結果

G L m	基礎データ				$f(D_{50})$	液状化 応力比 R	最大せん断応力度 kg/cm^2	地震時せん断応力比 L	液状化安全率
	N 値	σ_v' kg/cm^2	N_1	D_{50} mm					
-35~-39	60	6.46	18.8	0.17	-0.076	0.38	0.937	0.15	2.53

8. 建物の評価結果

8.1 静的地震力に対する評価

昭和56年審査指針では、建物の保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して重要度に応じた妥当な安全余裕を有していることを確認することになっている。これは、「保有水平耐力／必要保有水平耐力」の値が安全余裕度の指標となることを意味している。

必要保有水平耐力 Q_{un} は、次式で評価している。

$$Q_{un} = D_s \cdot F_{es} \cdot Q_{ud}$$

D_s : 各層の構造特性係数 (0.6)

D_s は、発電所の設計に用いられている 0.5 に 20% の余裕を見込んだ安全側の値とした。

F_{es} : 各層の形状特性係数 (1.0)

Q_{ud} : 地震力によって各層に生じる水平力 (ton)

(静的地震力は、重要度に応じた係数及び標準せん断力係数を 1.0 として算定する) (表 8-1 及び表 8-2 参照)

$$\begin{aligned} &= n \cdot Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0 \cdot W_i = 1.0 \cdot 1.0 \cdot 0.9 \cdot A_i \cdot 1.0 \cdot W_i \\ &= 0.9 \cdot A_i \cdot W_i \end{aligned}$$

保有水平耐力 Q_u は、次式で評価している。なお、表 8-3 に算出結果を示す。

$$Q_u = \left[\frac{0.0679 Pte^{0.23} (Fc + 180)}{\sqrt{M/(Q \cdot D)} + 0.12} + 2.7 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot Pwh + 0.1 \sigma_0} \right] \times Ae$$

Pte : 等価引張鉄筋比 (%) = $100 at / (be \cdot d)$

at : 鉄筋断面積 (cm^2)

be : 耐力壁の厚さ (cm)

d : はり有効せい (cm) = $0.95D$ (ここでの D の単位は cm)

Fc : コンクリート圧縮強度 (kg/cm^2)

M : 耐力を算定する断面のモーメント ($\text{ton} \cdot \text{m}$)

Q : 耐力を算定する断面のせん断力 (ton)

D : ボックス壁の加力方向の壁長又は円筒壁の外径 (m)

原子炉建物 28m、原子炉附属建物 50m、主冷却機建物 27.4m

σ_{wh} : せん断補強筋の材料強度 (kg/cm^2)

Pwh : せん断補強筋比 ($Pwh \leq 1.2\%$) (小数)

σ_0 : 全断面積に対する平均軸方向応力度 (kg/cm^2)

Ae : 耐力壁のせん断有効断面積 (cm^2)

ただし、 $M/(Q \cdot D)$ が 1 未満のときは 1 とし、3 以上のときは 3 とする。

上記より算出した保有水平耐力 Qu 及び必要保有水平耐力 Qu_{un} に基づき、静的地震力に対する安全裕度を算出した結果を表 8-4 に示す。この結果、建物の保有水平耐力は、最も厳しい箇所においても 3.0 以上の裕度を有しており、許容値 $\sqrt{3}$ に対して十分な安全余裕を有している。

8.2 動的地震力に対する評価

表 8-5 及び表 8-6 に動的地震時 (S_2) において得られた最大応答せん断力と静的地震力の最大せん断力との比率を示す。なお、表中には、本耐震性評価解析で示した技術指針 1991 年版の近似地盤ばねを用いた解析結果に加えて、当初設置許可で用いた解析条件と同一で行った解析結果及び技術指針 1987 年版の従来法を用いた解析結果も併せて示している。

表 8-5 及び表 8-6 より、静的に対する動的最大せん断力の比率はいずれも 1.0 を下回っており、動的地震力 (S_2) は静的地震力より小さい。静的地震力に対する保有水平耐力は、必要保有水平耐力（各層の構造特性係数 $D_s = 0.6$ とした場合）の 3 倍以上を確保しており、各層の構造特性係数 D_s を 1.0 として必要保有水平耐力を算出したとしても十分裕度を持っている。各層の構造特性係数 D_s は、建物の変形能力による地震エネルギー吸収能力に応じた低減係数であり、これを 1.0 にした場合は、建物の変形能力を期待しないことと同様であり、建物が弾性領域にあることを示している。

よって、動的地震時 (S_2) においても静的で算出した保有水平耐力を十分下回っており、建物の挙動が弾性範囲内にあると判断できる。

表 8-1 静的地震力の算定結果（原子炉建物、原子炉附属建物及び原子炉格納容器）

階 高 (m) G L (m) 重量位置	重 量 (t)		層せん断力 分布係数 A _i	層せん断力 係 数 C _i 地下部分は 震 度 K _i	層せん断力 Q _i * ¹ (t)	転 倒 モーメント M _i * ² ×10 ⁴ (t・m)
	階重量 W _i	鉛直震度考 慮の階重量 W _i × C _v + W _i				
原子 炉 建 屋	⑥ +12.7					
	12.50	1, 203.7	1, 564.8	1.4391	1.295	2, 026.4
	⑤ +0.2	2, 926.2	3, 804.1	1.2259	1.103	5, 921.9
	3.60					
	④ -3.4	4, 469.7	5, 810.6	1.1430	1.029	11, 503.7
	5.00					
	③ -8.4	4, 126.4	5, 364.3	1.0857	0.977	16, 163.3
	7.60					
	② -16.0	6, 038.2	7, 849.7	1.0000	0.900	21, 954.2
	6.30					
	⑩ -22.3					
小 計		18, 764.2	24, 393.5	—	—	—
格 納 容 器	⑫ +25.64					
	8.83	43.5	56.6	1.6486	1.484	84.0
	⑪ +16.81	95.2	123.8	1.4718	1.325	239.0
	7.95					
	⑩ +8.86	142.2	184.9	1.3154	1.184	432.5
	7.56					
	⑨ +1.30	208.0	270.4	1.1661	1.049	666.8
	3.85					
	⑧ -2.55	141.2	183.6	1.0998	0.990	811.1
	7.10					
	⑦ -9.65	209.1	271.8	1.0000	0.900	982.0
	6.05					
	⑯ -15.7					
小 計		839.2	1, 091.1	—	—	—
原 子 炉 附 属 建 屋	⑮ +26.70					
	13.00	868.0	1, 128.4	1.2654	1.139	1, 285.2
	⑭ +13.70	5, 856.2	7, 613.1	1.0667	0.960	8, 391.8
	5.20					
	⑬ +8.50	9, 157.0	11, 904.1	1.0000	0.900	18, 581.0
	8.30					
	⑮ +0.20	12, 769.5	16, 600.4	—		
	4.50				0.450	26, 051.2
	⑭ -4.30	15, 978.2	20, 771.7	—	0.402	34, 401.4
	8.65				0.304	41, 752.0
	⑬ -12.95	18, 599.7	24, 179.6	—	0.231	62. 9371
	6.50				0.225	113. 5822
	⑮ -19.45					
	5.63					
	① -25.08	85, 038.6	110, 550.2	—		
	6.72					
	⑫ -31.80	4, 126.4	5, 364.3	—		
小 計		152, 393.6	198, 111.8	—	—	—
合 計		171, 997.0	223, 596.4	—	90, 769.1	197. 7157

表 8-2 静的地震力の算定結果（主冷却機建物）

階 高 (m) G L (m) 重量位置	重 量 W (t)		層せん断力 分布係数 A _i	層せん断力 係 数 C _i 地下部分は 震 度 K	層せん断力 Q _i *1 (t)	転 倒 モーメント M _i *2 ×10 ⁴ (t・m)	
	階重量 W _i	鉛直震度考 慮の階重量 W _i × C _v + W _i					
主 冷 却 機 建 物	⑦ +24.4 11.90	691.0	898.3	1.1220	1.010	907.3	1.0797
	⑥ +12.5 8.00	4,213.6	5,477.7	1.0650	0.959	6,114.6	5.9714
	⑤ +4.5 4.50	1,402.5	1,823.3	1.0000	0.900	7,379.4	9.2921
	④ -0.2 1.40	8,121.8	10,558.3	—	0.300	10,546.9	17.0968
	③ -7.4 6.60	9,006.0	11,707.8	—	0.245	13,415.3	25.9509
	② -14.0 6.00	14,000.0	18,200.0	—	0.195	20,284.7	38.1217
	① -20.0	13,098.1	17,027.5	—	—	—	—
	合 計	50,533.0	65,692.9	—	—	—	—

層せん断力Q_iおよび転倒モーメントM_iは、構造計算指針・同解説（日本建築センター）を用いて以下の通り算出している。

*1：層せん断力Q_iは、下式より算出している。

(1) 地上部の層せん断力

$$Q_i = C_i \cdot W_i \quad W_i : \text{鉛直震度考慮した階重量}$$

(2) 地下部の層せん断力

$$Q_i = Q_A + K \cdot W_i \quad Q_A : \text{地上 1 階～2 階の層せん断力}$$

*2：転倒モーメントM_iは、層せん断力Q_iを用いて下式より算出している。

$$M_i = Q_i \cdot h_i \quad h_i : i \text{ 階の階高}$$

表 8-3 保有水平耐力の算出結果（静的）

要素No	$Ae \times 10^4 \text{cm}^2$	$a t \text{ cm}^2$	$b e \text{ cm}$	$d \text{ cm}$	$p te \%$	$F c \text{ kg/cm}^2$	$\sigma wh \text{ kg/cm}^2$	$p wh$	$\sigma o \text{ kg/cm}^2$	(1)式	(2)式	(3)式	$Qu t$
原子炉建物	6	15.5	$13.2 \times 28 = 369.6$	40	2660	0.347	3000	0.012	10.9	20.37	16.2	1.09	5,837.3
	5	63.5	$28.9 \times 28 = 809.2$	60		0.507				22.22			25,088.9
	4	96.8	$96.2 \times 28 = 2693.6$	150		0.675				23.74			39,717.0
	3	101.8	$96.2 \times 28 = 2693.6$	150		0.675				23.74			41,768.5
	2	107.9	$96.2 \times 28 = 2693.6$	150		0.675				23.74			44,271.4
原子炉附属建物	18	24.0	$8.5 \times 50 = 425.0$	50	4750	0.179	3000	0.012	10.9	17.49	16.2	1.09	8,347.2
	17	122.8	$8.5 \times 50 = 425.0$	50		0.179				17.49			42,709.8
	16	148.8	$8.5 \times 50 = 425.0$	50		0.179				17.49			51,752.6
	15	275.4	$59.5 \times 50 = 2975.0$	180		0.348				20.38			103,743.2
	14	286.6	$59.5 \times 50 = 2975.0$	180		0.348				20.38			107,962.2
	13	354.5	$96.5 \times 50 = 4825.0$	240		0.423				21.32			136,872.5
主冷却機建物	6	13.9	$4.0 \times 27 = 108.0$	25	2603	0.166	3000	0.012	10.5	16.56	16.2	1.05	4,699.6
	5	60.1	$4.0 \times 27 = 108.0$	25		0.166				16.56			20,319.8
	4	79.8	$4.0 \times 27 = 108.0$	25		0.166				16.56			26,980.4
	3	132.7	$24.5 \times 27 = 661.5$	100		0.254				18.26			47,121.8
	2	159.7	$39.6 \times 27 = 1069.2$	130		0.316				19.20			58,210.7

$$0.0679 Pte^{0.23} (F_c + 180)$$

$$(1) \text{式: } \frac{0.0679 Pte^{0.23} (F_c + 180)}{\sqrt{M/(Q \cdot D)} + 0.12}, \quad (2) \text{式: } 2.7 \sqrt{\sigma wh \cdot Pwh}, \quad (3) \text{式: } 0.1 \sigma_o$$

表 8 - 4 建物の必要保有水平耐力に対する安全余裕

要素No	保有水平耐力 Q_u (t)	必要保有水平耐力 Q_{un} (t)	安全裕度 Q_u/Q_{un}
原子炉建物	6 5,837.3	1,215.8	4.80
	5 25,095.2	3,553.1	7.06
	4 39,717.0	6,902.2	5.75
	3 41,768.5	9,698.0	4.31
	2 44,271.4	13,172.5	3.36
原子炉附属建物	18 8,347.2	771.1	10.83
	17 42,709.8	5,035.1	8.48
	16 51,752.6	11,148.6	4.64
	15 103,743.2	15,630.7	6.64
	14 107,962.2	20,640.8	5.23
	13 136,872.5	25,051.2	5.46
主冷却機建物	6 4,699.6	544.4	8.63
	5 20,319.8	3,668.8	5.54
	4 26,980.4	4,427.6	6.09
	3 47,121.8	6,328.1	7.45
	2 58,210.7	8,049.2	7.23

表 8-5 動的地震力と静的地震力との最大せん断力の比率（原子炉建物及び原子炉附属建物）

建物 名称	要素 番号	当初設置許可と同一の手法（従来法） ($\times 10^2 \text{ t}$)										比 率				
		近似地盤ばね (複素ばね)		地盤の減衰定数（当初設置許可と同一） (回転、水平 5%一定)				地盤の減衰定数（技術指針1987年版） (回転10%、水平30%一定)				(各動的地震力／静的地震力)				
		S ₁	S ₂	S ₁		S ₂		S ₁		S ₂		①	②	③	④	⑤
原子炉建物	6	3.2	4.4	4.7	7.7	7.8	12.9	3.7	5.4	7.1	8.3	0.22	0.38	0.64	0.35	0.41
	5	8.0	10.5	11.2	18.8	18.1	30.6	8.4	13.8	15.4	20.1	0.18	0.31	0.52	0.26	0.34
	4	14.3	19.0	19.3	33.3	34.0	54.8	14.4	25.0	25.1	36.5	0.17	0.30	0.48	0.22	0.32
	3	18.9	24.8	25.6	44.0	46.5	73.2	18.4	34.0	30.3	50.4	0.15	0.29	0.45	0.19	0.31
	2	23.1	28.7	31.3	54.1	59.5	91.0	21.1	43.0	34.0	65.7	0.13	0.27	0.41	0.15	0.30
原子炉附属建物	18	2.3	3.8	2.8	6.4	5.5	10.6	2.0	4.9	3.4	7.1	0.30	0.43	0.82	0.26	0.55
	17	13.3	21.7	15.5	39.1	28.0	60.6	12.3	29.2	18.4	41.2	0.26	0.33	0.72	0.22	0.49
	16	28.5	45.1	31.6	83.7	56.0	128.4	26.2	61.8	38.1	87.3	0.24	0.30	0.69	0.21	0.47
	15	38.0	64.3	45.4	129.0	76.5	201.9	40.4	95.4	58.6	137.7	0.25	0.29	0.78	0.22	0.53
	14	55.7	78.9	57.6	176.5	97.7	279.8	55.4	129.7	80.9	190.7	0.23	0.28	0.81	0.24	0.55
	13	81.4	131.6	75.3	209.1	114.8	340.0	66.4	159.3	98.0	227.7	0.32	0.27	0.81	0.23	0.55

表 8-6 動的地震力と静的地震力との最大せん断力の比率（主冷却機建物）

建 物 名 称	要 素 番 号	技術指針1991年版 ($\times 10^2 \text{ t}$)		当初設置許可と同一の手法（従来法） ($\times 10^2 \text{ t}$)						比 率						
		近似地盤ばね (複素ばね)		地盤動減衰定数（当初設置許可と同一） (回転、水平 5%一定)			地盤動減衰定数（技術指針1987年版） (回転 10%、水平 30%一定)			(各動的地震力／静的地震力)						
		S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	①	②	③	④	⑤		
主 冷 却 機 建 物	6	5.0	8.4	3.3	4.0	6.3	8.9	2.0	2.2	3.5	4.3	0.93	0.69	0.98	0.39	0.47
	5	22.2	35.7	15.6	15.7	24.6	27.6	9.7	9.6	14.6	16.5	0.58	0.40	0.45	0.24	0.27
	4	25.7	41.2	18.2	17.6	27.7	28.3	11.3	11.0	16.7	18.5	0.56	0.38	0.38	0.23	0.25
	3	47.6	72.3	30.0	23.5	40.2	36.2	19.2	17.9	24.6	26.6	0.69	0.38	0.34	0.23	0.25
	2	74.5	97.5	44.3	33.6	56.8	50.2	26.5	23.4	33.5	36.3	0.73	0.42	0.37	0.25	0.27
	1	106.7	165.4	66.7	56.8	96.4	104.4	39.1	35.1	54.4	52.9	0.82	0.48	0.51	0.27	0.26

9. 機器・配管系の動的加速度及び静的震度の新旧比較

3.章の耐震重要度分類の新旧比較で示したように、昭和56年審査指針に基づき耐震クラスの再分類を行った結果、Aクラス以上に該当する機器・配管系について、動的加速度及び静的震度の新旧比較を行った。

9.1 原子炉建物及び原子炉附属建物内機器・配管系

表9-1に原子炉建物及び原子炉附属建物内機器・配管系の動的加速度、静的震度の新旧比較を示す。

この結果、原子炉建物及び原子炉附属建物内に設置されている機器・配管系は、昭和56年審査指針に基づく動的加速度 S_1 、 S_2 及び静的震度が、すべて当初設置許可における設計条件を下回っていることを確認した。

9.2 主冷却機建物内機器・配管系

表9-2に主冷却機建物内機器・配管系の動的加速度、静的震度の新旧比較を示す。

この結果、主冷却機建物内に設置されている機器・配管系では、2次冷却系主配管の動的加速度 S_1 、 S_2 が当初設置許可における設計条件を上回っていた。したがって、再評価の必要性がある。

上記の結果を受けて、2次冷却系主配管については、昭和56年審査指針に基づく再評価を行っている。また、動的加速度及び静的震度の新旧比較結果で当初設置許可における設計条件を下回っているものでも、MK-III冷却系改造に係わる既設接続配管等について一部再評価を行っている。

以下に、再評価を行った機器・配管系を示す。

- (1) 2次冷却系主配管（全ルート） (13.章を参照)
- (2) 1次冷却系主配管（全ルート） (〃)
- (3) 原子炉容器 (12.章を参照)
- (4) 動的機器 (14.章を参照)

- ① 1次主循環ポンプ
- ② 制御棒駆動機構及び制御棒
- ③ アニュラス排気ファン
- ④ ディーゼル発電装置

また、以下に、上記と関係なく再評価を行った機器・構造物を示す。

(5) 原子炉格納容器 (10. 章を参照)

(6) 排気筒 (11. 章を参照)

表9-1(1/2) 原子炉建物及び原子炉附属建物内機器・配管系の動的加速度、静的震度の新旧比較

建 物 名	No	機器・配管名	ク ラ ス	昭和56年審査指針			当初設置許可		耐震性再評価の必 要性
				静的	S ₁	S ₂	静的	動的	
原子 炉 建 物	1	原子炉容器	As	0.741	0.213	0.452	0.750	0.400	なし
	2	炉心構造物	As	0.741	0.162	0.243	0.750	0.360	なし
	3	炉心構成要素	A	0.741	0.307	—	0.750	0.800	なし
	4	炉上部機構	A	0.741	0.241	—	0.750	0.480	なし
	5	制御棒駆動機構 (1) 駆動部	As	0.741	0.277	0.490	1.120	0.480	なし
		(2) 上部案内管	As	0.741	0.238	0.410	2.100		なし
	6	大回転プラグ	A	0.741	0.169	—	0.750	0.480	なし
	7	小回転プラグ	A	0.741	0.163	—	0.750	0.480	なし
	8	1次主循環ポンプ	As	0.741	0.164	0.254	0.778	0.480	なし
	9	1次冷却系主配管 (1) R/V～IHX	As	0.741	0.210	0.421	0.778	0.810	なし
		(2) IHX(A)～M. PUMP(A)	As	0.741	0.378	0.680	0.778	1.840	なし
		(3) IHX(B)～M. PUMP(B)	As	0.741	0.378	0.680	0.778	1.860	なし
		(4) M. PUMP～R/V	As	0.741	0.389	0.666	0.778	2.220	なし
	10	2次冷却系主配管 (1) IHX(A)～C. V壁	As	0.741	0.402	0.720	0.778	0.620	なし
		(2) IHX(B)～C. V壁	As	0.741	0.355	0.655	0.778	0.700	なし
		(3) C. V壁～IHX(A)	As	0.741	0.335	0.657	0.778	1.050	なし
		(4) C. V壁～IHX(B)	As	0.741	0.335	0.657	0.778	0.780	なし
	11	補助中間熱交換器	As	0.704	0.135	0.199	0.713	0.380	なし
	12	1次補助電磁ポンプ	As	0.648	0.187	0.335	0.681	0.360	なし
	13	1次補助冷却系配管 (1) R/V～A. IHX	As	0.741	0.818	1.456	0.778	2.600	なし
		(2) A. IHX～EMP	As	0.741	0.841	1.456	0.778	2.460	なし
		(3) EMP～R/V	As	0.741	0.438	0.781	0.778	1.470	なし

注) : 耐震クラスは、昭和56年審査指針に基づくものである。

表 9-1(2/2) 原子炉建物及び原子炉附属建物内機器・配管系の動的加速度、静的震度の新旧比較

	No	機器・配管名	ク ラ ス	昭和 56 年審査指針			当初設置許可		耐震性再評価の必 要性
				静的	S ₁	S ₂	静的	動的	
原 子 炉 建 物	14	オーバフロー電磁ポンプ	A	0.648	0.118	—	0.648		なし
	15	オーバフロータンク	A	0.648	0.096	—	0.648		なし
	(1) R/V～O/F TANK	オーバフロー系配管	A	0.741	0.645	—	0.778	1.490	なし
		(2) O/F TANK～EMP	A	0.741	0.221	—	0.778	0.470	なし
		(3) EMP～EMF	A	0.741	0.215	—	0.778	0.560	なし
		(4) EMF～R/V	A	0.741	0.221	—	0.778	0.420	なし
	17	2 次補助冷却系配管	A	0.704	0.504	—	0.745	0.920	なし
		(1) A. IHX～C. V壁(a)	A	0.704	0.220	—	0.745	1.390	なし
		(3) C. V壁～A. IHX	A	0.704	0.197	—	0.745	1.490	なし
原 子 炉 附 属 建 物	18	補助冷却器	A	0.540	0.165	—	0.810	0.490	なし
	19	2 次補助電磁ポンプ	A	0.540	0.164	—	0.810	0.500	なし
	20	膨張タンク	A	0.648	0.221	—	0.842	0.650	なし
	21	2 次補助冷却系配管	A	0.482	0.169	—	0.778	0.600	なし
		(1) C. V壁～A. DHX (c)	A	0.648	0.939	—	0.842	0.940	なし
		(2) C. V壁～A. DHX (d)	A	0.648	0.762	—	0.842	1.270	なし
		(4) EMP～C. V 壁(b)	A	0.540	0.281	—	0.810	1.690	なし
		(5) EMP～C. V 壁(c)	A	0.482	0.184	—	0.778	1.380	なし
	22	非常用換気設備	As	0.277	0.090	0.137	0.648		なし
		(1) アニラス排気ファン	As	0.277	0.088	0.131	0.648		なし
	23	無停電電源設備	As	0.648	0.360	0.565	0.875		なし
		(2) 交流200V蓄電池	As	0.648	0.360	0.565	0.875		なし
	24	中央制御盤	As	0.648	0.221	0.285	0.875		なし

注) : 耐震クラスは、昭和 56 年審査指針に基づくものである。

表9-2 主冷却機建物内機器・配管系の動的加速度、静的震度の新旧比較

No	機器・配管名	クラス	昭和56年審査指針			当初設置許可		耐震性再評価の必要性
			静的	S ₁	S ₂	静的	動的	
1	2次主循環ポンプ	As	0.690	0.411	0.666	0.778	1.180	なし
2	オーバーフロータンク	As	0.690	0.411	0.666	0.778	1.180	なし
3	2次冷却系主配管 (1) C.V壁～DHX	As	0.648	1.753	3.039	0.745	1.490	必要
	(2) DHX～M.PUMP	As	0.648	1.364	2.376	0.745	0.770	必要
	(3) M.PUMP～C.V壁	As	0.648	0.838	1.566	0.745	1.470	必要
4	ディーゼル発電装置	As	0.234	0.105	0.215	0.648		なし

注) : 耐震クラスは、昭和56年審査指針に基づくものである。

10. 原子炉格納容器の評価結果

原子炉格納容器は、動的応答解析の結果、容器上部において当初設置許可における動的応答加速度を上回る値が得られている。原子炉格納容器は、高速実験炉「常陽」における放射性物質を内包する最終的なバウンダリーであることから、技術指針1987年版及び1991年版に基づく耐震性の評価を行っている。

10.1 原子炉格納容器の仕様

原子炉格納容器は、内径28m、厚さ27mmないし25mmの円筒形胴部と、内半径14m、厚さ12mm半球形の頂部鏡板と、内半径25.3m、厚さ25mmないし27mmの半楕円形底部鏡板とからなる高さ54.3mの全溶接鋼板製気密容器である。図10-1に原子炉格納容器の概略図を示す。

(1) 最高使用圧力

(a) 内圧 1.35kg/cm²

(b) 外圧 0.05kg/cm²

(2) 最高使用温度 150°C

(3) 材 質

円筒形胴部、半球形頂部鏡板、半楕円形底部鏡板

JIS G3103 SB42相当（ボイラ及び圧力容器用炭素鋼）

(4) 耐震クラス A s

10.2 耐震評価

(1) 地震力の算定

① 動的地震力

(a) 水平地震力

動的水平地震力は、6.章に示した原子炉格納容器の応答解析結果を用いている。

(b) 鉛直地震力

動的鉛直地震力は、表6-4に示した値を用いている。

② 静的地震力

静的地震力は、表6-7に示した値を用いている。

(2) 評価点

評価点は、せん断力及び曲げモーメントが最大となる円筒形胴部のサンドクッション部（要素No. 7 及び質点No. 20）としている。なお、この部分の板厚は27mmであるが、応力

計算上は安全側にその上部の板厚25mmを用いて評価している。

(3) 地震時に発生するせん断力及び曲げモーメント

表10-1 及び表10-2に地震時に発生するせん断力及び曲げモーメントを示す。

これらの値は静的地震力で最大となり、評価点においてせん断力589.2ton、曲げモーメント12,109ton·mとなっている。なお、当初設置許可においても最大せん断力及び最大曲げモーメントは、静的地震力により発生している。

(4) 各荷重による発生応力

① 内圧による応力

$$\sigma \Phi 1 = \frac{Pr(D_i + 1.2t)}{200t} = 7.57 \text{kg/mm}^2$$

$\sigma \Phi 1$: 内圧により胴に生じる周方向応力 (kg/mm²)

Pr : 最高使用内圧 (kg/cm²) = 1.35kg/cm²

D_i : 原子炉格納容器胴の内径 (mm) = 2.8 × 10⁴mm

t : 原子炉格納容器胴の板厚 (mm) = 25mm

$$\sigma x 1 = \frac{Pr(D_i + 1.2t)}{400t} = 3.78 \text{kg/mm}^2$$

$\sigma x 1$: 内圧により胴に生じる軸方向応力 (kg/mm²)

② 外圧による応力

$$\sigma \Phi 1' = \frac{Pr(D_i + 1.2t)}{200t} = 0.28 \text{kg/mm}^2$$

$\sigma \Phi 1'$: 外圧により胴に生じる周方向応力 (kg/mm²)

Pr : 最高使用外圧 (kg/cm²) = 0.05kg/cm²

$$\sigma x 1' = \frac{Pr(D_i + 1.2t)}{400t} = 0.14 \text{kg/mm}^2$$

$\sigma x 1'$: 外圧により胴に生じる軸方向応力 (kg/mm²)

③ 自重による応力

$$\sigma x 2 = \frac{W}{A} = 0.38 \text{kg/mm}^2$$

$\sigma x 2$: 自重により胴に生じる軸方向応力 (kg/mm²)

W : 原子炉格納容器の重量 (kg) = 8.392 × 10⁵kg

A : 原子炉格納容器の断面積 (mm^2) $= 2.2011 \times 10^6 \text{ mm}^2$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

D_o : 原子炉格納容器胴の外径 (mm) $= 2.805 \times 10^4 \text{ mm}$

④ 水平方向地震力による応力

$$\sigma \times 3 = \frac{M}{Z} = 0.79 \text{ kg/mm}^2$$

$\sigma \times 3$: 水平方向地震力により胴に生じる軸方向応力 (kg/mm^2)

M : 水平方向地震力により生じる曲げモーメント ($\text{kg} \cdot \text{mm}$)

$$= 1.2109 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

Z : 断面係数 (mm^3) $= 1.5408 \times 10^{10} \text{ mm}^3$

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{(D_o^4 - D_i^4)}{D_o}$$

$$\tau = \frac{2Q}{A} = 0.54 \text{ kg/mm}^2$$

τ : 水平方向地震力により胴に生じるせん断応力 (kg/mm^2)

Q : 水平方向地震力により生じるせん断力 (kg) $= 5.892 \times 10^5 \text{ kg}$

⑤ 鉛直方向地震力による応力

$$\sigma \times 4 = \frac{C_V W}{A}$$

$\sigma \times 4$: 鉛直方向地震力により胴に生じる軸方向応力 (kg/mm^2)

C_V : 鉛直震度 $= 0.36 G$

⑥ 応力強さ

引張側

$$\sigma_{ot} = \frac{1}{2} (\sigma \Phi_1 + \sigma_{xt} + \sqrt{(\sigma \Phi_1 - \sigma_{xt})^2 + 4\tau^2}) = 7.66 \text{ kg/mm}^2$$

σ_{ot} : 胴の組合せ引張応力 (kg/mm^2)

$\sigma \Phi_1$: 胴の周方向応力 (kg/mm^2)

σ_{xt} : 胴の軸方向応力 ($= \sigma \times 1 - \sigma \times 2 + \sigma \times 3 + \sigma \times 4$) (kg/mm^2)

圧縮側

$$\sigma_{oc} = \frac{1}{2} (\sigma_{\Phi 1'} + \sigma_{xc} + \sqrt{(\sigma_{\Phi 1'} - \sigma_{xc})^2 + 4\tau^2}) = 1.66 \text{kg/mm}^2$$

σ_{oc} : 脈の組合せ圧縮応力 (kg/mm^2)

$\sigma_{\Phi 1'}$: 脈の周方向応力 (kg/mm^2)

σ_{xc} : 脈の軸方向応力 ($\sigma_{x1'} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sigma_{x4}$) (kg/mm^2)

(5) 座屈評価

原子炉格納容器の固定点（本評価点）においては、地震時の軸圧縮荷重及び曲げモーメントに対して、座屈評価を行う必要がある。なお、座屈評価は、以下の式を用いて行っていきる。

$$\frac{\alpha (P/A)}{fc} + \frac{\alpha (M/Z)}{fb} \leq 1$$

α : 安全率 $\eta \leq \eta_1$ の場合 $\alpha = 1.0$

$$\begin{aligned} \eta_1 < \eta < \eta_2 \text{ の場合} \quad \alpha = 1.0 + \frac{F}{13600} (\eta - \eta_1) \\ &= 1.486 \end{aligned}$$

$\eta \geq \eta_2$ の場合 $\alpha = 1.5$

$$\eta : R/t = 560.5$$

$$R : 原子炉格納容器脈の平均半径 (mm) = 1.40125 \times 10^4 \text{mm}$$

$$\eta_1 : 1200/F = 86.15$$

$$\eta_2 : 8000/F = 574.3$$

$$\eta_3 : 9600/F = 689.2$$

$$\begin{aligned} F : 告示 501 号第 88 条第 3 項第 1 号 (イ) における値 (\text{kg/mm}^2) \\ &= 13.93 \text{kg/mm}^2 \end{aligned}$$

P : 軸圧縮荷重 (kg)

$$P/A = \sigma_{x1'} + \sigma_{x2} + \sigma_{x4} = 0.66 \text{kg/mm}^2$$

fc : 軸圧縮荷重に座屈応力 (kg/mm^2)

$$fc = F \times [1 - \frac{1}{6800} (F - \Phi c (\eta)) (\eta - \eta_1)] = 6.50 \text{kg/mm}^2$$

($\eta_1 < \eta < \eta_2$ の場合)

$$\Phi_c(\eta) = 0.6 \frac{E}{\eta} [1 - 0.901 (1 - \exp(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta}))]$$

$$= 6.28$$

E : 材料の縦弾性係数 (kg/mm²) = 1.93×10^4 kg/mm²

f_b : 曲げモーメントに対する座屈応力 (kg/mm²)

$$f_b = F \times [1 - \frac{1}{8400} (F - \Phi_b(\eta)) (\eta - \eta_1)] = 10.05 \text{ kg/mm}^2$$

($\eta_1 < \eta < \eta_3$ の場合)

$$\Phi_b(\eta) = 0.6 \frac{E}{\eta} [1 - 0.731 (1 - \exp(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta}))]$$

$$= 9.00$$

(6) 評価結果

表10-3に評価点における発生応力を示す。また、表10-4に総合評価結果を示す。

これらを用いて応力評価を行った結果、1次一般膜応力は7.66kg/mm²であり、設計降伏応力 $S_y = 19.9$ kg/mm²を十分下回っていた。また、発生する応力から座屈評価を行った結果、座屈の許容値1.0に対して0.268であり、十分許容値を満足していた。

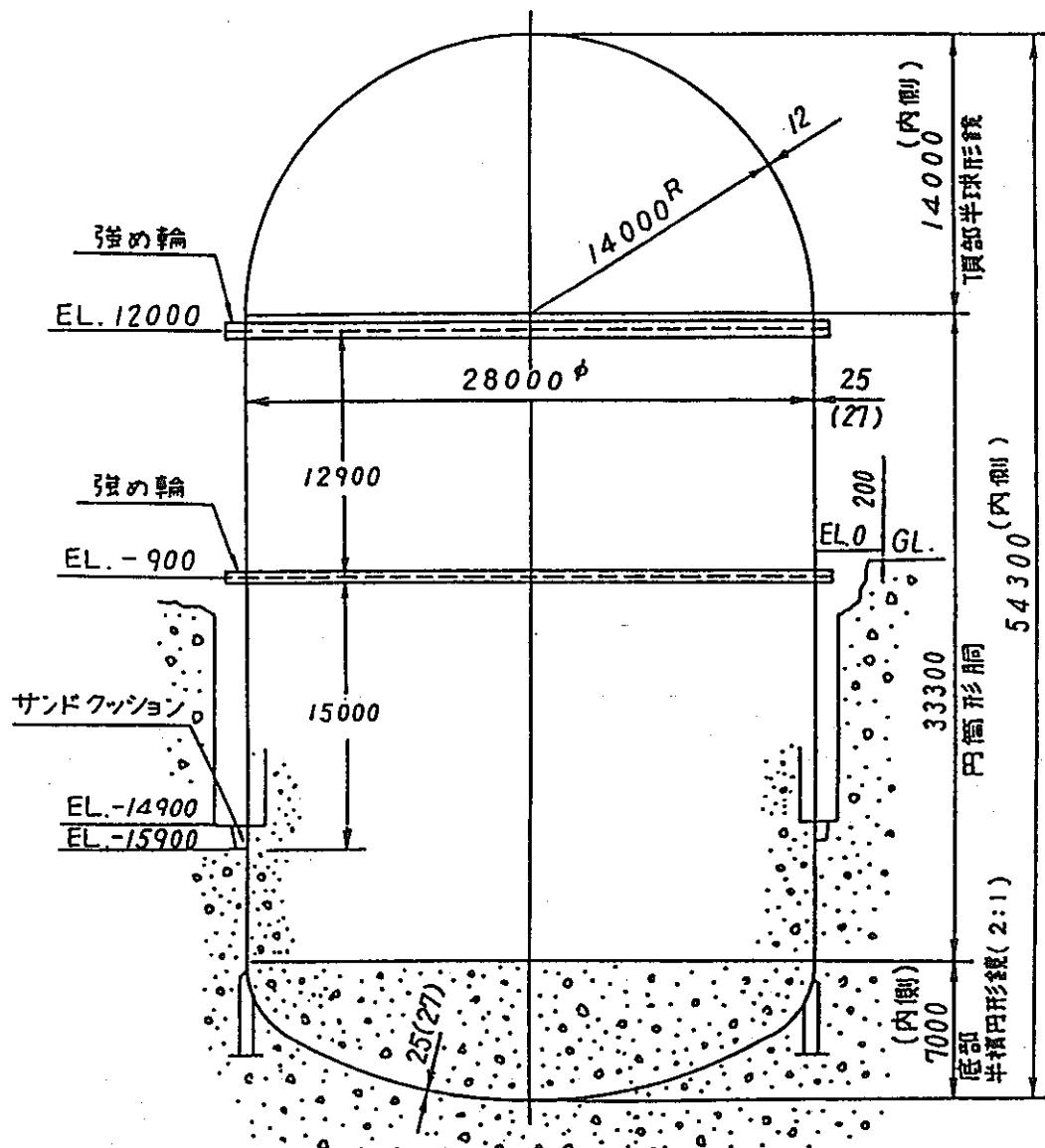


図10-1 原子炉格納容器の全体図

表10-1 地震時に原子炉格納容器に発生するせん断力
(単位: t)

要素No	静的地震力	S ₁	S ₂
12	50.4	20	40
11	143.4	50	100
10	259.4	90	170
9	400.5	130	250
8	486.7	160	290
7	589.2	180	330

表10-2 地震時に原子炉格納容器に作用する曲げモーメント
(単位: t・m)

質点No	静的地震力	S ₁	S ₂
12	0	0	0
11	445	200	300
10	1,585	600	1,100
9	3,546	1,200	2,400
8	5,088	1,700	3,400
7	8,544	2,800	5,500
20	12,109	3,900	7,400

表10-3 原子炉格納容器に発生する応力

(単位: kg/mm²)

	周方向応力	軸方向応力	せん断応力
内圧による応力	$\sigma \Phi 1 = 7.57$	$\sigma \times 1 = 3.78$	—
外圧による応力	$\sigma \Phi 1' = 0.28$	$\sigma \times 1' = 0.14$	—
自重による応力	—	$\sigma \times 2 = 0.38$	—
水平方向地震力による応力	—	$\sigma \times 3 = 0.79$	$\tau = 0.54$
鉛直方向地震力による応力	—	$\sigma \times 4 = 0.14$	—

表10-4 原子炉格納容器の総合評価結果

項目	計算結果	許容値
1次一般膜応力	組合せ引張側 7.66kg/mm ²	*1 19.9kg/mm ²
	組合せ圧縮側 1.66kg/mm ²	
座屈評価	0.268	1.0

*1 : 1次一般膜応力に対する許容応力は、設計降伏応力 S_y 又は設計引張強さ $S_u \times 0.6$ のいずれか小さい方を超えないものとされている。使用材料SB42の最高使用温度 150°Cにおける S_y 及び S_u は、以下の通りである。

設計降伏応力 $S_y = 19.9\text{kg/mm}^2$ 、設計引張強さ $S_u = 39.9\text{kg/mm}^2$

11. 排気筒の評価結果

「常陽」の排気筒は、当初設置許可において、「鋼製煙突構造計算規準・同解説（日本建築学会）」（1965年制定）に基づき行われている。一般公衆の線量当量評価においては、排気筒の健全性が前提となるため、設計用基準地震動 S_1 、 S_2 を用いて評価を行っている。なお、評価では、昭和55年に「鋼製煙突構造計算規準・同解説（日本建築学会）」と「鉄塔構造計算規準・同解説」の2規準が改訂され、まとめて「塔状鋼構造設計指針・同解説（日本建築学会）」（1980制定）⁽⁶⁾となっており、同指針を用いている。評価条件及び評価結果は、以下のとおりである。

11.1 排気筒の仕様

排気筒は、原子炉附属建物の屋上に設置され、地上面からの高さ79.25m、排気筒自体の高さ65.55m、底部外径5.55m、頂部外径2.55m、底部から1.95mまでの厚さ28mm、それより上部の厚さ25mmの円錐状の鋼製煙突である。

(1) 材質

- | | |
|-----------|---|
| ① 排気筒本体 | JIS G3114 SMA41A (溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材) |
| ② リブ | JIS G3101 SS41 (一般構造用圧延鋼材) |
| ③ アンカーボルト | M80 × 96本
JIS G3101 SS41 (一般構造用圧延鋼材) |

(2) 重量

- | | |
|---------------|------------|
| ① 排気筒本体 | 約162,700kg |
| ② はしご、防護柵、踊り場 | 約5,100kg |
| ③ 外壁塗料 | 約760kg |
| (3) 耐震クラス | Aクラス |

11.2 排気筒の評価条件

(1) 地震

① 動的地震力

(a) 水平地震力

動的地震力は、排気筒設置位置である原子炉附属建物屋上の設計用床応答スペクトル（減衰定数1%）を用いて応答解析を行った結果を用いている。

(b) 鉛直地震力

鉛直地震力は、設計用基準地震動 S_1 及び S_2 の最大加速度の1/2の値を震度 ($S_1 = 0.092G$ 、 $S_2 = 0.179G$) として用いている。

② 静的地震力

(a) 水平地震力

表 6-6 に示した原子炉附属建物屋上の値を用いている。

(b) 鉛直地震力

鉛直地震力には、鉛直震度0.36Gを用いている。

(2) 自重

自重は、11.1(2)項の重量を保守的に1.2倍した重量を用いている。なお、地震における質量密度の算定においても、1.2倍した重量を用いている。

(3) 風力

風力は、「塔状鋼構造設計指針・同解説（日本建築学会）」（1980制定）に基づき、煙突の高さ方向単位長さあたりの風力を下式を用いて算定している。

$$P_d = C_d \cdot q_c \cdot D \text{ (kg/m)}$$

$$P_d : \text{風向直角方向風力 (kg/m)} \quad = 10,545 \text{ kg/m}$$

$$C_d : \text{共振時風力係数} \quad = 12.5$$

$$H/D_m \text{ が } 7 \text{ 以下の場合 } C_d = 1$$

$$H/D_m \text{ が } 7 \text{ 以上の場合 } C_d = H/D_m - 6$$

$$H : \text{排気筒自体の高さ (m)} \quad = 65.55 \text{ m}$$

$$D_m : \text{排気筒の高さの } 2/3 \text{ の点における外径 (m)} \quad = 3.55 \text{ m}$$

$$q_c : \text{共振時速度圧 (kg/m}^2) \quad = 152.0 \text{ kg/m}^2$$

$$q_c = \frac{1}{16} V_c^2$$

$$V_c : \text{共振風速 (m/sec)} \quad = 49.3 \text{ m/sec}$$

$$V_c = \frac{N \cdot D_m}{S}$$

$$N : \text{煙突の固有振動数 (Hz)} \quad = 2.50 \text{ Hz}$$

$$S : \text{ストローハル数} \quad = 0.18$$

$$D : \text{煙突の外径 (m)} \quad = \text{Max} 5.55 \text{ m}$$

(4) 解析モデル

解析排気筒の動的及び静的解析は、汎用非線形解析コード“F I N A S”を用いて行っている。

解析モデルは、排気筒を3節点配管要素PIPE3を用いて、排気筒の縦方向鋼板枚数に応じて分割している。動的解析は、排気筒自体を分布質量、はしご、保護柵、及び踊り場を集中質量として取り扱っている。また、静的解析では、排気筒を分布重量、はしご、保護柵及び踊り場を集中重量として取り扱っている。なお、風力の解析では、算出した風力を排気筒の直角方向からの荷重として与えている。

表11-1に排気筒の解析モデル諸定数を示す。

11.3 排気筒の評価結果

(1) 評価点

評価点は、いずれの荷重においても応力が最大となる排気筒底部から1.95mにおける厚さが28mmから25mmに変わる接合部及びアンカーボルトの評価に用いる底部としている。

(2) 評価結果

① 解析結果

各荷重により発生する応力は、以下のとおりである。

	排気筒底部から1.95m	底部
(a) S ₁ 地震による応力	6.26kg/mm ²	5.70kg/mm ²
(b) S ₂ 地震による応力	7.23kg/mm ²	6.57kg/mm ²
(c) 静的水平震度による応力	3.69kg/mm ²	3.45kg/mm ²
(d) 静的鉛直震度による応力	0.16kg/mm ²	0.15kg/mm ²
(e) 自重による応力	0.44kg/mm ²	0.41kg/mm ²
(f) 風力による応力	8.94kg/mm ²	8.30kg/mm ²

② 評価結果

表11-2に評価結果を示す。

発生応力は、「鋼構造設計規準（日本建築学会）」（1970制定）⁽⁷⁾より溶接構造用の場合、鋼材の設計降伏応力S_y/1.5である許容応力度を満足することとされている。使用材料であるSMA41Aの-30～40°CにおけるS_yは24kg/mm²であり、許容応力度は16kg/mm²となる。また、ボルトの許容応力度は、使用材料であるSS41で12kg/mm²とされている。よって、いずれの荷重の組合せにおいても排気筒及び排気筒を支えるアンカーボルト

は、許容値を十分下回っている。なお、「塔状鋼構造設計指針・同解説（日本建築学会）」（1980制定）においては、地震荷重と風荷重を同時に組合せる必要はないとしている。これまでの最大瞬間風速は、設置変更許可申請書から44.2m/secであり、「塔状鋼構造設計指針・同解説（日本建築学会）」（1980制定）より定めた風速49.3m/secを十分下回っている。

表11-1 排気筒の解析モデル諸定数

質点番号	要素番号	排気筒底部からの高さ mm	静的解析 ^{*1}		動的解析		縦弾性係数 kg/mm ²	ポアソン比
			排気筒分布重量 $\times 10^{-6}$ kg/mm ³	はしご等集中重量 kg	排気筒分布質量 $\times 10^{-10}$ kgsec ² /mm ⁴	はしご等集中質量 $\times 10^{-1}$ kgsec ² /mm		
57	28	65,550	9.42	—	9.6122	—	19,600	0.3
55		64,350		1,401.6		1.43021		
47		54,750		700.8		0.71510		
38		43,950		766.8		0.78245		
28		31,950		1,894.8		1.93346		
16		17,550		1,300.8		1.32734		
3		1,950		—		—		
1		0.0		—		—		

* 1 : 静的地震力の解析では、重量データに水平の場合0.82、鉛直の場合0.36を乗じて使用している

表11-2 排気筒の評価結果

(単位 : kg/mm²)

項目	評価結果		許容値
	排気筒底部から 1.95m (鋼材)	底部 (アンカーボルト)	
S ₁ + 鉛直震度 + 自重	6.86	6.26	鋼材 16.0 (SMA41A)
S ₂ + 鉛直震度 + 自重	7.83	7.13	
静的水平震度 + 鉛直震度 + 自重	4.29	4.01	
風力 + 自重	9.38	8.71	7ンカーボルト 12.0 (SS41)

12. 原子炉容器の評価結果

12.1 評価部位

原子炉容器の評価部位は、以下のとおりである。なお、図12-1に原子炉容器の評価部位を示す。

- (1) 1次ナトリウム入口ノズル
- (2) 1次ナトリウム出口ノズル
- (3) コアサポート
- (4) 耐震振れ止め

12.2 地震荷重

原子炉容器は、原子炉建物のBM2F(GL-16,000)及びBM1F(GL-3,400)で支持されている。一般的に、機器・構造物が各点で支持されている場合は、建物からの入力を厳密に評価することを目的として、建物との連成系モデルによる解析が行われる。したがって、原子炉容器についても建物との連成系モデルによる解析を行っている。

(1) 原子炉容器の解析モデル

原子炉容器の解析モデルは、原子炉建物及び原子炉附属建物との連成系とし、曲げ・せん断モデルによって剛性を評価し、重量を集中質量とした、いわゆる多質点はりモデルとしている。なお、解析コードには、地震応答解析プログラム(RESP-A)を用いている。

図12-2に建物-原子炉容器連成系の解析モデルを示す。

原子炉容器は、原子炉建物の質点No.④(BM2F(GL-16,000))及び②BM1F(GL-3,400)に支持されており、炉心構成要素及び炉心バレルは、原子炉容器の炉心支持板である質点No.⑨で支持されている。

表5-1に原子炉建物及び原子炉附属建物モデルの諸定数を示す。また、表12-1に原子炉容器及び炉内構造物モデルの諸定数を示す。なお、原子炉容器等の減衰定数は、1%としている。

12.3 地震以外の荷重⁽⁸⁾

原子炉容器は、これまでMK-I、IIにおいて負荷された荷重、これからMK-IIで負荷されるであろう想定荷重及びMK-IIIにおける想定荷重のすべてを考慮した評価を行う必要がある。

原子炉容器の地震以外の荷重としては、圧力、自重、熱過渡荷重を考慮している。

(1) 運転時間

運転時間は、MK-I～MK-IIIの実績・想定運転時間の合計が「常陽」設計寿命の13,500Hrを超えないものとしている。

① MK-I、IIの実績・想定運転時間	57,759Hr
---------------------	----------

MK-I、IIの実績・想定運転時間は、すべて100Mwtにおける温度条件で運転されていたものとしている。

② MK-IIIの想定運転時間	73,741Hr
-----------------	----------

MK-IIIの想定運転時間は、すべて140Mwtにおける温度条件で運転されていたものとしている。

(2) 圧力荷重条件

圧力荷重条件は、MK-IIIにおいても最高使用圧力をMK-I、IIまでの設計範囲内とすることから、MK-I、IIと同一としている。

① 1次ナトリウム入口ノズル	: 7.2 kg/cm ²
② 1次ナトリウム出口ノズル	: 1.0 kg/cm ²
③ コアサポート（上部プレナム）	: 1.0 kg/cm ²
（下部プレナム）	: 7.2 kg/cm ²
④ 耐震振れ止め	: 7.2 kg/cm ²

(3) 熱過渡荷重条件

表12-2～表12-4に熱過渡事象及び想定回数を示す。

12.4 解析結果

(1) 原子炉容器の固有振動数

表12-5に建物-原子炉容器連成系による固有値解析結果を示す。

(2) 地震時発生モーメント

表12-6に地震時に原子炉容器に発生するモーメントを示す。

12.5 評価結果

評価は、一次+二次応力が最も厳しくなる箇所について行っている。

表12-7に原子炉容器の評価結果を示す。

この結果、原子炉容器の各部位において、高速原型炉高温構造設計指針（以下BDSという）の各制限条件を満足していることを確認している。

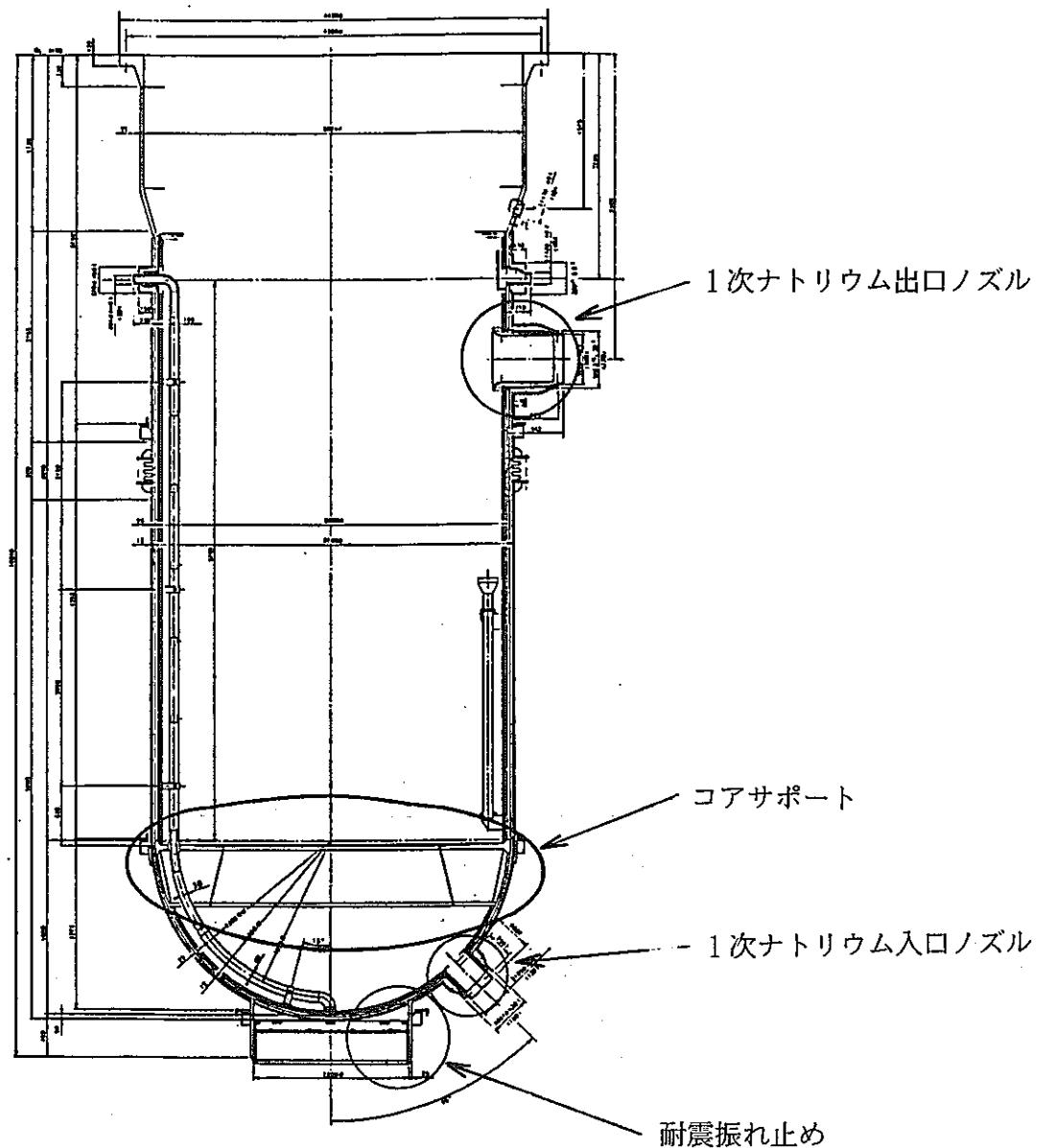
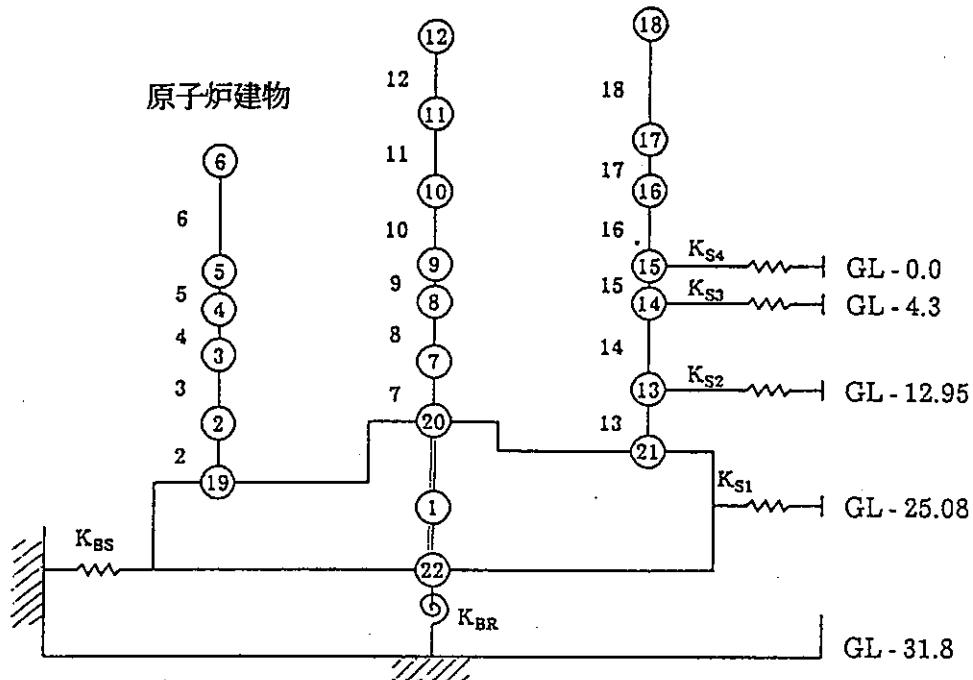


図12-1 原子炉容器の評価部位

原子炉附属建物
原子炉格納容器



原子炉建物

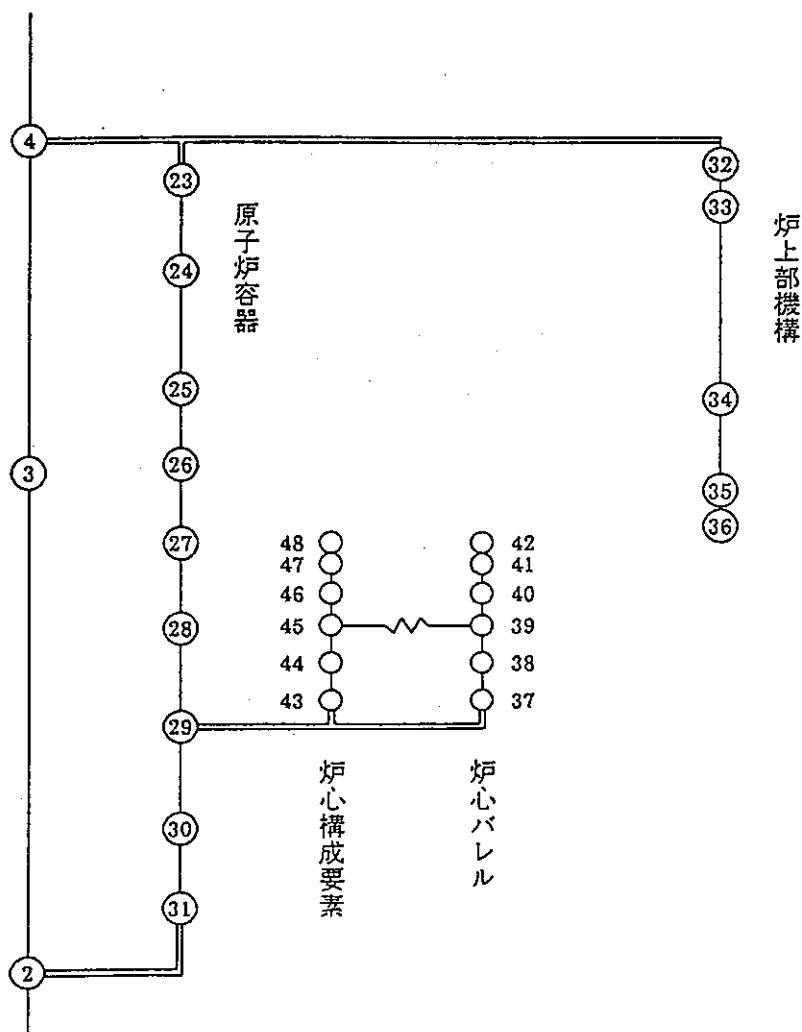


図12-2 建物-原子炉容器連成系の解析モデル

表12-1 原子炉容器及び炉内構造物モデルの諸定数

	質点番号	基礎底面からの高さZ m	要素番号	重量W $\times 10^3$ kg	質点密度 ρ $\times 10^{-9}$ kgsec ² /mm ⁴	質点間距離L mm	縦弾性係数E $\times 10^4$ kg/mm ²	断面2次モーメントI $\times 10^8$ mm ⁴	有効断面積A $\times 10^4$ mm ²
原子炉容器	(23)	27.700							
	(24)	26.340	7	7.39	3.577	1,360	1.68	6,050.00	15.50
	(25)	24.600	8	16.71	6.125	1,740	1.68	5,510.00	16.00
	(26)	23.450	9	19.82	12.300	1,150	1.68	4,680.00	14.30
	(27)	22.310	10	19.19	12.010	1,140	1.68	4,680.00	14.30
	(28)	21.040	11	19.69	11.060	1,270	1.68	4,680.00	14.30
	(29)	19.560	12	31.13	15.010	1,490	1.68	4,680.00	14.30
	(30)	17.970	13	28.44	12.760	1,590	1.68	4,100.00	14.30
	(31)	16.850	14	7.76	21.040	1,120	1.68	460.00	3.36
炉上部機構	32	28.040							
	33	27.300	16	6.90	34.830	735	1.68	80.00	2.75
	34	24.400	17	5.00	8.183	2,900	1.68	51.30	2.15
	35	23.100	18	3.10	11.320	1,300	1.68	51.30	2.15
	36	22.600	19	1.20	11.390	500	1.68	51.30	2.15
炉心バレル	37	19.876							
	38	20.458	21	10.28	20.720	582	1.68	1,070.00	8.70
	39	21.040	22	7.66	15.440	582	1.68	1,070.00	8.70
	40	21.440	23	6.63	19.440	400	1.68	1,070.00	8.70
	41	21.910	24	6.11	15.250	470	1.68	1,070.00	8.70
	42	22.310	25	6.18	18.120	400	1.68	1,070.00	8.70
炉心構成要素	43	19.876							
	44	20.458	27	4.67	12.270	582	1.68	1.08	6.68
	45	21.040	28	4.47	11.720	582	1.68	1.08	6.68
	46	21.440	29	3.91	14.950	400	1.68	1.08	6.68
	47	21.910	30	3.61	11.730	470	1.68	1.08	6.68
	48	22.310	31	2.34	8.925	400	1.68	1.08	6.68

注) : ポアソン比は、0.3を使用

表12-2 MK-I、IIにおける熱過渡事象の実績及び想定回数

事象No.		熱過渡事象	MK-II 実績及び想定回数	備考
状態I	I-1	通常起動（停止後再起動含む）	129	
	I-2	通常停止	68	
運転状態II	II-1	外部電源喪失	26 (15)	
	II-2	スクラム（1次主ポンプトリップを伴わない）	23 (15)	
	II-3	1次主ポンプトリップ	11 (2)	
	II-4	2次主ポンプトリップ	4 (1)	
	II-5	主送風機トリップ	5 (2)	
MK-I、IIにおける熱過渡事象の実績及び想定回数合計			69 (35)	

注) : カッコ内は性能試験により発生した回数を示す。

表12-3 MK-IIIにおける熱過渡事象及び想定回数（運転状態Ⅰ）

事象No.		熱過渡解析事象	MK-III時想定回数	備考
運 転 状 態 Ⅰ	I-1	通常起動	182	364 *1
	I-2	停止後再起動	182	
	I-3	通常停止	182	

*1：停止後再起動の想定回数の内訳は、運転状態Ⅱが生じた後の起動156回、運転状態Ⅲが生じた後の起動25回、運転状態Ⅳが生じた後の起動1回の合計182回である。

表12-4 MK-IIIにおける熱過渡事象及び想定回数（運転状態II、III、IV）

事象No.	熱過渡事象		～MK-II 実績想定 回数	MK-III時想定回数
	熱過渡事象	代表事象		
運転状態II	II-1	外部電源喪失	26	外部電源喪失 84 手動スクラム 72
	II-2	中性子束高	0	
	II-3	手動スクラム	23	
	II-4	1次主循環ポンプトリップ	3	
	II-5	2次主循環ポンプトリップ	4	
	II-6	1次冷却材流量減少	8	
	II-7	2次冷却材流量減少	0	
	II-8	1次冷却材流量増大	0	
	II-9	2次冷却材流量増大	0	
	II-10	主冷却器空気流量減少	5	
	II-11	主冷却器空気流量増大	0	
小計			69	156
運転状態III	III-1	1次主循環ポンプ軸固着事故	0	10
	III-2	1ループ1・2次系同時ポンプトリップ	0	3
	III-3	2次主循環ポンプ軸固着事故	0	10
	III-4	主冷却器送風機軸固着事故	0	2
	小計		0	25
運転状態IV	IV-1	1次冷却材Na漏洩（内管のみ）事故（1ループ） (1次冷却材漏洩事故)	0	2次冷却材漏洩事故 1 (最も厳しい熱過渡を与える事象につき 1回考慮する)
	IV-2	2次冷却材Na漏洩事故、1次系健全ループポンプ 軸固着（事故ループ） (2次冷却材漏洩事故)	0	
	IV-3	(燃料スランピング事故)	0	
合計			72	182

表12-5 建物-原子炉容器連成系による固有値解析結果

モード	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	備考
1次	0.370	2.71	各建物連成系(1次)
2次	0.229	4.38	炉心構成要素(1次)
3次	0.202	4.96	各建物連成系(2次)
4次	0.132	7.61	各建物連成系(3次) 原子炉建物
5次	0.091	10.94	各建物連成系(4次) 原子炉格納容器
6次	0.083	12.05	炉上部機構(1次)
7次	0.073	13.66	各建物連成系(5次)
8次	0.066	15.15	各建物連成系(6次)
9次	0.060	16.70	各建物連成系(7次)
10次	0.053	18.99	原子炉容器(1次)

表12-6 地震時に原子炉容器に発生するモーメント

質点 No	要素 No	S ₁ 地震		S ₂ 地震	
		せん断力 (kg)	曲げモーメント (kg・mm)	せん断力 (kg)	曲げモーメント (kg・mm)
(23)	23	7,390	51.68×10 ⁶	13,850	87.85×10 ⁶
			52.26×10 ⁶		75.12×10 ⁶
(24)	24	6,820	54.03×10 ⁶	13,460	73.45×10 ⁶
			50.52×10 ⁶		68.59×10 ⁶
(25)	25	6,470	44.98×10 ⁶	14,340	59.44×10 ⁶
			34.91×10 ⁶		53.11×10 ⁶
(26)	26	6,900	26.13×10 ⁶	16,800	50.32×10 ⁶
			22.55×10 ⁶		30.54×10 ⁶
(27)	27	9,010	48.45×10 ⁶	29,450	65.52×10 ⁶
(28)	28	10,920		31,330	
(29)	29	21,980			
(30)	30	23,290			
(31)					

表12-7 原子炉容器の評価結果

評価部位	一次 応 力 の 制 限	ひずみの制限									クリープ 疲労損傷 の制限	
		一次+二次応力の制限				Sa制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態IVに関する制限			
		Sn * (3SmH) (3Sm)	Sn (2.5(3Sm)) (3Sm)	Sn (2.5(3Sm)) (3Sm)	Sn' (3Sm)	P' + Q' (Sa)	$\varepsilon_{EC} + \varepsilon_{mEF}$ (0.01)	$\varepsilon_{EC} + \varepsilon_{mEF} + \varepsilon_{bEF}$ (0.02)	Sn * (2.5(3SmH)) (E, S ₁ , S ₂ , P)	領域	Df	Df+Dc
1次ナトリウム 入口ノズル	内面	合格	16.5 (33.4)	12.8 (32.5)	—	—	—	—	—	23.3 (84.7)	S ₂	0.0000 0.1000 (1.00)
	外面	合格	24.6 (33.4)	15.9 (32.6)	—	—	—	—	—	25.4 (84.7)	S ₂	0.0001 0.1000 (1.00)
1次ナトリウム 出口ノズル	内面	合格	22.1 (30.0)	23.4 (23.6)	—	—	—	0.0006 (0.01)	0.0015 (0.02)	22.1 (75.0)	S ₁	0.0001 0.3000 (0.60)
	外面	合格	20.3 (30.0)	8.9 (23.7)	—	—	—	0.0000 (0.01)	0.0010 (0.02)	16.0 (75.0)	S ₁	0.0001 0.3000 (0.60)
コアサポート	内面	合格	7.9 (33.9)	—	45.6 (82.0)	23.9 (32.8)	—	—	—	12.1 (84.7)	E	0.0049 0.1000 (1.00)
	外面	合格	10.8 (33.9)	—	39.6 (82.0)	23.9 (32.8)	—	—	—	16.5 (84.7)	S ₁	0.0003 0.1000 (1.00)
耐震振れ止め	内面	合格	19.8 (33.9)	16.3 (32.9)	—	—	—	—	—	19.8 (84.7)	S ₂	0.0000 0.1000 (1.00)
	外面	合格	1.8 (34.0)	16.1 (32.9)	—	—	—	—	—	1.8 (84.7)	E	0.0000 0.1000 (1.00)

Sn * : 地震による1次+2次応力強さ範囲

Sn : 長期および短期荷重による1次+2次応力強さ範囲

Sn' : 熱曲げを除いた長期および短期荷重による1次+2次応力強さ範囲

P' : 1次応力の組合せに対する等価な膜応力

Q' : 長期および短期荷重による2次応力強さ範囲

 ε_{EC} : 促進クリープひずみ ε_{mEF} : 長期2次膜応力による弾性追従ひずみ ε_{bEF} : 長期2次曲げ応力による弾性追従ひずみ

3SmH : 地震時持続時間における応力緩和を無視した弾性シェイクダウン条件

3Sm : 応力緩和を考慮した弾性シェイクダウン条件

2.5(3Sm) : 進行性ひずみの防止条件

Sa : クリープラチャットによる累積非弾性ひずみが無視できる条件

Df : 疲労損傷係数

Dc : クリープ損傷係数

D : クリープ疲労損傷の制限値

13. 1次及び2次冷却系主配管の評価結果

13.1 荷重条件

1次及び2次冷却系主配管は、これまでMK-I、IIにおいて負荷された荷重、これからMK-IIで負荷されるであろう想定荷重及びMK-IIIにおける想定荷重のすべてを考慮した評価を行う必要がある。

下記に1次及び2次冷却系主配管の荷重条件を示す。

(1) 運転時間

11. 章の原子炉容器の評価結果に示した運転時間と同様である。

(2) 圧力荷重条件

MK-IIIにおける圧力荷重条件では、最高使用圧力をMK-I、IIまでの設計範囲内としていることから、MK-I、IIと同一としている。よって、圧力荷重条件は、以下の通りである。

① 1次冷却系主配管

- (a) 原子炉容器～主中間熱交換器（ホットレグ） : 1.0 kg/cm²
- (b) 主中間熱交換器～1次主循環ポンプ（コールドレグ） : 1.0 kg/cm²
- (c) 1次主循環ポンプ～原子炉容器（コールドレグ） : 7.2 kg/cm²

② 2次冷却系主配管

- (a) 主中間熱交換器～原子炉格納容器壁（ホットレグ） : 4.5 kg/cm²
- (b) 原子炉格納容器壁～主中間熱交換器（コールドレグ） : 4.5 kg/cm²
- (c) 原子炉格納容器壁～主冷却器（ホットレグ） : 4.5 kg/cm²
- (d) 主冷却器～2次主循環ポンプ（コールドレグ） : 2.0 kg/cm²
- (e) 2次主循環ポンプ～原子炉格納容器壁（コールドレグ） : 5.0 kg/cm²

(3) 過渡荷重条件

表12-2～表12-4に熱過渡事象及び想定回数を示す。

(4) 地震荷重条件

地震荷重としては、動的地震力と静的地震力のうち、大きい方を用いている。また、動的水平地震力の算定にあたっては、配管系が原子炉建物のGL-3.4 mからGL-16.0 mの間に配置されていることから、この間の各フロアにおける設計用床応答スペクトルを包絡したもの、又は、各フロアの時刻歴応答波形を用いている。なお、配管系の減衰定数

は、2.5%を用いている。

① 動的地震力

動的水平地震力には、設計用基準地震動 S_1 、 S_2 を用い、動的鉛直地震力には、設計用基準地震動 S_1 、 S_2 の最大加速度の $1/2$ の値である $0.092G$ 、 $0.179G$ を用いて算出している。なお、水平地震力と鉛直地震力とは、同時に不利な方向に作用するものとしている。

② 静的地震力

静的水平地震力は、水平震度に $3.6 C_1$ より定まる $0.741G$ を用い、鉛直震度に $1.2 C_V$ より定まる $0.36G$ を用いて算出している。なお、水平地震力と鉛直地震力とは、同時に不利な方向に作用するものとしている。

13.2 評価結果

評価は、一次 + 2 次応力が最も厳しくなる部位について評価を行っている。

表13-1 及び表13-2 に 1 次及び 2 次冷却系主配管の評価結果を示す。

この結果、改造範囲配管以外の既設配管においても高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針 (BDS) における各制限条件を満足していることを確認している。

表13-1 1次冷却系主配管の評価結果

評価点	一次 応 力 の 制 限	ひずみの制限										クリープ 疲労損傷 の制限	
		一次+二次応力の制限					Sa制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態IVに関する制限			
		Sn *	Sn	Sn	Sn'	Se	P' + Q'	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF}$	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF}$	Sn *	領域	Df	Df+Dc
原子炉容器 ～主IHX (ホットレグ)	合 格	4.0 (30.0)	22.3 (27.8)	—	—	—	—	0.0001 (0.01)	0.0015 (0.02)	4.0 (74.8)	E	0.00 0.30	0.31 (0.60)
主IHX(A) ～1次主ポンプ(A) (コールドレグ)	合 格	25.0 (33.9)	— —	40.4 (83.5)	16.8 (33.4)	23.4 (33.4)	—	— —	— —	25.2 (84.7)	S ₂	0.00 0.10	0.11 (0.86)
主IHX(B) ～1次主ポンプ(B) (コールドレグ)	合 格	24.6 (33.9)	— —	37.8 (83.5)	13.9 (33.4)	22.7 (33.4)	—	— —	— —	25.1 (84.7)	S ₂	0.00 0.10	0.11 (0.86)
一次主ポンプ ～原子炉容器 (コールドレグ)	合 格	6.8 (33.9)	23.1 (33.4)	—	—	—	—	— —	— —	7.1 (84.7)	E	0.00 0.10	0.11 (0.86)

Sn * : 地震による1次+2次応力強さ範囲

Sn : 長期および短期荷重による1次+2次応力強さ範囲

Sn' : 熱曲げを除いた長期および短期荷重による1次+2次応力強さ範囲

P' : 1次応力の組合せに対する等価な膜応力

Q' : 長期および短期荷重による2次応力強さ範囲

 ϵ_{EC} : 促進クリープひずみ ϵ_{mEF} : 長期2次膜応力による弾性追従ひずみ ϵ_{bEF} : 長期2次曲げ応力による弾性追従ひずみ

3SmH : 地震時持続時間における応力緩和を無視した弾性シェイクダウン条件

3Sm : 応力緩和を考慮した弾性シェイクダウン条件

2.5(3Sm) : 進行性ひずみの防止条件

Sa : クリープラチャットによる累積非弾性ひずみが無視できる条件

Df : 疲労損傷係数

Dc : クリープ損傷係数

D : クリープ疲労損傷の制限値

表13-2 2次冷却系主配管の評価結果

評価点	一次 応力 の 制 限	ひずみの制限										クリープ 疲労損傷 の制限	
		一次+二次応力の制限					Sa制限	累積非弾性ひずみの制限		運転状態IVに関する制限			
		Sn * (3SmH)	Sn (3Sm)	Sn (2.5(3Sm))	Sn' (3Sm)	Se (3Sm)	P' + Q' (Sa)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF}$ (0.01)	$\epsilon_{EC} + \epsilon_{mEF} + \epsilon_{bEF}$ (0.02)	Sn * (2.5(3SmH))	領域 (E, S ₁ , S ₂ , P)	Df	Df+Dc
主IHX(A) ～格納容器壁 (ホットレグ)	合 格	2.1 (35.5)	23.5 (24.2)	—	—	—	—	0.0031 (0.01)	0.0078 (0.02)	2.2 (88.7)	E	0.00 0.55 0.55 (0.74)	0.55 (0.74)
主IHX(B) ～格納容器壁 (ホットレグ)	合 格	2.4 (35.5)	23.7 (24.2)	—	—	—	—	0.0034 (0.01)	0.0081 (0.02)	2.4 (88.7)	E	0.00 0.55 0.55 (0.74)	0.55 (0.74)
格納容器壁 ～主IHX(A) (コールドレグ)	合 格	4.4 (37.2)	17.7 (37.2)	—	—	—	—	—	—	6.5 (93.0)	E	0.00 0.10 0.10 (0.86)	0.11 (0.86)
格納容器壁 ～主IHX(B) (コールドレグ)	合 格	3.8 (37.2)	17.3 (37.2)	—	—	—	—	—	—	6.0 (93.0)	E	0.00 0.10 0.10 (0.86)	0.11 (0.86)
格納容器壁 ～主冷却器 (ホットレグ)	合 格	32.9 (35.5)	20.7 (24.2)	—	—	—	6.5 (10.5)	—	—	60.0 (88.7)	P	0.01 0.30 (0.60)	0.31
主冷却器 ～2次主ポンプ (コールドレグ)	合 格	12.6 (37.2)	28.8 (37.2)	—	—	—	—	—	—	23.8 (93.0)	S ₁	0.00 0.10 0.10 (0.86)	0.11 (0.86)
2次主ポンプ ～格納容器壁 (コールドレグ)	合 格	14.8 (37.2)	25.6 (37.2)	—	—	—	—	—	—	28.7 (93.0)	S ₁	0.00 0.10 0.10 (0.86)	0.11 (0.86)

14. 動的機器の評価結果

14.1 制御棒駆動機構及び制御棒

地震発生における制御棒の挿入性の検討に当たっては、地震時変位を考慮しても制御棒が重力落下で規定時間0.8sec以内に挿入できることを確認する必要がある。このためには、地震時における制御棒上部案内管と下部案内管との相対変位量を把握し、この変位量が挿入機能確認済相対変位量以内であることを確認する。

(1) 解析モデル及び解析条件

① 制御棒上部案内管

解析モデルは、上部案内管を含む炉上部機構を多質点ビームモデルに置換して行った。解析は、上部案内管が据付けられている原子炉建物質点No.④における床応答スペクトル（減衰定数1%） S_1 、 S_2 及び静的震度を用いて行った。

② 制御棒下部案内管

解析モデルは、下部案内管を多質点ビームモデルに置換して行った。解析は、下部案内管が原子炉容器内に収められた炉心構成要素の一部であることから、原子炉容器が据付けられている原子炉建物質点No.④における床応答スペクトル（減衰定数1%） S_1 、 S_2 及び静的震度を用いて行った。

(2) 解析結果及び評価結果

地震時における制御棒上部案内管と下部案内管との相対変位量は、以下の式より算出している。

$$\text{相対変位量 } \delta = a + b + c = 1.05 + 3.10 + 26.2 = 30.35\text{mm}$$

a : 制御棒上部案内管の地震時変位量 (mm)

b : 据付け誤差 (mm)

c : 制御棒下部案内管の地震時変位量 (mm)

$$\text{挿入機能確認済相対変位量} = 35\text{mm}$$

上記のとおり、地震時における相対変位量は、挿入機能確認済相対変位量を下回っていることを確認している。

14.1 他の動的機器

表14-1に制御棒駆動機構及び制御棒を除く他の動的機器の評価結果を示す。

この結果、いずれの動的機器についても機能確認済加速度を下回っており、問題ないこ

とを確認している。

表14-1 動的機器の評価結果

評 価 対 象 設 備		型 式	要 目	動的加速度又は 静的震度 (G)	機能確認済 加速度 (G)
1	1次主循環ポンプ	豎軸自由液面遠心式	21m ³ /min × 70mNa	0.741	1.347 * ¹
2	非常用換気設備排風機 (アニュラス排気ファン)	ターボブロア	1,700m ³ /h	0.277	2.600 * ²
3	ディーゼル発電装置	単動 4 サイクルV形12気筒	3,000PS 2,500KVA	0.234	1.100 * ²

*1：「もんじゅ」1次主循環ポンプの機能確認済加速度を示す。なお、高速実験炉「常陽」の1次主循環ポンプは、「もんじゅ」と同型式であるとともに、全長が「もんじゅ」より短く、かつ、小型であることから、固有振動数が高い。よって、「もんじゅ」の機能確認済加速度を評価に用いた。

*2：技術指針1991年版による。

15. 耐震性評価の妥当性及び保守性について

15.1 概要

「常陽」では、設計用基準地震動 S_1 、 S_2 に対する地盤内伝播解析、建物及び機器・配管系の動的応答解析において、その解析条件を技術指針1987年版⁽¹⁾及び技術指針1991年版⁽²⁾に基づき設定している。また、その解析条件には、種々の保守性を考慮している。これら解析の妥当性及び保守性について15.2項～15.4項に記述した。

図15-1に設計用基準地震動及び地盤・建物解析条件の設定フローを示す。

15.2 地盤内伝播解析

15.2.1 解放基盤表面の定義

「常陽」は、いわゆる第四紀層の洪積層である良く締まった砂層に設置されている。これに対して、設計用基準地震動 S_1 、 S_2 は、解放基盤表面に設定することになっている。

解放基盤表面とは、基盤（概ね第三紀層及びそれ以前の堅牢な岩盤であって、著しい風化を受けていないもの）面上の表層や構造物がないものと仮定した上で、基盤面に著しい高低差がなく、ほぼ水平であって相当な拡がりのある基盤の表面をいう。

解放基盤表面の定義から、設計用基準地震動の設定は、基盤面より上部に地盤がある場合には、上部の地盤をはぎ取って、露出させた仮の基盤面を解放基盤表面としなければならない。これは、設計用基準地震動の設定に用いられる標準応答スペクトル（大崎スペクトル）が、露出した岩盤表面上あるいはごく岩盤表面に近い個所、すなわちほぼ解放基盤表面上と考えられる個所に設置された強震加速度計によって観測された実地震動記録を基に作成されたものであるからである⁽³⁾。

よって、「常陽」のように基盤面が地盤で覆われている基盤の表面は、解放基盤表面に対して内部基盤面と定義される。図15-2に解放基盤表面と内部基盤面の概念を示す。このような場合には、設計用基準地震動を用いて、建物に入力する地震動を別途設定する必要がある。

その方法として、建物のない自由地盤を想定して、解放基盤表面（内部基盤面）から地表面までの地盤内伝播解析を行い、建物の動的応答解析モデルの各地盤ばね位置における入力地震動を設定する。図15-3に地盤内伝播解析手法とスウェイーロッキング（S-R）モデルにおける入力地震動の設定手法を示す。なお、これらの解析手法は、技術指針1991年版に記載されている。

図15-4にEL CENTRO 地盤の地表面で観測された地震波に基づき1次元波動理論によつて、解放基盤表面及び内部基盤面の地震波を逆増幅解析した例⁽¹⁰⁾を示す。この図からわかるように、解放基盤表面では、上部に地盤のない地震波となるため、上部地盤による反射がなく、内部基盤面の地震波より大きくなる。

したがって、「常陽」のように、設計用基準地震動を入力する基盤面が内部基盤面となる地盤においては、上部地盤による反射によって解放基盤表面に設定した設計用基準地震動が、内部基盤面で小さくなることは当然のことである。

15.2.2 地盤の物性値

地盤内伝播解析及び建物の動的解析に用いる地盤ばねの設定にあたっては、その解析に用いる地盤の物性値を適切に設定する必要がある。したがって、解析に用いる地盤の単位体積重量 γ 、せん断弾性係数G及び減衰定数hの物性値は、土質試験の結果に基づく値を採用する必要がある。

表15-1に「常陽」建物支持地盤の構造を示す。

(1) 単位体積重量 γ

単位体積重量 γ は、室内試験（物理試験）によって求められる。したがって、「常陽」では、地盤の単位体積重量 γ として物理試験結果を用いている。

(2) せん断弾性係数G

せん断弾性係数Gは、室内試験（動的3軸圧縮試験等）、原位置試験（孔内載荷試験等）、弾性波試験等から求められる。これら試験方法のうち、動的解析用の地盤のせん断弾性係数Gとして用いるデータに最も適切な試験方法は、地盤の地震時の波動伝播現象を的確に評価し得る弾性波試験の結果が最もふさわしいことが明らかにされている。また、弾性波試験結果そのものが持つバラツキが地層全体の振動特性の評価に及ぼす影響も小さく、その平均値をもって評価することで実用上十分であるとされている。

したがって、「常陽」では、地盤の弾性係数に弾性波試験結果を用いている。また、「常陽」のような成層を成した成層地盤に対して動的解析を行う場合には、なおさら弾性波試験結果を用いることが有効である。これは、技術指針1987年版において、弾性波試験結果が成層地盤を等価な半無限地盤として取り扱うための田治見の成層補正法による結果と良く一致するとされているからである。なお、「常陽」における成層地盤の補正是、田治見の成層補正法を用いている。

図15-5に「常陽」敷地周辺の地質断面図を示す。これらの地質断面図のA-A'断

面が約800m、B-B'断面が約350mであり、大洗工学センター敷地内にある重水臨界実験装置のボーリングデータを含めるとB-B'断面は約800mとなる。これらの広い範囲のボーリングデータから、「常陽」敷地周辺の地盤は、十分成層性を成した地盤であると判断できる。

(3) 減衰定数 h

砂層の地盤を弾性体として解析する場合の減衰定数 h には、慣用値、室内試験（動的 3 軸圧縮試験等）及び原位置試験（孔内載荷試験等）結果が用いられている。これらのうち、「常陽」の地盤内伝播解析においては、最も保守的な慣用的に用いられている減衰定数 $h = 2\%$ を用いている。以下に、この減衰定数 $h = 2\%$ が保守的であることを地盤調査結果から説明する。

地盤内部における減衰の主な要因としては、材料減衰（地盤内部の粒子間摩擦、粒子間の空隙を満たす粘性流体の運動、粒子再配列に要するエネルギー消費等）、散乱減衰（地盤の不均質、不連続による境界面での反射などによる波動の逸散等）及び幾何減衰（幾何学的な波面の拡散によるもの）が挙げられる。

減衰定数 h を求める試験には、室内試験（動的 3 軸圧縮試験等）、原位置試験（孔内載荷試験等）、弾性波試験、地震観測が挙げられる。室内試験は材料減衰のみ、弾性波試験は材料減衰と散乱減衰、地震観測は材料減衰、散乱減衰及び幾何減衰が評価できるものである。したがって、これらの減衰の大小関係には、以下の関係がある。

室内試験、原位置試験 < 弾性波試験 < 地震観測

砂層の地盤を弾性体として解析する場合に慣用的に用いられている減衰定数 $h = 2\%$ は、上記のうち、材料減衰のみを考慮したものと考えられる。これは、「常陽」における動的 3 軸圧縮試験及び孔内載荷試験の結果からも判断できる。

表15-2 に「常陽」敷地における動的 3 軸圧縮試験及び孔内載荷試験で得られた結果を示す。したがって、実際には、材料減衰のみでも孔内載荷試験における減衰定数 $h = 5 \sim 7\%$ が使用できると考えられるが、保守的に地盤内伝播解析では、減衰定数 $h = 2\%$ を用いている。

15.2.3 地盤内伝播解析

解放基盤表面（内部基盤面）～地表面までの地盤内伝播解析は、表15-1 の「常陽」建物支持地盤の構造を用いて、1次元波動理論に基づく解析コード S H A K E を用いて行っている。

表15-3に地盤内伝播解析結果を示す。また、図15-6に1次元波動理論による地盤内伝播解析の概念を示す。

地盤内伝播解析は、線形粘弾性系を通過するせん断波の縦方向伝播による応答を考えている。線形粘弾性系は、水平方向に半無限大に拡がるN個の水平層からなり、基盤層は、半無限大の層厚を有するものとしている。各層は、均質、等方性であり、層厚H、単位体積重量 γ 、せん断弾性係数G及び減衰定数hが定義されるものとしている。なお、1次元波動理論による地盤内伝播解析の詳細については、参考文献^{(10), (11), (12)}に記述されている。

1次元波動理論による地盤内伝播解析については、参考文献^{(10), (13)}にその妥当性及び保守性が示されている。図15-7にある地盤の実測データとその地盤データに基づく1次元波動理論による解析結果⁽¹⁰⁾を示す。この結果によれば、加速度時刻歴及び増幅スペクトルとも概ね実測データと一致している。また、有限要素法及び1次元波動理論を用いた地盤内伝播解析結果でも1次元波動理論を用いた地盤内伝播解析結果の方が保守的になることも示されている⁽¹³⁾。

なお、技術指針1991年版の中で、建物の線形動的応答解析を用いて、建物の接地率を以下の式で求め、接地率が75%以上の場合には、地盤の非線形性を考慮した建物動的応答解析を行わなくても良いとされている。

$$\text{接地率 } \eta = 3 \left(\frac{1}{2} - \frac{M_{\max}}{W \cdot L} \right)$$

M_{\max} : 最大転倒モーメント (t・m)

W : 建物重量 (t)

L : 振動方向基礎幅 (m)

「常陽」の建物の線形動的応答解析の結果では、原子炉建物及び原子炉附属建物の接地率は、S₁地震及びS₂地震とも100%である。また、主冷却機建物の接地率は、S₁地震時で100%、S₂地震時で85%と、S₂地震時に浮き上がりが生じると考えられるが、線形動的応答解析の範囲内である。よって、建物及び機器の評価においては、建物の線形動的応答解析結果を用いて評価を行っている。

15.2.4 「常陽」における常時微動測定結果による妥当性について

「常陽」の敷地地盤の振動測定は、「常陽」建設前の建設予定地における常時微動測定と、第二使用済燃料貯蔵施設の増設の際に行われた常時微動測定で得られたデータと

がある。

図15-8に「常陽」建設前の建設予定地周辺一帯における常時微動測定位置を示す。

また、図15-9に「常陽」建設前の建設予定地周辺一帯での常時微動測定結果を示す。

図15-9は、常時微動測定結果をゼロークロッシング法による周期一頻度曲線（金井スペクトル）で示したものである。この結果から、敷地周辺のどの場所においても、0.10～0.30sec付近に共通のピークが見られる。また、0.35～0.40sec付近及び1.20sec付近にもピークがあるようである。

図15-10に第二使用済燃料貯蔵施設の増設の際に行われた建物基礎底面（G L - 17m）付近の常時微動測定結果を示す。なお、図15-10は、常時微動測定結果のパワースペクトルを示したものである。この結果から、0.10～0.35sec付近に多数のピークが見られている。また、1.30sec付近にもピークが見られている。

上記の常時微動測定結果は、いずれも同一の周期においてピークが見られており、これらの周期が「常陽」における地盤の振動特性であると考えられる。

図15-11に地盤内伝播解析による地盤加速度応答スペクトルを示す。この結果から、0.10～0.30sec付近にピークがあり、常時微動測定における「常陽」の振動特性が十分反映されている。なお、0.10～0.30sec付近のピークは、建物の固有周期とも一致することから重要なものであるが、1.20～1.30secのピークは、高層ビルのような長周期の建物では問題となるが、「常陽」をはじめとした原子力発電所における建物では、剛構造の短周期構造物であることから、問題とならない。

15.3 建物動的応答解析

図15-12に建物の耐震解析フローを示す。

15.3.1 建物構造モデルの設定

「常陽」のようなボックス型、円筒型の耐力壁を主体とした構造物の剛性評価にあたっては、構造物を曲げせん断棒に置換し、基礎マット下の地盤を等価な水平及び回転地盤ばねに置換し、S-Rモデルとして取り扱っている。

図15-13に「常陽」の原子炉建物、原子炉附属建物及び主冷却機建物の概略断面図を示す。

15.3.2 地盤ばねモデルの設定

「常陽」の原子炉建物、原子炉附属建物及び主冷却機建物は、剛構造であり、地盤に深く埋込まれている。剛構造の建物は、地震時に地盤との相互作用の影響が大きく、特に埋

込みが深い場合には、建物の応答が埋込みにより影響されるので、モデルを作成するにあたっては、これらを適切にモデル化する必要がある。

上記のことから、「常陽」のような地盤に深く埋込まれている剛構造の建物の解析にあたっては、建物と地盤との相互作用の影響を考慮する地盤ばねの設定が重要となる。

解析に用いている地盤ばねモデルは、15.2項に示した地盤調査結果に基づく地盤の物性値を用いて、地盤のばねと減衰の振動数依存性を考慮して設定している。また、地盤ばねは、技術指針1991年版に示されているように、理論解法による値を近似した近似地盤ばねを用いている。図15-14に理論解法による値から近似地盤ばねにする方法の概略を示す。なお、地盤ばねモデルは、地盤が地震時に弾性体とした地盤ばねモデルを設定し、建物の動的応答解析に使用している。

15.3.3 「常陽」の起振実験による解析の妥当性

技術指針1991年版では、既に「常陽」のような地盤に深く埋込まれている建物に対する埋込み効果の評価法が示されている。一方、「常陽」では、技術指針1991年版が発行される以前に、地盤に深く埋込まれた原子炉施設の地震時応答特性を把握し、その耐震性を検討することは、第四紀層立地の原子炉施設の耐震設計を行う上で重要な課題の一つであると考え、電力中央研究所と共同研究で地盤調査、起振実験^{(14), (15)}を行ってきた。このうち、「常陽」における起振実験は、技術指針1991年版の建物に対する埋込み効果の評価法が妥当なものであることを技術指針1991年版が発行される以前に確認したものである。

表15-4に「常陽」における起振実験結果を他の原子炉施設と比較して示す。

参考文献^{(14), (16)}によれば、1次モードに占める水平、回転、建物変形の比率は、それぞれ28%、65%、7%と回転を主体とするモードであり、埋込みの浅い他の原子炉施設に比べて建物変形率が極めて小さい結果が得られている。また、モード減衰が極めて大きく、1次モードで56%である。なお、参考文献^{(15), (16)}によれば、起振実験結果⁽¹⁵⁾（地震観測記録⁽¹⁶⁾）と地盤ばねに技術指針1991年版で示されている理論解法を用いた解析結果を比較した結果、共振振動数及び共振振幅とも概ね一致し、理論解法の適用性が十分であることが示されている。

表15-5に「常陽」当初設置許可の解析結果及び本動的応答解析結果を起振実験結果と併せて示す。これによれば、本動的応答解析結果の2次、3次、4次モードが起振実験の1次、2次、3次モードに相当している。また、当初設置許可における解析結果及び本動的応答解析結果とも、起振実験結果よりも短周期応答であることが分かり、保守的なモデ

ルを設定していることが判断できる。

我が国の原子力発電所の設計では、鉄筋コンクリート構造物及び鋼製原子炉格納容器の減衰定数を振動実験、地震観測及び耐震壁の構造実験等から得られた数値として、鉄筋コンクリート構造物は減衰定数 $h = 5\%$ 、鋼製原子炉格納容器は減衰定数 $h = 1\%$ が慣用的に用いられている。「常陽」においても、当初設置許可の解析の際からこれらと同様の値を用いている。

15.3.4 「常陽」の地震観測結果による妥当性

図15-15に「常陽」における地震観測位置（強震計）を示す。

表15-6に強震計で観測された比較的大きな応答を示した宮城県沖地震（1978年6月12日発生）及び鹿島灘沖地震（1982年3月7日発生）の応答と動的応答解析結果の建物增幅特性を比較して示す。この結果、地震観測結果によるB 2 Fからの各階の增幅率は、解析結果より小さいものであり、建物の減衰定数が保守的に設定されていると判断できる。

15.4 機器・配管系動的応答解析

図15-12に機器・配管系の耐震解析フローを示す。また、図15-16に機器・配管系の構造設計フローを示す。

機器の動的応答解析は、大きく分けて地盤-建物系と直接連成して行うものと、建物の床応答を介して間接的に地盤-建物系の影響を考慮して行うものとに分類される。

地盤-建物系と直接連成して行う機器は、大型機器が多く、一般的に原子炉格納容器や原子炉容器等がこれらに該当する。したがって、「常陽」においても原子炉格納容器及び原子炉容器を地盤-建物と直接連成して動的応答解析を行っている。その他の機器・配管系については、床応答を介して間接的に地盤-建物系の影響を考慮して行われている。

なお、地盤-建物系と直接連成して行う機器の場合は、その解析手法として時刻歴モーダル法が用いられる。また、床応答を介して間接的に地盤-建物系の影響を考慮して行う機器・配管系の場合は、建物の床応答を用いたスペクトルモーダル法又は時刻歴モーダル法が用いられる。

15.4.1 機器・配管系モデルの設定

(1) 機器

機器の動的応答解析を行うあたっては、機器を曲げせん断棒に置換した多質点はりモデルとして取り扱っている。機器の解析モデルは、機器の寸法変化、剛性変化、質量分布及び強度評価上必要な部位を考慮した質点位置を決定し、振動モードを適切に表現で

きるモデルとしている。また、質量評価にあたっては、機器自体の重量、付属品、保温材、内部流体等を考慮し、質量を集中質量又は分布質量系として取り扱っている。

図15-17に機器の耐震解析モデルの設定例を示す。

(2) 配管系

配管系の動的解析を行うにあたっては、配管系を曲げせん断棒に置換した多質点はりモデルとして取り扱っている。同一モデルに含める範囲は、アンカ点（機器端点）からアンカ点（機器端点）までとし、質点は応力が高くなると考えられる溶接部、エルボ部及びティーポ等に設定し、振動モードを適切に表現できるモデルとしている。また、配管系は、種々の配管支持装置により支持されていることから、これら取付け位置において各種配管支持装置の特性に合わせた境界条件を設定している。なお、質量評価にあたっては、配管自体の重量、付属品、保温材、内部流体等を考慮し、質量を集中質量又は分布質量系として取り扱っている。

図15-17に配管系の耐震解析モデルの設定例を示す。

15.4.2 機器・配管系モデルの減衰定数

(1) 機器

機器の減衰定数は、種々の機器等の振動試験結果を反映した保守的な値が技術指針1987年版及び技術指針1991年版で定められている。これらの値は、振動試験の最低値をカバーしたものとなっている。よって、解析にあたっては、これらの値に基づき以下の値を用いている。

① 溶接構造物	1.0 %
② ボルト及びリベット構造物	2.0 %
③ 電気盤（自立閉鎖型）	4.0 %
④ ポンプ、ファン等の機械装置	1.0 %

(2) 配管系

配管系の減衰定数は、種々の配管系の振動試験結果を反映した保守的な値が技術指針1987年版及び技術指針1991年版で定められている。よって、解析にあたっては、これらの値に基づき表15-7の値を用いている。

一般的に高速炉の配管系の場合は、熱膨張応力を緩和するために配管ルートが曲りくねっており、かつ、自重を支えたり、地震時に配管系を拘束するサポート点が多数あるため、そのサポート点位置毎に減衰定数が異なるものである。表15-7に示した技術指

針1987年版及び技術指針1991年版の値は、これらの値の最低値をカバーしたものである。

したがって、設計用減衰定数は、かなり保守的に設定されていると言える。なお、「常陽」における配管系は、配管区分Ⅰの保温材有りに該当するため、設計にあたっては減衰定数2.5%を用いている。

表15-8に「常陽」設置当初の総合機能試験の一環として行った実機配管系の振動試験結果を示す。この結果から、表15-7に示した設計用減衰定数は、かなり保守的な値であることが判る。

15.4.3 機器・配管系の動的応答解析方法

本章の初めにも記述したように、機器・配管系の動的応答解析方法には、大きく分けて2種類の解析方法がある。一つは、大型機器である原子炉格納容器や原子炉容器等の解析を行う場合であり、この場合は、地盤-建物系と直接連成して動的解析を行っている。もう一つは、その他の機器・配管系の解析を行う場合であり、この場合は、建物の動的解析の結果得られた各階床の応答を用いて動的解析を行っている。

解析手法には、スペクトルモーダル法又は時刻歴モーダル法を用いており、地盤-建物系と直接連成して解析を行う場合は、時刻歴モーダル法が用いられる。また、機器・配管系単独で解析を行う場合には、建物の各階床の応答結果を直接利用した時刻歴モーダル法と各機器・配管系の減衰定数に相当する床応答スペクトルを周期軸方向に±10%拡幅した設計用床応答スペクトルを利用したスペクトルモーダル法が用いられる。

時刻歴モーダル法は、各端点、支持点毎に地震動の時刻歴を直接入力することができることから、支持点が建物の階をまたいで支持されるような場合に精度の高い解析が可能である。一方、スペクトルモーダル法は、機器・配管系毎に一つの設計用床応答スペクトルを用いて行うことから、支持点が建物階をまたいで支持されるような場合には、これら各階の設計用床応答スペクトルを包絡する床応答スペクトル（一般的には最上階の設計用床応答スペクトル）を用いることになるので、時刻歴モーダル法に比べて精度は下がるもの、かなり保守的な結果を与えることになる。

図15-8に配管系の動的解析方法の概念を示す。

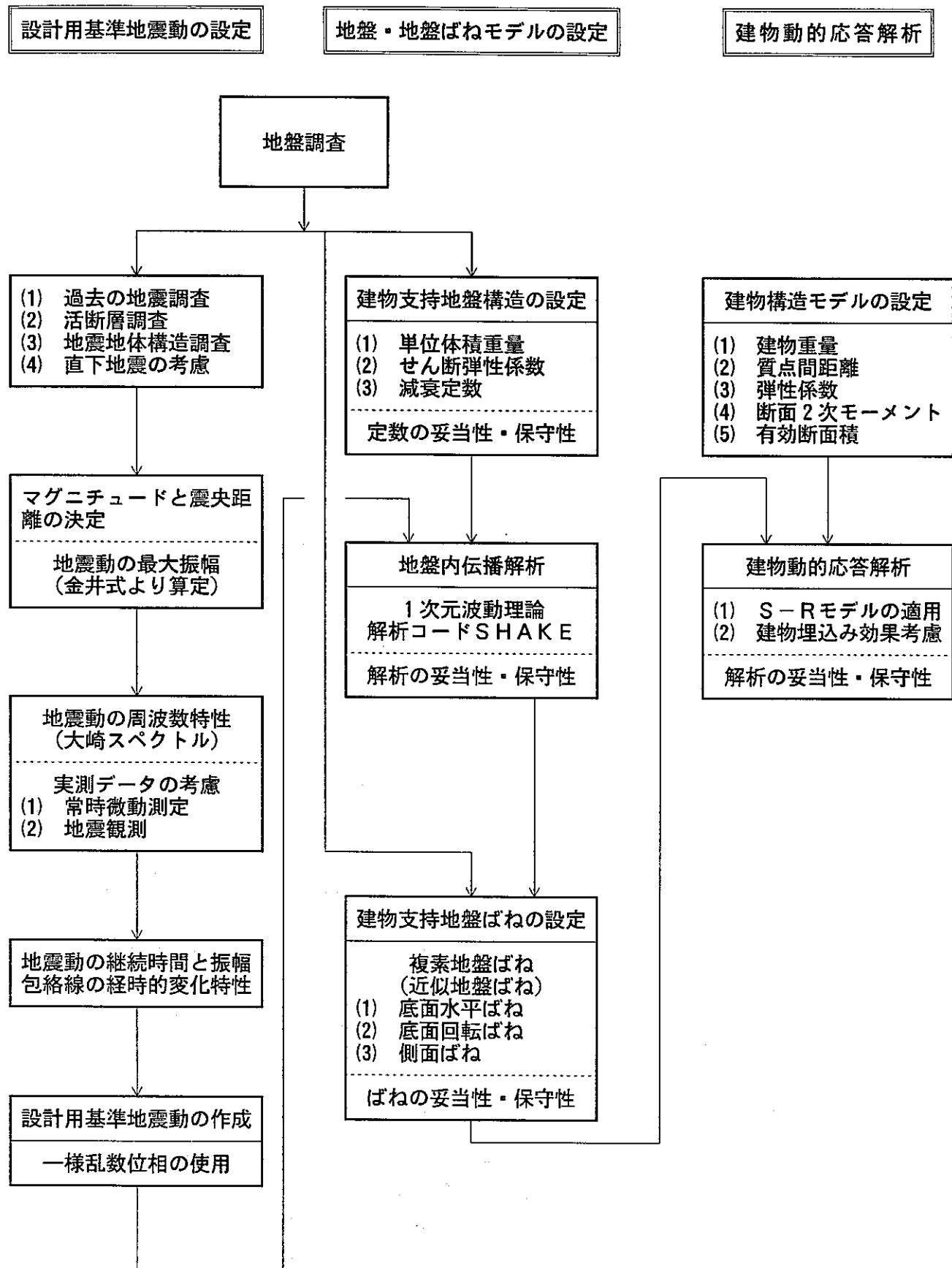


図15-1 設計用基準地震動及び地盤・建物解析条件の設定フロー

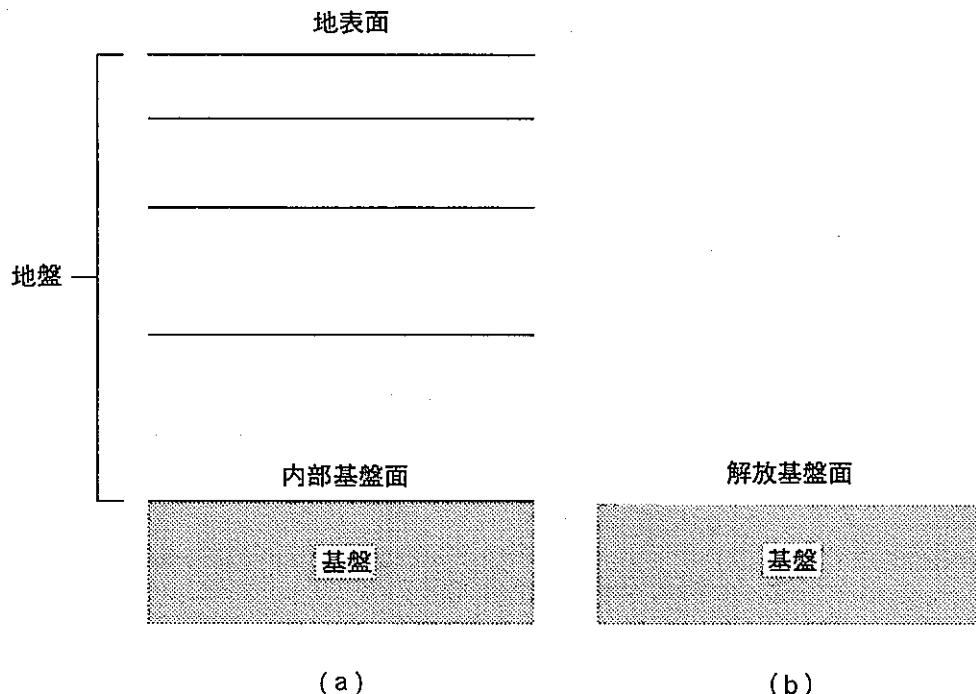


図15-2 解放基盤表面と内部基盤面の概念

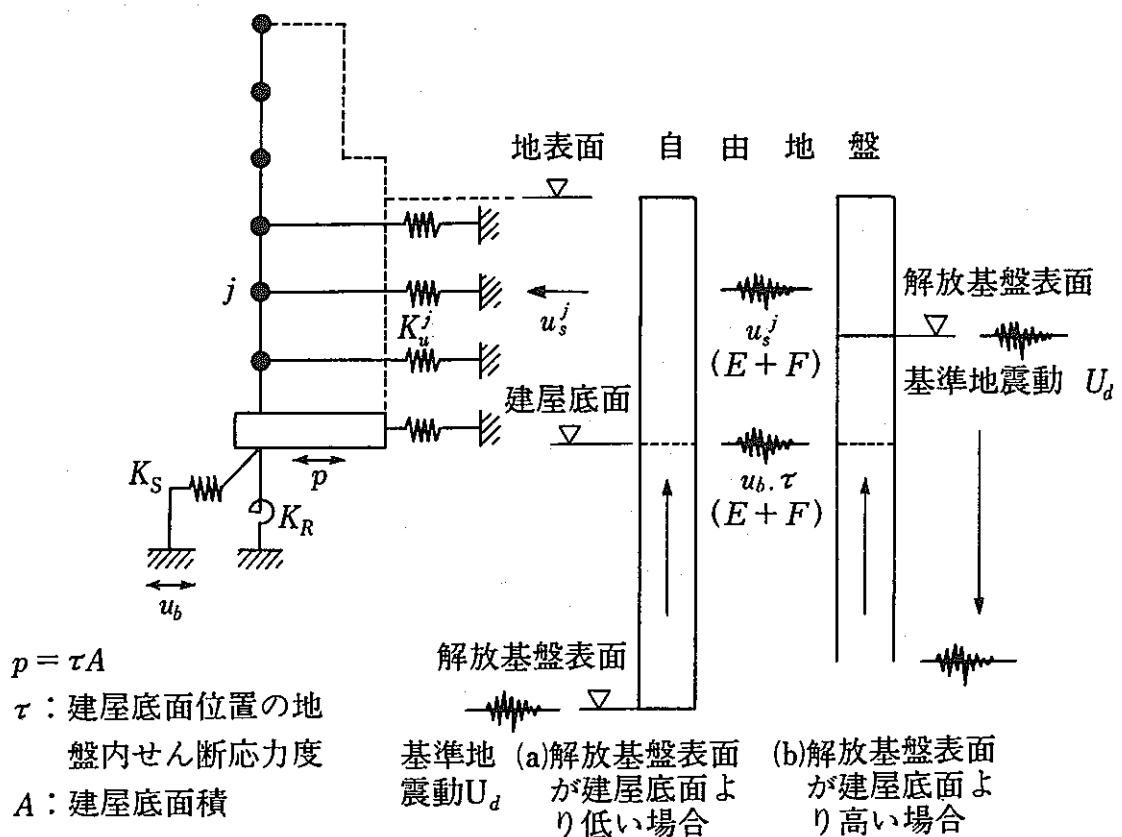


図15-3 地盤内伝播解析手法とS-Rモデルにおける入力地震動の設定手法

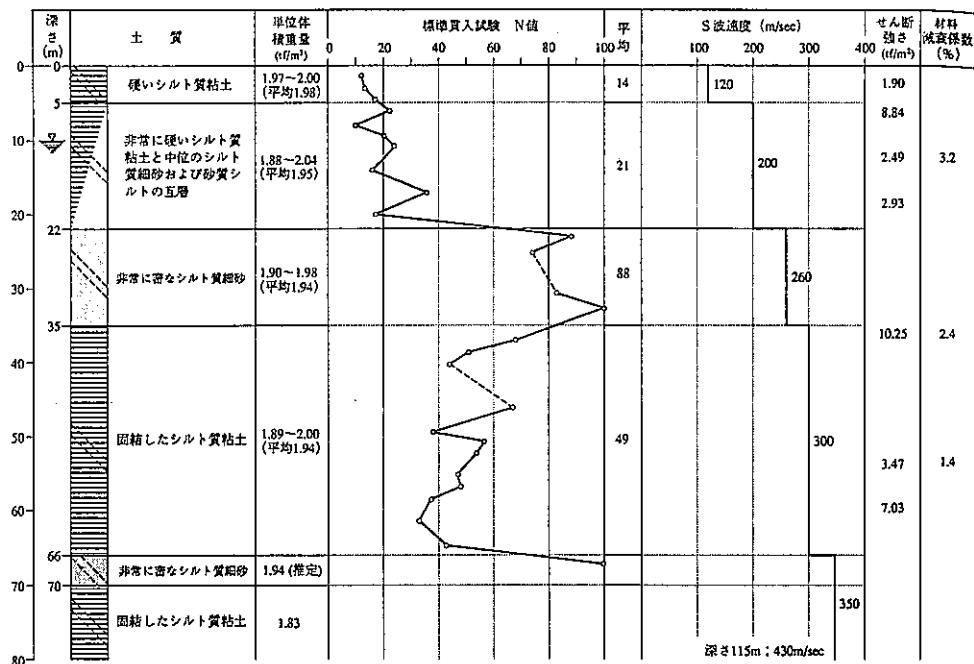


図9-21 エル・セントロの地盤

層	深さ (m)	土質	厚さ (m)	単位体積重量 (tf/m^3)	せん断弾性係数 (tf/m^2)	減衰係数	
						α^* (1/sec)	β
1	0.0	粘土	5.0	1.98	2900	2.0	0.020*
2	5.0	粘土・シルト・砂の互層	17.0	1.95	8000	2.0	0.032
3	22.0	シルト質砂	13.0	1.94	13400	2.0	0.024
4	35.0	シルト質粘土	31.0	1.94	17800	2.0	0.014
5	66.0	シルト質砂	4.0	1.94	24200	2.0	0.010*
6	70.0	固結粘土	—	1.83	22800	2.0	0.010*

*は仮定

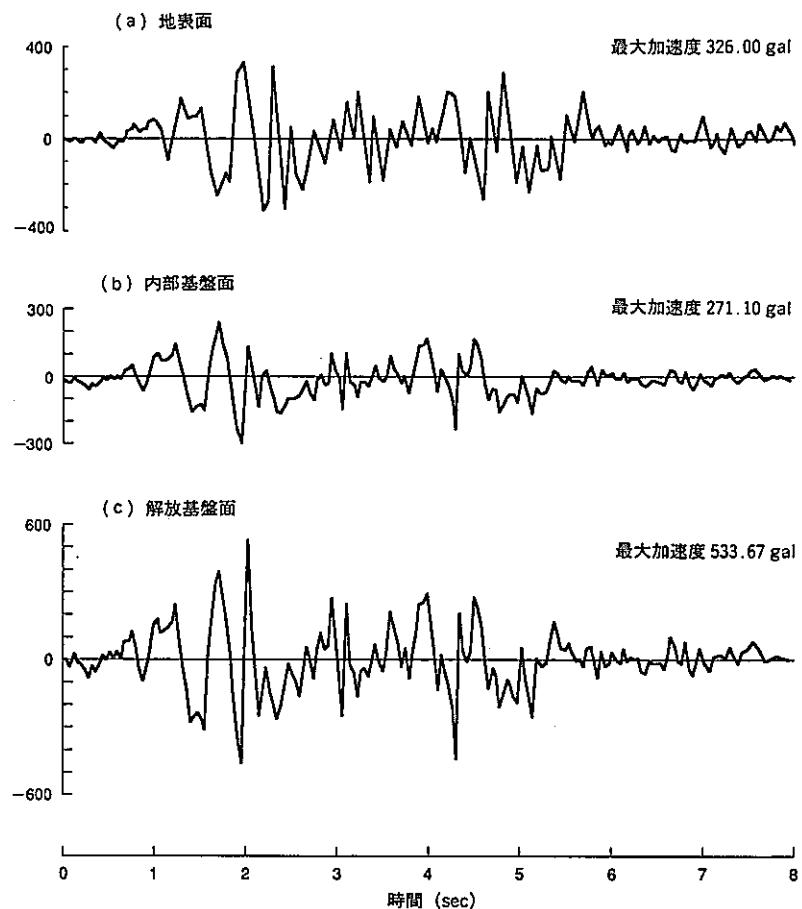
図15-4 解放基盤表面及び内部基盤面の地震波を逆増幅解析した例
(EL CENTRO 地震の地表面で観測された地震波に基づく1次元波動理論による解析)

表15-1 高速実験炉「常陽」建物支持地盤の構造

GL (m)	層 厚 (m)	単位体積 重量 γ (ton/m ³)	縦波速度 V_p (m/sec)	せん断波 速度 V_s (m/sec)	せん断 ^{*1} 弾性係数 G (ton/m ²)	主な土質
0.0						
-5.0	5.0	1.88	500	120	2,760	盛土、ローム
-16.0	11.0	1.88			19,624	細砂～中砂
主冷基礎-20.0	6.0	1.93	700	320	20,146	粘土 砂
-22.0						
-31.0	9.0	2.10	900	570	69,550	砂礫、細砂
附属基礎-31.8	4.0	1.91			43,009	細砂
-35.0	6.0	2.00	1,600	470	45,036	
-41.0						
-64.0	23.0	2.00	1,600	350	24,975	シルト質砂 細砂
-80.0	16.0	2.00	1,600	400	32,620	細砂、シルト湿り細砂
-114.0	34.0	2.00	1,600	470	45,036	細砂 シルト質細砂
	16.0	2.00	1,600	530	57,268	砂質泥岩

* 1 : せん断弾性係数Gは、 $G = \gamma \cdot V_s^2 / g$ より算出している。なお、gは重力加速度であり、 $g = 9.81\text{m/sec}^2$ としている。

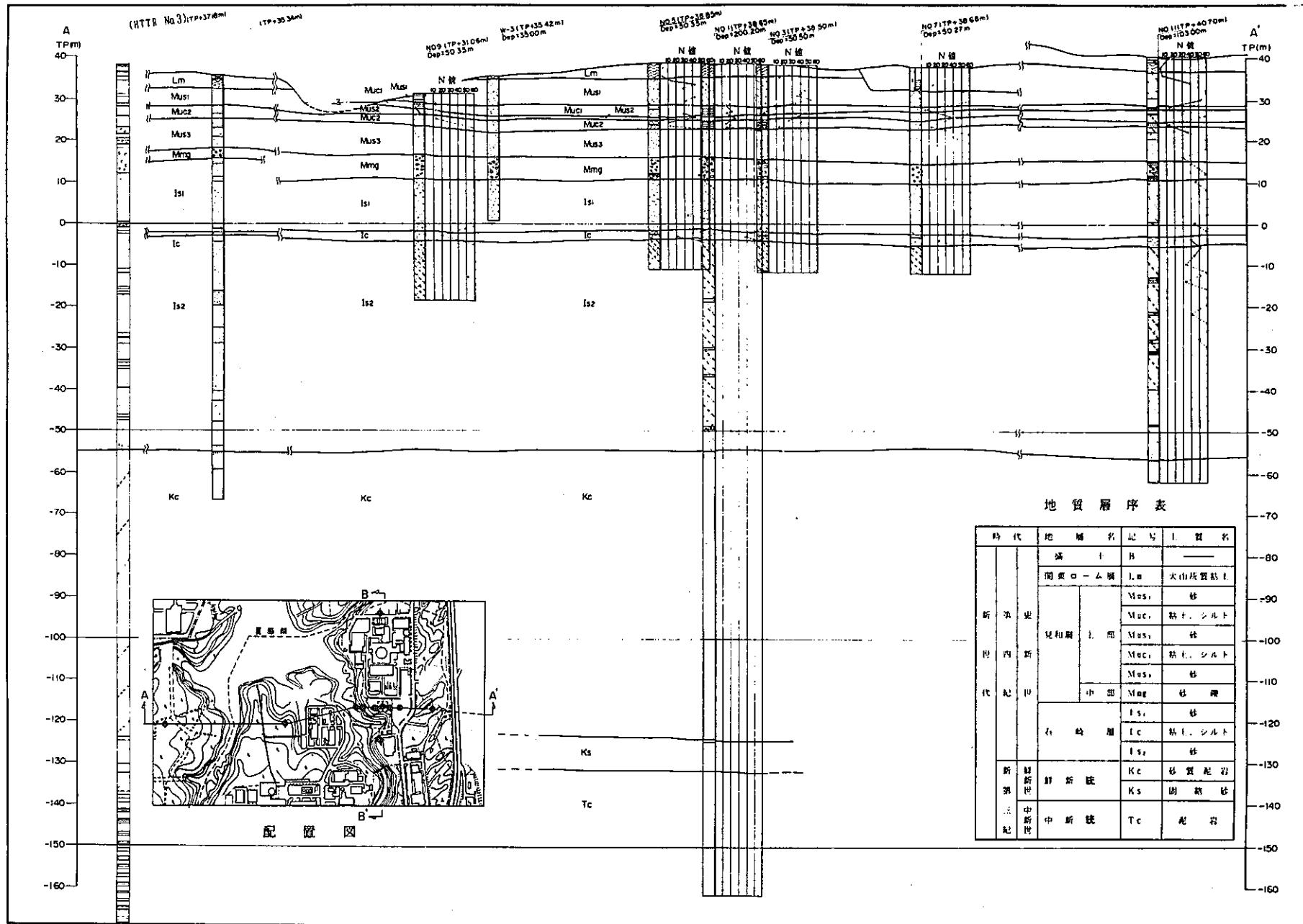


図15-5(1/2) 「常陽」敷地周辺の地質断面図 (A-A' 断面)

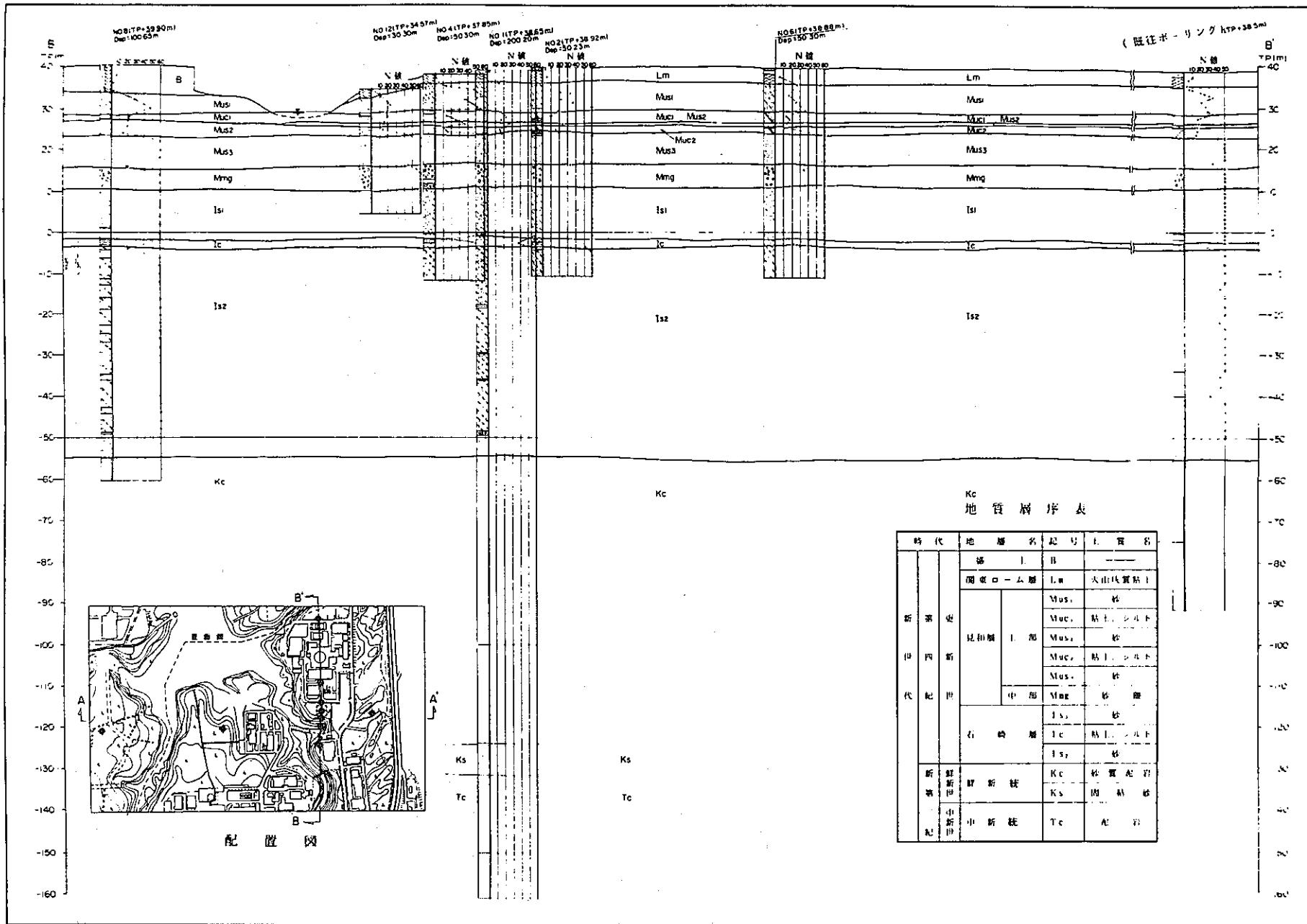


図15-5(2/2) 「常陽」敷地周辺の地質断面図 (B-B' 断面)

表15-2 動的3軸圧縮試験及び孔内載荷試験結果で得られた減衰定数

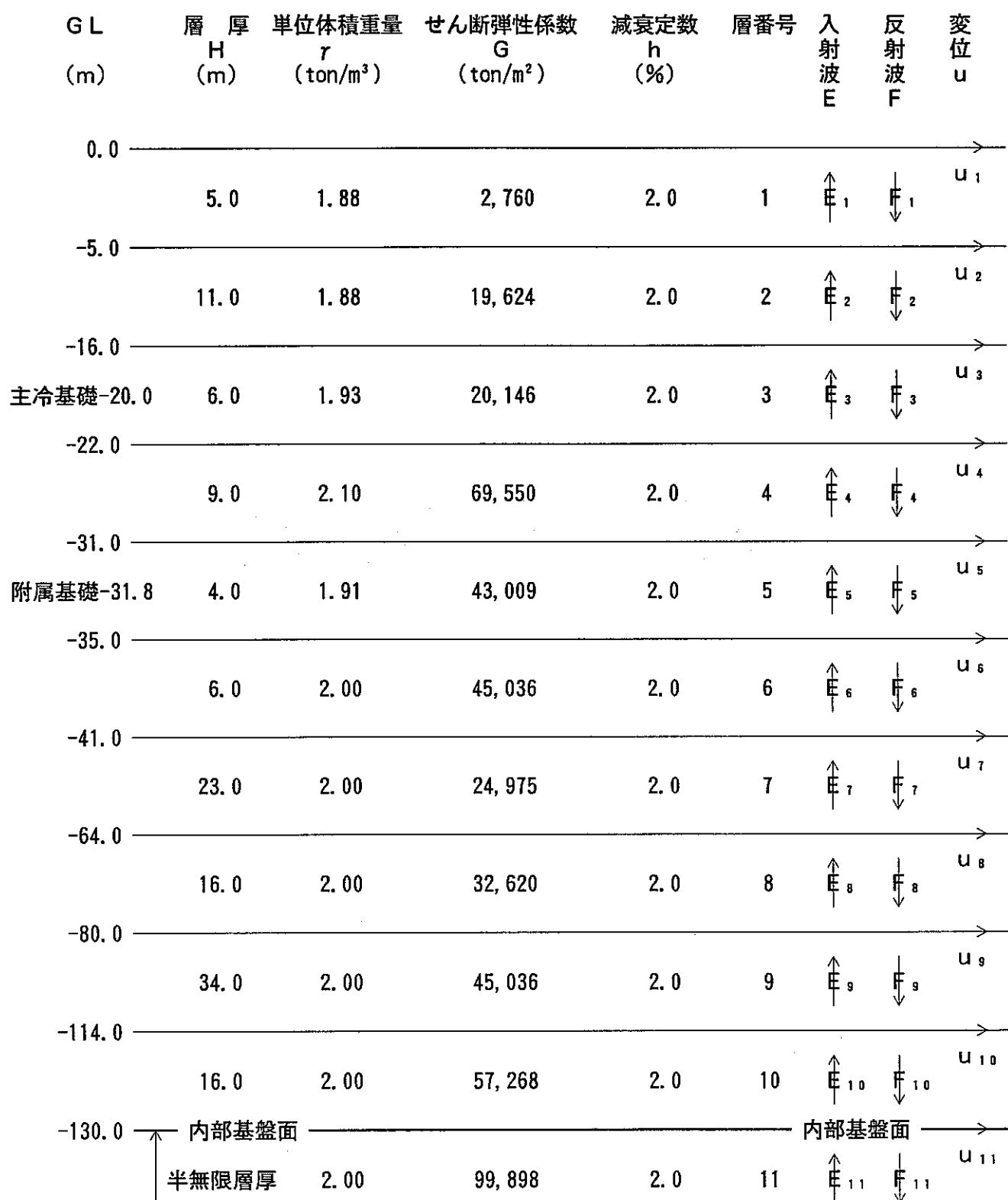
G L (m)	層 厚 (m)	減衰定数 h			主な土質
		動的3軸圧縮 試験結果	孔 内 載 荷 試 験 結 果	動的3軸、孔内 載荷試験結果 (h_{max})	
0.0	5.0				盛土、ローム
-5.0	11.0	2~3%	5~6%	19~23%	細砂~中砂 粘土 砂
-16.0					
主冷基礎	-20.0 6.0	2%	6~7%	22%	
-22.0	9.0		7%		砂礫、細砂
-31.0	31.8 4.0	2%	5%	20~22%	
-35.0	6.0	2.5%	6~8%	21%	細砂
-41.0	23.0				シルト質砂 細砂
-64.0	16.0				細砂、シルト湿り細砂
-80.0	34.0				細砂 シルト質細砂
-114.0	16.0				砂質泥岩

力学試験の結果、拘束圧による物性変化に上部地盤との変化が見られないことから、上部地盤と同様として取り扱っている。

表 15-3 地盤内伝播解析

(単位 : g a l)

地盤位置	S ₁ 地震			S ₂ 地震		
	線形解析 ①	非線形解析 ②	①/②	線形解析 ①	非線形解析 ②	①/②
GL - 0.00m	284	192	1.48	605	319	1.90
GL - 4.30m	202	163	1.24	262	248	1.06
GL - 5.00m	188	—	—	269	—	—
GL - 12.95m	116	113	1.03	258	209	1.23
GL - 16.00m	106	—	—	214	—	—
GL - 22.00m	124	—	—	202	—	—
GL - 25.08m	122	108	1.13	203	165	1.23
GL - 31.00m	106	—	—	188	—	—
GL - 31.80m	101	102	0.99	186	185	1.01
GL - 35.00m	87	—	—	174	—	—
GL - 41.00m	92	—	—	170	—	—
GL - 64.00m	141	—	—	249	—	—
GL - 80.00m	112	—	—	223	—	—
GL - 114.00m	117	—	—	236	—	—
GL - 130.00m (内部基盤面)	—	—	—	—	—	—
GL - 130.00m 設計用基準地震動 (解放基盤表面)	180	180	1.00	350	350	1.00



E₁₁=設計用基準地震動 S₁、S₂

図15-6 1次元波動理論による地盤内伝播解析の概念

成層地盤の特性

層	深さ (m)	土質	層厚 (m)	単位体積重量 (tf/m ³)	せん断弾性係数 (tf/m ²)
	0.00				
1	3.80	粘土	3.80	1.50	1200
2	7.00	砂質粘土	3.20	1.67	2900
3	10.90	砂	3.90	1.85	5700
4		軟岩	—	1.95	50000

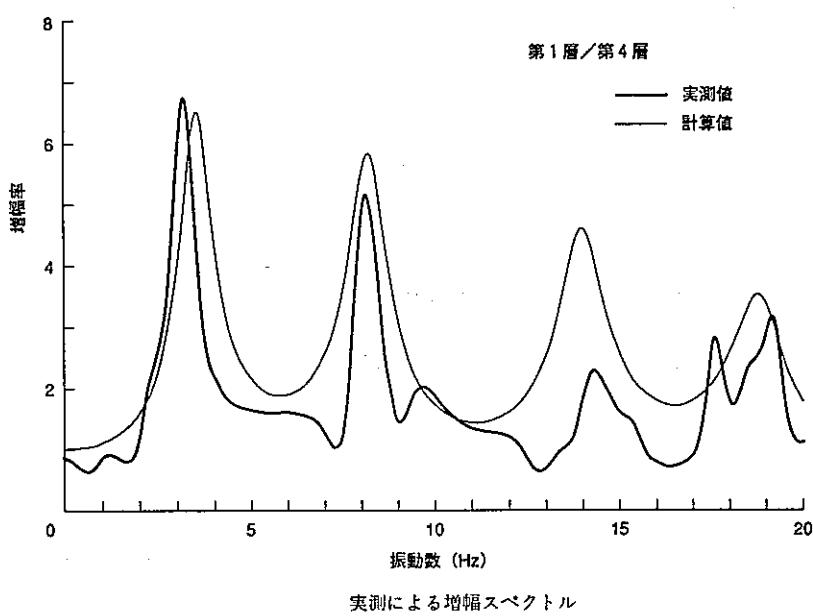
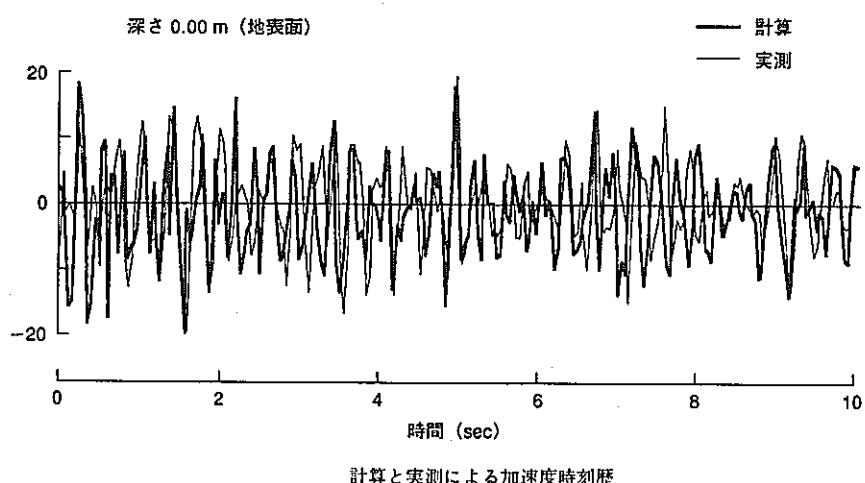


図15-7 ある地盤の実測データとその地盤データに基づく1次元波動理論による解析結果の比較

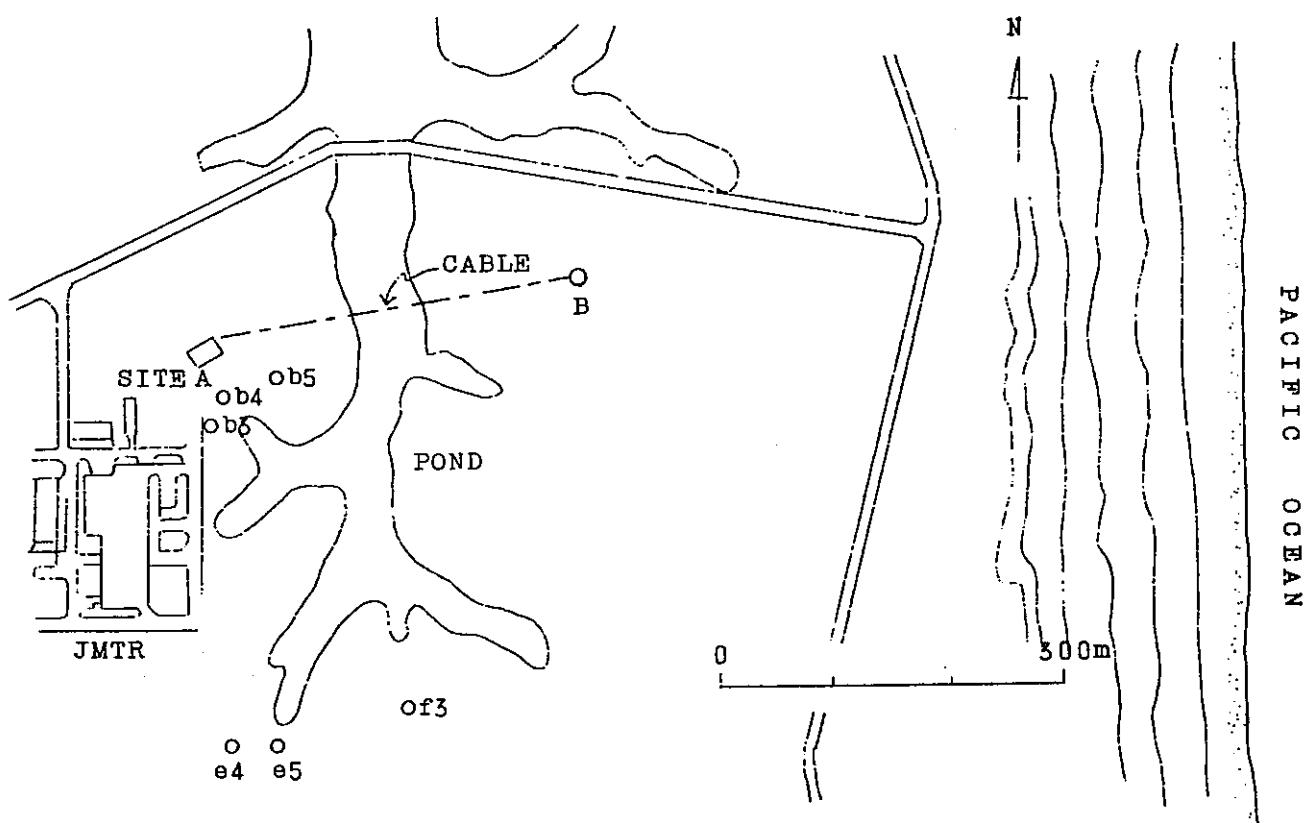


図15-8 「常陽」建設前の建設予定地周辺一帯における常時微動測定位置

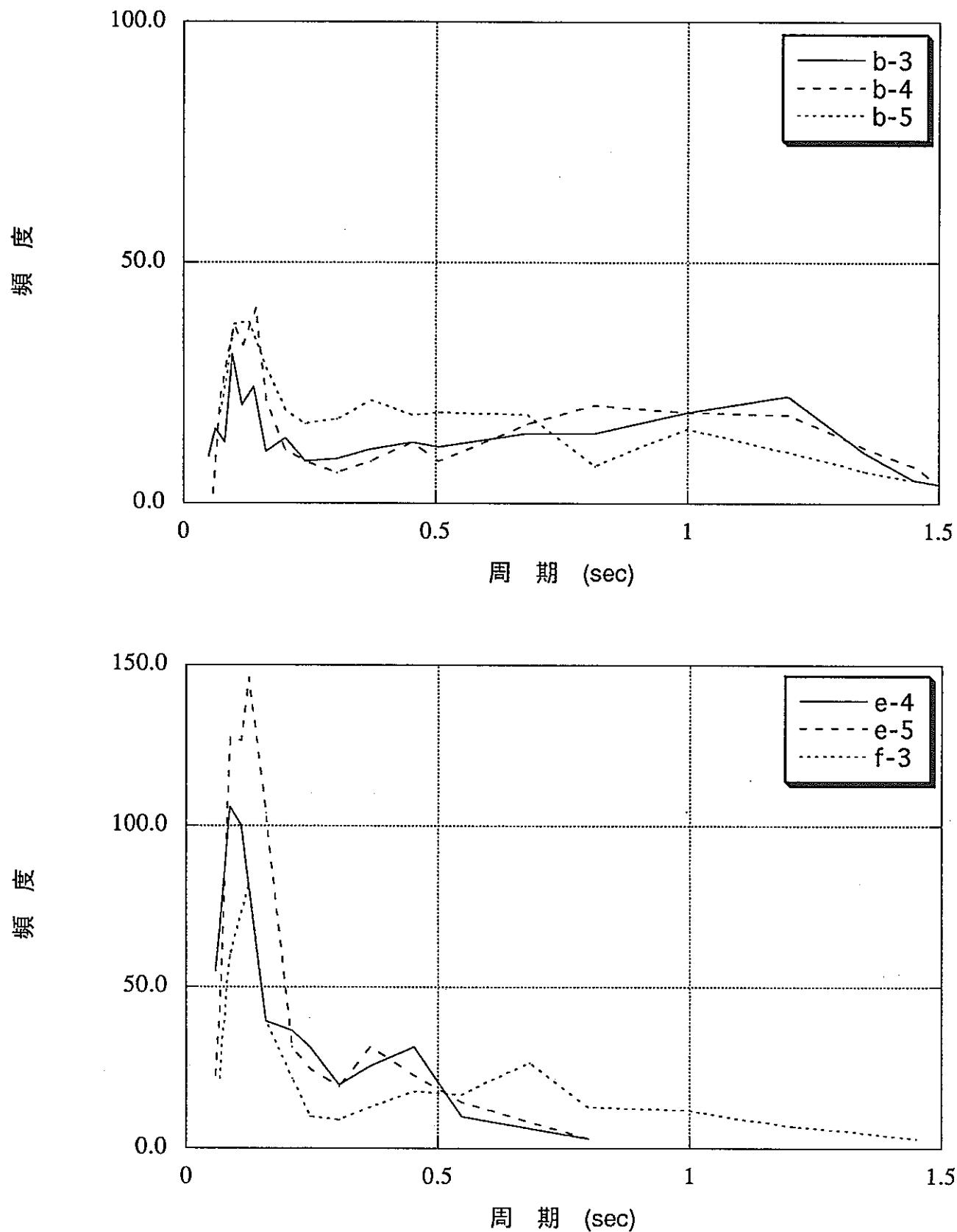


図15-9 「常陽」建設前の建設予定地周辺一帯での常時微動測定結果

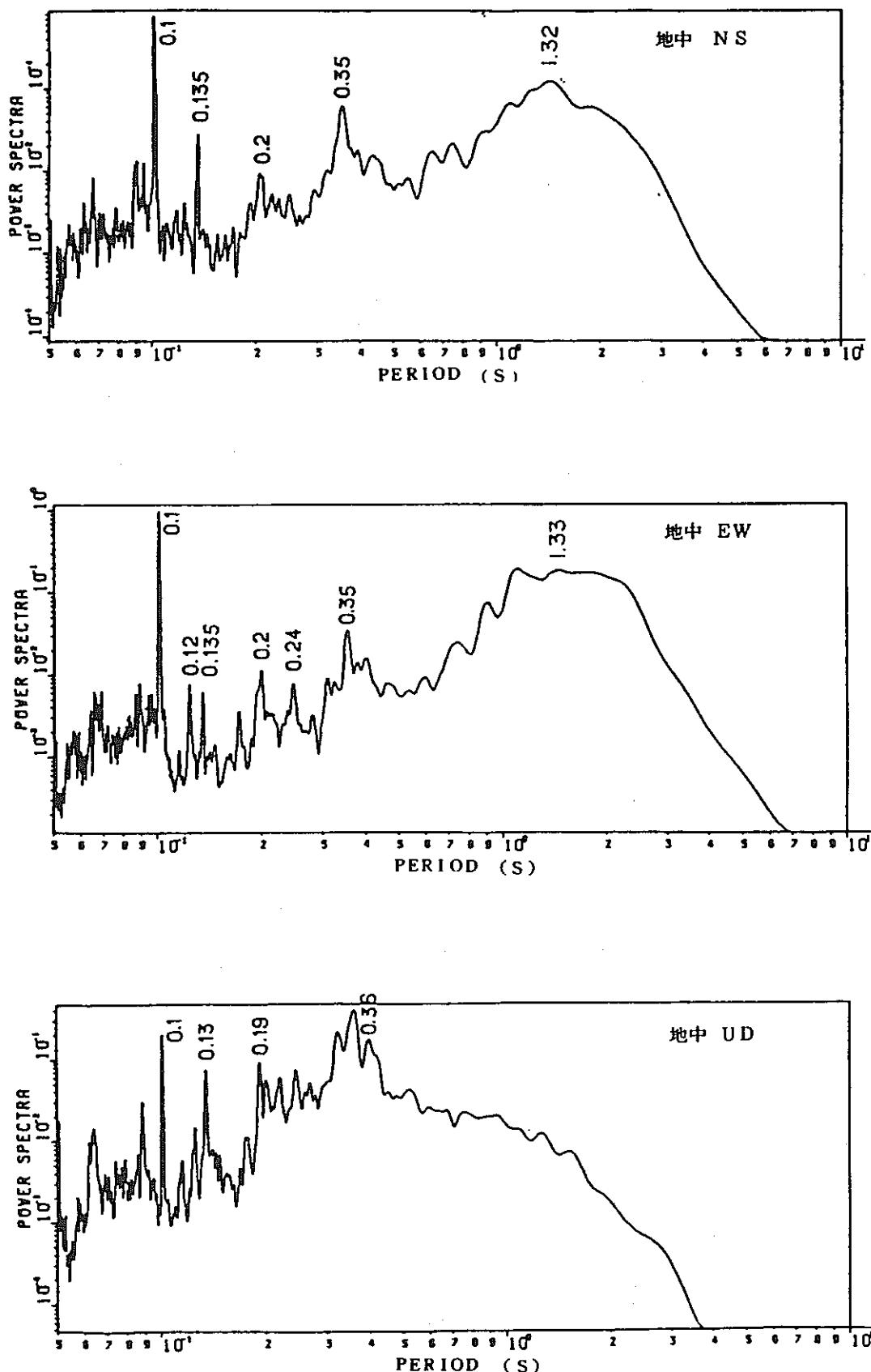


図15-10 第二使用済燃料貯蔵施設の増設の際に行われた建物基礎底面付近の常時微動測定結果

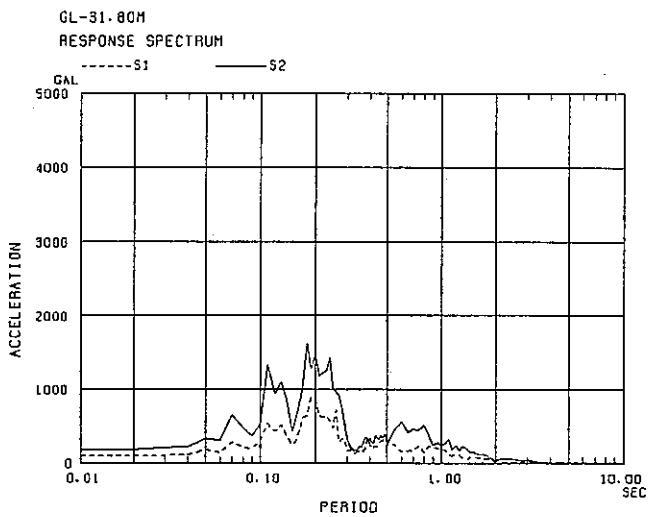
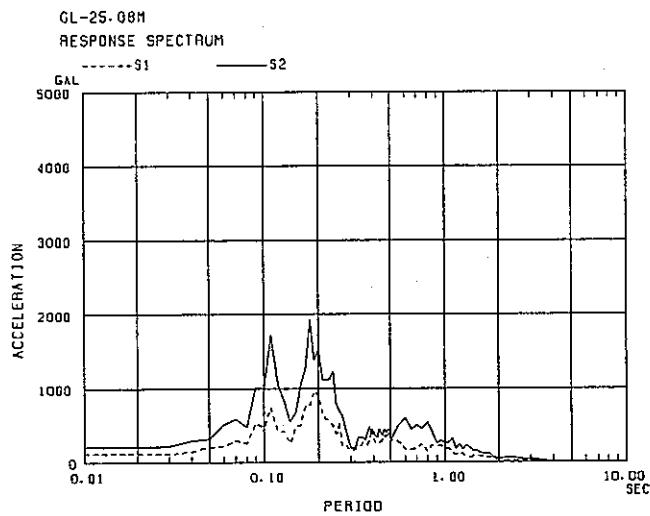
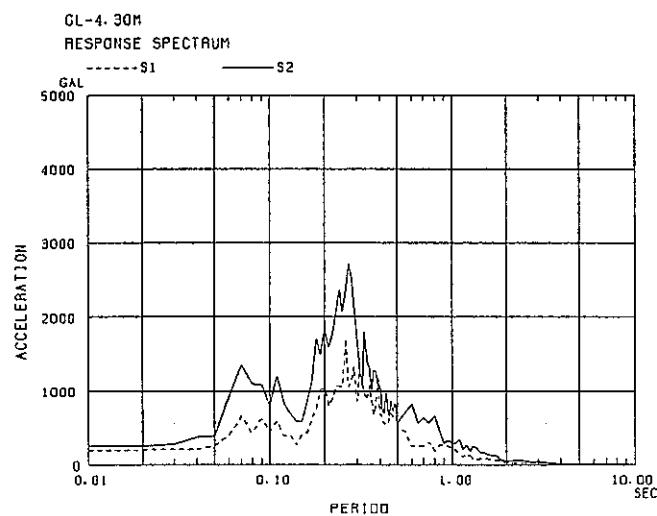
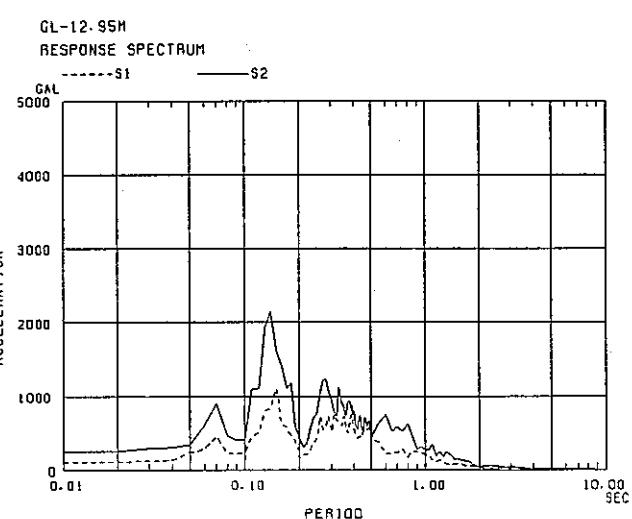
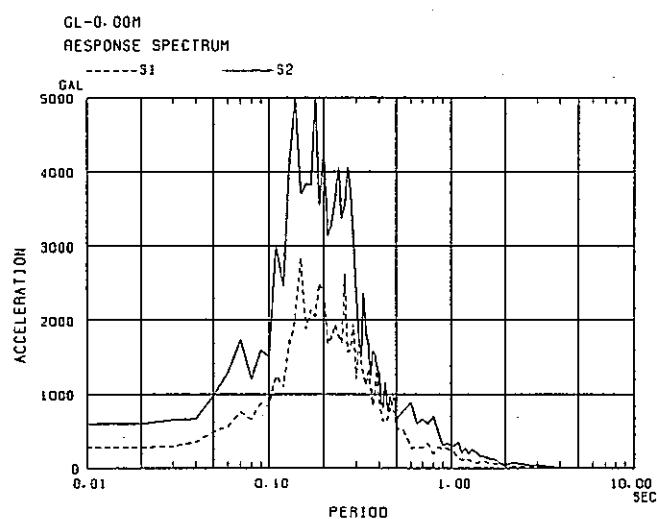


図15-11 地盤内伝播解析による地盤加速度応答スペクトル（減衰定数 1 %）

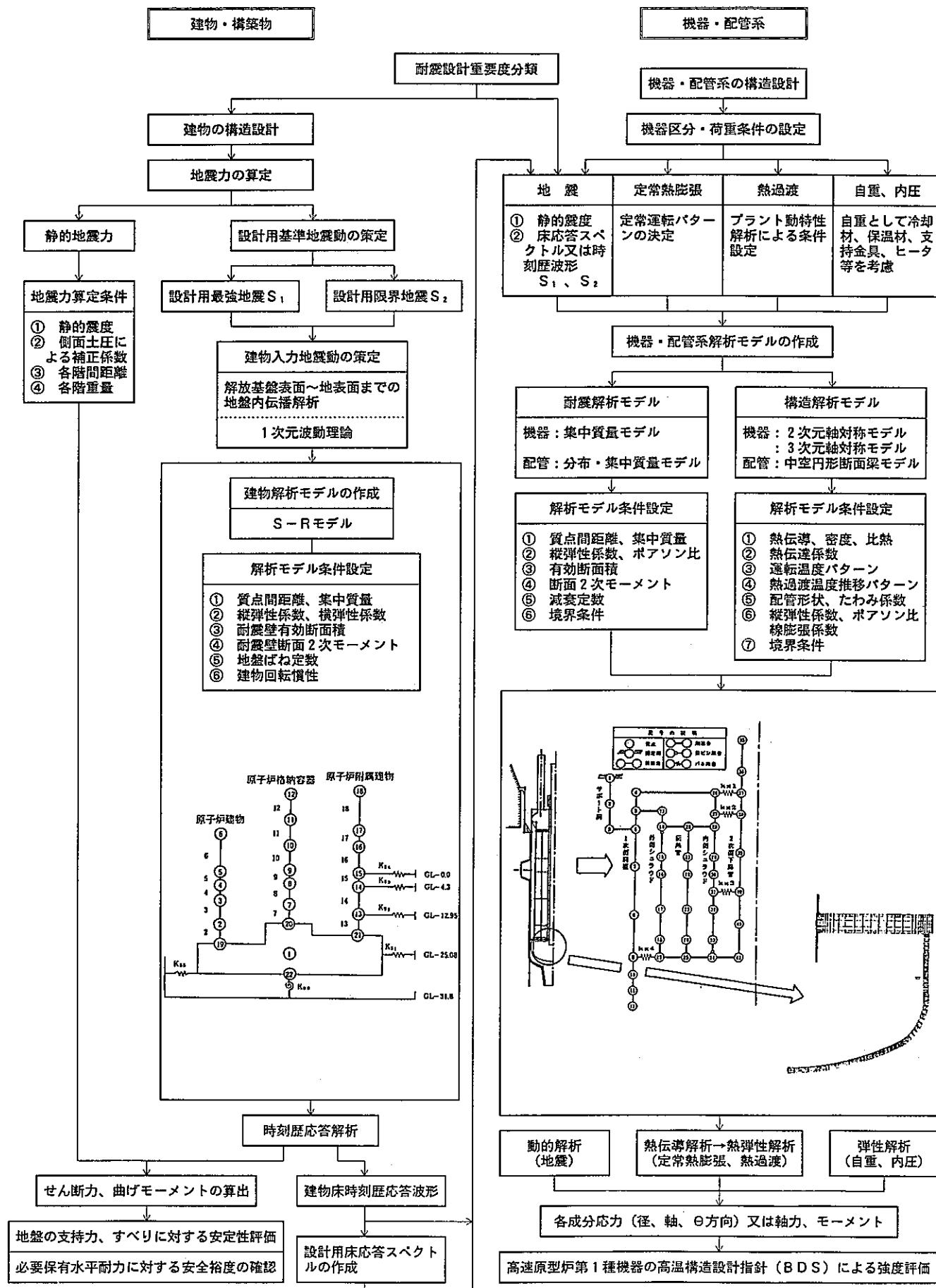
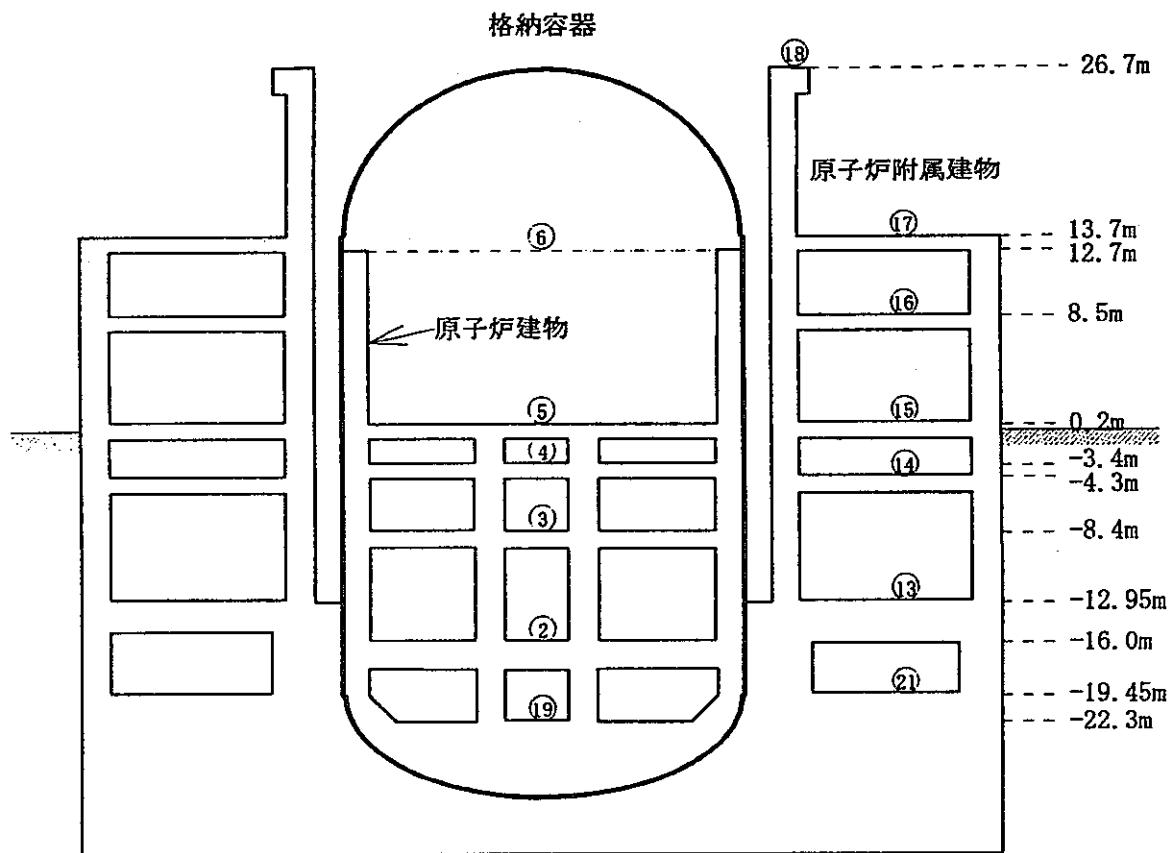
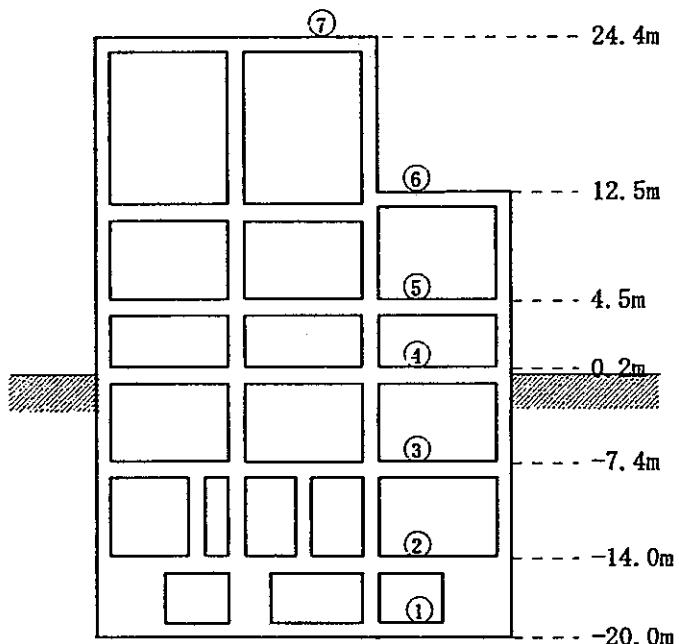


図15-12 建物及び機器・配管系の耐震解析フロー



原子炉建物および原子炉附属建物



図中の丸付き数字は、解析モデルの質点番号の位置

図15-13 「常陽」の原子炉建物、原子炉附属建物及び主冷却機建物の概略断面図

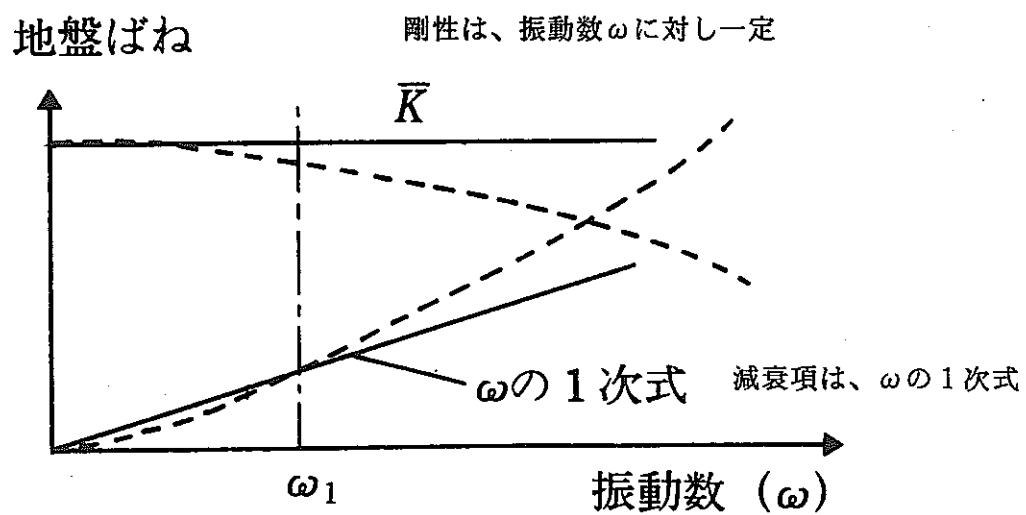


図15-14 理論解法による値から近似地盤ばねにする方法の概略図

表15-4 高速実験炉「常陽」における起振実験結果

実験建物	基礎寸法 (m)	全高さ (m)	埋込み深さ (%)	せん断波速度 (m/s)	1次固有値		1次モード構成比		
					振動数 (Hz)	減衰 (%)	水平 (%)	回転 (%)	建物变形 (%)
「常陽」	50×55	58.5	54	470	4.3	56	28	65	7
A	70×70	80.7	31	470	2.8	15	12	60	28
B	75.5×75.5	75.3	23	410	2.7	29	13	66	21
C	52.3×約50	62.8	25	1,220	5.6	7	6	15	79
D	φ20	40.6	41	500	6.7	25	8	62	30

表15-5 「常陽」の起振実験と解析結果における固有振動数と減衰

		起振実験	本動的応答解析	当初設置許可における解析	
				軟地盤	硬地盤
固有振動数(Hz)	1 次	4.3	2.7	2.9	3.9
	2 次	8.0	5.0	6.5	6.7
	3 次	10.6	7.6	7.0	9.3
	4 次	15.4	11.0	10.9	11.4
	5 次	16.3	13.7	13.2	13.2
減衰定数(%)	1 次	56.0	地盤と建物間 : 近似地盤ばね 建物(鉄筋コンクリート) : 5 %	地盤と建物間 : 5 % 建物(鉄筋コンクリート) : 5 % 原子炉格納容器(鋼製) : 1 %	
	2 次	22.0			
	3 次	11.0			
	4 次	11.0			
	5 次	9.8	原子炉格納容器(鋼製) : 1 %		

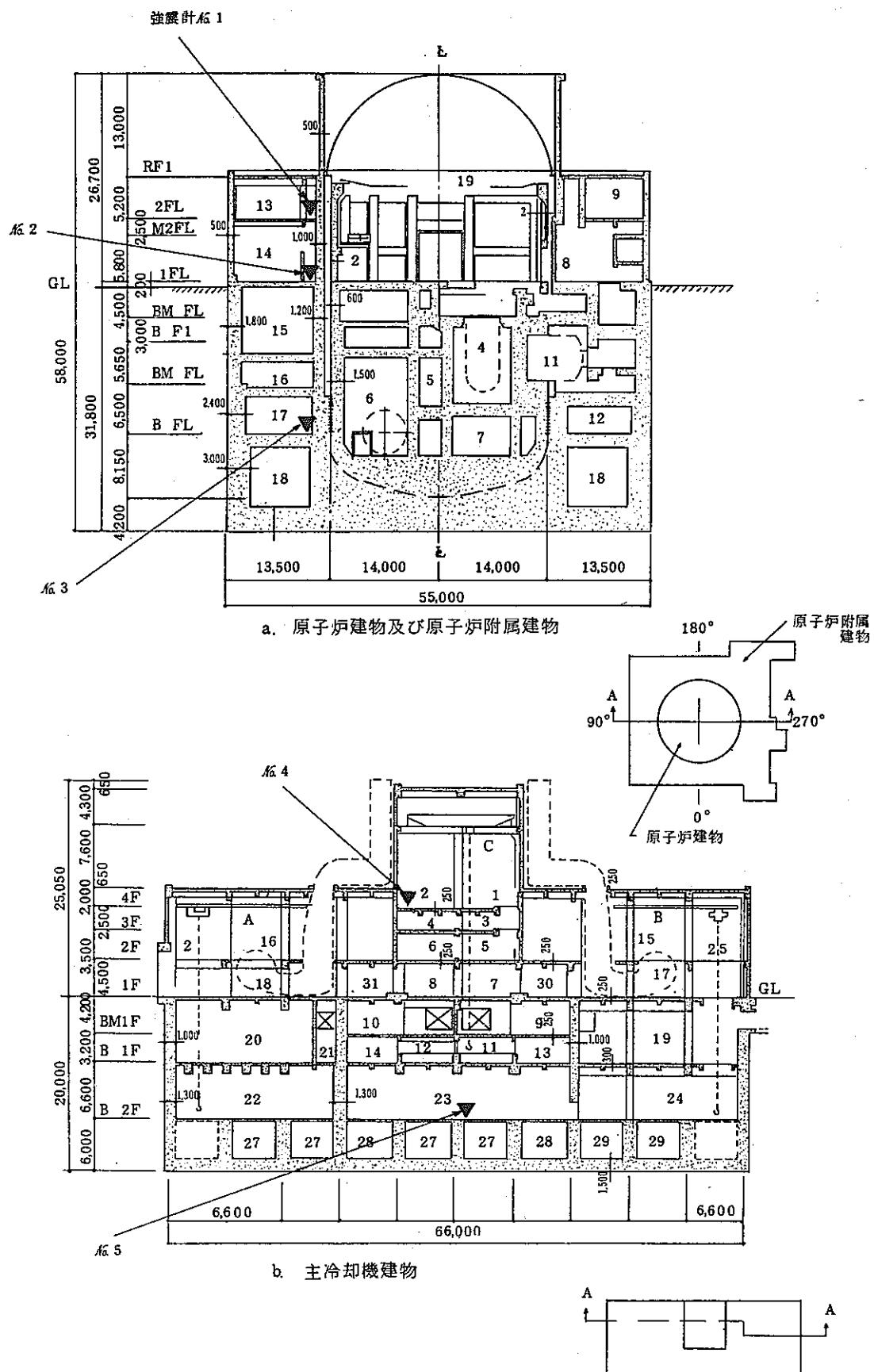


図15-15 「常陽」における地震観測位置 (S M A C 強震計)

表15-6 地震観測結果と本動的応答解析結果の増幅特性

建物		地震観測結果				本動的応答解析				
		宮城県沖地震 ^{*1}		鹿島灘沖地震 ^{*2}		S ₁ 地震		S ₂ 地震		
		加速度 (gal)	増幅率	加速度 (gal)	増幅率	加速度 (gal)	増幅率	加速度 (gal)	増幅率	
原子炉附属建物	2F (GL- 8.50m) 質点番号 ⑯	NS	—	—	80	1.67	163	1.96	249	2.20
		EW	—	—	57	1.54				
	1F (GL- 0.20m) 質点番号 ⑮	NS	27	1.17	63	1.31	122	1.47	168	1.49
		EW	28	1.40	35	0.95				
主冷却機建物	B2F (GL-19.45m) 質点番号 ㉑	NS	23	1.00	48	1.00	83	1.00	113	1.00
		EW	20	1.00	37	1.00				
	4F (GL-10.50m) 質点番号 ⑥	NS	33	1.57	126	3.00	403	3.91	652	3.10
		EW	26	1.44	76	1.85				
	B2F (GL-14.00m) 質点番号 ②	NS	21	1.00	42	1.00	103	1.00	210	1.00
		EW	18	1.00	41	1.00				

*1: 1978年6月12日17:14

マグニチュードM=7.4

震源地 東経 142.17°、北緯 38.15°、深さ40km

*2: 1982年3月7日8:14

マグニチュードM=5.6

震源地 東経 140.70°、北緯 36.50°、深さ60km

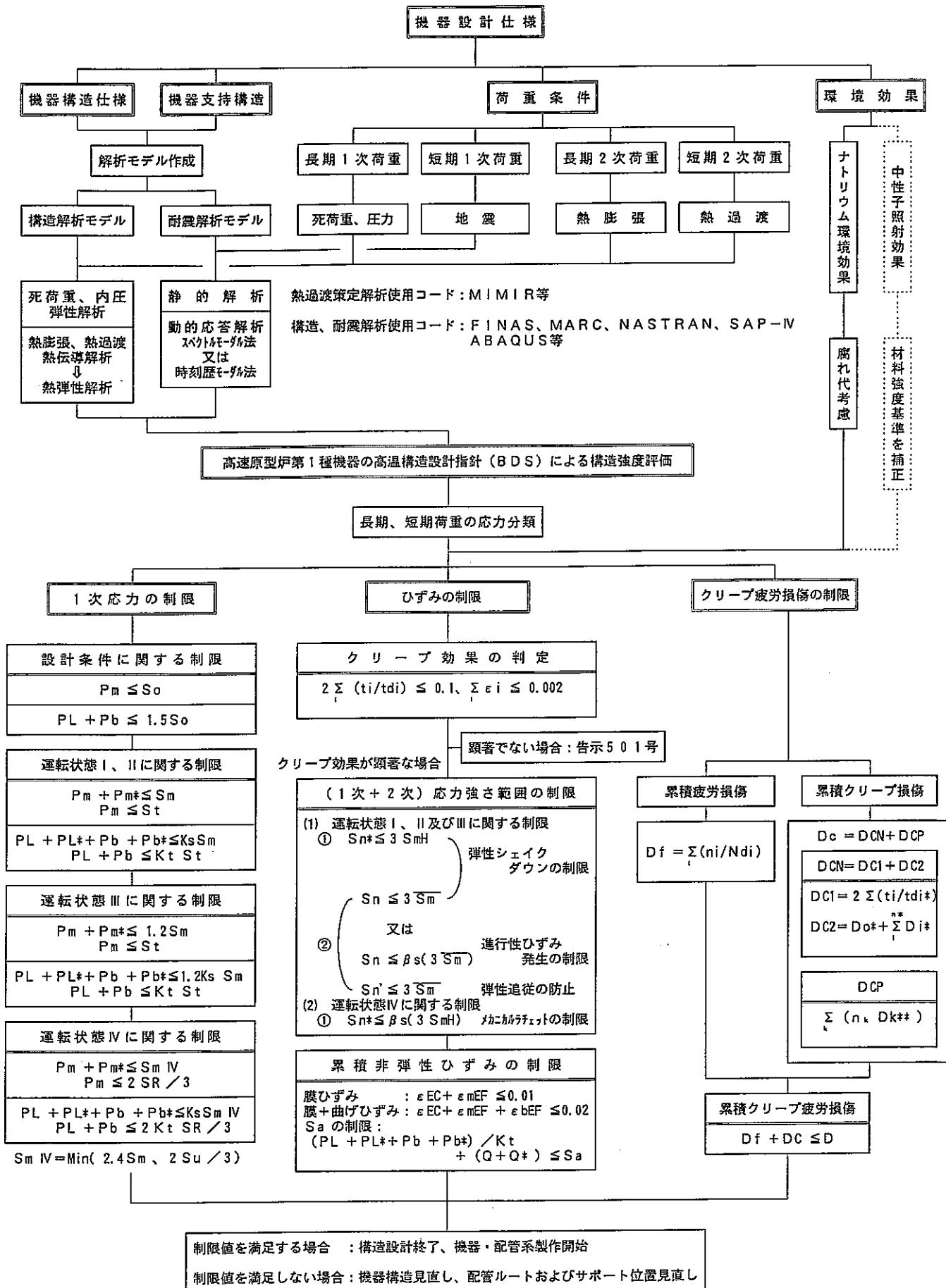
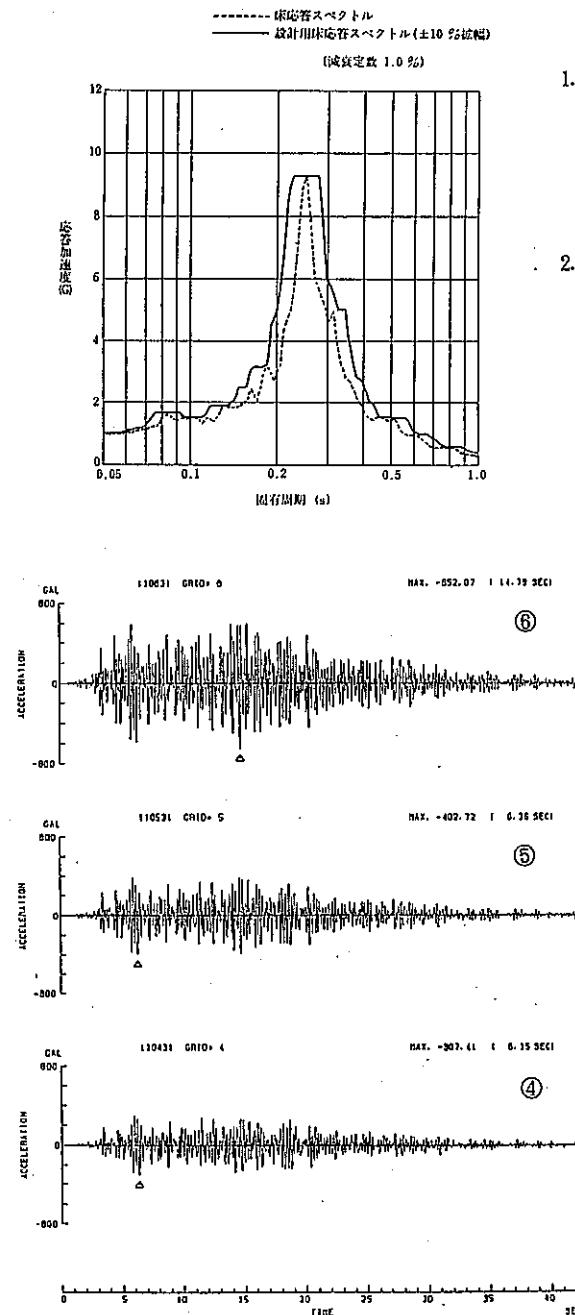


図15-16 機器・配管系の構造設計フロー



1. スペクトルモーダル法
 - (1) 各機器・配管系の減衰定数に相当する床応答スペクトルを周期軸方向に±10%拡幅した設計用床応答スペクトルを使用する。
 - (2) 配管系が建物階をまたいで支持される場合には、各階の設計用床応答スペクトルを包括する床応答スペクトルを用いる。
2. 時刻歴モーダル法
 - (1) 各端点、サポート点毎に、そのサポートの建物側の質点位置に直接時刻歴応答波を入力する。
 - (2) 入力する時刻歴応答波は、各端点、支持点が支持される各階のものを使用する。
(時刻歴応答波入力例)
 - ① 1階時刻歴応答波④入力位置 (桃色の支持点)
 - ② 2階時刻歴応答波⑤入力位置 (青色の支持点)
 - ③ 3階時刻歴応答波⑥入力位置 (黄色の支持点)

図15-17 配管系の耐震解析モデルの設定例

表15-7 配管系の設計用減衰定数

配 管 区 分		設計用減衰定数 (%)	
		保温材有	保温材無
I	スナバおよび架構レストレイント支持主体の配管系でその支持装置数が4個以上のもの	2.5	2.0
II	スナバ、架構レストレイント、ロッドレストレイント、ハンガ等を有する配管系でその支持装置（アンカおよびリボルト除く）数が4個以上のもので配管区分Iに属さないもの	1.5	1.0
III	配管区分IおよびIIに属さないもの	1.0	0.5

表15-8 「常陽」における実機配管振動試験結果（減衰定数）

配 管 系		配管口径	減衰定数 (%)
一 次 系	1次主冷却系配管	20B／22B	4.0～8.7
	1次補助冷却系配管	4B／6B	4.0～22.0
	1次アルゴンガス系配管	6B	4.3～16.0
二 次 系	2次主冷却系配管	12B	3.4～5.8
	2次補助冷却系配管	3B	3.8～10.1
	2次アルゴンガス系配管	3B	3.3～9.2

16. まとめ

昭和56年審査指針の考え方に基づき、高速実験炉「常陽」の耐震性を再評価した結果、建物の安定性、機器・配管系の構造健全性及び動的機器の機能維持に問題ないことが確認された。

なお、これら耐震性評価の「常陽」における地盤内伝播解析及び建物動的応答解析は、その手法の妥当性が確認されている技術指針1987年版及び技術指針1991年版に基づき、その解析モデルを設定している。また、解析モデルの諸条件は、敷地における地盤調査結果及び実機の起振実験等に基づき設定しており、その妥当性が確認されたものであり、かつ、諸定数に十分な保守性が考慮されていることを技術的に確認した。したがって、「常陽」における地盤内伝播解析及び建物動的応答解析は、妥当なものであり、保守性が十分考慮されたものであると判断している。

17. 参考文献

- (1) 電気技術基準調査委員会編, 電気技術指針原子力編 : 原子力発電所耐震設計技術指針
: JEAG4601-1987, (社) 日本電気協会 (1987年)
- (2) 電気技術基準調査委員会編, 電気技術指針原子力編 : 原子力発電所耐震設計技術指針
追補版 : JEAG4601-1991, (社) 日本電気協会 (1987年)
- (3) 宇佐美龍夫 : 新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会 (1987年)
- (4) 活断層研究会編 : 新編日本の活断層一分布図と資料, 東京大学出版会 (1991年)
- (5) 日本建築学会 : 建築基礎構造設計指針, (1988年制定)
- (6) 日本建築学会 : 塔状鋼構造設計指針 同解説, (1980年制定)
- (7) 日本建築学会 : 鋼構造設計規準, (1970年制定)
- (8) 磯崎和則, 野口芳宏, 菅谷和司, 富田直樹, 金城勝哉 : 「常陽」MK-Ⅲ冷却系改造に
係わる設計条件の整備 — 機器・配管構造設計用熱過渡条件の策定 — , PNC ZN9410 91-
313 (1991年9月)
- (9) 大崎順彦 : 原子力発電所設計用の基準地震動評価に関するガイドライン — 主として大
崎スペクトルについて — , ORI 研究報告84-01, 1984年12月, 大崎総合研究所
- (10) 大崎順彦 : 新・地震動のスペクトル解析入門, 1994年5月, 鹿島出版会
- (11) 土木学会編 : 動的解析と耐震設計 [第2巻] 動的解析の方法, 1989年7月, 技報堂出版
- (12) 柴田明徳 : 最新建築学シリーズ9 最新耐震構造解析, 1981年6月, 森北出版
- (13) 矢野明義, 土方勝一郎, 大島豊, 内山正次, 三浦賢治, 小黒栄市 : 埋込みを考慮した原子
炉建屋の地震応答解析法 (その2) S-Rモデルの検討, 昭和62年10月, 日本建築学会大
会学術講演梗概集 2101
- (14) 澤田誠, 前田清彦, 上島照幸, 大友敬三 : 「常陽」原子炉建物の起振実験, 1986年10月,
日本原子力学会 C23
- (15) 上島照幸, 岩楯敬広, 花田和史, 澤田誠 : 深く根入れされた高速実験炉「常陽」の地震
応答特性その(1)建屋加振動特性と地盤の動的抵抗係数の評価, 1986年, 第7回日本地震工
学シンポジウム 135
- (16) 矢野明義, 土方勝一郎, 大島豊, 内山正次, 阿部康彦, 米田玄次 : 埋込みを考慮した原
子炉建屋の地震応答解析法 (その4) 地震観測記録との比較・検討, 昭和62年10月, 日本
建築学会大会学術講演梗概集 2103