

アスファルト固化処理施設 爆発時の 各部屋境界部等の圧力評価 —設備等の破壊強度解析—

—アスファルト固化処理施設 火災爆発事故の原因究明・
再発防止に関する調査・検討—

1997年11月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

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。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

(A)

アスファルト固化処理施設 爆発時の各部屋境界部等の圧力評価 — 設備等の破壊強度解析 —

— アスファルト固化処理施設 火災爆発事故の原因究明・再発防止に
関する調査・検討 —

菊地直樹*
大森栄一*
山内孝道**

要旨

本報告書は、アスファルト固化処理施設で発生した火災・爆発事故の原因究明に
係る各種解析評価作業の一環として実施した、爆発時の各部屋境界部等の破壊圧力
の評価結果をまとめたものである。

本評価では、爆発規模の推定を目的に、施設内各部屋間の境界部となる遮へい扉、
ハッチ、ドアなどの建具類について、その破壊に必要な圧力を推定し、これら評価
結果を施設各階毎に圧力評価図として取りまとめた。

今回の解析評価結果は、爆発事故時の施設内の被害状況を定量的に説明し得るもの
であり、また、これにより爆発時に各部屋に発生した圧力を推定することが可能
となった。

*) 再処理工場 工務部 技術課

**) アスファルト固化処理施設 火災・爆発事故原因究明・再発防止対策班

**Evaluation of Pressure Added to Room Boundaries by Explosion
at Bituminization Facility
- Fracture Strength Analysis of Damaged Fixtures -**

Naoki Kikuchi*
Eiichi Omori*
Takamichi Yamanouchi**

Abstract

This report describes the results of evaluation of pressure added to room boundaries by explosion at bituminization facility where the fire and explosion accident occurred, for the purpose of investigating the cause of the accident.

Concerning the fixtures such as shielding door and hatch which were installed on the boundaries between the rooms, the pressure necessary to destroy them was calculated in order to estimate the scale of explosion. Summary of the above results were shown in pressure evaluation drawings.

In accordance with the evaluation, we can explain the explosion damage of the facilities quantitatively, and it will be able to estimate the pressure added to room boundaries.

*) Maintenance Section, Technical Service Division, Tokai Reprocessing Plant.

**) Investigation Group for Bituminization Facility Accident.

**アスファルト固化処理施設 爆発時の各部屋境界部等の圧力評価
— 設備等の破壊強度解析 —**

**— アスファルト固化処理施設 火災爆発事故の原因究明・再発防止に
関する調査・検討 —**

目 次

1. まえがき	1
2. 圧力評価の概要	2
2.1 建具類の主な被害状況	2
2.2 評価方法の概要	2
2.3 動的解析の必要性について	3
3. 圧力評価結果	18
3.1 破壊建具類	18
3.1.1 両開遮へい扉(CS-5)	18
3.1.2 シールディングウォール(M502)	19
3.1.3 シールディングドア(M503)	21
3.1.4 リムーバブルルーフ(M306)	22
3.1.5 油圧式ハッチカバー(M183) およびリムーバブルハッチ	23
3.2 非破壊建具類	24
3.2.1 シールディングドア(M107)	24
3.2.2 シールディングドア(M109)	24
3.2.3 シールディングドア(M153)	25
3.2.4 油圧式ハッチカバー(M182)	26
3.2.5 シールディングトラップドア(M184)	26
3.3 その他建具類	27
3.3.1 扉	27
3.3.2 エレベータドア	31

3.3.3 シャッター	34
3.3.4 外壁窓	36
3.4 壁	37
3.5 まとめ	37
4. あとがき	45
5. 謝辞	46
<参考文献>	47

添付資料 有限要素法による構造解析

1. まえがき

平成9年3月11日に発生したアスファルト固化処理施設の火災・爆発事故に係る各種解析評価を、以下の目的のもとに計画・実施している。

- ・ 施設の被害状況や事故の進展などを解析的に評価することを通じて、その解析過程又は結果において事故原因究明に有用な知見が得られる可能性に期待する。
- ・ 火災・爆発事故例の一つとして、各研究分野における各種解析に必要なデータ等を提供できうるよう、独自に解析を実施することを通じたデータ整理を行う。

これらのうち、爆発に係る解析評価では、爆発に寄与した物質やその量が確定していないため、施設内の被害状況から爆発エネルギーを各種の方法により推定する方針としている。

ここでは、爆発規模の推定を目的に、施設内各部屋間の境界部となる遮へい扉、ハッチ、ドアなどの建具類について、その破壊に必要な圧力の評価を実施した。

2. 圧力評価の概要

2.1 建具類の主な被害状況

爆発の発生元と想定されるアスファルト充てん室(R152)およびエクストルーダ室(R151)廻りに設置されている建具類に関する被害としては、R152 天井部(保守作業室(A234)床)に設置のリムーバブルルーフ(M306)の 5 基のうちの 2 基の落下が挙げられる。本来は自重により固定されているものが、下の R152 に 2 基が折り重なるように落下している。R152 と R151 の境界にあり R152 側よりボルトによって固定されていたシールディングウォール(M502)は、R152 側に吹き飛ばされており、取付ボルトはすべて外れ、外枠の一部が外れかかっている。エクストルーダモータ室(A133)と R151 の間にあるシールディングドア(M503)は、ドアロック部およびヒンジ部が破損し A133 側に落下している。R152 とカスク保管室(A121)の間にある両開遮へい扉(CS-5)は、北側の半分は残っているものの、南側部分はドアロック部およびヒンジ部が破損し A121 内に落下している。

その他の被害状況としては、トラックエアロック(G112)と通廊(G212)の間にあるリムーバブルハッチ(二分割構造)の G112 への落下(2 基共)、A121 とカスク操作室(G221)の間にある油圧式ハッチカバー(M183)の開放(跳ね上がり)、エレベータードアの湾曲外れ、外壁窓の破損、シャッターの湾曲外れ、各部屋間の扉の破損などが挙げられる。特に、扉については、施設 1 階、2 階を中心にかなり広い範囲で破損が見られ、その破損形態も、蝶番部鉄板の剥がれ、蝶番軸の破断、扉本体の湾曲など多岐にわたっている。

なお、これらの具体的な被害状況については、科技庁事故調査委員会提出資料^{1),2)}に記載の通りである。これらの情報を基に、評価の前提となる破壊モードの検討を実施した。

2.2 評価方法の概要

建具類の破壊圧力の評価方法としては、爆風を受け破壊した建具類については、その破壊状況(破壊部材の寸法、破断面の情報等)を基に破壊モードを検討し、破壊に必要な荷重を計算して、その近傍に生じた最低圧力(各部屋の境界部の破壊・開放時に作用した圧力)を推定する。

非破壊建具類については、爆風を受けた際に応力が集中する箇所(部材)を推定し、その部材の破壊荷重との比較から、その近傍に生じた最高圧力(破壊・開放に必要とされる圧力)を推定する。

これら評価方法の概要を表 2.2-1 に、評価対象建具類の概要を 図 2.2-1 ~ 図 2.2-13 に示す。表 2.2-1 では、爆発の発生元と想定されるアスファルト充てん室 (R152) およびエクストルーダ室 (R151) 近傍に設置されている破壊された建具類と破壊されていない建具類、その他、扉などの施設内各部にわたり設置されている建具類に分類・整理して、その評価方法の概要をまとめてある。

各部材に生じる荷重や曲げモーメントなどは、基本的には、平板の曲げやはりの計算などの簡易手法(手計算)により算出しているが、一部、簡易手法の体系ではモデル化しにくいものについては、有限要素法(FEM)による応力解析を実施した。

なお、FEM 解析による具体的な評価内容については、別途、報告書(公開予定)を取りまとめ中であるため、ここでは、その抜粋を添付資料にまとめて示す。

2.3 動的解析の必要性について

爆発事象では、急激な圧力上昇を伴うため、材料に負荷速度の高い動的荷重(衝撃荷重)が加わる可能性がある。動的荷重による破壊や強度は、通常の材料力学的手法で考慮される静的荷重による破壊や強度と異なったものとなるため、今回の建具類の破壊に対しその動的効果を考慮すべきか事前に検討する必要がある。

本件に関し、東工大の小林教授から、以下に示す助言をいただいた。

- ・ 動的効果を考える上で、以下の三つのポイントがある。

(1) 動的効果を検討する上で最初にすべきことは、気体側の動的な圧力上昇挙動を明確に把握することである。気体側の圧力挙動が確定して初めて固体側の応力伝播の解析が有効となる。入力条件が不明なまま固体側の応答解析を実施してもあまり意味がない。

(これに対し、今回の爆発では、各部屋間の境界部を破壊しながらの圧力伝播が生じており、各部屋に生じる圧力はかなり複雑な挙動を示すと考えられ、また、火炎乱れなど現状では評価不可能な事象を取扱う必要があることから、圧力変動(入力条件)を解析的に評価するのは極めて困難である。)

(2) 固体側の動的応答の一つとして、応力波伝播の問題がある。これは、パルス状の外力を加えた場合、その反射波との干渉により局部的に高い応力を発生することがあるという問題だが、爆発圧力がこのようなパルス状であるかどうかは疑問である。上記と同様、入力条件(圧力経時変化)を fix しなければ解析できない。また、単なる応力波の伝播なのか、ひずみ速度の影響なのか明らかにする必要がある。

(3) 材料の破壊特性などの性質は、ひずみ速度の大小により変わってくる。

応力・ひずみ関係に及ぼすひずみ速度 $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$ の影響は、

$$\sigma = C \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$$

で表される。金属材料の場合、 $n=0.1$ 、 $m=0.01$ のオーダーであるため、通常の静的な応力解析では $\dot{\varepsilon}$ の効果を無視しているが、動的効果が加味されると $\dot{\varepsilon}$ が大きくなりその効果が無視できず、結果として σ への影響が現れる。

すなわち、動的な破壊と静的な破壊では、図 2.3-1 に示す通り、その形態が異なったものとなる。動的な破壊は、気体側の急激な圧力上昇が固体側に作用することによりひずみ速度が大きくなり、降伏応力や引張強さが増大した後破壊に至るのに対し、静的な破壊では、ひずみ速度の影響が無視でき、上降伏点と下降伏点が現れる典型的な応力・ひずみ曲線に従い破壊が生じる。

- ・ 爆ごうでは衝撃波の伝播が生じ圧力上昇速度も大きくなるので、固体側の応答としてのひずみ速度も大きくなり、それに伴い動的効果がかなり大きくなる。爆ごうが生じていないのであれば、破壊に係る動的効果は無視できる。これは、今までの圧力容器や配管などの破壊を研究してきた経験に基づくもので、破壊圧力は静的強度で説明できており、(動的効果を加味し)その 2~3 倍になったという経験はない。
- ・ アスファルト充てん室から採取された M502 の破損ボルトの写真(図 2.3-2)から、曲げと引っ張りによる塑性変形後の塑性崩壊であると判断できる。また、ボルトが引っ張られ伸びながら破断した様子が見られ、この壊れ方は、典型的な応力・ひずみ曲線に沿った延性破壊であり、ひずみ速度が大きい場合に見られる脆性破壊ではなく、従って、動的な破壊形態ではないと言える。

以上の助言を踏まえ、建具類の動的解析は必要ないと判断し、静的な荷重が作用した場合の強度評価を実施することとする。

表2.2-1 破壊圧力の評価方法の概要 (1/3)

No.	分類	機器No.	機器名称	設置場所	評価方法の概要
1	破壊建具類	CS-5	両開遮へい扉	R152/A121	破損した南側の扉を、上下ヒンジ、中央上部ロックピンの3点支持の平板としてモデル化し、等分布圧力が加わった場合に下部ヒンジ(ボルトが破断した箇所)に働く軸力と曲げモーメントをFEM(有限要素法)により評価し、軸力と曲げモーメントを同時に受けるボルトの塑性崩壊条件から、その破壊に必要な圧力を推定。(図2.2-1参照)
		M502	シールディングウォール	R151/R152	鉄板本体を4辺固定支持の平板としてモデル化し、等分布圧力が加わった場合に4辺(固定ボルト)に働く軸力と曲げモーメントをFEMにより評価し、軸力と曲げモーメントを同時に受けるボルトの塑性崩壊条件から、その破壊に必要な圧力を推定。(図2.2-2参照)
		M503	シールディングドア	R151/A133	曲げ破損したドアロック回転軸部に関し、軸力と曲げモーメントを同時に受ける軸の塑性崩壊条件から、その降伏荷重を算出し、最終的に破壊に必要な圧力を推定。(図2.2-3参照)
		M306	リム-ハッチフル-フ	R152/A234	自重で載っているハッチ。(内圧上昇によりハッチに加わる荷重)>(ハッチ重量)より、圧力を推定。(図2.2-4参照)
		M183	油圧式ハッチカバー	A121/G221	同上
		—	リム-ハッチフルハッチ	G112/G212 G212/G312	同上
2	非破壊建具類	M107	シールディングドア	R152/R116	扉本体を扉上下端を単純支持とする平板として取扱い、等分布圧力が加わった場合に単純支持端に生じる反力と、支持端の構成部材のうち破損が一番起きやすい箇所と想定した下部ガイドローラ軸のせん断破壊荷重との比較から、その破損に必要な圧力を推定。(図2.2-5参照)

表2.2-1 破壊圧力の評価方法の概要 (2/3)

No.	分類	機器No.	機器名称	設置場所	評価方法の概要
1		M109	シールディングドア	R152/R116	R152側に設置された当該ドアは、爆風を受けた際にセル壁開口部で支持されるため、上下取付部(レール廻り)に生じる反力は無視し得ると考え、ドア本体の曲げ破損に必要な圧力を推定。(図2.2-6参照)
		M153	シールディングドア	R152/R122	同上
		M182	油圧式ハッチカバー	W120/G221	自重で載っているハッチ。当該ハッチは、爆風による被害は見られないため、(内圧上昇によりハッチに加わる荷重) < (ハッチ重量)より、圧力を推定。
		M184	シールディングトラップドア	R152/G221	横方向可動ハッチが上部鉄板で押さえられている構造。上部鉄板固定(ボルト締め)部、スクリューシャフト固定(ボルト締め)部を破損させ、鉄板本体を持ち上げるのに必要な荷重を計算し、これら破損に必要な圧力を推定。(図2.2-7参照)
3	その他建具類	—	扉	各部屋間	<p>扉の破損形態別に、以下の3通りの方法により、破壊に必要な圧力を推定。(大半は(1)の壞れ方である)</p> <p>(1) 蝶番部の破壊(蝶番取付部ドアパネルの破断、蝶番軸の破断や曲げ)に必要な荷重を、その破断面の状況を基に算出し、最終的に破壊に必要な圧力を推定。(図2.2-8、図2.2-9参照)</p> <p>(2) 幅方向に湾曲の見られる扉に関して、扉の上枠と左右両堅枠の3周辺端を単純支持とする平板としてモデル化し、扉下部中央に生じる最大曲げ応力と降伏応力との比較から、破壊に必要な圧力を推定。(図2.2-10参照)</p> <p>(3) 手計算では評価しにくい破損形態、具体的には、上部蝶番とドアロック部、下部蝶番とドアロック部を結ぶ2線上に沿って塑性ヒンジが生じている扉については、3点支持の平板としてモデル化し、その湾曲に必要な圧力をFEMにより解析。(図2.2-11参照)</p>

表2.2-1 破壊圧力の評価方法の概要 (3/3)

No.	分類	機器No.	機器名称	設置場所	評価方法の概要
		—	エレベータードア	A060／各階	エレベータードア本体を等分布荷重を受ける2点支持はりと仮定し、その曲げモーメントと、ドア本体が塑性変形を起こす際の極限曲げモーメントとの比較から、破損に必要な圧力を推定。(図2.2-12参照)
		—	シャッター	W120, G112	等分布荷重を受けた場合のスラット(シャッターの構成部材)1枚当たりに生じる曲げモーメントと、スラットが塑性変形を起こす際の極限曲げモーメントとの比較から、破損に必要な圧力を推定。(図2.2-13参照)
		—	窓	施設外壁	平均破壊荷重(数十枚以上の破壊実験の結果から統計的に求めたもの)を窓表面積で割り、破壊に必要な圧力を推定。 (当該施設では、3種類の寸法の異なる窓を使用)

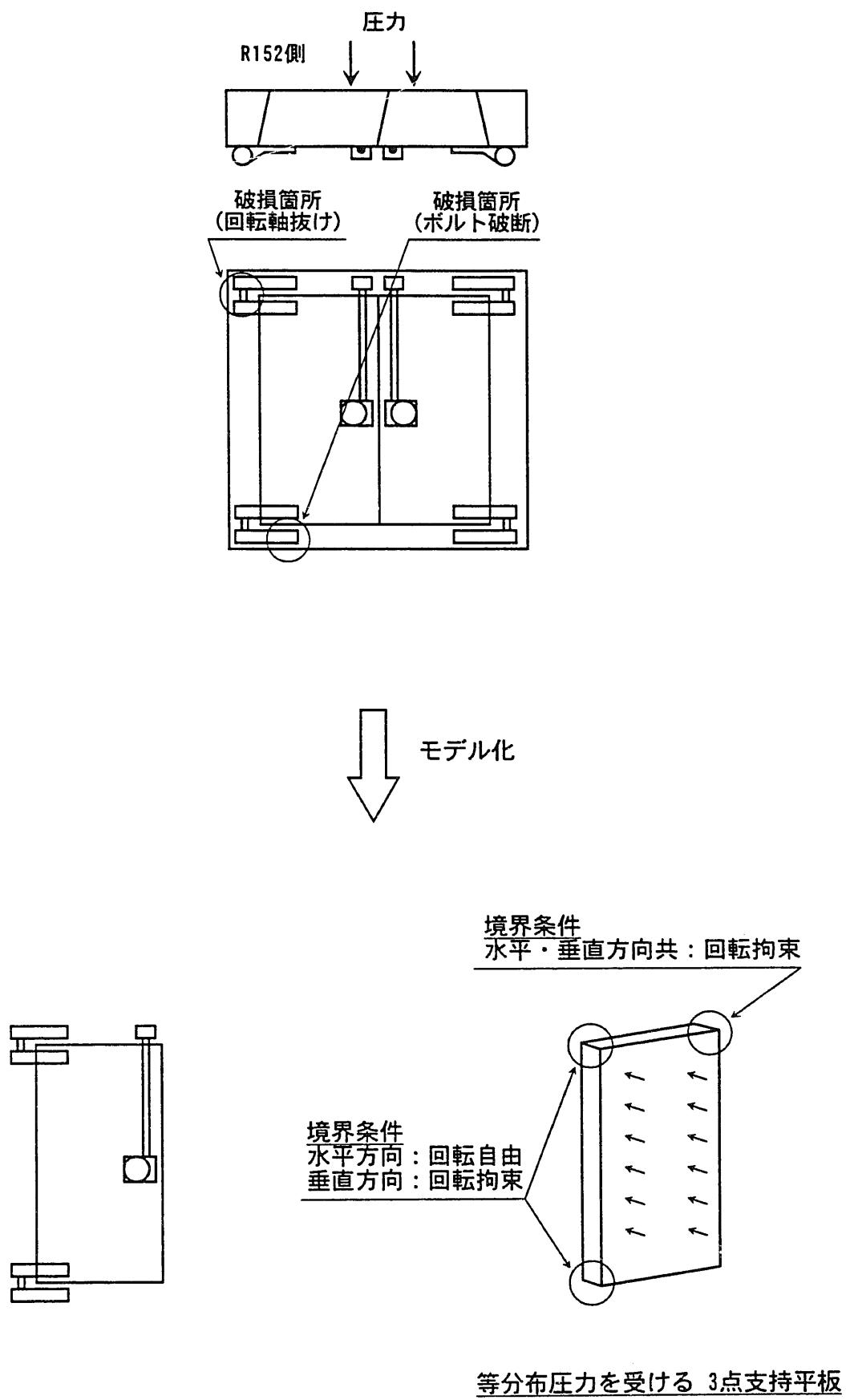
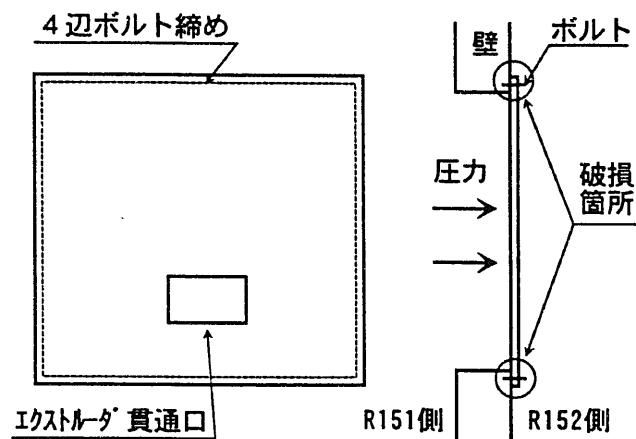
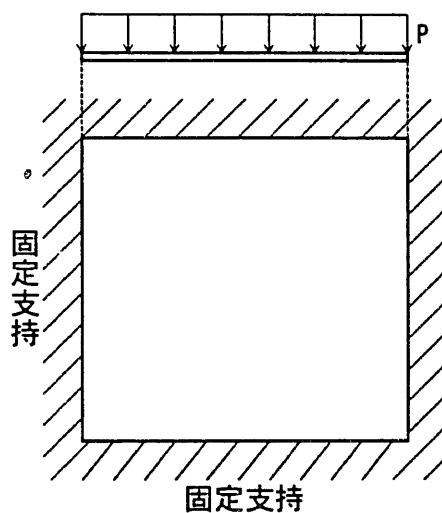


図2.2-1 CS-5 両開遮へい扉 (R152-A121)



↓ モデル化



等分布圧力を受ける 4辺固定支持平板

図2.2-2 M502 シールディングウォール (R152-R151)

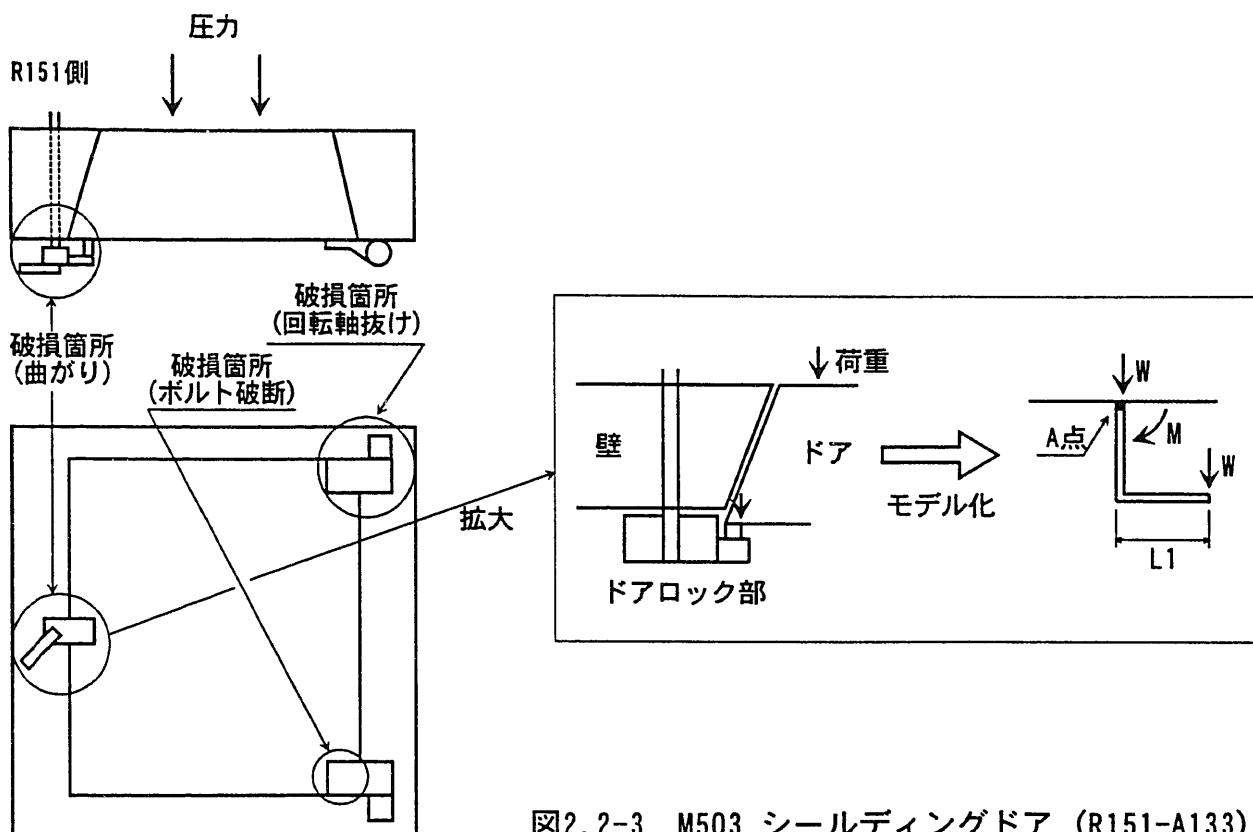


図2.2-3 M503 シールディングドア (R151-A133)

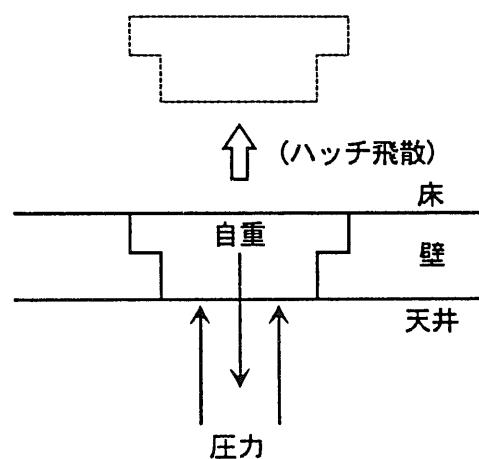


図2.2-4 M306 リムーバブルルーフ (R152-A234)

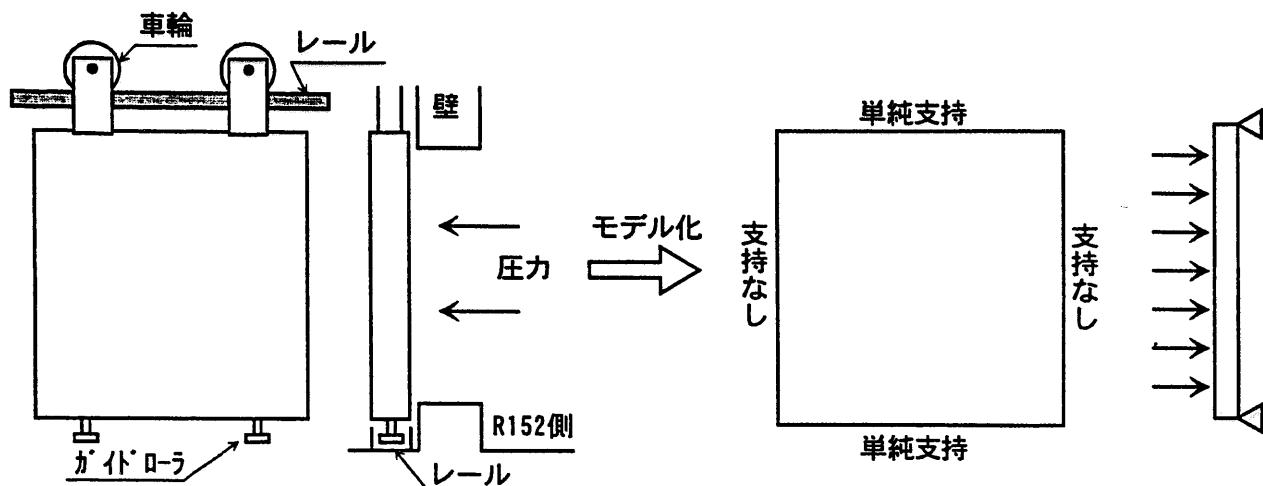


図2.2-5 M107 シールディングドア (R152-R116)

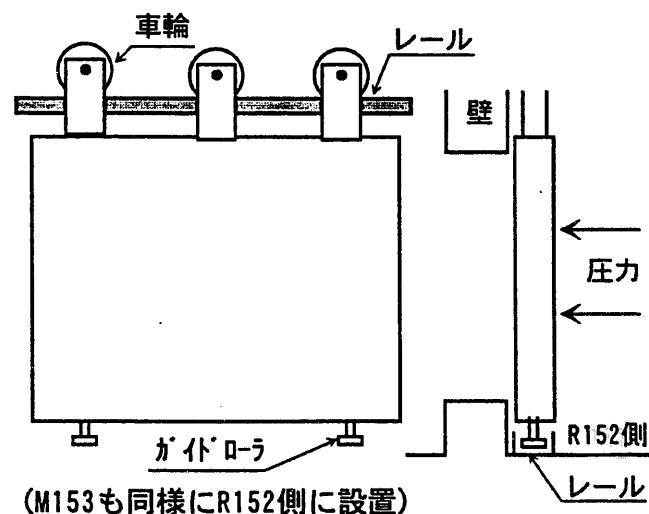


図2.2-6 M109 シールディングドア (R152-R116)

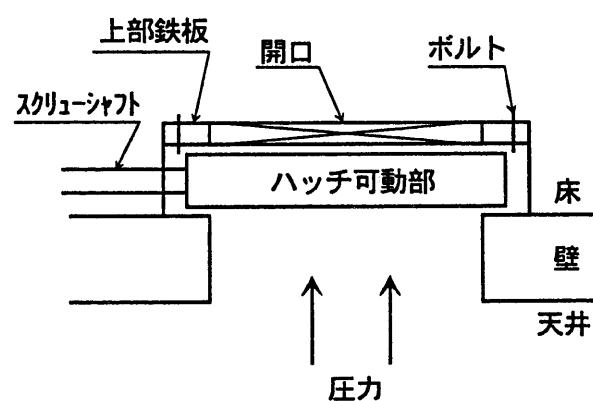


図2.2-7 M184 シールディングトラップドア (R152-G221)

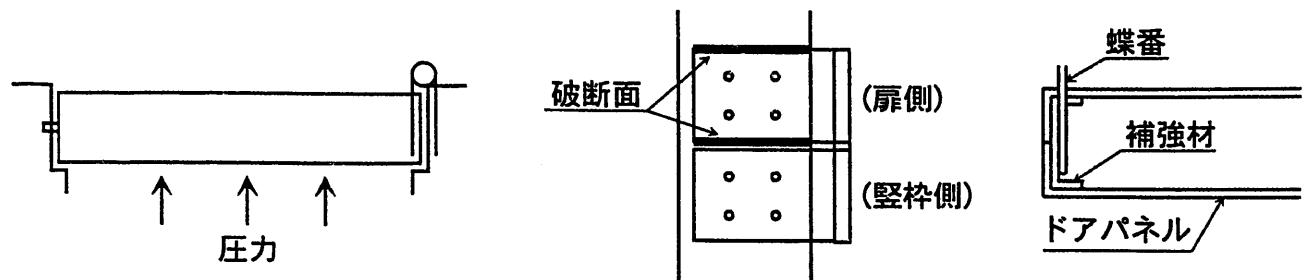


図2.2-8 扉（蝶番部鉄板の剥がれ破損）

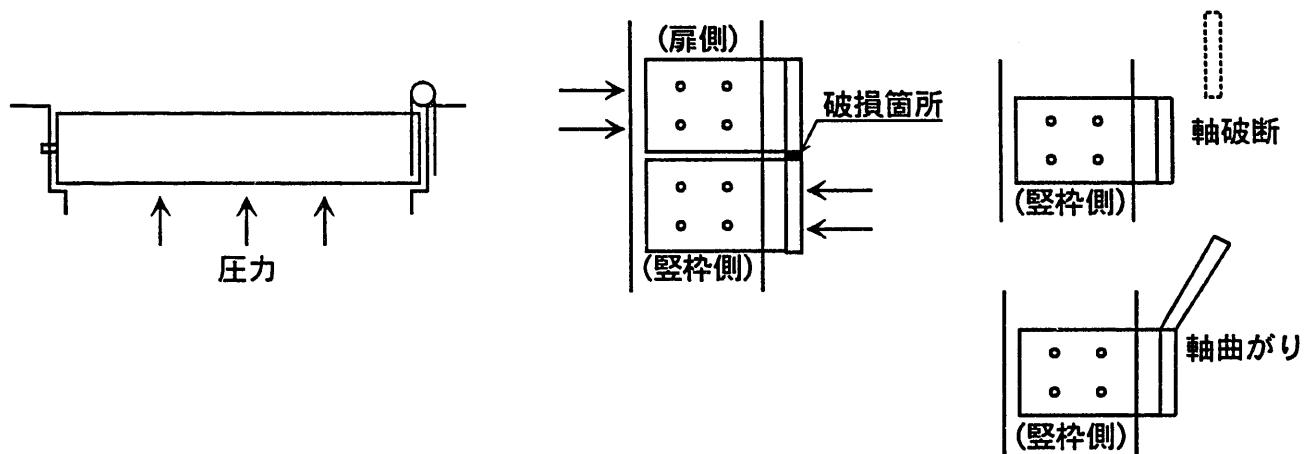


図2.2-9 扉（蝶番軸の破断および曲げ破損）

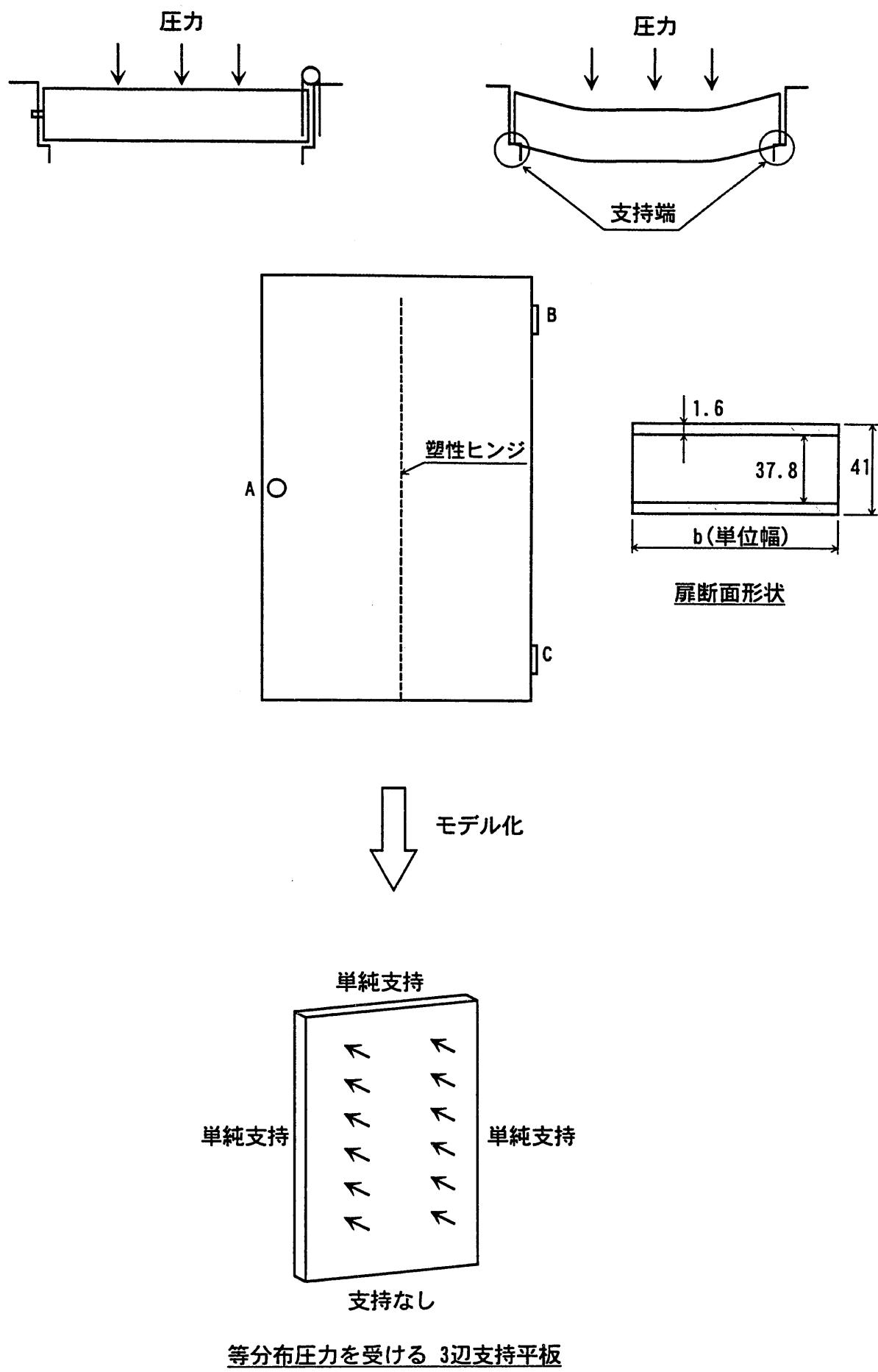


図2.2-10 扇（扇本体の幅方向への曲げ破損）

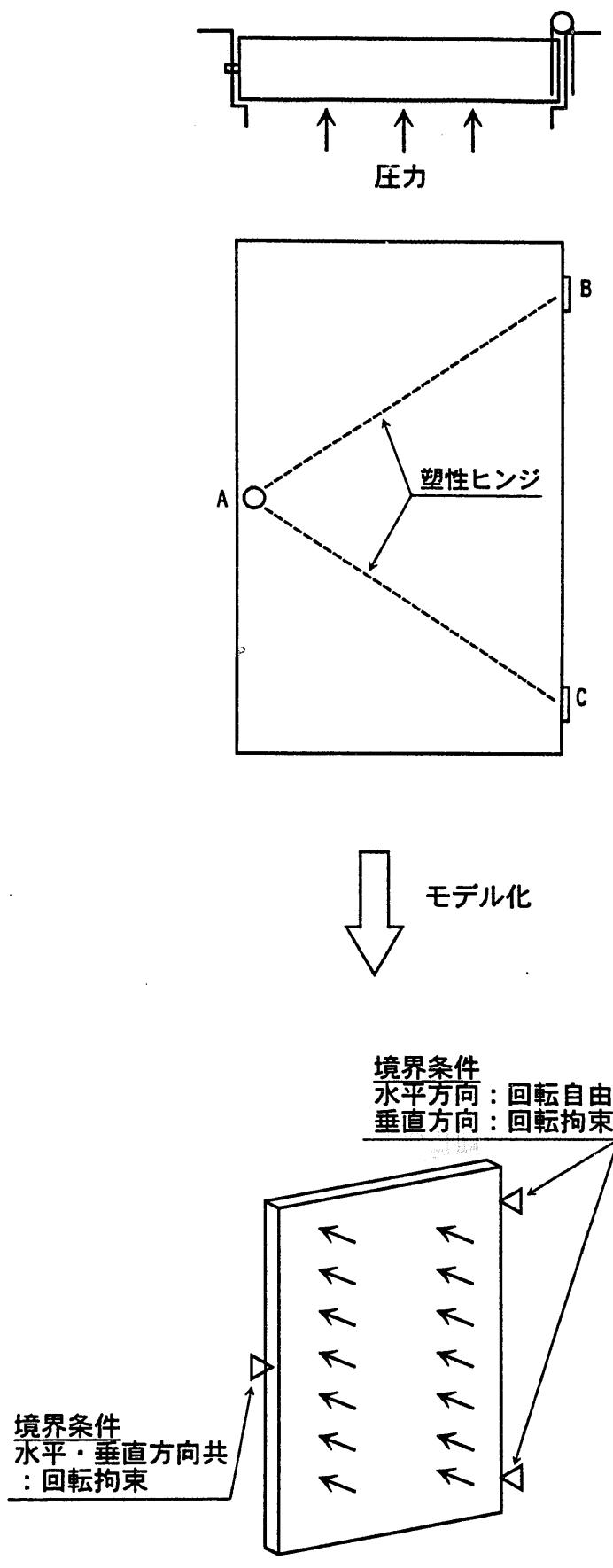


図2.2-11 扉（蝶番-ドアロック間の曲げ破損）

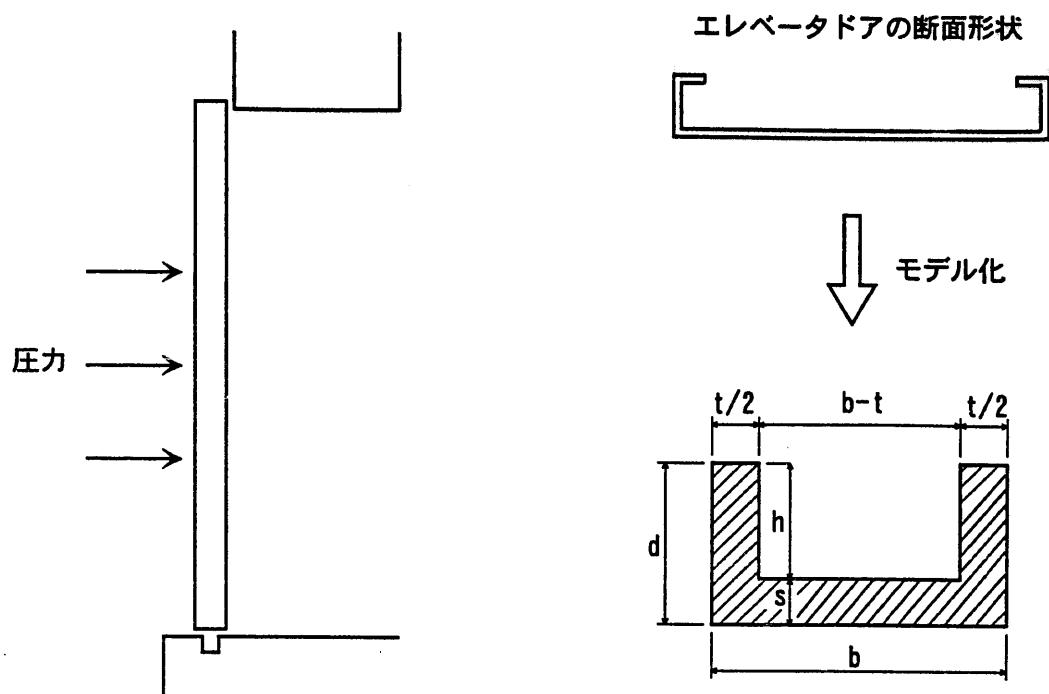


図2.2-12 エレベータドア

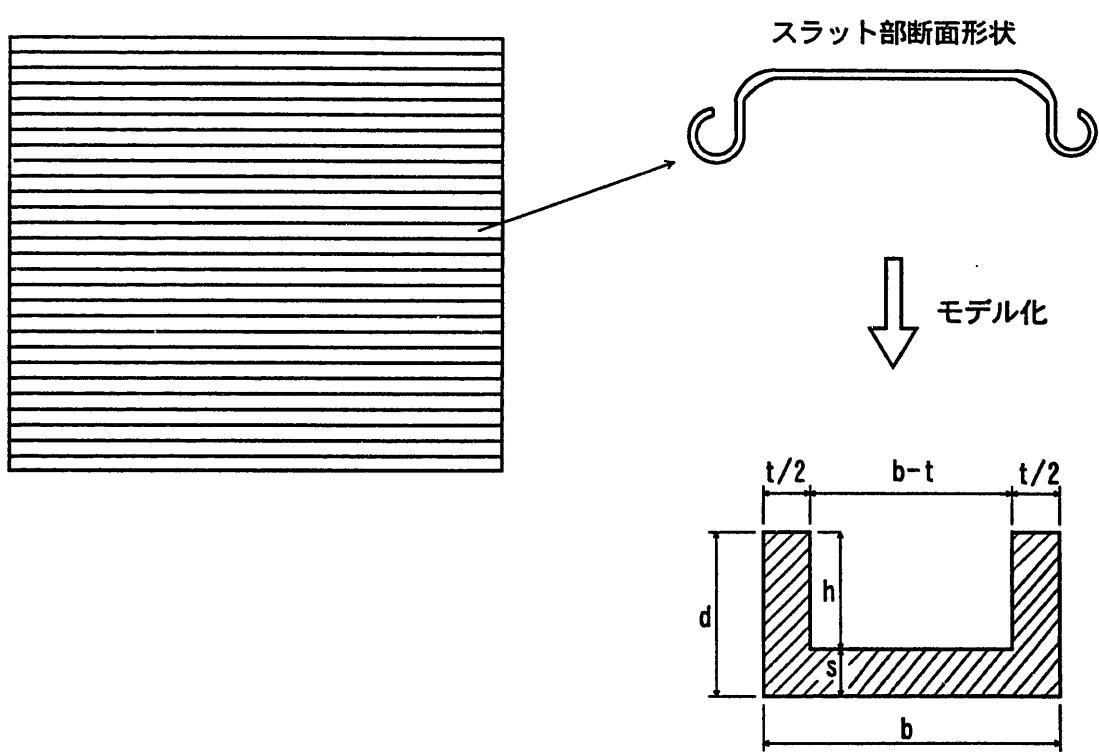
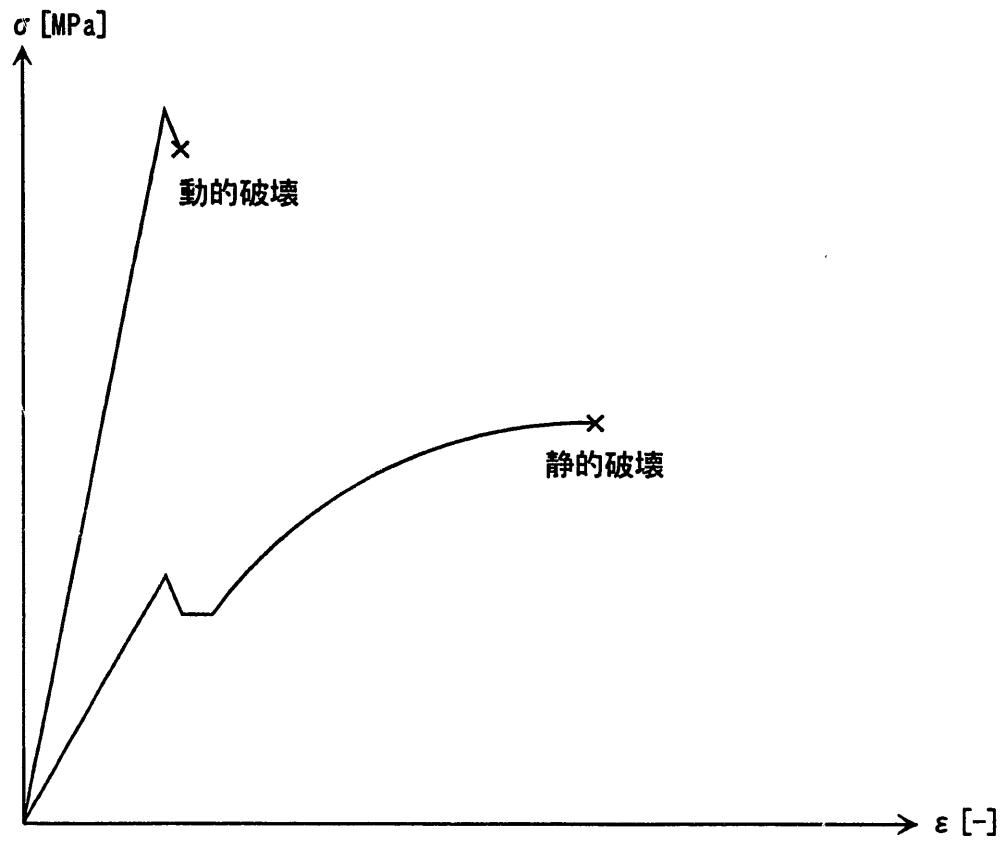
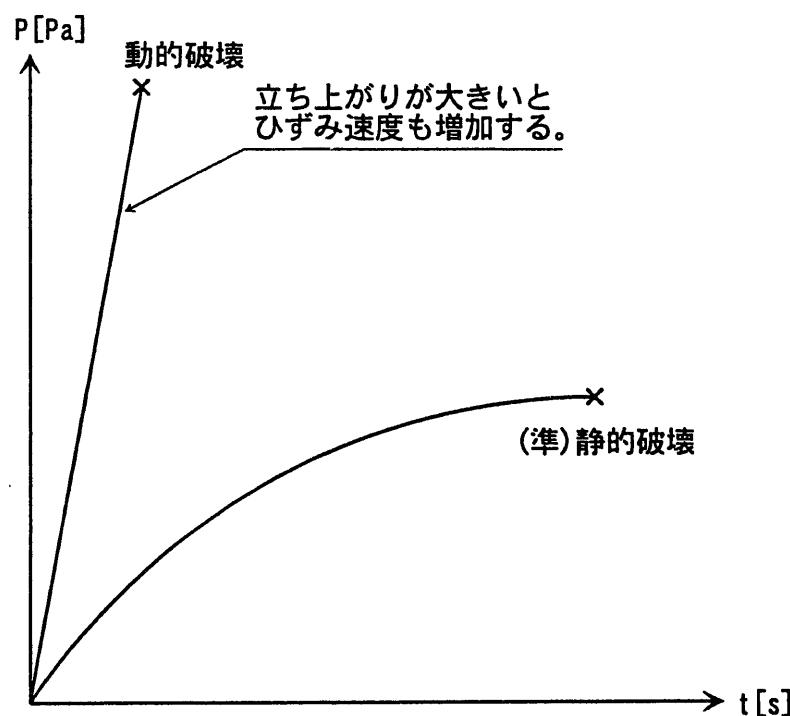
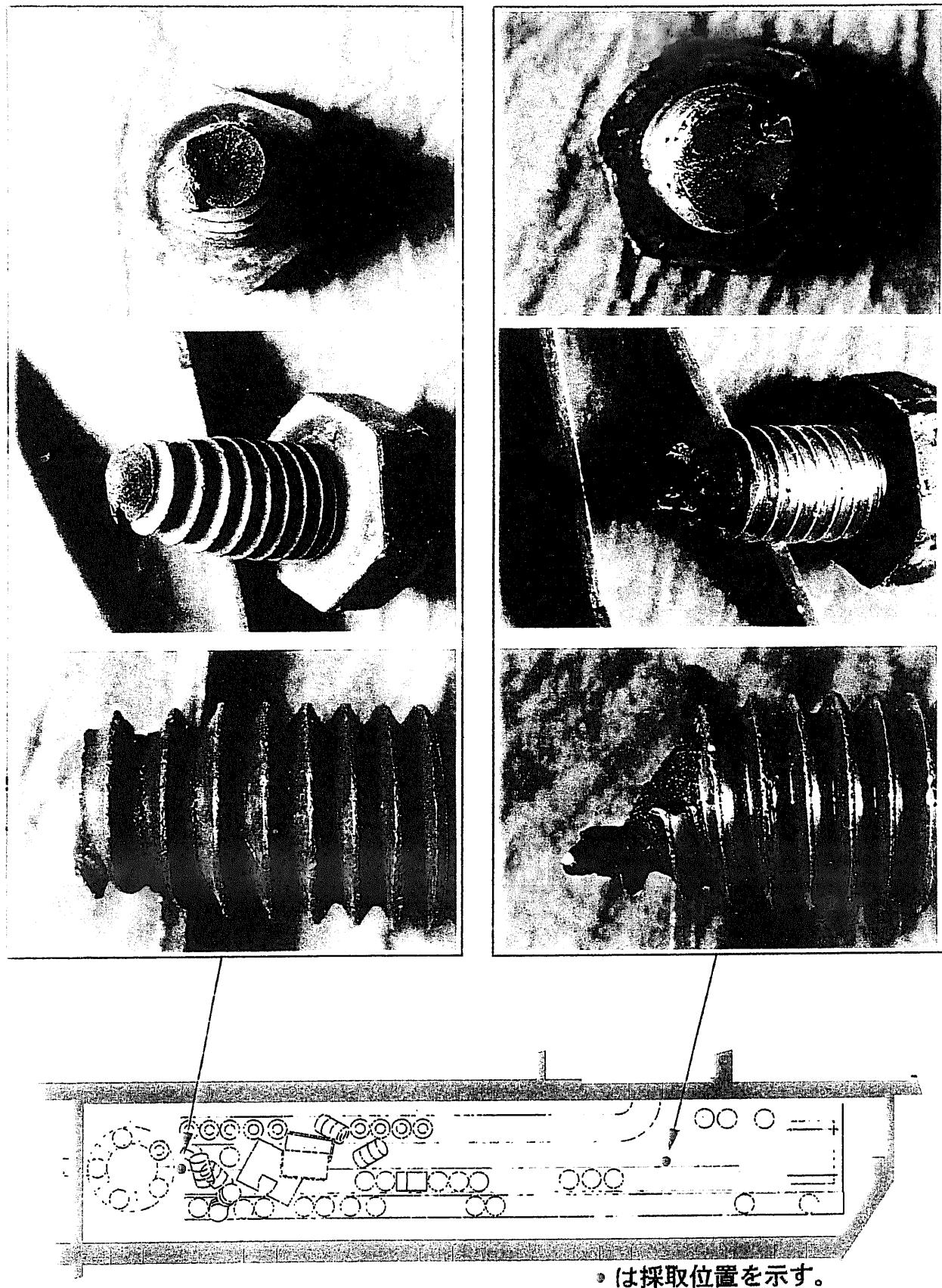


図2.2-13 シャッター

応力・ひずみ曲線圧力・時間関係図2.3-1 動的破壊と静的破壊の相違



・は採取位置を示す。

図 2.3-2 アスファルト充てん室内からの採取ボルト (M12)

3. 圧力評価結果

3.1 破壊建具類

3.1.1 両開遮へい扉 (CS-5)

アスファルト充てん室(R152)とカスク保管室(A121)の間に設置されている両開遮へい扉(CS-5)については、南側の扉のみ吹き飛ばされている。当該扉は、上下2箇所のヒンジで固定されており、扉中上部のロックピンによりロックされている。当該扉の破損状況としては、南側扉の下部ヒンジ取付用ボルト6本すべてが破断してヒンジごと取付枠から外れている。その結果、上部ヒンジの回転軸が軸受部から抜けて、最終的に扉本体が吹き飛ばされたと思われる。なお、南側扉のロックピンおよびドアハンドルにも破損が見られるが、これらは扉が倒れた際に扉の自重で破損したものと想定し、これらの破壊荷重は考慮しないこととする。

従って、ここでは、ヒンジの取付用ボルトの破断に必要な荷重を求め、当該扉にR152側から加わった圧力を推定することとする。具体的には、破損した南側の扉を、上下ヒンジ、中央上部ロックピンの3点支持の平板としてモデル化し(図2.2-1参照)、等分布圧力が加わった場合に下部ヒンジ(ボルトが破断した箇所)に働く軸力と曲げモーメントを有限要素法(FEM)により求め、軸力と曲げモーメントを同時に受けるボルトの塑性崩壊条件から、その破壊に必要な圧力を推定する。

ここで、FEMによる解析結果を基にした破壊圧力の算出は、以下に示す手順で行うこととする。(次3.1.2項のM502についても同様)

- (a) FEMにより、基準圧力 1 kg/mm^2 に対する支持点の軸力 W と曲げモーメント M を求める。
- (b) 破損時に実際に作用した圧力を $P \text{ kg/mm}^2$ とし、その際の支持点の軸力と曲げモーメントを、それぞれ、 WP 、 MP とする。
- (c) 軸力と曲げモーメントを同時に受けるボルトの塑性崩壊条件式³⁾

$$\left(\frac{W}{W_B}\right)^2 + \frac{M}{M_B} = 1$$

において、 W 、 M を、それぞれ、 WP 、 MP に置き換え、また、軸力のみ作用した場合のボルトの破壊荷重 W_B

$$W_B = \sigma_B A \quad (\sigma_B : \text{引張強さ}, A : \text{断面積})$$

曲げモーメントのみ作用した場合のボルトの極限曲げモーメント M_B

$$M_B = \sigma_B Z_p \quad (\text{円形断面の塑性断面係数 } Z_p = \frac{1}{6}d^3, d : \text{直径})^4)$$

を代入し、すなわち、

$$\left(\frac{WP}{\sigma_B A} \right)^2 + \frac{MP}{\sigma_B \times (1/6) \times d^3} = 1 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

より、ボルト 1 本当たりの破壊に必要な圧力 P を求める。

(d) 上記 P に、支持点にある破断したボルトの本数をかけ、破壊圧力を求める。

添付資料の FEM 解析結果によると、支持点(下部ヒンジ)の軸力と曲げモーメントは、それぞれ、 $5.46 \times 10^7 \text{ kg}$ 、 $1.59 \times 10^7 \text{ kg}\cdot\text{mm}$ であるが、これらを 6 本のボルトで均等に受け持つとして、ボルト 1 本当たりに生じる軸力と曲げモーメントを

$$W = 5.46 \times 10^7 \times \frac{1}{6} \text{ [kg]} \quad M = 1.59 \times 10^7 \times \frac{1}{6} \text{ [kg}\cdot\text{mm]}$$

とする。これらの値と、

$$\sigma_B = 400 \text{ [N/mm}^2] \quad (\text{ボルト材料 (SS41) の引張強さ。JIS G3101 より})$$

$$d = 13.835 \text{ [mm]} \quad (\text{ボルト (M16) のねじ谷径。JIS B0205 より})$$

$$A = (\pi/4) \times 13.835^2 \text{ [mm}^2]$$

を(1)式に代入して、ボルト 1 本の破断に必要な圧力 P を求めると、

$$\left(\frac{5.46 \times 10^7 \times (1/6) \times 9.80665 \times P}{400 \times (\pi/4) \times 13.835^2} \right)^2 + \frac{1.59 \times 10^7 \times (1/6) \times 9.80665 \times P}{400 \times (1/6) \times 13.835^3} = 1$$

$$\therefore P = 6.4 \times 10^{-4} \text{ [kg/mm}^2] = 0.064 \text{ [kg/cm}^2]$$

従って、下部ヒンジの 6 本の取付用ボルトを破断させ、南側扉を吹き飛ばすのに必要な圧力(R152 内圧)は、 $0.064 \times 6 = \underline{\underline{0.38 \text{ kgf/cm}^2 (37 \text{ kPa) 以上}}$ となる。

3.1.2 シールディングウォール (M502)

アスファルト充てん室(R152)とエクストルーダ室(R151)の間に設置されているシールディングウォール(M502)は、R152 側に 1 スパン程度吹き飛ばされている。M502 は、厚さ 6 mm の鉄板で、中央下部にエクストルーダ貫通口があり、後面(R151 側)は L 形鋼で補強されている。破損の形態としては、鉄板本体の取付部(ボルト)が破損しており、また、その鉄板本体の破損状況より¹⁾ R151 側から圧力が加わったものと想定される。

従って、ここでは、鉄板本体の取付用ボルトの破壊に必要な圧力を推定する。具

体的には、図 2.2-2 に示すように、鉄板本体を 4 辺固定支持の平板としてモデル化し、等分布圧力が加わった場合に 4 辺(固定ボルト)に働く軸力と曲げモーメントを FEM により求め、軸力と曲げモーメントを同時に受けるボルトの塑性崩壊条件から、その破壊に必要な圧力を推定する。なお、今回の評価手法の妥当性については、前 2.3. 項で記載の通り、破損ボルトの写真(図 2.3-2)から判断できる。

添付資料の FEM 解析結果によると、固定端に生じる軸力と曲げモーメントは、左右端(長辺)中央(固定点 C)で最大となり、それぞれ、 $1.27 \times 10^5 \text{ kg}$ 、 $2.48 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ となる。M502 は、4 周辺端に均等間隔(ピッチ : 150mm)で配置された計 54 本のボルトで固定されており、これらボルトに作用する軸力と曲げモーメントは配置場所により若干異なっているが、ここでは、最大値で代表して評価することとする。すなわち、 $W = 1.27 \times 10^5 \text{ [kg]}$ 、 $M = 2.48 \times 10^7 \text{ [kg} \cdot \text{mm]} \text{ とする。}$

これらの値と、

$$\sigma_B = 400 \text{ [N/mm}^2\text{]} \text{ (ボルト材料 (SS41) の引張強さ。JIS G3101 より)}$$

$$d = 10.106 \text{ [mm]} \text{ (ボルト (M12) のおねじ谷径。JIS B0205 より)}$$

$$A = (\pi / 4) \times 10.106^2 \text{ [mm}^2\text{]}$$

を前 3.1.1. 項の(1)式に代入して、ボルト 1 本の破断に必要な圧力 P を求めると、

$$\left(\frac{1.27 \times 10^5 \times 9.80665 \times P}{400 \times (\pi / 4) \times 10.106^2} \right)^2 + \frac{2.48 \times 10^7 \times 9.80665 \times P}{400 \times (1/6) \times 10.106^3} = 1$$

$$\therefore P = 2.8 \times 10^{-4} \text{ [kg/mm}^2\text{]} = 0.028 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

ここで、4 周辺端のうち、上端と下端、左端と右端では、対称点における軸力と曲げモーメントは同一値であり、また、当該平板の形状(上下端 1900 mm、左右端 2000 mm)から、左右端(長辺)における軸力と曲げモーメントの総和の方が大きくなっている。今回の評価においては、軸力と曲げモーメントが最大の一端、すなわち、左端(あるいは右端)におけるボルトの塑性崩壊条件 × 本数により、破壊圧力を推定することとする。

従って、(4 隅にある 2 本のボルトも含めて)左端(あるいは右端)15 本のボルトの破断に必要な圧力(R151 内圧)は、 $0.028 \times 15 = \underline{0.42 \text{ kgf/cm}^2 (41 \text{ kPa}) \text{ 以上}}$ となる。

なお、参考までに、M502 の破壊圧力を簡易手法(手計算)により評価した結果を以下に示す。

M502 を等分布圧力を受ける 4 辺固定支持の平板の問題として取扱い、固定支持端に生じる軸力と曲げモーメントから、破壊に必要な圧力 P を推定する。

ボルト 1 本当たりの軸力 W は、当該鉄板に生じる荷重 PA を上下左右端のボルト

54本で受けるものとして、 $W = (1/54) \times P \times 1900 \times 2000$

固定支持端に生じる単位長さ当たりの曲げモーメント M_x は、 $M_x = 0.0547 \text{ Pa}^2$ ⁵⁾
ボルト 1 本が受ける曲げモーメント M は、固定支持端全体にかかる曲げモーメント
をボルトピッチ(150mm)毎に均等に受けるものとして、

$$M = 0.0547 \times \text{Pa}^2 \times 150 \quad \text{とする。}$$

これらをボルトの塑性崩壊条件式に代入して、ボルト 1 本の塑性崩壊・破断に必要な圧力 P を求めると、

$$\left(\frac{(1/54) \times P \times 1900 \times 2000}{400 \times (\pi/4) \times 10.106^2} \right)^2 + \frac{0.0547 \times P \times 1900^2 \times 150}{400 \times (1/6) \times 10.106^3} = 1$$

$$\therefore P = 2.3 \times 10^{-3} [\text{N/mm}^2] \rightarrow 0.023 \text{ kgf/cm}^2$$

従って、(4隅にある 2 本のボルトも含めて)左端(あるいは右端)15 本のボルトの
破断に必要な圧力(R151 内圧)は、 $0.023 \times 15 = 0.35 \text{ kgf/cm}^2$ 以上 となり、
FEM による解析結果(0.42 kgf/cm^2 以上)と大きな違いはないことが分かる。

3.1.3 シールディングドア(M503)

エクストルーダ室(R151)とエクストルーダモータ室(A133)の間に設置されているシールディングドア(M503)は、R151 内圧上昇により取付部が破損し吹き飛ばされている。破損状況としては、ドアロック部が曲げ破損し、また、下部ヒンジについては、ドア側のボルトが破断しヒンジブラケットがドアから外れ、上部ヒンジは、回転軸が軸受部から抜けた状況となっている。また、扉の開放側の壁が大きく損傷している。これら破壊のシナリオとしては、R151 側からの荷重付加により、まず、ドアロック回転軸に曲げ破損が生じ、ロックが外れドアが開き、ドア本体が上下ヒンジ軸を中心として急激に回転し、壁に衝突した際に下部ヒンジのドア側のボルトが破断し、上部ヒンジの回転軸が抜け、結果として、ドアが吹き飛ばされたと想定される。すなわち、当該ドアの開放・破壊に必要な圧力としては、ドアロック軸の曲げ破損に必要な荷重のみ考慮すればよいと考えられる。

当該ドアロック部の回転軸の曲げに働く荷重は、図 2.2-3 に示す A 点廻りの曲げモーメント M による荷重と単軸方向の引張荷重 W であり、これらの荷重により当該回転軸に塑性変形が生じたものとして、以下計算する。

軸力(引張荷重)と曲げモーメントを同時に受ける回転軸の塑性崩壊条件は、

$$\left(\frac{W}{W_y} \right)^2 + \frac{M}{M_p} = 1 \quad \text{で与えられる}^3).$$

ここで、引張降伏荷重 $W_y = \sigma_y A = 390 \times \pi / 4 \times 22^2 [N]$
 (σ_y : 降伏応力 390 N/mm^2 (S35C)、A : 回転軸の断面積)
 曲げモーメント $M = W \times L_1 = W \times 62.5 [N \cdot mm]$

$$\text{極限曲げモーメント } M_p = \sigma_y Z_p = 390 \times \frac{1}{6} \times 22^3 [N \cdot mm]$$

$$(\text{塑性断面係数 } Z_p = \frac{1}{6} d^3)^4)$$

これらを回転軸の塑性崩壊条件式に代入して、曲げに必要な降伏荷重 W は、

$$\left(\frac{W}{390 \times (\pi / 4) \times 22^2} \right)^2 + \frac{W \times 62.5}{390 \times (1/6) \times 22^3} = 1$$

$$\therefore W = 1.10 \times 10^4 [N] = 1.12 \times 10^3 [\text{kgf}]$$

また、面積 A の当該ドアが等分布圧力 P を受ける場合の、ドアロック回転軸の軸力 W は、単純支持端に生じる反力に相当し、

$$W = (PA) / 2 \quad (\text{2点支持はりと同様}) \quad \text{で与えられる。}$$

従って、当該ドアを破損させるのに必要な圧力 P (R151 内圧) は、その開口部寸法 $62 \text{ cm} \times 81 \text{ cm}$ より、

$$P = 2W/A = (2 \times 1.12 \times 10^3) / (62 \times 81) = \underline{0.45 \text{ kgf/cm}^2 (44 \text{ kPa}) \text{ 以上}} \text{ となる。}$$

なお、塑性変形が生じる当該回転軸の加工硬化を考慮する場合は、 σ_y を

$$\sigma_{ey} = \frac{\sigma_y + \sigma_b}{2} \quad (\sigma_b : \text{引張強さ } 570 \text{ N/mm}^2 \text{ (S35C)}) \quad \text{で置き換え計算する。}$$

すなわち、 $\sigma_{ey} = \frac{390 + 570}{2} = 480 [\text{N/mm}^2]$ を塑性崩壊条件式に代入して、

$$\left(\frac{W}{480 \times (\pi / 4) \times 22^2} \right)^2 + \frac{W \times 62.5}{480 \times (1/6) \times 22^3} = 1$$

$$\therefore W = 1.36 \times 10^4 [N] = 1.39 \times 10^3 [\text{kgf}]$$

従って、加工硬化を考慮する場合の、当該ドアを破損させるのに必要な圧力 P (R151 内圧) は、

$$P = 2W/A = (2 \times 1.39 \times 10^3) / (62 \times 81) = \underline{0.55 \text{ kgf/cm}^2 (54 \text{ kPa}) \text{ 以上}} \text{ となる。}$$

3.1.4 リムーバブルループ(M306)

アスファルト充てん室(R152)上部に設置されているリムーバブルループ(M306)は、爆発に伴う R152 内圧上昇により吹き飛ばされている。M306 は、開口部上部に

自重で載せてあるもので、異なる大きさのハッチ 5 基より構成されており、これらのうち 2 基が下の部屋(R152)に落下し、残り 3 基は位置決めピンから外れ全体がずれていることが確認されている。従って、R152 内圧上昇により、これらはすべて吹き飛ばされたものと想定される。その内圧上昇によりハッチを飛ばすには、

内圧上昇によりハッチに加わる荷重 > ハッチの重量
が成立すればよい(図 2.2-4 参照)。

ここで、M306 ハッチの全重量は、ハッチ No.1~5 の各重量 4830 kg、2650 kg、2245 kg、3847 kg、3379 kg に、吊り金具の重量 47 kg を加えて、合計 16998 kg である。

従って、開口部面積 80850 cm² (開口部寸法 490cm × 165cm) より、当該ハッチを飛ばすのに必要な R152 内圧は、

$$16998 / 80850 = \underline{0.21 \text{ kgf/cm}^2 (21 \text{ kPa}) \text{ 以上}}$$

3.1.5 油圧式ハッチカバー(M183)およびリムーバブルハッチ

アスファルト充てん室(R152)に直接面していない箇所、すなわち、R152 以外の部屋に設置されているハッチで、爆風により吹き飛ばされたものは 3 基あり、一つは、カスク操作室 G221(カスク保管室 A121 の真上)に設置されている油圧式ハッチカバー(M183)、もう一つは、通廊 G212(トラックエアロック G112 の真上)に設置されているリムーバブルハッチ、更には、通廊 G312 (G212 の真上)に設置されているリムーバブルハッチ(G212 のハッチと同一仕様)についても、吹き飛んではいないものの開口からずれていて外れそうな状況にある。これらのハッチは、すべて開口部上部に自重で載せてあるもので、その重量および開口部寸法は、それぞれ、

- ・ M183 : 重量 2500 kg、開口部寸法 350 cm × 400 cm
- ・ リムーバブルハッチ : 重量 650 kg、開口部寸法 250 cm × 250 cm

ここでは、これら 3 基のハッチがすべて吹き飛ばされたものとして、その飛散に必要な圧力を評価する。内圧上昇によりハッチを飛ばすには、

内圧上昇によりハッチに加わる荷重 > ハッチの重量

が成立すればよく、従って、ハッチを飛ばすのに必要な圧力は、それぞれ、以下の通りとなる。

- ・ M183 : $2500 / (350 \times 400) = \underline{0.018 \text{ kgf/cm}^2 (1.8 \text{ kPa}) \text{ 以上}}$
- ・ リムーバブルハッチ : $650 / (250 \times 250) = \underline{0.010 \text{ kgf/cm}^2 (0.98 \text{ kPa}) \text{ 以上}}$
(2F、3F)

3.2 非破壊建具類

3.2.1 シールディングドア(M107)

アスファルト充てん室(R152)とコンベア室(R116)の間にあるシールディングドア(M107)は、R116側に設置されており、横方向へのスライド移動で開閉するものである。当該ドアが閉じた状態でR152側から圧力を受けた場合、上下取付部を支点としてドア全体がたわむと予想されるため、その際に生じる反力によりこれら取付部を破損させるのに必要な圧力を推定することとする。

具体的には、図2.2-5に示すように、当該ドアをドア上下端を単純支持とする平板の問題として取扱うこととする。この場合、すなわち、面積Aのドアが等分布圧力Pを受ける場合、単純支持端に生じる反力Rは、

$$R = (PA)/2 \quad (2\text{点支持はりと同様})$$

となる。当該反力が固定部材の引張(あるいはせん断)強さより大きい場合に破損が生じる。上下固定部のうち、破損が一番起きやすい箇所としては、部材の一番小さい下部ガイドローラ軸と思われ、従って、ここでは、そのせん断破壊に必要な圧力を求めることとする。

ガイドローラ軸(使用材料 S35C)のせん断破壊応力を引張強さ 570 N/mm^2 (JIS鉄鋼I添付参考資料より) の $1/\sqrt{3}$ 倍であるとし、せん断部面積 $\pi/4 \times 30^2 \text{ mm}^2$ より、2本のガイドローラ軸の破断に必要な圧力Pを計算すると、

$$\frac{PA}{2} = \frac{570}{\sqrt{3}} \times \frac{\pi}{4} \times 30^2 \times 2$$

ここで、ドア開口部の寸法 $1100 \text{ mm} \times 1350 \text{ mm}$ より、

$$P = \frac{570/\sqrt{3} \times \pi/4 \times 30^2 \times 2 \times 2}{1100 \times 1350} = 0.63 [\text{N/mm}^2]$$

$$\rightarrow \underline{6.4 \text{ kgf/cm}^2 (6.3 \times 10^2 \text{ kPa}) \text{ 以下}} \text{ となる。}$$

3.2.2 シールディングドア(M109)

アスファルト充てん室(R152)とコンベア室(R116)の間にあるシールディングドア(M109)は、M107と同様、横方向へのスライド移動で開閉するものである(図2.2-6参照)。但し、当該ドアは、R152側に設置されており、閉じた状態でR152側から圧力を受けた場合、ドア本体は開口部の4周辺端で支持されるため、上下固定取付部(レール廻り)に生じる反力は無視し得る。従って、当該ドアが圧力を受けた場合、上下固定取付部廻りの部材が破損することは考えにくく、破損が生じるとすれば、ドア本体の湾曲か開口部周辺端(壁)の破壊かいずれかである。従って、ここでは、ドア本体の湾曲に必要な圧力Pを求めることとする。

当該ドア本体を4周辺端を単純支持とする平板の問題とした場合、ドア中央部に生じる最大曲げ応力 σ_{\max} は、下式で与えられる⁶⁾。

$$\sigma_{\max} = \beta_1 \frac{Pa^2}{h^2}$$

ここで、 β_1 ：平板の最大応力係数、P：圧力、a：短辺長さ、b：長辺長さ、h：平板の厚さ

ここで、a=1600、b=2000 より、b/a=1.25 であり、これに対応する β_1 は、 $\beta_1=0.4$ となる⁷⁾。また、h=210、使用材料(SS41)の降伏点 245 N/mm² (JIS G3101) より、当該ドアの曲げ破損に必要な圧力 P は、

$$0.4 \times \frac{P \times 1600^2}{210^2} = 245$$

$$\therefore p = 10.6 [\text{N/mm}^2] \rightarrow 108 \text{ kgf/cm}^2$$

すなわち、当該ドアを破損するには、100 kgf/cm² 以上もの圧力を必要とするが、壁の耐圧が 10 kgf/cm² 前後であると予想されることから、ドアの破損の前に開口部の壁の方が先に破損すると思われる。

3.2.3 シールディングドア(M153)

アスファルト充てん室(R152)とキャッピング装置室(R122)の間にあるシールディングドア(M153)についても、前項の M109 と同様、R152 側に設置されているため、閉じた状態で爆風を受けた場合の耐圧を、4周辺端を単純支持とする平板の問題として評価することとする。すなわち、

$$\sigma_{\max} = \beta_1 \frac{Pa^2}{h^2}$$

に、 $\beta_1=0.32$ (a=550、b=600、b/a=1.09 より)、h=200、使用材料(SS41)の降伏点 245 N/mm² (JIS G3101) を代入し、

$$0.32 \times \frac{P \times 550^2}{200^2} = 245$$

$$\therefore p = 101 [\text{N/mm}^2] \rightarrow 1.03 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$$

すなわち、当該ドアを破損するには、1000 kgf/cm² 以上もの圧力を必要とするが、壁の耐圧が 10 kgf/cm² 前後であると予想されることから、ドアの破損の前に開口部の壁の方が先に破損すると思われる。

3.2.4 油圧式ハッチカバー(M182)

カスク操作室 G221(トラックエアロック W120 の真上)に設置されている油圧式ハッチカバー(M182)については、爆風による被害は見られない(吹き飛んでいない)。

従って、M182 の重量 2300 kg、開口部寸法 350 cm × 360 cm より、当該ハッチ近傍に生じた圧力(W120 内圧の最大値)は、

$$2300 / (350 \times 360) = \underline{0.018 \text{ kgf/cm}^2 (1.8 \text{ kPa}) \text{ 以下}} \text{ となる。}$$

3.2.5 シールディングトラップドア(M184)

アスファルト充てん室(R152)上部(カスク操作室 G221 床)に設置されているシールディングトラップドア(M184)は破損していない。M184 については、横方向にスライド可動するハッチが下部開口部と同じ大きさの開口を有する上部鉄板で押さえられた構造となっており、これを打ち破るには、当該接合(ボルト締め)部および可動用スクリュウ取付部を破損させ得る荷重の付加が必要である(図 2.2-7 参照)。

まず、接合(ボルト締め)部の破損の形態として、おねじ谷部の引張破壊を想定し、ここでは、その引張破壊に必要な荷重を求めることとする。使用材料(SS41)の引張強さ 400 N/mm² (JIS G3101 より)、引張応力が生ずる箇所の断面積 $\pi / 4 \times 10.106^2 \text{ mm}^2$ 、ボルトの本数 36 本より、当該ボルト(M12)の引張破壊に必要な荷重は、

$$\begin{aligned} 400 \times \pi / 4 \times 10.106^2 \times 36 &= 1.16 \times 10^6 [\text{N}] \\ &= 1.18 \times 10^5 [\text{kgf}] \end{aligned}$$

次に、可動用スクリュウ取付部の破損の形態として、当該スクリュウとスライド可動ハッチとを接合するボルトのせん断破壊を想定し、その破壊荷重を求める。当該ボルト(M10)のせん断破壊応力は、使用材料(SS41)の引張強さ 400 N/mm² (JIS G3101) の $1/\sqrt{3}$ 倍であるとし、せん断応力が生ずる箇所の断面積 $\pi / 4 \times 8.376^2 \text{ mm}^2$ 、ボルトの本数 8 本より、せん断破壊に必要な荷重は、

$$\begin{aligned} 400 / \sqrt{3} \times \pi / 4 \times 8.376^2 \times 8 &= 1.02 \times 10^5 [\text{N}] \\ &= 1.04 \times 10^4 [\text{kgf}] \end{aligned}$$

当該ハッチの破損に必要な荷重としては、上記破壊荷重に、スライド可動ハッチの重量 8160 kg、上部鉄板の重量 1915 kg、更には、事故時に当該ハッチ上部に載せてあったキャスクの重量 35.5 t を加えた荷重であり、従って、当該ハッチの破損に必要な圧力は、開口部寸法 190 cm × 190 cm より、

$$\begin{aligned} (1.18 \times 10^5 + 1.04 \times 10^4 + 8160 + 1915 + 35500) / (190 \times 190) \\ = \underline{4.8 \text{ kgf/cm}^2 (4.7 \times 10^2 \text{ kPa}) \text{ 以下}} \text{ となる。} \end{aligned}$$

3.3 その他建具類

3.3.1 扉

施設内の各部屋間に設置されている扉に関して、その被害状況の特徴としては、蝶番部の破損(蝶番取付部ドアパネルの破断、蝶番軸の破断や曲げ)が大半であり、これら破損により扉本体が吹き飛ばされたものもある。その他扉本体の変形が確認された箇所もある。これら扉の破壊に必要な圧力を評価する上での基本的な考え方(および前提条件)を以下に示す。

- ・ 扉を構成する各部材の引張(あるいはせん断)破壊荷重を、その破断面の状況から推定する。
- ・ 具体的には、蝶番部の鉄板の剥がれ、蝶番軸の曲げまたは破断、扉本体の曲げに必要な荷重を求める。
- ・ ドアロック部については、ラッチボルトそのものが破断しているものではなく、扉が外れる際に、ラッチボルトの堅枠溝からの外れによりその表面が削れた程度であり、また、扉およびその取付部の構造から、扉本体の変形(たわみ)や蝶番部の破損が生じた時点で、ラッチボルトは容易に堅枠から外れると想定されるため、破壊荷重の検討においては、ドアロック部の破損は考慮しないこととする。
- ・ ドアノブについては、爆風による直接の破損は考えにくく、扉開放側の壁等に衝突した際に破損したものと想定されるため、破壊荷重の検討においては、ドアノブの破損についても考慮しないこととする。
- ・ これら破壊に必要な荷重を、荷重が生じている部分、すなわち、扉の表面積(標準寸法: 90 cm 幅 × 200 cm 高)で割り、最終的に、扉の破壊に必要な圧力を求める。(等分布荷重を仮定する)

これらの考え方に基づき、以下、扉の破壊に必要な圧力を推定することとする。

(1) 破損箇所別の破壊圧力の評価

ここでは、まず、破損形態別に代表例を挙げ、その破壊に必要な圧力を評価することとする。

(a) 蝶番部鉄板の剥がれ破損 (図 2.2-8 参照)

蝶番接合部の鉄板は、扉本体のドアパネル(板厚 1.6 mm)およびその補強材(板厚 2.3 mm)とで構成されており、これら両方とも破断している(固定ねじは破断していない模様)。破断面は、内挿された蝶番に沿って生じる傾向が見られるが、その破断状況(破断長さ)は多岐にわたっている。その代表例として、蝶番挿入部分の長さ 34 mm にわたり破断している場合、および、扉本体の厚さの半分程度

(20 mm)まで破断している場合について、その破壊に必要な圧力を推定する。

まず、蝶番挿入部分の長さ 34 mm にわたり破断している場合、上下 2 枚の蝶番部における破断面積は、

$$34[\text{mm}] \times (1.6+2.3)[\text{mm}] \times 2[\text{面}] \times 2[\text{枚}] = 530.4 [\text{mm}^2] \text{ となる。}$$

ここで、当該鉄板のせん断破壊応力を、使用材料(SECC)の引張強さ 270 N/mm^2

(JIS G3313) の $1/\sqrt{3}$ 倍とすると、せん断破壊に必要な荷重は、

$$\begin{aligned} 270/\sqrt{3} \times 530.4 &= 8.27 \times 10^4 [\text{N}] \\ &= 8.43 \times 10^3 [\text{kgf}] \text{ 以上となる。} \end{aligned}$$

従って、当該扉の破壊・開放時に加わった圧力は、

$$(8.43 \times 10^3)/(90 \times 200) = \underline{0.47 \text{ kgf/cm}^2 (46 \text{ kPa}) \text{ 以上}} \text{ となる。}$$

同様に、扉本体の厚さの半分程度(20 mm)まで破断している場合については、扉の破壊・開放時に加わった圧力は、

$$\begin{aligned} (270/\sqrt{3} \times 20 \times (1.6+2.3) \times 2 \times 2 \times 0.101972)/(90 \times 200) \\ = \underline{0.28 \text{ kgf/cm}^2 (27 \text{ kPa}) \text{ 以上}} \text{ となる。} \end{aligned}$$

(b) 蝶番軸の破断および曲げ破損 (図 2.2-9 参照)

蝶番軸については、2 枚の蝶番の間で破断しているもの、当該箇所で曲げ破損しているものがあり、これら破壊に必要な圧力を求める。

まず、せん断破壊に必要な荷重は、蝶番軸のせん断破壊応力を使用材料(SUS403)の引張強さ 440 N/mm^2 (JIS G4304,G4305 より) の $1/\sqrt{3}$ 倍であるとし、せん断応力が生ずる箇所の断面積 $\pi/4 \times 12^2 \text{ mm}^2$ より、

$$\begin{aligned} 440/\sqrt{3} \times \pi/4 \times 12^2 &= 2.87 \times 10^4 [\text{N}] \\ &= 2.93 \times 10^3 [\text{kgf}] \text{ 以上となる。} \end{aligned}$$

従って、上下 2 本の蝶番軸を破断し、扉を破壊・開放させるのに必要な圧力は、

$$(2.93 \times 10^3 \times 2)/(90 \times 200) = \underline{0.33 \text{ kgf/cm}^2 (32 \text{ kPa}) \text{ 以上}} \text{ となる。}$$

次に、蝶番軸を曲げ破損させるのに必要な荷重を求める。蝶番軸に曲げ破損が生じたケースでは、軸は根元で塑性崩壊している。この場合、軸の根元には、等分布荷重を受ける片持はりの最大曲げモーメント M_{\max} が生じ、 M_{\max} は、

$$M_{\max} = \frac{1}{2} w \ell^2$$

で与えられる⁸⁾。ここで、 ℓ は、はりの長さ。 w は単位長さ当たりの荷重であり、軸全体で受ける荷重 W は、 $W = w \ell$ となる。

また、当該軸が塑性変形を起こす際の極限曲げモーメント M_p は、

$$M_p = \sigma_y Z_p \quad \text{で与えられる。}$$

$M_{\max} = M_p$ 、すなわち、 $\frac{1}{2}W\ell^2 = \frac{1}{2}W\ell = \sigma_y Z_p$ の際に、軸に塑性変形が生じる。

ここで、使用材料(SUS403)の降伏応力は $\sigma_y = 205 \text{ N/mm}^2$ (JIS G4304, G4305 より)であり、また、塑性断面係数 Z_p は、

$$Z_p = \frac{1}{6}d^3 = \frac{1}{6} \times 12^3 = 288 [\text{mm}^3]$$

これより、当該軸の曲げ破損に必要な荷重 W は、軸 1 本当たり、

$$\frac{1}{2} \times W \times 735 = 205 \times 288 \quad \text{より}, \quad W = 1.61 \times 10^3 [\text{N}] = 164 [\text{kgf}]$$

従って、上下 2 本の蝶番軸を曲げ、扉を破壊・開放させるのに必要な圧力は、

$$(164 \times 2) / (90 \times 200) = \underline{0.018 \text{ kgf/cm}^2 (1.8 \text{ kPa}) \text{ 以上}}$$

(c) 扉本体の幅方向への曲げ破損 (図 2.2-10 参照)

扉の開放側から圧力を受けた一部の扉では、図 2.2-10 に示すように、扉中央線に沿って塑性ヒンジが生じ、特に、扉下部において幅方向への湾曲が見られる。

当該扉本体を上枠と左右両堅枠の 3 周辺端を単純支持とする(下端は支持なし)平板の問題とした場合、ドア下部中央に生じる最大曲げ応力 σ_{\max} は、下式で与えられる⁹⁾。

$$\sigma_{\max} = \beta_s' \frac{Pb^2}{h^2}$$

ここで、 β_s' : 平板の最大応力係数、 P : 圧力、 a : 支持端長さ、

b : 自由端長さ、 h : 平板厚さ

ここで、 $a=2000$ 、 $b=900$ より、 $a/b=2.22$ であり、これに対応する β_s' は、

$\beta_s' = 0.8$ となる⁷⁾。

また、当該扉本体は、図 2.2-10 に示す通り、1.6 mm 厚さのドアパネル 2 枚を接合して、厚さ 41 mm の中空の扉としており、上記平板厚さ h については、等価強度の板厚に置き換えることとする。すなわち、中空断面の塑性断面係数¹⁰⁾と長方形断面の塑性断面係数¹¹⁾が等しくなるように h を定めると、

$$\frac{b}{4}(41^2 - 37.8^2) = \frac{b}{4}h^2$$

$$\therefore h = 15.9 \text{ mm}$$

ここで、扉本体の使用材料(SECC)の降伏応力 σ_y に関するデータは見当たらない

(JIS G3313 に記載なし)が、ほぼ同一の化学組成を有する軟鋼の降伏点が引張強さの半分程度であることに着目し¹²⁾、 $\sigma_y = 140 \text{ N/mm}^2$ と仮定する。

以上より、当該ドアの曲げ破損に必要な圧力 P は、

$$0.8 \times \frac{P \times 900^2}{15.9^2} = 140$$

$$\therefore p = 0.055 [\text{N/mm}^2] \rightarrow \underline{\underline{0.56 \text{ kgf/cm}^2 (55 \text{ kPa) 以上}} \text{ となる。}}$$

(d) 扉本体の蝶番-ドアロック間の曲げ破損 (図 2.2-11 参照)

扉の開放側へと圧力を受けた一部の扉では、図 2.2-11 に示すように、上部蝶番とドアロック部(A-B 間)、下部蝶番とドアロック部(A-C 間)を結ぶ 2 線上に沿って塑性ヒンジができ、上部(または下部)の三角形の部分が A-B(または A-C) を支持線として押されるように湾曲している。

当該扉については、上下蝶番とドアロック部の 3 点を支持点とする平板としてモデル化し、その湾曲に必要な圧力を FEM により求める。添付資料の FEM 解析結果によると、基準圧力 1 kg/mm^2 が作用する時の扉の最大応力は 5140 kg/mm^2 となる。当該最大応力は、扉の等応力線図を見ても明らかなように、損傷(曲がり)が一番大きいドアロック部近傍で生じている。

扉の実際の曲げ応力 σ_b は、添付資料に記載の通り、シェルの曲げ応力(FEM 解析結果)の 1.667 倍であるとし、

$$\sigma_b = 1.667 \times 5140 = 8568 [\text{kg/mm}^2] \text{ とする。}$$

当該 σ_b と扉構成部材の降伏点 σ_y の比較から曲げ破損に必要な圧力 P を求める。ここで、前(c)項と同様、 $\sigma_y = 140 \text{ N/mm}^2$ とする。

従って、求める圧力 P は、 $8568 \times P = 140 \times 0.101972$ より、

$$P = 1.7 \times 10^{-3} [\text{kg/mm}^2] \rightarrow \underline{\underline{0.17 \text{ kgf/cm}^2 (17 \text{ kPa) 以上}} \text{ となる。}}$$

(2) 施設内各扉の破壊圧力の評価

前(1)項では、蝶番部鉄板、蝶番軸など破損箇所毎に破壊荷重を求め、扉の破壊に必要な圧力を評価した。しかしながら、実際の被害状況においては、例えば、上部蝶番は鉄板剥がれと軸曲がり、下部蝶番は鉄板剥がれと軸破断、更には扉本体も湾曲、など、様々な壊れ方をしている。これら破壊に必要な圧力を正確に評価することは極めて困難であるが、ここでは、破壊に必要な最低限の圧力を推定することを目的に、以下に示す基本的な考え方(前提条件)に基づき、扉の破壊圧力を評価することとする。

- ・ 上下蝶番それぞれについて最大の破壊荷重を求め (例えば、同じ蝶番で鉄板剥がれと軸曲がりが生じていれば、鉄板剥がれの荷重とする)、これら上下蝶番

の最大荷重を足し合わせたものから破壊圧力を評価する。

- 蝶番部破損の他に扉本体に曲げ変形が生じているものについては、上下蝶番の破壊荷重合計との比較で大きい方の荷重を基に破壊圧力を評価する。
- 扉本体が吹き飛び崩壊(ドアパネル自体が破断)しているものについては、その破壊メカニズムが不明である(例えば、爆風自体により碎け散ったのか、爆風に伴う飛散物の衝突により碎け散ったのか不明である)ため、これら扉本体の飛散後の崩壊に必要な荷重は考慮しないこととする。

これらの考え方に基づき、扉の破壊に必要な圧力を評価した結果を、各破壊扉毎に表 3.3.1-1 にまとめて示す。

なお、非破壊扉については、扉の構成部材のうち一番壊れやすい箇所として、破壊荷重が最小の蝶番軸の曲げ破損に着目し、その破壊荷重 164 kgf(軸 1 本当たり)、蝶番数、および扉の寸法より、当該扉近傍に生じた最高圧力を推定することとする。すなわち、最高圧力は、

- 60 cm 幅 × 200 cm 高 の扉 :

$$(164 \times 2) / (60 \times 200) = \underline{0.027 \text{ kgf/cm}^2 (2.6 \text{ kPa}) \text{ 以下}}$$

- 90 cm 幅 × 200 cm 高 の扉 :

$$(164 \times 2) / (90 \times 200) = \underline{0.018 \text{ kgf/cm}^2 (1.8 \text{ kPa}) \text{ 以下}}$$

- 135 cm 幅 × 200 cm 高 の扉 :

$$(164 \times 4) / (135 \times 200) = \underline{0.024 \text{ kgf/cm}^2 (2.4 \text{ kPa}) \text{ 以下}}$$

- 180 cm 幅 × 200 cm 高 の扉 :

$$(164 \times 4) / (180 \times 200) = \underline{0.018 \text{ kgf/cm}^2 (1.8 \text{ kPa}) \text{ 以下}}$$

- 135 cm 幅 × 230 cm 高 の扉 :

$$(164 \times 4) / (135 \times 230) = \underline{0.021 \text{ kgf/cm}^2 (2.1 \text{ kPa}) \text{ 以下}} \text{ とする。}$$

3.3.2 エレベータドア

各階のエレベータドアにおける主な被害状況は以下の通りである。

- 2F ドアの被害が一番大きく、ドア本体が曲がり、ホール側(A060)に吹き飛ばされ、更には、事故時 2F に止まっていたかご室までも崩壊している。
- その他の階のドアは、ドア本体の通廊側への湾曲、上下取付部の外れ等が確認されている。
- ドアの外れ方としては、上部ドアハンガーおよび下部ドアシューが単にレールから外れたもの、ドア本体上部鉄板の破断やボルト接合部の破断等とともに上部ドアハンガーが外れたもの、下部ドアシューのみ外れてドア本体がめくれあがっているもの、等多岐にわたっている。

表3.3.1-1 扉破壊圧力計算結果

No.	設置場所	被害状況 (破壊箇所)	破断面積	引張強さ	破壊荷重	扉寸法 [cm]	破壊圧力	破壊圧力
			[mm ²]	[N/mm ²]	[kgf]	幅	高さ	[kgf/cm ²]
1	A118-A121間	蝶番剥がれ(上下共半分程度)、扉本体曲がり(塑性ヒンジ:2線)	312.0	270	4.96E+03	90	200	> 0.28 > 27
2	A118-G115間	蝶番剥がれ(上下共半分程度)、扉本体曲がり(塑性ヒンジ:2線)	312.0	270	4.96E+03	90	200	> 0.28 > 27
3	A118-W120間	蝶番剥がれ(上下共半分程度)	312.0	270	4.96E+03	90	200	> 0.28 > 27
4	A133-G111間	蝶番剥がれ(上下共全破断)、蝶番軸破断(上下共)	530.4	270	8.43E+03	90	200	> 0.47 > 46
5	A131-A133間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	530.4	270	8.43E+03	90	200	> 0.47 > 46
6	G111-G112間	蝶番剥がれ(上下共半分程度)、扉本体曲がり(塑性ヒンジ:2線)	312.0	270	4.96E+03	90	200	> 0.28 > 27
7	A131-G114間	蝶番剥がれ(上下共半分程度)	312.0	270	4.96E+03	90	200	> 0.28 > 27
8	A131-A130間	扉本体曲がり(塑性ヒンジ:中央1線)	—	—	—	90	200	> 0.56 > 55
9	A234-A235間	蝶番剥がれ(上下共全破断)、蝶番軸曲がり(下)	530.4	270	8.43E+03	90	200	> 0.47 > 46
10	A231-A235間	蝶番剥がれ(上下共全破断)、蝶番軸曲がり(上下共)	530.4	270	8.43E+03	90	200	> 0.47 > 46
11	A231-A236間	蝶番軸破断(上下共)	226.2	440	5.86E+03	90	200	> 0.33 > 32
12	A231-A130間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	530.4	270	8.43E+03	90	200	> 0.47 > 46
13	A231-A233間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	530.4	270	8.43E+03	90	200	> 0.47 > 46
14	A231-A232間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	530.4	270	8.43E+03	90	200	> 0.47 > 46
15	A232-G214間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	1060.8	270	1.69E+04	135	200	> 0.62 > 61
16	A236-G216間	蝶番全剥がれと蝶番軸破断(北側、南側共)	756.6	270/440	1.43E+04	180	200	> 0.40 > 39
17	G216-G221間(北側)	蝶番剥がれ(上部:半分、下部:全破断)	421.2	270	6.70E+03	90	200	> 0.37 > 36
18	G216-G221間(西側)	蝶番軸破断(上下共)	226.2	440	5.86E+03	90	200	> 0.33 > 32
19	G216-G218間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	530.4	270	8.43E+03	135	200	> 0.31 > 31
20	G215-G216間	蝶番剥がれ(上下共半分程度。北側、南側共)	624.0	270	9.92E+03	135	200	> 0.37 > 36
21	G216-G220間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	530.4	270	8.43E+03	90	200	> 0.47 > 46
22	G219-G221間	蝶番全剥がれ(上)と蝶番軸破断(下)	378.3	270/440	7.15E+03	90	200	> 0.40 > 39
23	G212-G214間	蝶番剥がれ(上下共半分程度)	312.0	270	4.96E+03	135	200	> 0.18 > 18
24	G212-G215間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	530.4	270	8.43E+03	135	200	> 0.31 > 31
25	A331-A334間	蝶番剥がれ(上下共半分程度。北側、南側共)	624.0	270	9.92E+03	135	200	> 0.37 > 36
26	A431-A435間	蝶番剥がれ(上下共全破断)	530.4	270	8.43E+03	135	200	> 0.31 > 31

これら被害状況より、エレベータホール(A060)における爆風の伝播経路としては、2F ドアを破壊しかご室までも破壊してホール内に入った爆風が、ホール内を伝播し、各階のドアをホール側より加圧し破損させたものと想定される。

また、上述の通り、エレベータドアの被害状況は多岐にわたっており、これらの破壊に必要な圧力を正確に評価することは極めて困難であるが、ここでは、破壊に必要な最低限の圧力を推定することを目的に、とりあえず単純なモデルによりどの程度の荷重が加わると破壊が生じるか評価することとする。

なお、ドア上部はドアハンガーの車輪(2 個)がレール上に載っており、ドア下部においては、ゴム製のドアシュー(2 個)がレール溝に載っている。これらの構造から、ドア本体に曲げ変形が生じた段階で、いずれも容易に外れるものと想定される。

従って、ここでは、ドア本体の湾曲に必要な圧力のみ考慮することとする。具体的には、エレベータドア本体を等分布荷重を受ける 2 点支持はりと仮定して、ドア本体の湾曲に必要な圧力を求める。ドア本体が荷重を受けた場合、ドア本体には上下取付部を支点とした曲げモーメントが生じる。当該曲げモーメントはドア中央で最大となり、 $M_{\max} = \frac{w\ell^2}{8}$ となる¹³⁾。

ここで、 ℓ は、はりの長さ。 w は単位長さ当たりの荷重であり、ドア本体が受ける等分布圧力を P とすると、 $w=Pb$ (b : はりの幅) である。

また、当該ドアが塑性変形を起こす際の極限曲げモーメント M_p は、

$$M_p = \sigma_y Z_p \quad \text{で与えられる。}$$

$M_{\max} = M_p$ 、すなわち、 $\frac{Pb\ell^2}{8} = \sigma_y Z_p$ の際に、ドア本体に塑性変形が生じる。

ここで、使用材料(SPCC)の降伏応力 σ_y に関するデータは見当たらない(JIS G3141 に記載なし)が、ほぼ同一の化学組成を有する軟鋼の降伏点が引張強さの半分程度であることに着目し¹²⁾、 $\sigma_y = 140 \text{ N/mm}^2$ と仮定する。

また、塑性断面係数 Z_p は、図 2.2-12 に示すような断面形状の場合、

$$Z_p = (\bar{e}_1 + \bar{e}_2) \frac{A}{2} \quad \text{で与えられる } 14).$$

$$\text{但し、} \quad \bar{e}_1 = \frac{1}{2} e_1 \quad \bar{e}_2 = \frac{bs(2e_2 - s) + t(e_2 - s)^2}{2bs + 2t(e_2 - s)} \quad A = bs + ht$$

$$e_1 = d - \frac{d^2 t + s^2(b-t)}{2(bs+ht)} \quad e_2 = \frac{d^2 t + s^2(b-t)}{2(bs+ht)}$$

ここで、 $b=680[\text{mm}]$ 、 $d=32[\text{mm}]$ 、 $h=30.4[\text{mm}]$ 、 $s=1.6[\text{mm}]$ 、 $t=3.2[\text{mm}]$ を代入し、 $e_1=29.89$ 、 $e_2=2.113$ 、 $A=1185$ 、 $\bar{e}_1=14.95$ 、 $\bar{e}_2=1.311$

$$\therefore Z_p = 9.63 \times 10^3 [\text{mm}^3] \text{ となる。}$$

従って、ドア本体の変形に必要な圧力 P は、ドア幅 $b = 680 \text{ mm}$ 、ドア高さ $\ell = 2114 \text{ mm}$ より、

$$\frac{P \times 680 \times 2114^2}{8} = 140 \times 9.63 \times 10^3$$

$$\therefore P = 3.55 \times 10^3 [\text{N/mm}^2] \rightarrow 0.036 \text{ kgf/cm}^2 \text{ 以上 となる。}$$

以上より、2F を除く各階のエレベータドアの曲げ変形に必要な圧力は、最低でも 0.036 kgf/cm² (3.5 kPa) 以上 と想定される。また、2F のドアについては、同一タイプのドアがかご室にも設置されているため、曲げ変形には他の階の倍以上の圧力が必要であるとして、0.036 × 2 = 0.072 kgf/cm² (7.1 kPa) 以上 と想定される。

3.3.3 シャッター

シャッターは、トラックエアロック W120 に 2 箇所(SS-101 および SS-103)、トラックエアロック G112 に 1 箇所(SS-102) 設置されているが、いずれも爆風を受けた際に本体が曲がり、ガイドレールから外れた状態となっている。

ここでは、爆風を受けた場合のスラット 1 枚当たりの曲げモーメントによる応力と降伏応力との比較から、これらシャッターハードの耐圧を評価することとする。なお、スラットは特にジョイント部で複雑な形状をしているが、ここでは、これら形状を簡略化し、図 2.2-13 に示すような断面形状にモデル化し計算することとする。

シャッターが荷重を受けた場合、スラット 1 枚当たりには、左右ガイドレールを支点とした曲げモーメントが生じる。当該曲げモーメントはスラット中央で最大となり、

$$M_{\max} = \frac{w\ell^2}{8} \text{ となる } ^{13)}$$

ここで、 ℓ は、はりの長さ。 w は単位長さ当たりの荷重であり、スラット 1 枚が受ける等分布圧力を P とすると、 $w = Pb$ (b : はりの幅) である。

また、スラットが塑性変形を起こす際の極限曲げモーメント M_p は、

$$M_p = \sigma_y Z_p \text{ で与えられる。}$$

$$M_{\max} = M_p, \text{ すなわち, } \frac{Pb\ell^2}{8} = \sigma_y Z_p \text{ の際に、スラットに塑性変形が生じる。}$$

ここで、塑性断面係数 Z_p は、前項で評価したエレベータドアと同様に、

$$Z_p = (\bar{e}_1 + \bar{e}_2) \frac{A}{2} \text{ とする } ^{14)}.$$

これらの考え方に基づきシャッターの曲げ変形に必要な圧力を評価した結果を、各シャッター毎に以下に示す。

- SS-101

当該シャッターのスラット部は、ピッチ 75 mm、高さ 18 mm、長さ 4600 mm、板厚 1.5 mm のステンレス製である。ここで、 $b=75[\text{mm}]$ 、 $d=18[\text{mm}]$ 、 $h=16.5[\text{mm}]$ 、 $s=1.5[\text{mm}]$ 、 $t=3.0[\text{mm}]$ より、

$$\begin{aligned} e_1 &= 14.5, \quad e_2 = 3.5, \quad A = 162, \quad \bar{e}_1 = 7.25, \quad \bar{e}_2 = 2.66 \\ \therefore Z_p &= 803 [\text{mm}^3] \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

従って、スラットの曲げ変形に必要な圧力 P は、スラット幅 $b = 75 \text{ mm}$ 、スラット長さ $\ell = 4600 \text{ mm}$ 、 $\sigma_y = 205 \text{ N/mm}^2$ (JIS G4304,G4305) より、

$$\begin{aligned} \frac{P \times 75 \times 4600^2}{8} &= 205 \times 803 \\ \therefore P &= 8.30 \times 10^{-4} [\text{N/mm}^2] \rightarrow \underline{0.0085 \text{ kgf/cm}^2 (0.83 \text{ kPa}) \text{ 以上}} \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

- SS-102

当該シャッターのスラット部は、ピッチ 70 mm、高さ 15 mm、長さ 3000 mm、板厚 1.6 mm の SS41 製である。ここで、 $b=70[\text{mm}]$ 、 $d=15[\text{mm}]$ 、 $h=13.4[\text{mm}]$ 、 $s=1.6[\text{mm}]$ 、 $t=3.2[\text{mm}]$ より、

$$\begin{aligned} e_1 &= 12.1, \quad e_2 = 2.88, \quad A = 155, \quad \bar{e}_1 = 6.05, \quad \bar{e}_2 = 2.03 \\ \therefore Z_p &= 626 [\text{mm}^3] \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

従って、スラットの曲げ変形に必要な圧力 P は、スラット幅 $b = 70 \text{ mm}$ 、スラット長さ $\ell = 3000 \text{ mm}$ 、 $\sigma_y = 245 \text{ N/mm}^2$ (JIS G3101) より、

$$\begin{aligned} \frac{P \times 70 \times 3000^2}{8} &= 245 \times 626 \\ \therefore P &= 1.95 \times 10^{-3} [\text{N/mm}^2] \rightarrow \underline{0.020 \text{ kgf/cm}^2 (2.0 \text{ kPa}) \text{ 以上}} \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

- SS-103

当該シャッターのスラット部は、ピッチ 75 mm、高さ 18 mm、長さ 5900 mm、板厚 1.6 mm の SS41 製である。ここで、 $b=75[\text{mm}]$ 、 $d=18[\text{mm}]$ 、 $h=16.4[\text{mm}]$ 、 $s=1.6[\text{mm}]$ 、 $t=3.2[\text{mm}]$ より、

$$\begin{aligned} e_1 &= 14.5, \quad e_2 = 3.54, \quad A = 172, \quad \bar{e}_1 = 7.25, \quad \bar{e}_2 = 2.65 \\ \therefore Z_p &= 851 [\text{mm}^3] \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

従って、スラットの曲げ変形に必要な圧力 P は、スラット幅 $b = 75 \text{ mm}$ 、スラット長さ $\ell = 5900 \text{ mm}$ 、 $\sigma_y = 245 \text{ N/mm}^2$ (JIS G3101) より、

$$\begin{aligned} \frac{P \times 75 \times 5900^2}{8} &= 245 \times 851 \\ \therefore P &= 6.39 \times 10^{-4} [\text{N/mm}^2] \rightarrow \underline{0.0065 \text{ kgf/cm}^2 (0.64 \text{ kPa}) \text{ 以上}} \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

3.3.4 外壁窓

当該施設では、3種類(AW^F-1、AW^F-2、AW^F-3)の外壁窓が設置されている。これらは窓の寸法に違いがあるだけで、使用する板ガラスのスペックは同一で、すべて6.8 mm 厚の網入型である。その平均破壊荷重*は、メーカースペックで 825 kgf となっている。また、これらの窓の寸法は、それぞれ、以下の通りである。

- AW^F-1 寸法(幅×高) : 180 cm × 120 cm
- AW^F-2 寸法(幅×高) : 120 cm × 120 cm
- AW^F-3 寸法(幅×高) : 120 cm × 90 cm

従って、当該窓を破壊するのに必要な最低圧力は、それぞれ、

- AW^F-1 : $825 / (180 \times 120) = \underline{0.038 \text{ kgf/cm}^2 (3.7 \text{ kPa})}$
- AW^F-2 : $825 / (120 \times 120) = \underline{0.057 \text{ kgf/cm}^2 (5.6 \text{ kPa})}$
- AW^F-3 : $825 / (120 \times 90) = \underline{0.076 \text{ kgf/cm}^2 (7.5 \text{ kPa})}$ となる。

なお、爆風により破損した窓の設置場所を、各タイプ毎に以下に示す。

- AW^F-1 : G212、G214(2箇所)、G215、G216、G218(2箇所)、
G219(2箇所)、G221(2F、3F)、G315、G316(4箇所)
- AW^F-2 : G216
- AW^F-3 : G010(1F、2F×2箇所、4F、RF)、G220、
A130(1F、2F、3F、4F、RF)

* 平均破壊荷重： 数十枚以上の破壊実験の結果から統計的に求めたもの。
これをガラス面積で除した値が平均破壊風圧となる。
(メーカーカタログより)

3.4 壁

爆発発生元と想定されるアスファルト充てん室(R152)、エクストルーダ室(R151)、および、それに隣接する各部屋の壁に関して、簡易手法*またはFEM解析により壁の降伏・終局耐力の評価を実施している。その具体的な評価内容については、別途、報告書(公開予定)を取りまとめ中であるため、ここでは、その耐力評価の結果のみを次3.5項でまとめた圧力評価図に記載することとする。

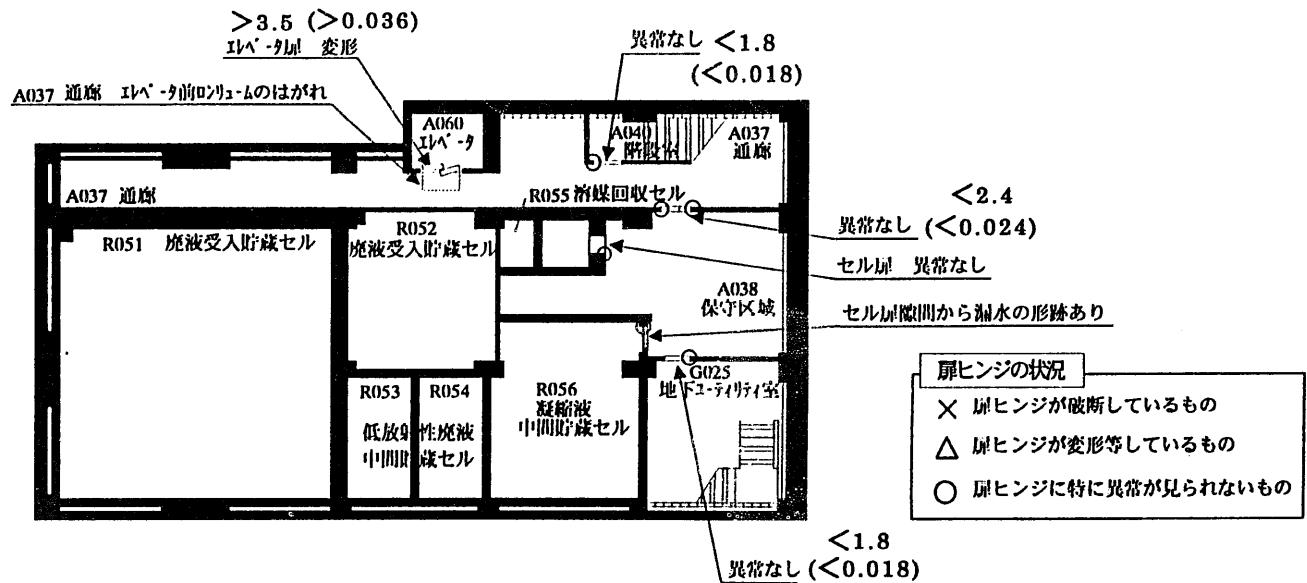
* 降伏耐力： 鉄筋コンクリート平板を等質等方体と仮定し、境界条件を満足する基礎微分方程式の解を利用して評価。

終局耐力： 境界条件に対応する降伏線理論により評価。

3.5 まとめ

これまでの評価結果を、各建具類の被害状況とともに、各階毎に図3.5-1～図3.5-7にまとめて示す。本図では、破壊した建具類についてはその近傍に生じた最低圧力を“何 kPa 以上 (> X.X kPa)”の表示で、非破壊建具類については最高圧力を“何 kPa 以下 (< X.X kPa)”の表示で記載している(括弧内に[kgf/cm²G]表示を併記している)。

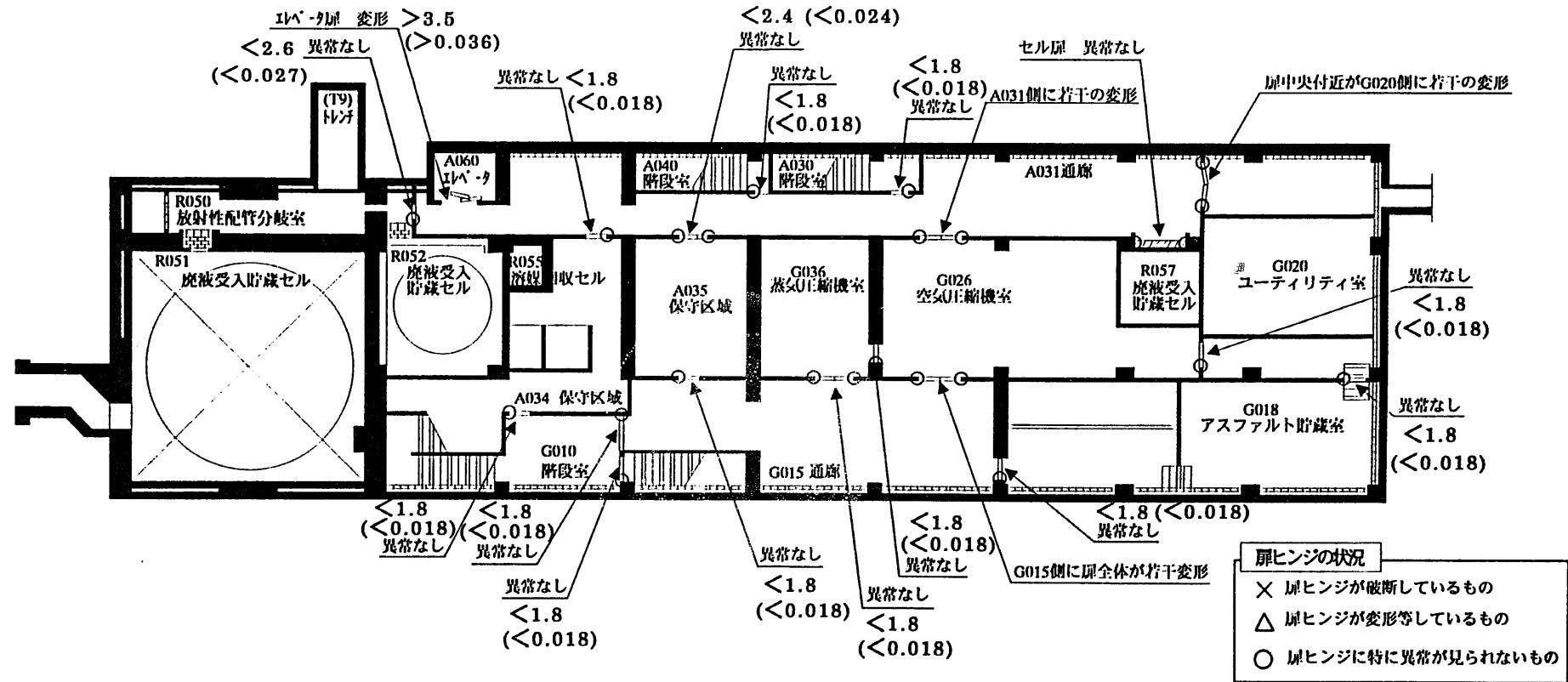
これより、爆発発生元と想定されるアスファルト充てん室(R152)内に生じた圧力は 37 kPa (0.38 kgf/cm²G) 以上、エクストルーダ室(R151)内に生じた圧力は 54 kPa (0.55 kgf/cm²G) 以上、保守作業室(A234)や保守エアロック室(A235)内に生じた圧力は 0.28～0.37 MPa (2.9～3.8 kgf/cm²G) 程度と想定される。



[注記]

破壊した建具類についてはその近傍に生じた
最低圧力を、非破壊建具類については最高圧力
を推定。単位は [kPa] (ゲージ圧)。
(括弧内に [kgf/cm²G] 表示を併記)

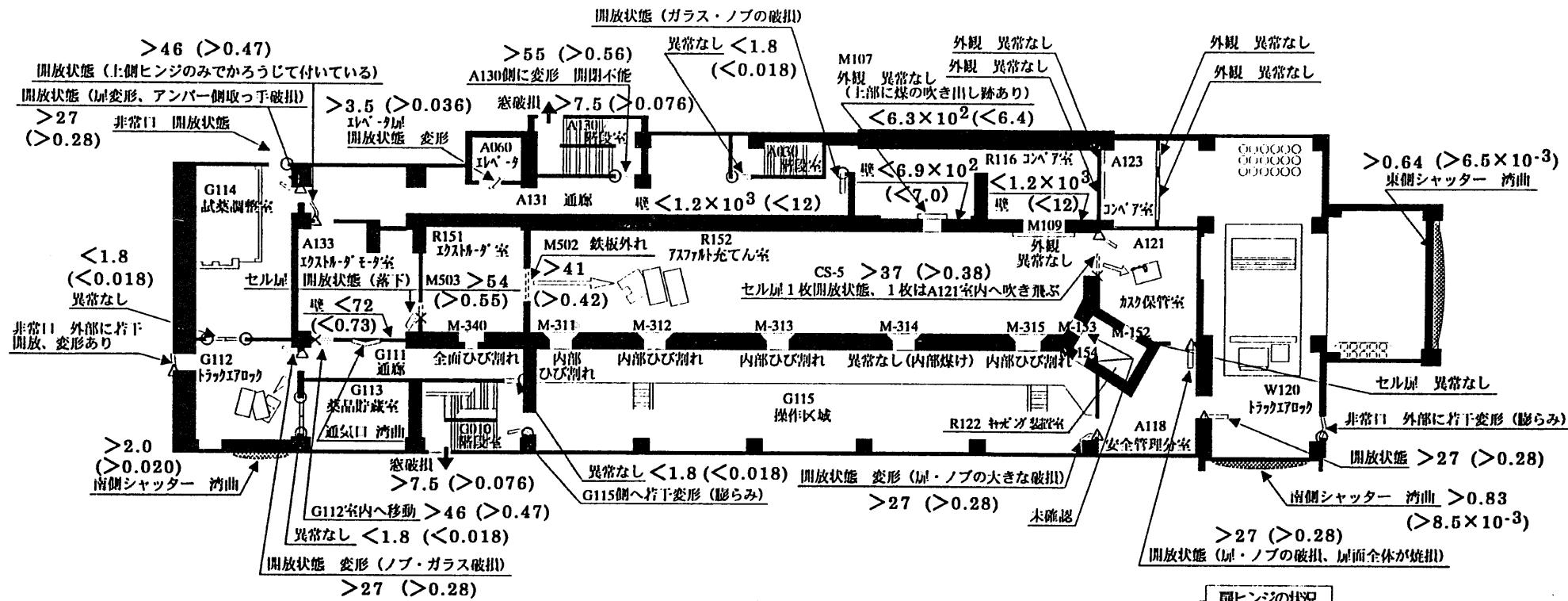
図3.5-1 建具類破壊圧力評価結果（地下2階）



[注記]

破壊した建具類についてはその近傍に生じた
最低圧力を、非破壊建具類については最高圧力
を推定。単位は [kPa] (ゲージ圧)。
(括弧内に [$\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$] 表示を併記)

図3.5-2 建具類破壊圧力評価結果（地下1階）



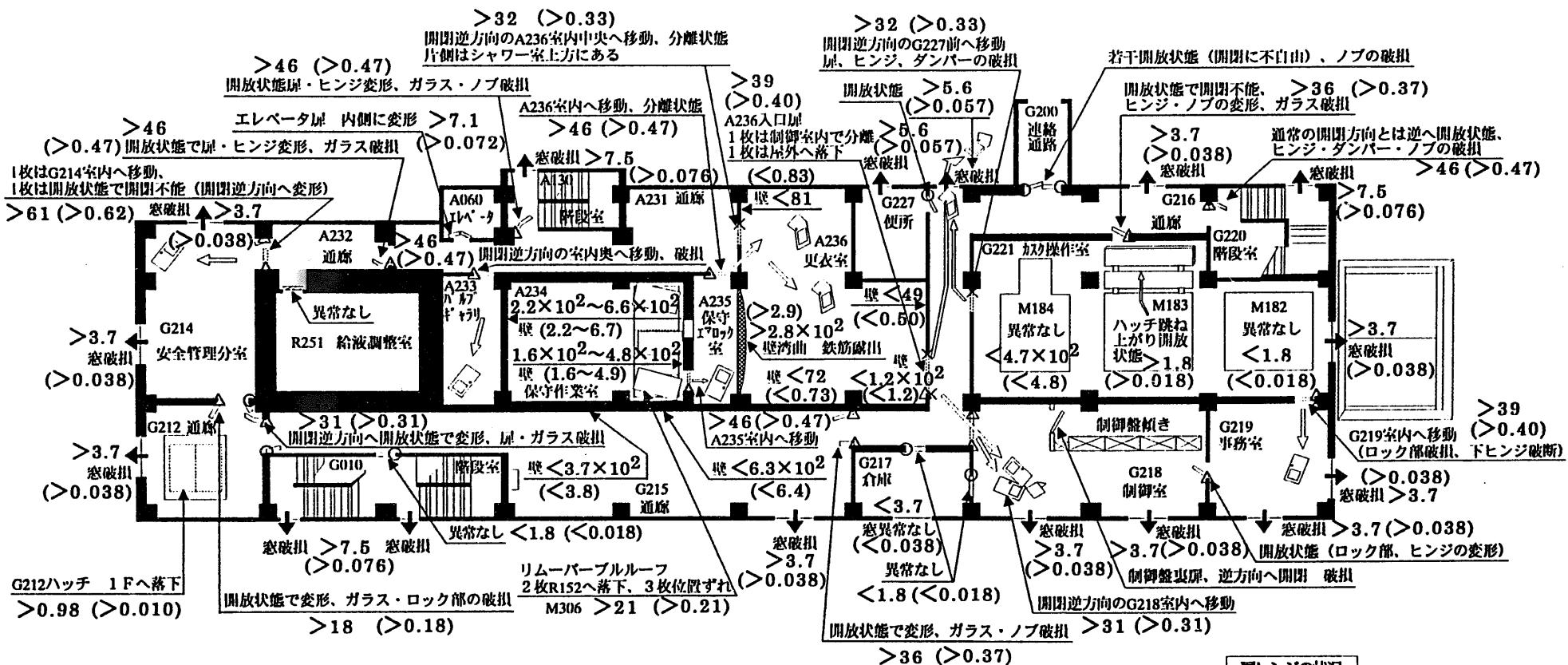
[注記]

破壊した建具類についてはその近傍に生じた
最低圧力を、非破壊建具類については最高圧力を
を推定。単位は [kPa] (ゲージ圧)。
(括弧内に $[kg/cm^2G]$ 表示を併記)

扉ヒンジの状況

- × 扉ヒンジが破断しているもの
- △ 扉ヒンジが変形等しているもの
- 扉ヒンジに特に異常が見られないもの

図3.5-3 建具類破壊圧力評価結果（1階）



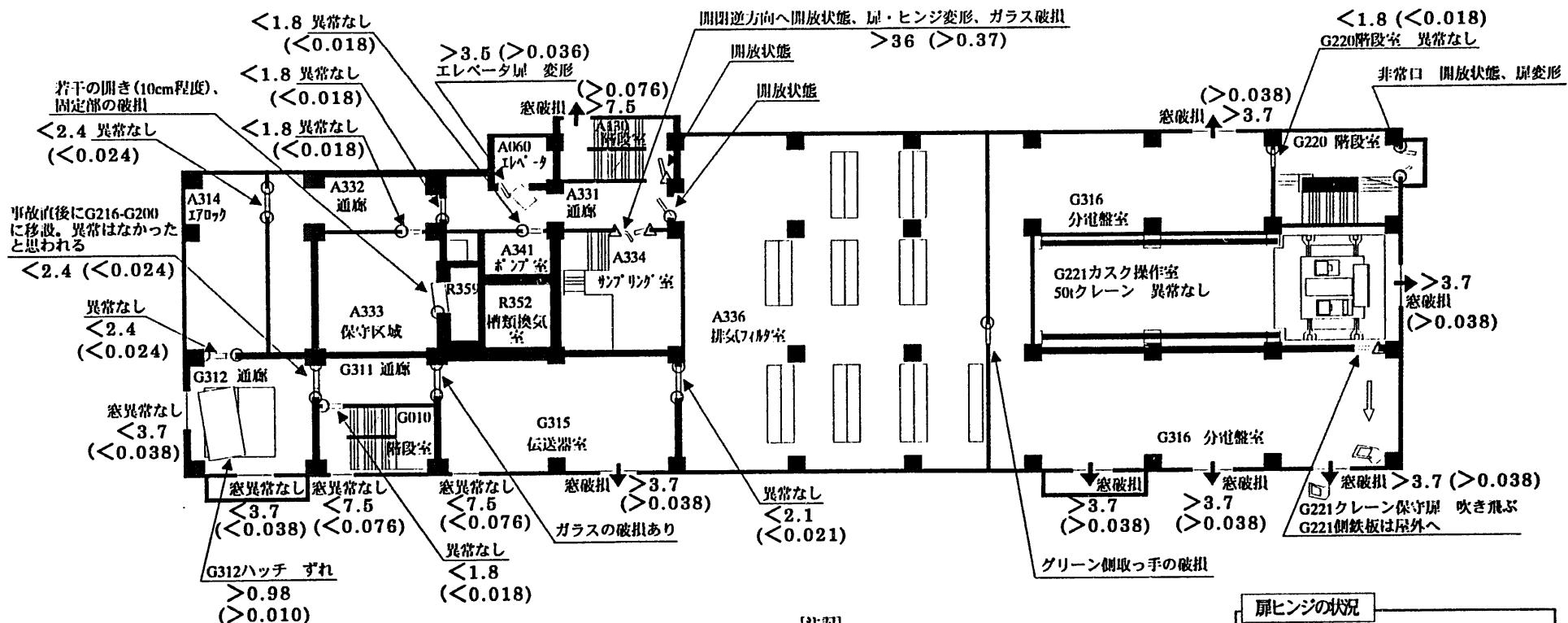
【注記】

破壊した建具類についてはその近傍に生じた
最低圧力を、非破壊建具類については最高圧力
を推定。単位は [kPa] (ゲージ圧)。
(括弧内に [kgf/cm²G] 表示を併記)

扉ヒンジの状況

- × 扉ヒンジが破断しているもの
- △ 扉ヒンジが変形等しているもの
- 扉ヒンジに特に異常が見られないもの

図3.5-4 建具類破壊圧力評価結果（2階）



[注記]

破壊した建具類についてはその近傍に生じた
最低圧力を、非破壊建具類については最高圧力を
を推定。単位は [kPa] (ゲージ圧)。
(括弧内に [kgf/cm²G] 表示を併記)

扉ヒンジの状況	
×	扉ヒンジが破断しているもの
△	扉ヒンジが変形等しているもの
○	扉ヒンジに特に異常が見られないもの

図3.5-5 建具類破壊圧力評価結果（3階）

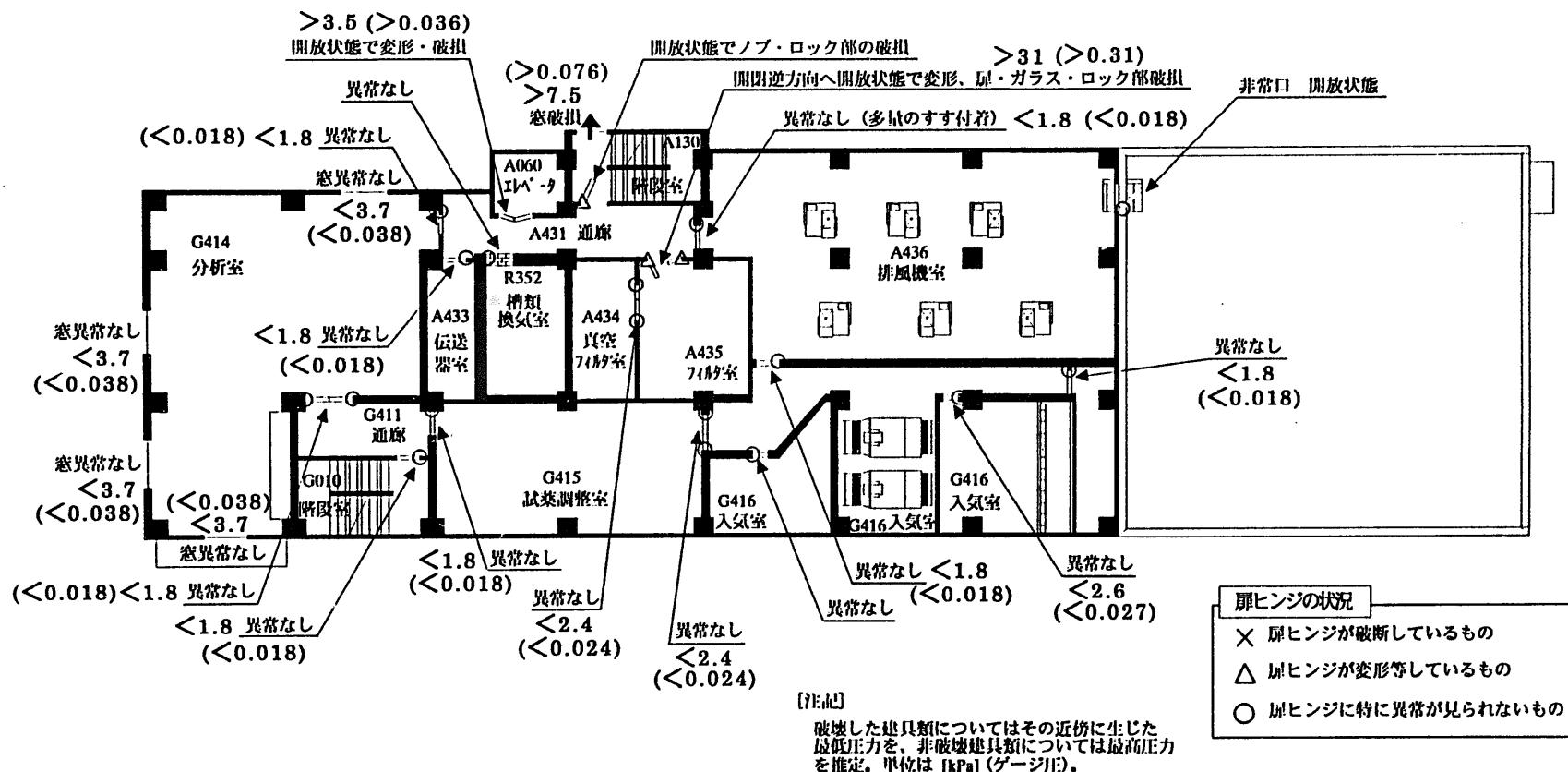


図3.5-6 建具類破壊圧力評価結果（4階）

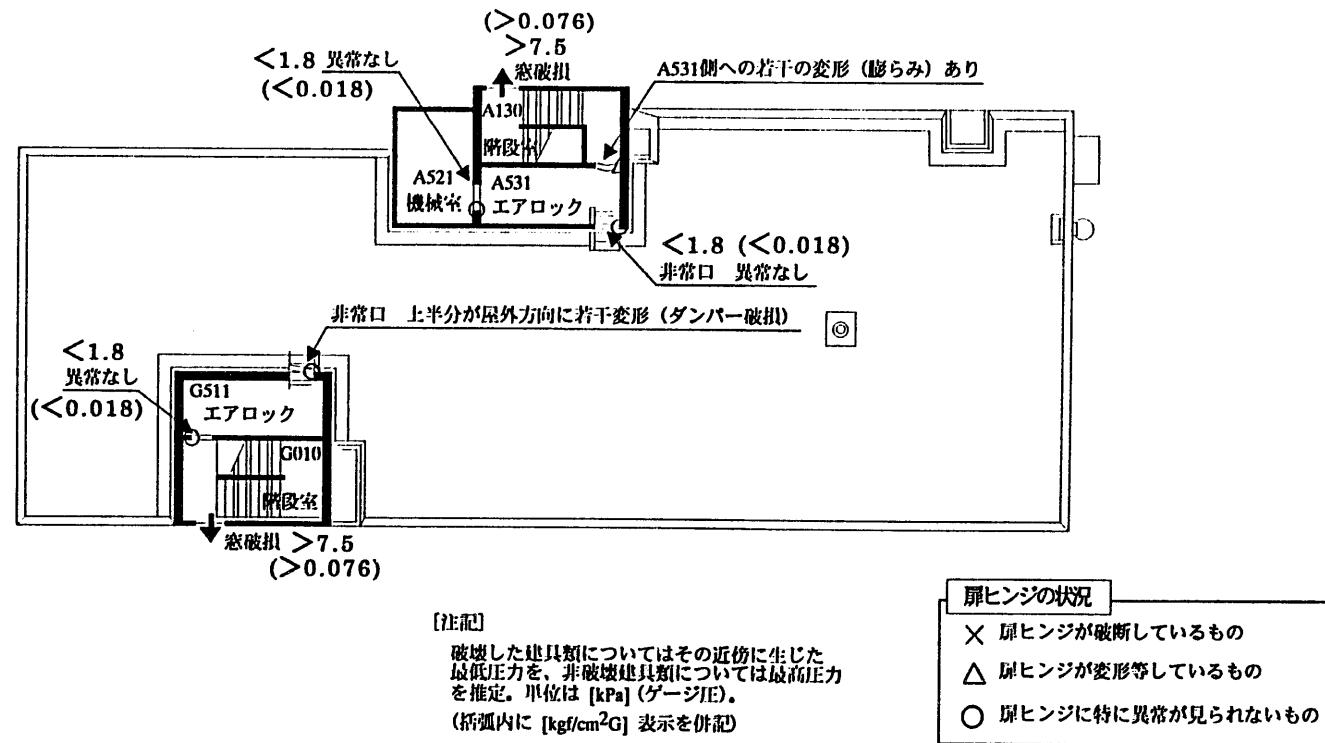


図3.5-7 建具類破壊圧力評価結果（屋上）

4. あとがき

本報告書は、アスファルト固化処理施設で発生した火災・爆発事故の原因究明に係る各種解析評価作業の一環として実施した、爆発時の各部屋境界部等の破壊圧力の評価結果をまとめたものである。

本評価では、爆発規模の推定を目的に、施設内各部屋間の境界部となる遮へい扉、ハッチ、ドアなどの建具類について、その破壊に必要な圧力を評価を実施した。

具体的には、爆風を受け破壊した建具類については、その被害状況を基に破壊に必要な荷重を計算し、その境界部の破壊・開放時に作用した圧力を推定し、一方、非破壊建具類については、爆風を受けた際に応力が集中する箇所(部材)を推定し、その部材の破壊荷重との比較から、その境界部の破壊・開放に必要とされる圧力を推定した。これらの評価結果を、施設各階毎に圧力評価図として取りまとめた。

今回の解析評価結果は、爆発事故時の施設内の被害状況を定量的に説明し得るものであり、また、これにより爆発時に各部屋に発生した圧力を推定することが可能となった。

今後は、事故時の爆発エネルギーの推定、爆風ルートの同定、更には、爆発に伴う各部屋への圧力伝播挙動の評価などに今回の結果を適用し、最終的な事故原因の究明に役立てる予定である。

5. 謝辞

本検討を進めるにあたり、東京工業大学工学部機械宇宙学科の小林英男教授から、応力評価の基本的な考え方や具体的な評価手法など有益な助言を数多くいただきました。この場をかりて御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 火災・爆発被害状況（その8）：科学技術庁事故調査委員会提出資料，資料11-3，平成9年6月11日
- 2) 火災・爆発被害状況（その9）：科学技術庁事故調査委員会提出資料，資料15-3，平成9年7月10日
- 3) 機械設計便覧：第3版，丸善，東京，p.265(1992)
- 4) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-25，表6，No.6(1987)
- 5) S.P.Timoshenko, et al., Theory of Plates and Shells : 2nd edition, McGraw-Hill, p.202, Table 35 (1959)
- 6) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-60，表28，No.1(1987)
- 7) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-61，図91(1987)
- 8) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-28，表7，No.3(1987)
- 9) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-60，表28，No.5(1987)
- 10) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-25，表6，No.2(1987)
- 11) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-25，表6，No.1(1987)
- 12) 強度設計データブック：第5版，裳華房，東京，pp.156～157(1971)
- 13) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-29，表7，No.10(1987)
- 14) 機械工学便覧，基礎編，応用編：新版，丸善，東京，p.A4-26，表6，No.17(1987)

有限要素法による構造解析

- ・ 解析コードの説明
- ・ 解析モデルの概要（形状、境界条件等）
- ・ 解析結果
(固定点軸力およびモーメント、変位分布図、等応力線図)

解析コード ABAQUS について

1. 概要

ABAQUS コードは、HKS (Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.) において開発・整備されている有限要素法解析のための汎用プログラム・システムである。

本コードは、構造解析の分野における線形および非線形問題を解析するために開発されたものであり、大変形問題、接触問題および座屈問題などの幾何学的非線形解析、弾塑性問題やクリープ問題などの材料非線形解析、動的解析および熱応力問題に対する熱伝導解析などの幅広い解析が可能である。

更に、種々の形状に対して応用するため、2次元連続体、3次元連続体、シェル、はりなどの構造に対して、多くの要素を含んだ要素ライブラリが用意されており、線形解析のみでなく非線形解析も可能である。要素ライブラリには、非圧縮性材料に関するものや、接触およびインターフェイスなどの特殊な問題に対する要素も含まれている。

2. 応力解析

ABAQUS では、線形および非線形の解析ができるだけ自由に行えるように、解析すべき問題の履歴をごく一般的にモデル化できるように作成されている。

解析においては、負荷の履歴をいくつかのステップに分割することができ、非線形解析では、プログラムの自動コントロールにより、各ステップは複数のインクリメントに分割される。各インクリメントの非線形釣合い式を解くために、ABAQUS は、ほとんどの問題でニュートン法を用いている。

使用可能な主なプロシージャは以下の通りである。

(1) 静的応力／変位解析

ABAQUS は静的応力解析に 2 種類の方法を用いている。ひとつは負荷履歴が指定されている解析(熱衝撃での温度トランジエントなど)である。もうひとつは、弧長法(修正 Riks 法)であり、崩壊後または座屈後のような不安定問題の解析に用いることができる。負荷履歴が指定されている解析では、材料の応答は時間依存または非依存とすることができます。

(2) 線形問題に対する動的応力／変位解析

ABAQUS は、系の固有モードに基づく時刻歴応答解析、応答スペクトル解析、定常応答解析および不規則応答解析の機能を持っている。固有振動数の計算には、サブスペース法が用いられており、解析の任意の段階での計算が可能で、初期荷重を考慮することができます。

(3) 非線形問題に対する動的応力／変位解析

非線形の動的问题に対し、ABAQUS は Hilber-Hughes-Taylor 法(制御可能な数値減衰を含む Newmark 法)による直接陰的積分機能を持っており、自動時間増分機能がある。非線形の弱い問題に対しては、系の初期状態の固有モードを基底関数として用いるモード投影法があり、非線形制止構造物を含む配管系のような局所的非線形性のある系の解析に非常に有効である。

3. 热伝導解析

ABAQUS には、热伝導(拡散)問題の解析機能が用意されており、线形および非線形問題に対して、定常および非定常の解析を行うことができる。

定常問題の解は、时间積分を行うことなく直接求めることが可能である。非定常問題に対しては、後退差分法(修正 Crank-Nicholson 法)による時間積分が行われる。この積分法は線形問題に対しては、無条件安定である。

热伝導解析は、热応力解析に用いる温度場を得るために行われることが多い。ABAQUS は、热伝導解析から出力された結果ファイルを、応力解析の入力データとするための使い易いインターフェイスを用意している。

ABAQUS は、非線形热伝導問題の解析にイテレーションを行う。その方法は基本的にはニュートン法であるが、強い非線形の潜熱が存在する場合の安定性を確保するために、修正が加えられている。

热伝導解析のための要素ライブラリは、ほとんどの問題をモデル化することが可能となるように準備されている。シェル構造物の解析のためには、シェル型の热伝導要素が用意されている。

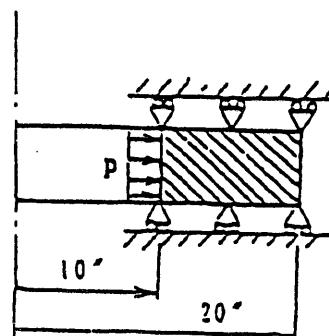
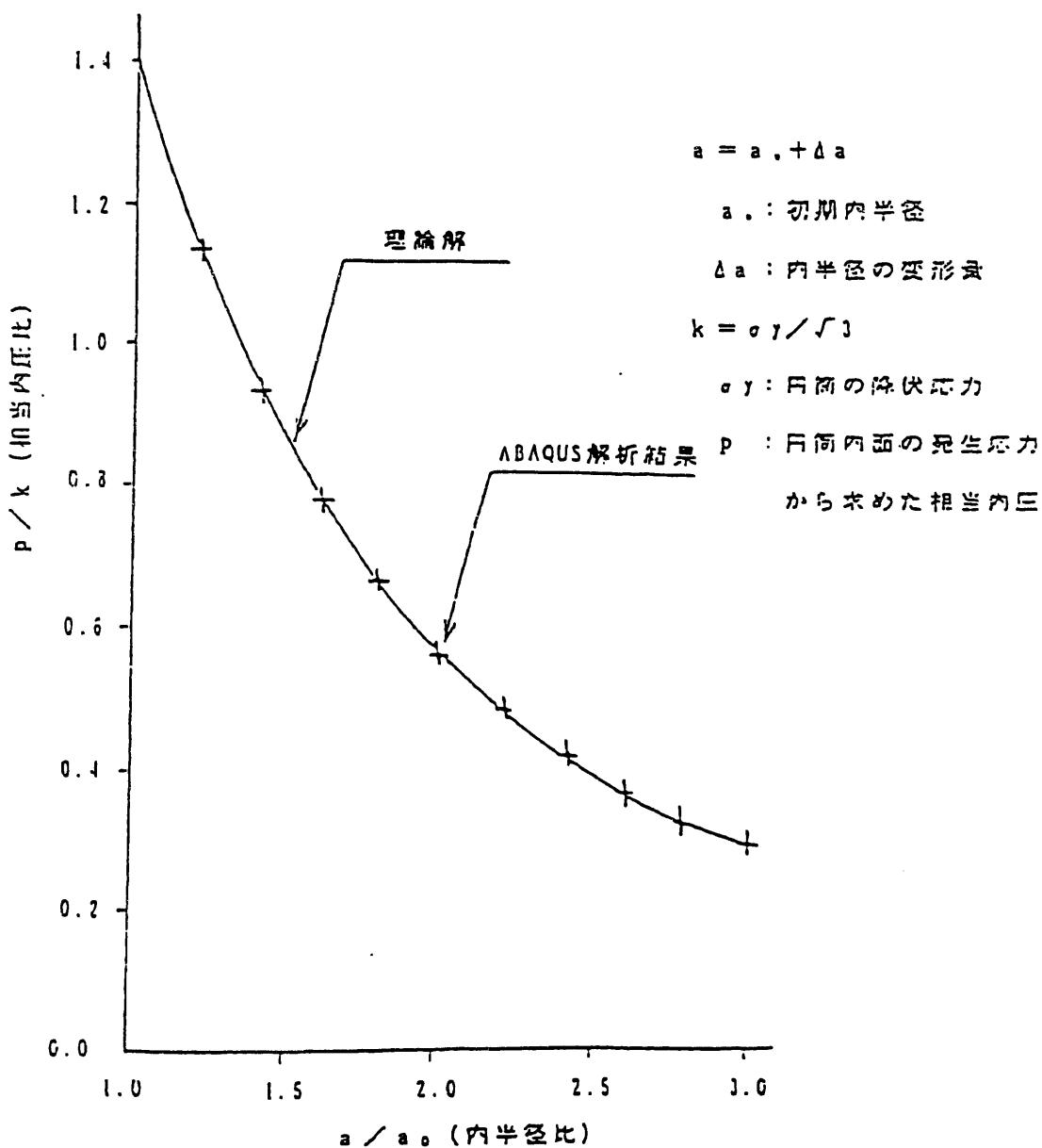
热伝導解析における境界条件には、热流束(分布または集中)、温度指定、热伝達、ふく射がある。これらはいずれも时间の関数として与えることができる。

热伝導と応力の問題を完全に連成させた解析機能も用意されている。

4. 信頼性

ABAQUS コードの検証は、数多くの問題に対して理論解と比較することにより行われており、それらは ABAQUS Example Problems Manual と Verification Manual に詳細が示されている。

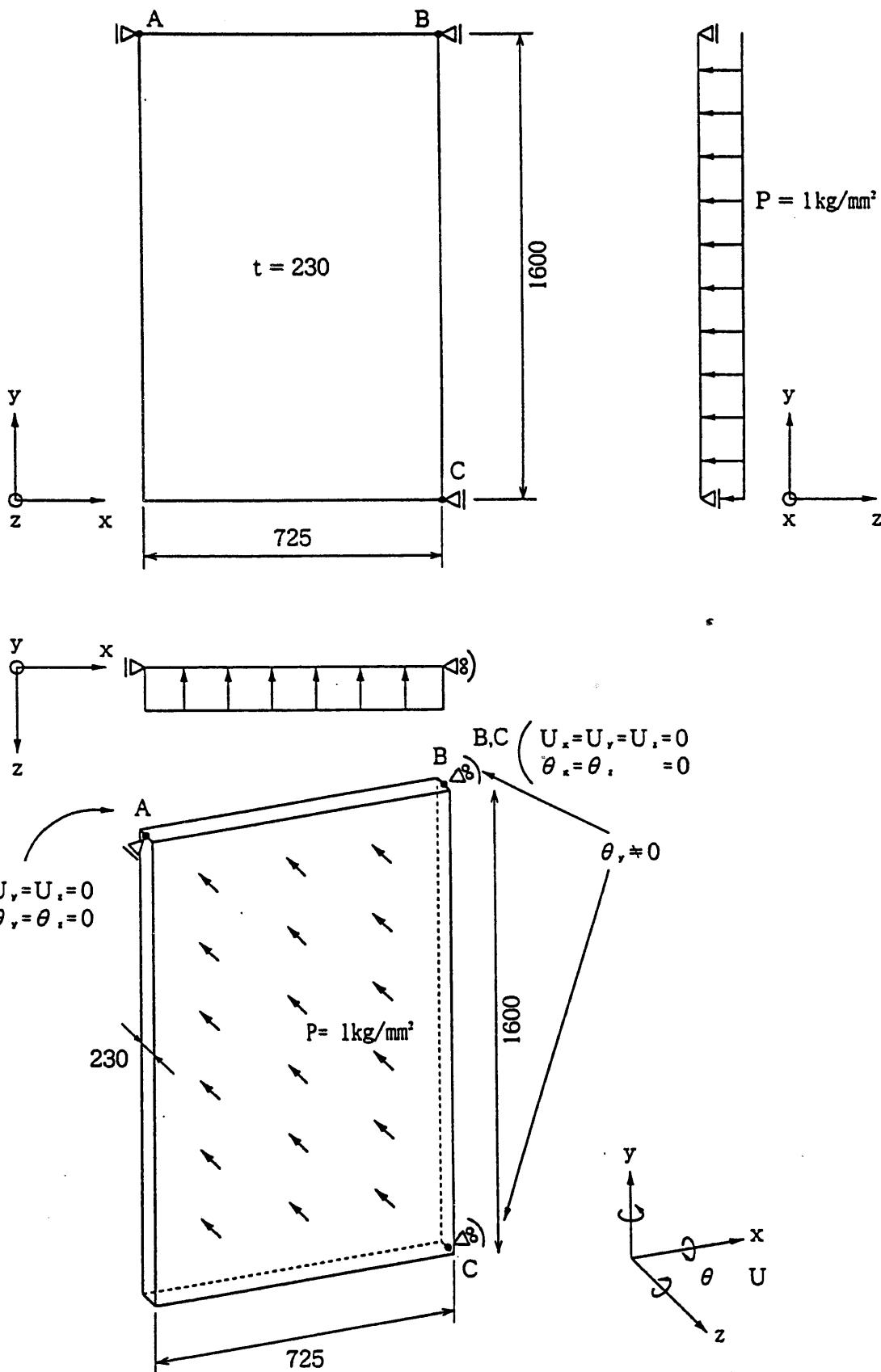
検証例として、内圧力を受ける厚肉円筒の ABAQUS による解析結果と理論解の比較を次頁に示す。

解析モデルABAQUS コードの検証例

(厚肉円筒の内面に強制変位を与えて塑性大変形される問題)

1. 両開遮蔽扉 (CS - 5)

(1) 形状



(2) 計算モデル

a. シェルの形状

725 × 1600 × 230

b. 境界条件

$$A : U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$$

$$B : U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_z = 0 \quad (\theta_y \neq 0)$$

$$C : U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_z = 0 \quad (\theta_y \neq 0)$$

c. 外力

圧力 $P = 1 \text{ kg/mm}^2$

d. 材料特性

ヤング率 $E = 2 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.30$

(3) アウトプット

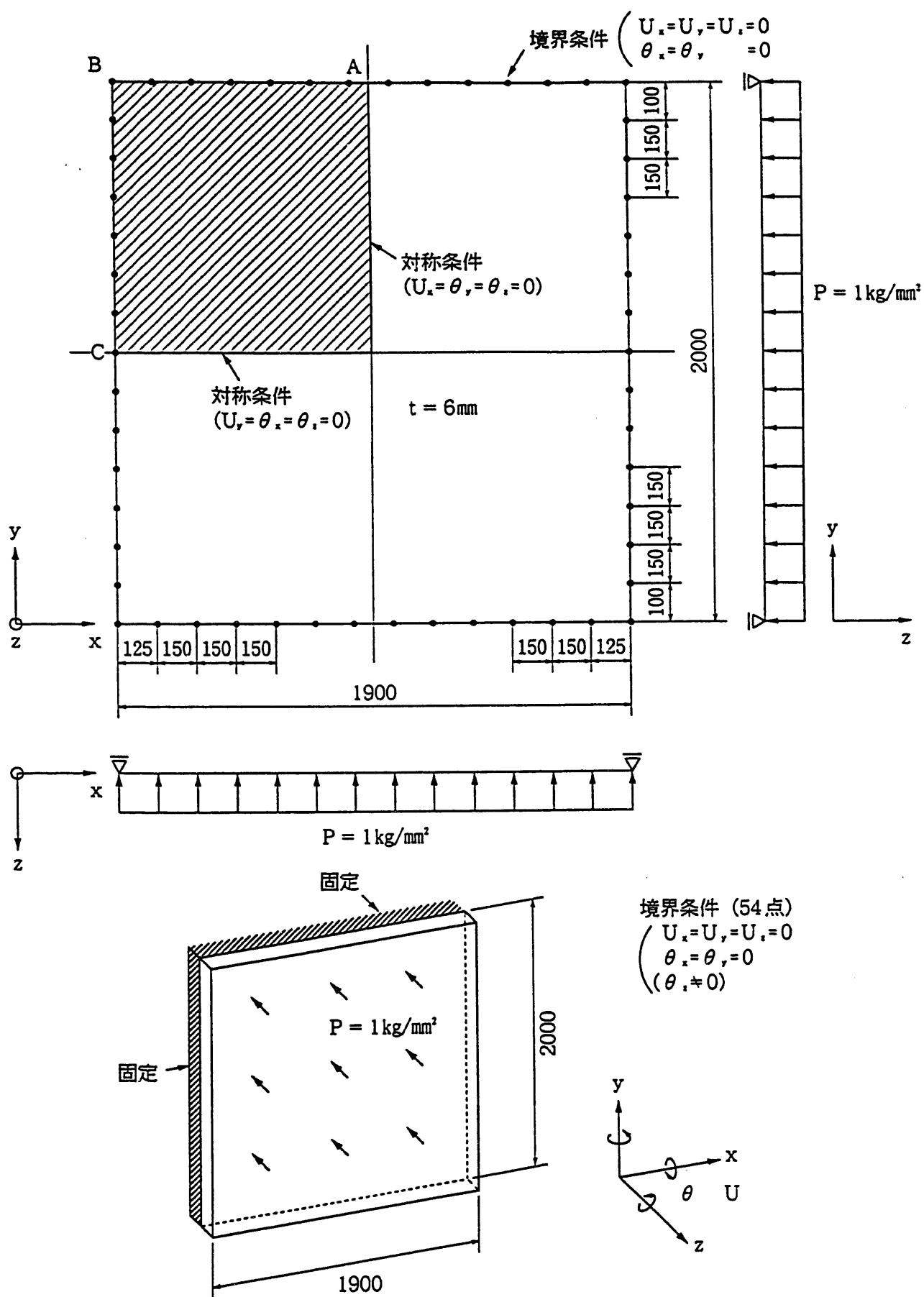
a. 境界条件 (A, B, C) の反力と反力モーメント

b. シェルの等応力線図 (内表面, 外表面, 中立軸)

c. シェルの変位分布図

2. シールディングウォール (M502)

(1) 形状



(2) 計算モデル

a. シェルの形状

1900 × 2000 × 6

b. 境界条件

周囲 54 点で次の境界条件

$$U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_y = 0 \quad (\theta_z \neq 0)$$

c. 外力

圧力 $P = 1 \text{ kg/mm}^2$

d. 材料特性

ヤング率 $E = 2 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.30$

(3) アウトプット

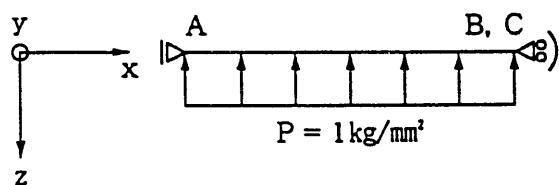
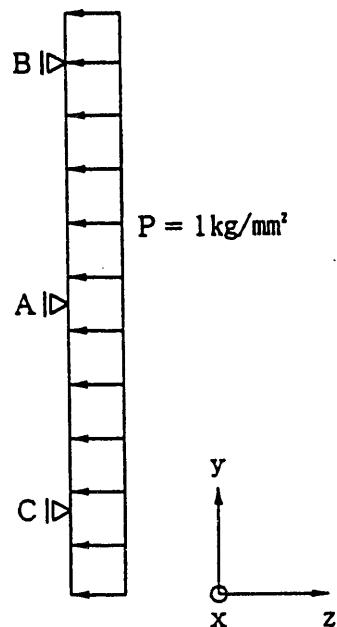
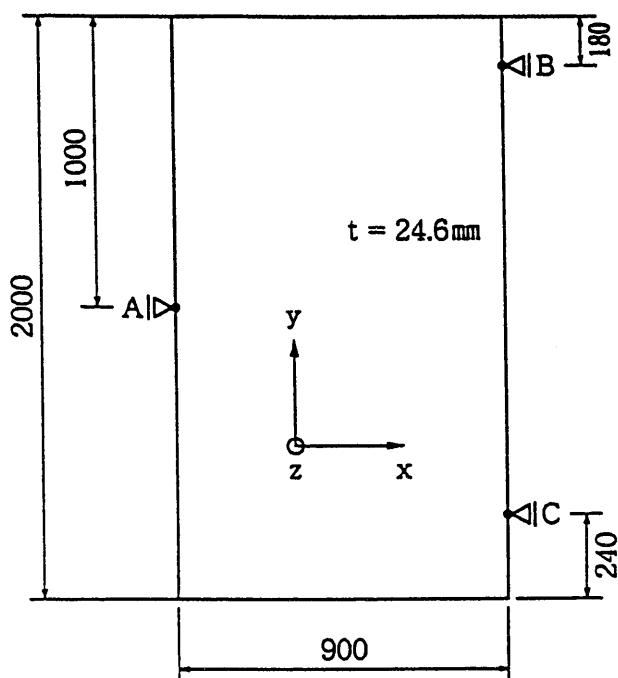
a. 境界条件 (A, B, C) の反力と反力モーメント

b. シェルの等応力線図 (内表面, 外表面, 中立軸)

c. シェルの変位分布図

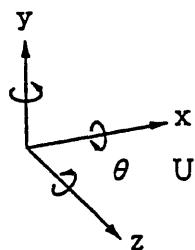
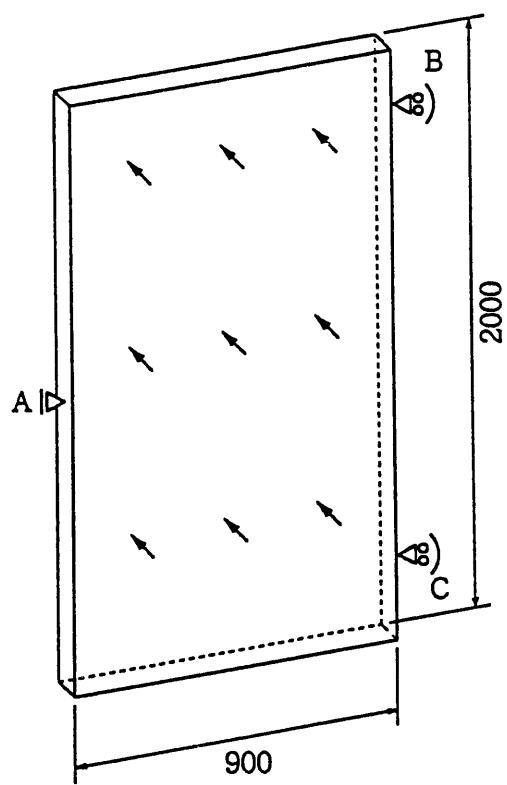
3. 题

(1) 形状



境界条件
A ($\begin{cases} U_x = U_y = U_z = 0 \\ \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0 \end{cases}$)

B, C ($\begin{cases} U_x = U_y = U_z = 0 \\ \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0 \\ (\theta_z \neq 0) \end{cases}$)



(2) 計算モデル

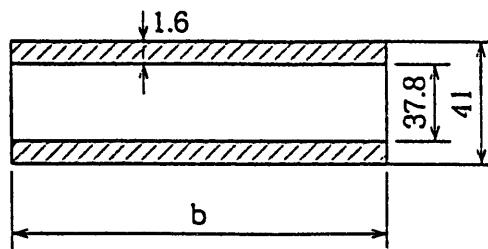
a. シェルの形状 (一様板厚)

◦ $900 \times 2000 \times t$ ◦ t については二つの考え方

(a) 等価剛性

$$I = \frac{b}{12} (41^3 - 37.8^3) = \frac{b}{12} t^3$$

$$t = 24.6 \text{ mm}$$



(b) 等価強度

$$\frac{b}{4} (41^2 - 37.8^2) = \frac{b}{4} t^2$$

$$t = 15.8 \text{ mm}$$

b. 計算方法

(a) 弹性解析では、等価剛性の板厚 ($t = 24.6 \text{ mm}$) を用い、シェルの内外面の応力より、実際の中空板の応力を求める。また、境界条件 (A, B, C) の反力は弾性解析では正しい。

(b) 塑性解析では、等価強度の板厚 ($t = 15.8 \text{ mm}$) を用いる。
しかし、塑性解析となるため、ここでは実施しない。

c. 境界条件

$$A : U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$$

$$B : U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_z = 0 \quad (\theta_y \neq 0)$$

$$C : U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_z = 0 \quad (\theta_y \neq 0)$$

d. 外力

$$\text{圧力 } P = 1 \text{ kg/mm}^2$$

e. 材料特性

$$\text{ヤング率 } E = 2 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{ポアソン比 } \nu = 0.30$$

(3) アウトプット

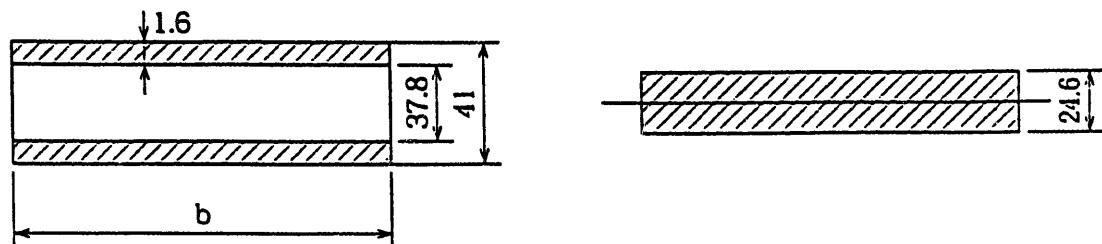
a. 境界条件 (A, B, C) の反力と反力モーメント

b. シェルの等応力線図 (内表面、外表面、中立軸)

c. シェルの変位分布図

(4) 実際の応力とシェルの応力

a. 実際の板厚とシェルの板厚

b. 実際の曲げ応力 σ_b とシェルの曲げ応力 σ_b^*

$$\sigma_b = \frac{M(20.5)}{I}$$

$$\sigma_b^* = \frac{M(12.3)}{I}$$

$$I = \text{断面二次モーメント} = \frac{b}{12} (41^3 - 37.8^3) = \frac{b}{12} (24.6)^3$$

M = 曲げモーメント

$$\boxed{\sigma_b = \frac{20.5}{12.3} \sigma_b^* = 1.667 \sigma_b^*}$$

c. 実際の膜応力 σ_m とシェルの膜応力 σ_m^*

$$\sigma_m = \frac{N}{b(41-37.8)} = \frac{N}{3.2b}$$

$$\sigma_m^* = \frac{N}{24.6b}$$

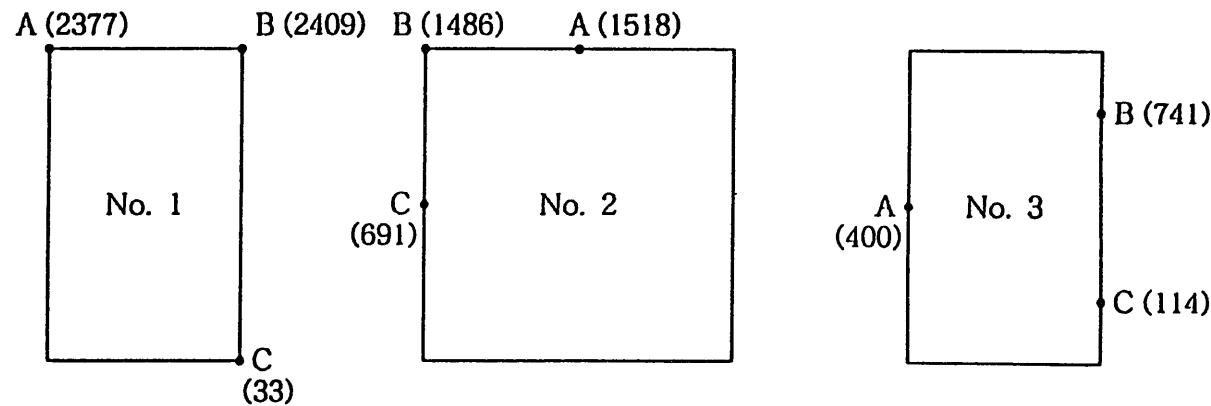
N = 膜力

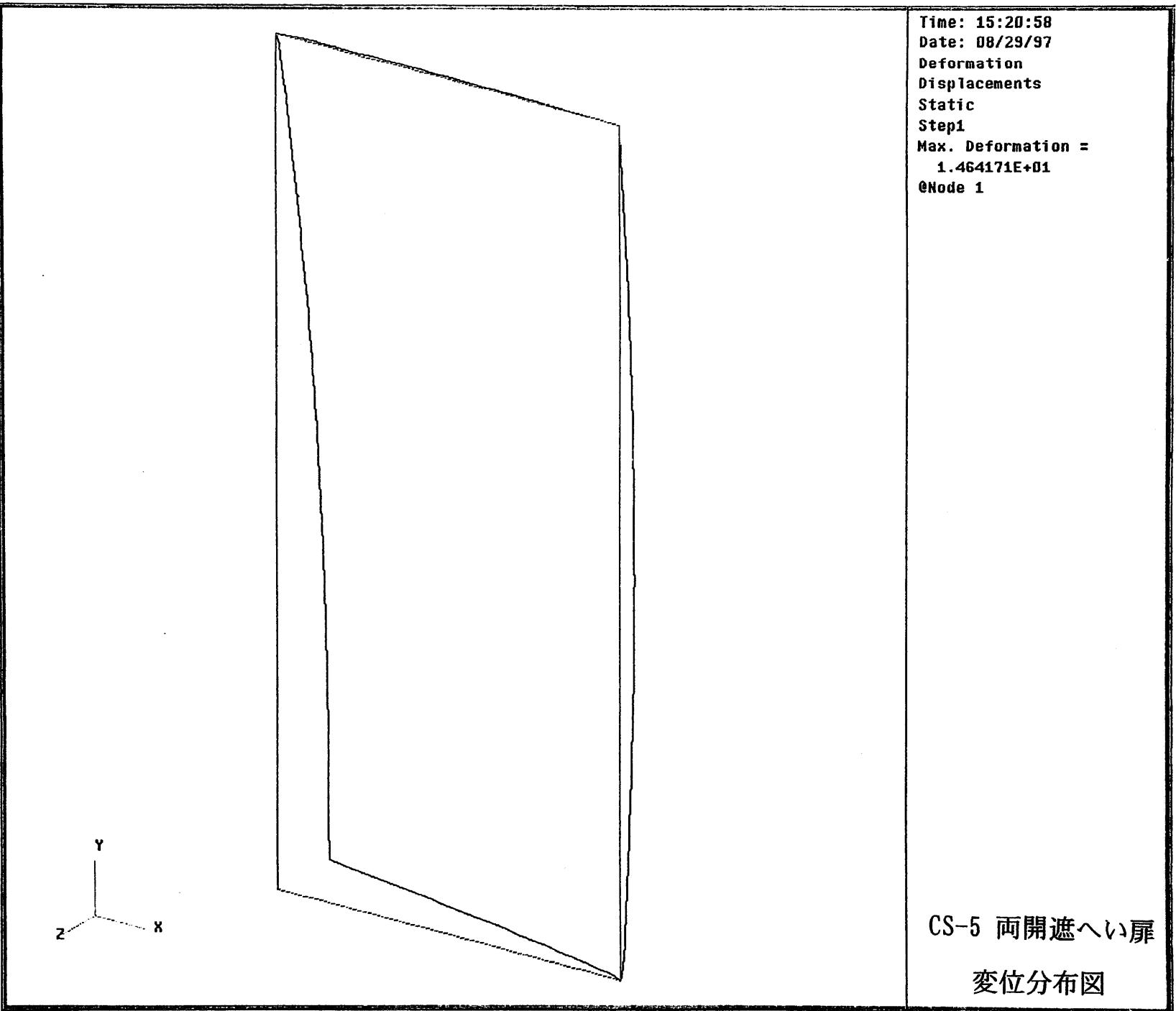
$$\boxed{\sigma_m = 7.69 \sigma_m^*}$$

圧力 $P = 1 \text{ kg/mm}^2$ が作用する時の計算結果

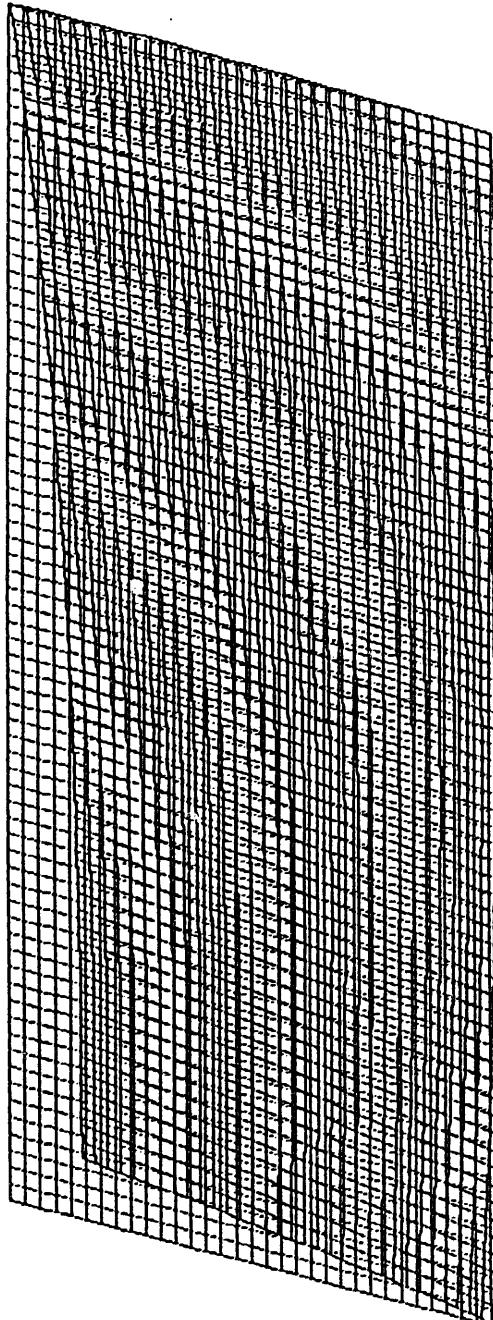
No.	問 領	扉		固定点 A (1)		固定点 B (1)		固定点 C (1)	
		最大ミーゼス応力 (kg/mm ²)	最大変位 (mm)	軸 力 (kg)	曲げモーメント (kg·mm)	軸 力 (kg)	曲げモーメント (kg·mm)	軸 力 (kg)	曲げモーメント (kg·mm)
1	両開しゃへい扉 (CS-5)	375	14.64	6.20×10^5	(2377) $- 5.25 \times 10^7$	(2409) $- 5870$	$- 1.86 \times 10^7$	5.46×10^7	(33) 1.59×10^7
2	シールディングウォール (M502)	3.57×10^4	6.02×10^1	1.24×10^5	(1518) $- 2.34 \times 10^7$	(1486) $- 5.03 \times 10^4$	7.19×10^6	1.27×10^5	(691) $- 2.48 \times 10^7$
3	扉	(2) 5140	2.61×10^3	9.54×10^5	(400) $- 4.83 \times 10^7$	(741) 4.10×10^6	$- 3.49 \times 10^6$	4.36×10^5	(114) $- 8.03 \times 10^7$

(1) 固定点

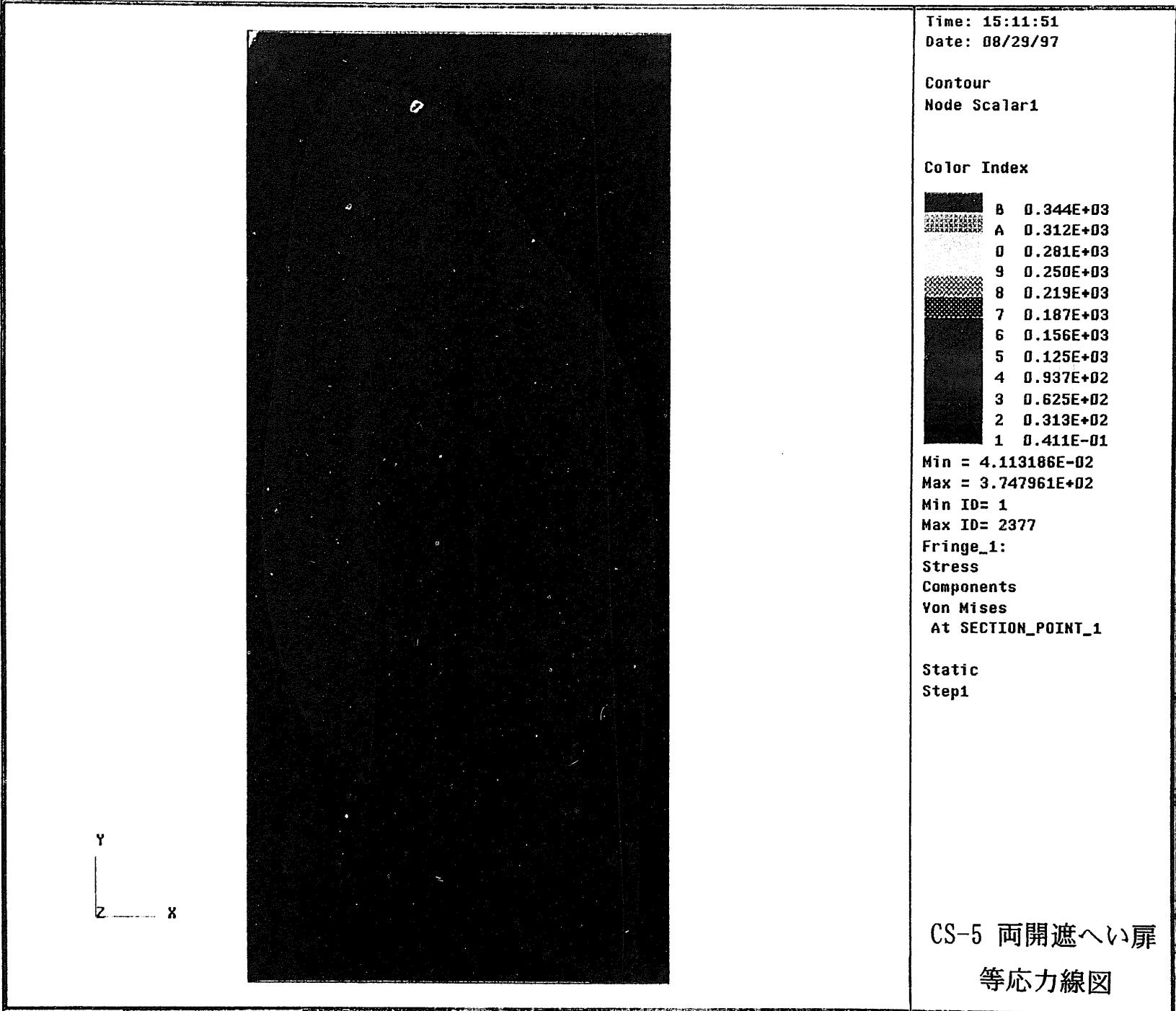
(2) 扉の実際の応力 = $1.667 \times 5140 = 8568 \text{ kg/mm}^2$



Time: 17:38:24
Date: 00/29/97
Deformation
Displacements
Static
Step1
Max. Deformation =
1.464171E+01
@Node 1



CS-5 両開遮へい扉
変位分布図



Time: 17:30:05
Date: 08/29/97
Deformation
Displacements
Static
Step1
Max. Deformation =
6.021095E+04
@Node 745

