

鉄筋コンクリート壁の耐力評価

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。

〒319-11 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

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

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

鉄筋コンクリート壁の耐力評価

山田 登志郎*¹、石田 雅俊*²、澤本 佳和*¹

要 旨

本報告書は、3月11日に発生したアスファルト固化処理施設の火災・爆発事故に対して、当該施設で生じた爆発威力の推定に関し必要となる当該施設の主要な構造壁（床）の静的降伏及び終局耐力の評価を目的としたものである。

鉄筋コンクリート床板の降伏及び終局耐力のうち、前者については基礎微分方程式による解法が比較的有効とされているが、後者についての代表的な評価法にはK.W. Johansonによって体系化された降伏線理論があるが、床板内に生じる扁平アーチ状の圧縮膜作用（アーチアクション）が考慮されていないため、その正確な評価が困難とされている。ここではこのアーチアクションの効果を何らかの形で降伏線理論に取り入れ鉄筋コンクリート床板の終局耐力を評価することを試みる。ただし、複雑な境界条件を持つ床板に対しては本方法の適用が困難であることや、異なった解析法での同一床板のクロチェックを行うことは、解析法の妥当性の検証に有効であることから、一部の床板については、降伏耐力の評価も含め有限要素法による評価も実施した。

その結果、上記クロスチェックを行うことにより、両手法の妥当性を示した。またアーチアクション等の効果を取り入れることにより、簡易手法を用いて、壁の降伏・終局耐力の評価をある程度行えることがわかった。

本報告書は、鹿島建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

* 1 : 鹿島建設株式会社 技術研究所 第三研究部 第3研究室
* 2 : 鹿島建設株式会社 情報システム部 開発課 建築解析C r .

EVALUATION ON STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SLABS

Toshiroh YAMADA*¹, Masatoshi ISHIDAT *²,
and Yoshikazu SAWAMOTO*¹

Abstract

On the 1st. of March, fire and explosive accident was happened in Bituminization Demonstration Facility. An estimation of this explosive force have been needed. In this report, static yield and ultimate strength of its main structural walls and floors are evaluated in order to guess the magnitude of the explosive force.

Among yield and ultimate strength of reinforced concrete(RC) slabs, the former can be estimated effectively by a solution of fundamental differential equation. The most popular method to estimate the latter is the method using a yield line theory which was proposed by K.W.Johanson, But it is said to be different to estimate exactly the ultimate strength of RC slabs, because this theory does not take an arch effect created within RC slabs into account. Here a modified yield line theory regarding the arch effect is tried to estimate the ultimate strength of RC slabs. However the above method(simple method) is difficult to be applied to the slabs with complicated boundary conditions. In case of complicated boundary conditions, a different analytical method is needed. Here a Finite Element Method(FEM) is selected. And it is effective to verify the validity of the simple estimative method by analyzing same slabs using both methods.

In this results, previous experimental results and some of RC slabs in Bituminization Demonstration Facility were evaluated on the yield and ultimate strength using both methods. And the validity of both methods were verified. Therefore, taking the arch effect created within RC slabs into account, the evaluation on the yield and ultimate strength of the walls was turned out to be achieved to some extent using the simple estimative method.

Work performed by Kajima Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

*1:Kajima Technical Research Institute
*2:Information Processing Center

目 次

1. はじめに	1
2. 解析対象部材	2
3. 簡易手法による鉄筋コンクリート壁の降伏・終局耐力評価	6
3.1 概要	6
3.2 耐力評価の手順	7
3.3 簡易手法の妥当性の検証	14
3.4 降伏・終局耐力の評価結果	22
4. 有限要素法（FEM）による鉄筋コンクリート壁の解析	24
4.1 概要	24
4.2 解析手法	24
4.3 モデル化の方針	24
4.4 コンクリートおよび鉄筋の物性	24
4.5 初期降伏および終局状態の定義	24
4.6 解析対象	25
4.7 解析結果	25
5. 簡易手法とFEM解析結果との比較	38
6. 被害レベルの概略推定	39
7. まとめ	43
参考文献	44
付録-1 降伏耐力評価のための予備検討	45
付録-2 終局耐力評価のための予備検討	48
付録-3 鉄筋コンクリート壁の寸法・配筋状況	50
付録-4 FEM解析コードの概要	60
付録-5 FEM解析結果（変形図・破壊状況図）の詳細図	67

1. はじめに

3月11日に発生したアスファルト固化処理施設の火災・爆発事故に対して、当該施設のコンクリートの健全性と当該施設で生じた爆発威力の推定に関し、当社が協力することとなった。本業務は爆発威力の推定に必要な当該施設の主要な構造壁（床）の静的降伏及び終局耐力の評価を目的としたものである。

鉄筋コンクリート床板の降伏及び終局耐力のうち、前者については基礎微分方程式による解法が比較的有効とされているが⁽¹⁾、後者についてはその正確な評価が困難とされている。これは代表的な評価法にK.W. Johansonによって体系化された降伏線理論があるが⁽²⁾、本方法は特に周辺が拘束された床板に対しては、床板内に生じる扁平アーチ状の圧縮膜作用（アーチアクション）により、終局強度を過少に評価することが多くの研究者によって指摘されているからである⁽⁴⁾。しかしながら、簡便な計算により終局耐力が評価可能であるというメリットがあることから、ここではこのアーチアクションの効果を何らかの形で降伏線理論に取り入れ鉄筋コンクリート床板の終局耐力を評価することを試みる。ただし、複雑な境界条件を持つ床板に対しては本方法の適用が困難であることや、異なった解析法での同一床板のクロスチェックを行うことは、解析法の妥当性の検証に有効であることから、一部の床板については、降伏耐力の評価も含め有限要素法による評価も実施する。

2. 解析対象部材

評価対象とする部材は、エクストルーダ室(R151)に隣接した以下に示す各部室の壁(4方向)、床、及び、天井である。

[評価対象とする部屋] : R151 (エクストルーダ室)
R152 (アスファルト充てん室)
A121 (カスク保管室)
A133 (エクストルーダモータ室)
A234 (保守作業室)
A235 (保守エアロック室)
A236 (更衣室)

ここでは、次に示す方針、

- (1) 爆心から外へ通じる室(A133)の開口のある薄い壁(No.1-2)
- (2) 爆心(R152)の開口を有する壁・天井及び面積の広い壁・床・天井(No.3-9)
- (3) 爆心上部(A234)の主な壁(No.10-13)
- (4) 爆心上部から爆圧を受けた室(A236)の薄い壁・天井(No.14-20)

により、評価対象とする部屋の部材の内、表-2.1、図-2.1~2.2 (ハッチ部分) に示す20面を選択し、3章に示す簡易手法による降伏・終局耐力の評価と4章に示す当社所有の有限要素法(FEM)プログラムCARC-SHELLを用いたシミュレーション解析を行った。

ただし、選択した部材は大梁・柱で囲まれた面を1つの部材と見なしている。

表2.1 耐力評価実施部位

No.	解析名称	FEM	簡易手法	板厚(mm)	備考
1	A133-壁S		○	200	開口あり
2	A133-壁W		○	300	開口あり
3	R152-壁W (R151-壁E)	○	○	300	開口あり
4	R152-壁N-1		○	800	開口なし
5	R152-壁N-2		○	550	開口あり
6	R152-壁N-3		○	750	開口あり
7	R152-天井-1 (A234-床)		○	850	開口あり
8	R152-天井-3 (A236-床)		○	850	開口なし
9	R152-床-4		○	900	開口なし
10	A234-壁S-1		○	350	開口なし
11	A234-壁S-2		○	350	開口なし
12	A234-壁E (A235-壁W)		○	350	開口あり
13	A234-壁W		○	350	開口なし
14	A236-壁E-1	○	○	200	開口あり
15	A236-壁W-1 (A235-壁E)	○	○	200	開口なし
16	A236-壁W-2		○	200	開口あり
17	A236-壁S-1		○	200	開口なし
18	A236-壁S-2		○	200	開口なし
19	A236-天井-1	○	○	140	小梁あり(簡易手法：分割)
20	A236-天井-3		○	140	開口なし

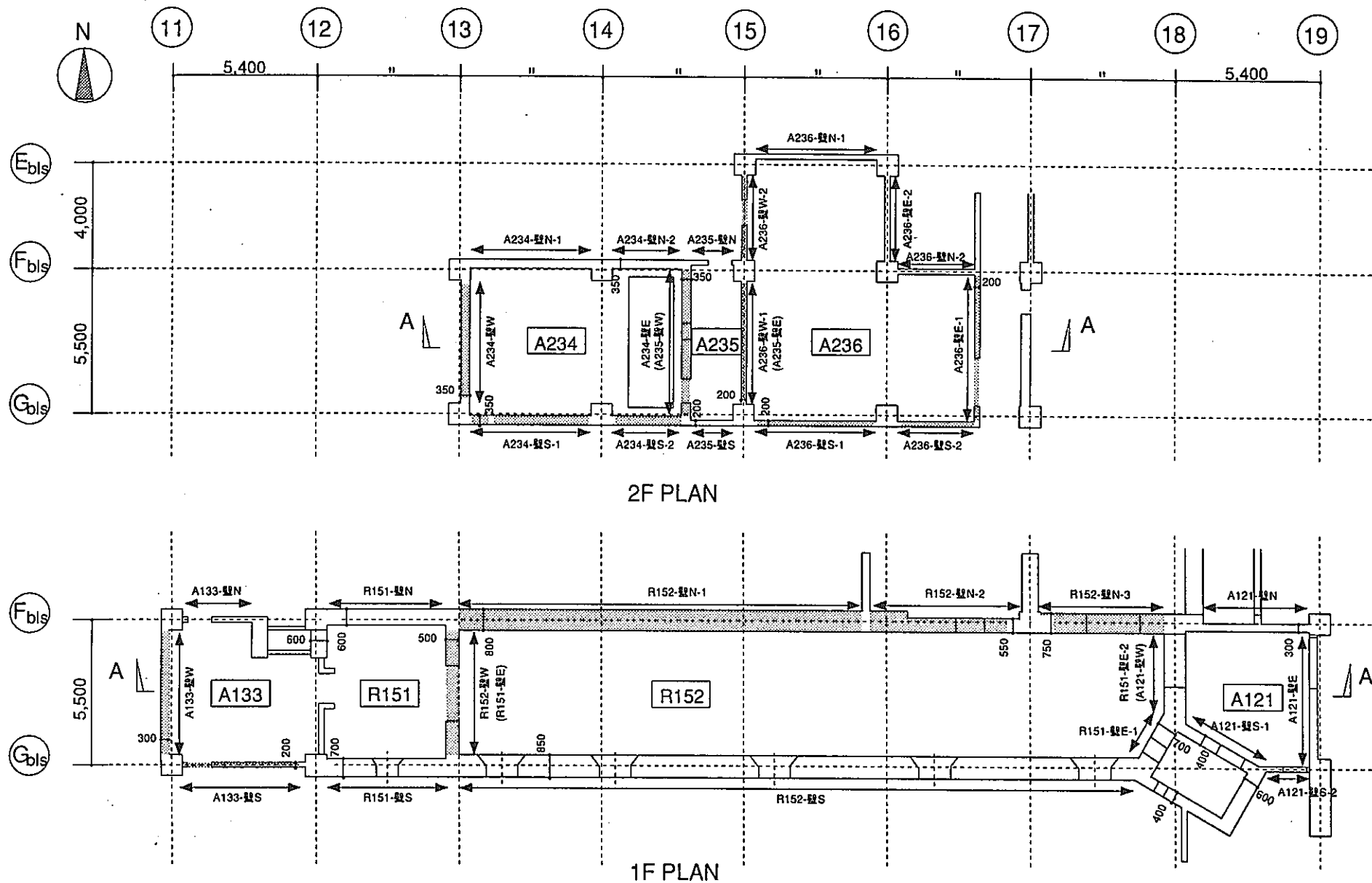
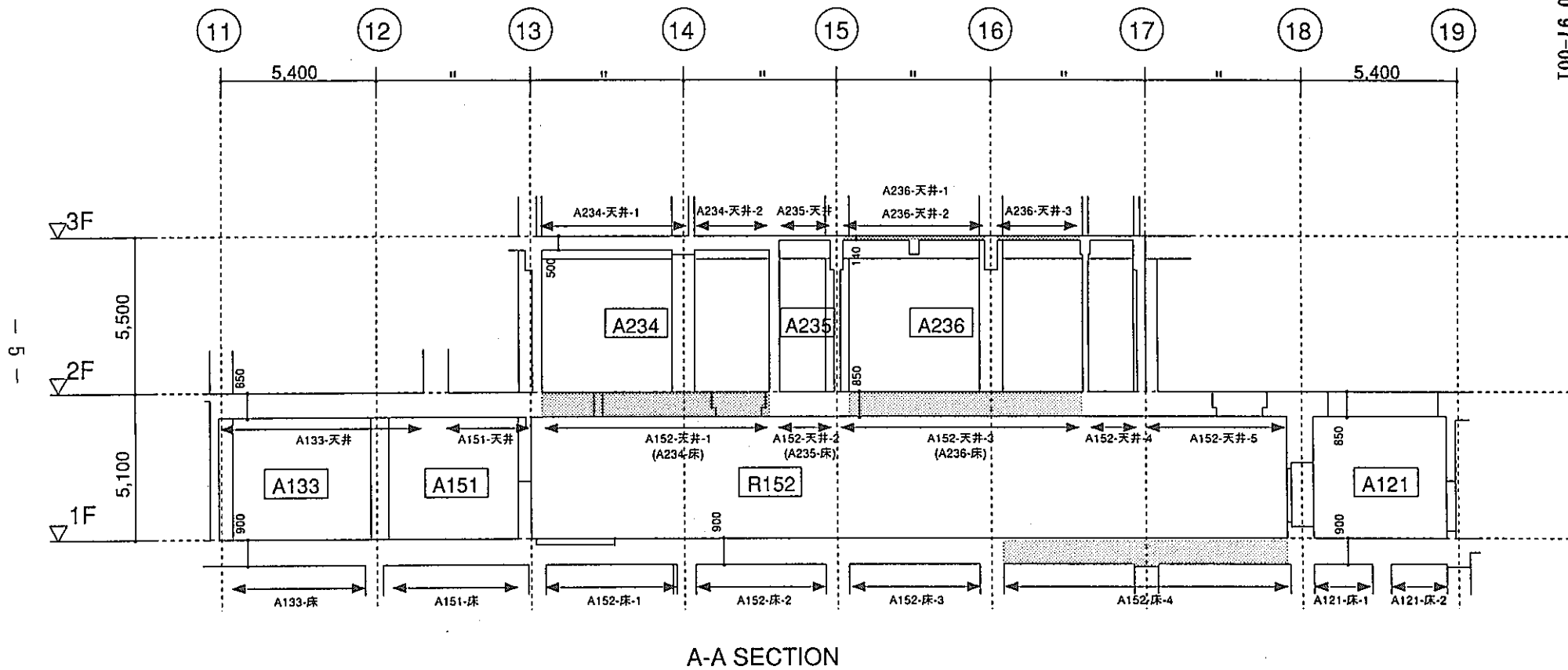


图2.1 解析对象範圍 (平面图)



A-A SECTION

図2.2 解析対象範囲 (断面図)

3. 簡易手法による鉄筋コンクリート壁の降伏・終局耐力評価

3.1 概要

ここで言う簡易手法とは、鉄筋コンクリート壁の降伏・終局耐力の評価を、それぞれに対して

降伏耐力の評価：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求める。

終局耐力の評価：境界条件に対応する降伏線理論により求める。

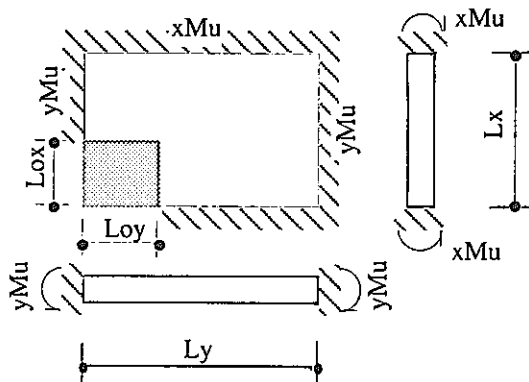
のように行うことを言う。

上述の評価に対しては、任意の開口を取り扱うことは困難であるため、今回のような開口を有する壁を評価するにあたっては、仮定が必要となってくる。

よって、3.2節にそれぞれの手法の概要を挙げる。ここでは、降伏・終局耐力を評価する際のもとになる鉄筋コンクリート板の終局モーメントの評価については、アーチアクションの効果を何らかの形で取り入れたものも考える。次に、3.3節では既往の実験結果との比較を行い、特に終局耐力に関して、本手法の妥当性を検討する。最後に3.4節で、2章に示す解析部位に対して降伏・終局耐力の評価を行う。

3.2 耐力評価の手順

ここでは、以下に示す4辺固定の境界条件を持つ解析モデルを例に挙げ、簡易手法による降伏・終局耐力の評価法の手順について説明する。



xMu, yMu : 単位幅当りの終局モーメント
 Lx, Ly : 短辺及び長辺の内法スパン
 Lox, Loy : Lx 及び Ly 方向の開口幅

①単位当りの終局モーメント (xMu, yMu) を算出する。

まず、以下の3種類の板の単位幅当りの終局モーメントを提案する。ここで、(3.2.1)式は「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」による式である。また、(3.2.2)式は文献 [4] を参考に鉄筋コンクリート板内に生じる扁平アーチ状の圧縮膜作用 (アーチアクション) の効果を取り入れた式であり、(3.2.4)式は(3.2.2)式に於いて鉄筋強度に鉄筋の降伏点を使用していたものを鉄筋コンクリート板の終局状況を考えて、鉄筋強度に鉄筋の引張強度を使用した式である。

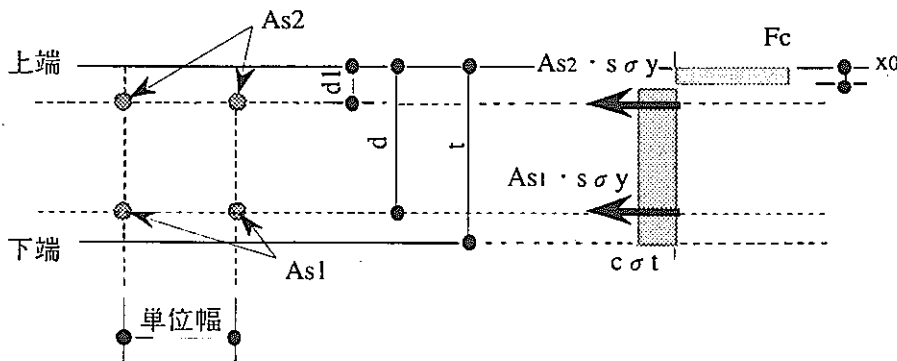
$$Mu0 = 0.9As1 \cdot s \sigma y \cdot d \quad (3.2.1)$$

$$Mu1 = Fc \cdot x0^2 / 2 + c \sigma t (t - x0)^2 / 2 + As1 \cdot s \sigma y (d - x0) + As2 \cdot s \sigma y (d1 - x0) \quad (3.2.2)$$

$$x0 = \frac{c \sigma t \cdot t + (As1 + As2) s \sigma y}{Fc + c \sigma t} \quad (3.2.3)$$

$$Mu2 = Fc \cdot x0^2 / 2 + c \sigma t (t - x0)^2 / 2 + As1 \cdot s \sigma u (d - x0) + As2 \cdot s \sigma u (d1 - x0) \quad (3.2.4)$$

$$x0 = \frac{c \sigma t \cdot t + (As1 + As2) s \sigma u}{Fc + c \sigma t} \quad (3.2.5)$$



ここで、

- x_0 : 圧縮縁から中立軸までの距離
- t : 板厚
- d : 圧縮縁から下端鉄筋中心までの距離
- d_1 : 圧縮縁から上端鉄筋中心までの距離
- F_c : コンクリートの圧縮強度
- $c_{\sigma t}$: コンクリートの引張強度
- $s_{\sigma y}$: 鉄筋の降伏点
- A_{s1} : 単位幅当りの下端鉄筋の断面積
- A_{s2} : 単位幅当りの上端鉄筋の断面積

なお、文献 [4] に於いては引張側鉄筋（下端鉄筋）のみの場合の単位幅当りの終局モーメントの式しか載っていないかったため、図のような圧縮側鉄筋（上端鉄筋）のある場合について、(3.2.2)式～(3.2.5)式を導出した。

②理論解により開口のない板の降伏耐力 (P_y) を評価する。

ここでは、開口の無い板として個々の μ に対して、図3.2.1に示されるグラフ [1] により降伏耐力 (P_y) を算出する。

$$P_y' = \min(xP_y, yP_y) \quad (3.2.6)$$

$$xP_y' = \frac{x\mu \cdot L_y}{m_x \cdot L_x} \quad (3.2.7)$$

$$yP_y' = \frac{y\mu \cdot L_y}{m_y \cdot L_x} \quad (3.2.8)$$

③降伏耐力 (P_y) に対する開口による補正係数 (r_{Py}) を乗じ、開口の有る板の降伏耐力 (P_y) を求める。

補正係数 r_{Py} は、開口位置と平均開口率 (L_o/L) からグラフ(図-3.2.2)により求められる。ただし、今回の解析対象の壁がほぼ正方形であるため、 r_{Py} は正方形版の値を代用することとする。また、開口位置についても、以下に示す代表的な3つのタイプ（中央部、中央端部、コーナー部）のみ考え、実際は対象とする鉄筋コンクリート壁の開口位置に近いものの値を使用するものとする。

$$P_y = r_{Py} \cdot P_y' \quad (3.2.9)$$

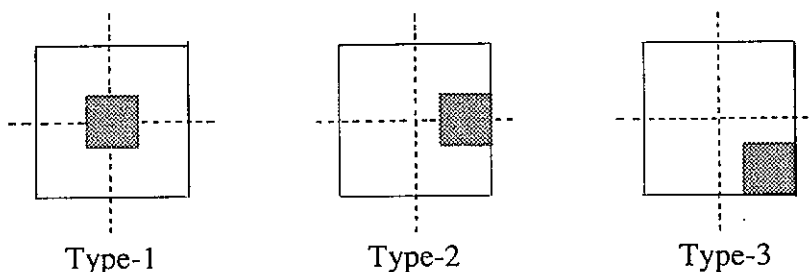
$$r_{Py} = r_{Py}(\text{開口位置}, L_o/L) \quad (3.2.10)$$

開口位置 : 中央部(Type-1), 中央端部(Type-2), コーナー部(Type-3)

平均開口率 : L_o/L

$L_o = \text{ave}(L_{ox}, L_{oy})$: L_x および L_y 方向の開口幅の平均

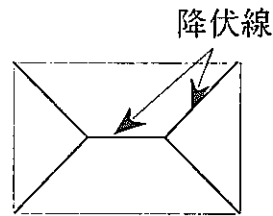
$L = \text{ave}(L_x, L_y)$: L_x と L_y の平均



*) 補正係数(rPy)については、開口を有する板の弾性理論による解を導出した例が少ないため、当社の保有の弾性FEMプログラム(KANSAS)により求めた。詳細については、付録-1に掲載する。

④降伏線理論により開口のない板の終局耐力 (Pu') を評価する。

四辺固定の長方形版の場合には、降伏線は右図のように形成され、終局耐力の値は、下式となる。



$$Pu' = pu \cdot (Lx \cdot Ly - Lox \cdot Loy) \quad (3.2.11)$$

$$pu = 24xMu \frac{\frac{Ly}{Lx}}{\frac{yMu}{xMu} Lx^2 \left(\frac{3yMu \cdot Ly}{2xMu \cdot Lx} + \frac{Lx}{Ly} \sqrt{\left(\frac{Lx}{Ly} \right)^2 + 3 \left(\frac{xMu}{yMu} \right)^2} \right)} \quad (3.2.12)$$

⑤終局耐力 (Pu') に対する開口による補正係数(rPu)*を乗じ、開口の有る板の終局耐力 (Pu) を求める。

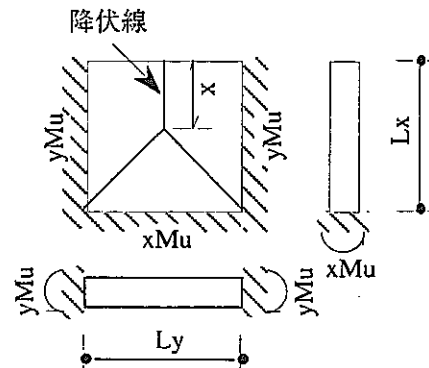
補正係数rPuは、開口位置と平均開口率 (Lo/L) からグラフ(図-3.2.3)により求められる。ただし、今回の解析対象の壁がほぼ正方形であるため、rPuは正方形版の値を代用することとする。

$$Pu = rPu \cdot Pu' \quad (3.2.13)$$

$$rPu = rPu(\text{開口位置}, Lo/L) \quad (3.2.14)$$

*) 補正係数(rPu)については、開口を有する正方形板の終局耐力を降伏線理論により導出し求めた。詳細については、付録-2に掲載する。

以上が今回対象とする鉄筋コンクリート壁・床のほとんどが含まれる4辺固定の境界条件を持つ解析モデルの場合についてである。ただし、今回対象とする鉄筋コンクリート壁・床の内、R152-天井-1 (A234-床)の境界条件のみ、3辺固定・1辺自由となっているため、この場合の評価法の簡単な説明を行う。境界条件が変わっても上記の流れはほぼ同じである。異なる点は、以下に示す2点である。



(1) ②理論解により降伏耐力を評価する際に、図3.2.1ではなく図3.2.4^[1]を用いる点。

(2) ④降伏線理論により終局耐力を評価する際に、(3.2.12)式ではなく以下に示す(3.2.12')、(3.2.12'')式を用いる点。

$$pu = \frac{12}{Ly^2} \cdot \frac{4Lx \cdot yMu \cdot x - 4Lx^2 \cdot yMu - Ly^2 \cdot xMu}{(x^2 + Lx \cdot x - 2Lx^2)} \quad (3.2.12')$$

$$x = \frac{\left(\frac{Ly}{Lx} \right)^2 + 4 \frac{yMu}{xMu} - \frac{Ly}{Lx} \sqrt{\left(\frac{Ly}{Lx} \right)^2 + 12 \frac{yMu}{xMu}}}{4 \frac{yMu}{xMu}} \cdot Lx \quad (3.2.12'')$$

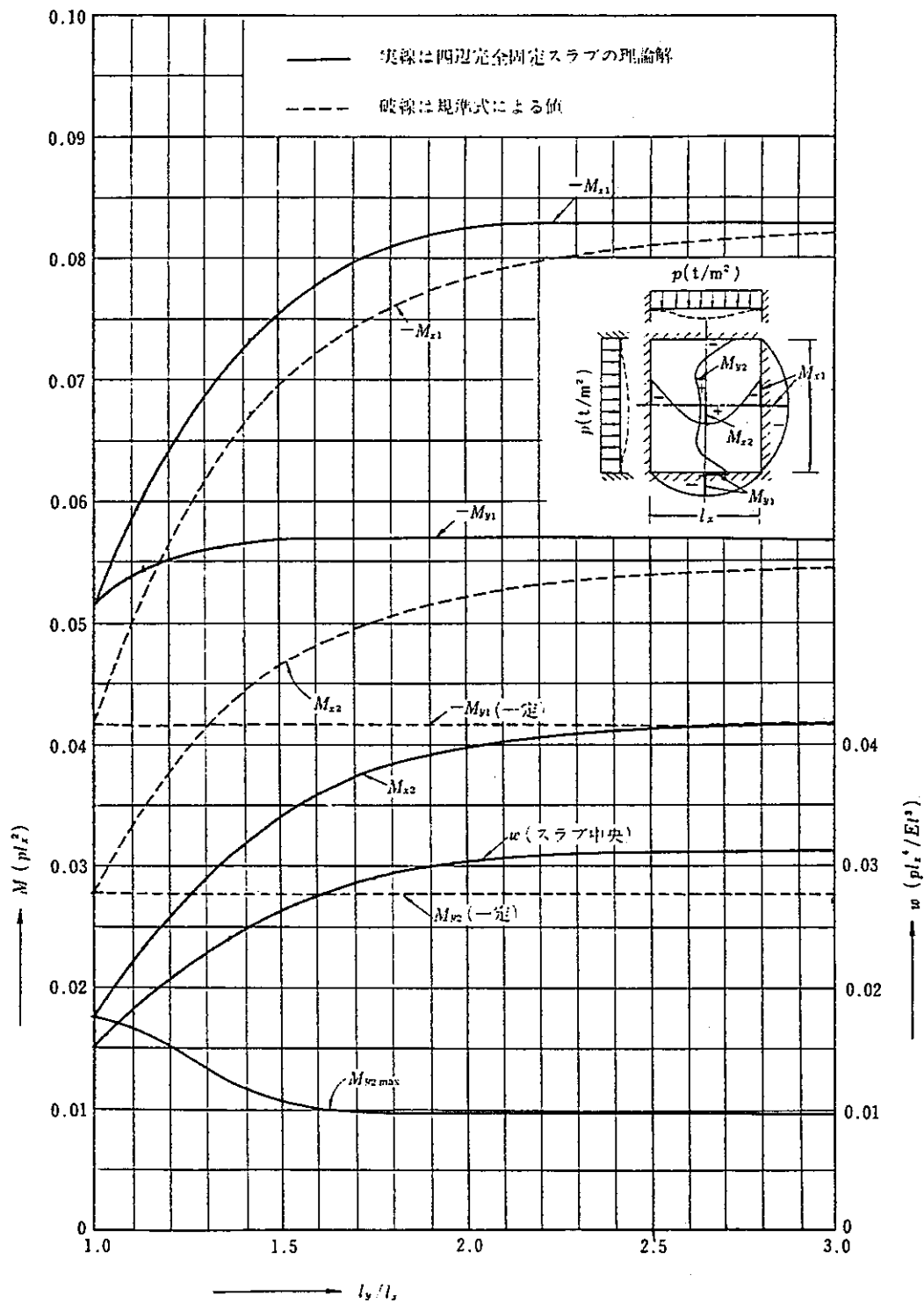


図3.2.1 等分布荷重時四辺固定スラブの曲げモーメントとたわみ ($\nu=0$)

注) 「破線は規準式」とあるのは、日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準式

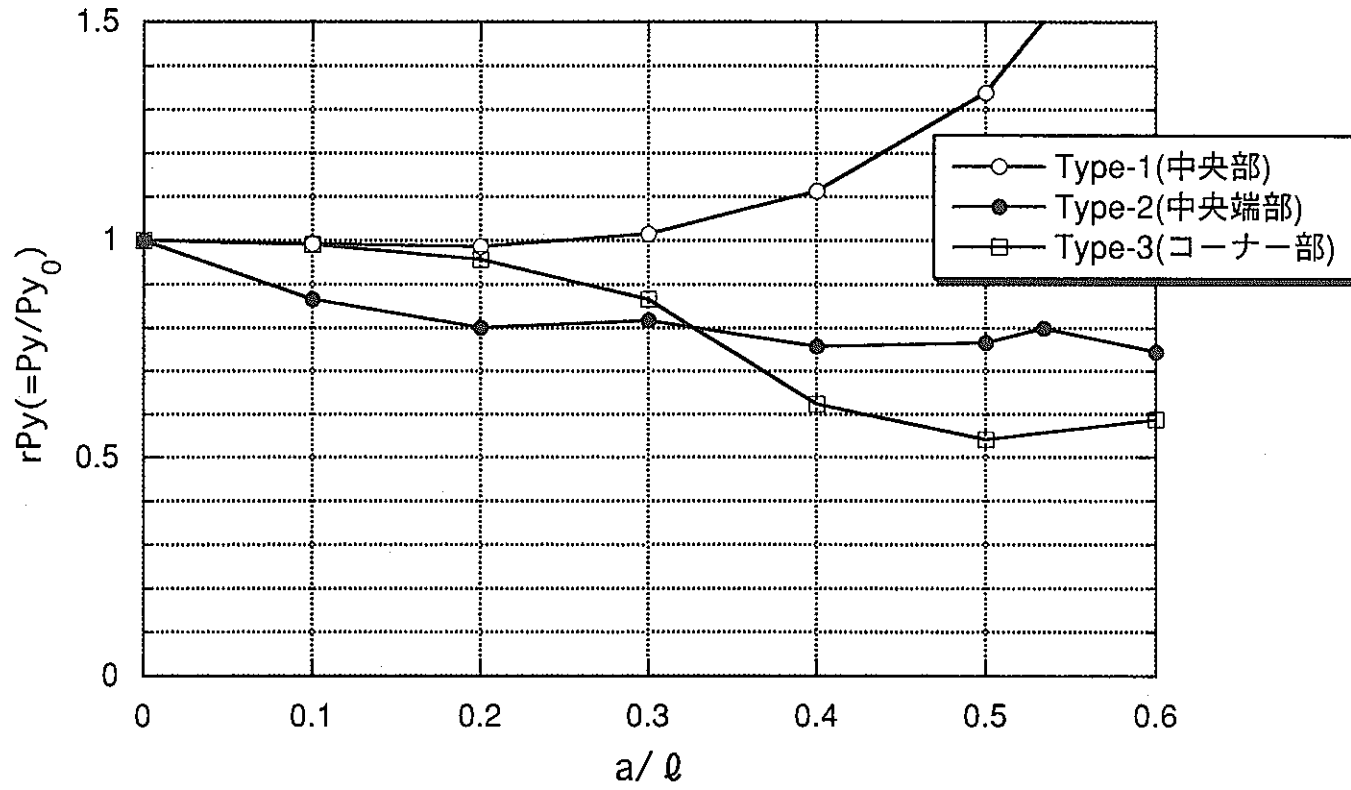


図3.2.2 降伏耐力に対する開口による補正係数

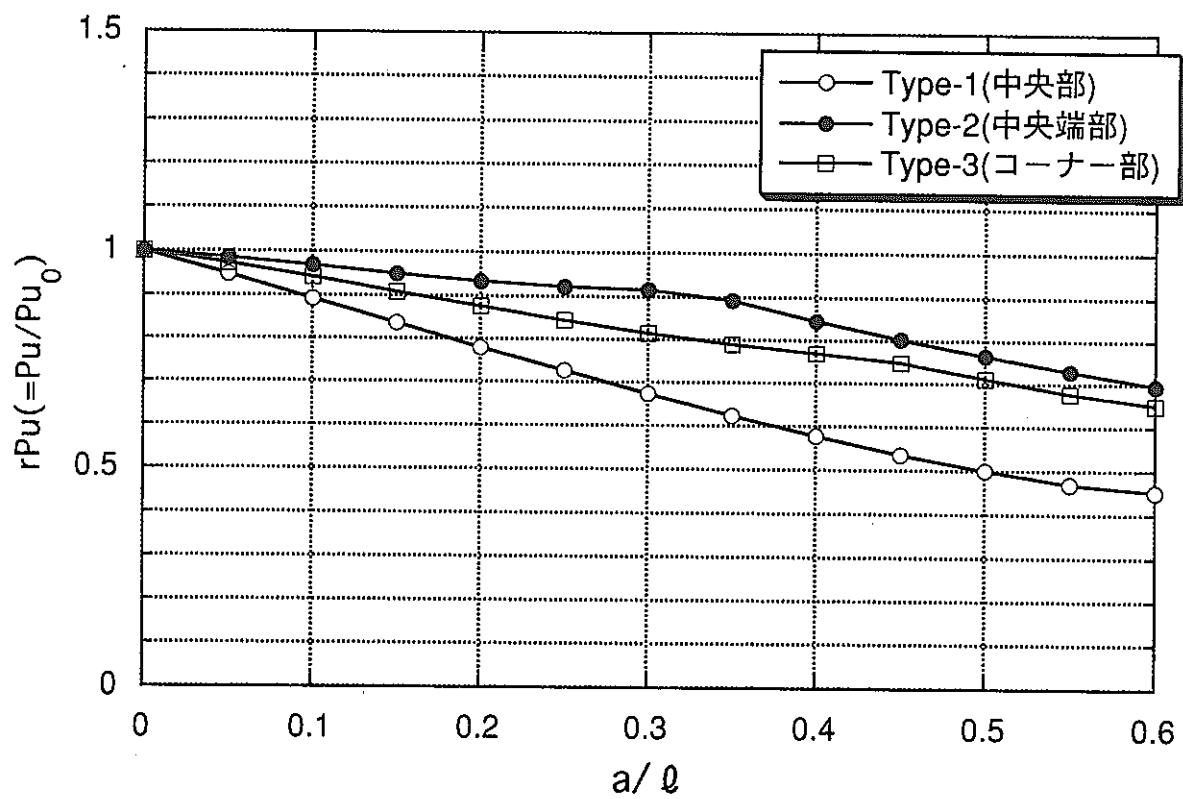


図3.2.3 終局耐力に対する開口による補正係数

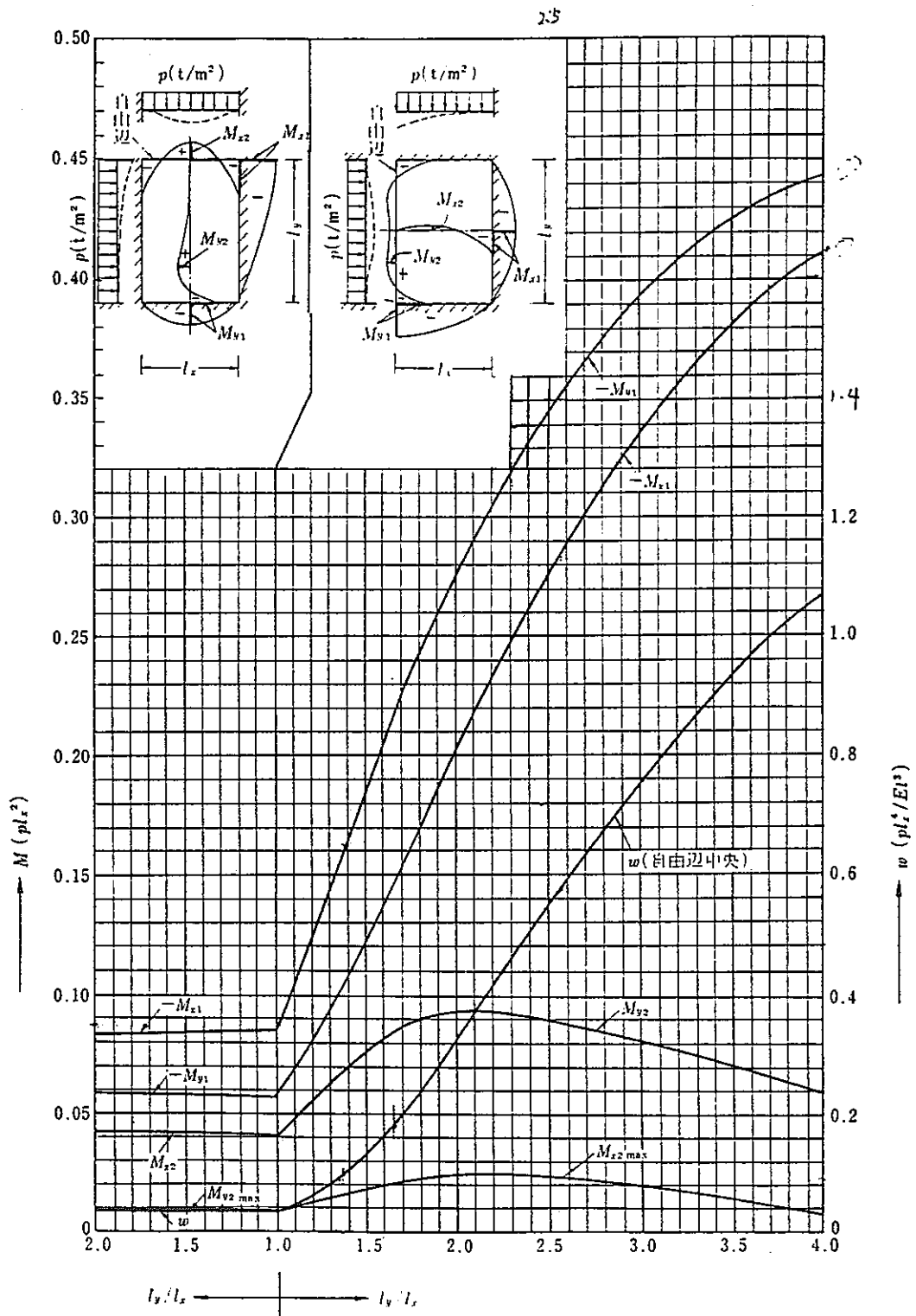


図3.2.4 等分布荷重時三辺固定、一辺自由スラブの曲げモーメントとたわみ ($\nu=0$)

3.3 簡易手法の妥当性の検証

ここでは、荷重条件が、分布荷重（多点集中荷重）で、支持条件が四辺固定支持である既往の実験結果10例を取り上げ、個々の試験体について耐力評価を行うことにより、簡易手法の妥当性を検討する。この例には、開口を有する板も含まれている。

評価結果については、弾塑性FEM(当社所有プログラム：CARC-SHELL)による解析結果も併せて、表3.3.1と図3.3.1に掲載する。

ただし、3.2節で示した簡易手法により得られた計算値は、等分布荷重の条件で求められたものであり、実験結果とは荷重条件が異なるため、簡易手法により得られた降伏および終局耐力に、実験での荷重条件を考慮した補正係数を乗じる必要がある。ここでは、加力点が9点の場合には0.6を、16点の場合には8/9を乗じ、32点の場合にはほぼ等分布荷重と見なし、補正係数を乗じることなくそのままの値を用いた。

これにより、簡易手法による終局耐力に関しては、終局モーメントとして、(3.2.1)式を用いたものは、実験結果に対して、かなり低めの評価となり、鉄筋コンクリート板のアーチアクションを考慮した(3.2.2)式及び(3.2.4)式を用いたものは、実験結果をある程度良く表現していることがわかった。なお、(3.2.4)式による終局耐力については、概ね±30%程度の誤差範囲内で評価できることがわかる。ただし、実際の板の終局現象は、鉄筋が降伏し、終局状態（破断）に至るまでに生じるので、(2.2.2)式と(2.2.4)式の間の値が、板の終局耐力の値となるものと判断される。

ここで簡易手法では、周辺の拘束条件を完全固定として取り扱っており、上記誤差の要因にこの周辺の拘束条件の影響も考えられる。以下では(3.2.4)式による終局耐力（以下、簡易法と略記）を例にとって拘束条件が耐力に及ぼす影響についての考察を行った。表3.3.2と図3.3.2に示す周辺の柱・梁の曲げ剛性や振り剛性の比（横軸：以下では剛性比と略記）と実験値と簡易法との比（縦軸）の関係を見ても、明確な相関関係は見られなかった。また、今回の対象とする構造部材に関しても簡易法（拘束条件；固定）とFEM（拘束条件；考慮）との比較を行ったところ、A236壁E-1とA236壁W-1は剛性比が大きくなっているが（表3.3.3）、両解析法の終局耐力は良く一致しており、これらの事実を見る限りでは、周辺の拘束条件が結果に影響を与える大きな要因ではないことがわかる（計算値は3.4節の表3.4.1参照）。以上より、少なくとも本解析に関してはこのような剛性比の範囲の付帯柱・梁の周辺拘束条件を取り扱う場合には、完全固定として取り扱ってもそれほど問題は無いことがわかった。

また、FEMのシミュレーション解析結果については、一般的に実験結果より高めに出ることが知られており、この場合も多少高い値を示す傾向がある。また、UR2-1試験体との比較については、鉄筋位置の情報がやや不確かな面もあり、これを度外視すればFEMのシミュレーション解析結果は概ね15%程度実験値より高めに評価する傾向にあると判断される。ここで、UR2-1試験体の鉄筋位置を板の中央と判断したのは、同著者の同様な実験シリーズで、鉄筋位置が板の中央であること、および簡易法と実験値が良い対応を示した点からである。

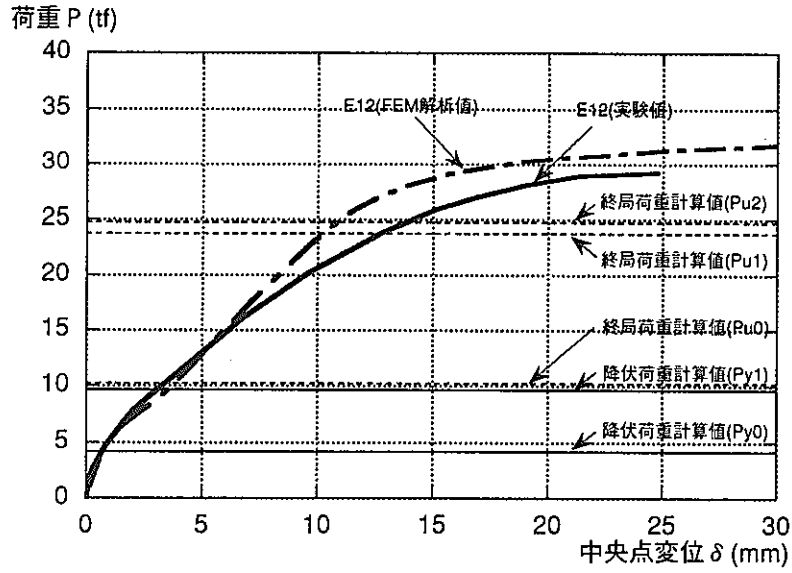
最後に、降伏耐力については、該当する実験値がないため、比較を実施することができなかったが、終局耐力と同様、幅を持って評価するのが妥当だと思われる。ただし、簡易手法では、鉄筋が降伏する以前に発生するコンクリートのひび割れによる剛性低下を忠実に評価していない分（簡易法では、等価弾性剛性で評価）、FEMと比較して多少誤差が入る可能性がある。

上記結果より、簡易手法により評価された降伏・終局耐力の妥当性が示された。

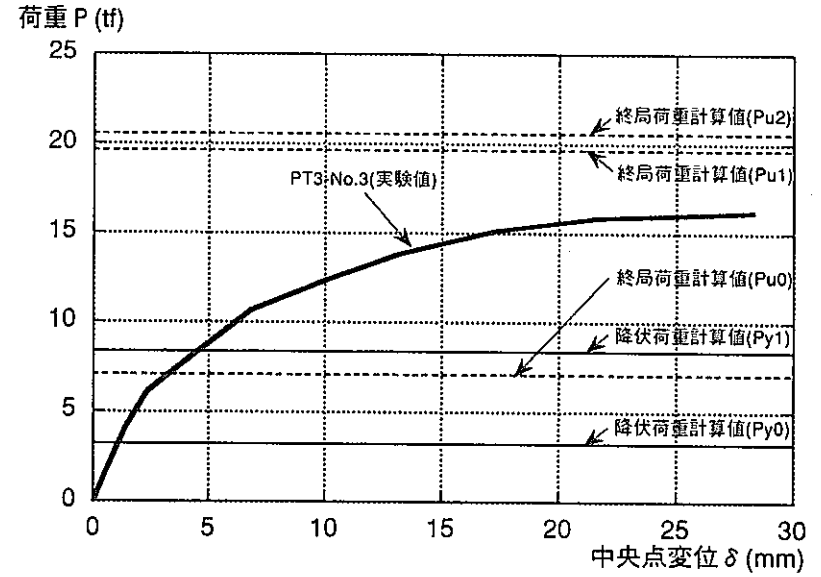
表3.3.1 実験結果（等分布荷重・四辺固定支持）と計算結果との比較

No.	実験者	試験体の種類	スラブ寸法 (cm)				鉄筋				コンクリート		降伏強度 (tf/cm ²)		終局強度 (tf/cm ²)						実験値			
			スパン ⁽¹⁾ L _x × L _y (加力点数)	開口	版厚 t	L _x /t	配筋 ⁽²⁾	鉄筋比 ⁽³⁾ (%)	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 ⁽⁴⁾ (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 ⁽⁵⁾ (kgf/cm ²)	計算値		実験値		計算値				FEM			
													P _{yo} ⁽⁷⁾	P _{yl} ⁽⁸⁾	P _{uE}	P _{u0} ⁽⁹⁾	P _{u1} ⁽¹⁰⁾	P _{u2} ⁽¹¹⁾	P _{uA} ⁽¹²⁾	P _{uE} P _{u0}	P _{uE} P _{u1}	P _{uE} P _{u2}	P _{uE} P _{uA}	
1	坂尻, 田野, 上橋 ⁽¹⁾	E12	200×200 (9)	-	6.51	30.7	4.0 φ @100 dw.	0.38	5390	5900	254.0	21.5	4.18	9.67	29.20	10.26	23.77	24.77	31.50	2.85	1.23	1.18	0.93	
2	上橋, 坂尻 ⁽¹⁾	PT3-No.3	200×200 (9)	-	6.01	33.3	3.0 φ @100 dw.	0.24	6900	7590	228.0	18.9	3.22	8.34	16.19	7.08	19.66	20.60	-	2.29	0.82	0.79	-	
3		PT6-No.2	200×200 (9)	-	5.78	34.6	4.5 φ @100 dw.	0.55	5100	5610	228.0	18.9	4.50	9.96	17.77	10.24	23.66	24.96	-	1.73	0.75	0.71	-	
4		PT9-No.2	200×200 (9)	-	6.31	31.7	5.5 φ @100 dw.	0.75	6300	6930	228.0	18.9	5.89	12.26	22.10	13.58	29.25	30.86	-	1.63	0.76	0.72	-	
5	東, 小森 ⁽¹⁾	US2-1	70×70 (16)	-	3.30	21.2	3.2 φ @50 S.	1.22	2430	3400	230.3	19.3	1.05	2.62	9.30	2.51	6.37	7.18	-	3.70	1.46	1.30	-	
6		US3-1	70×70 (16)	-	3.20	21.9	3.2 φ @50 S.	1.22	2430	3400	230.3	19.3	1.01	2.49	6.00	2.44	6.06	6.83	-	2.46	0.99	0.88	-	
7	上橋, 坂尻 ⁽¹⁾	OSR-No.1	200×200 (9)	50×50 (中央)	6.06	33.0	4.0 φ @100 S.	0.21	5300	5830	338.0	25.9	2.94	6.64	17.92	6.19	15.28	15.80	21.11	2.89	1.17	1.13	0.85	
8		OSR-No.2	200×200 (9)	50×50 (中央)	6.03	33.2	4.0 φ @100 S.	0.21	5300	5830	338.0	25.9	2.66	6.29	19.28	5.52	14.45	14.89	-	3.49	1.33	1.29	-	
9		RT-No.2	200×200 (9)	125×125 (コーナー)	7.30	27.4	4.5 φ @100 dw.	0.44	5100	5610	214.0	18.9	4.02	8.58	15.88	9.09	20.29	21.29	-	1.75	0.78	0.75	-	
10	小森 ⁽¹⁾	UR2-1	70×140 (32)	-	2.80	25.0	3.2 φ @50 S.	1.18	2760	3360	269.4	21.9	1.42	3.18	7.20	3.23	7.35	7.91	9.13	2.23	0.98	0.91	0.79	

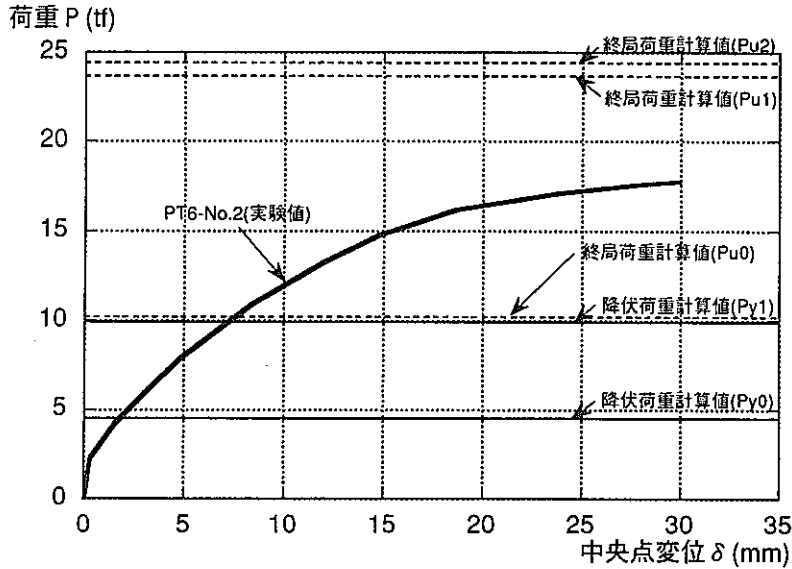
(注)：(1) L_x：短辺内法スパン、L_y：長辺内法スパン (2) dw：複配筋、S：単配筋 (3) 単位幅当たりの版厚に対する鉄筋比、複配筋の場合は上下両筋を合算した値。 (4) 引張強度が掲載されていないNo.2-4, 7-9については、No.1の降伏比を参考に算定した。 (5) 引張強度が掲載されていないNo.4-6, 9については、0.245F_c0.803で推定した。
 (6) 自重・載荷配置を含む。但しNo.1は含まない。 (7) P_{yo}：単位幅当たりの板の終局モーメントM0として0.9atσ_yd(RC基準式)を使用して、板の理論解より算出。 (8) P_{yl}：コンクリートの引張強度(σ_c)も考慮したM0を使用し、板の理論解より算出(鉄筋強度には、降伏点を使用)。 (9) P_{u0}：M0として0.9atσ_yd(RC基準式)を使用して、降伏線理論(Johansen提案)より算出。 (10) P_{u1}：σ_ctを考慮したM0を使用し、降伏線理論より算出(鉄筋強度には、降伏点を使用)。
 (11) P_{u2}：σ_ctを考慮したM0を使用し、降伏線理論より算出(鉄筋強度には、引張強度を使用)。 (12) CARC-SHELLによる解析値。



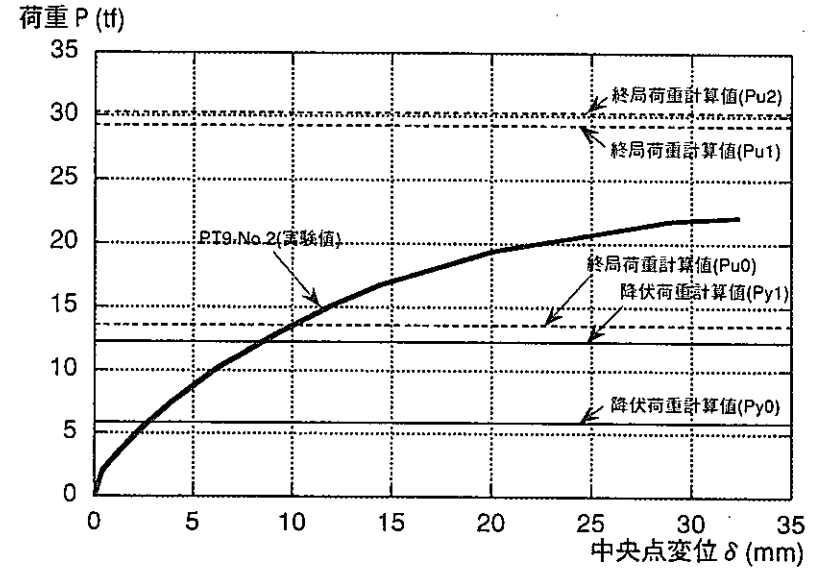
(1) E12



(2) PT3-No.3

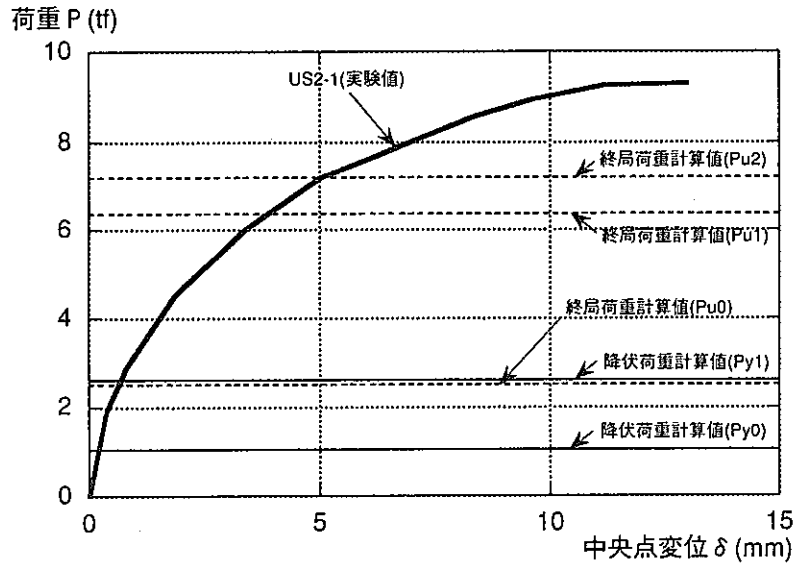


(3) PT6-No.2

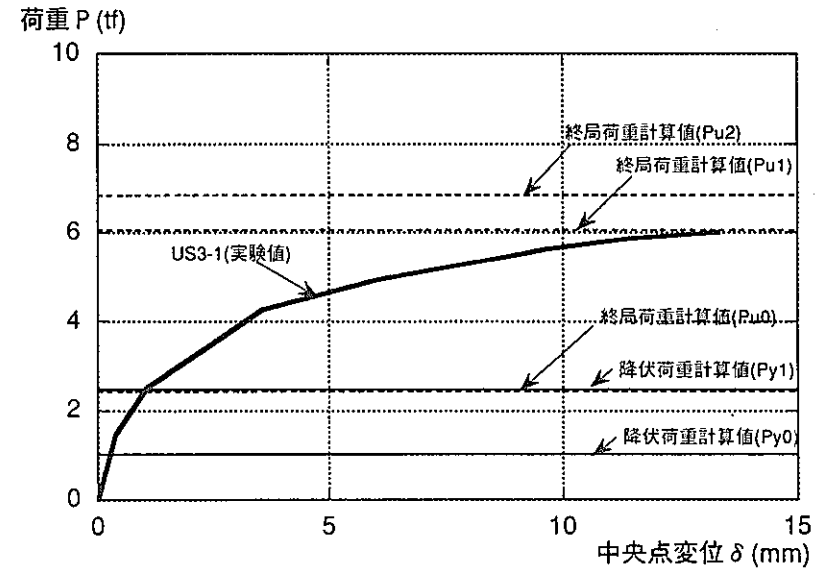


(4) PT9-No.2

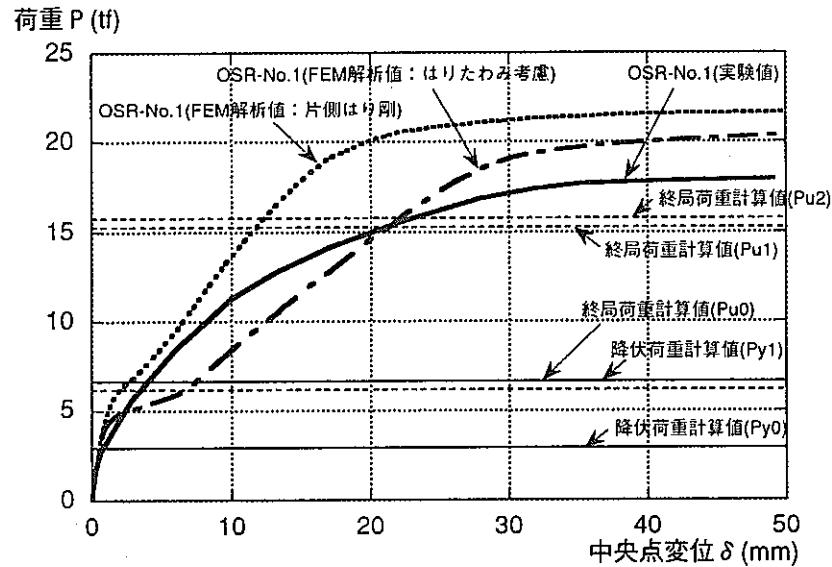
図3.3.1(a) 実験結果との比較



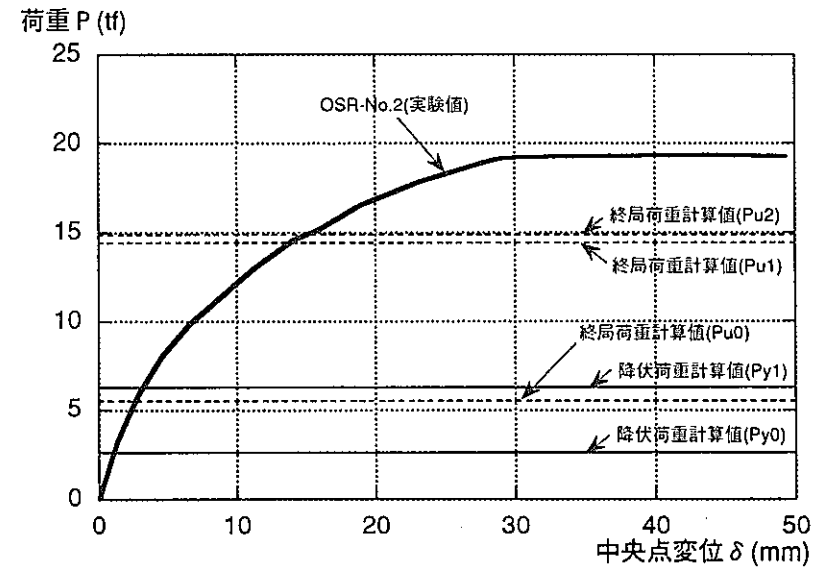
(5) US2-1



(6) US3-1

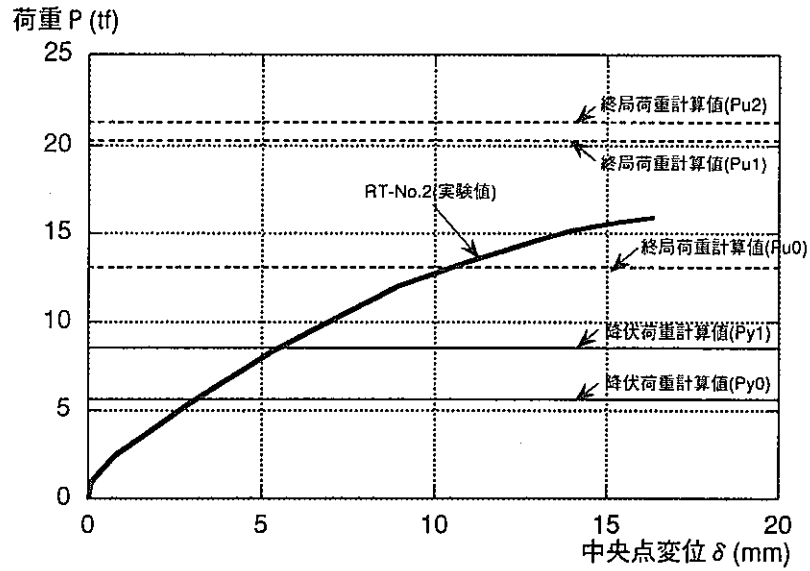


(7) OSR-No.1

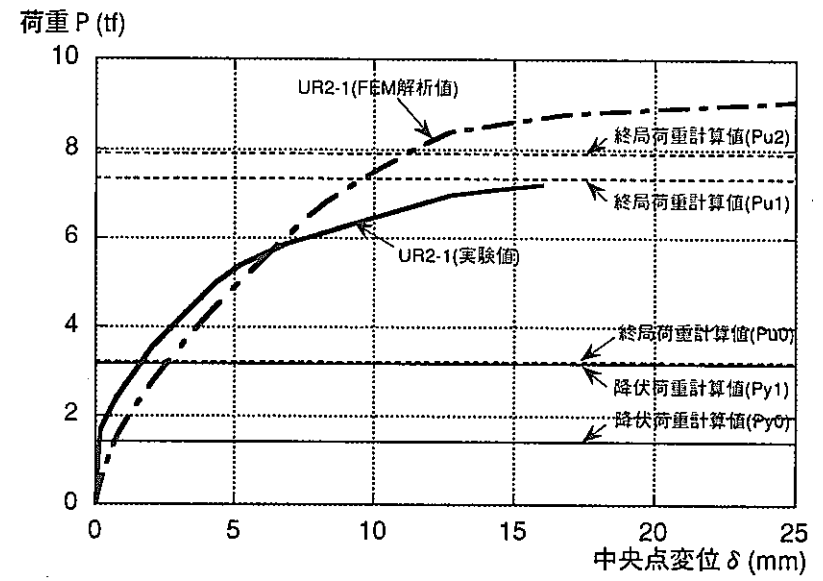


(8) OSR-No.2

図3.3.1(b) 実験結果との比較



(9) RT-No.2



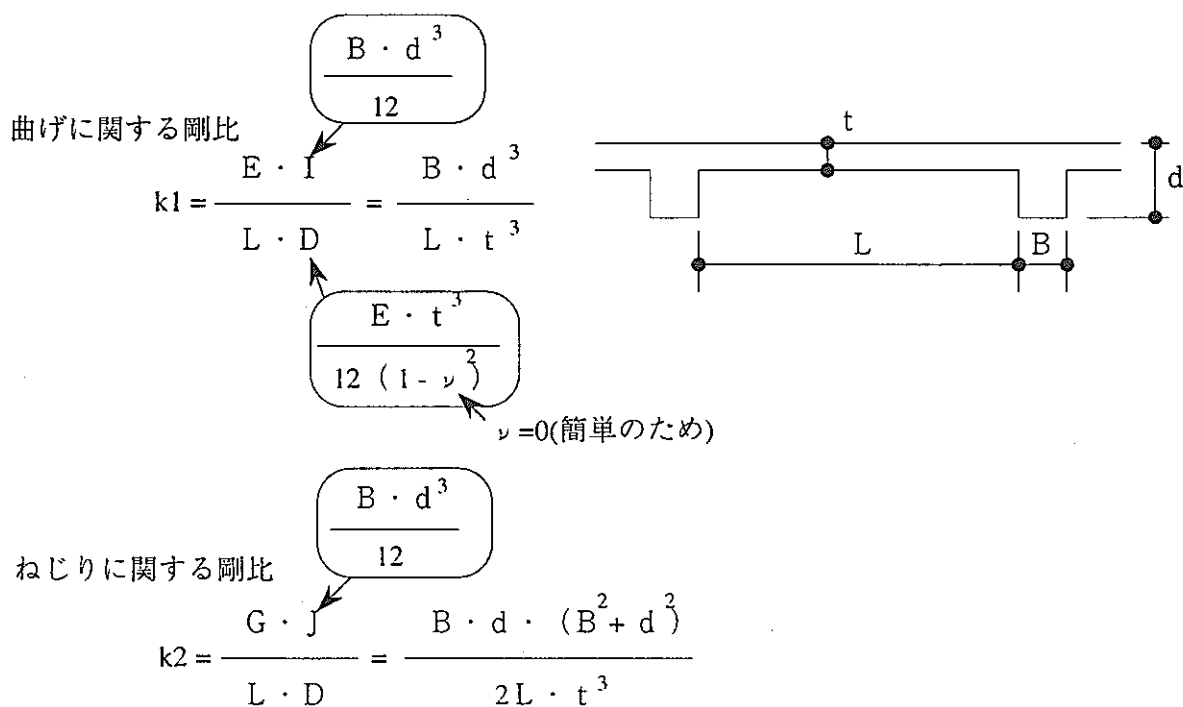
(10) UR2-1

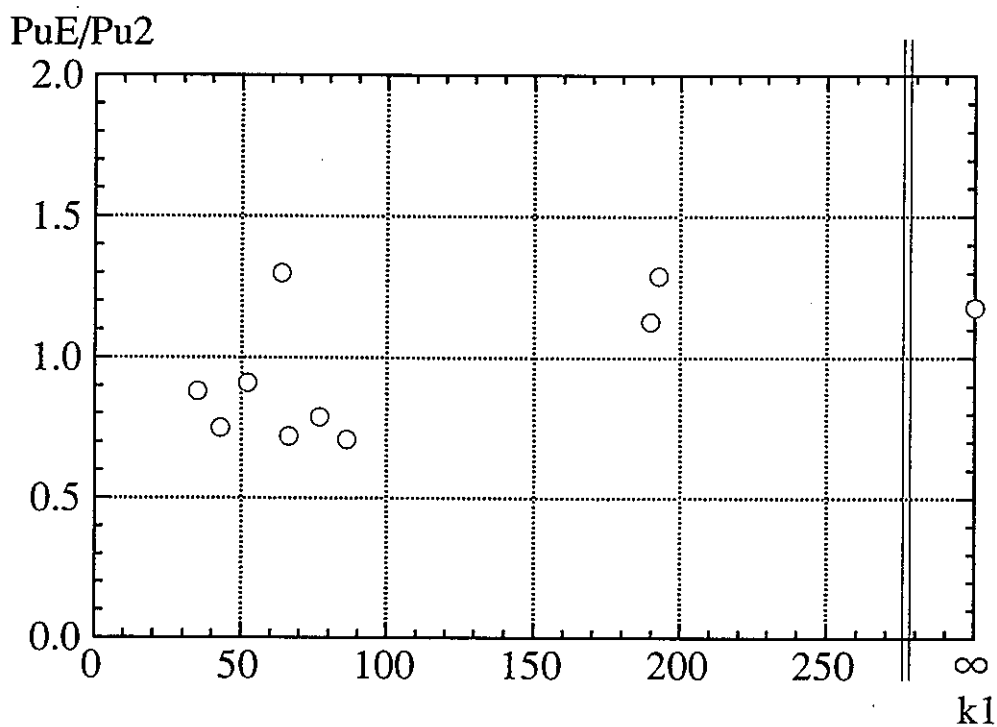
図3.3.1(c) 実験結果との比較

表3.3.2 実験結果における版と周辺ばりの剛比(k)と計算結果との関係に関する考察

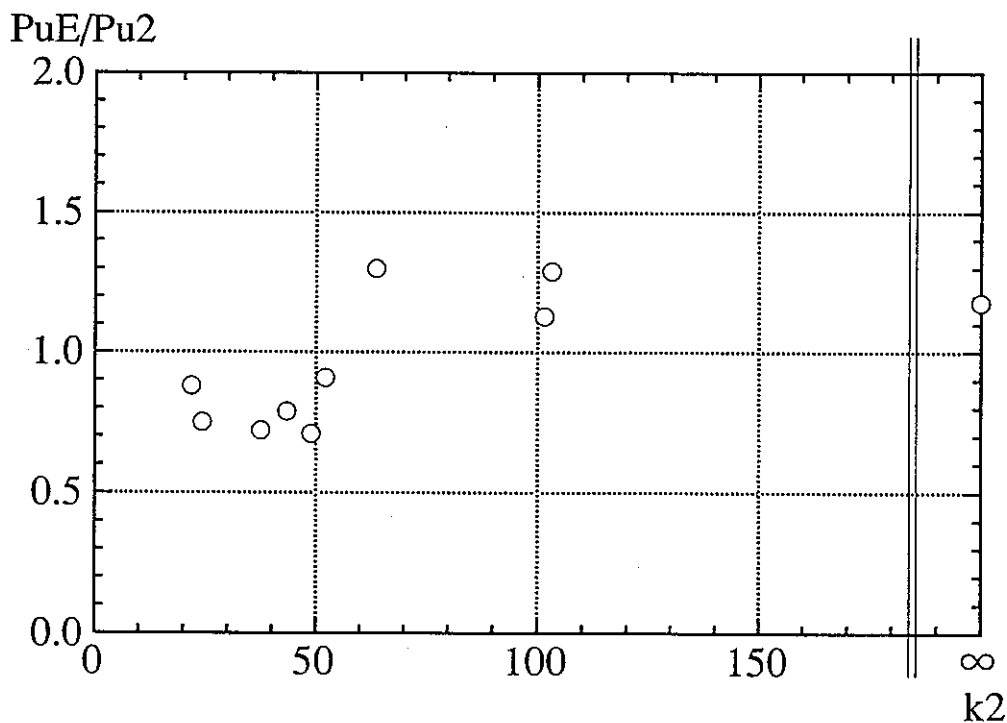
		B (cm)	d (cm)	L (cm)	t (cm)	k1	k2	PuE/Pu2	PuE/PuA (FEM)
1	EI2	175.00	100.00	200.00	6.51	3171.50	6442.11	1.18	0.93
2	PT3-No.3	20.00	55.00	200.00	6.01	76.64	43.39	0.79	-
3	PT6-No.2	20.00	55.00	200.00	5.78	86.16	48.78	0.71	-
4	PT9-No.2	20.00	55.00	200.00	6.31	66.22	37.49	0.72	-
5	US2-1	20.00	20.00	70.00	3.30	63.60	63.60	1.30	-
6	US3-1	10.00	20.00	70.00	3.20	34.88	21.80	0.88	-
7	OSR-No.1	20.00	75.00	200.00	6.06	189.57	101.52	1.13	0.85
8	OSR-No.2	20.00	75.00	200.00	6.03	192.41	103.05	1.29	-
9	RT-No.2	20.00	55.00	200.00	7.30	42.77	24.21	0.75	-
10	UR2-1	20.00	20.00	140.00	2.80	52.06	52.06	0.91	0.79

ただし、No.9については、最終破壊が曲げ破壊で無いためグラフから省いた。





曲げに関する剛比と PuE/Pu2 の関係



ねじりに関する剛比と PuE/Pu2 の関係

図3.3.2 剛比と PuE/Pu2 の関係

表3.3.3 解析対象壁における剛比

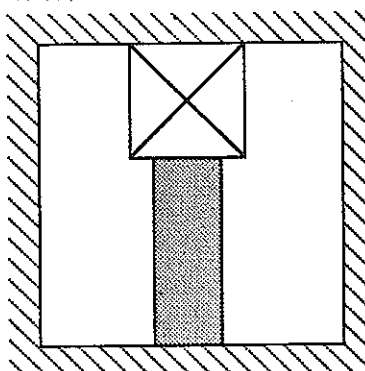
No.	解析名称	B (cm)	d (cm)	L (cm)	t (cm)	k1	k2	備考
3	R152-壁W (R151-壁E)	80	80	470	50.00	0.697	0.697	周辺ばり壁付き
6	R152-壁N-3	80	80	470	78.10	0.183	0.183	周辺ばり壁付き
12	A234-壁E (A234-壁W)	35	50	540	35.00	0.189	0.141	周辺ばり壁付き
14	A236-壁E-1	20	20	540	20.00	0.037	0.037	周辺ばり壁付き
15	A236-壁W-1 (A235-壁E)	80	80	470	20.00	10.894	10.894	周辺ばり壁付き
16	A236-壁W-2	80	80	450	20.00	11.378	11.378	周辺ばり壁付き
19	A236-天井-1	30	60	510	14.00	4.630	2.894	周辺ばり壁付き

3.4 降伏・終局耐力の評価結果

ここでは、3.3節で妥当性が検証された簡易評価手法により、解析対象部位の降伏・終局耐力を計算する。ただし、耐力を評価する際の板の単位幅当たりの終局モーメントとしては、降伏耐力を求める際には(3.2.1)式と(3.2.2)式を、終局耐力を求める際には(3.2.2)式と(3.2.4)式を用いて算出したものを使用し、それぞれの終局モーメントに対応する降伏および終局耐力を計算した。表-3.4.1に計算結果を示す。また、表-3.4.1にはFEM(CARC-SHELL)による解析結果も併せて掲載する。

ここで、簡易解析手法による計算値は、単純な条件（開口がある場合には正方形に近いもの、周辺が固定等）しか求めることができないため、R152壁-WおよびA236天井-Iについては、以下に示すモデルによる値を計算し、参考値として表-3.4.1に載せた。また、対象とする鉄筋コンクリート壁の板厚が一樣で無い場合には、断面による等価厚さを計算し、この板の厚さとした。付録-3に対象とした鉄筋コンクリート壁の寸法および配筋状況を示す。

■R152壁-Wについては、簡易解析手法とFEM（実際の板と同じ条件）における解析モデルは、
 FEM：右図のハッチ部分を固定としたモデル
 簡易手法：右図のハッチ部分を固定とせず、
 開口を有する1枚の版としたモデル（参考値）

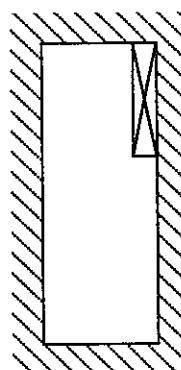


である。

実際の壁は、FEMモデルに見られるように、ハッチ部分に架台があり、この部分は固定支持とモデル化しなければならない。しかしながら、簡易手法でこの実際の壁を解析するためには、右下図にみられるような長方形版のコーナー部に開口を有する壁としてモデル化しなければならない。

しかしながら、現状では、開口による低減率のグラフがあるのは、正方形版のみであり、このような長方形版について解析する場合には、正方形版の場合と同様にして、長方形版に関する開口による低減率のグラフを求める必要が生じる。

そのため、今回は、簡易手法に関しては、参考値として、上記モデルによる計算値を掲載した。



■A263天井-Iについては、簡易解析手法とFEM（実際の板と同じ条件）における解析モデルは、
 FEM：小梁を含めた天井全体のモデル
 簡易手法：小梁を剛と見なした天井の半分
 のみのモデル

である。

実際の天井は、FEMモデルに見られるように、天井の中央に小梁があり、荷重を受けた際にはこの小梁も変形するものと思われる。しかしながら、簡易解析手法ではこのように中央に弾性梁が存在するモデルを解くことはできないため、上記のように小梁を剛として考え、参考値として上記モデルによる計算値を掲載した。

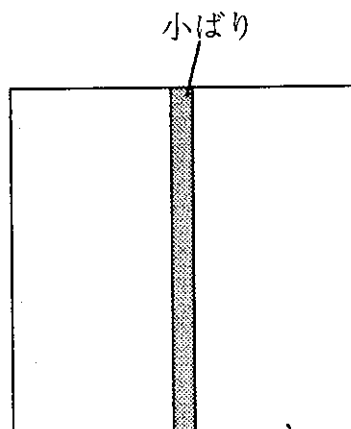


表3.4.1 壁の降伏・終局耐力計算値

No.	解析名称	支持条件	スラブ寸法 (cm)					鉄筋 ⁽¹⁾					コンクリート				降伏耐力 (上段: 下段: kgf/cm ²) ⁽²⁾				終局耐力 (上段: 下段: kgf/cm ²) ⁽³⁾				備考
			スパン ⁽⁴⁾ L _x × L _y	開口 ⁽⁵⁾ L _{ox} × L _{oy}	板厚 t	L _x /t	L _o /L ⁽⁶⁾	配筋	上端からの 鉄筋位置 (cm)		降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 ⁽⁷⁾ (kgf/cm ²)	P _y	計算値			P _u	計算値					
									下端	上端						P _{yx} (p _{yx})	P _{yy} (p _{yy})	P _{ry} ⁽⁸⁾ (p _{ry})		P _{ux}	P _{uy} (p _{uy})	P _{ry} ⁽⁸⁾ (p _{ry})			
1	A133-壁S	四辺固定	425 × 460	200 × 103	20.00	1.08	0.34	D 13 @ 150	15.05	4.95	3500	5500	320.0	25.0	0.769	50.88 0.29	126.83 0.73	-	0.794	183.71 1.05	389.85 2.23	487.53 2.79	-		
2	R133-壁W	四辺固定	425 × 470	-	30.00	1.11	-	D 13 @ 150	25.05	4.95	3500	5500	320.0	25.0	1.000	106.95 0.54	321.61 1.61	-	1.000	392.97 1.97	916.77 4.59	1125.38 5.63	-		
3	R152-壁W (R151-壁E)	四辺固定	431 × 470	200 × 190	50.00	1.09	0.43	D 19 @ 150	44.15	5.85	3500	5500	320.0	25.0	0.760	323.16 1.96	760.65 4.62	2632.14 16.00	0.820	1301.59 7.91	2395.40 14.56	2986.39 18.16	9377.01 57.00	計算値は架台を考慮せず (参考値)	
4	R152-壁N-1	四辺固定	413 × 1530	-	78.10	3.70	-	D 25 @ 120	71.35	6.75	3500	5500	320.0	25.0	1.000	3214.39 5.09	7648.16 12.10	-	1.000	7900.39 12.50	12864.69 20.36	15989.03 25.30	-		
5	R152-壁N-2	四辺固定	413 × 570	135 × 110	61.02	1.38	0.25	D 25 @ 120	54.27	6.75	3500	5500	320.0	25.0	0.810	745.65 3.38	1551.02 7.03	-	0.922	4502.34 20.41	5757.29 26.10	7161.12 32.47	-		
6	R152-壁N-3	四辺固定	413 × 470	210 × 200	78.10	1.14	0.46	D 25 @ 120	71.35	6.75	3500	5500	320.0	25.0	0.763	777.81 5.11	1850.68 12.17	-	0.795	6324.18 41.58	7590.32 49.90	9678.60 63.63	-		
7	R152-天井-1 (A234-床)	三辺固定 一辺自由	705 × 490	-	86.79	-	-	D 25 @ 240	81.29	5.50	3500	5500	320.0	25.0	1.000	648.20 1.88	1525.67 4.42	-	1.000	3304.39 9.57	6003.65 17.38	7390.11 21.30	-		
8	R152-天井-3 (A236-床)	四辺固定	490 × 850	-	86.79	1.73	-	D 25 @ 120	80.04	6.75	3500	5500	320.0	25.0	1.000	1669.18 4.01	3982.82 9.56	-	1.000	6736.80 16.17	10645.17 25.56	13323.76 31.99	-		
9	R152-床-4 (A236-床)	四辺固定	470 × 981	-	90.00	2.09	-	D 29 @ 120	82.65	7.35	3500	5500	320.0	25.0	1.000	2655.78 4.01	5927.15 9.56	-	1.000	8938.93 19.39	13254.32 28.76	16518.99 35.84	-		
10	A234-壁S-1 (上部)	四辺固定	280 × 465	-	35.00	1.66	-	D 16 @ 200	29.60	5.40	3500	5500	320.0	25.0	1.000	193.99 1.49	500.22 3.84	-	1.000	380.69 2.92	1139.34 8.75	1360.42 10.45	-	計算値は壁の下部の値	
11	A234-壁S-2 (下部)	四辺固定	265 × 280	-	35.00	1.06	-	D 16 @ 100	31.20	3.80	3500	5500	320.0	25.0	1.000	183.12 0.64	472.19 1.64	-	1.000	2142.70 28.88	2065.18 27.83	2643.48 35.63	-	計算値は壁の下部の値	
12	A234-壁E (A234-壁W)	四辺固定	467 × 540	200 × 103	35.00	1.16	0.30	D 16 @ 200	29.60	5.40	3500	5500	320.0	25.0	0.866	147.76 0.64	381.00 1.64	-	0.815	352.23 1.52	943.09 4.07	1137.15 4.91	-	計算値は出入り(1030×200) のみ考慮	
13	A234-壁W-1	四辺固定	450 × 461	-	35.00	1.02	-	D 16 @ 200	29.60	5.40	3500	5500	320.0	25.0	1.000	179.19 0.86	462.06 2.23	-	1.000	424.08 2.05	1148.50 5.54	1384.83 6.68	-		
14	A236-壁E-1	四辺固定	490 × 540	200 × 193	20.00	1.10	0.38	D 13 @ 150	15.05	4.95	3500	5500	320.0	25.0	0.672	45.36 0.20	113.06 0.50	101.70 0.45	0.777	178.54 0.79	380.26 1.68	475.24 2.10	453.13 2.01	-	
15	A236-壁W-1 (A235-壁E)	四辺固定	450 × 470	-	20.00	1.04	-	D 13 @ 150	15.05	4.95	3500	5500	320.0	25.0	1.000	64.88 0.31	161.72 0.76	211.50 1.00	1.000	235.01 1.11	494.82 2.34	619.62 2.93	623.93 2.95	-	
16	A236-壁W-2	四辺固定	320 × 450	103 × 200	20.00	1.41	0.39	D 13 @ 200	16.35	3.65	3500	5500	320.0	25.0	0.648	40.82 0.33	101.75 0.82	-	0.773	115.08 0.93	298.25 2.42	359.76 2.92	-		
17	A236-壁S-1	四辺固定	460 × 470	-	20.00	1.02	-	D 13 @ 200	16.35	3.65	3500	5500	320.0	25.0	1.000	62.93 0.29	156.87 0.73	-	1.000	130.89 0.61	350.54 1.62	420.19 1.94	-		
18	A236-壁S-2	四辺固定	280 × 470	-	20.00	1.68	-	D 13 @ 200	16.35	3.65	3500	5500	320.0	25.0	1.000	63.12 0.48	157.34 1.20	-	1.000	161.55 1.23	413.85 3.14	500.27 3.80	-		
19	A236-天井-1	四辺固定	230 × 510	-	14.00	2.22	-	D 13 @ 200	10.35	3.65	3500	5500	320.0	25.0	1.000	110.38 0.94	247.74 2.11	129.03 1.10	1.000	251.33 2.14	551.84 4.70	682.42 5.82	310.85 2.65	計算値は天井を半分で取り、 2倍したものを(参考値)	
20	A236-天井-3	四辺固定	290 × 510	-	14.00	1.76	-	D 13 @ 200	10.35	3.65	3500	5500	320.0	25.0	1.000	44.96 0.30	100.92 0.68	-	1.000	115.27 0.78	249.29 1.69	308.28 2.08	-		

(注) (1) L_x: 短辺内法スパン, L_y: 長辺内法スパン
 (2) L_{ox}: L_x方向開口幅, L_{oy}: L_y方向開口幅
 (3) 平均開口率: $\text{ave}(L_{ox} \cdot L_{oy}) / \text{ave}(L_x \cdot L_y)$ の値
 (4) 上段: L_x方向, 下段: L_y方向
 (5) 実験式: 0.245F_{cu}0.807で推定。
 (6) 自重を含むまない。上段: 転倒重、下段: 分布荷重。
 (7) 最初に鉄筋が降伏した時の値。
 (8) 部材角15°を終局荷重とした。

4. 有限要素法 (FEM) による鉄筋コンクリート壁の解析

4.1 概要

3章で耐力を評価した壁およびスラブの中で特に重要と考えられるもの、あるいは3章の評価法の適用範囲外と考えられるもの合わせて4箇所の壁・スラブを選んでFEM (CARC-SHELL) による解析を行い詳細な耐力評価を行った。以下にその概要を述べる。

4.2 解析手法

解析は、コンクリートのひび割れ、圧縮降伏、圧破、鉄筋の降伏等が評価できる積層シェル要素を用いて行った。この要素では法線保持、および微小変形を仮定して定式化しており、コンクリートの破壊則はDrucker-Prager則を採用している。なお詳細は付録-3に示す。

4.3 モデル化の方針

対象とする壁・スラブには面外方向の付帯壁あるいは付帯梁柱があり、それらの拘束効果は耐力を評価する上で無視し得ない。しかしこの効果を厳密に評価することは困難であり、また問題をいたずらに複雑にする事になる。

今回の解析では、この効果を以下のようにモデル化することで簡便な形で考慮することにする。

(1)対象とするRC板の周辺が、壁で拘束されているとき

→RC板を拘束している壁の面までモデル化し、拘束壁面で全固定とする。

(2)対象とするRC板の周辺が、面外壁付の付帯柱/壁で拘束されているとき

→拘束している柱/梁芯までモデル化し、柱/梁芯をピン支持とする。

また、芯から柱/梁の面までねじり剛性が等価な厚さの弾性体とする。

また開口部についている金物は、曲げ剛性がFEMメッシュ1要素の1/5以下のものであり、耐力に及ぼす影響は小さいと考えられるため無視することにする。

4.4 コンクリートおよび鉄筋の物性

コンクリートおよび鉄筋の物性はすべて以下の応力ひずみ関係があるものとして解析を行う。なおコンクリートの破壊基準はDrucker-Prager則を採用している。

・コンクリート (図3.1参照)

ヤング係数 E_c 2.83×10^5 kgf/cm²

圧縮強度 f_c 320 kgf/cm²

引張強度 f_t 25.0 kgf/cm²

また、残りの値は次のように設定した。

$f_{y1} = (1/3)f_c$

$f_{y2} = (2/3)f_c$

$\epsilon_b = 3f_t/E_c$

$\epsilon_y = 0.002$

・鉄筋

ヤング係数 E_s 2.10×10^6 kgf/cm²

降伏強度 σ_y 3500 kgf/cm²

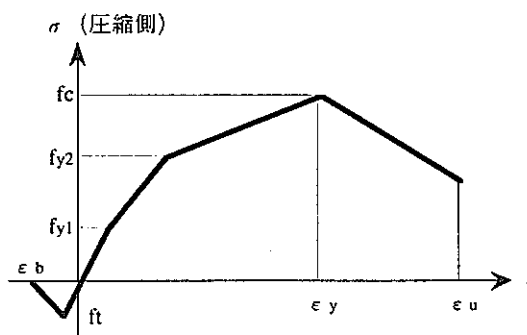


図4.1 コンクリートの応力ひずみ関係

4.5 初期降伏および終局状態の定義

一般に面外荷重を受けるRCスラブの初期降伏状態と終局状態を定義することは難しいが、今回の解析では次のような状態を意味するものとする。

初期降伏状態 : 鉄筋が最初に降伏した状態

終局状態 : 短スパン方向の部材角 (最大変位/短スパンの1/2) が1/20になる変位で終局状態と見なす。

4.6 解析対象

解析対象とする壁およびスラブを以下に示す。

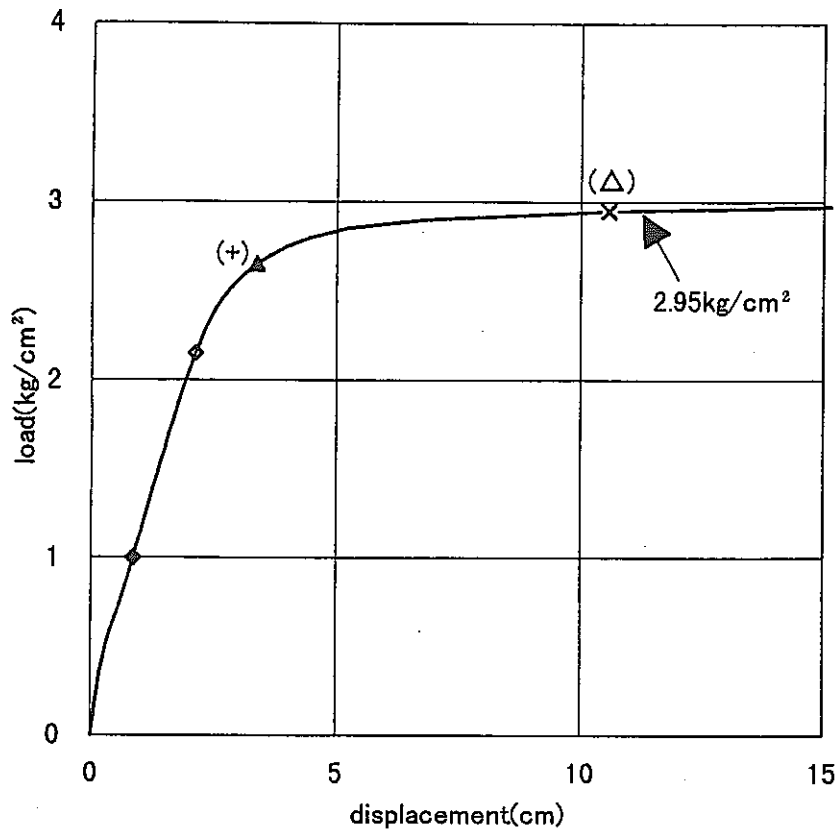
- | | |
|----------------------------|-------------------|
| ①A 2 3 6 壁W 1 (A 2 3 5 壁E) | 爆圧による損傷大 |
| ②R 1 5 2 壁W (R 1 5 1 壁E) | 中央上部に開口、中央下部に架台有り |
| ③A 2 3 6 壁E 1 | 右下部に開口有り |
| ④A 2 3 6 天井 1 | 小梁有り (荷重は上向き) |

4.7 解析結果

それぞれの解析結果を以下に示す。

- 図4.2 A236-壁W-1；荷重変形曲線
- 図4.3 A236-壁W-1；変形図
- 図4.4 A236-壁W-1；破壊状況図
- 図4.5 R152-壁W；荷重変形曲線
- 図4.6 R152-壁W；変形図
- 図4.7 R152-壁W；破壊状況図
- 図4.8 A236-壁E-1；荷重変形曲線
- 図4.9 A236-壁E-1；変形図
- 図4.10 A236-壁E-1；破壊状況図
- 図4.11 A236-天井-1；荷重変形曲線
- 図4.12 A236-天井-1；変形図
- 図4.13 A236-天井-1；破壊状況図

なお、付録-5に上記変形図 (図4.3、4.6、4.9、4.12) ・破壊状況図 (図4.4、4.7、4.10、4.13) の詳細なもの (拡大版) を掲載する。



C点での荷重-変位曲線

要素位置	状態	Load(kg/cm ²)	位置	マーク
A	最初の鉄筋降伏 引	1.0	上端	◆
	圧	2.1	下端	◇
	コンクリートの軟化	2.9		×
B	最初の鉄筋降伏 引	2.6	下端	▲
	圧	2.9	上端	△
	コンクリートの軟化	2.6		+

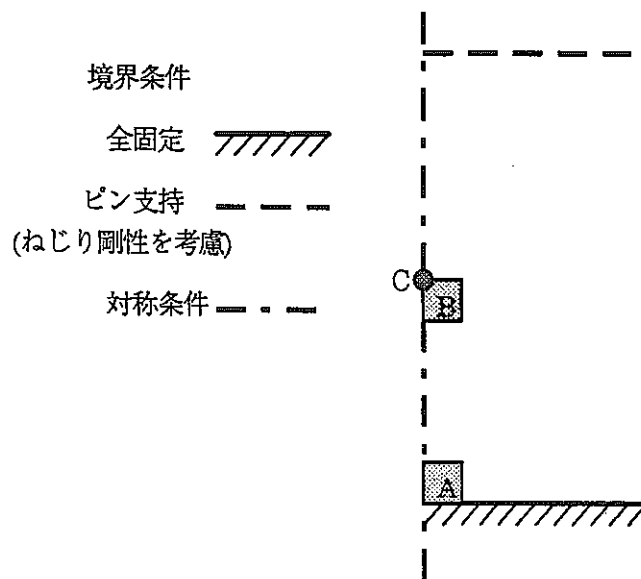


図4.2 A236-壁W-1 ; 荷重変位曲線

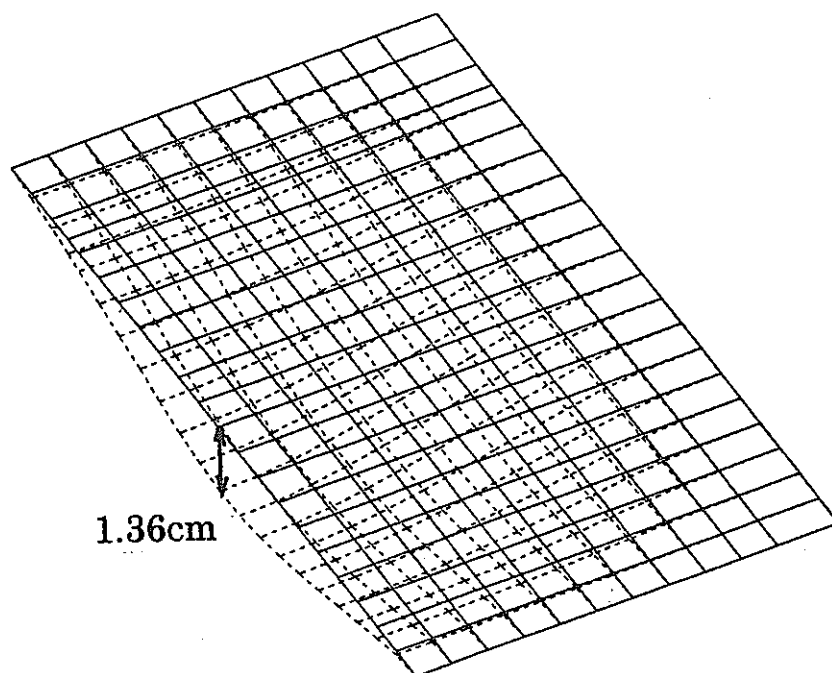
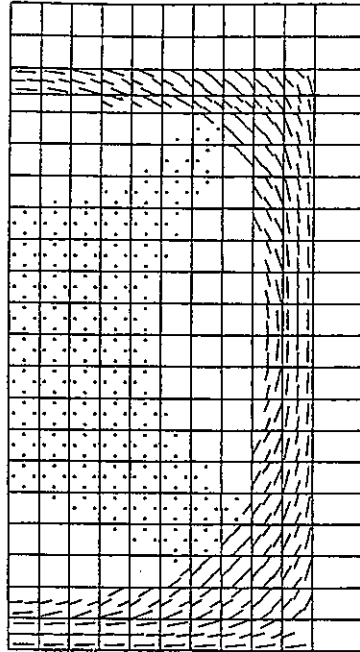


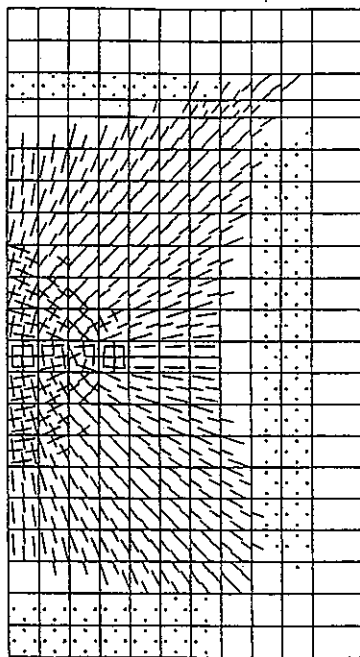
图4.3 A236-壁W-1；变形图
($P=1.5\text{kg/cm}^2$)

凡例

- | | |
|---|----------|
| — | 1 方向ひび割れ |
| × | 2 方向ひび割れ |
| ▲ | 圧縮第 2 勾配 |
| ◆ | 圧縮第 3 勾配 |
| ⋈ | 圧縮軟化 |

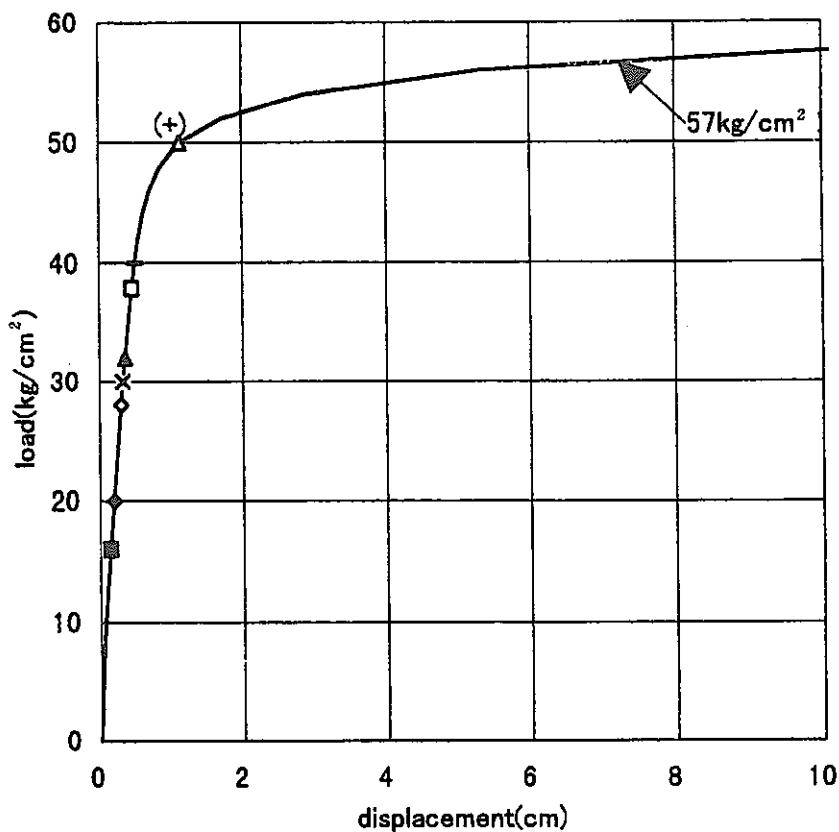


破壊状況(表)



破壊状況(裏)

図4.4 A236-壁W-1；破壊状況図 (P=1.5kg/cm²)



D点での荷重-変位曲線

要素位置	状態	Load(kg/cm ²)	位置	マーク
A	最初の鉄筋降伏 引	20.0	上端(水平方向)	◆
	圧	28.0	下端(水平方向)	◇
	コンクリートの軟化	30.0		×
B	最初の鉄筋降伏 引	32.0	下端(上下方向)	▲
	圧	50.0	上端(上下方向)	△
	コンクリートの軟化	50.0		+
C	最初の鉄筋降伏 引	16.0	上端(水平方向)	■
	圧	38.0	下端(水平方向)	□
	コンクリートの軟化	40.0		-

境界条件

全固定

対称条件

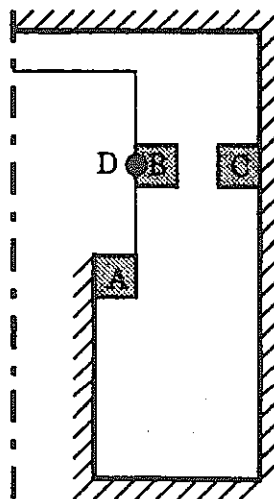


図4.5 R152-壁W (R151-壁E) ; 荷重変位曲線

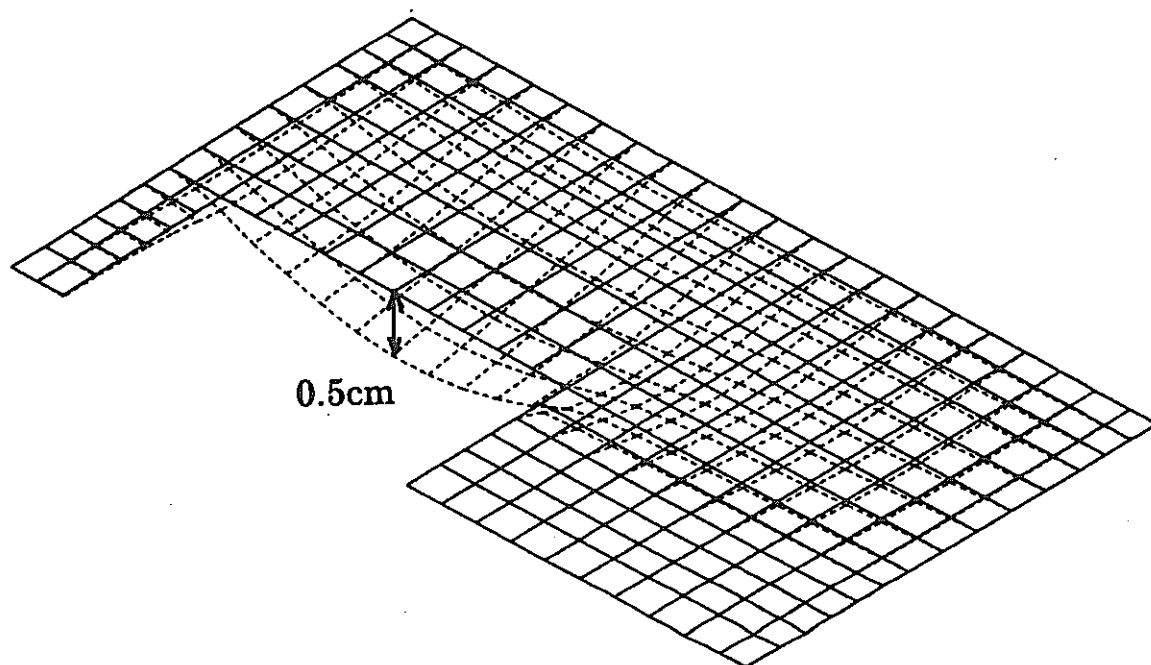
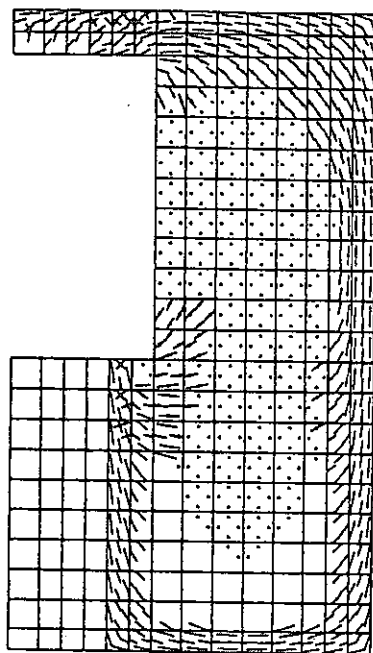


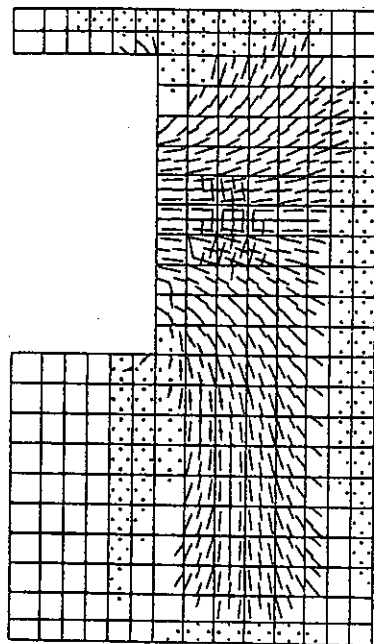
图4.6 R152-壁W；变形图
($P=40\text{kg/cm}^2$)

凡例

- | | |
|---|----------|
| — | 1 方向ひび割れ |
| × | 2 方向ひび割れ |
| ▲ | 圧縮第 2 勾配 |
| ◆ | 圧縮第 3 勾配 |
| ⋈ | 圧縮軟化 |

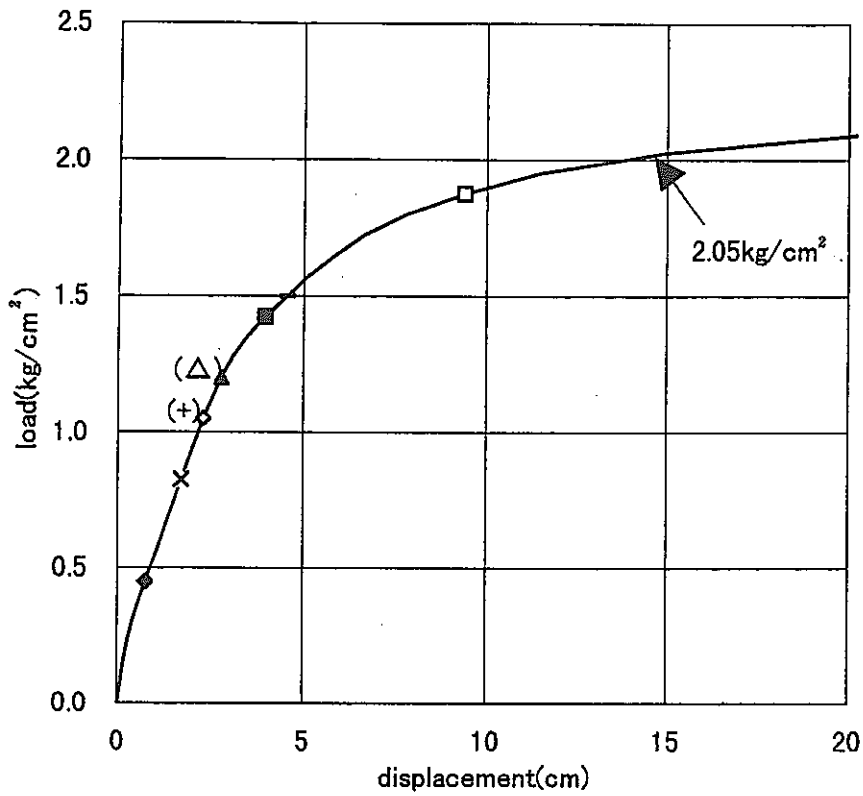


破壊状況(表)



破壊状況(裏)

図4.7 R152-壁W；破壊状況図 (P=40kg/cm²)



D点での荷重-変位曲線

要素位置	状態	Load(kg/cm ²)	位置	マーク
A	最初の鉄筋降伏 引	0.450	上端(上下方向)	◆
	圧	1.050	下端(上下方向)	◇
	コンクリートの軟化	0.825		×
B	最初の鉄筋降伏 引	1.200	下端(上下方向)	▲
	圧	1.200	上端(上下方向)	△
	コンクリートの軟化	1.050		+
C	最初の鉄筋降伏 引	1.425	下端(上下方向)	■
	圧	1.875	上端(水平方向)	□
	コンクリートの軟化	1.500		-

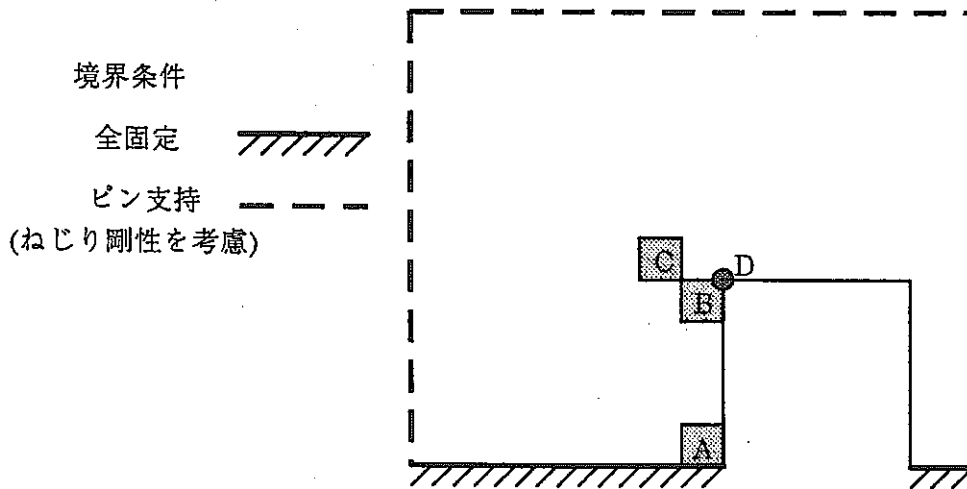


図4.8 A236-壁 E-1 ; 荷重変位曲線

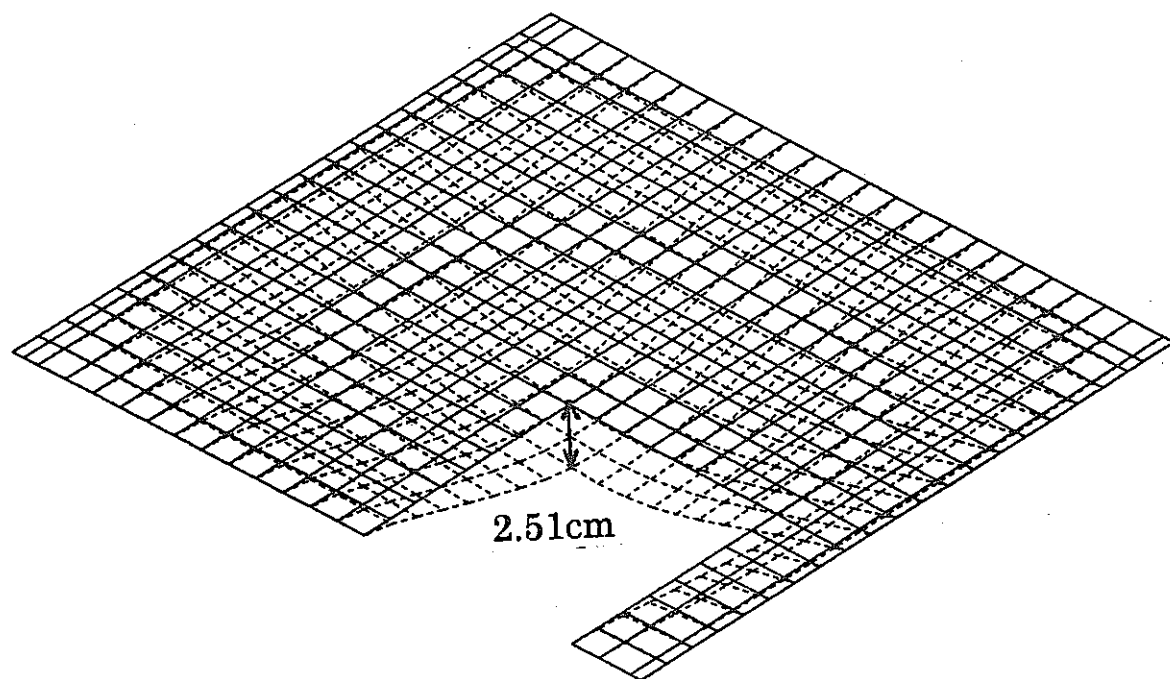
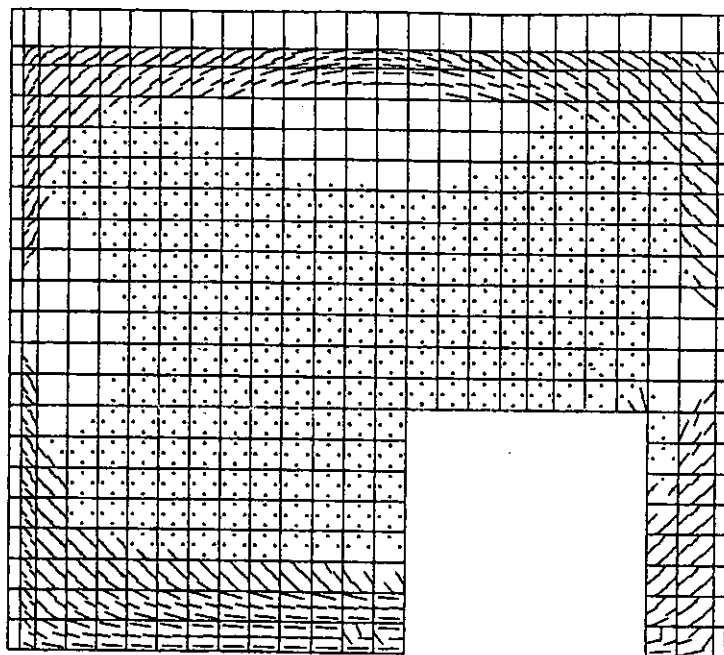


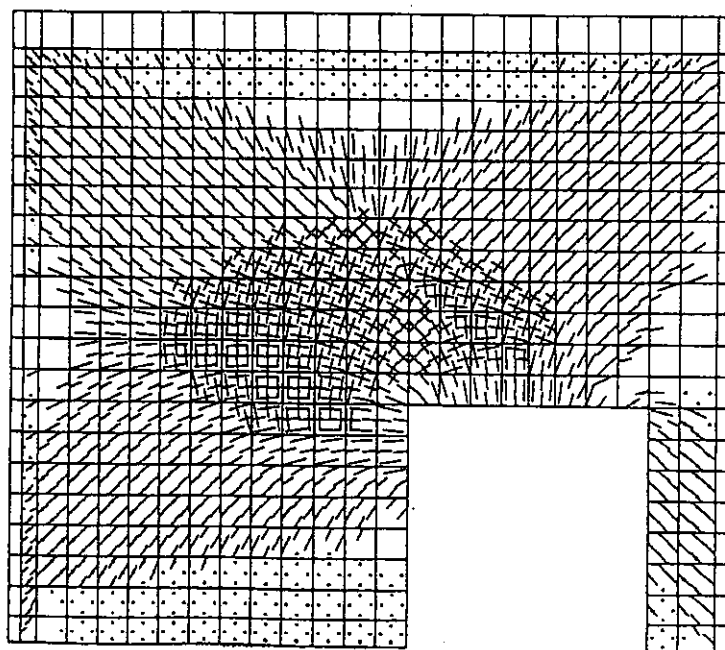
图4.9 A236-壁 E-1；变形图
($P=1.1\text{kg/cm}^2$)

凡例

- | | |
|---|----------|
| — | 1 方向ひび割れ |
| × | 2 方向ひび割れ |
| ▲ | 圧縮第 2 勾配 |
| ◆ | 圧縮第 3 勾配 |
| ⋈ | 圧縮軟化 |

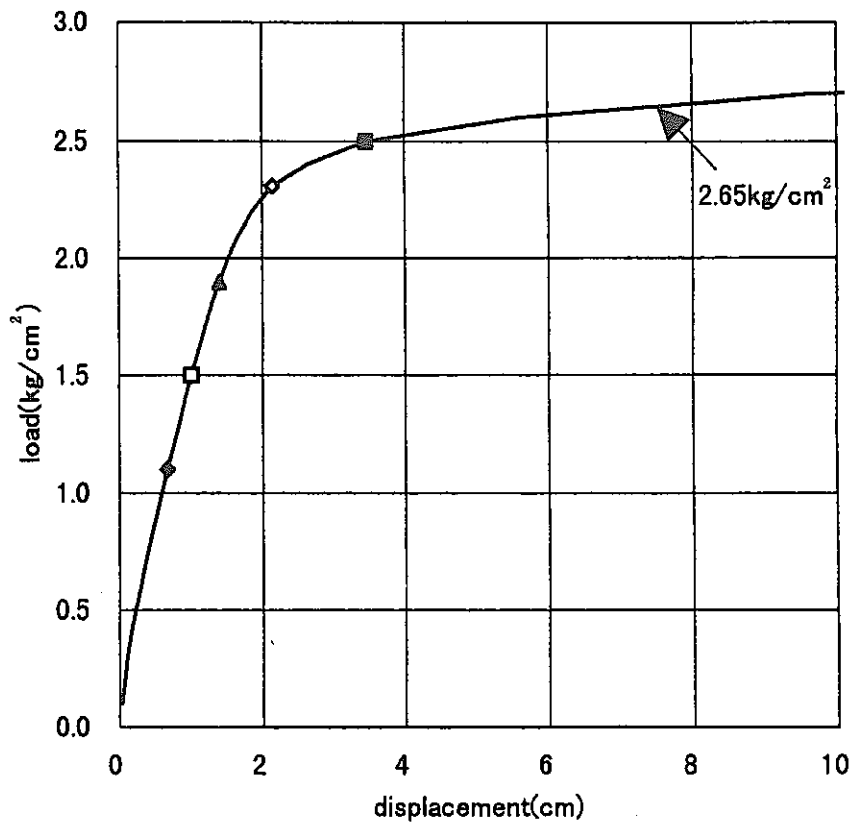


破壊状況(表)



破壊状況(裏)

図4.10 A236-壁 E-1 ; 破壊状況図 (P=1.1kg/cm²)



D点での荷重-変位曲線

要素位置	状態	Load(kg/cm ²)	位置	マーク
A	最初の鉄筋降伏 引	1.1	下端	◆
	圧	2.3	上端	◇
B	最初の鉄筋降伏 引	1.9	上端	▲
C	最初の鉄筋降伏 引	2.5	上端	■
	圧	1.5	下端	□

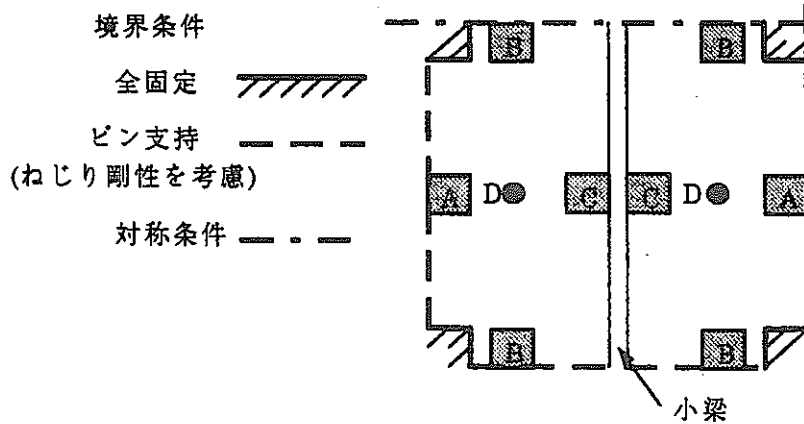


図4.11 A236-天井-1；荷重変位曲線

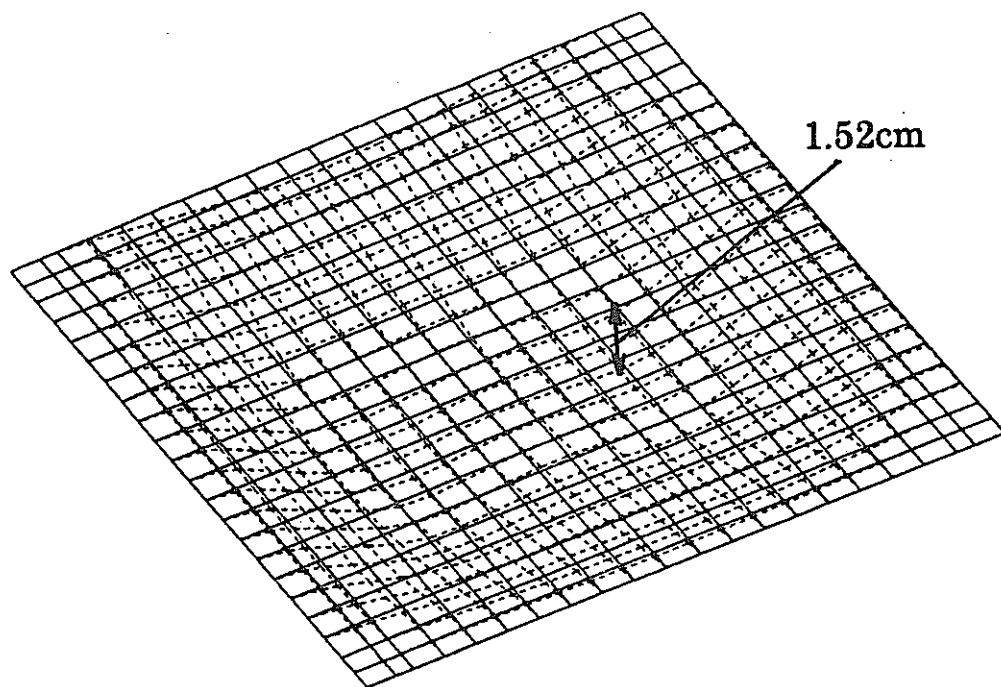
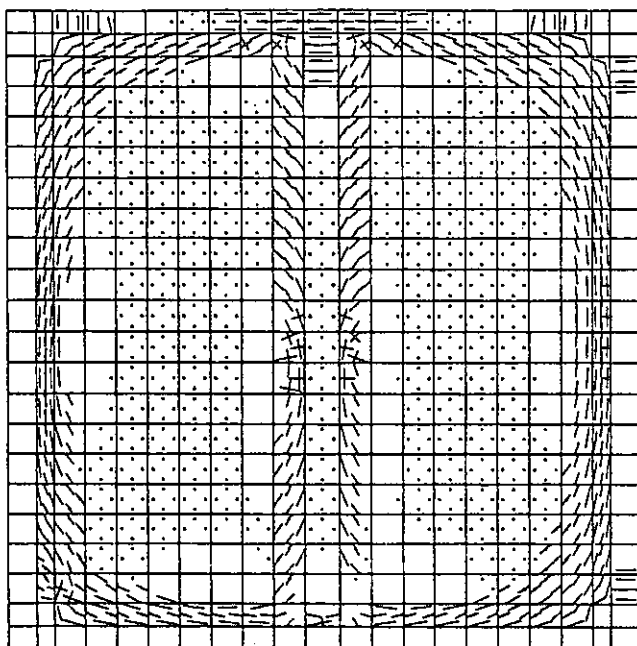


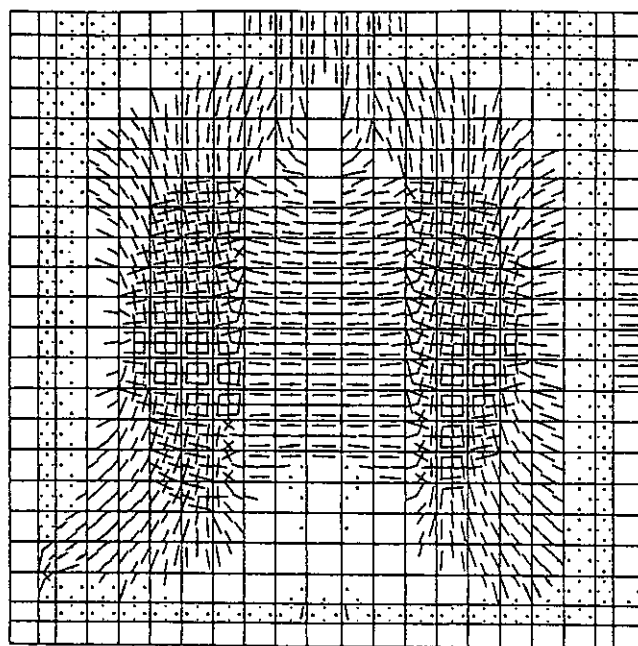
图4.12 A236-天井-1；变形图
($P=2.0\text{kg/cm}^2$)

凡例

- | | |
|---|----------|
| — | 1 方向ひび割れ |
| × | 2 方向ひび割れ |
| ▲ | 圧縮第 2 勾配 |
| ◆ | 圧縮第 3 勾配 |
| ⋈ | 圧縮軟化 |



破壊状況(表)



破壊状況(裏)

図4.13 A236-天井-1；破壊状況図 (P=2.0kg/cm²)

5. 簡易手法とFEM解析結果との比較

簡易手法とFEM(CARC-SHELL)の両手法により同じ部材を解析したケースは、

- ①A236-壁W1 (A235-壁E)
- ②R152-壁W (R151-壁E)
- ③A236-壁E1
- ④A236-天井I

の4ケースであるが、②と④については、3.4節でも説明したように、

- ②：簡易手法では開口下の架台をモデル化していない。
- ④：簡易手法では、天井中央の小梁を剛としている。

としているため、②ではFEM解析値が簡易手法による耐力より大きな値を示し、④ではFEM解析値が簡易手法による耐力より小さな値を示す結果となった。

特に、④では小梁が存在するような場合には、FEMモデルのように小梁を含めた全体としてモデル化する必要があることがわかる。

以下では、簡易手法による耐力評価結果とFEM(CARC-SHELL)による解析結果を直接比較することができる2つの壁、すなわち、A236-壁E-1（開口有り）とA236-壁W-1（開口無し）の結果を比較する（表-2.4.1）。ただし、簡易手法の計算値としては、降伏耐力においては鉄筋の降伏点（ σ_y ）を用いた計算値（ P_{y1} ）を、終局耐力においては、鉄筋の引張強度（ σ_u ）を用いた計算値（ P_{u2} ）を用いるものとする。また、FEMは鉄筋の強度に降伏点（ σ_y ）を用いている。

A236-壁E-1（開口有り）の場合には、降伏耐力および終局耐力とも簡易手法とFEMの解析結果は良く一致している。

A236-壁W-1（開口無し）の場合には、終局耐力については簡易手法とFEMの解析結果は良く一致しているが、降伏耐力についてはFEMに対して簡易手法は2～3割小さめの値を示した。

ここで真の壁の耐力値については、3章および上記の結果を考えると、ある程度の幅を持って評価するのが妥当だと思われる。

しかしながら、FEMによる解析が行えない場合にも、壁の形状が簡単なもの（開口が1つ程度）であれば、簡易手法により壁の耐力評価がある程度行えることがわかった。

6. 被害レベルの概略推定

ここでは、鉄筋の露出が見られるA236壁W-1およびひび割れが生じているA234-壁WとA234-壁E（A235-壁W）についてその被害レベル（降伏か、終局か）について推定する。

A236-壁W-1は、図6.1にも見られるように鉄筋の露出が生じている。一般に現在の状況は、衝撃荷重により振動した部材が減衰し最終的に静止した状態であり、あくまで残留変位、残留ひび割れが観察されている状態である。従って、静止した状態での被害状況は、実際の最大被害状況より小さめであることが判断される。これと、鉄筋が露出している状況を考えれば、A236壁W-1は終局状態に近いと考えられる。ただし、現場の状況（壁両側のひび割れパターン・幅、残留変形、等）を実際観察しなければ断定は困難である。

A234-壁WとA234-壁E（A235-壁W）については、図6.2と図6.3に見られるようにひび割れが発生している。実際等分布荷重が作用したかは、ひび割れパターンから大凡の検討がつくが、実際には、A236壁W-1の場合と同様に現場の状況（壁両側のひび割れパターン・幅、残留変形、等）を実際観察しなければ断定は困難である。ただ、図から判断する限りでは、少なくとも終局状態まで達していないように思われる。

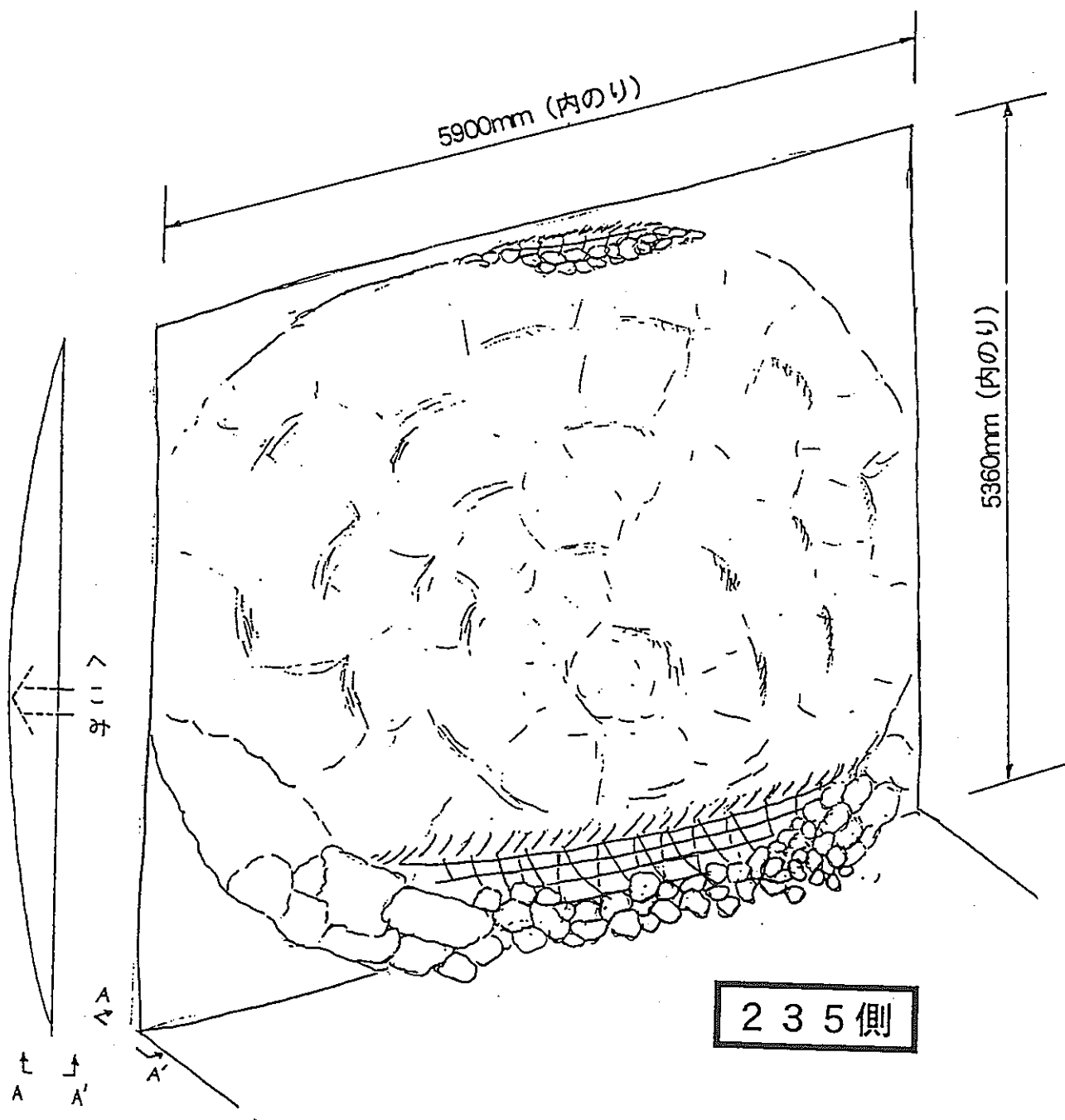
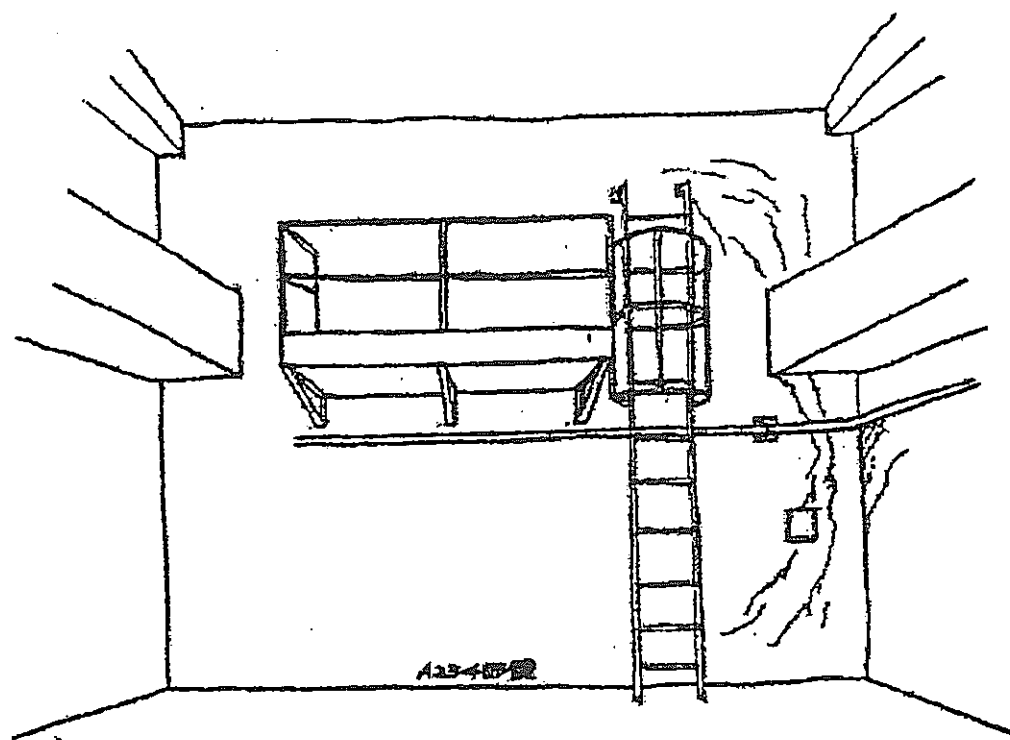
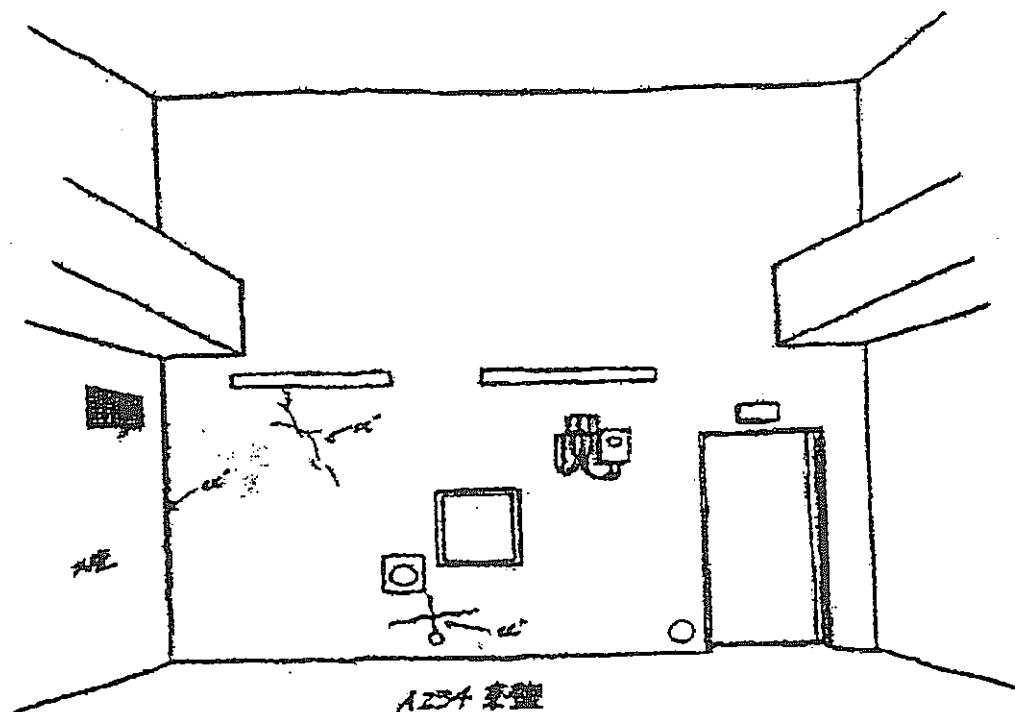


図6.1 A236-壁W-1の被害状況

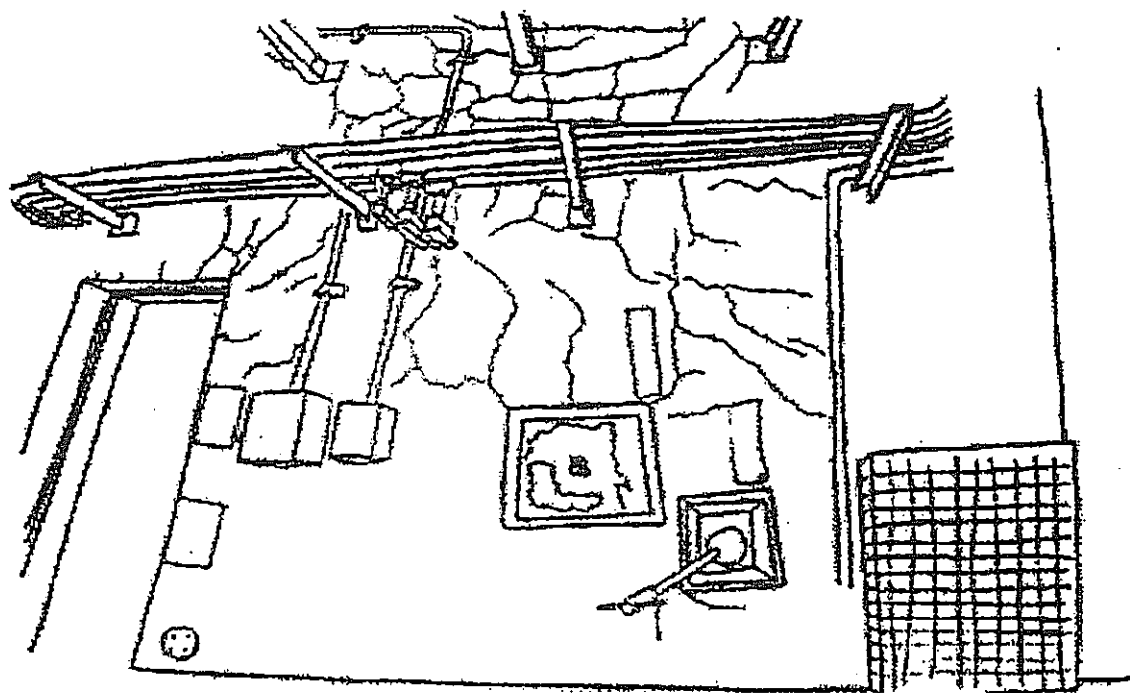


A234西壁



A234東壁

図6.2 A234-壁WとA234-壁Eの被害状況



A235西壁

図6.3 A235-壁Wの被害状況

7. まとめ

既往の実験及びアスファルト固化処理施設の一部の構造壁（床）の耐力評価について、簡易手法（基礎微分方程式と降伏線理論を用いた解法）と有限要素法(FEM)による耐力のクロスチェックを行うことにより、両手法の妥当性を示した。またアーチアクション等の効果を取り入れることにより、簡易手法を用いて、壁の降伏・終局耐力の評価をある程度行えることがわかった。

【参考文献】

- [1] 東 洋一、小森 清司：建築構造学大系1 1「平板構造」，彰国社
- [2] 東 洋一：鉄筋コンクリートスラブの降伏線理論と終局耐力，コンクリートジャーナル
- [3] 坂尻 公也、日野 正熙、土橋 由造：周辺拘束形鉄筋コンクリート床スラブの終局強度について，日本建築学会構造系論文報告集 第403号，1989年9月
- [4] 土橋 由造、坂尻 公也：鉄筋コンクリート床版の終局強度について，日本建築学会論文報告集 第277号，1979年3月
- [5] 東 洋一、小森 清司：等分布荷重をうける鉄筋コンクリート正方形スラブの終局耐力に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集 第140号，1967年10月
- [6] 土橋 由造、坂尻 公也：自由辺を有する鉄筋コンクリート床版の終局強度について，日本建築学会論文報告集 第296号，1980年10月
- [7] 小森 清司：各種荷重をうける鉄筋コンクリート長方形スラブの終局耐力に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集 第143号，1968年1月

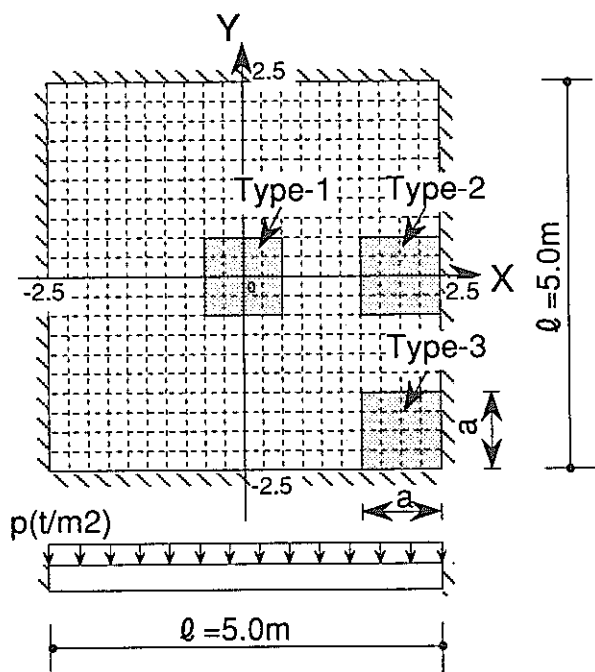
付録-1 降伏耐力評価のための予備検討

開口を有する板の弾性理論による解を導出した例は少なく、また、この解は開口の位置により変動することが予想される。

そこで、壁の降伏耐力(P_y)を評価するために、下図に示すような正方形の板を例にとり、当社保有の弾性FEMプログラム(KANSAS)により、開口の位置・大きさによる板の最大モーメント値を算出し、開口の無い板の降伏耐力(P_{y0})と開口の有る板の降伏耐力(P_y)との比 $rP_y(=P_y/P_{y0})$ を、開口の位置・大きさをパラメータとして求めた。

なお、上記FEM解析の妥当性は、文献 [1] に掲載されている中央に開口を有する板の最大モーメントの値を比較することにより検証する。

1. 解析モデル



解析モデルは、左図に示すような等分布荷重 $p(t/m^2)$ を受ける四辺固定の正方形である（一辺は 5 m；要素は一辺を 20 分割した SHELL 要素）。また開口位置は、次の代表的な 3 タイプとした。

- Type-1：中央部
- Type-2：中央端部
- Type-3：コーナー部

開口辺長比(a/ℓ)は、0.0~0.6(0.1刻み)とした。

更に、弾性理論解との整合性をとるために、ポアソン比(ν)は、 $\nu=0$ とし、曲げのみを考慮した解析とした。

以下に解析パラメータを挙げる。

2. 解析パラメータ

開口位置	Type-1, Type-2, Type-3
開口辺長比(a/ℓ)	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6
ヤング係数(E)	$2.65 \times 10^5 (kgf/cm^2)$ ← $F_c=320kgf/cm^2$
ポアソン比(ν)	0.0
板厚(t)	50cm(一部、20cm,100cm)
等分布荷重(p)	1.0 (t/m^2)

付表-1 板厚による最大モーメント値の差異

単位：tm/m

	開口無し		開口有り					
			Type-1(a/ℓ=0.6)		Type-2(a/ℓ=0.6)		Type-3(a/ℓ=0.6)	
	maxMx	maxMy	maxMx	maxMy	maxMx	maxMy	maxMx	maxMy
t=20cm	1.197	1.197	0.422	0.422	0.993	0.837	1.318	1.318
t=50cm	1.187	1.187	0.418	0.418	1.021	0.863	1.290	1.290
t=100cm	1.160	1.160	0.409	0.409	1.067	0.897	1.207	1.207

付表-2 理論解とFEMの値の比較 (M ; p · ℓ²)

a/ℓ	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
理論解	0.0491	0.0475	0.0453	0.0416	0.0354	0.0274	0.0190
FEM	0.0475	0.0474	0.0462	0.0426	0.0358	0.0266	0.0167

付表-3 開口辺長比による降伏耐力の差異

(1)Type-1(中央部)

a/ℓ	maxMx (tm/m)	maxMy (tm/m)	maxM (tm/m)	M (pℓ ²)	rAe (m ²)	Py (=rAe/M)	rPy (=Py/Py ₀)
0.0	1.187	1.187	1.187	0.0475	1.00	21.061	1.000
0.1	1.185	1.185	1.185	0.0474	0.99	20.886	0.992
0.2	1.156	1.156	1.156	0.0462	0.96	20.761	0.986
0.3	1.065	1.065	1.065	0.0426	0.91	21.362	1.014
0.4	0.896	0.896	0.896	0.0358	0.84	23.438	1.113
0.5	0.665	0.665	0.665	0.0266	0.75	28.195	1.339
0.6	0.418	0.418	0.418	0.0167	0.64	38.278	1.817

(2)Type-2(中央端部)

a/ℓ	maxMx (tm/m)	maxMy (tm/m)	maxM (tm/m)	M (pℓ ²)	rAe (m ²)	Py (=rAe/M)	rPy (=Py/Py ₀)
0.0	1.187	1.187	1.187	0.0475	1.00	21.061	1.000
0.1	1.356	1.224	1.356	0.0542	0.99	18.252	0.867
0.2	1.421	1.265	1.421	0.0568	0.96	16.890	0.802
0.3	1.316	1.322	1.322	0.0529	0.91	17.209	0.817
0.4	1.131	1.318	1.318	0.0527	0.84	15.933	0.757
0.5	1.079	1.161	1.161	0.0464	0.75	16.150	0.767
0.53	-	-	-	0.0424	0.71	16.865	0.801
0.6	1.021	0.863	1.021	0.0408	0.64	15.671	0.744

(3)Type-3(コーナー部)

a/ℓ	maxMx (tm/m)	maxMy (tm/m)	maxM (tm/m)	M (pℓ ²)	rAe (m ²)	Py (=rAe/M)	rPy (=Py/Py ₀)
0.0	1.187	1.187	1.187	0.0475	1.00	21.061	1.000
0.1	1.187	1.187	1.187	0.0475	0.99	20.851	0.990
0.2	1.191	1.191	1.191	0.0476	0.96	20.151	0.957
0.3	1.247	1.247	1.247	0.0499	0.91	18.244	0.866
0.4	1.599	1.599	1.599	0.0640	0.84	13.133	0.624
0.5	1.644	1.644	1.644	0.0658	0.75	11.405	0.542
0.6	1.290	1.290	1.290	0.0516	0.64	12.403	0.589

付録-2 終局耐力評価のための予備検討

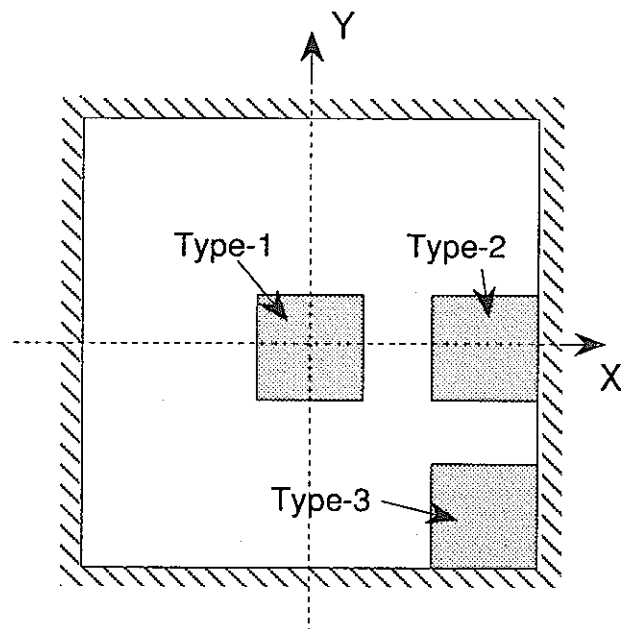
開口を有する板の降伏線理論による解を導出した例は少なく、また、この解は開口の位置により変動することが文献2)からも予想される。

そこで、壁の終局耐力(P_u)を評価するために、降伏耐力の評価と同様に、下図に示すような正方形の板を例にとり、文献 [2] に示される手法に従い、開口の位置・大きさによる板の終局等分布荷重(p)を算出し、開口の無い板の降伏耐力(P_{u0})と開口の有る板の降伏耐力(P_u)との比 $r_{Pu}(=P_u/P_{u0})$ を、開口の位置・大きさをパラメータとして求めた。

1. 解析モデル

解析モデルは、降伏耐力評価のための検討の時と同様に、等分布荷重 $p(t/m^2)$ を受ける四辺固定の正方形であり（一辺は5 m）、開口位置は、次の代表的な3タイプである。

- Type-1：中央部
- Type-2：中央端部
- Type-3：コーナー部



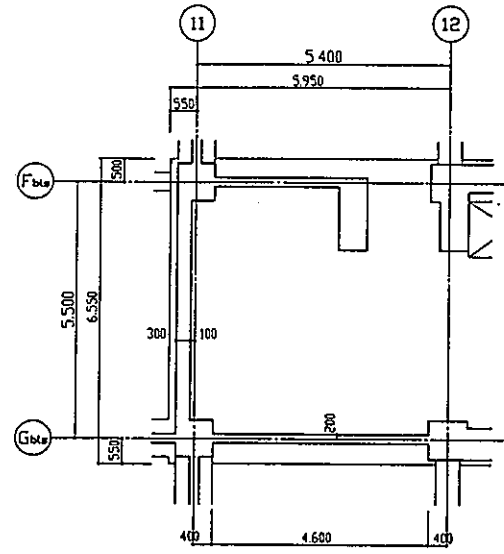
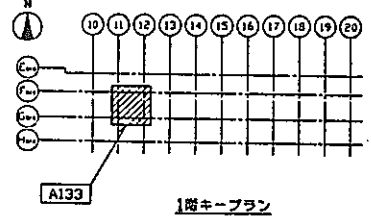
2. 降伏線理論による終局荷重

各開口位置に対して、降伏線理論により求められた $M_0=1.0$ の時の終局分布荷重(p_u)及び開口の無い板の降伏耐力(P_{u0})と開口の有る板の降伏耐力(P_u)との比 $r_{Pu}(=P_u/P_{u0})$ を付表-4に示す。また、上記 r_{Pu} と開口辺長比(a/l)の関係を各開口位置に関して、図3.2.3に示す。

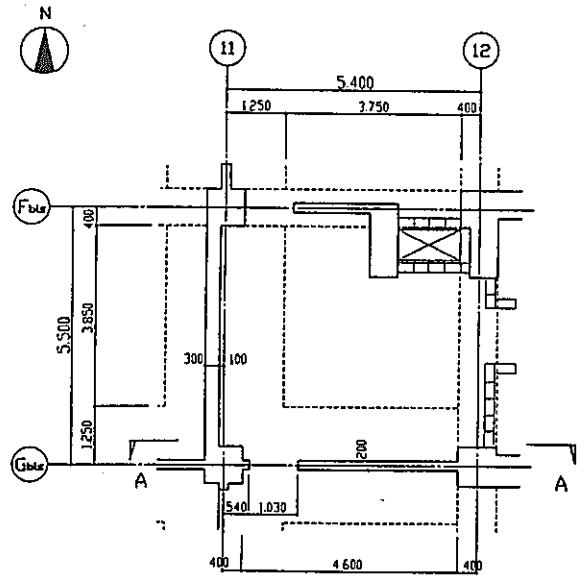
付表-4 開口辺長比による終局耐力の差異

a/ℓ	Type-1 (中央部)			Type-2 (中央端部)									Type-3 (コーナー部)						
	pu ($\times M_0$)	rpu ($=p/p_0$)	rPu ($=Pu/Pu_0$)	x1 (m)	pu1 ($\times M_0$)	x2 (m)	pu2 ($\times M_0$)	x3 (m)	pu3 ($\times M_0$)	pu ($\times M_0$)	rpu ($=p/p_0$)	rPu ($=Pu/Pu_0$)	x1 (m)	pu1 ($\times M_0$)	x2 (m)	pu2 ($\times M_0$)	pu ($\times M_0$)	rpu ($=p/p_0$)	rPu ($=Pu/Pu_0$)
0.00	1.920	1.000	1.000	2.500	1.920	3.865	3.293	-	-	1.920	1.000	1.000	2.500	1.920	-	-	1.920	1.000	1.000
0.05	1.824	0.950	0.948	2.531	1.897	3.735	2.762	-	-	1.897	0.988	0.985	2.532	1.872	-	-	1.872	0.975	0.973
0.10	1.731	0.902	0.893	2.558	1.877	3.603	2.419	-	-	1.877	0.978	0.968	2.563	1.826	-	-	1.826	0.951	0.942
0.15	1.643	0.856	0.837	2.573	1.866	3.456	2.197	-	-	1.866	0.972	0.950	2.592	1.786	-	-	1.786	0.930	0.909
0.20	1.561	0.813	0.780	2.570	1.868	3.286	2.058	-	-	1.868	0.973	0.934	2.617	1.752	-	-	1.752	0.913	0.876
0.25	1.486	0.774	0.726	2.542	1.888	3.094	1.982	-	-	1.888	0.983	0.922	2.634	1.729	-	-	1.729	0.901	0.844
0.30	1.421	0.740	0.673	2.484	1.932	2.882	1.957	-	-	1.932	1.007	0.916	2.642	1.719	-	-	1.719	0.895	0.815
0.35	1.365	0.711	0.624	2.392	2.008	2.656	1.978	3.257	1.953	1.953	1.017	0.893	2.636	1.727	3.250	1.857	1.727	0.899	0.789
0.40	1.321	0.688	0.578	2.268	2.126	2.423	2.048	3.110	1.932	1.932	1.006	0.845	2.613	1.757	3.028	1.809	1.757	0.915	0.769
0.45	1.291	0.673	0.536	2.115	2.301	2.189	2.175	2.945	1.933	1.933	1.007	0.803	2.569	1.818	2.969	1.802	1.802	0.938	0.748
0.50	1.280	0.667	0.500	1.937	2.558	1.958	2.376	2.764	1.958	1.958	1.020	0.765	2.500	1.920	2.913	1.820	1.820	0.948	0.711
0.55	1.295	0.674	0.470	1.740	2.941	1.733	2.683	2.569	2.008	2.008	1.046	0.729	2.401	2.081	2.860	1.866	1.866	0.972	0.678
0.60	1.352	0.704	0.451	1.528	3.531	1.512	3.156	2.361	2.086	2.086	1.087	0.695	2.269	2.331	2.811	1.946	1.946	1.014	0.649

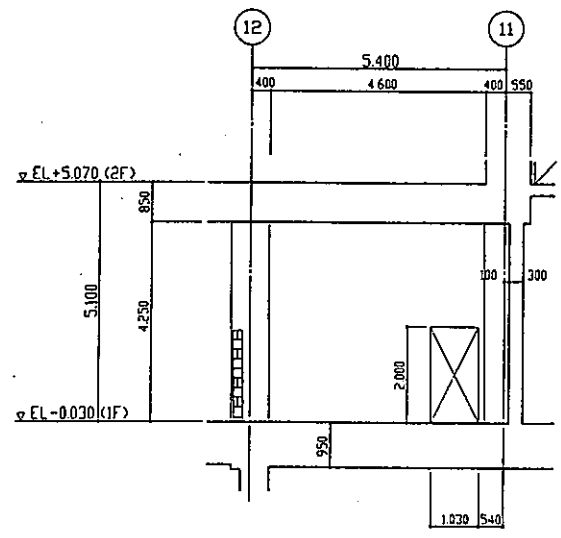
付録-3 鉄筋コンクリート壁の寸法・配筋状況



A133 天井具上図

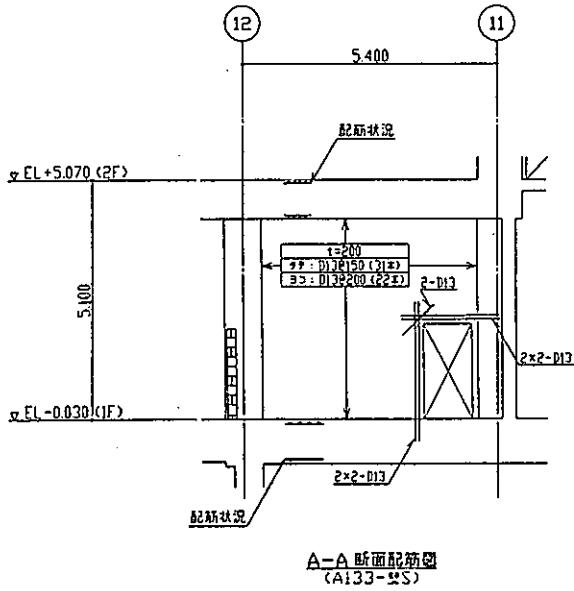
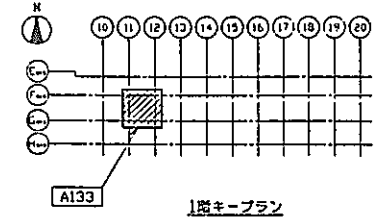
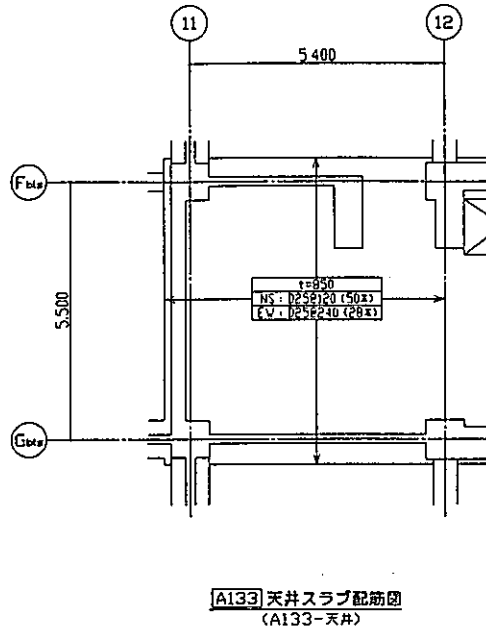
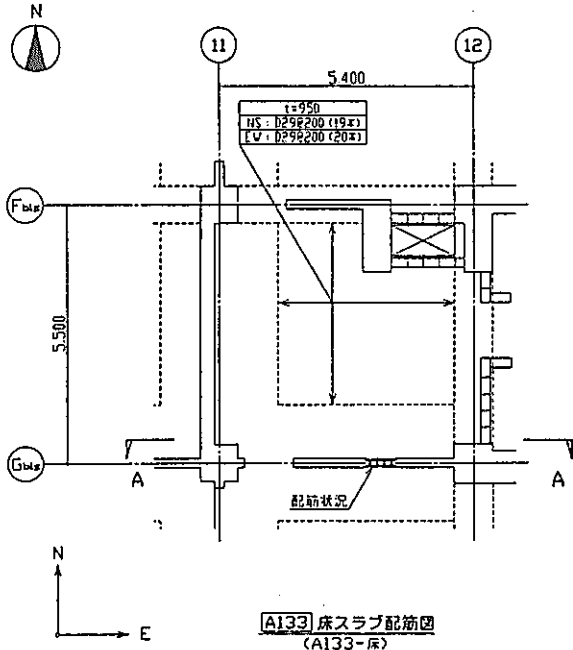


A133 床伏図

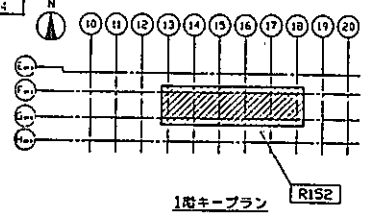
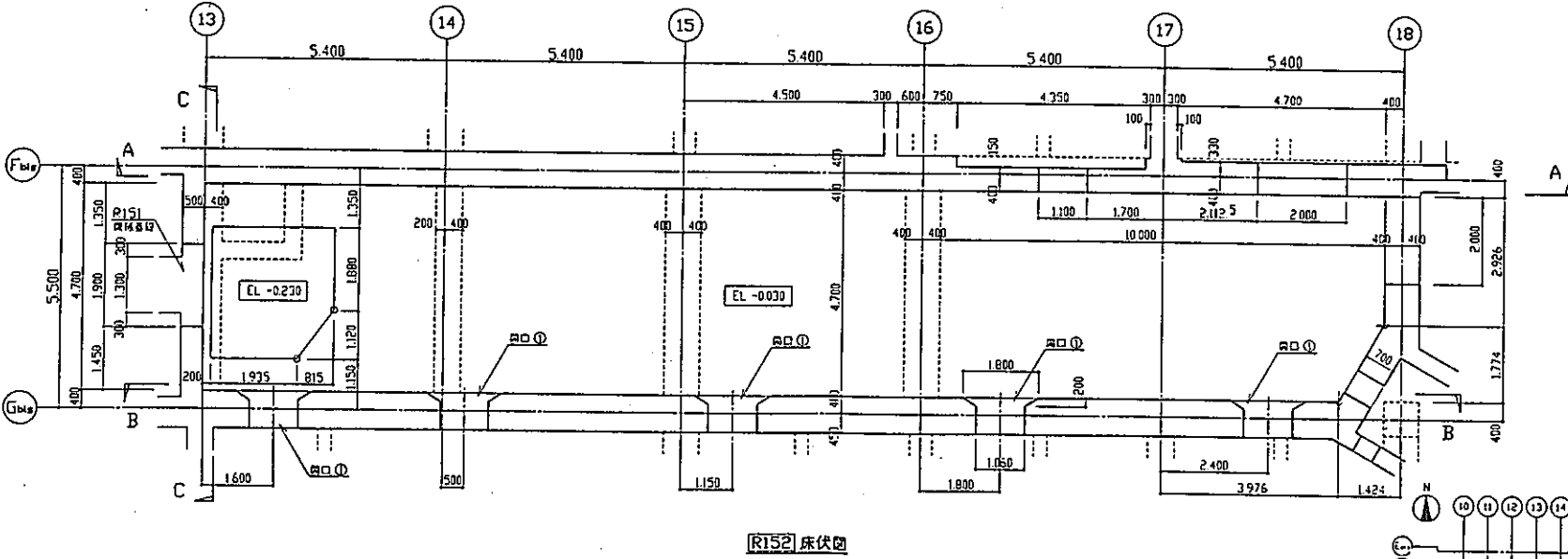
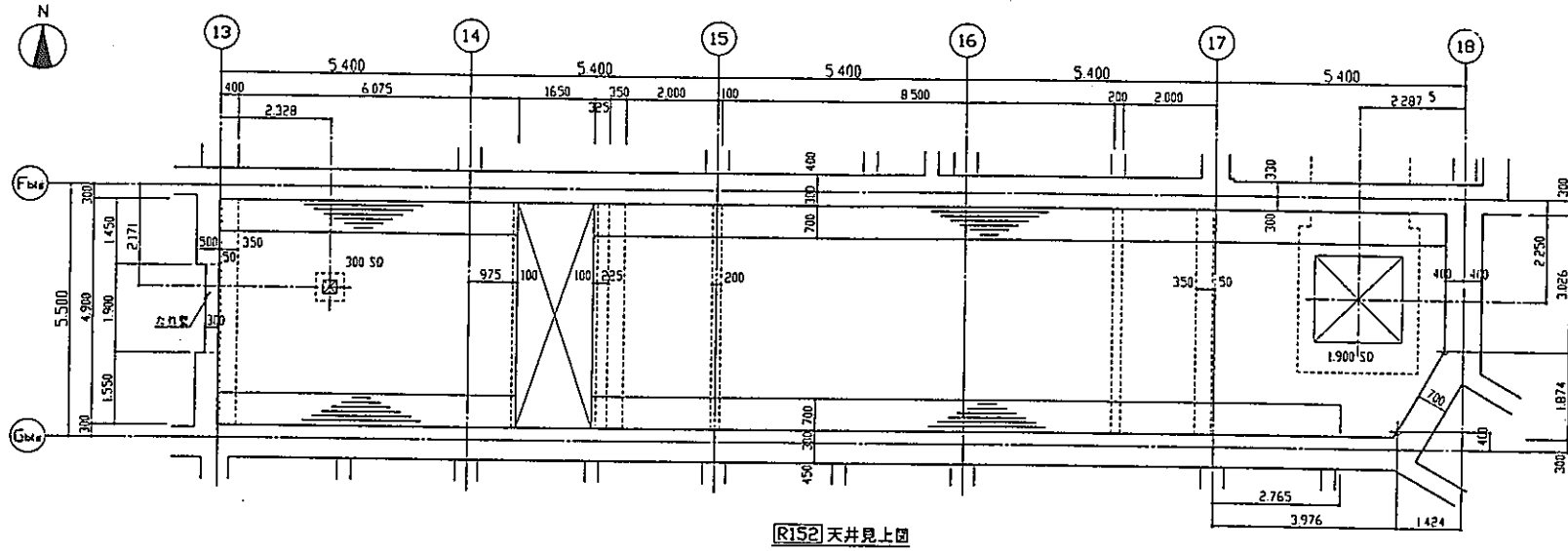


A-A断面図

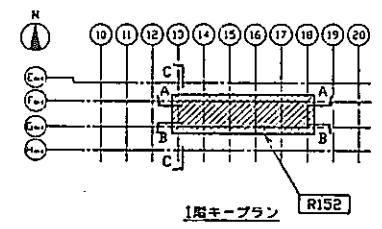
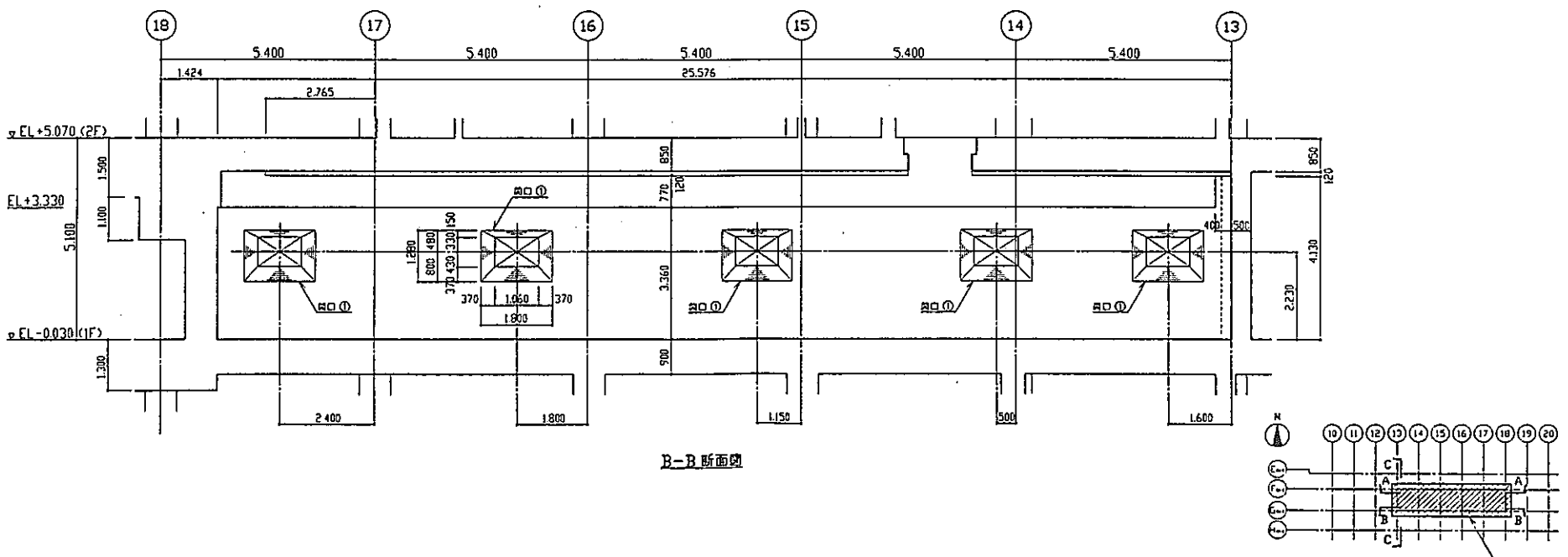
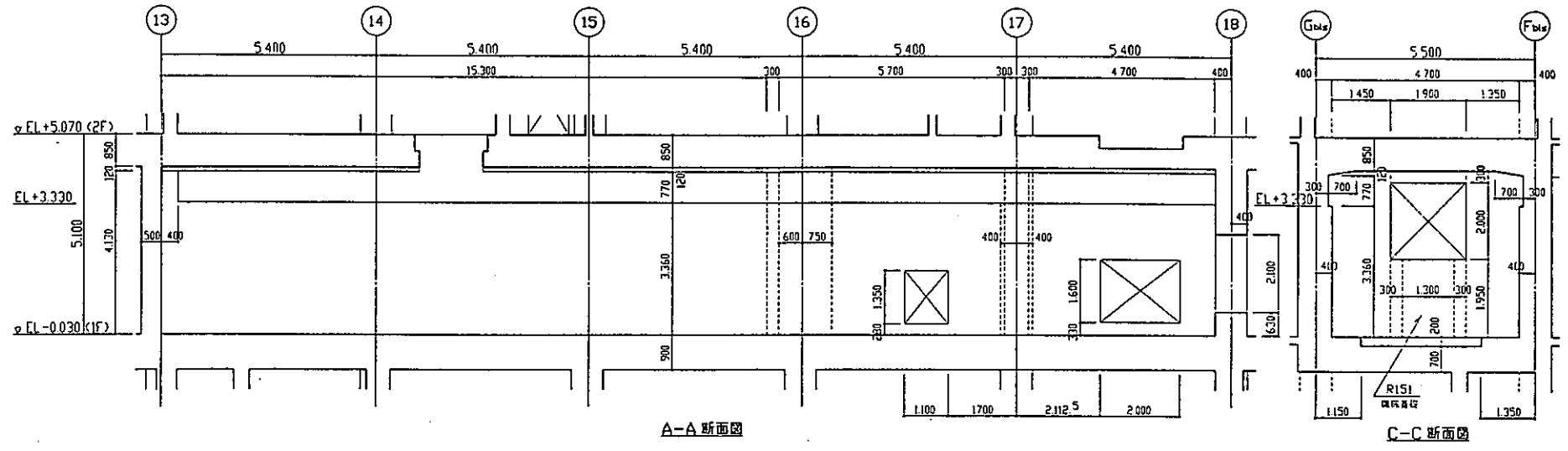
A133 躯体図



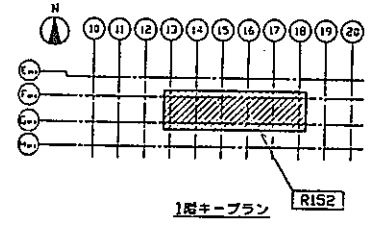
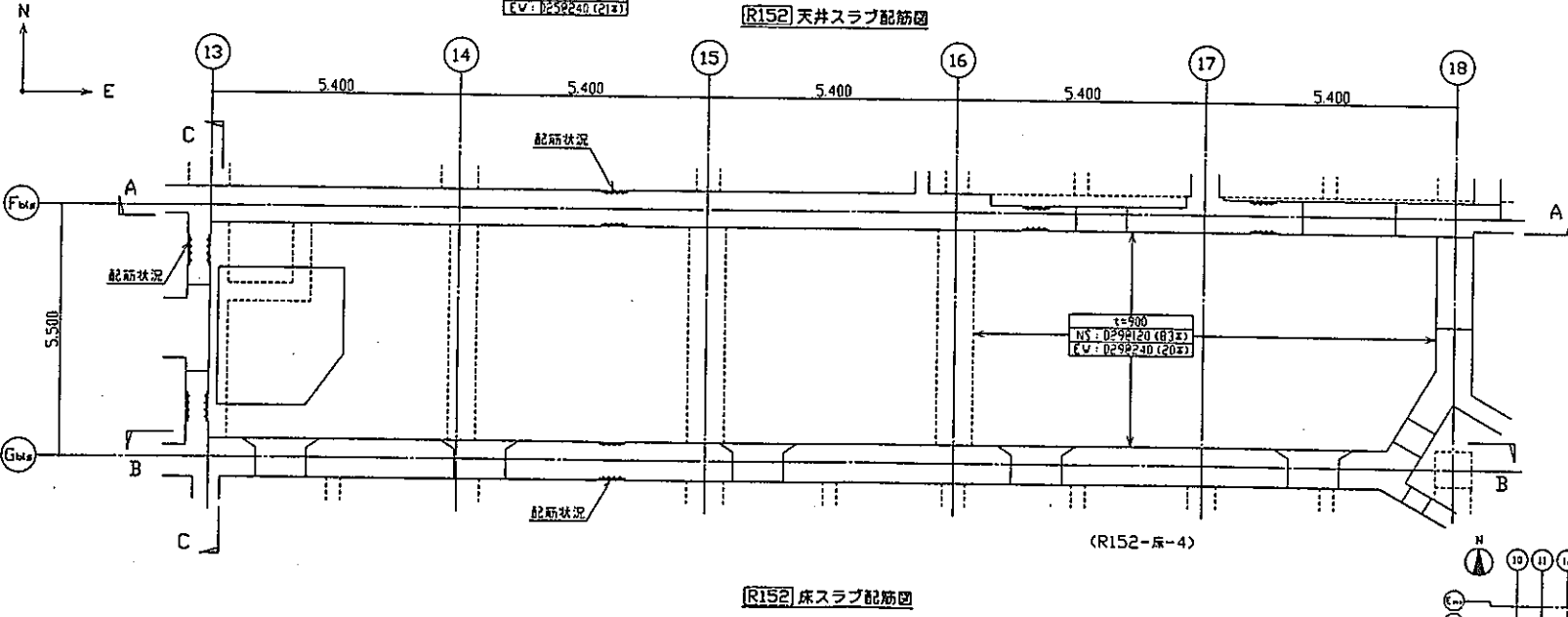
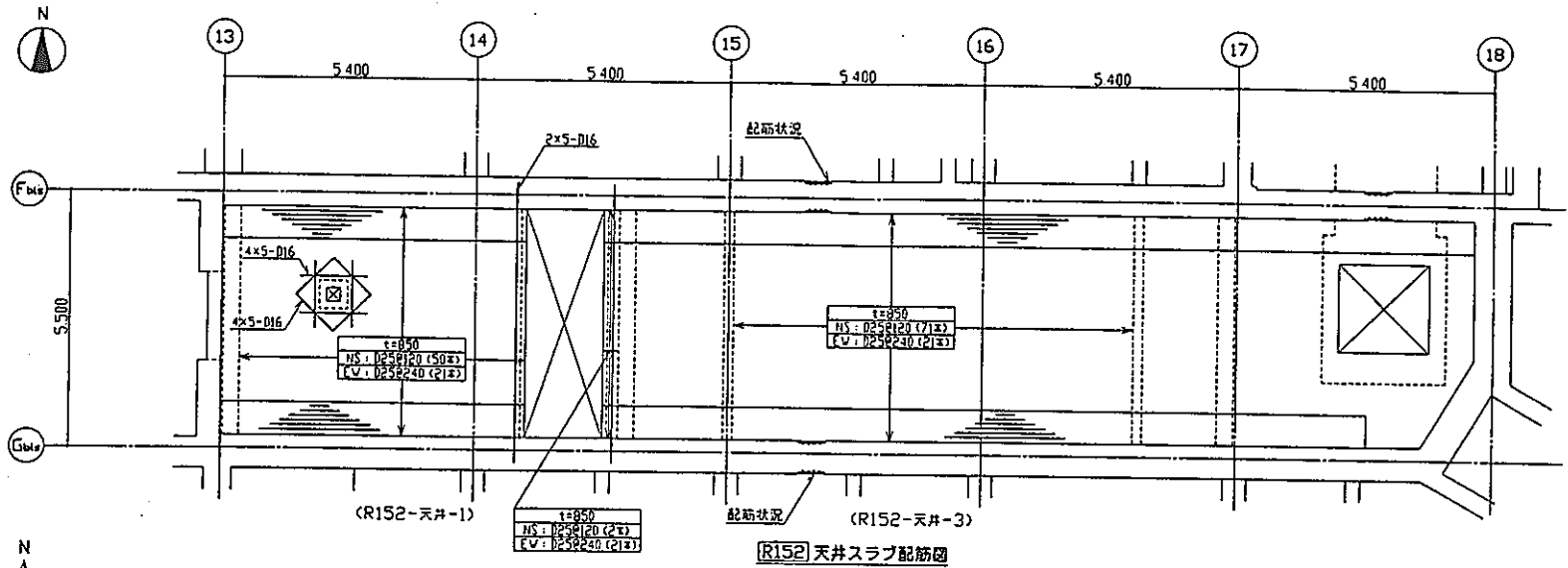
A133 配筋図



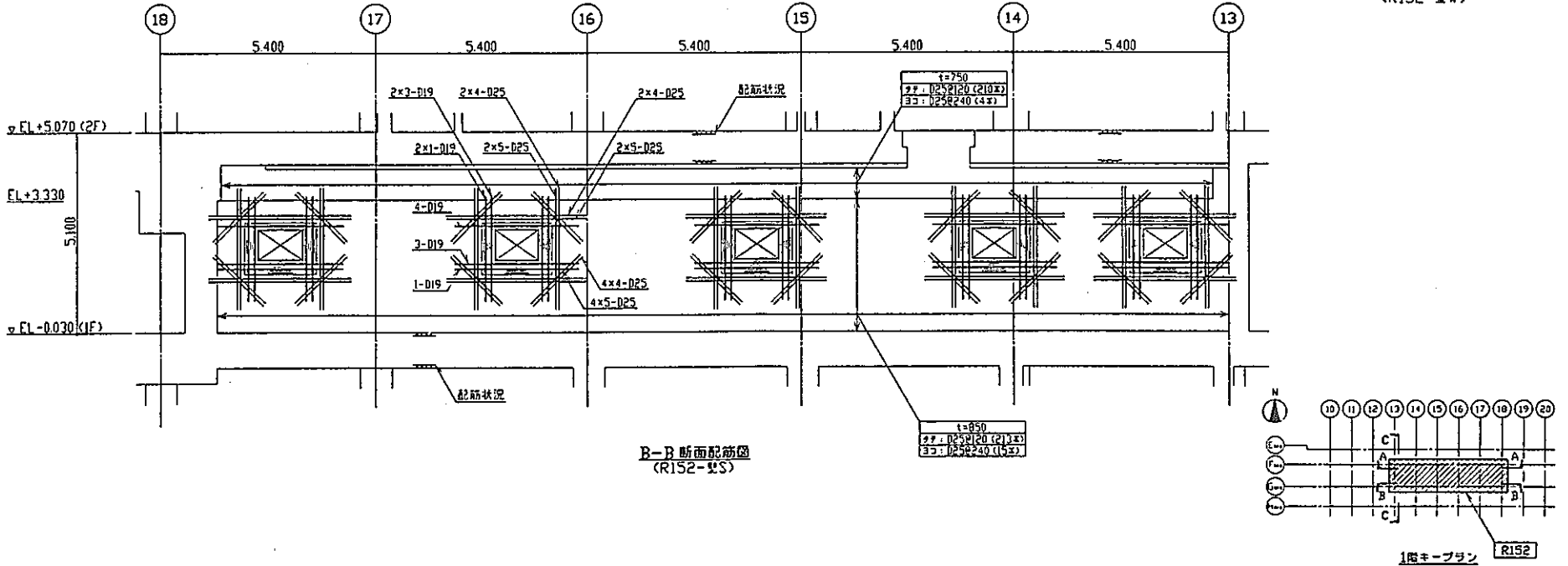
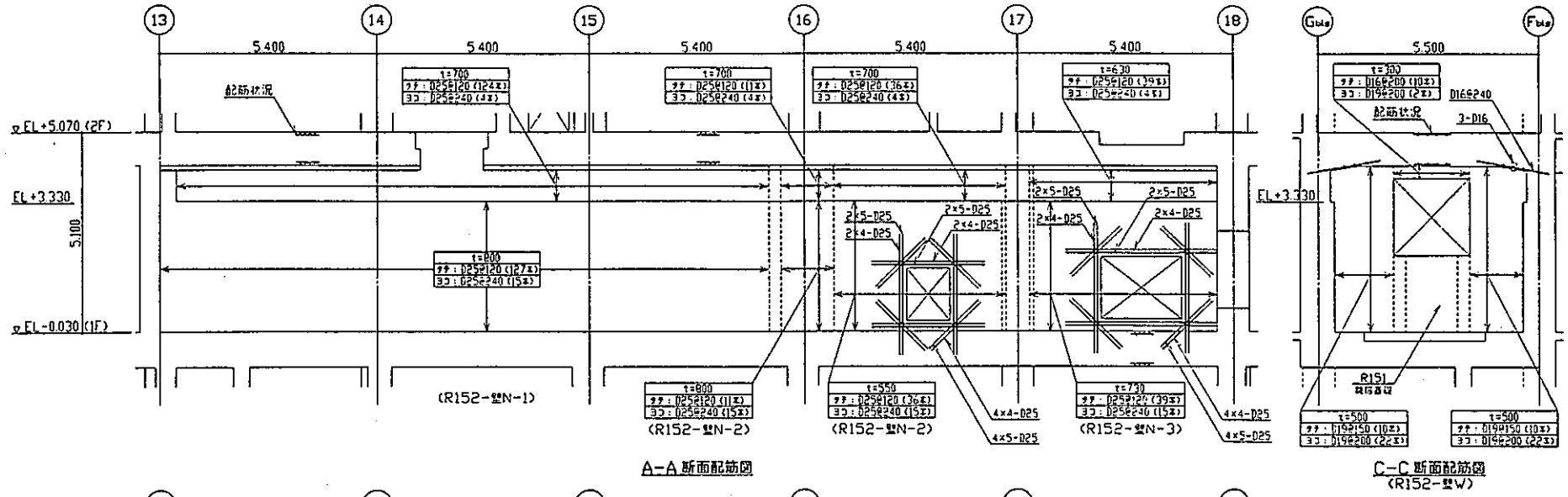
R152 躯体図 (1)



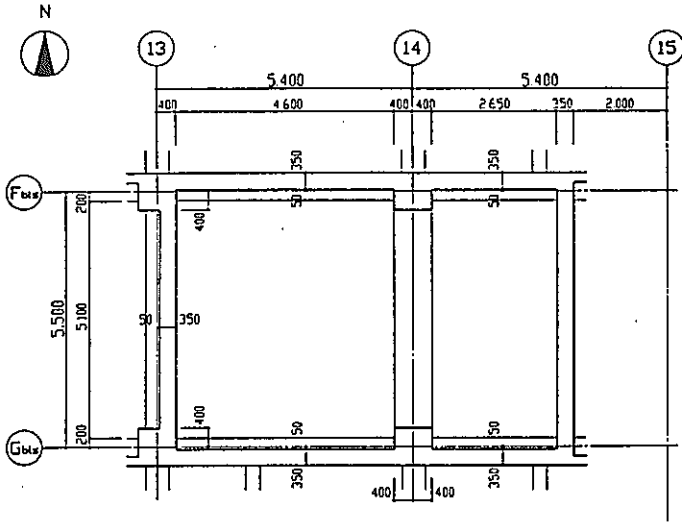
R152 全体図 (2)



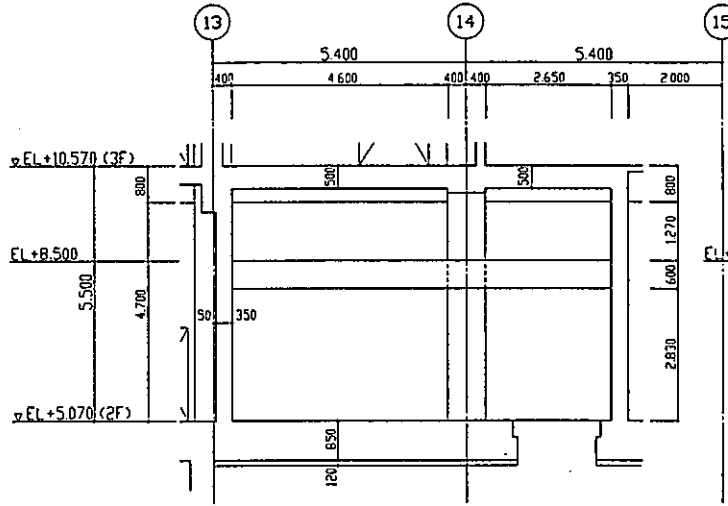
R152 配筋図 (1)



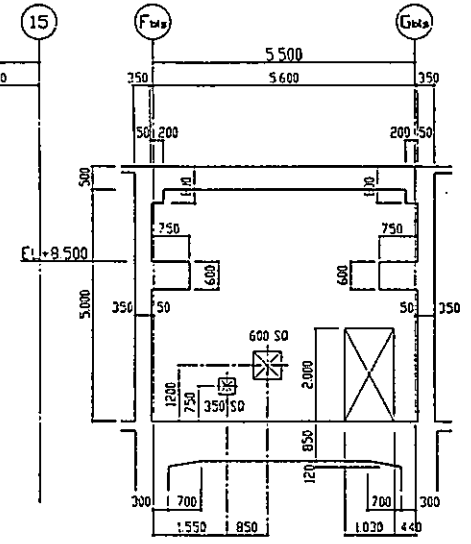
R152 配筋図 (2)



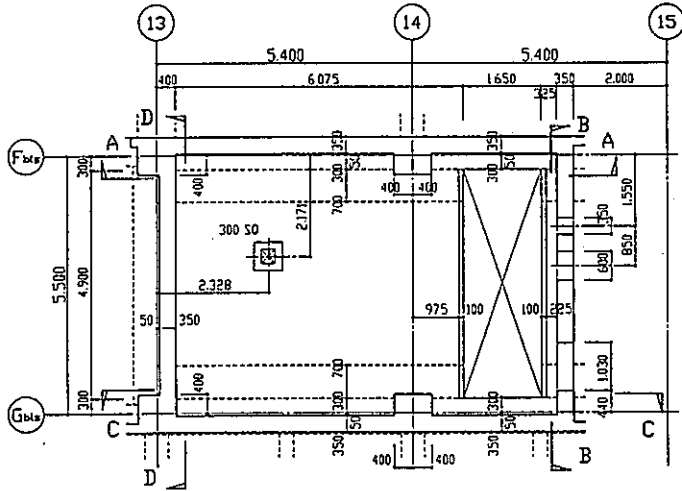
A234 天井見上図



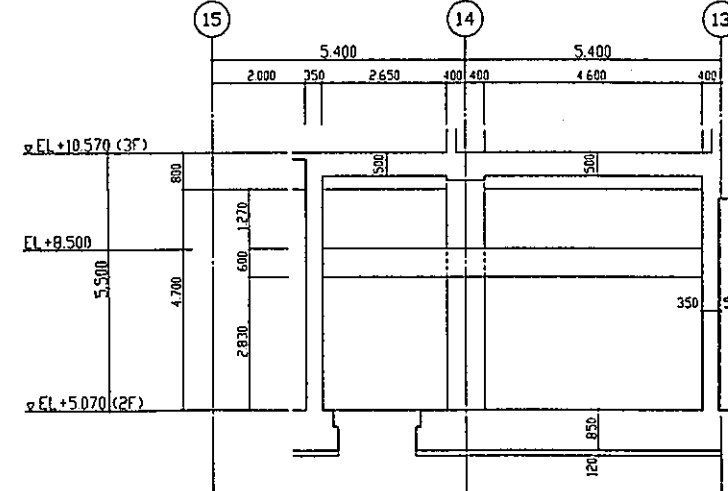
A-A 断面図



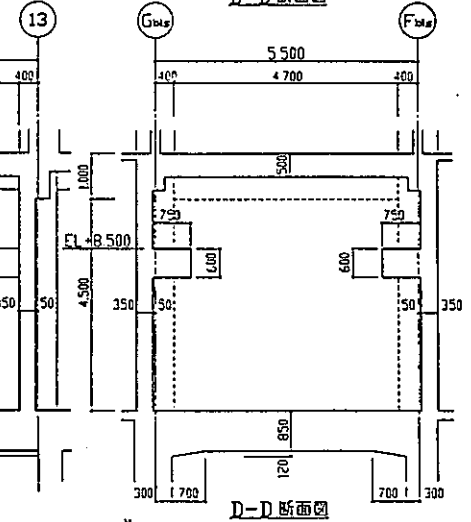
B-B 断面図



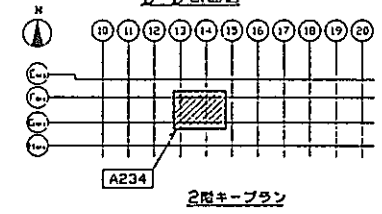
A234 床伏図



C-C 断面図

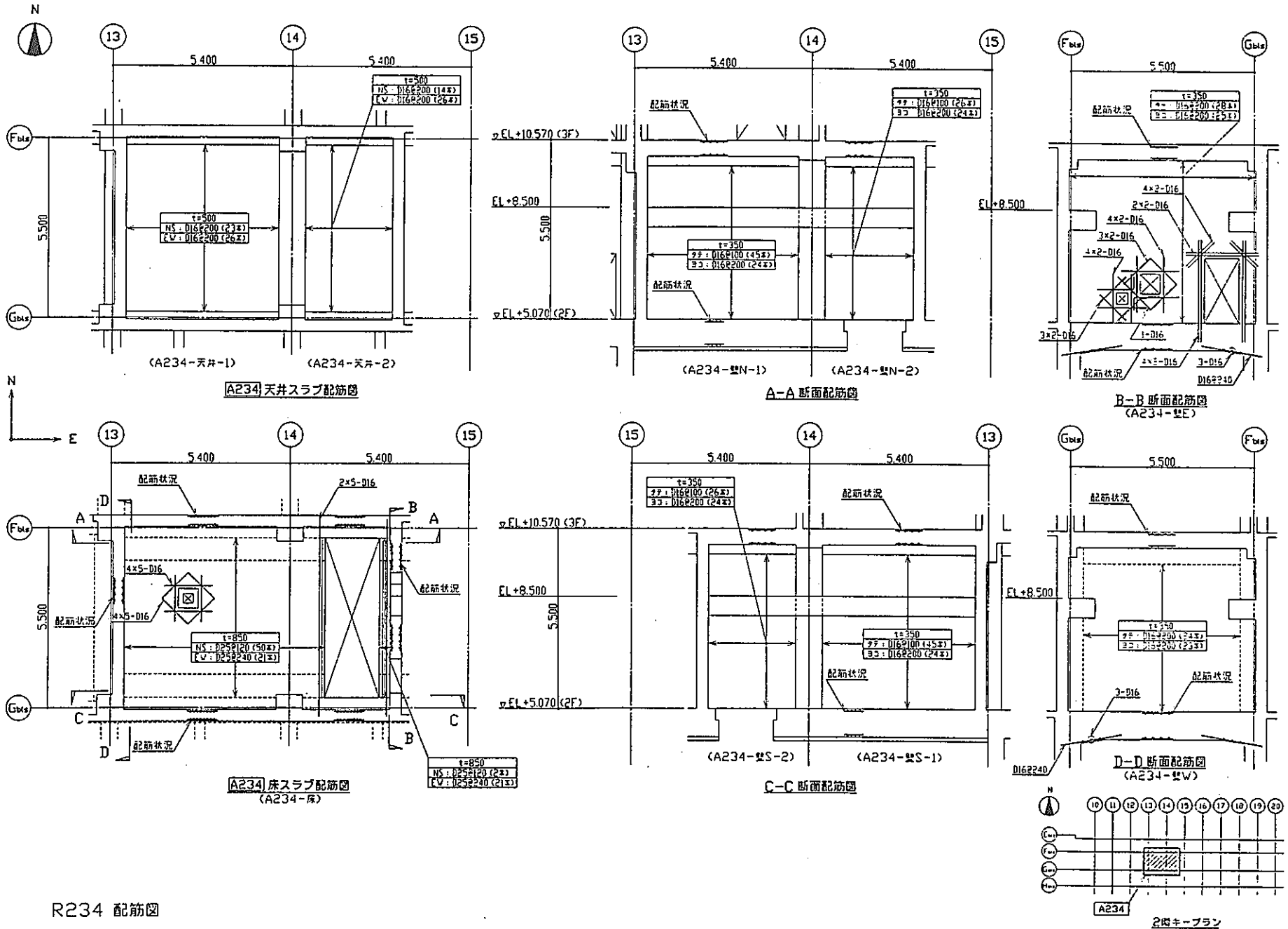


D-D 断面図

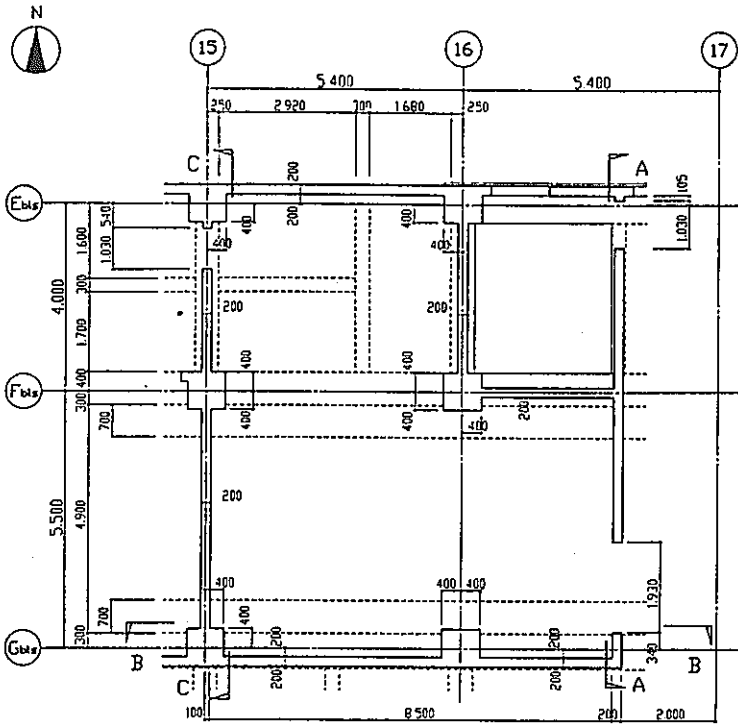


2階キープラン

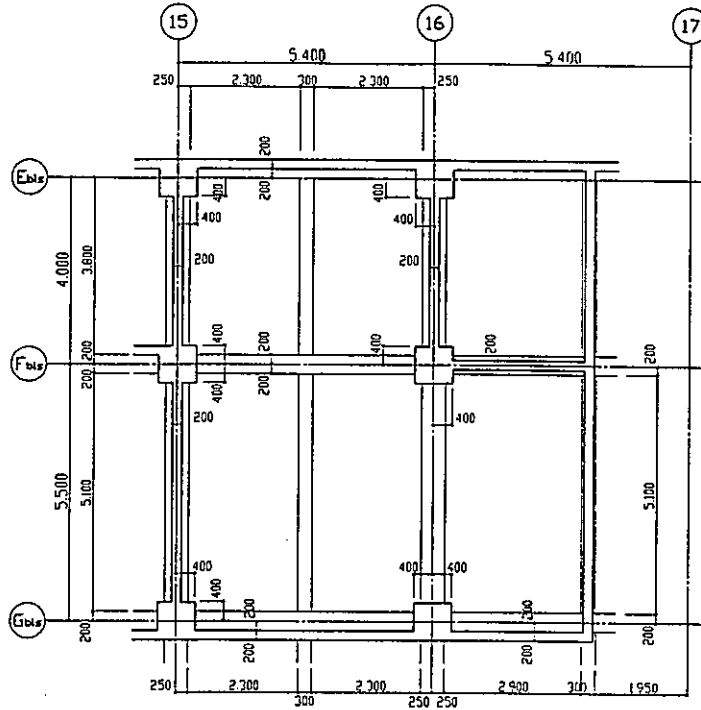
A234 躯体図



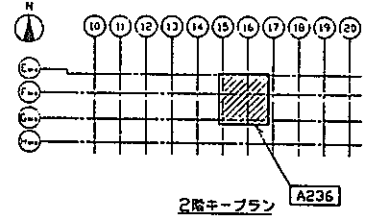
R234 配筋図



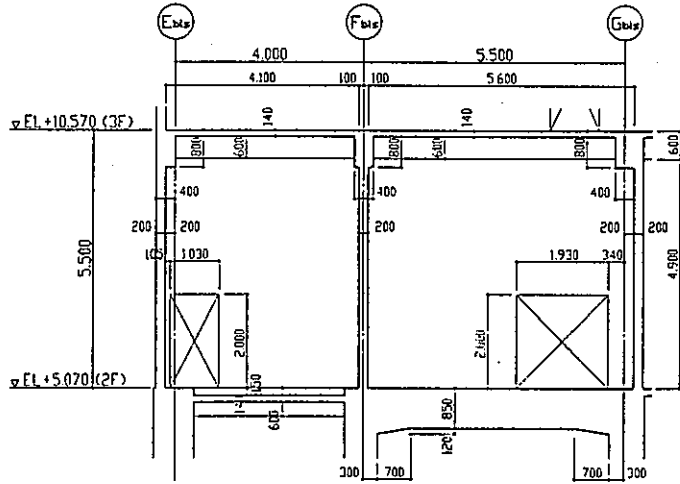
A236 床伏図



A236 天井見上図

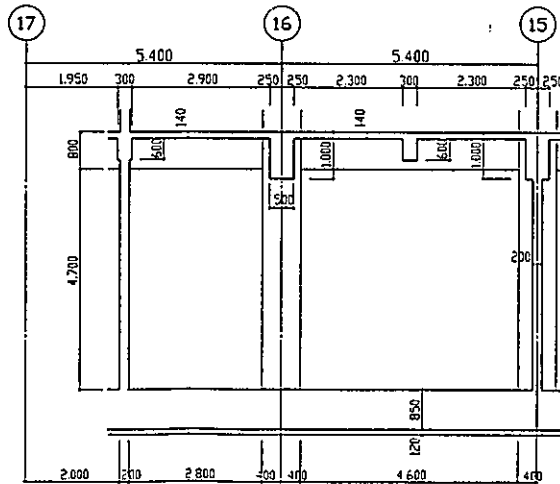


2階キープラン A236

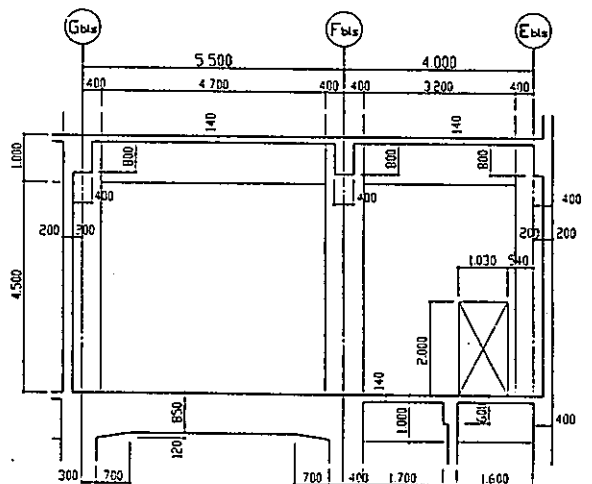


A236 船体図

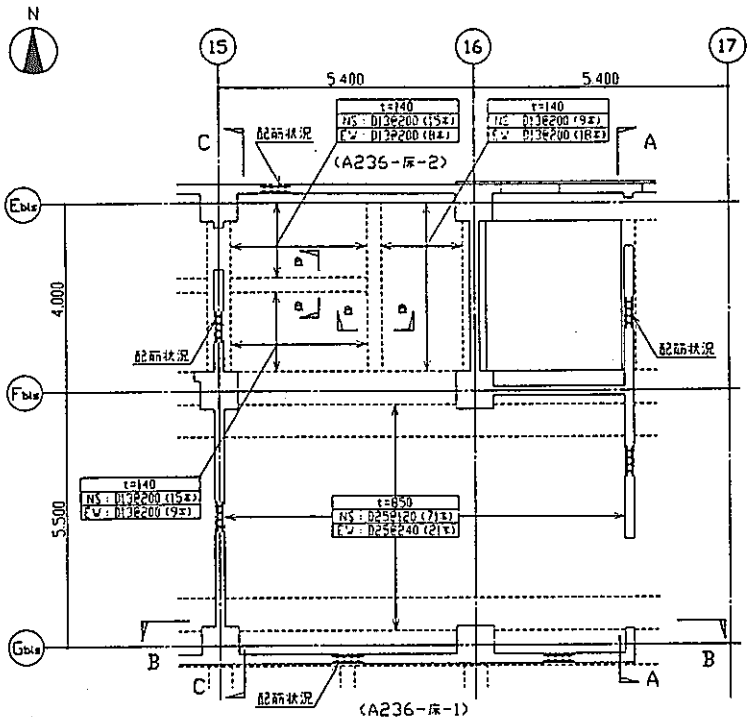
A-A 断面図



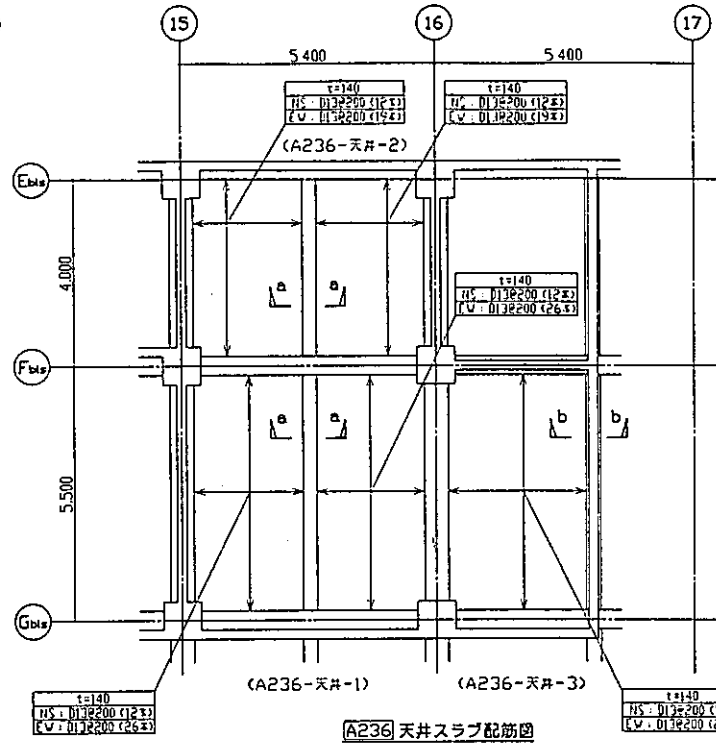
B-B 断面図



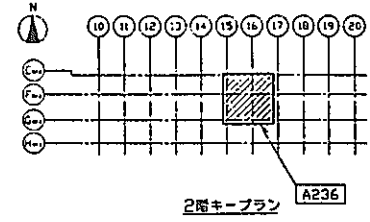
C-C 断面図



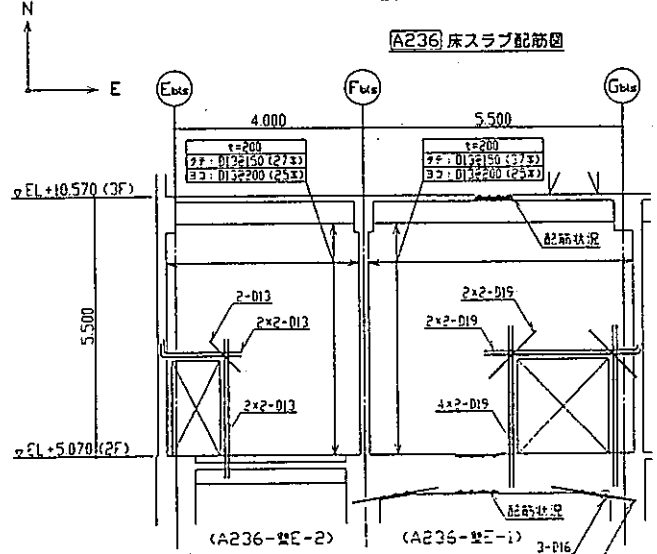
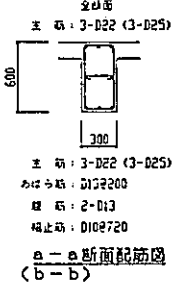
A236 床スラブ配筋図



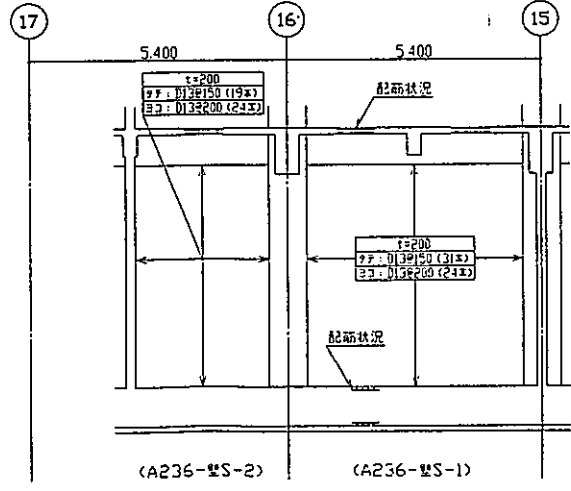
A236 天井スラブ配筋図



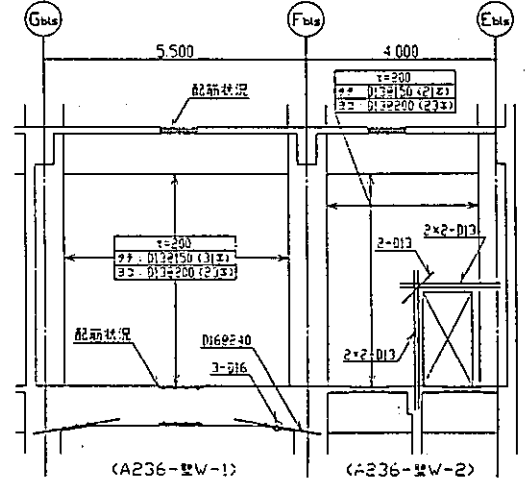
小振り断面



A236 配筋図



A236 壁スラブ配筋図



A236 壁スラブ配筋図

付録-4 FEM解析コードの概要

鉄筋コンクリート構造物の全体破壊解析コード CARC-SHELL-DYN の概要を以下に示す。

2.1 板要素の剛性評価の概要

鉄筋コンクリート構造物を簡単に取り扱えるシェル要素を採用し、構造物は平面要素の集合体に近似する。

シェル要素として三角形4つからなる四辺形平板要素を採用し、面内抵抗を表わす剛性行列は一定ひずみの仮定より求め、平板曲げ要素としての取扱いは Clough, Fellipa 等の開発した適合モデルを導入する。

図2.1 に示すように基本となる三角形要素を重心0と各頂点を結ぶ直線によって3個の領域に分け、三角形の各頂点に3自由度、各辺の midpoint に法線方向回転角の1自由度をとり、全体で12自由度を設定する。それぞれの領域において10項からなる3次多項式の変位関数を仮定し、各領域の境界線上において変位の適合条件を適用することによって変位関数を定める。この変位関数に基づいて最終的に面外12自由度、面内6自由度の変位自由度に対するひずみ—変位行列 [B] が算定される。

また、コンクリートのひびわれ、圧縮降伏、圧壊、鉄筋の降伏を評価するため、図2.2 に示すように板厚方向を数層に分割した積層要素を採用する。断面が平面保持する仮定から、任意位置におけるひずみは、中立面位置のひずみと任意位置までの距離を用いて表わすことができる。この任意面のひずみ—中立面ひずみ行列を [G] とする。

ここで応力—ひずみ行列を [D] で表わすと仮想仕事の原理から剛性行列 [K] が下式で算定される。

$$[K] = \int_V [B]^T [G]^T [D] [G] [B] dV \quad \dots\dots (2.1)$$

図2.3 に示すように四辺形要素剛性は、(2.1) 式で導かれた剛性を重ね合わせ辺の midpoint の法線方向回転角が線形に変化すると仮定による消去を行い、最終的に計24自由度の剛性行列となる。

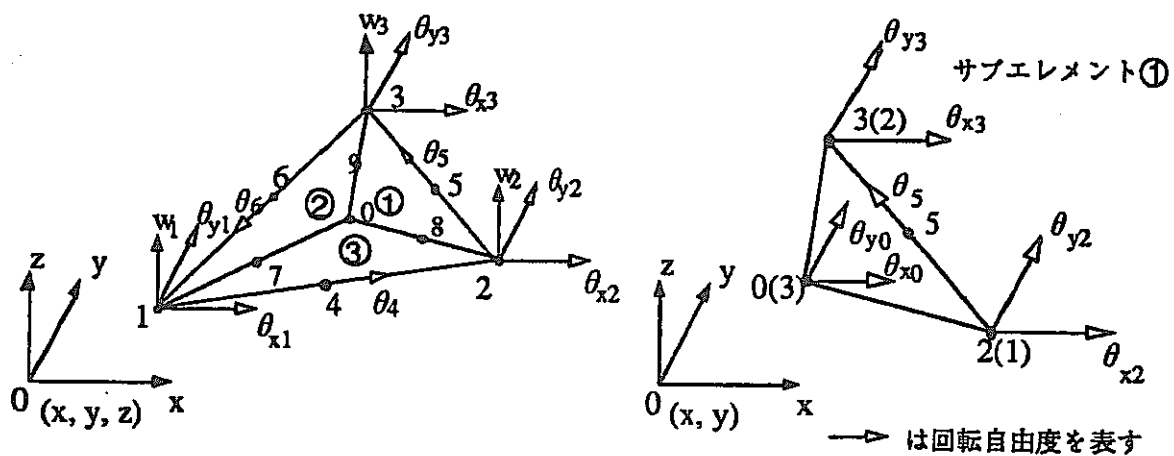


図2.1 三角形要素の変位とサブエレメント

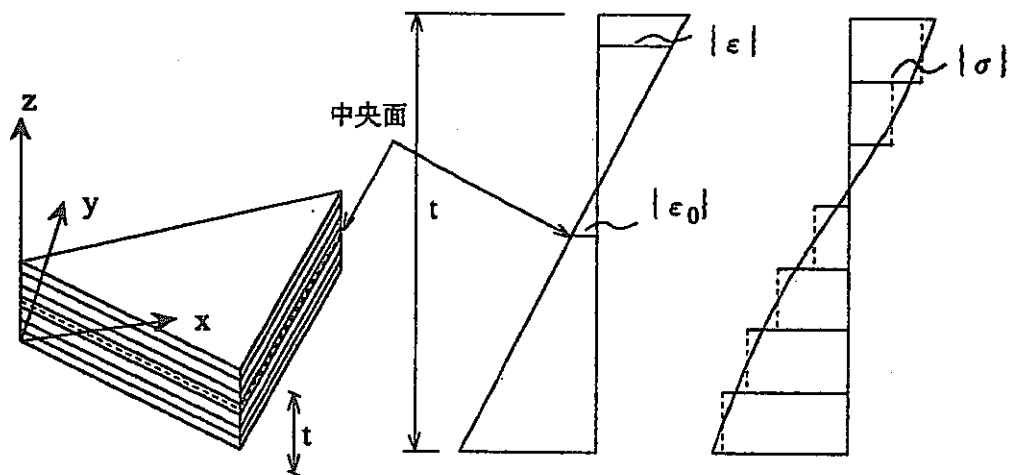


図2.2 層分割及び応力とひずみ

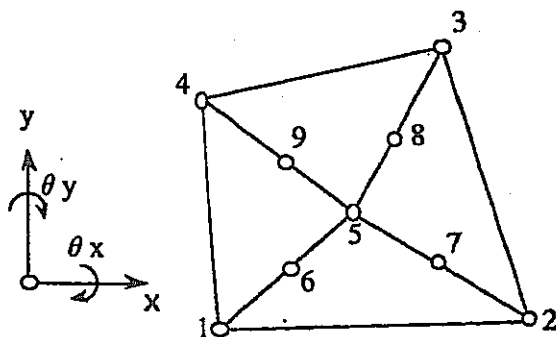


図2.3 四角形要素

2.2 数値積分法

数値積分法として無条件安定であり、考えている振動数の範囲では周期誤差がなく2次オーダーの精度を有するNewmark β 法を採用した。

Newmark β 法は、次のように表わされる。

$$M a_{n+1} + C v_{n+1} + K_{n+1} d_{n+1} = f_{n+1} \quad \dots\dots (2.2)$$

$$d_{n+1} = d_n + \Delta t v_n + (\Delta t)^2 ((1-2\beta) a_n + 2\beta a_{n+1}) / 2 \quad \dots\dots (2.3)$$

$$v_{n+1} = v_n + \Delta t ((1-\gamma) a_n + \gamma a_{n+1}) \quad \dots\dots (2.4)$$

ここでM, C, Kは質量、減衰、剛性のマトリックス、a, v, dは加速度、速度、変位のベクトル、fは外力ベクトルである。添え字nは、時刻n Δt 時点を表す。

上式において構造物の復元力は非線形であるので、このような場合には、増分解析法が有効である。

$$M \Delta a + C \Delta v + K \Delta d = \Delta f \quad \dots\dots (2.5)$$

$$(M + \gamma \Delta t C + \beta (\Delta t)^2 K) \Delta a = \Delta f - \Delta t C a_n - \Delta t K v_n + (\Delta t)^2 \Delta a / 2 \quad \dots\dots (2.6)$$

減衰マトリックスCは、次のレーリ型の減衰を採用する。

$$C = \alpha_1 M + \alpha_2 K \quad \dots\dots (2.7)$$

なおnステップにおける不釣合力は、n+1ステップで解除する。

2.3 鉄筋コンクリート材料特性

1) コンクリートの引張側特性

ひびわれを図2.4に示すように要素内に一様に分布する分布ひびわれモデルで表現し、コンクリートの主応力が、引張強度に達する主応力に直角な方向にひびわれが生ずるとする。主応力度は、弾性論から、

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad \dots\dots (2.8)$$

ただし、 $\tan 2\theta_{cr} = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$

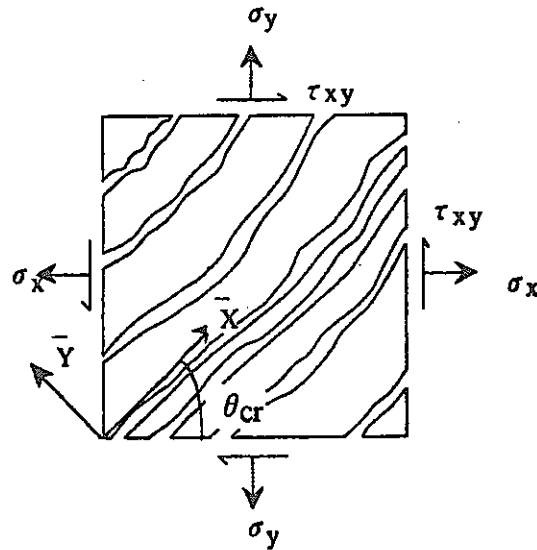


図2.4 分布ひびわれ(Smeared Crack) モデル

2) コンクリートの圧縮側特性

圧縮領域の塑性時の構成則は、初期降伏条件、流動則、硬化則により規定されるものとする。

a. 初期降伏条件

次のDrucker-Prager式を用いる。

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa = 0 \quad \dots (2.9)$$

ここに、 $I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$

$$J_2 = \frac{1}{6} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 \} \quad \dots (2.10)$$

α : 塑性変形に伴って生ずる体積変化の割合を示す定数

κ : 降伏応力

この降伏条件を主応力空間に描けば図2.5のようになる。ただし、引張側ではひびわれの発生に対して主応力度による破壊条件を設けているので前項1) で述べた扱いをしている。

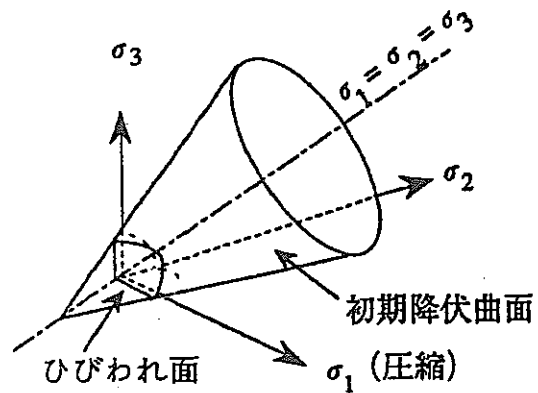


図2.5 3次元における降伏条件

b. 流動則

降伏後の変形は関連流動則に従うものとし、塑性ひずみ増分 $\{de^P\}$ が降伏曲面の法線方向に向かうと仮定すると次式で表される。

$$\{de^P\} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} d\lambda \quad \dots\dots (2.11)$$

ここに、 $d\lambda$: 比例定数 ($d\lambda > 0$)

c. 硬化則

塑性流れが進行するときの後続の降伏曲面は等方硬化則に従うものとする。

d. 塑性時の応力—ひずみ関係式

以上より、塑性時の応力増分とひずみ増分の関係を表す構成式 $[D^P]$ は次のようになる。

$$[D^P] = [D^e] - \frac{[D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e]}{H' + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}} \quad \dots\dots (2.12)$$

ここに、 $[D^e]$: 弾性時の応力ひずみマトリックス

H' : ひずみ硬化率

e. コンクリートの応力—ひずみ関係

コンクリートの応力—ひずみ関係はトリリニアを仮定し、各状態は図2.6のように表示される。

なお、コンクリートの圧縮破壊は要素の主ひずみが圧縮破壊ひずみをこえた場合に生じるものとし、圧縮破壊後は要素の応力負担を0にする。

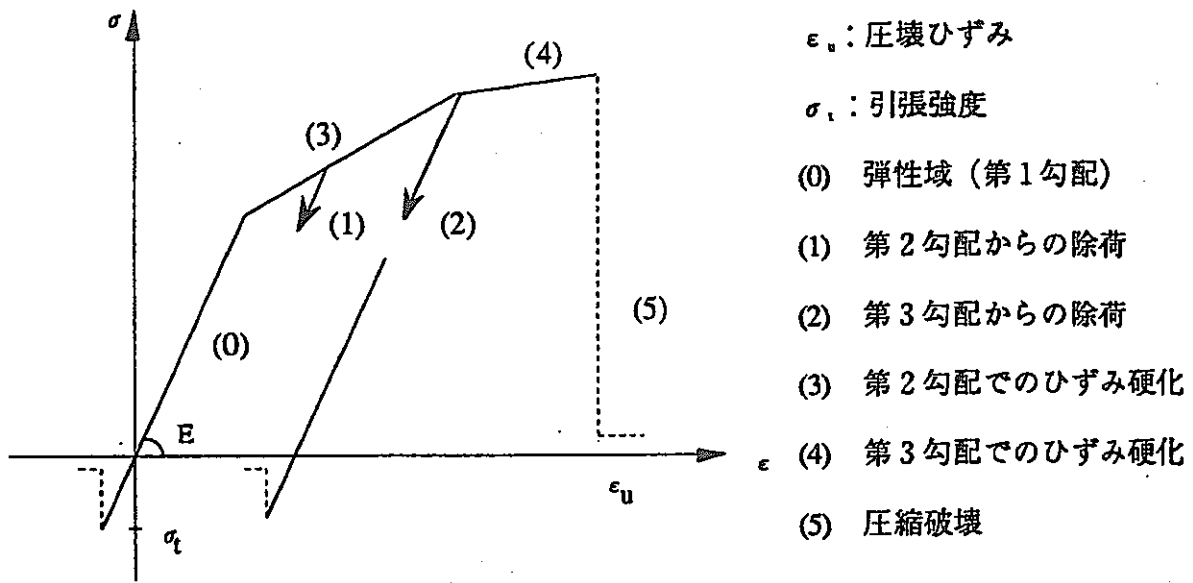


図2.6 コンクリートの応力—ひずみ関係

3) 鉄筋の材料特性

鉄筋要素は、図2.7に示すように等価な厚みを持つ一様な板として取り扱う。

剛性は軸方向のみ考え、応力—ひずみ関係は図2.8に示すように、バイリニア型と仮定する。

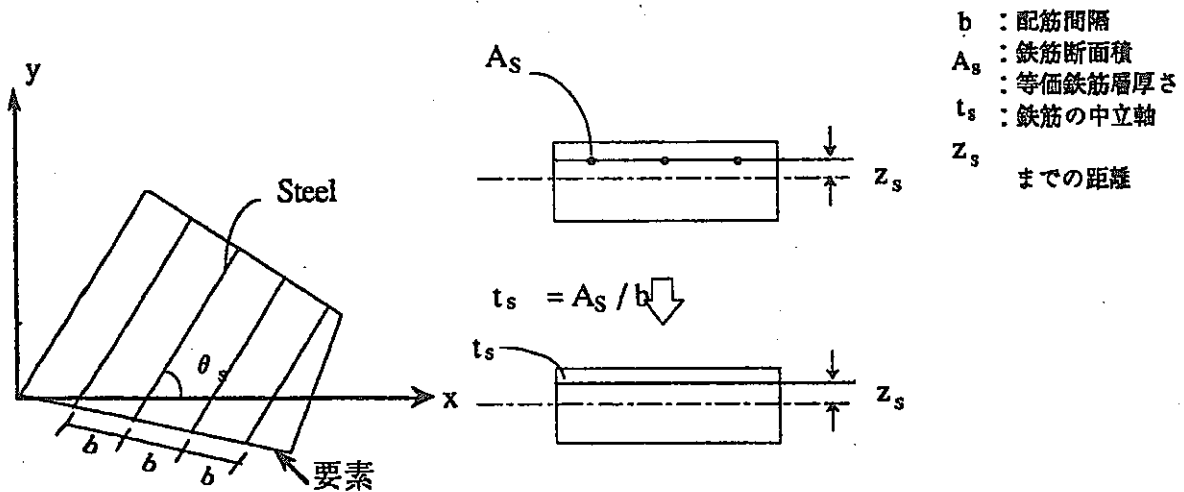


図2.7 鉄筋要素

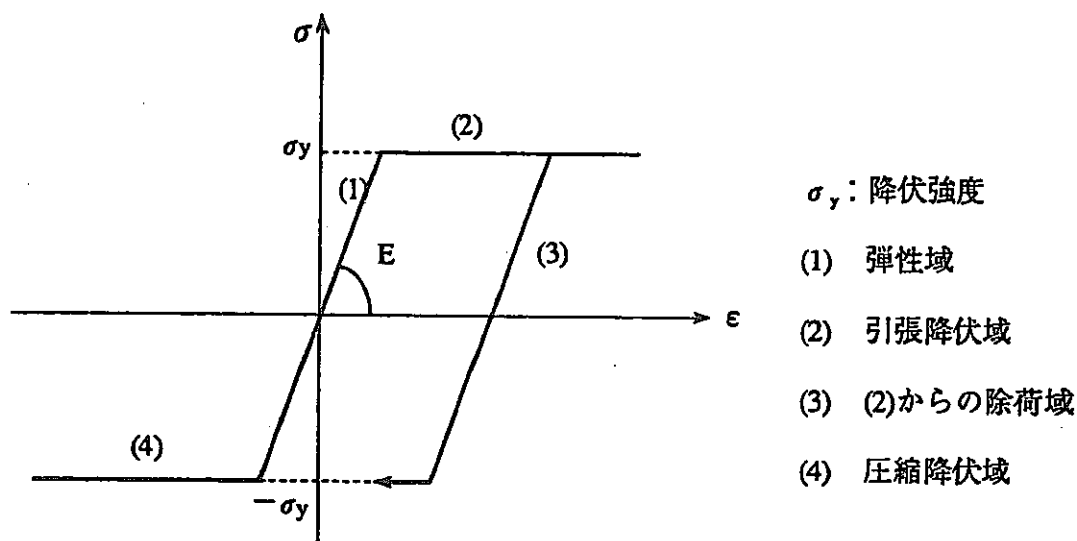
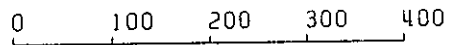
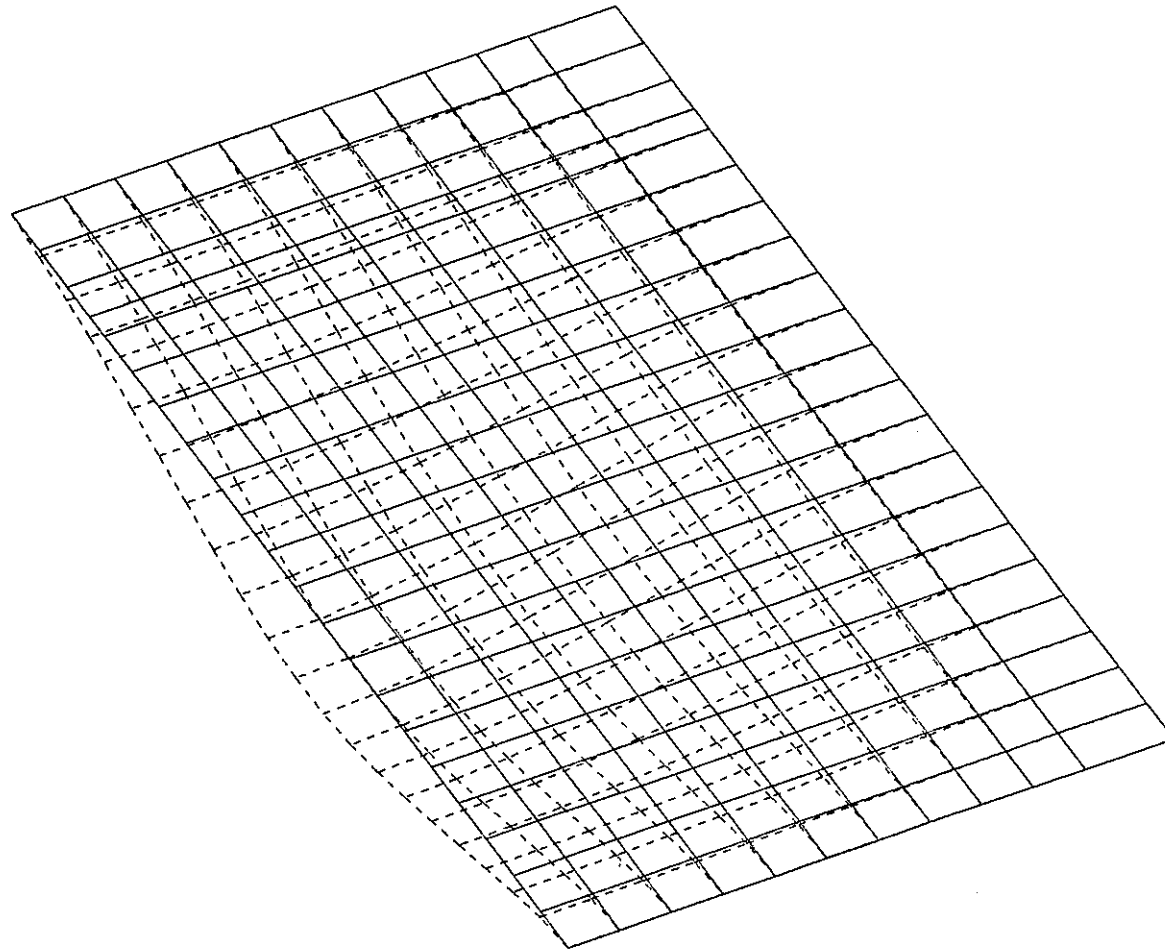


図2.8 鉄筋の応力—ひずみ関係

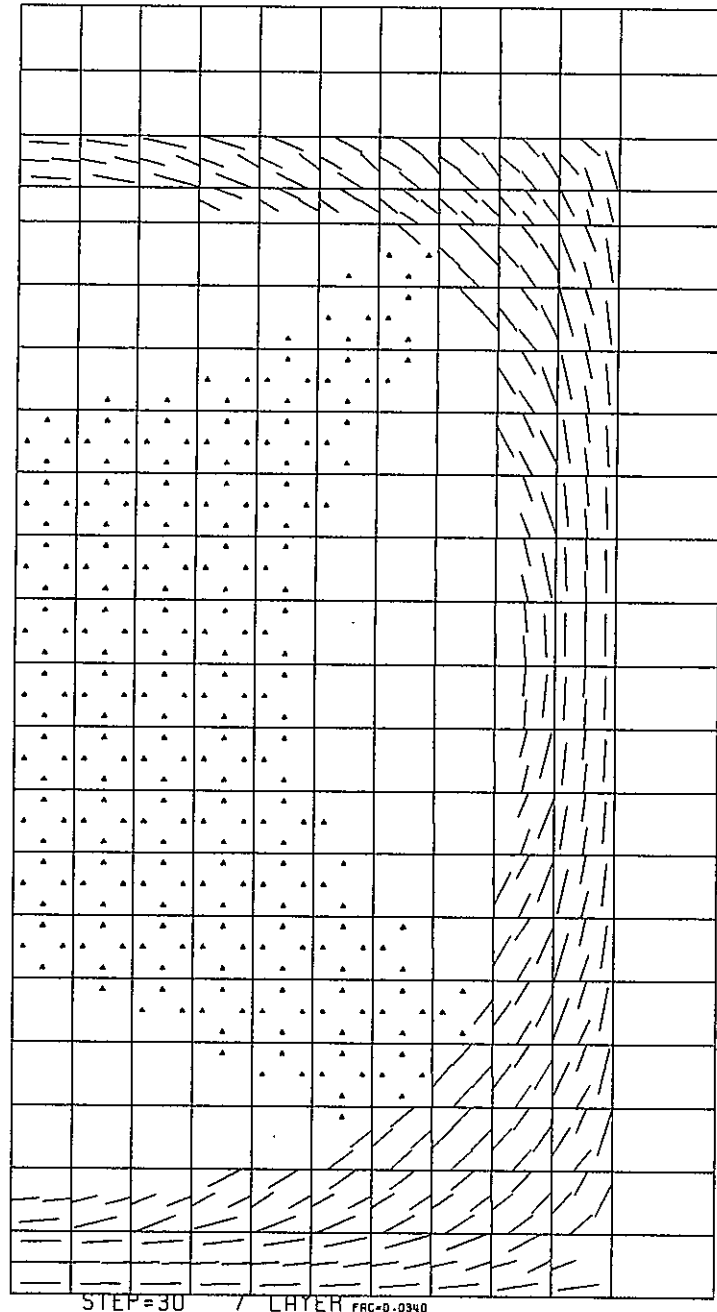


A236 W-1

付図-1.1 A236-壁W-1；変形図

ケース名称
A236 W-1

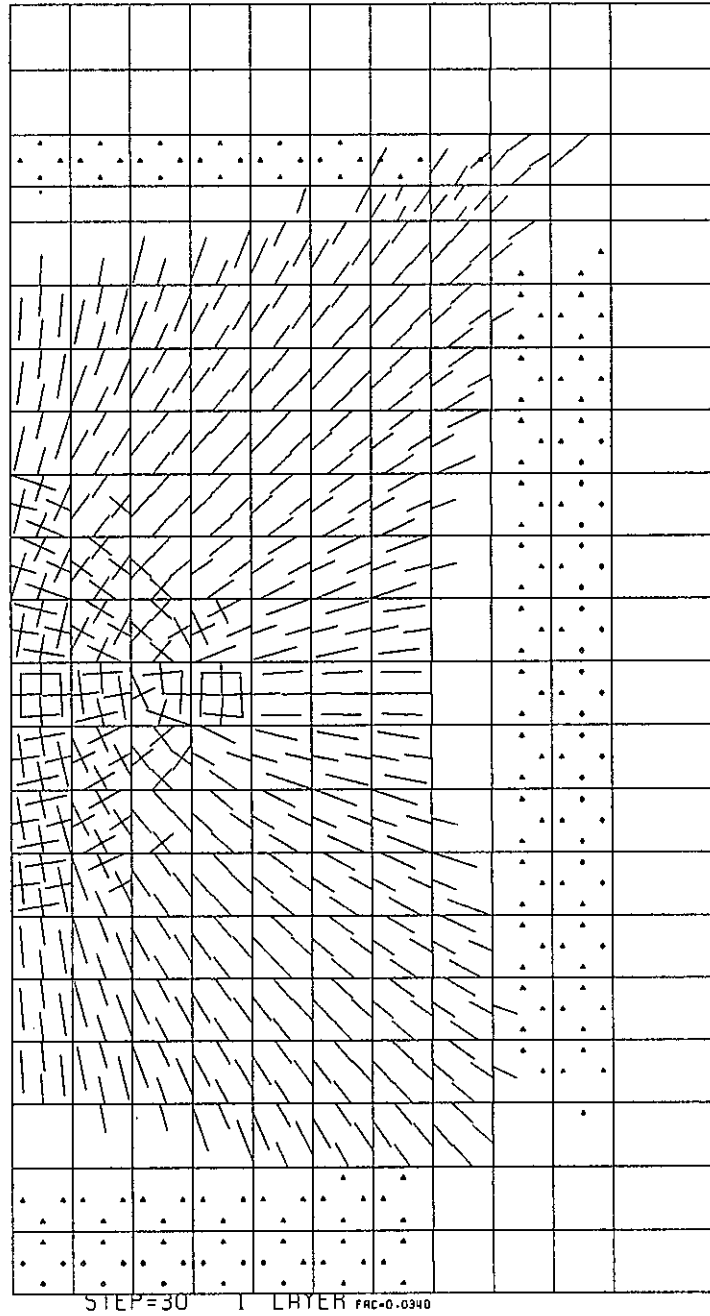
30



付図-1.2 A236-壁W-1；破壊状況図（表面）

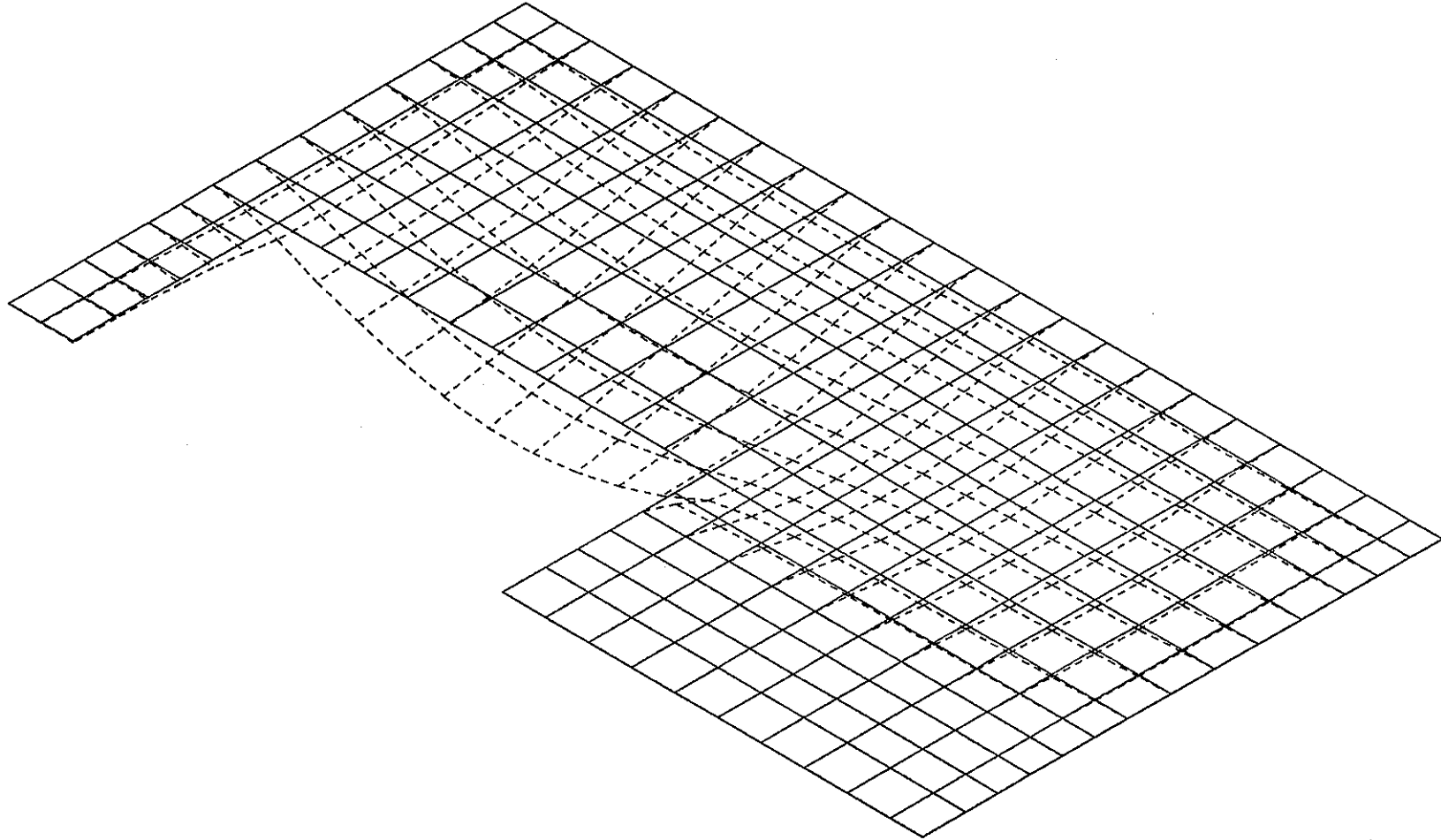
A236 W-1

A236 W-1



付図-1.3 A236-壁W-1；破壊状況図（裏面）

変形図



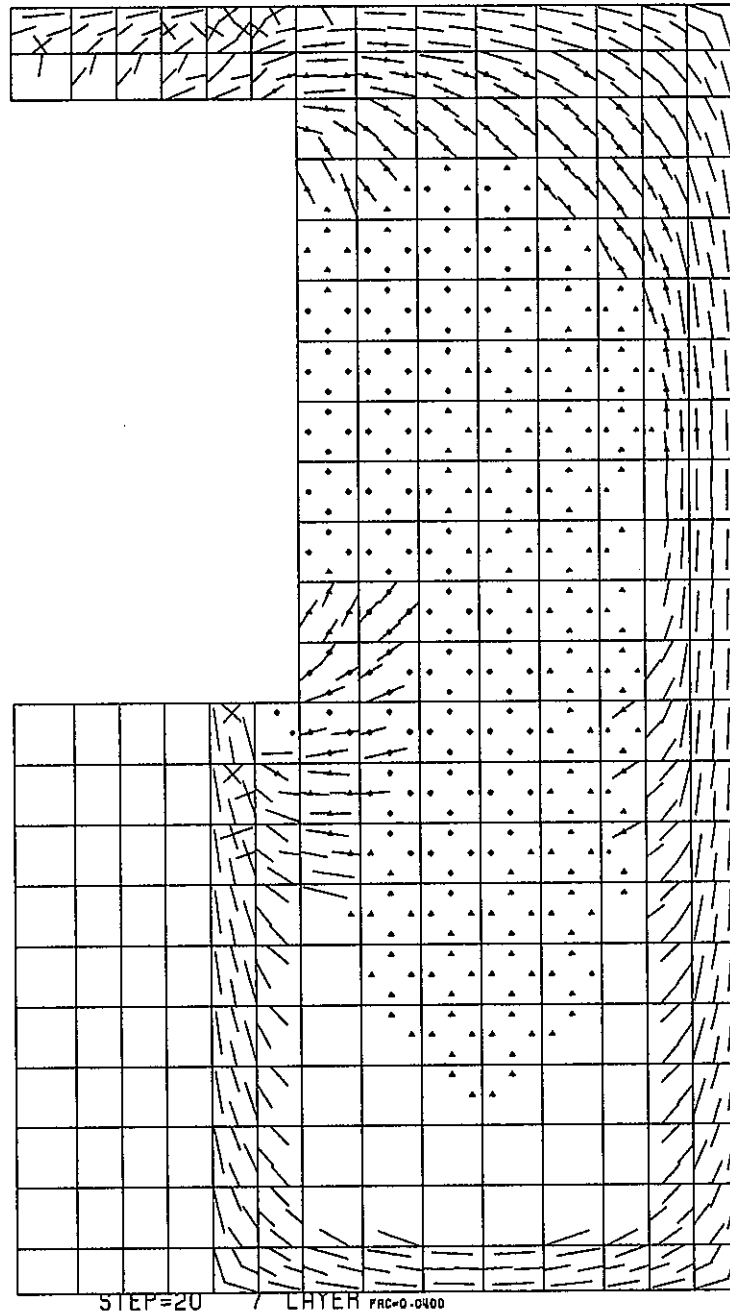
-70-

0 50 100 150

DONEN R152T

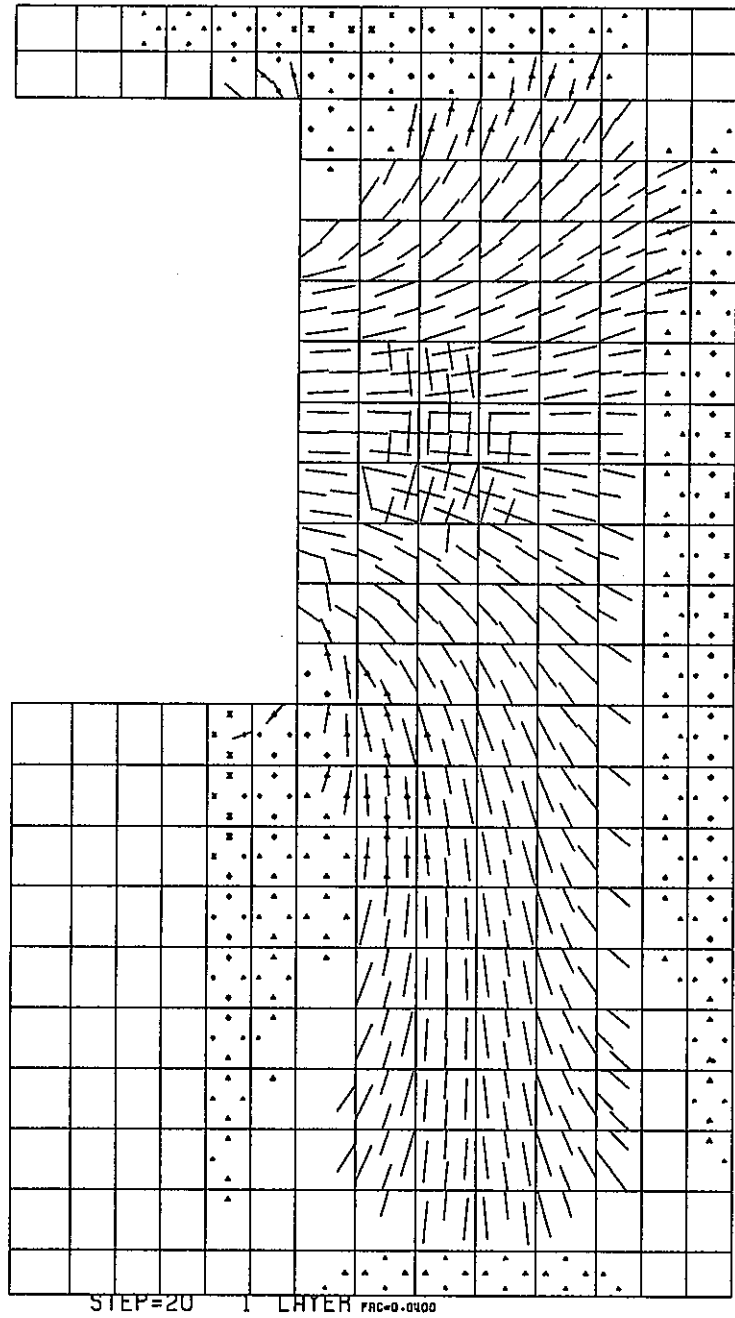
付図-2.1 R152-壁W；変形図

ケース名称 20
R152T



付図-2.2 R152-壁W；破壊状況図（表面）

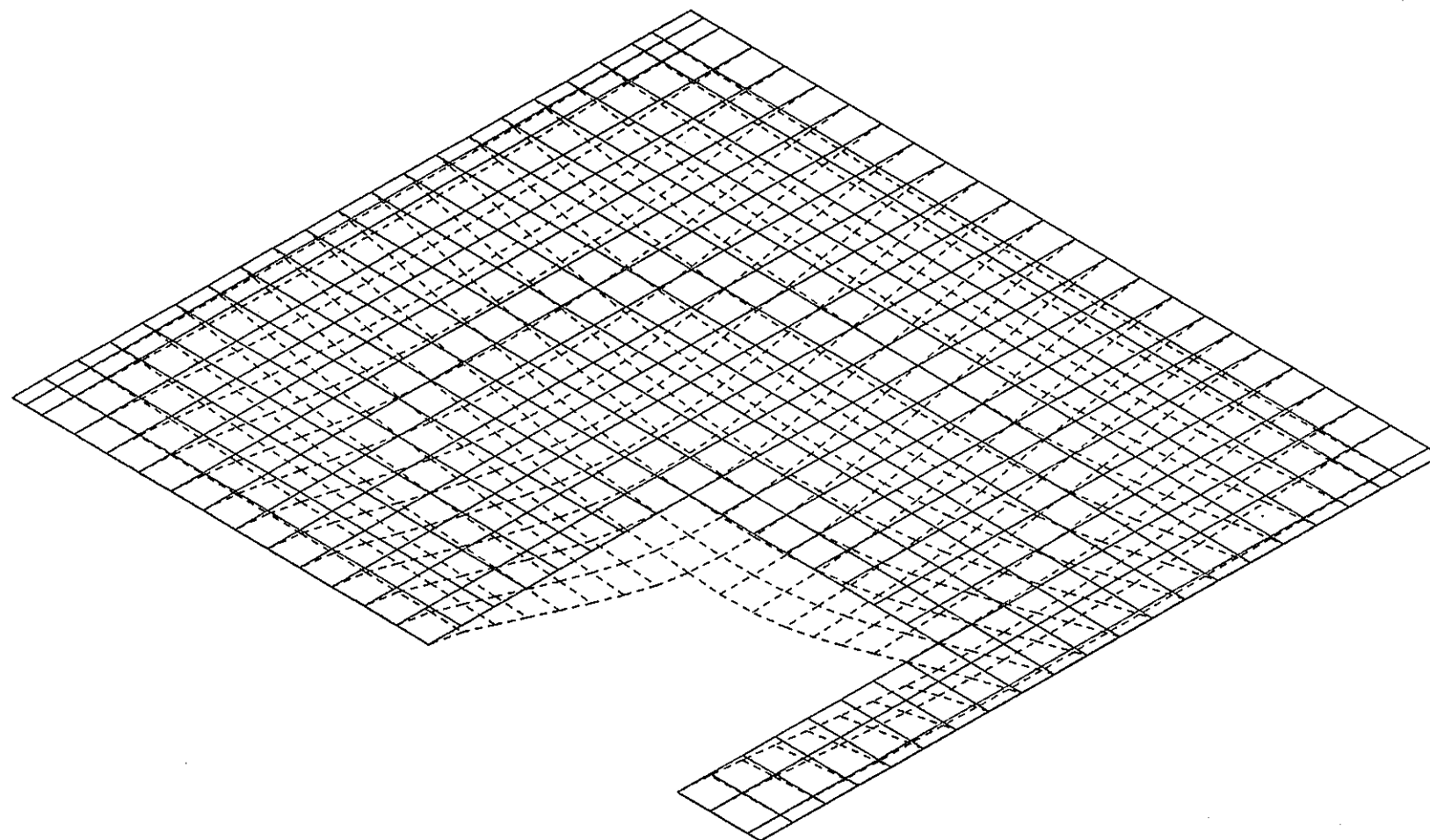
R152T



付図-2.3 R152-壁W；破壊状況図（裏面）

R152T

変形図



- 73 -

0 100200300400500600700

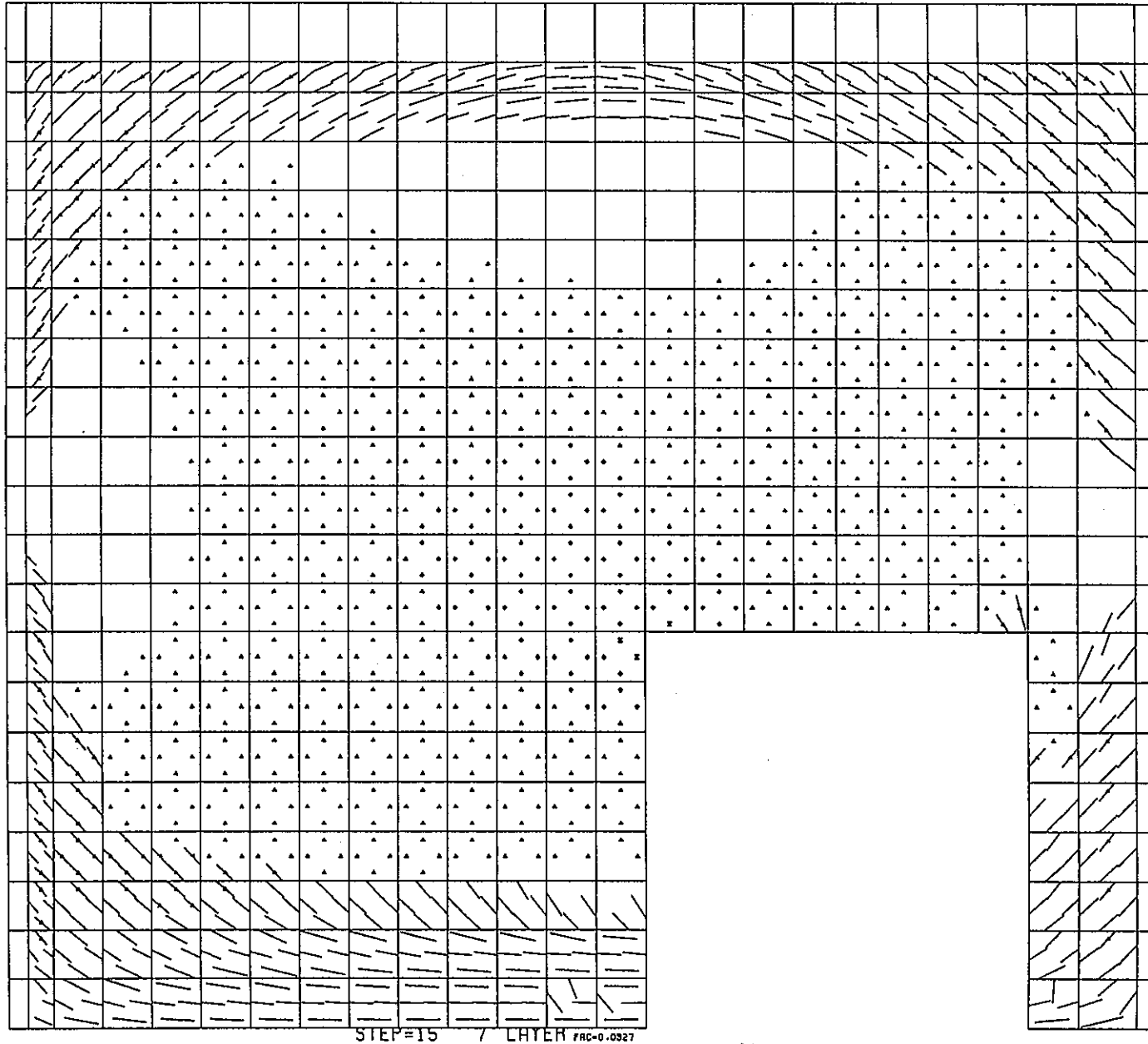
DONEN R236E1

付図-3.1 A236-壁 E-1 ; 変形図

ケース名称
A236

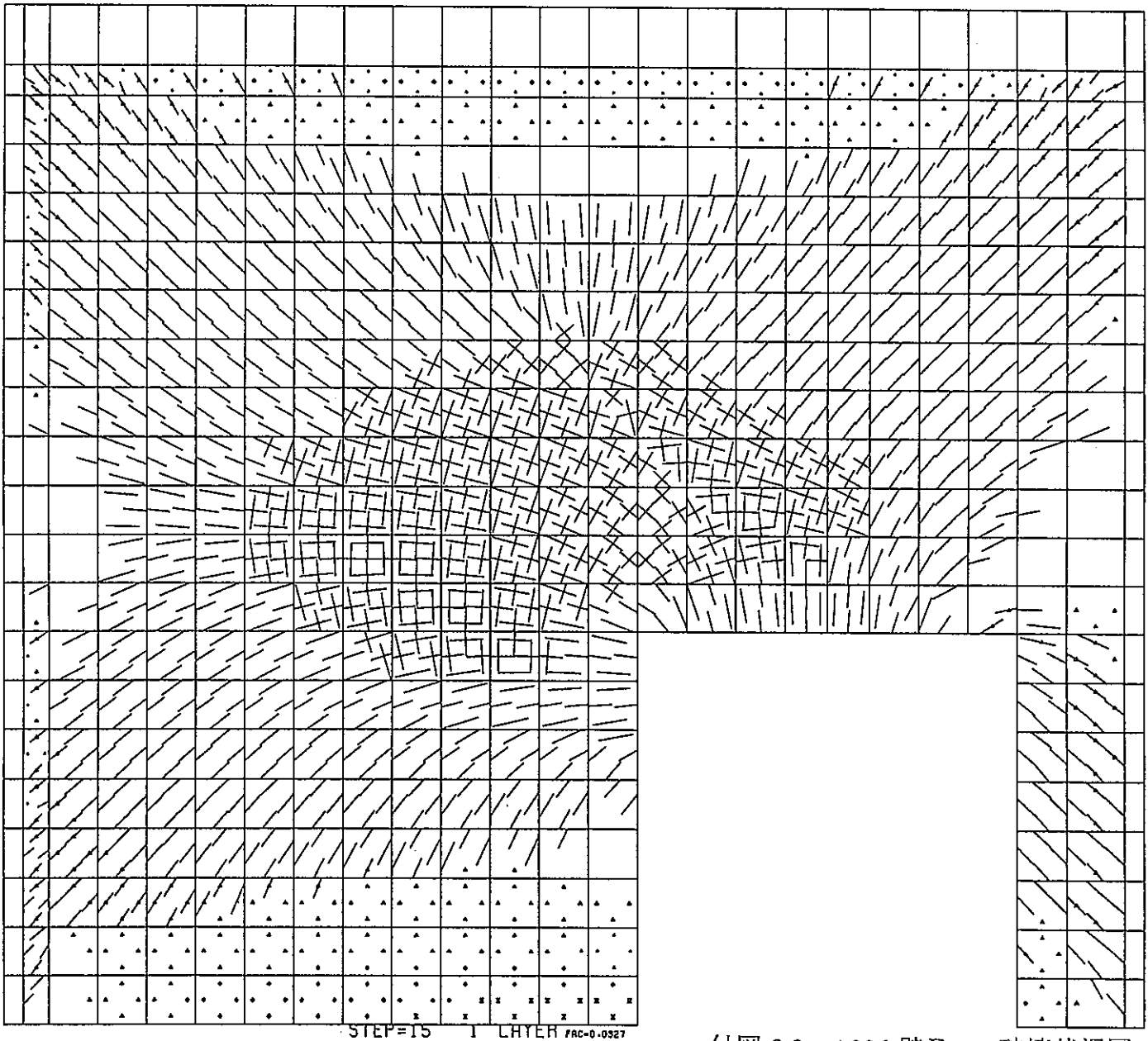
15

A236E1



STEP=15 / LAYER FRC=0.0927

付図-3.2 A236-壁 E-1 ; 破壊状況図 (表面)



R236E1

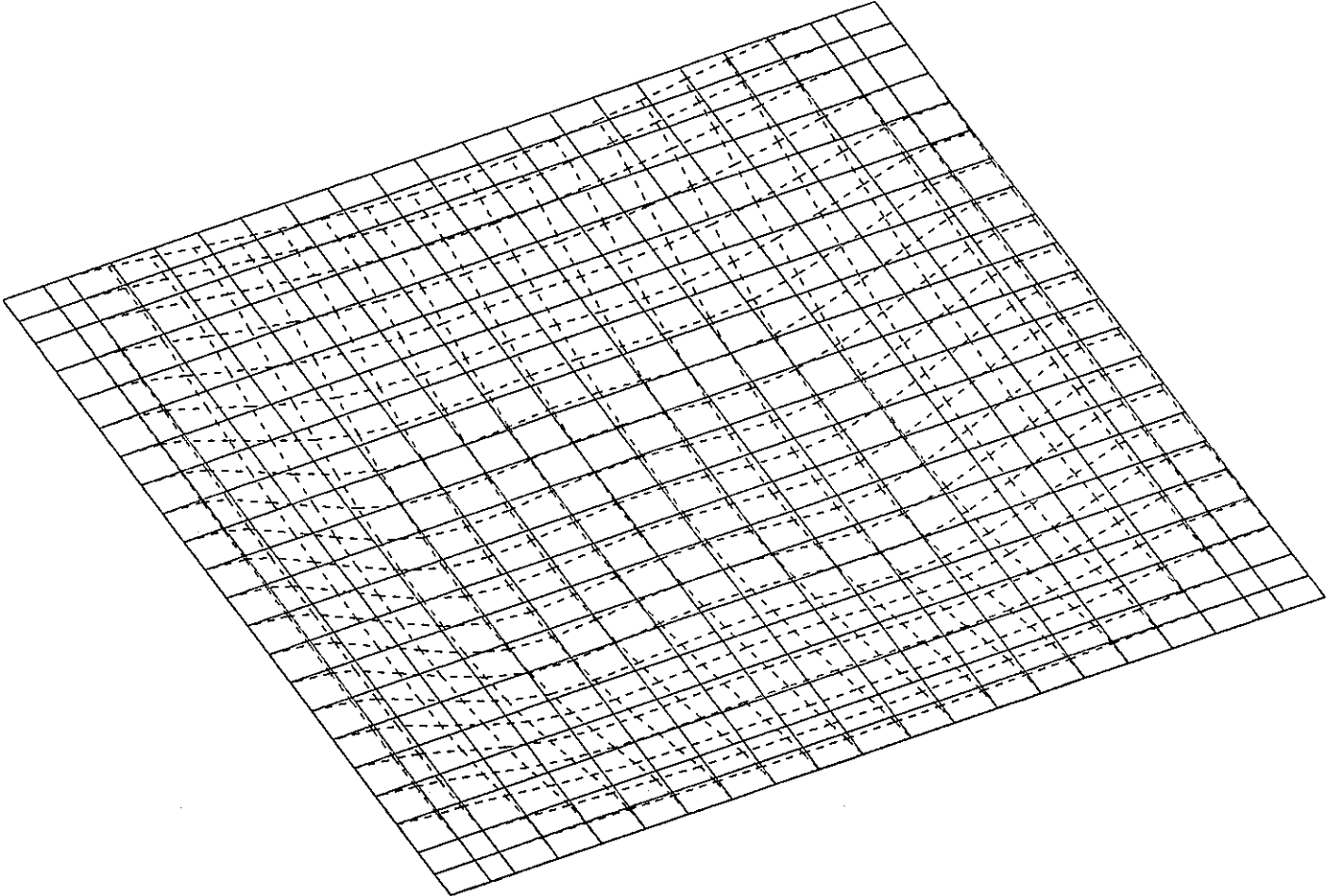
STEP=15 1 LAYER FRC=0.0927

付図-3.3 A236-壁E-1；破壊状況図（裏面）

変形図

単位 : cm

PNC T18100 97-001



- 76 -

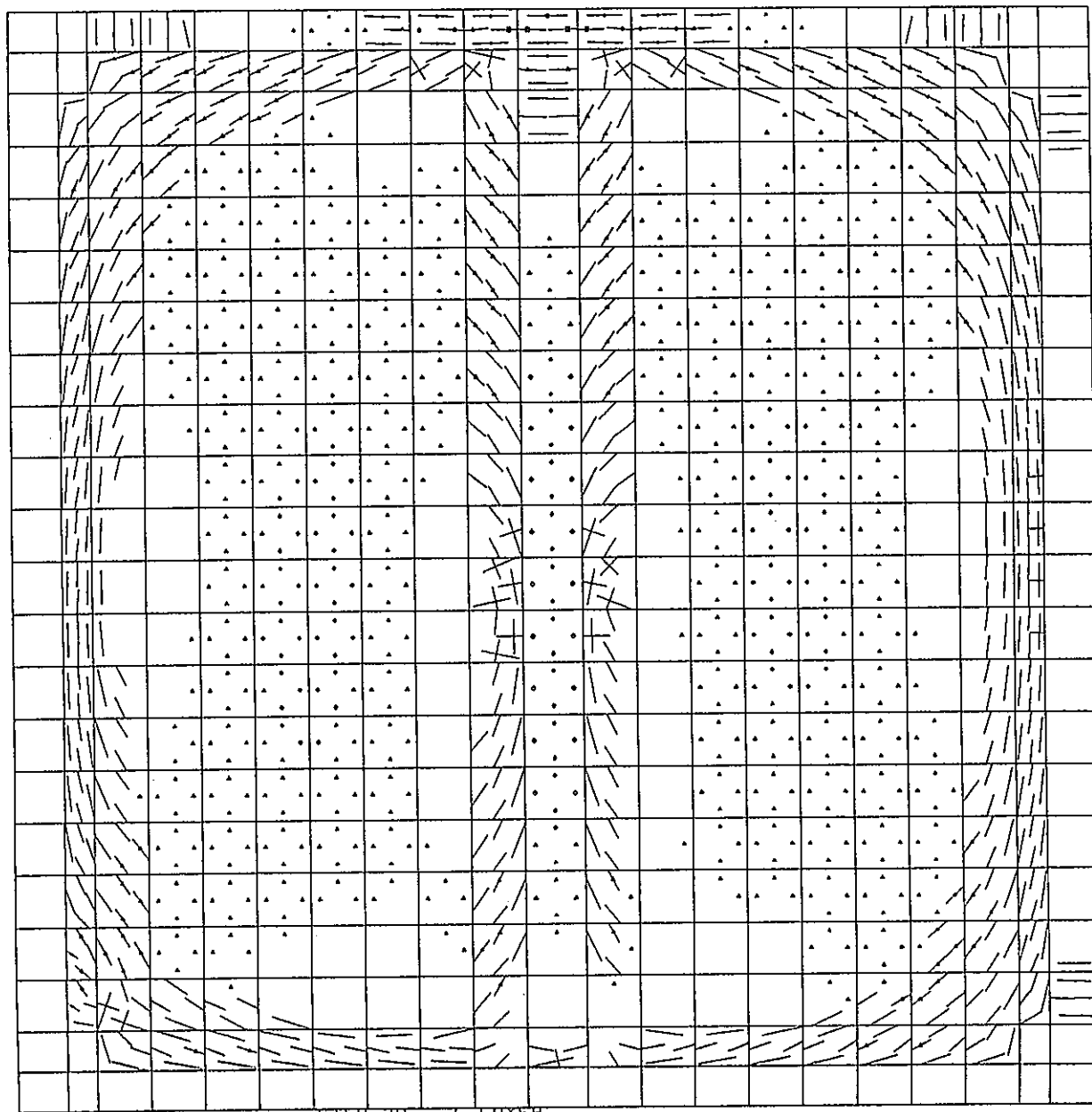
0 100 200 300 400

A236 T-1

付図-4.1 A236-天井-1 ; 変形図

ケース名称
A236 T-1

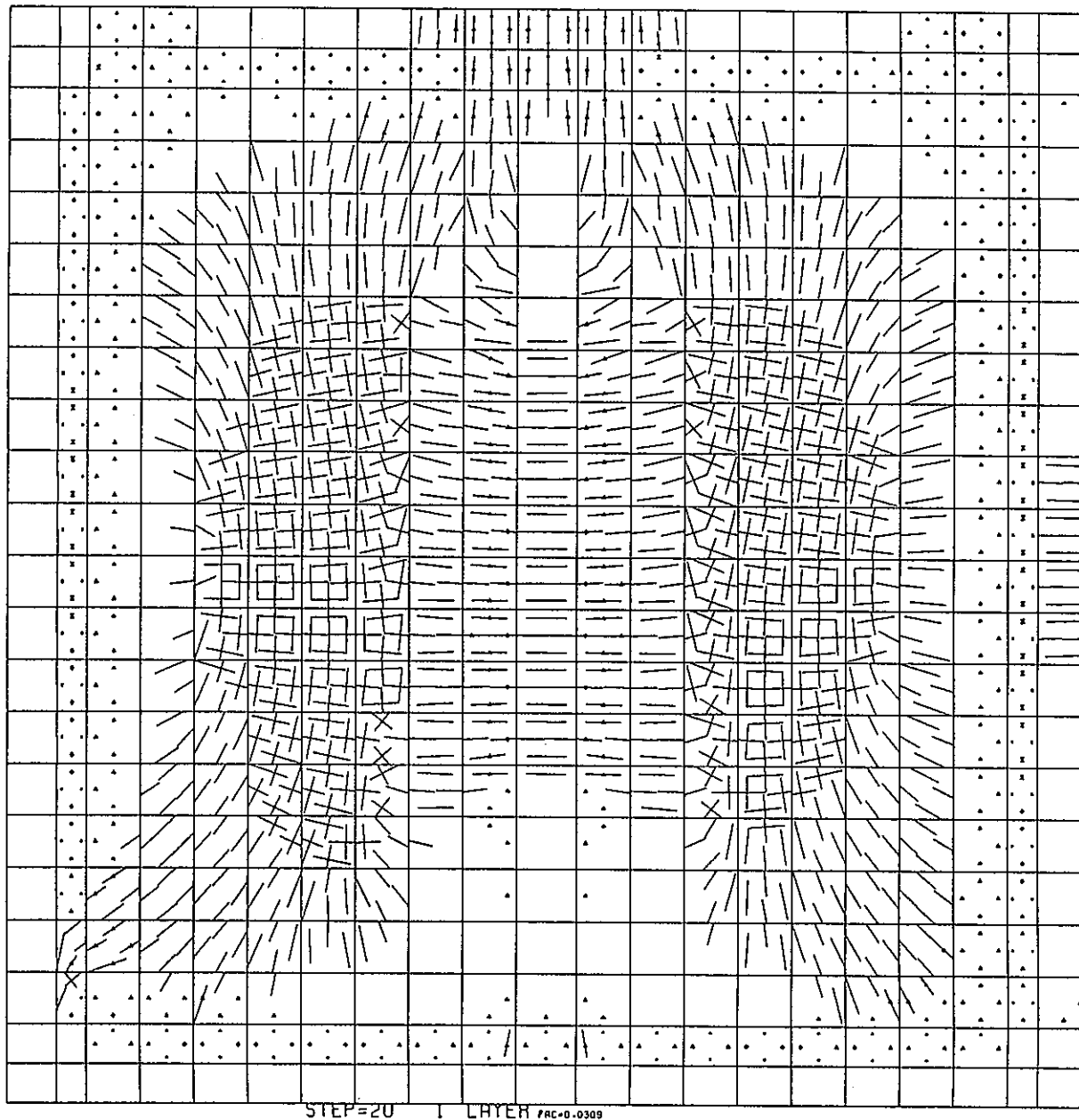
20



STEP=20 / LHYER FRC=0.0309

付図-4.2 A236-天井-1；破壊状況図（表面）

A236 T-1



A236 T-1

STEP=20 1 LAYER FRC=0.0309

付図-4.3 A236-天井-1；破壊状況図（裏面）