

### 3. 3 落橋防止装置・ノックオフ構造ワーキンググループの研究成果

#### (1) 活動方針

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、落橋防止装置においても多くの破損がみられた。このため、震災後に通知された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」(平成7年2月)や「道路橋示方書・同解説V編」(平成8年12月)では、落橋防止装置の規定が大きく改訂され、衝撃的な地震力を緩和できる構造とすることが新たに規定された。

本ワーキンググループでは、このことに着目し、震災以降の落橋防止構造について事例調査をするとともに、緩衝材について実験的研究を行うこととした。

現在、緩衝材としてはゴムが多く用いられているが、ゴムの緩衝効果について疑問視する意見がある。また落橋防止装置の大きさが、ゴムの支圧応力度により決定され、落橋防止装置の設置に苦勞することが多くある。そこで、本ワーキンググループでは、ゴムの緩衝効果を実験により検証し、またゴムに変わる緩衝材として、鋼材を使用した緩衝材を提案し、実験によりその実用性・有効性を検討することとした。

## (2) 落橋防止装置の事例調査

### (a) 調査概要

震災以後に用いられてきた落橋防止装置の事例調査を実施して調査表に整理すると共に、タイプ別にそれらの特徴をまとめる。

### (b) 落橋防止装置の分類

落橋防止装置を以下のタイプに分類する。

#### ①PCケーブルタイプ

上下部工間または上部工間をPCケーブルまたは、PC鋼棒にて連結する落橋防止装置

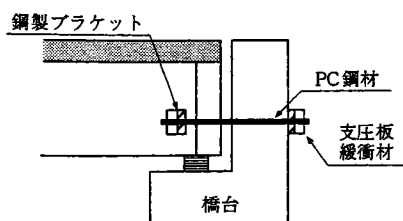


図-3.3.1 PCケーブルタイプの例

#### ②アンカーバータイプ

上下部工間に鋼棒（アンカーバー）を設置する落橋防止装置

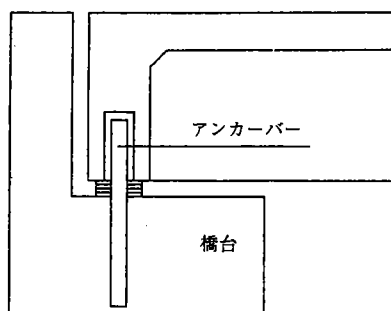


図-3.3.2 アンカーバータイプの例

#### ③鋼製ブロックタイプ

上下部工間に鋼製ブロックまたは、鋼製ブラケットを設置する落橋防止装置

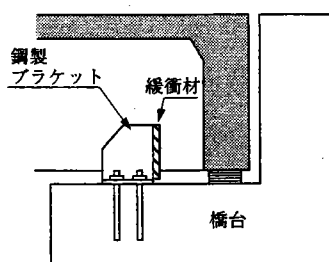


図-3.3.3 鋼製ブロックタイプの例

#### ④コンクリートブロックタイプ

下部工にコンクリートブロックを設置する落橋防止装置

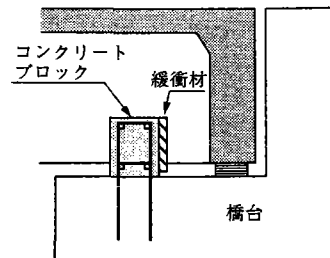


図-3.3.4 コンクリートブロックタイプの例

#### (c) 調査項目

以下の項目について調査し、調査表にまとめる。

- |         |          |
|---------|----------|
| ① 形式    | ② 材料     |
| ③ 設置位置  | ④ 構造     |
| ⑤ 使用目的  | ⑥ 作用する方向 |
| ⑦ 死荷重   | ⑧ 設計荷重   |
| ⑨ 移動可能量 | ⑩ 設置スペース |
| ⑪ 橋梁形式  | ⑫ 新設・既設別 |
| ⑬ コスト   | ⑭ 支承条件   |
| ⑮ 設計基準  | ⑯ その他    |

#### (d) 調査結果

表3.3.1～表3.3.13に調査表を示す。また、表3.3.14には、各タイプ別の特徴を示す。

この表より、各落橋防止装置にはそれぞれ特徴があり、橋梁の規模や構造的性によって選定されていることが分かる。また、落橋防止装置を選定する場合は、経済性だけでなく、施工性や維持管理などにも考慮して決定する必要があるといえる。

表-3.3.1 落橋防止装置の事例調査(その1)

形式	連結
材料	PCケーブル
設置位置	上部工・下部工間
構造	<p>2-PL 720 x 9 x 880                  2-PL 480 x 22 x 360                  4-PL 480 x 22 x 314                  4-PL 464 x 22 x 214                  4-PL 225 x 22 x 464                  2-PL 480 x 22 x 464                  18-WTR 100 x 110 (S107)                  24-WTR 100 x 65 (S107)</p>
使用目的(システム)	落橋防止
機能させる方向	橋軸方向
設計荷重	35.4tf/ヶ所
設計移動可能量	± ? mm
設計スパン	2500mm x 490mm x 720mm
支承条件	F、F、M
適用橋梁形式	2径間連続ばん桁
新設・既設	新設
コスト	やや高価
その他	道路橋示方書・同解説(平成8年12月)

表-3. 3. 2 落橋防止装置の事例調査 (その2)

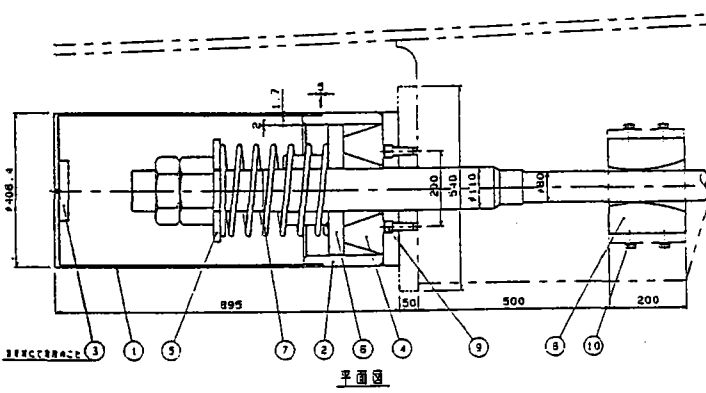
形 式	連 結
材 料	P C ケーブル
設置位置	上部工相互
構 造	
使用目的	落橋防止
作用する方向	橋軸方向
死 荷 重	387.7 t f
設計荷重	193.9 t f (2個使用)
移動可能量	320 mm (支承の全移動可能量+10)
設置スペース	φ350×900 (片側)
適用橋梁形式	鋼3径間連続下路トラス
新設・既設	新 設
コ ス ト	やや高価
支承条件	固定・可動支承 (ピボット、ピボット・ローラー支承) 可動側
設計基準	復旧仕様 H 7. 6
そ の 他	掛け違い部のみ、橋台部は縁端拡幅

表-3.3.3 落橋防止装置の事例調査 (その3)

形 式	連 結
材 料	P C ケーブル
設置位置	上部工、下部工 (橋台) 間
構 造	
使用目的	落橋防止
作用する方向	橋軸方向
死 荷 重	720tf (Rd/4=180)
設計荷重	270tf (4個使用)
移動可能量	600mm (ゴム支承の250%変形時移動量)
設置スペース	450×450×1600 (桁側)、450×450×500 (橋台側)
適用橋梁形式	P C 4 径間連続箱桁
新設・既設	新 設
コ ス ト	やや高価
支承条件	免震支承 (ゴム支承)
設計基準	道路橋示方書 H 8. 1 2
そ の 他	

表-3.3.4 落橋防止装置の事例調査 (その4)

形式	連結	
材料	PCケーブル	
設置位置	上部工-上部工	下部工-上部工
構造		
使用目的	落橋防止	
機能させる方向	橋軸	
設計荷重	30.2tf 隣接橋の全反力より決定	54.0tf 隣接橋の全反力より決定
移動可能量	70mm	60mm
設置スペース	400×300×2950 (L)	1000×1000×2250 (L)
支承条件	M (ゴム支承)	M (ゴム支承)
橋梁形式	鋼4径間連続非合成箱桁 (MFFFM)	
新設・既設	新設	
コスト	やや高価	
設計基準	I II III IV (H6), V (H2), 復旧仕様	
その他		

表-3.3.5 落橋防止装置の事例調査 (その5)

形式	アンカーバー
材料	鋼棒
設置位置	上部工、下部工間
構造	
使用目的	落橋防止
作用する方向	橋軸、橋軸直角方向
死荷重	353 t f
設計荷重	353 t f (5セット分)
移動可能量	200 mm (橋軸方向、温度又は地震)、4 mm (橋軸直角方向)
設置スペース	橋軸×直角×高さ = 410× 210× 2220 (上部+下部、1セット)
適用橋梁形式	鋼6径間連続非合成鈹桁
新設・既設	新 設
コスト	安 価
支承条件	水平力分散支承 (ゴム支承)
設計基準	復旧仕様H7.6
その他	端支点にコンクリート充填



表-3. 3. 6 落橋防止装置の事例調査 (その6)

形 式	アンカーバー
材 料	鋼棒
設置位置	上部工、下部工間
構 造	
使用目的	落橋防止
作用する方向	橋軸、橋軸直角方向
死 荷 重	? t f
設計荷重	25 t f (1セット)
移動可能量	320 mm (橋軸方向)、4 mm (橋軸直角方向)
設置スペース	橋軸×直角×高さ=400×80×1200 (上部+下部)
適用橋梁形式	コンクリート橋
新設・既設	新 設
コ ス ト	安 価
支承条件	水平力分散支承 (ゴム支承)
設計基準	復旧仕様H7. 6
そ の 他	

表-3. 3. 7 落橋防止装置の事例調査 (その7)

形 式	突 起
材 料	鋼製ブロック
設置位置	上部工、下部工間
構 造	
使用目的	落橋防止
作用する方向	橋軸方向
死 荷 重	1960.8tf
設計荷重	326.8tf (6個使用)
移動可能量	100mm
設置スペース	橋軸×直角×高さ=1800×1800×820
適用橋梁形式	ニールセンローゼ橋
新設・既設	新 設
コ ス ト	高 価
支承条件	固定・可動支承 (ゴム支承)
設計基準	復旧仕様H7.6
そ の 他	

表-3.3.8 落橋防止装置の事例調査(その8)

形式	突起
材料	鋼製ブロック
設置位置	上部工、下部工間
構造	
使用目的	落橋防止
作用する方向	橋軸、橋軸直角方向
死荷重	265 t f
設計荷重	397.5 t f
移動可能量	320 mm (橋軸方向、保耐時変位)、20 mm (橋軸直角方向)
設置スペース	橋軸×直角×高さ=1400×1850×470
適用橋梁形式	PC3径間ラーメン橋
新設・既設	高価
コスト	???
支承条件	中間剛結、端支点可動支承(ゴム支承)
設計基準	道路橋示方書H8.12
その他	

表-3.3.9 落橋防止装置の事例調査 (その9)

形 式	突 起
材 料	鋼製ブロック
設置位置	上部工、下部工間
構 造	
使用目的	落橋防止
作用する方向	橋軸、橋軸直角方向
死 荷 重	1 2 6 t f
設計荷重	1 2 6 t f
移動可能量	2 5 0 mm (橋軸方向、震度法時)、4 0 mm (橋軸直角方向)
設置スペース	橋軸×直角×高さ = 9 6 0 × 7 6 0 × 3 4 4
適用橋梁形式	鋼 3 径間連続鉄桁
新設・既設	新 設
コ ス ト	高 価
支承条件	水平力分散支承 (ゴム支承)
設計基準	復旧仕様 H 7 . 6
そ の 他	

表-3.3.10 落橋防止装置の事例調査 (その10)

形式	突起
材料	鋼製ブラケット
設置位置	上部・下部工間
構造	
使用目的	落橋防止
作用する方向	橋軸方向
設計荷重	支承反力42.2ton×5主桁
移動可能量	80~100mm (緩衝材含む)
設置スペース	橋軸×直角×高さ=650×300×444
適用橋梁形式	鈹桁
新設・既設	新設
コスト	安価
支承条件	固定・可動支承
設計基準	復旧仕様H7.6
その他	

表-3.3.11 落橋防止装置の事例調査 (その11)

形式	突起	
材料	鋼製ブロッカー-鋼製ブロック	
設置位置	下部工-上部工	
構造		
使用目的	落橋防止	
機能させる方向	橋軸	
設計荷重	159.1tf 中間橋脚が比較的高く、この支承部に荷重が集中するため、地震時の橋軸水平力を使用	12.8tf
移動可能量	80mm =0+(70~80)	150mm =温度変化分+(70~80)
設置スペース	1300 (D) × 520 (H) × 3000 (W)	1300 (D) × 540 (H) × 3000 (W)
支承条件	F (ゴム支承)	M (ゴム支承)
橋梁形式	鋼3径間連続プレートガーダー(FFFM)	
新設・既設	新設	
コスト	高価	
設計基準	I II III IV (H6), V (H2), 復旧仕様	
その他	PCケーブルと併用	

表-3.3.12 落橋防止装置の事例調査(その12)

形式	突起
材料	コンクリートブロック
設置位置	下部工
構造	
使用目的(システム)	落橋防止
機能させる方向	橋軸方向
設計荷重	138tf
設計移動可能量	±150mm
設計スパン	550mm × 435mm × 1980mm
支承条件	M、M、F、M
適用橋梁形式	鋼3径間連続非合成曲線箱桁
新設・既設	新設
コスト	安価
その他	復旧仕様H7.6

表-3.3.13 落橋防止装置の事例調査 (その13)

形式	突起	
材料	コンクリートブロック-鋼製ブロック	
設置位置	下部工-上部工	
構造		
使用目的	落橋防止	
機能させる方向	橋軸・橋軸直角	
設計荷重	120.8tf 隣接橋の全反力より決定	107.9tf 隣接橋の全反力より決定
移動可能量	橋軸：70mm 橋直：150mmくらい	橋軸：60mm 橋直：150mmくらい
設置スペース	980 (D) × 800 (H) × 2000 (W)	980 (D) × 700 (H) × 1500 (W)
支承条件	M (ゴム支承)	M (ゴム支承)
橋梁形式	鋼4径間連続非合成箱桁 (MFFFM)	
新設・既設	新設	
コスト	安価	
設計基準	I II III IV (H6), V (H2), 復旧仕様	
その他		



表-3. 3. 14 落橋防止タイプ別の特徴

		PCケーブルタイプ	アンカーバータイプ	鋼製ブロックタイプ	コンクリートブロックタイプ
荷重方向	橋軸	作用	作用	作用	作用
	直角	追従のみ	作用可能	作用可能	作用可能
	浮上り	追従のみ	作用しない	作用しない	作用しない
分担可能荷重 (1個当たり)		ケーブル径により限界あり	鋼棒の径により限界あり	大きい荷重にも対応可	大きい荷重にも対応可
設置スペース		小さい	普通	大きい (緩衝材により決定)	大きい (緩衝材により決定)
景観性		ケーブルが露出するため あまり良くない	良い	普通	普通
コスト		やや高価	普通	高価	安価
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>腹板に取り付ける場合は、左右対称とする。(偏心に注意)</li> <li>移動量が大きい場合はケーブルのたわみに注意する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>交換は困難である。</li> <li>横桁をコンクリートで巻き立て設置する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>剛性の大きい横桁が必要となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工順序に注意する。</li> </ul>

### (3) ノックオフ構造の事例調査

#### (a) 調査概要

兵庫県南部地震以降、橋の耐震設計は、このような大規模地震に対しても限定された損傷にとどめることが規定されている。大規模地震を想定して桁と橋台の遊間を大きくとると、伸縮装置が大型化し、設計が不可能になったり、非常に不経済になったりする。そこで桁遊間を小さくし、桁が橋台に衝突したとき、橋台の一部が裏込め地盤の方に滑動して桁と橋台に著しい損傷を与えないようにするノックオフ機能が研究されている。

ノックオフ機能をもたせた橋は、国内ではまだほとんど事例がないため、ここではノックオフ機能に関する文献を調査しまとめた。

#### (b) 調査結果

表-3. 3. 15 ノックオフ機能に関する文献一覧

著者	論文名	雑誌名(書名)	掲載頁	発行年
川島一彦 後藤洋三	道路橋の免震設計とノックオフ機能付き橋台の開発	土木施工 VOL32, NO.3	87 ～ 94	1991
川島一彦 他	道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究報告書(その3)	土木研究所共同研究報告書 75号	402 ～ 411	1992
菊地敏男 後藤洋三 黒岩正夫	ノックオフ機能付橋台の模型実験結果について	土木学会年次学術講演会講演概要集 第46回 第1部	1394 ～ 1395	1991
菊地敏男 樋口俊一 後藤洋三	免震橋用ノックオフ機能付橋台の設計法に関する研究	大林組技術研究所報	1 ～ 8	1993
菊地敏男 樋口俊一 後藤洋三	免震橋用ノックオフ装置の滑動時における破壊機構と最大反力簡易算定法の検討	土木学会論文集 No. 501	153 ～ 161	1994

#### (4) 落橋防止装置に関する実験および解析

##### (a) 目的

兵庫県南部地震以降、衝撃的な地震力を緩和するため、落橋防止構造に緩衝材が設置されるようになった。その緩衝材の材料としては、ゴムが多く用いられているが、その緩衝効果や極限状態での力学特性については必ずしも明確にされているとは言い難い。また実際に落橋防止装置を設計してみると、緩衝材の支圧応力度を満足させるために必要な大きさで落橋防止装置自体の大きさが決まってしまう場合がある。さらに、ゴム以外の材料を用いた緩衝材はほとんど使われていないのが現状である。そこで、実際の落橋防止装置に使われている緩衝ゴムまたはそれと同等のゴムを使って、静的载荷実験によりゴムの緩衝効果や力学特性を把握するとともに、断面形状の異なる型鋼を利用した4種類の鋼製緩衝材を用いて、ゴム製緩衝材と同様の実験を行い、ゴムの緩衝材と比較して鋼製緩衝材の有効性を検討する。更に、静的および衝撃载荷に対するFEM解析を行い、これらの緩衝材の力学特性が数値解析によりシュミレート出来ることを示す。鋼製緩衝部材を実橋へ適用した場合の設置イメージを図-3.3.5に示す。

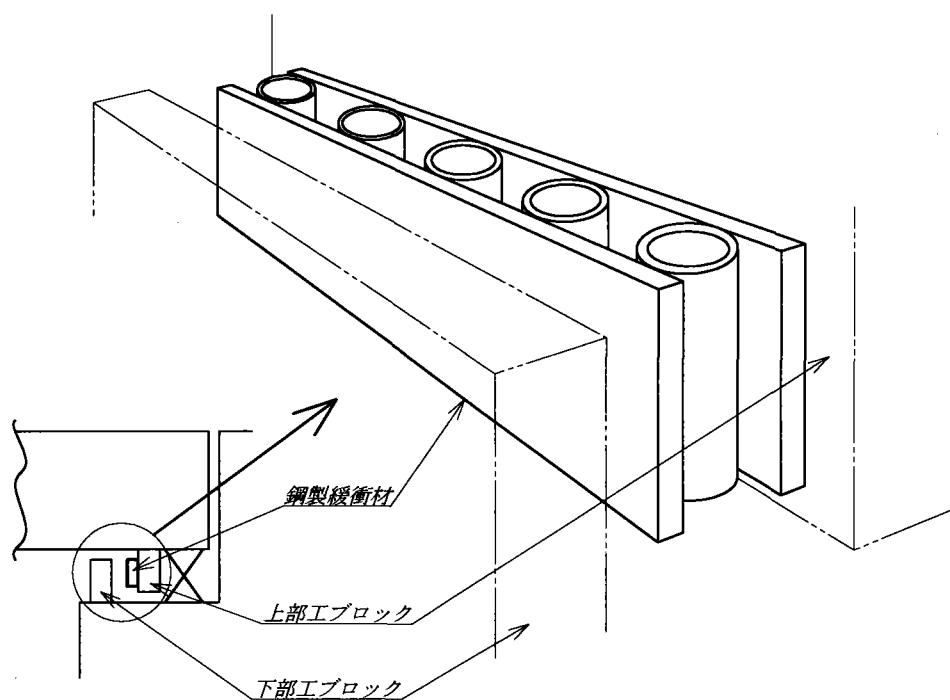


図-3.3.5 鋼製緩衝材設置イメージ図

(b) 実験

a) 実験の概要

実験にはゴム1種類(実験1)と鋼材4種類(実験2)の計5種類の試験体を用い、静的載荷実験をそれぞれ3シリーズ行い、荷重-変位関係を測定した。シリーズ名の一覧を表-3.3.16に示す。記録された荷重-変位関係からエネルギー吸収量を算出し、それぞれの試験体の緩衝効果を比較した。試験機の概要図および仕様を図-3.3.6に示す。

表-3.3.16 シリーズ名一覧

シリーズ番号	実験場所 (実験日)
シリーズ1	川口金属工業 (H11.1.19)
シリーズ2	川口金属工業 (H11.1.20)
シリーズ3	東京都立大学 (H11.1.14)

b) 試験体の種類

試験体はゴム1種類(タイプA)、鋼材4種類(タイプB~E)の計5種類とした。タイプAは、落橋防止の緩衝材として一般的に使われている材質および厚さのゴムとし、平面形状および寸法は試験機的能力を考慮して決めた。タイプB~Eは、材質をSS400相当とし、断面形状は市販の形鋼にあるもの、あるいは簡単に製作出来るような寸法形状とした。また、試験体のストローク(つぶし代)がゴムの厚みとほぼ同じとなるように寸法を決めた。試験体の種類および寸法形状を表-3.3.17に、試験体の製作図を図-3.3.7~図-3.3.10に示す。

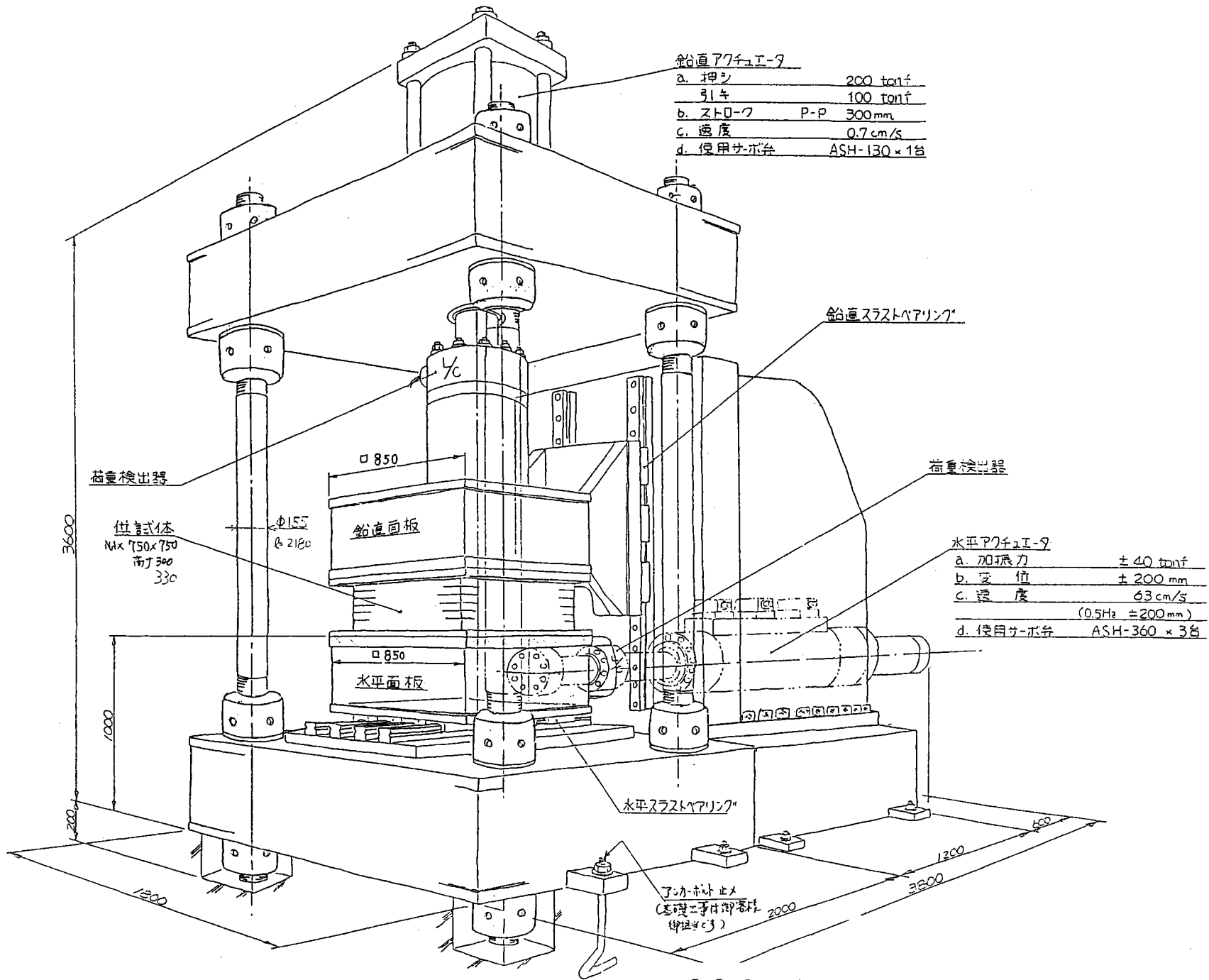


図-3.3.6 試験機概要図

表-3.3.17 試験体一覧表

試験体	寸法、形状	材質	試験個数
A		クロロプレ ンゴム 硬度55±5	3個
B		STKM13A	3個
C		STKR400	3個

試験体	寸法、形状	材質	試験個数
D		SS400 (L100x100x7)	3個
E		SS400 (L50x50x6)	3個

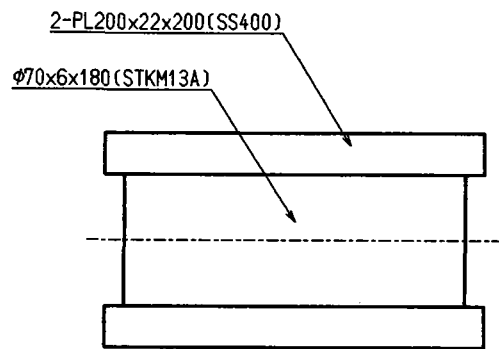
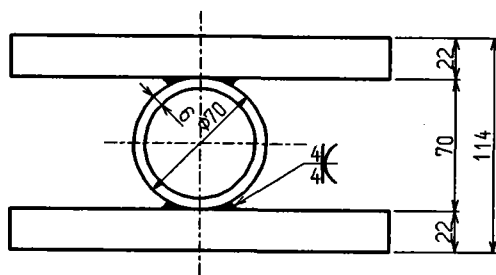
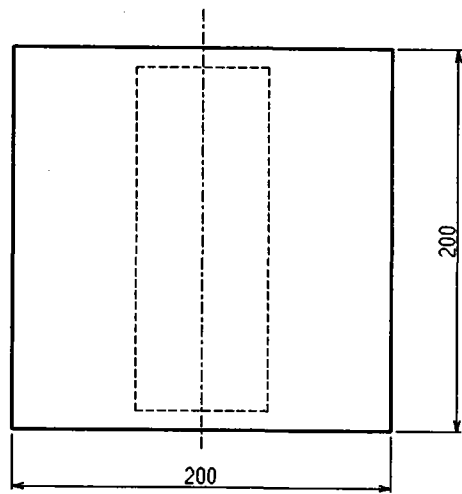


図-3.3.7 タイプB製作図

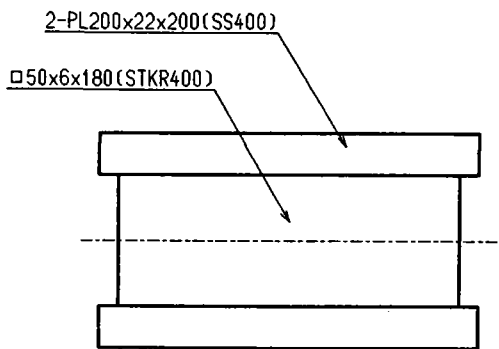
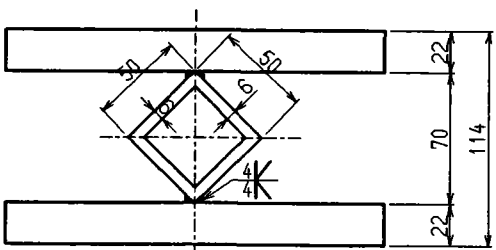
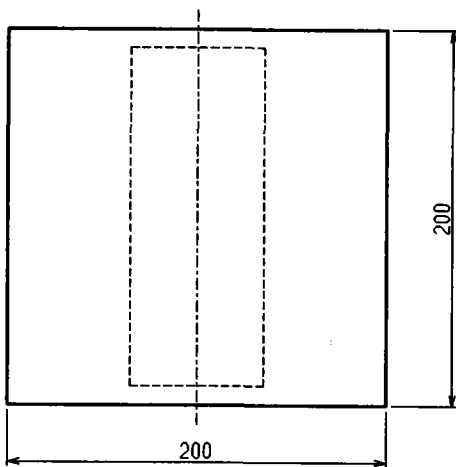


図-3.3.8 タイプC製作図

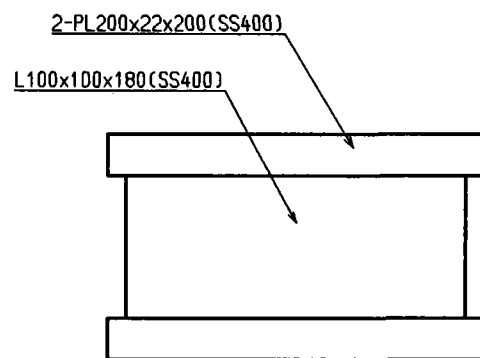
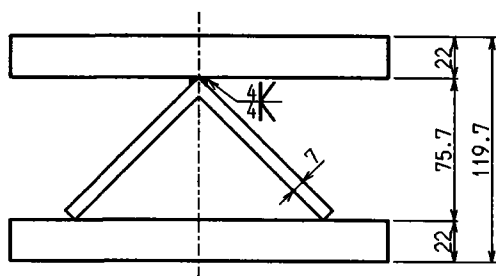
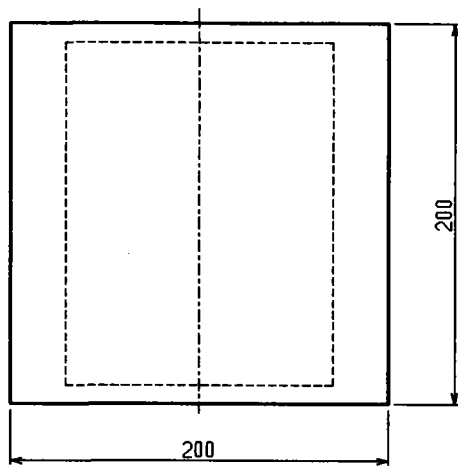


図-3.3.9 タイプD製作図

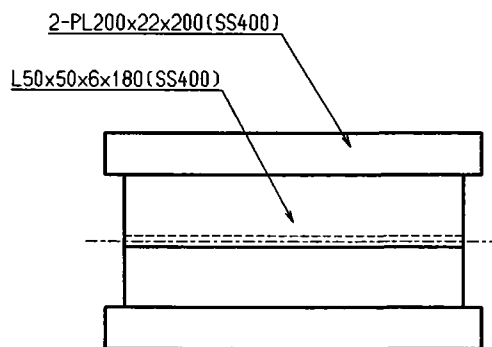
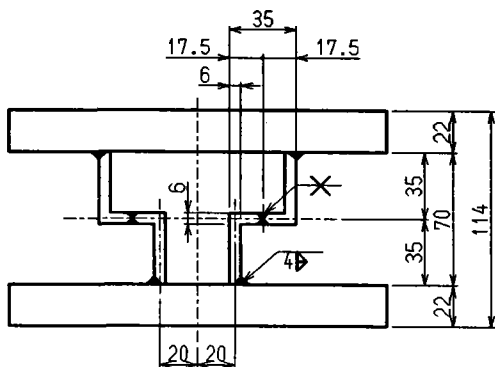
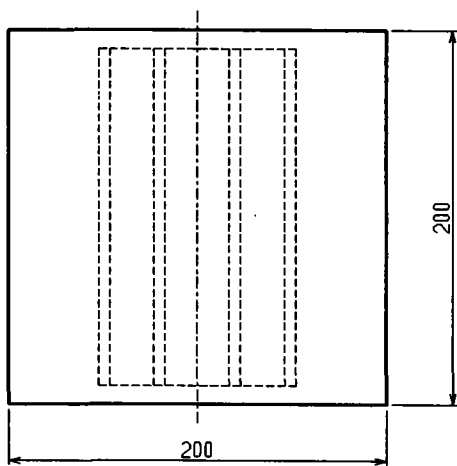


図-3.3.10 タイプE製作図



### c) 実験方法

#### ① 実験1 (ゴム製緩衝材)

ゴムの緩衝材を試験体とし、試験体に設計許容支圧応力度の5倍程度(=600kgf/cm<sup>2</sup>)の荷重を静的に負荷し、この時の荷重-変位関係を測定するとともに極限状態での変形状態を目視により観察した。川口金属での実験の条件を以下に示す。

実験日：1999. 1. 19～1. 20

実験場所：川口金属工業(株)本社工場

使用試験体：タイプA

使用試験機：200tf-2軸載荷試験機

試験荷重：0～135tf (支圧応力度：0～600kgf/cm<sup>2</sup>) シ-ｽﾞ 1

：0～ 6.75tf (支圧応力度：0～ 30kgf/cm<sup>2</sup>) シ-ｽﾞ 2

：0～ 27.0tf (支圧応力度：0～120kgf/cm<sup>2</sup>) ”

：0～ 84.4tf (支圧応力度：0～375kgf/cm<sup>2</sup>) ”

載荷速度：0.2～1.0tf/sec

制御方法：荷重制御

測定項目：荷重-変位および試験体の状態(目視)

測定方法：変位計による測定。

ここで、試験荷重の最大値は緩衝ゴムの許容支圧応力度の5倍程度を最初に想定したが、シ-ｽﾞ 1の実験で支圧応力度600kgf/cm<sup>2</sup>まで載荷したところ、試験終了後に変位が大きく残る結果となった。このためシ-ｽﾞ 2の実験では、一度に最大荷重を載荷するのではなく、いくつかの段階に分けてその都度ゴムを試験機からはずし、ゴムの状態を確認し再び試験機にセットして載荷するという手順で試験を行った。また、載荷速度はそれぞれのサイクルの最大荷重に応じて変えた。

#### ② 実験2 (鋼製緩衝材)

異なる数種類の断面形状の鋼材を試験体とし、静的に荷重を負荷し試験体がほぼ完全に圧壊するか、あるいは極端に荷重が立ち上がるまで塑性変形させ、この時の荷重-変位関係を測定した。川口金属での実験の条件を以下に示す。

実験日：1999. 1. 19～1. 20

実験場所：川口金属工業(株)本社工場

使用試験体：タイプB～E

使用試験機：200tf-2軸載荷試験機

最大変位：50mm

変形速度：0.5mm/sec

最大荷重：200tf

制御方法：変位制御

測定項目：荷重-変位

測定方法：荷重計による測定。

ここで、試験変位は試験体の形状寸法より変形可能と思われる最大50mmとした。また、変位がこれ以下でも荷重が試験機の上限まで達した場合は中断する設定とした。実験の概要を図-3.3.11に示す。

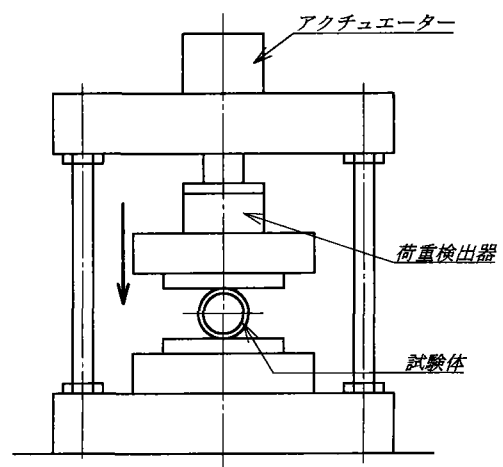


図-3.3.11 実験概要図

### (c) 実験結果

各試験体の変形状況を図-3.3.12~17に、荷重-変位関係を図-3.3.18~22示す。

#### a) ゴムの緩衝材 (試験体A)

シリーズ1の実験では一気に支圧応力度 $600\text{kgf/cm}^2$  ( $135\text{tf}$ )まで載荷したが、実験中には亀裂の発生等の異常は見られなかった。ただし実験終了後、ゴムの角部や縁の部分が伸び、逆に中央部が薄くなるような残留変位が確認された。(図-3.3.12)

2シリーズ目の試験では最初に支圧応力度 $0\sim 30\text{kgf/cm}^2$  ( $0\sim 6.75\text{tf}$ )の載荷を行った。その後荷重を解放して目視でゴムの状態を確認した。この範囲では、ゴムに亀裂や残留変位は見られなかった。次に支圧応力度 $0\sim 120\text{kgf/cm}^2$  ( $0\sim 27.0\text{tf}$ )の載荷を行った後、荷重を解放してゴムの状態を確認した。この範囲になるとゴムの角部や縁の部分に伸びが発生し、中央部の厚みは元の厚みより $1\sim 2\text{mm}$ ほど薄くなっていた。最後に支圧応力度 $0\sim 375\text{kgf/cm}^2$  ( $0\sim 84.4\text{tf}$ )の載荷を行い、荷重を解放してゴムの状態を確認した。その結果シリーズ1の試験時と同程度の残留変位が発生しており、これ以上の実験の継続は意味がないと判断して、この時点で実験を終了した。なお、残留変位は時間とともに少なくなり、角部や縁の部分の伸びは完全にはもどらなかったが、中央部は最終的にはほぼ元の厚さに戻った。荷重-変位曲線は各シリーズで大きな違いが出た。荷重-変位曲線を図-3.3.18に示す。

#### b) 鋼製の緩衝材 (タイプB~E)

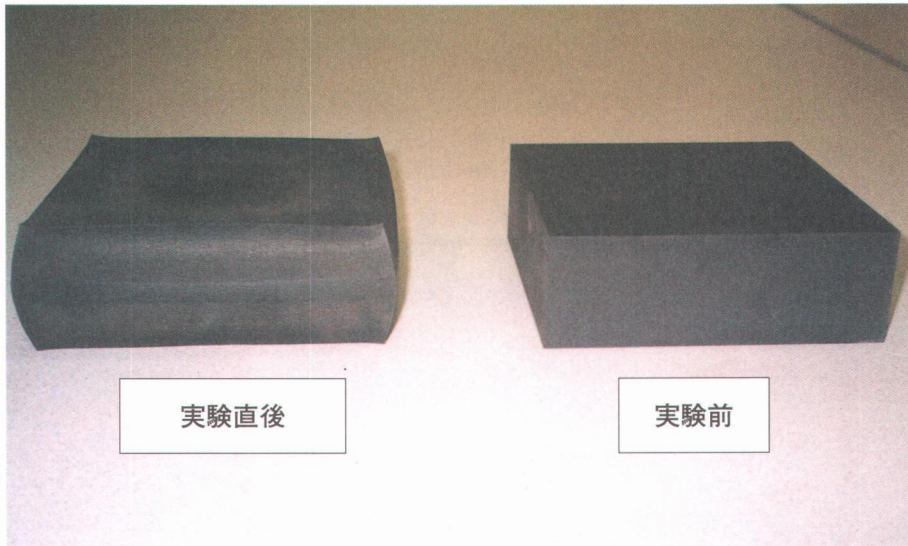
**タイプB** はじめは楕円状につぶれていたが、途中で溶接部の境目付近に折れ曲がりが発生し、楕円が2カ所でくびれたようなつぶれ方になった。(図-3.3.14) 最後は上下のくびれの部分が接触しその後も多少の変形を続け、変位が $50\text{mm}$ を越えたため実験を終了した。荷重は最初に立ち上がった後はほぼ一定値を保ち、くびれが生じ始めたところでいったん下がり、くびれが接触するとまた上がり始めた。

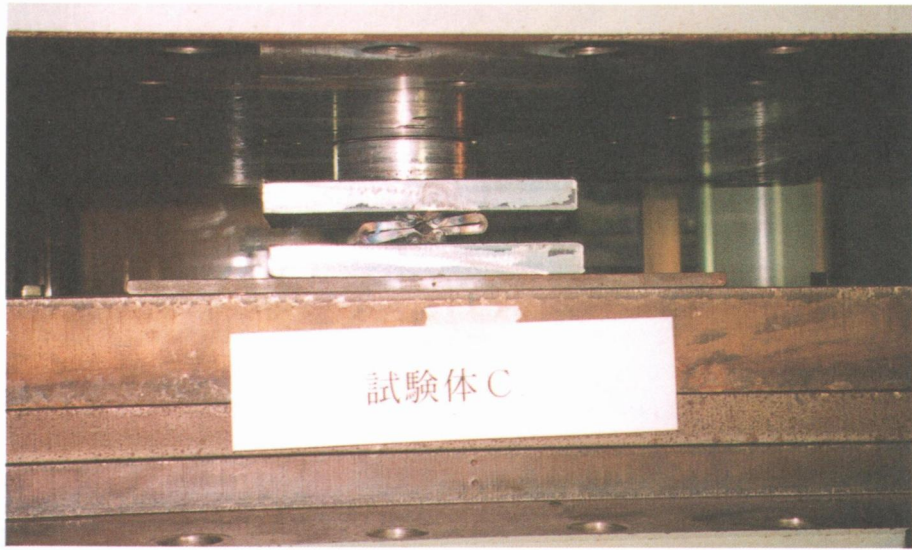
**タイプC** 比較的均等につぶれた。左右の角部はほぼ完全につぶれたが、上下の角部は溶接の影響で少し空間がのこった。(図-3.3.15) 荷重は最初に立ち上がった後はほぼ一定値を保ち、試験体Bのような荷重の変化は起こらなかった。最初の立ち上がり時点の荷重は試験体Bより若干低いものであった。変位 $50\text{mm}$ 以下で荷重が $200\text{tf}$ を越えたため実験を終了した。

**タイプD** 上部の溶接部の境目付近から弓形に曲がるようにつぶれはじめ、最後は両足の部分が若干反り返るような感じになった。(図-3.3.16) 荷重は最初に立ち上がった後はほぼ一定を保ち、最試験体Cと同様荷重の変化は起こらなかった。最初の立ち上がり時点の荷重は試験体Bの2割程度であった。変位が $50\text{mm}$ を越えたため実験を終了した。

**タイプE** 角部付近が曲がるようにつぶれはじめ、角部が上下の鋼板に接触して荷重を支えるようになり、そこでほぼ変形がとまってしまった。(図-3.3.17) 荷重は最初に立ち上がった後はほぼ一定を保ち、角部が上下の鋼板に接触してから荷重が急激に立ち上がり始めた。最初の立ち上がり時点の荷重はタイプBの6割程度であった。変位 $50\text{mm}$ 以下で荷重が $200\text{tf}$ を越えたため実験を終了した。

なお、各試験体共にシリーズ毎の変形の状態や荷重の値はほぼ同じであった。





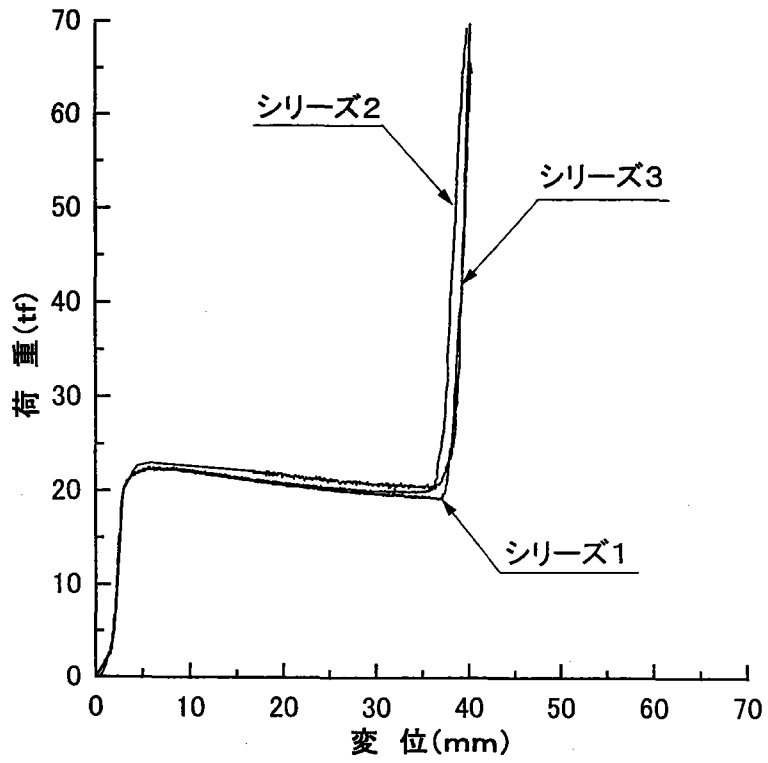


図-3. 3. 20 荷重-変位曲線 (タイプC)

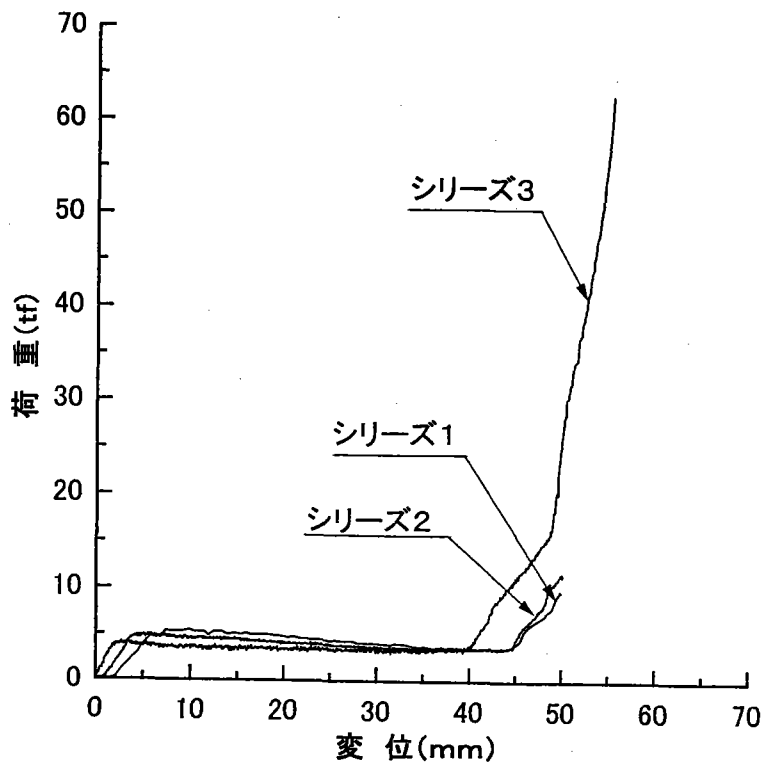


図-3. 3. 21 荷重-変位曲線 (タイプD)

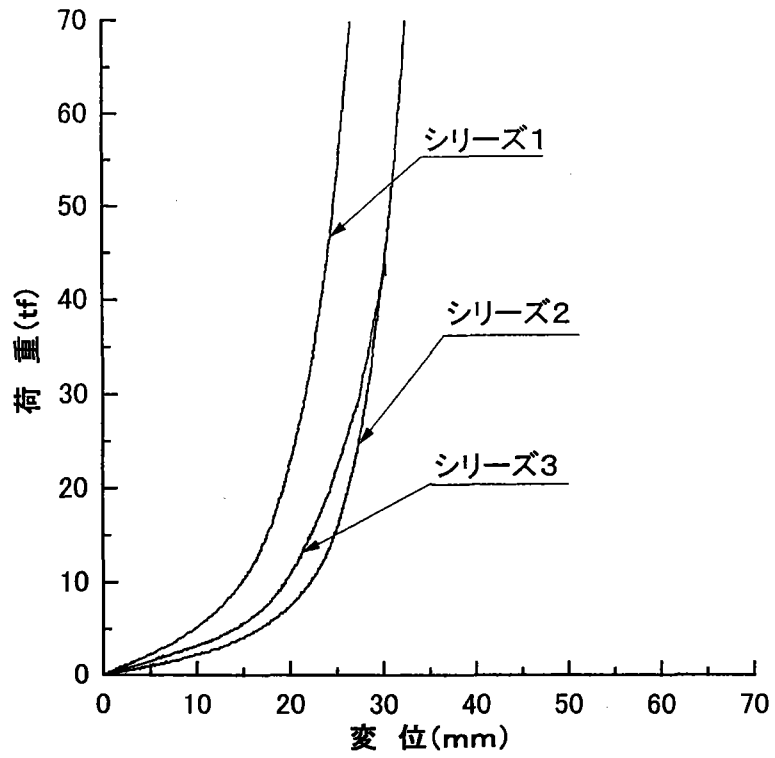


図-3. 3. 18 荷重-変位曲線 (タイプA)

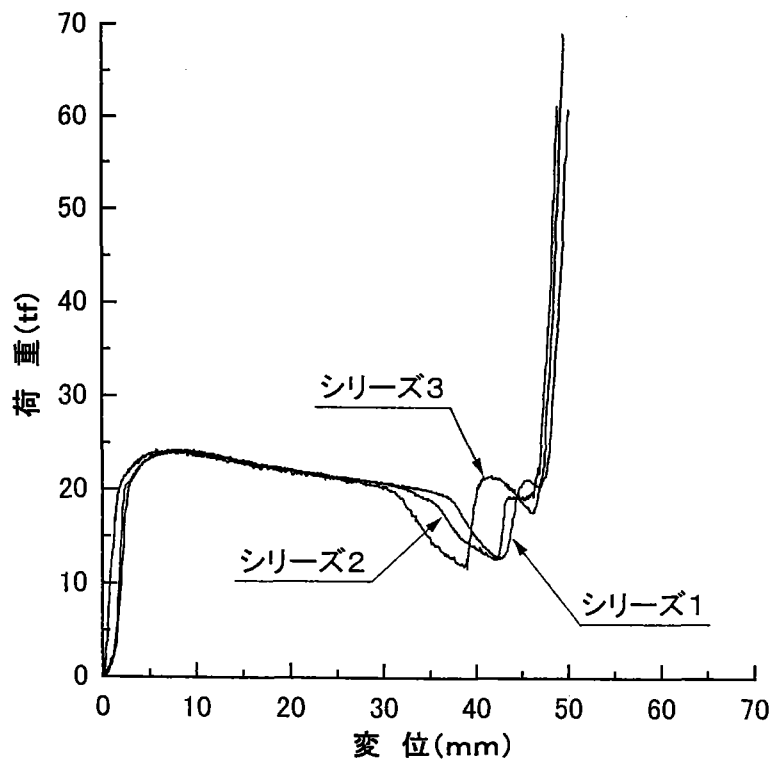


図-3. 3. 19 荷重-変位曲線 (タイプB)

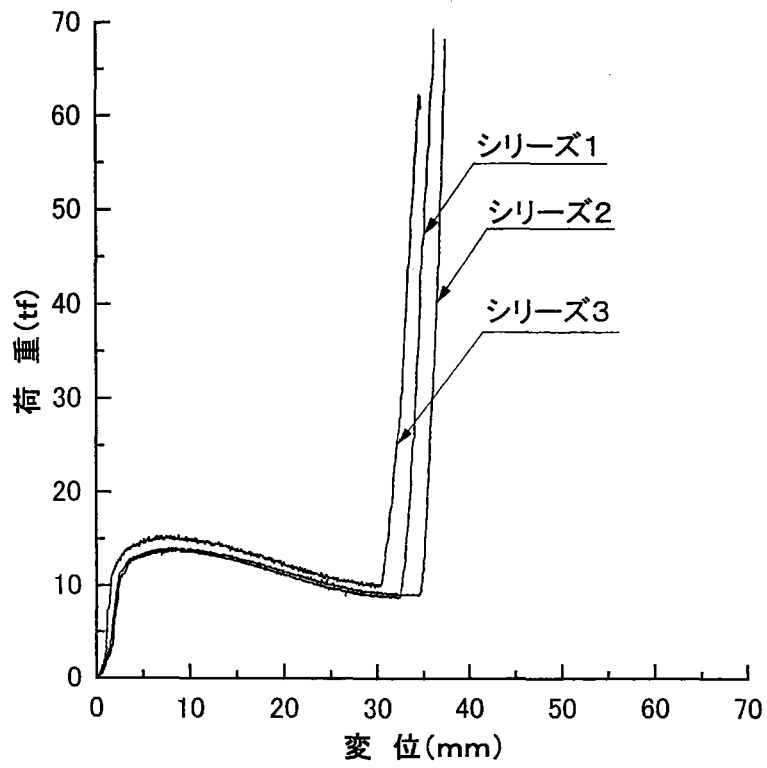


図-3. 3. 2 2 荷重-変位曲線 (タイプE)

## (d) 解析の概要

### ①解析対象

解析対象は、いずれも型鋼を用いて製作された鋼製緩衝装置である。材質はすべて SS400 相当のものを想定した。材料定数を表-3.3.18 に示す。また、解析に用いた形鋼の真応力-真ひずみ関係は、1 軸引張実験結果から得られる公称応力-工学ひずみ関係(図-3.3.23)を体積一定の条件のもとで真応力-真歪関係に変換して求めた。この際、図-3.3.23 に○で示した 3 点での応力-ひずみ点を用いて、トリリニアタイプでモデル化した。用いた真応力-真歪関係を図-3.3.24 に示す。衝撃による歪速度効果は降伏点に動的倍率を掛けることで考慮した。

### ②解析方法

有限要素動的応答解析には、市販の汎用コードである PC/LS-DYNA-3D を用いた。時間積分法は中心差分法であり、時間刻みは解の安定性の条件から自動的に決定される。

用いた要素は 3 次元破壊要素(Isotropic elastic-plastic with failure)である。この要素は、破壊基準として、相当塑性ひずみが最大塑性ひずみを超える場合と、相当応力が限界応力を上回る場合の二つを設定している。これらの条件に該当した要素は、解析上削除される。

図-3.3.25 に有限要素モデルを示す。各緩衝装置モデルの上下を極厚の鋼板で挟みこんだ構造形式とした。載荷方法としては、変位を準静的に与える方法と、重量 98kN の物体を 80cm/sec の速度で衝突させる方法を用いた。以下、前者を静的載荷、後者を衝撃載荷と呼ぶ。

## (e) 解析結果

### ①静的圧縮載荷

図-3.3.26 から図-3.3.29 に静的圧縮載荷における各タイプの荷重-変位曲線を示す。ここで、変位は緩衝装置上下の載荷板の相対変位である。なお、図中には、別途実施した載荷実験によって得られた荷重-変位関係も解析の妥当性を検証するために示した。また、ゴム製緩衝装置の載荷実験によって得られた荷重-変位関係を比較のために図-3.3.30 に示す。なお、ゴムは硬度 55 のクロロプレンゴムで、寸法は 150×150×50 である。また、図-3.3.31 から図-3.3.34 には鋼製緩衝装置の変形形状の推移を実験結果と比較して示す。

**タイプ B** 初期には楕円状につぶれるが、変位が 20mm を過ぎた時点から、溶接部の折れ曲がりにより、2 箇所にくびれが生じて波を打つような形状になり、最終的にはそのくびれ部分が互いに接触した。荷重-変位関係は、弾性域を過ぎて急激に最大荷重値に至り、その後荷重値はほぼ一定値を保っている。最終的にくびれ部が接触した時点から、荷重値は急激に増加している。最終的な変位は 50mm(外形の 70%)程度となった。

**タイプ C** タイプ B の場合にアーチアクションと溶接の影響で、波を打つような変形をしたのに対して、この形式ではくびれは生じず、均等に変形した。左右の角部はほぼ完全につぶれたが、上下の角部は溶接金属による拘束のために多少空間が残っている。荷重-変位関係については、降伏した後、荷重値が漸増して、上下の板が接触することにより、荷重値は急激に増加した。降伏荷重はタイプ B とほぼ同程度であり、最終的な変位は 40mm (外形寸法の 57%) 程度となった。

**タイプ D** 上部の溶接部の境界から弓なりに曲がり、両端部はすべて外側に移動している。その後、上部の溶接部の空間を残して完全につぶれた後、足部の両端が反り返って



いる。荷重—変位関係については、タイプ B と同様、降伏後ほぼ一定荷重を保ったのち、圧壊に至った。最大荷重はタイプ B のその 20% 程度であった。最終的な変位は他のどの形式より大きく 55mm (外形寸法の 79%) 程度となっている。

**タイプ E** 角部付近が次第に曲がってゆくが、上下の固定部の距離が変化しないために、角部が上下板に接触して反力を取るに至り、変形はそれ以上進まなくなる。したがって、最大変位は他のどの形式よりも小さく 35mm (外形寸法の 50%) 程度となっている。荷重—変位関係については、降伏した後、荷重値が漸減して、中央の角部が接触することにより、荷重値は急激に増加した。降伏荷重はタイプ B の 65% 程度であった。

## ② 静的引張載荷

静的圧縮載荷の解析結果から、タイプ B およびタイプ C が緩衝装置としては優位性が有ると判断されたため、それらの静的引張載荷における応答解析を実施した。図—3.3.35 および図—3.3.36 にそれぞれの荷重—変位曲線を示す。また、図—3.3.37 から図—3.3.39 には B, C, E 各タイプの変形状の推移を示す。

**タイプ B** 上下の溶接部で固定されているため、形状は円から楕円、そして矩形へと移行して、最終的には溶接部近傍の応力が大きくなって、そこから破断している。圧縮載荷の場合に対して、降伏荷重はほぼ同じであるが、その後荷重は上昇を続け、最大荷重は降伏荷重の 5 倍程度にまで達して、最終的には溶接部近傍で破断している。破断時の変位は 20mm (外形寸法の 30%) 程度と小さい。

**タイプ C** タイプ B の場合と初期形状が異なることによる違いを除けば、変形状況は同様である。また、荷重—変位関係についても、降伏後の勾配が、タイプ B の場合には単調増加なのに対して、このタイプの場合には途中で減少に転じる点を除けば、ほぼ同様の傾向を示した。

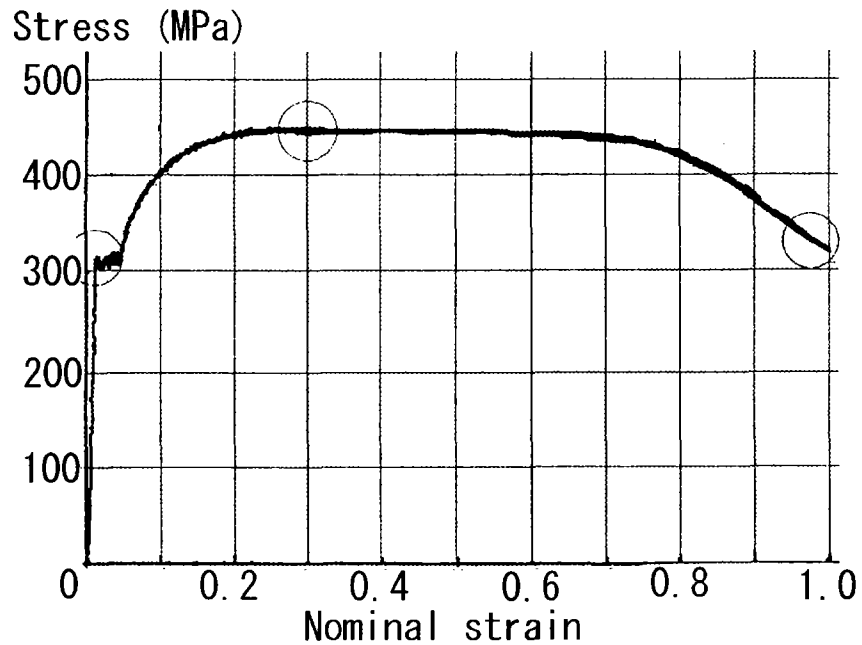
## ③ 衝撃載荷

図—3.3.40 にタイプ B の場合の荷重—時間線図を、図—3.3.41 に同じく変形状況の時刻歴を示す。この形式に限らず、いずれの緩衝装置も塑性変形の後、衝突体を跳ね返した。荷重値は衝突から 0.03sec 程度までほぼ一定値を保っており、静的載荷において示されたのと同様の良好なエネルギー吸収性状を示すことが分かる。

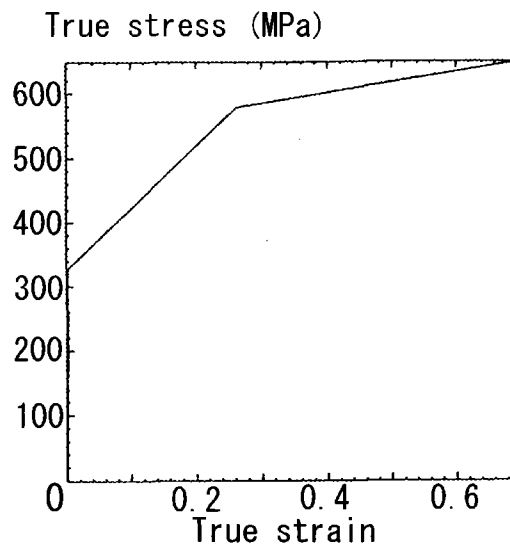
図—3.3.42 から図—3.3.44 にその他のタイプについて変形状況の推移を示す。また、図—3.3.45 から図—3.3.48 に、各タイプについて衝突体の加速度の時刻歴を示す。いずれの場合にも、衝突からおよそ 0.04sec 程度まで衝突体の加速度は変動はあるものの一定水準を保っていることがわかる。

表— 3. 3. 1 8 材料定数の設定

材料定数	設定値
弾性係数	2.06 $10^5$ MPa
ポアソン比	0.3
降伏応力	321 MPa
最大応力	636 MPa
破壊ひずみ	0.7



図— 3. 3. 2 3 公称応力—工学ひずみ関係の測定結果



図— 3. 3. 2 4 解析に用いた真応力—真ひずみ関係

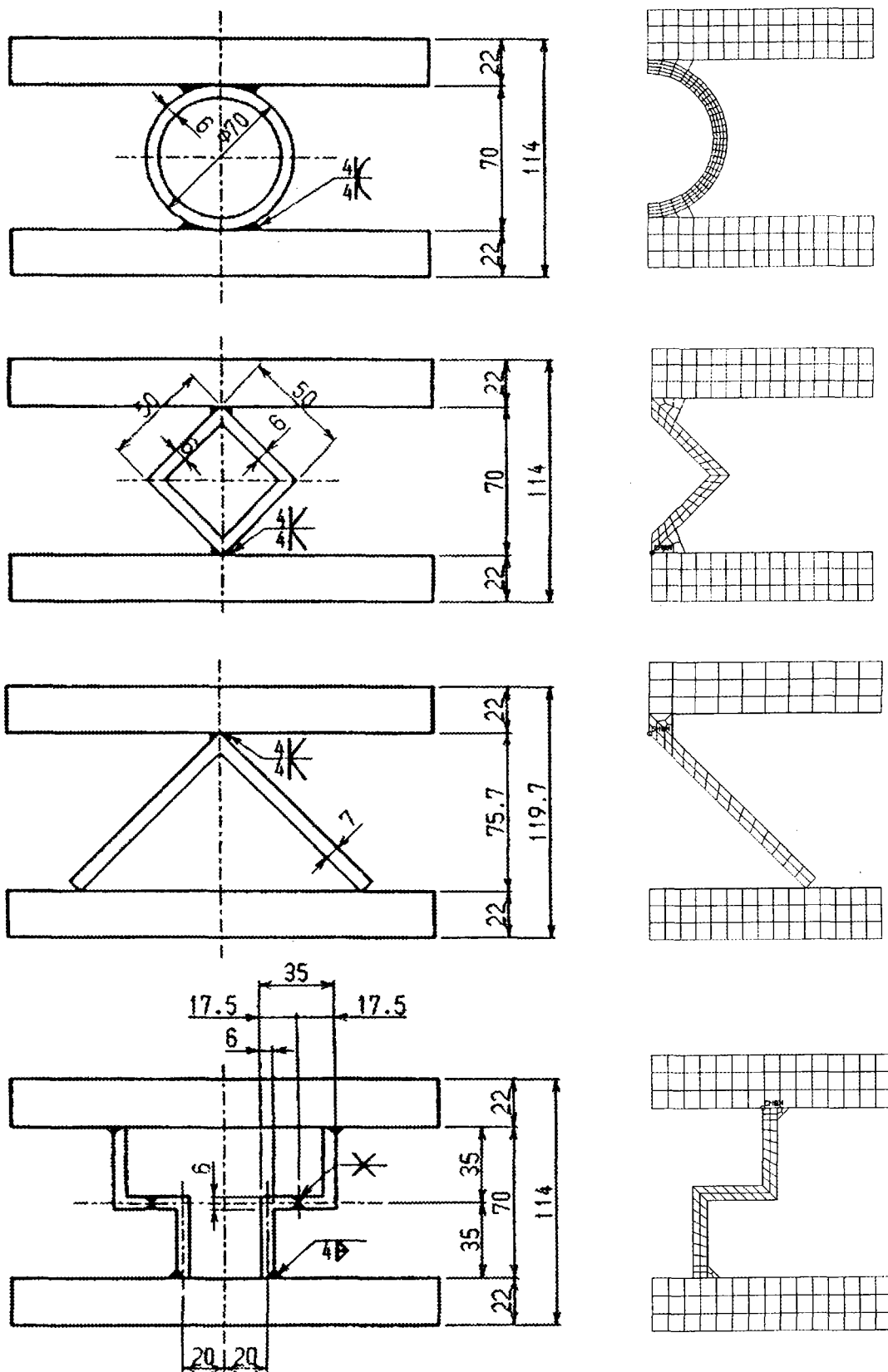
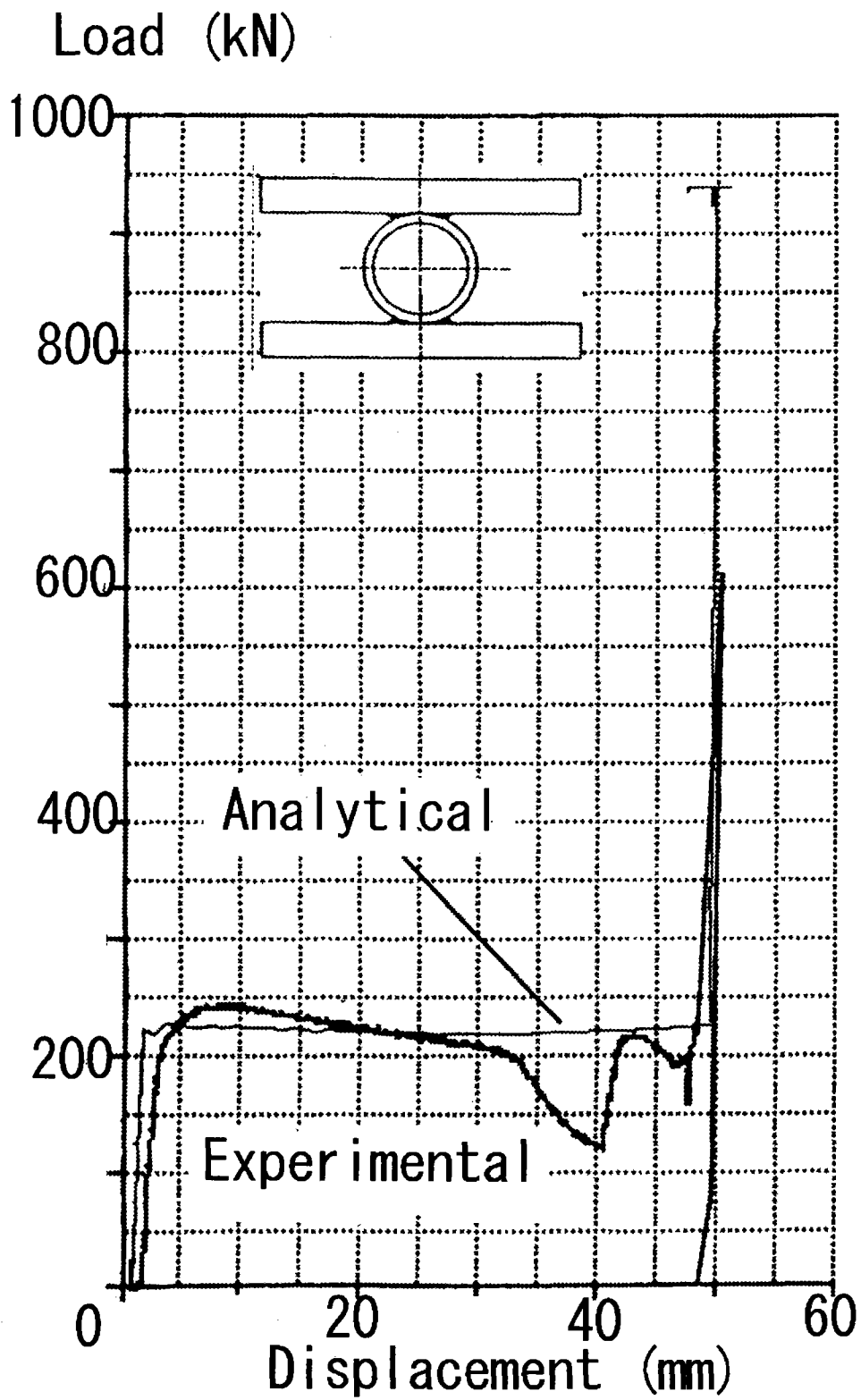
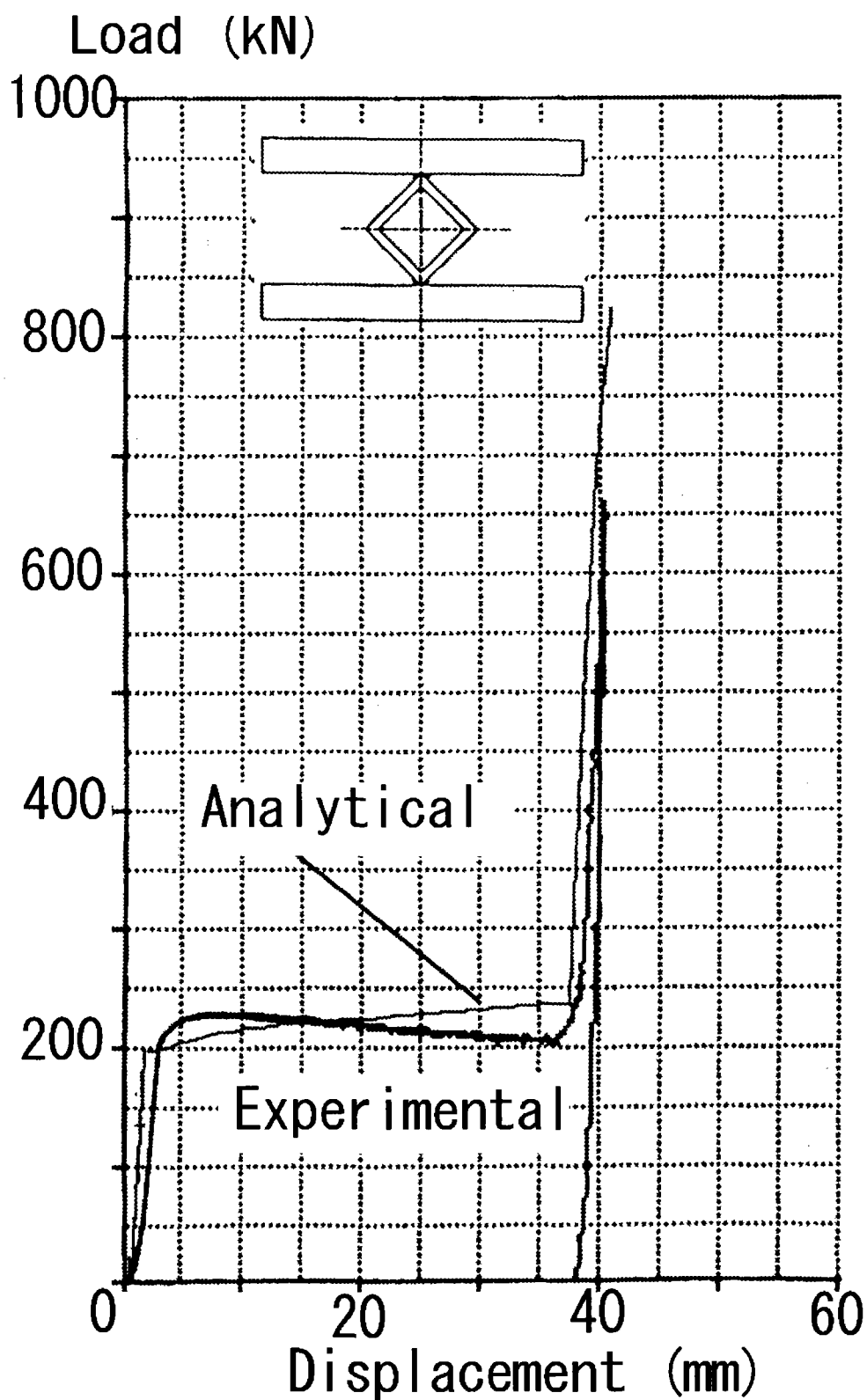


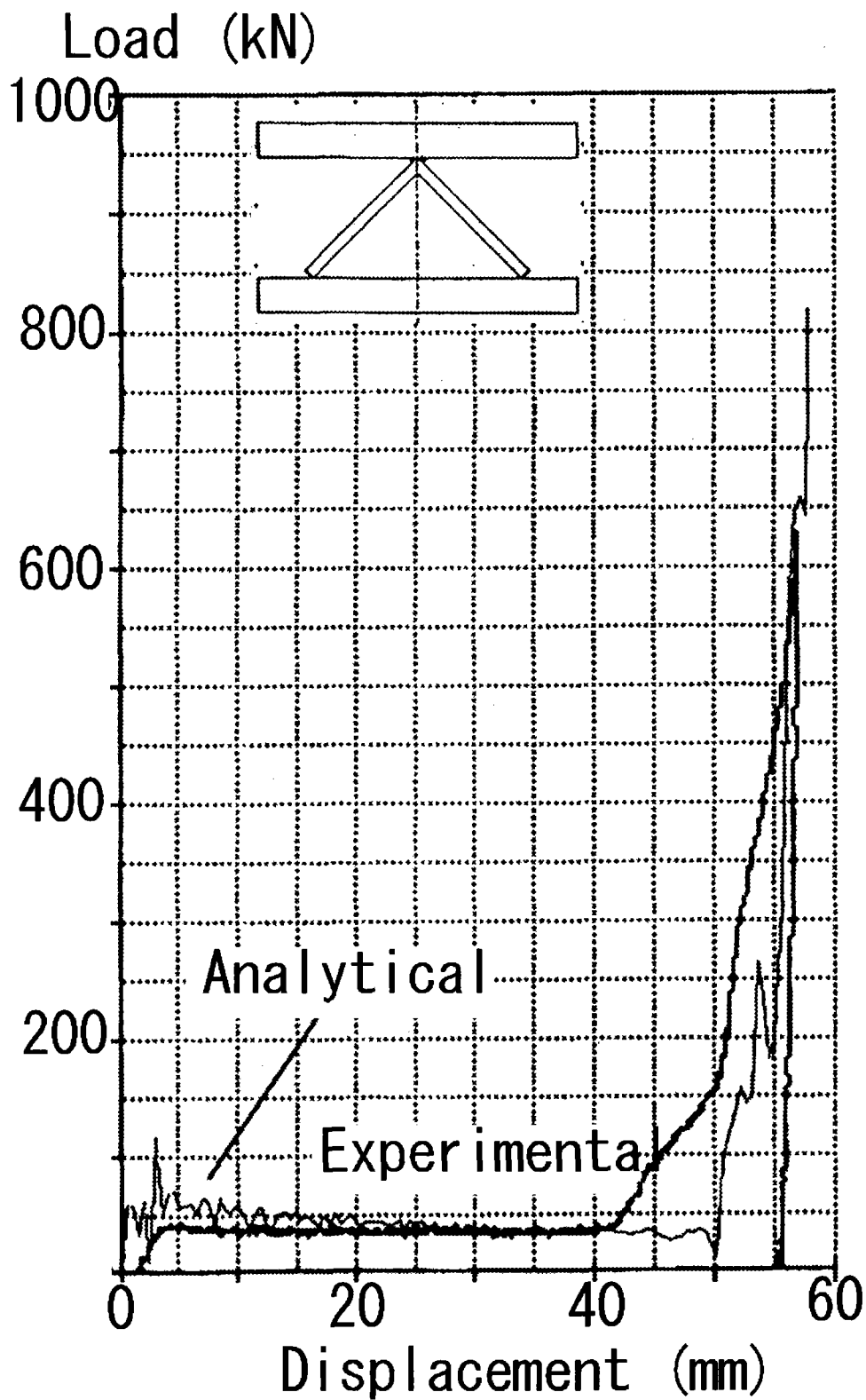
图-3.3.25 解析对象と要素分割



図一3. 3. 26 静的圧縮載荷における荷重-変位曲線 (タイプB)



図一3. 3. 27 静的圧縮荷重における荷重-変位曲線 (タイプC)



図一 3. 3. 28 静的圧縮荷重における荷重—変位曲線 (タイプD)

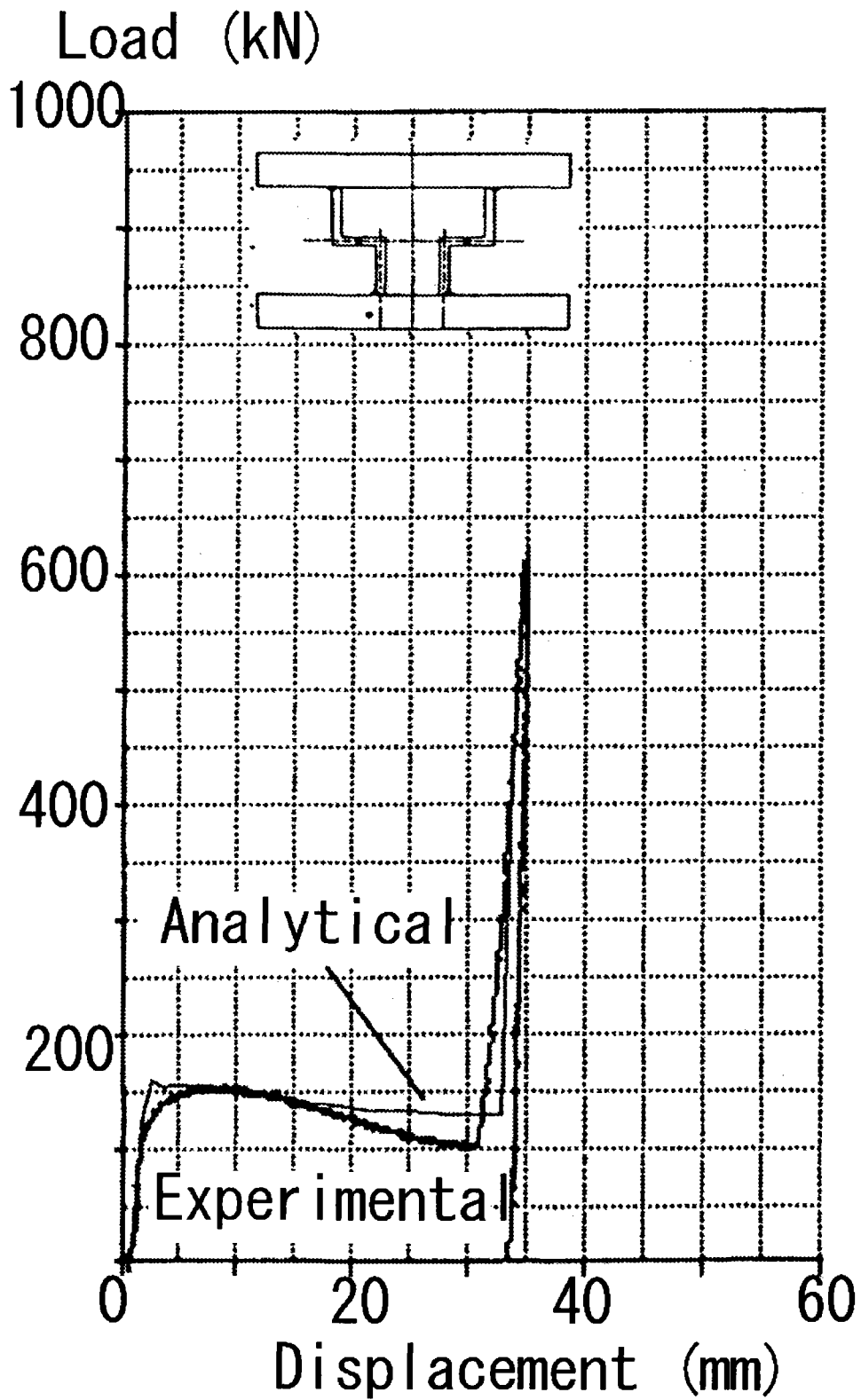


図-3.3.29 静的圧縮載荷における荷重—変位曲線(タイプE)

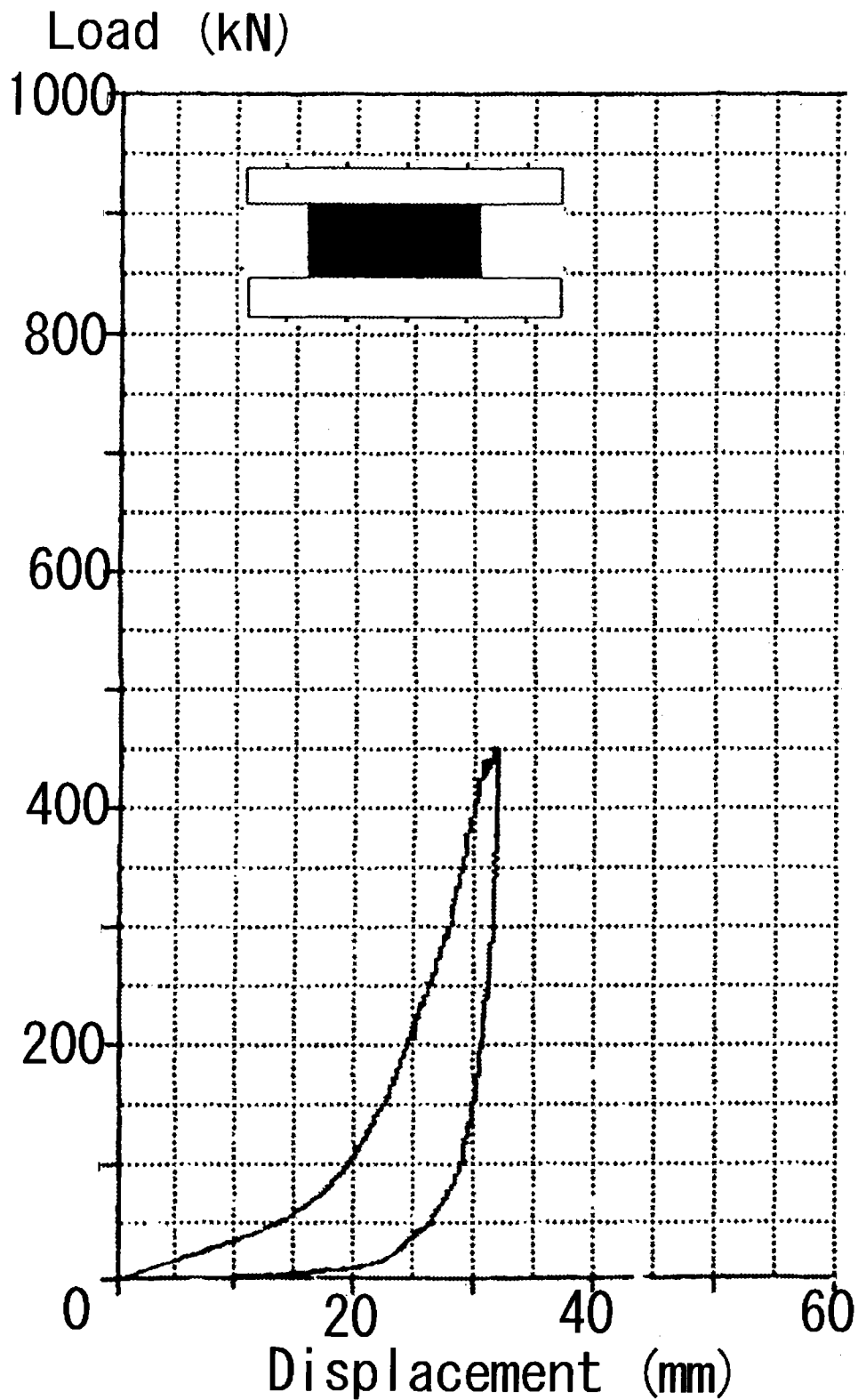
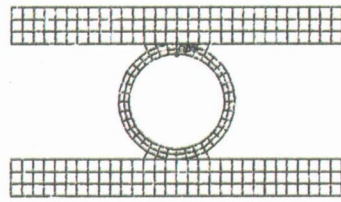
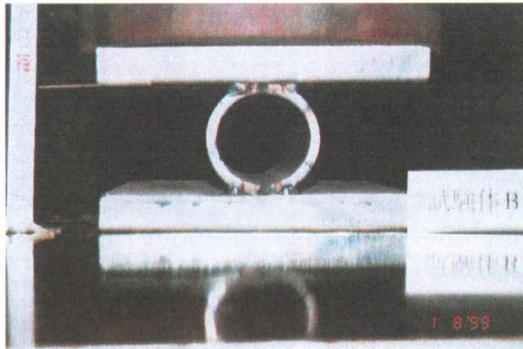


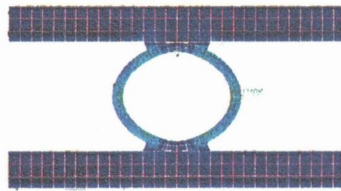
図-3. 3. 3 0 静的圧縮载荷における荷重-変位曲線 (ゴム緩衝材)



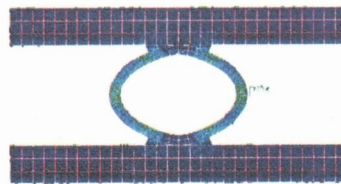
■ 初期状態



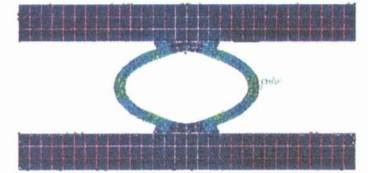
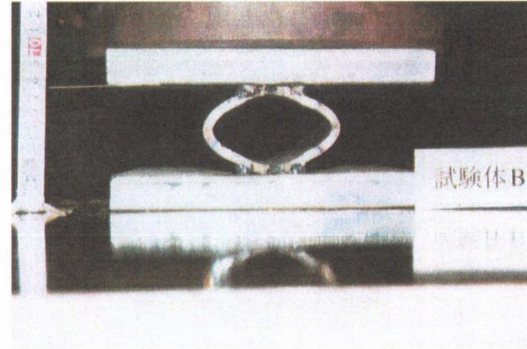
■ 変位 5 mm



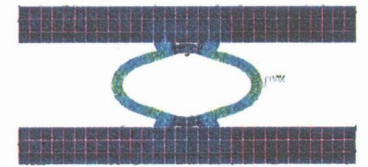
■ 変位 10 mm



■ 変位 15 mm



■ 変位 20 mm



■ 変位 25 mm

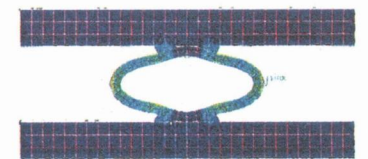
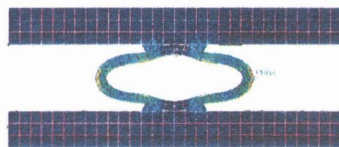
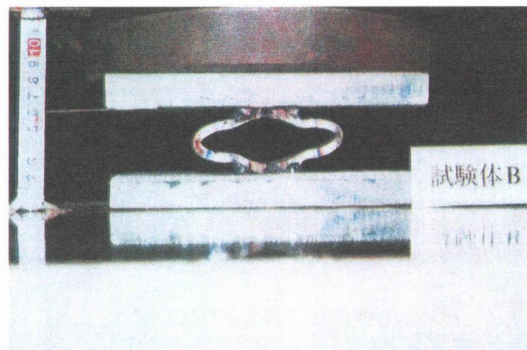


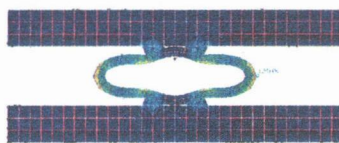
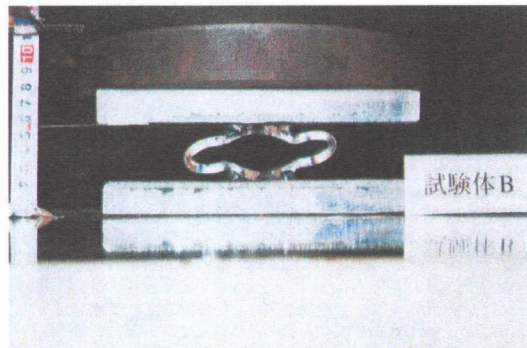
図-3.3.31 a 静的圧縮荷重における変形形状の推移 (タイプB)

図-3.3.31 b 静的圧縮荷重における変形形状の推移 (タイプB)

■ 変位 30 mm



■ 変位 35 mm



■ 変位 40 mm

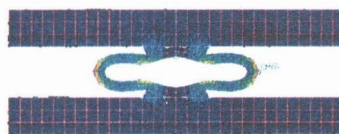
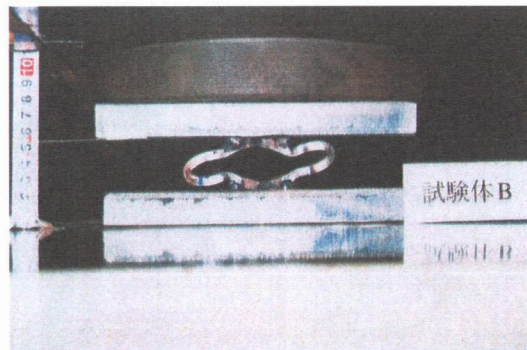
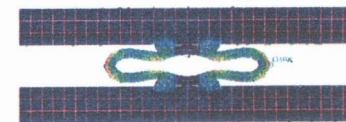
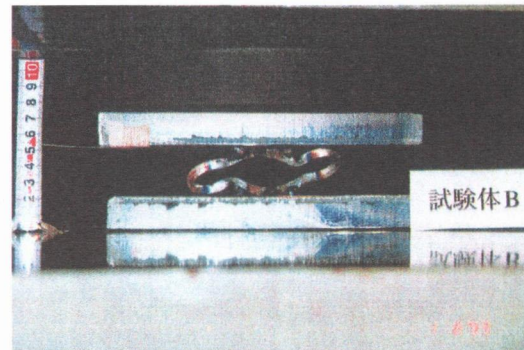


図-3.3.31c 静的圧縮荷における変形形状の推移 (タイプB)

■ 変位 45 mm



■ 変位 50 mm

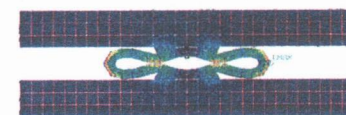
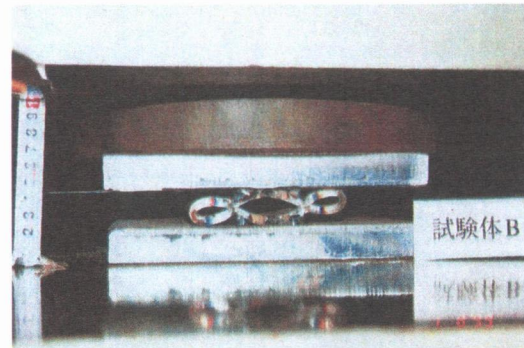
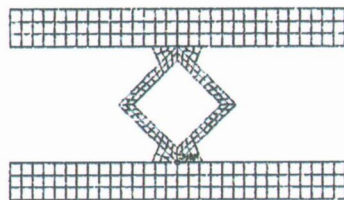
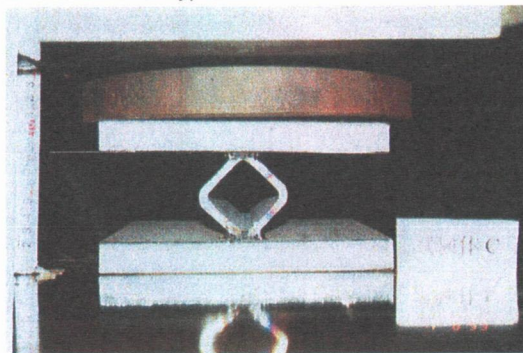
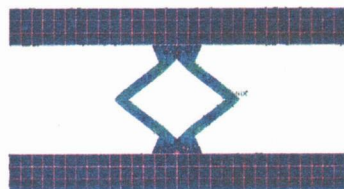
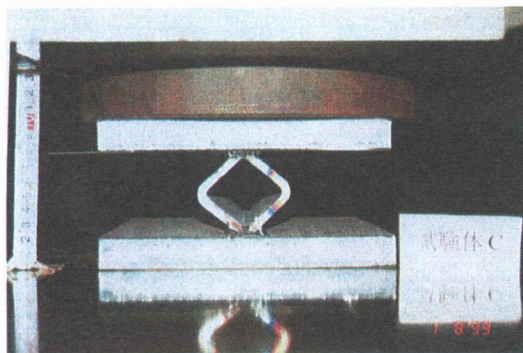


図-3.3.31d 静的圧縮荷における変形形状の推移 (タイプB)

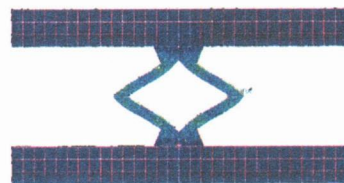
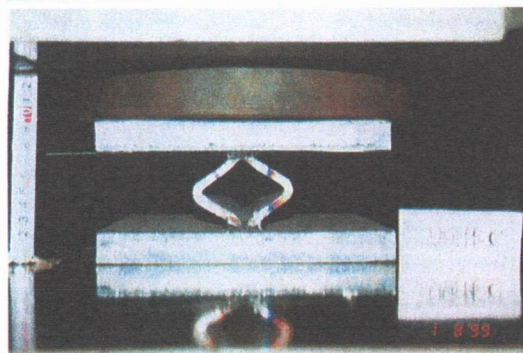
■ 初期状態 (C-type)



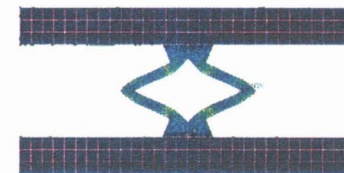
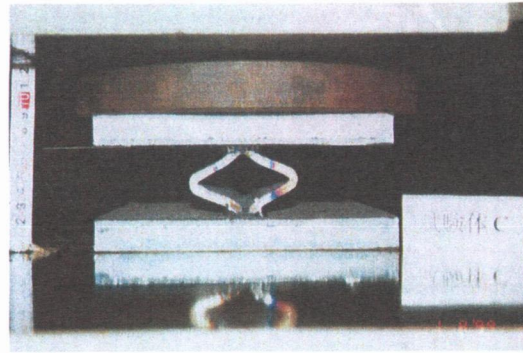
■ 変位 5 mm



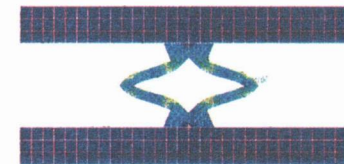
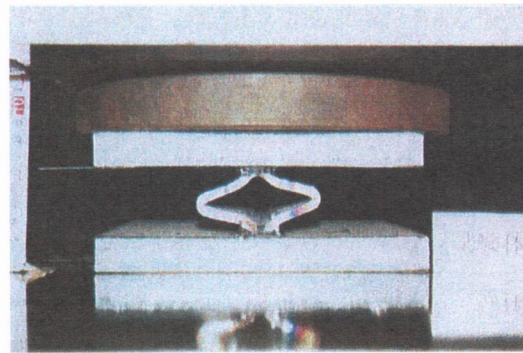
■ 変位 10 mm



■ 変位 15 mm



■ 変位 20 mm



■ 変位 25 mm

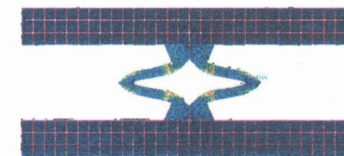
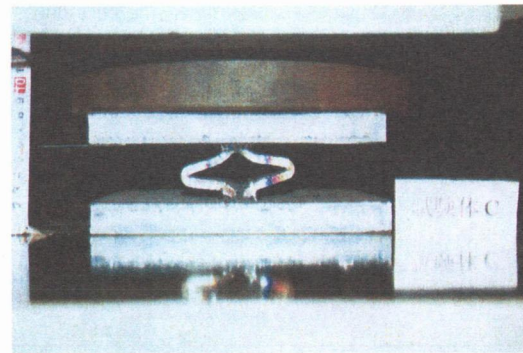
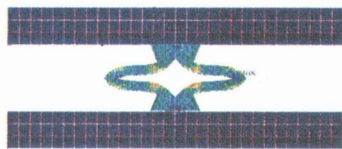
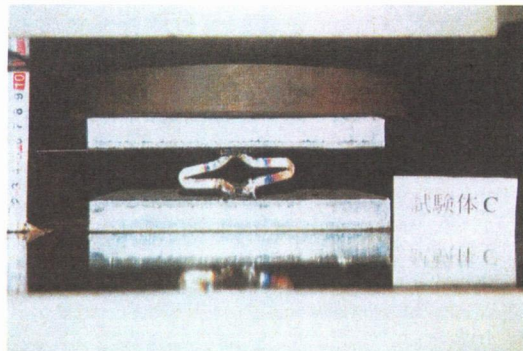


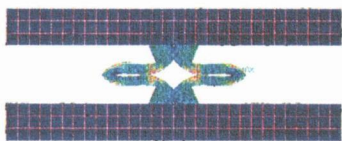
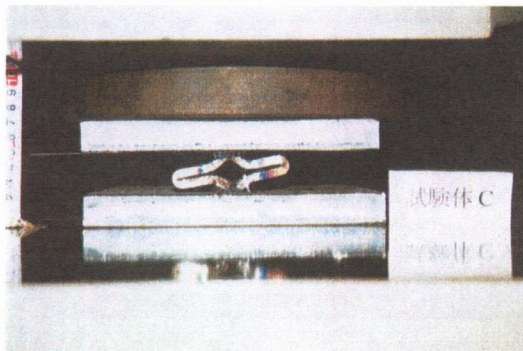
図-3. 3. 3 2 a 静的圧縮载荷における変形状の推移 (タイプC)

図-3. 3. 3 2 b 静的圧縮载荷における変形状の推移 (タイプC)

■ 変位 30 mm



■ 変位 35 mm



■ 変位 40 mm

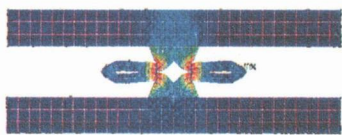
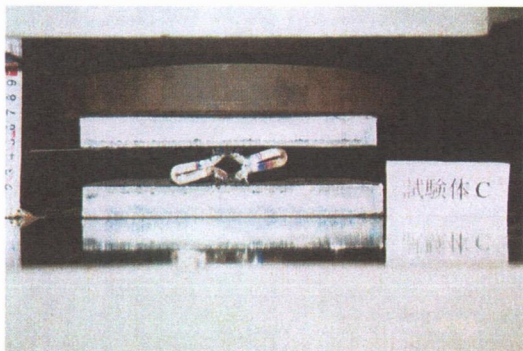
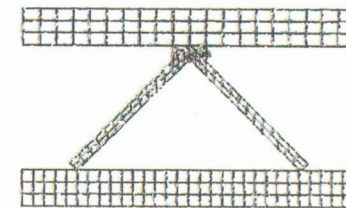
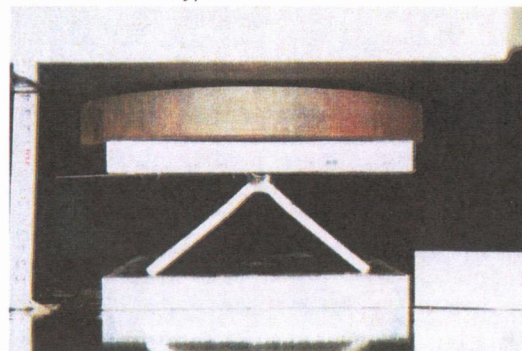
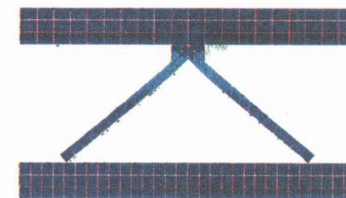
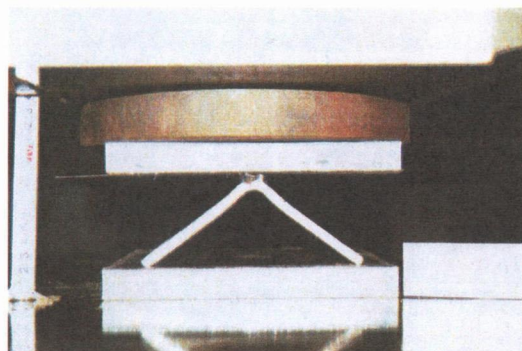


図-3.3.32c 静的圧縮荷における変形形状の推移 (タイプC)

■ 初期状態 (D-type)



■ 変位 5 mm



■ 変位 10 mm

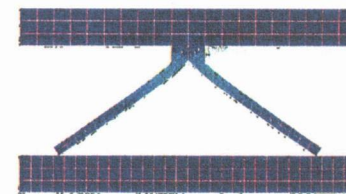
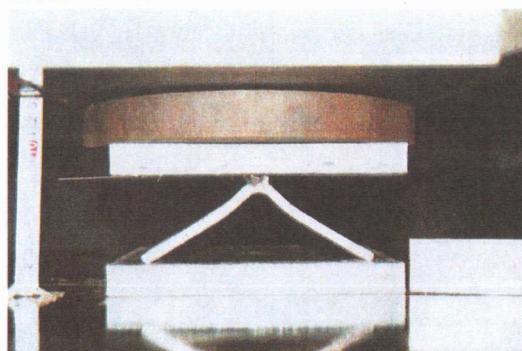
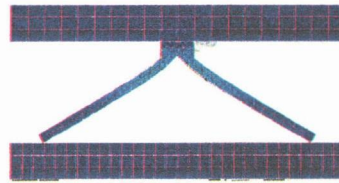
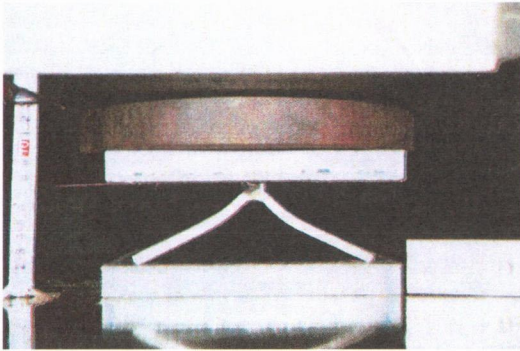
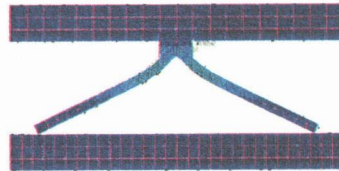
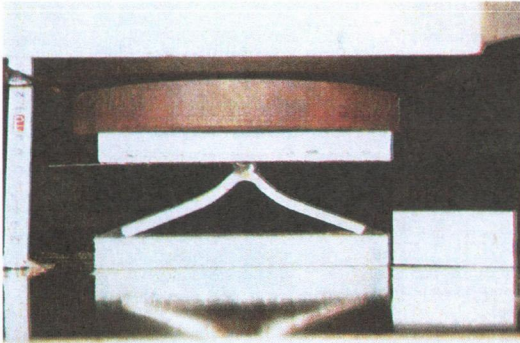


図-3.3.33a 静的圧縮荷における変形形状の推移 (タイプD)

■ 変位 15 mm



■ 変位 20 mm



■ 変位 25 mm

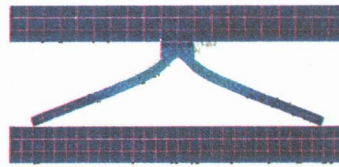
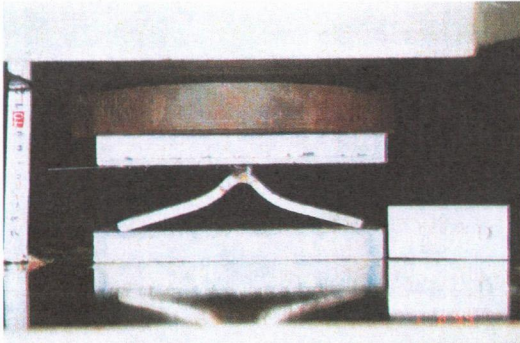
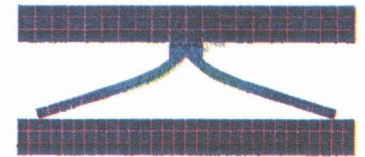
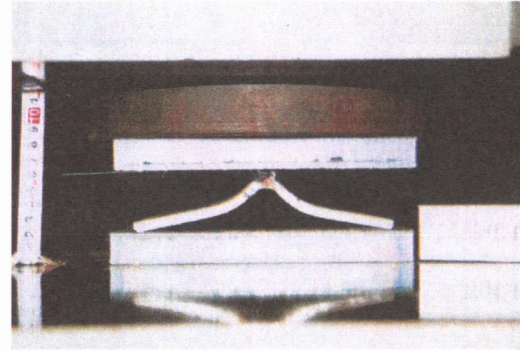
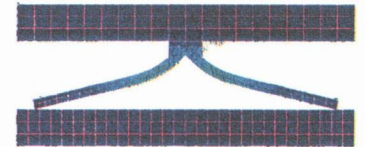
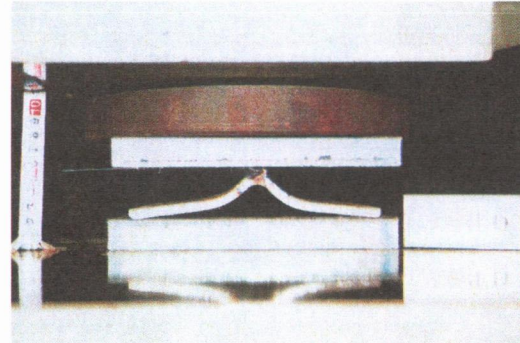


図-3. 3. 3 3 b 静的圧縮荷重における変形状の推移 (タイプD)

■ 変位 30 mm



■ 変位 35 mm



■ 変位 40 mm

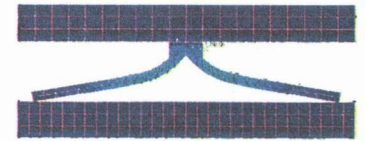
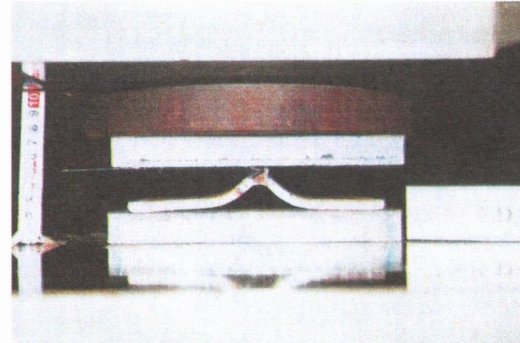
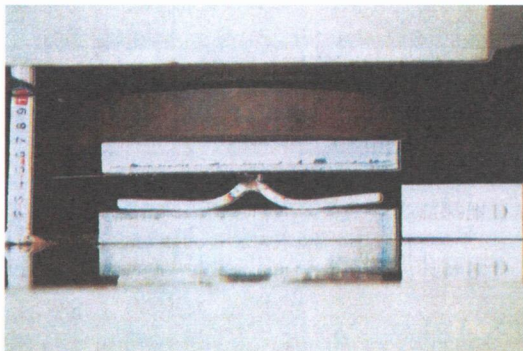
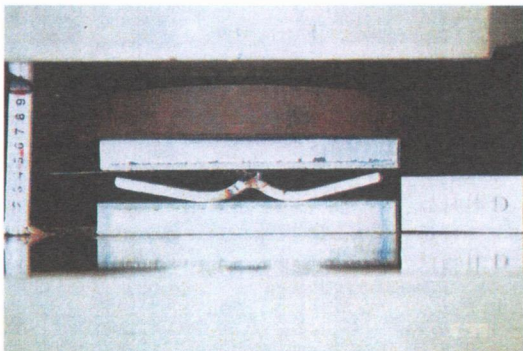


図-3. 3. 3 3 c 静的圧縮荷重における変形状の推移 (タイプD)

■ 変位 45 mm



■ 変位 48 mm



■ 変位 50 mm

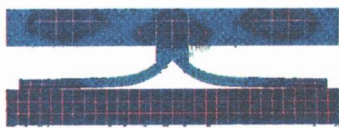
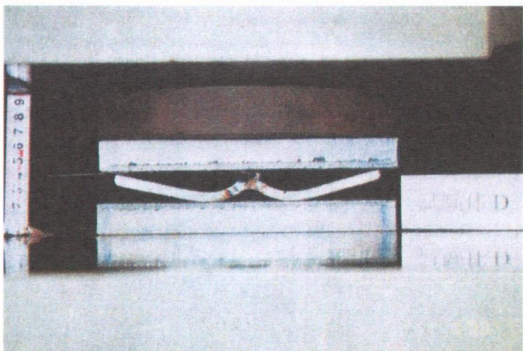
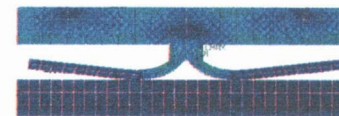


図-3.3.33d 静的圧縮荷重における変形状の推移 (タイプD)

■ 変位 55 mm

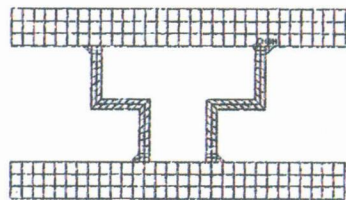
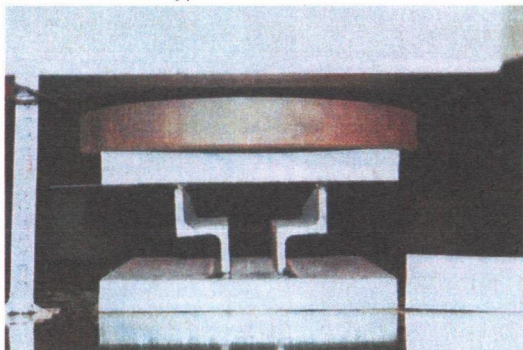


■ 変位 60 mm

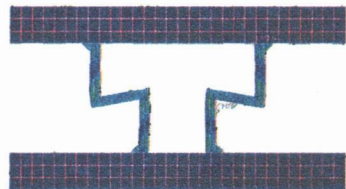
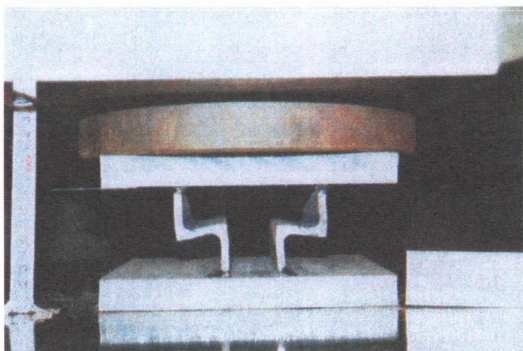


図-3.3.33e 静的圧縮荷重における変形状の推移 (タイプD)

■ 初期状態 (E-type)



■ 変位 5 mm



■ 変位 10 mm

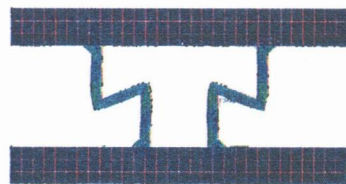
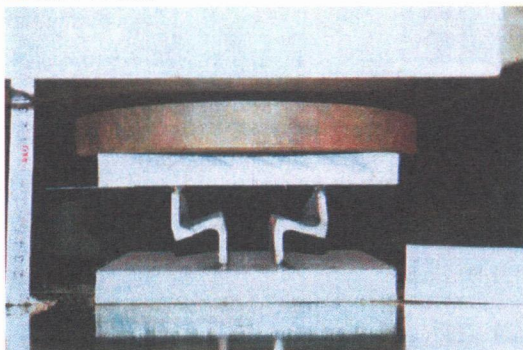
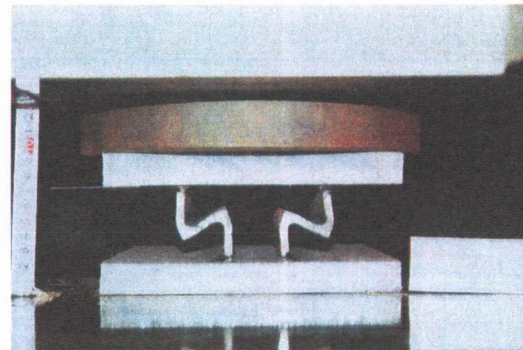
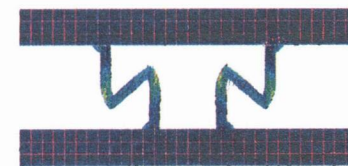
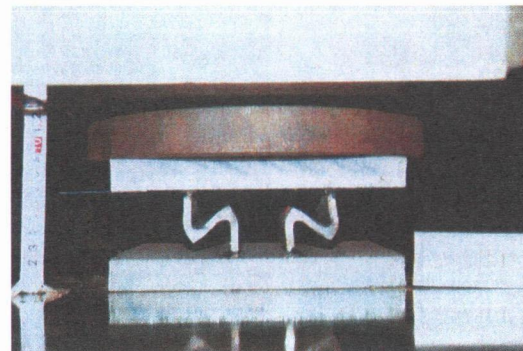


図-3. 3. 3 4 a 静的圧縮荷における変形形状の推移 (タイプE)

■ 変位 15 mm



■ 変位 20 mm



■ 変位 25 mm

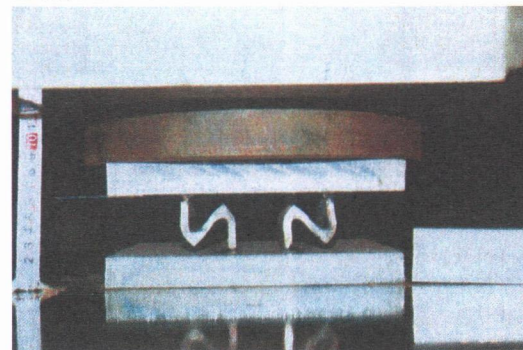
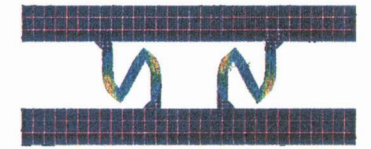
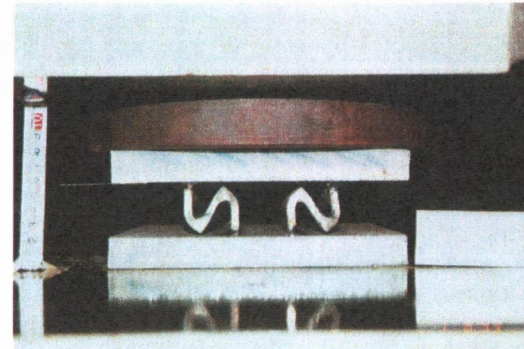
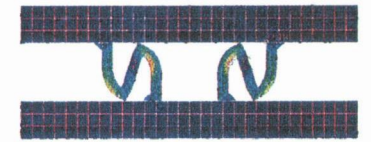
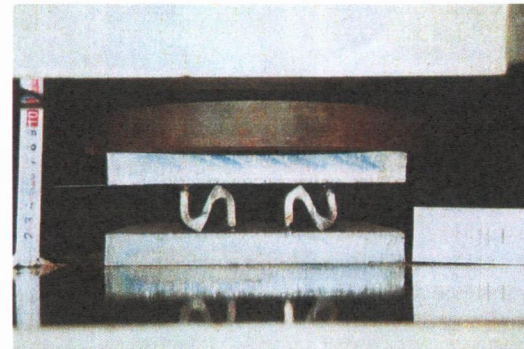


図-3. 3. 3 4 b 静的圧縮荷における変形形状の推移 (タイプE)

■ 変位 30 mm



■ 変位 35 mm



■ 変位 40 mm

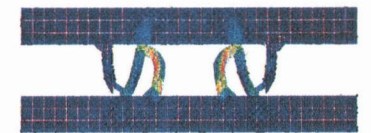


図-3.3.34c 静的圧縮载荷における変形形状の推移 (タイプE)



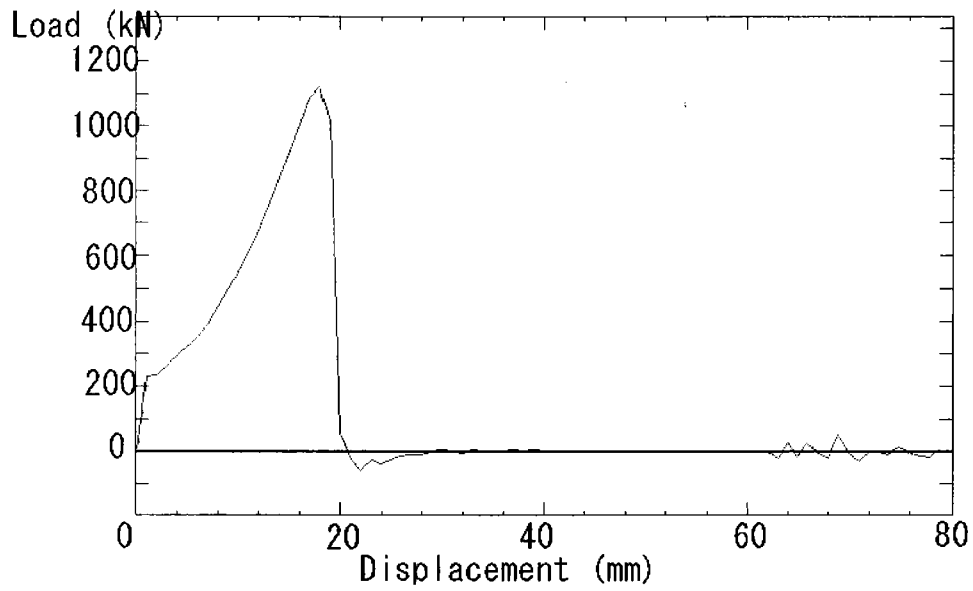


図-3.3.35 静的引張載荷における荷重-変位曲線 (タイプB)

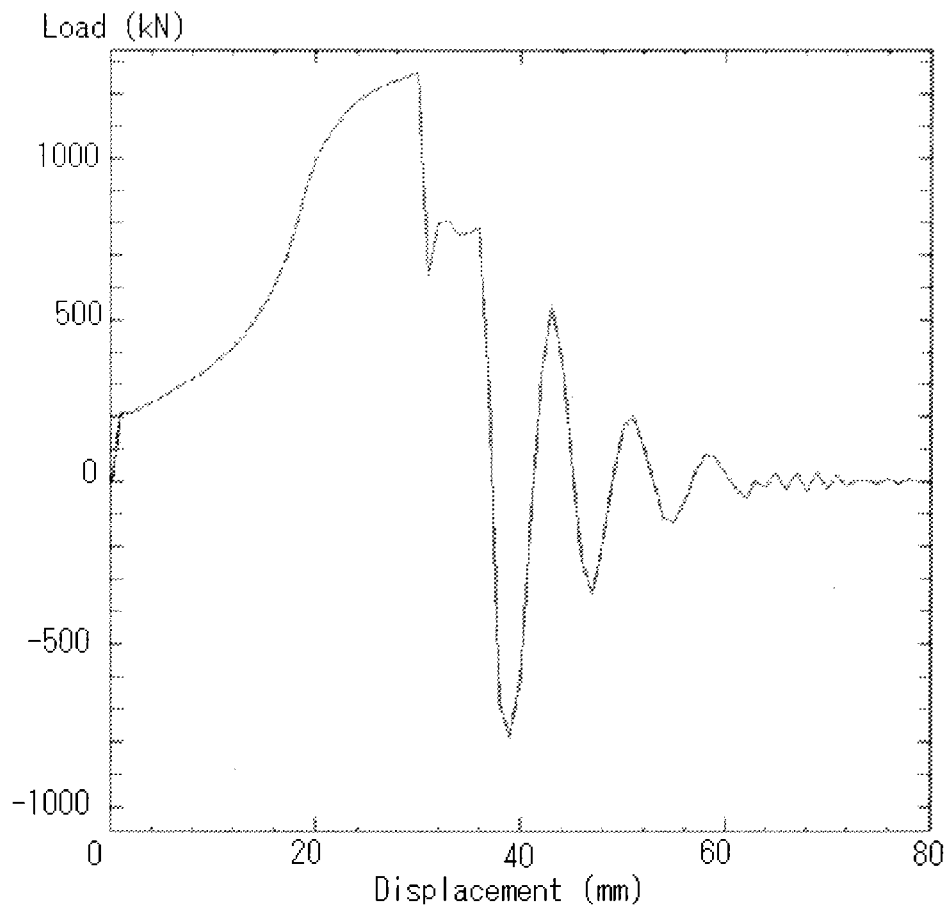
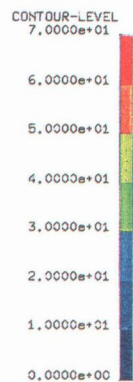
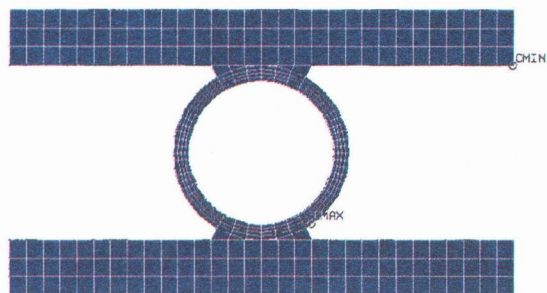
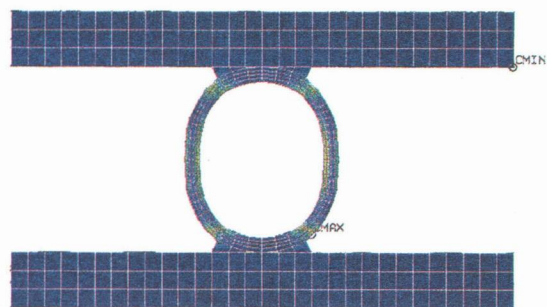


図-3.3.36 静的引張載荷における荷重-変位曲線 (タイプC)

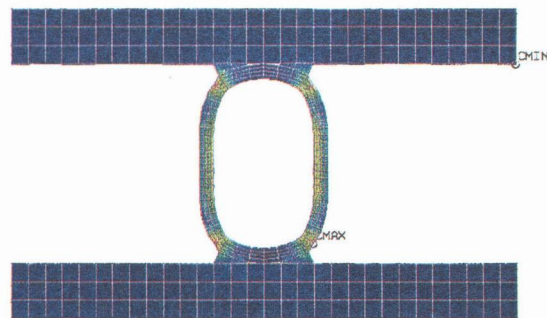
■ 初期状態



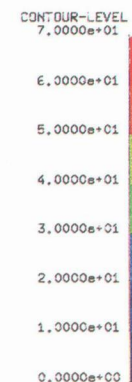
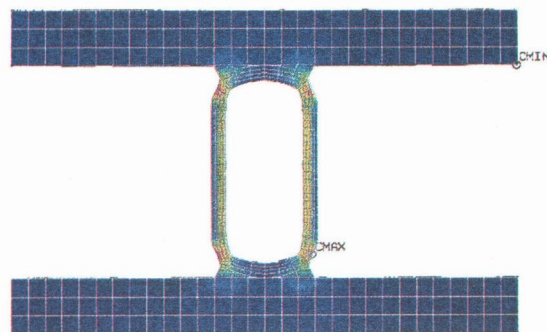
■ 変位 5 mm



■ 変位 10 mm



■ 変位 15 mm



■ 変位 20 mm

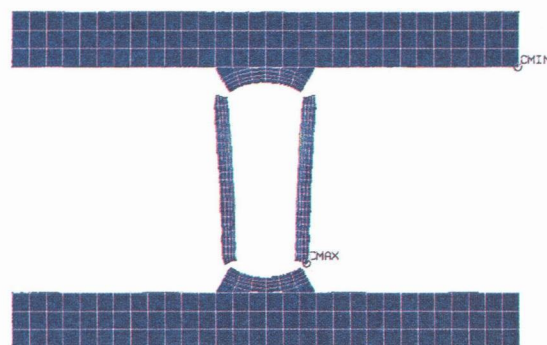


図-3.3.37 a 静的引張载荷における変形形状の推移 (タイプB)

図-3.3.37 b 静的引張载荷における変形形状の推移 (タイプB)

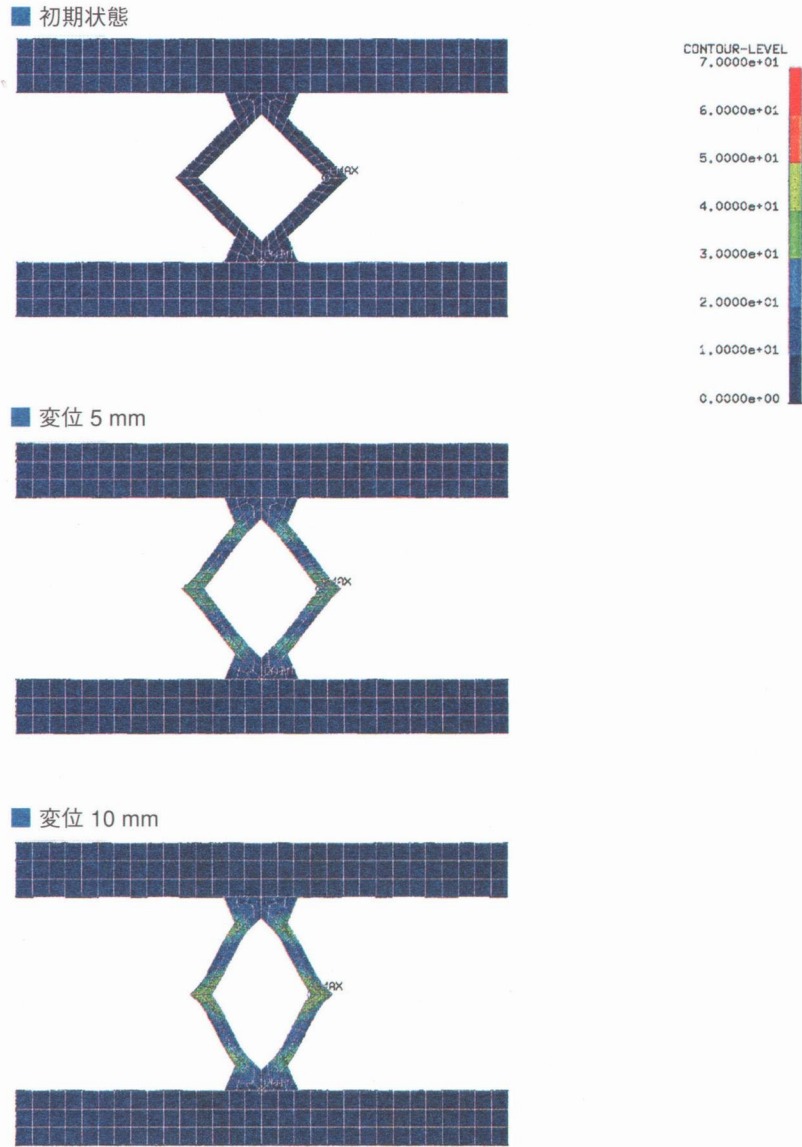


図-3. 3. 38 a 静的引張载荷における変形形状の推移 (タイプC)

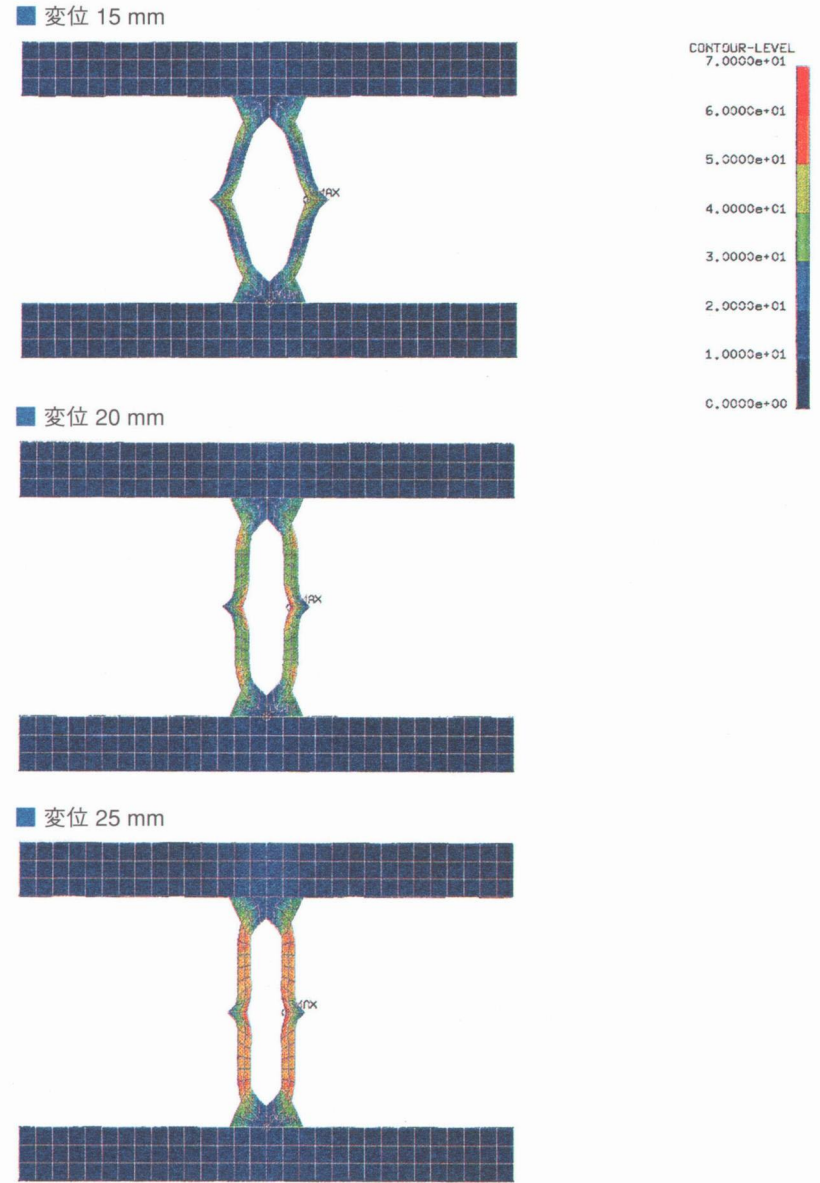
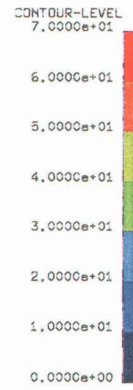
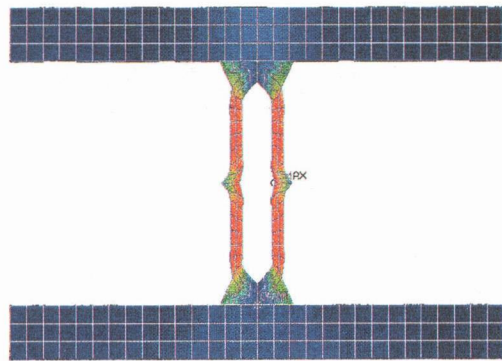
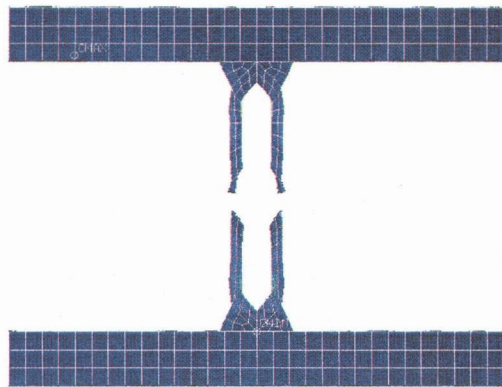


図-3. 3. 38 b 静的引張载荷における変形形状の推移 (タイプC)

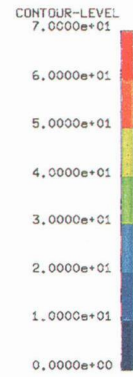
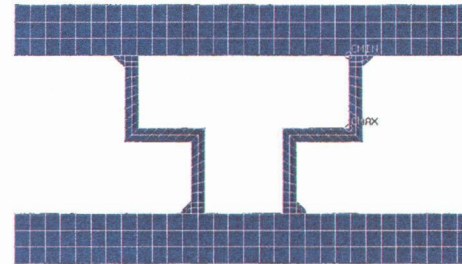
■ 変位 30 mm



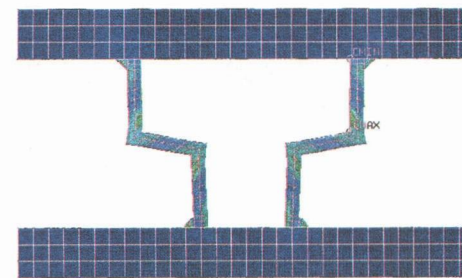
■ 変位 35 mm



■ 初期状態



■ 変位 5 mm



■ 変位 10 mm

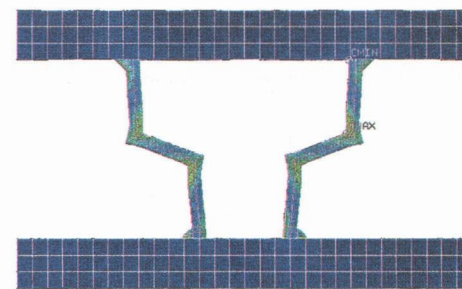
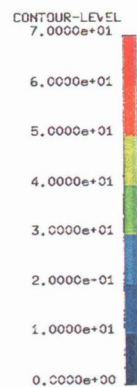
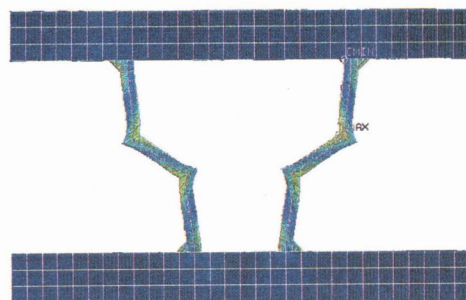


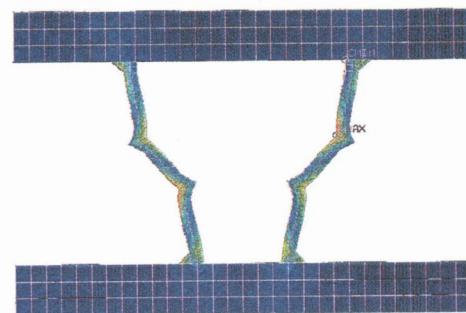
図-3. 3. 38 c 静的引張载荷における変形形状の推移 (タイプC)

図-3. 3. 39 a 静的引張载荷における変形形状の推移 (タイプE)

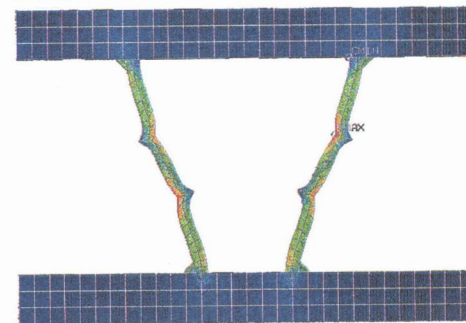
■ 変位 15 mm



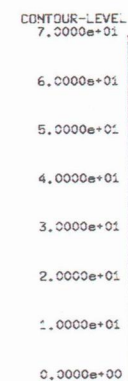
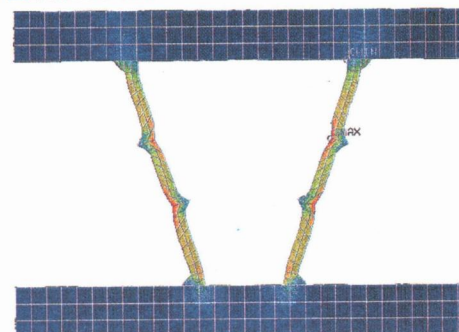
■ 変位 20 mm



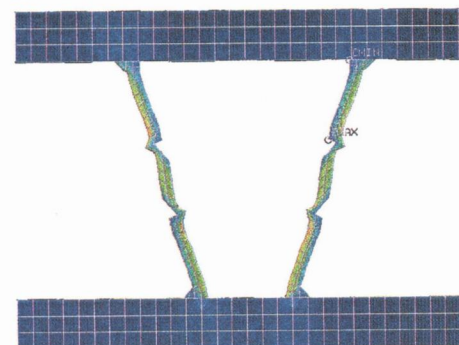
■ 変位 25 mm



■ 変位 30 mm



■ 変位 35 mm



■ 変位 40 mm

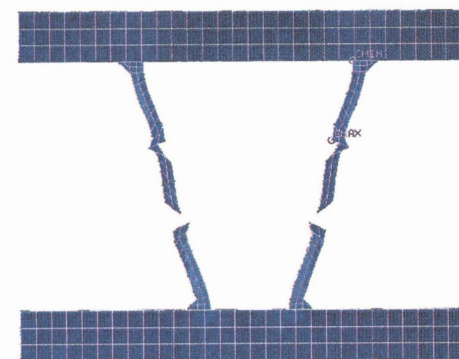
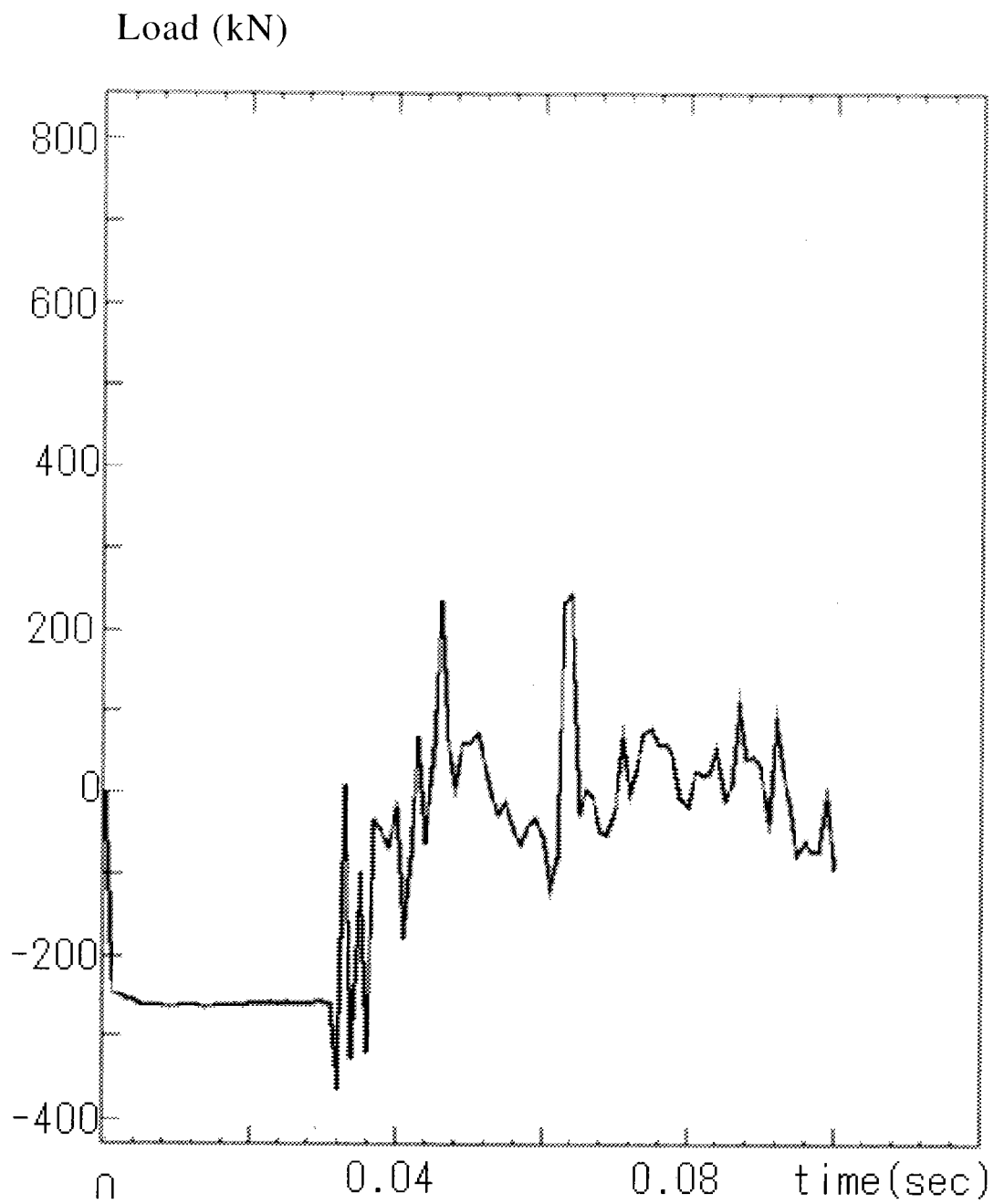


図-3.3.39 b 静的引張载荷における変形形状の推移 (タイプE)

図-3.3.39 c 静的引張载荷における変形形状の推移 (タイプE)



図—3. 3. 40 衝撃载荷に対する荷重—時間線図 (タイプB)

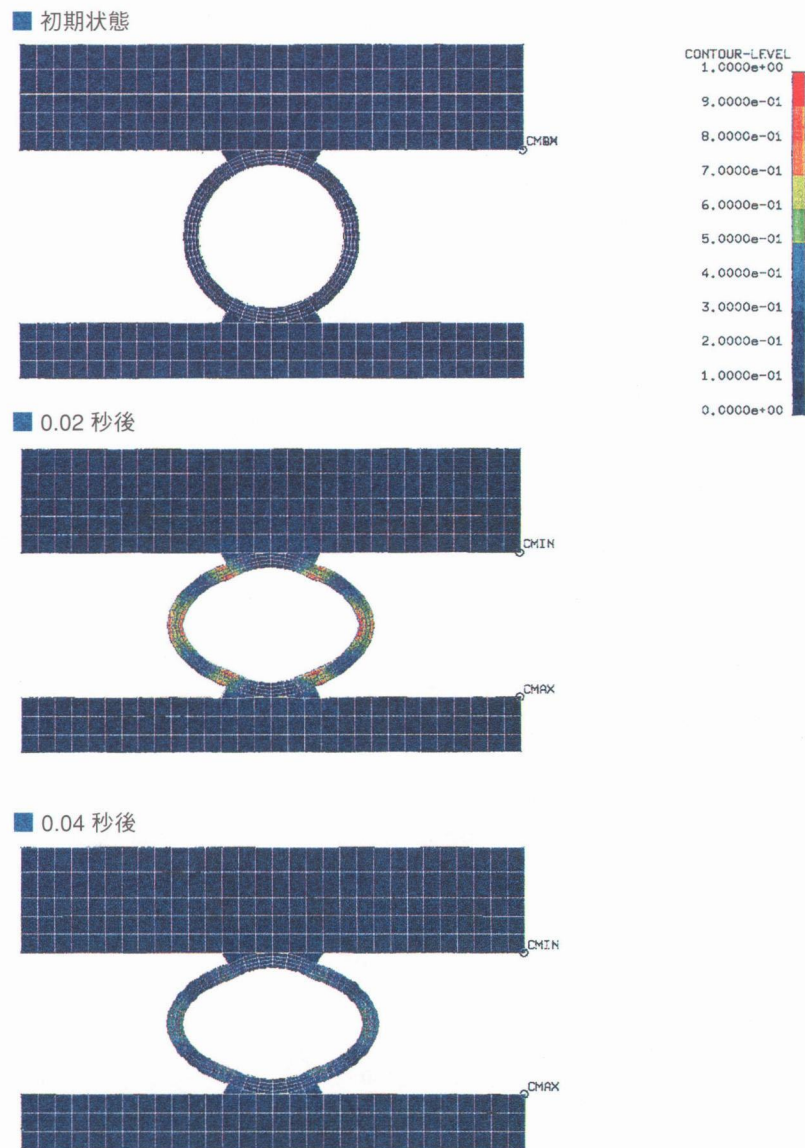


図-3.3.41 a 衝撃载荷における変形形状の推移 (タイプB)

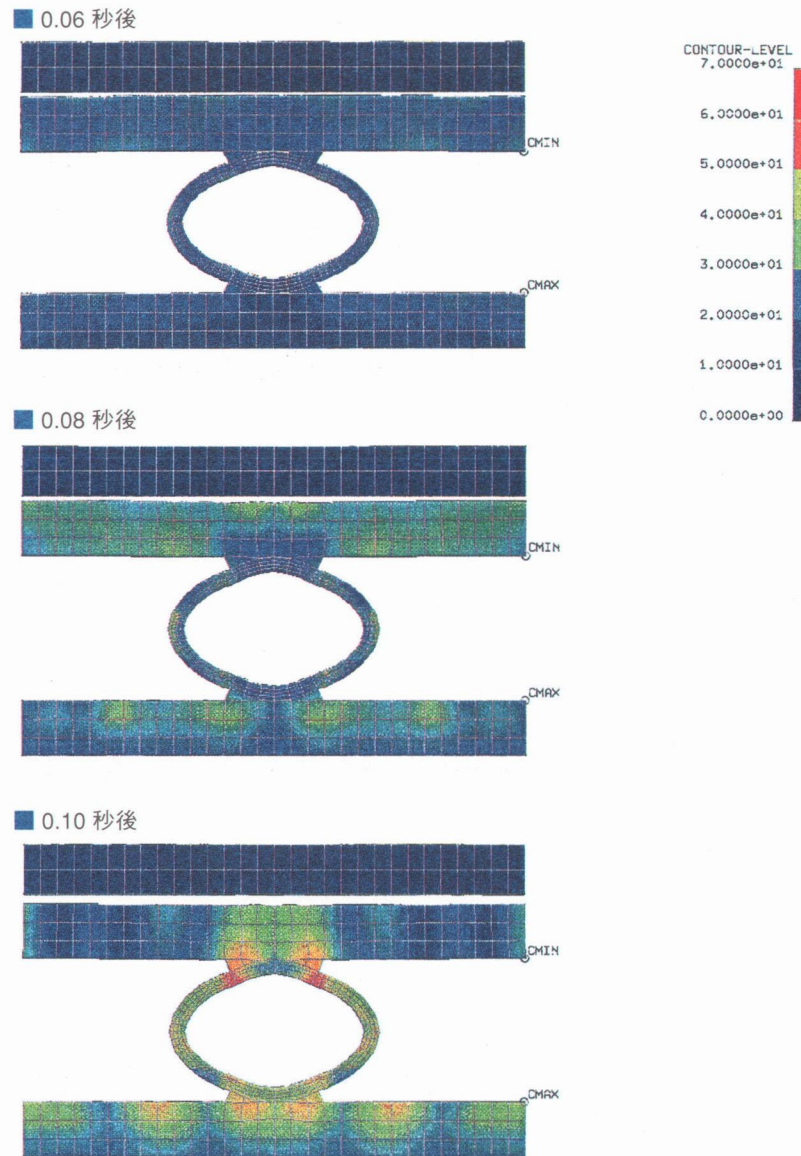
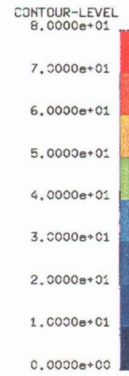
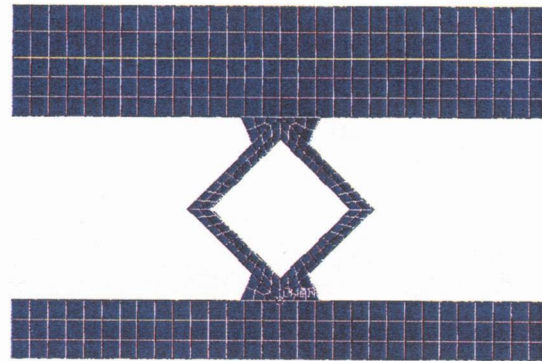
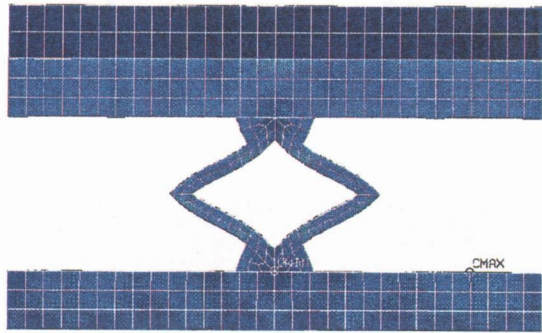


図-3.3.41 b 衝撃载荷における変形形状の推移 (タイプB)

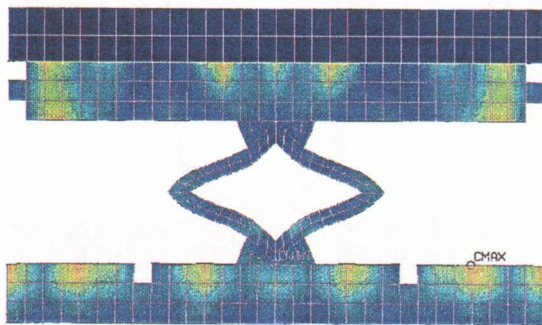
■ 初期状態



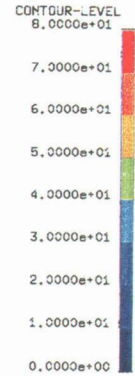
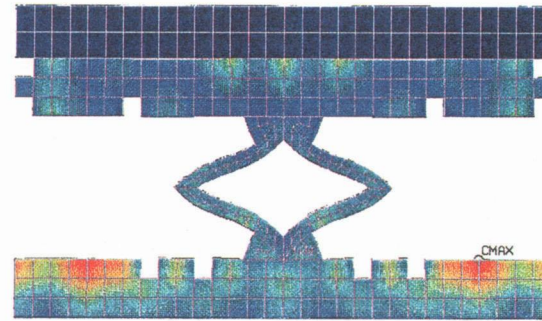
■ 0.02 秒後



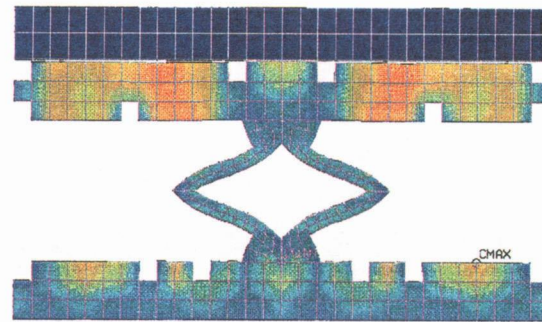
■ 0.04 秒後



■ 0.06 秒後



■ 0.08 秒後



■ 0.10 秒後

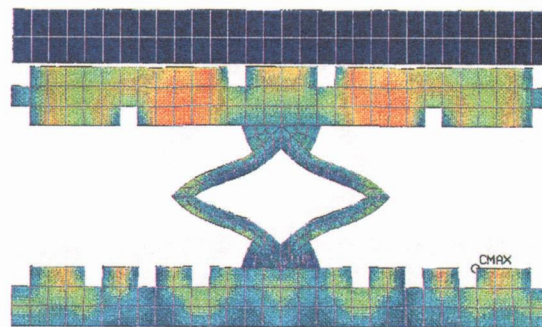


図-3.3.42 a 衝撃载荷における変形形状の推移 (タイプC)

図-3.3.42 b 衝撃载荷における変形形状の推移 (タイプC)





図-3.3.43 a 衝撃载荷における変形形状の推移 (タイプD)

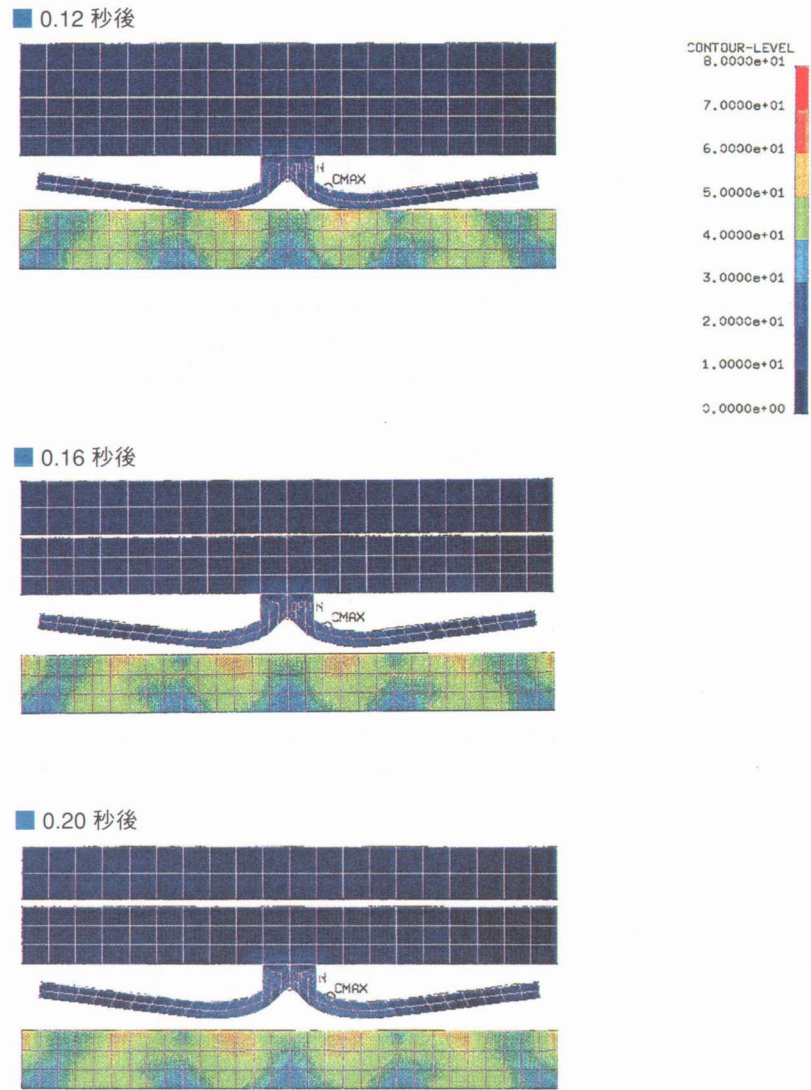


図-3.3.43 b 衝撃载荷における変形形状の推移 (タイプD)

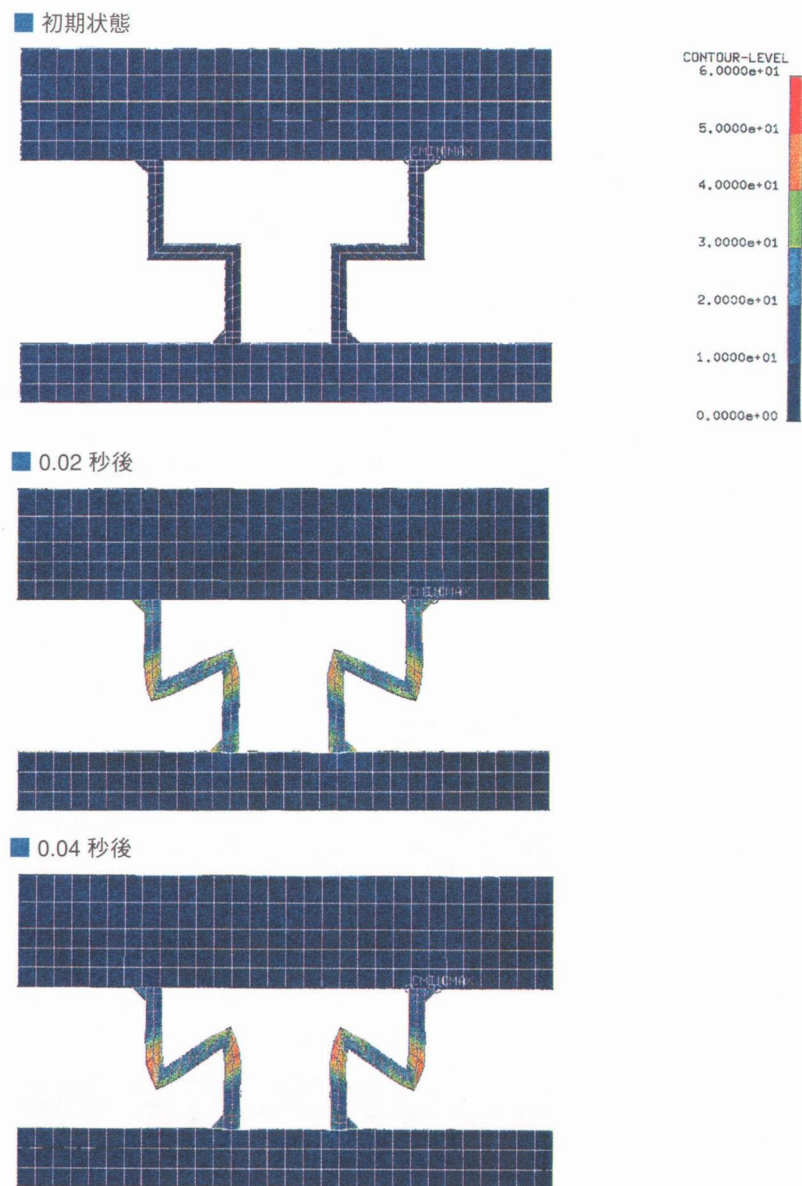


図-3. 3. 4 4 a 衝撃载荷における変形形状の推移 (タイプE)

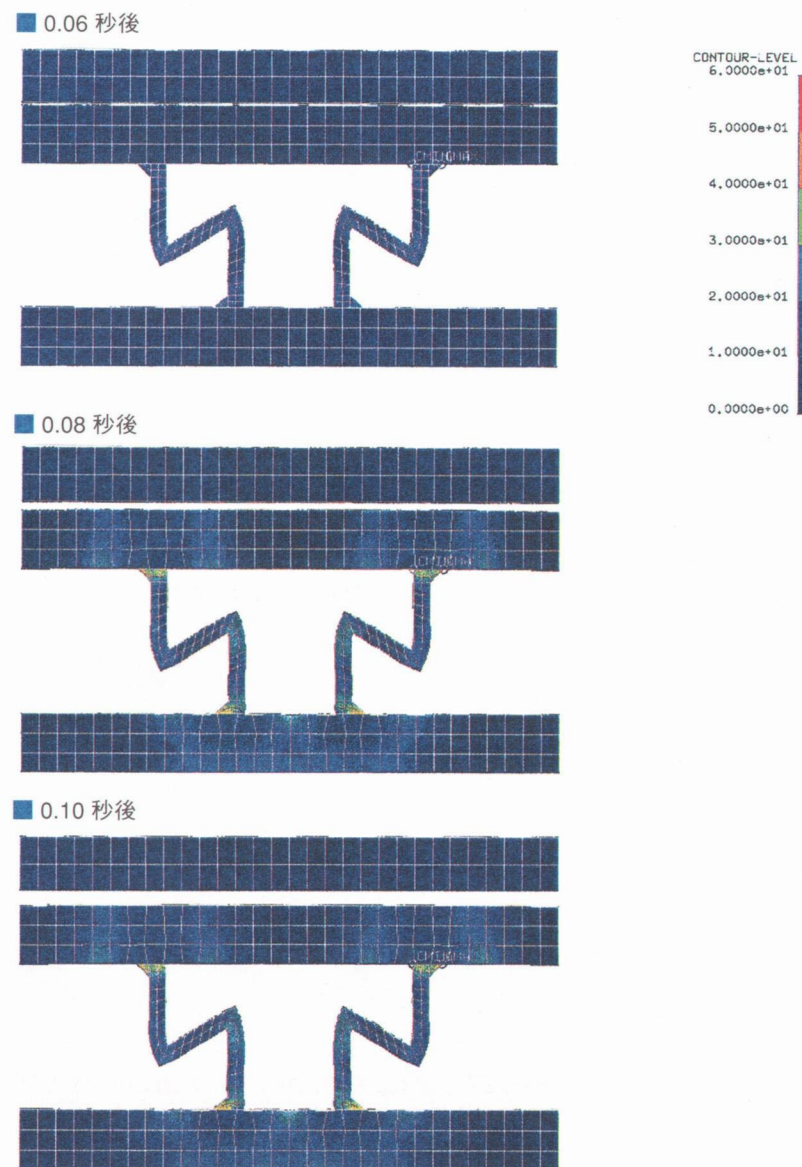


図-3. 3. 4 4 b 衝撃载荷における変形形状の推移 (タイプE)

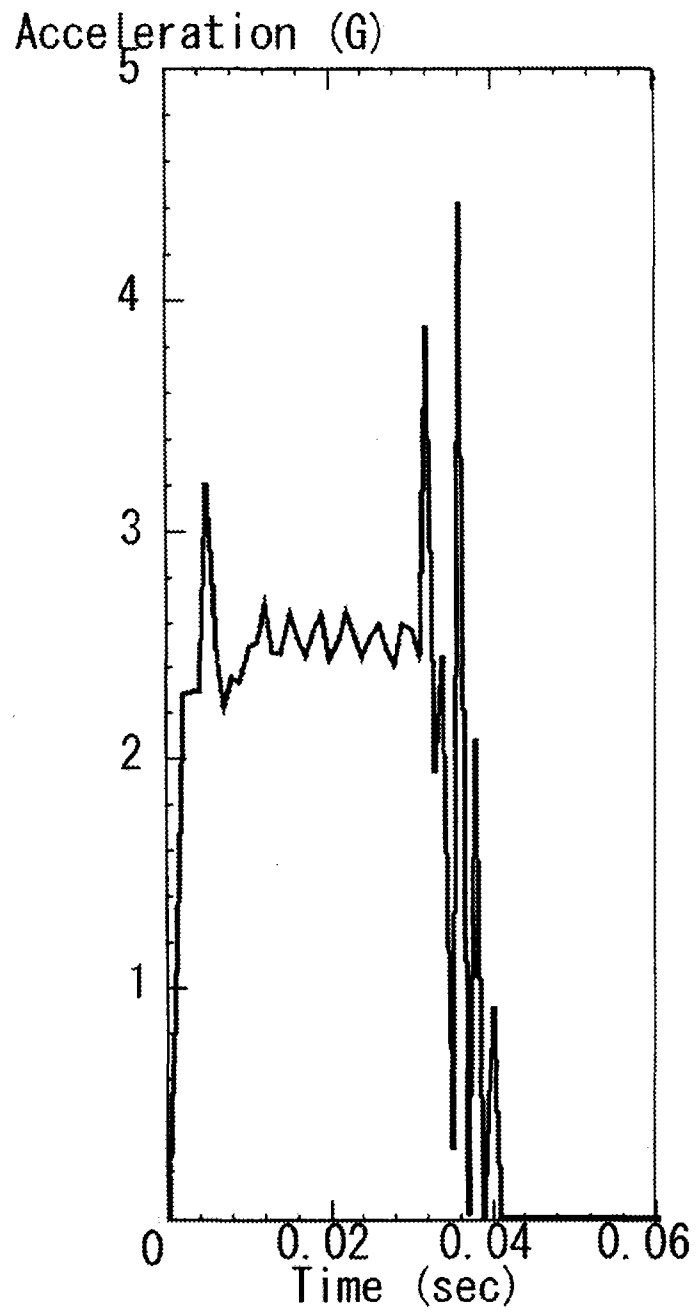


図-3.3.45 衝突体の加速度の時刻歴 (タイプB)

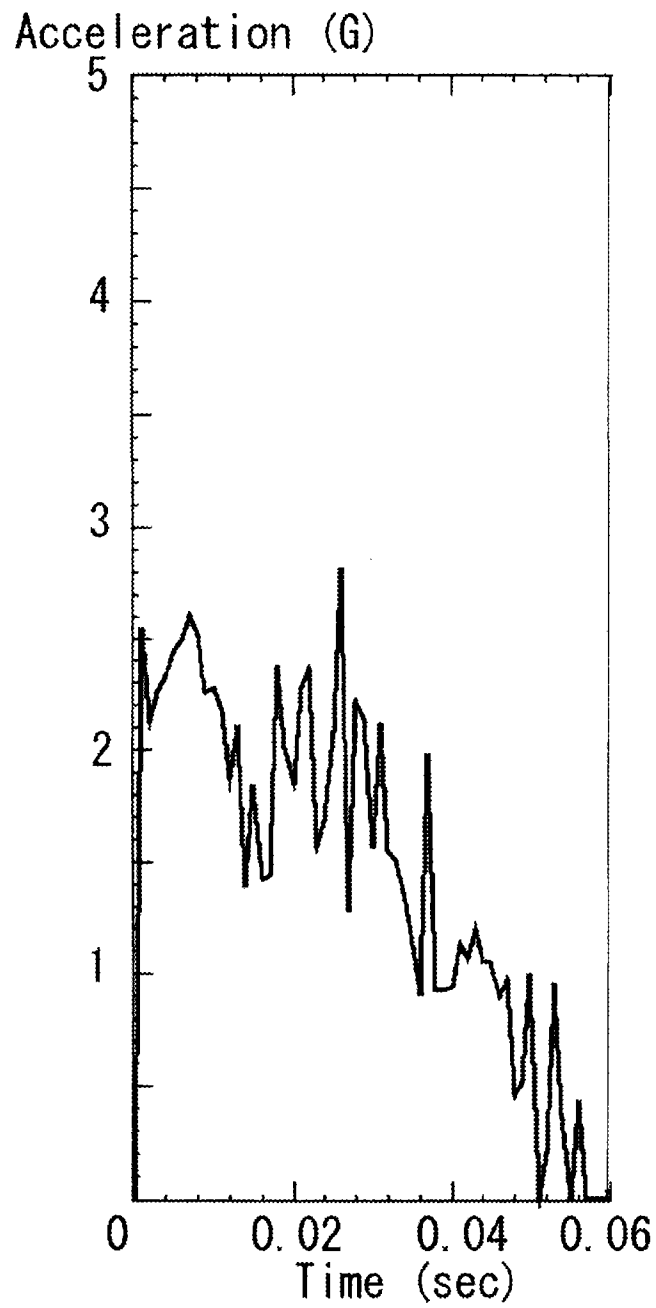


図-3.3.46 衝突体の加速度の時刻歴(タイプC)

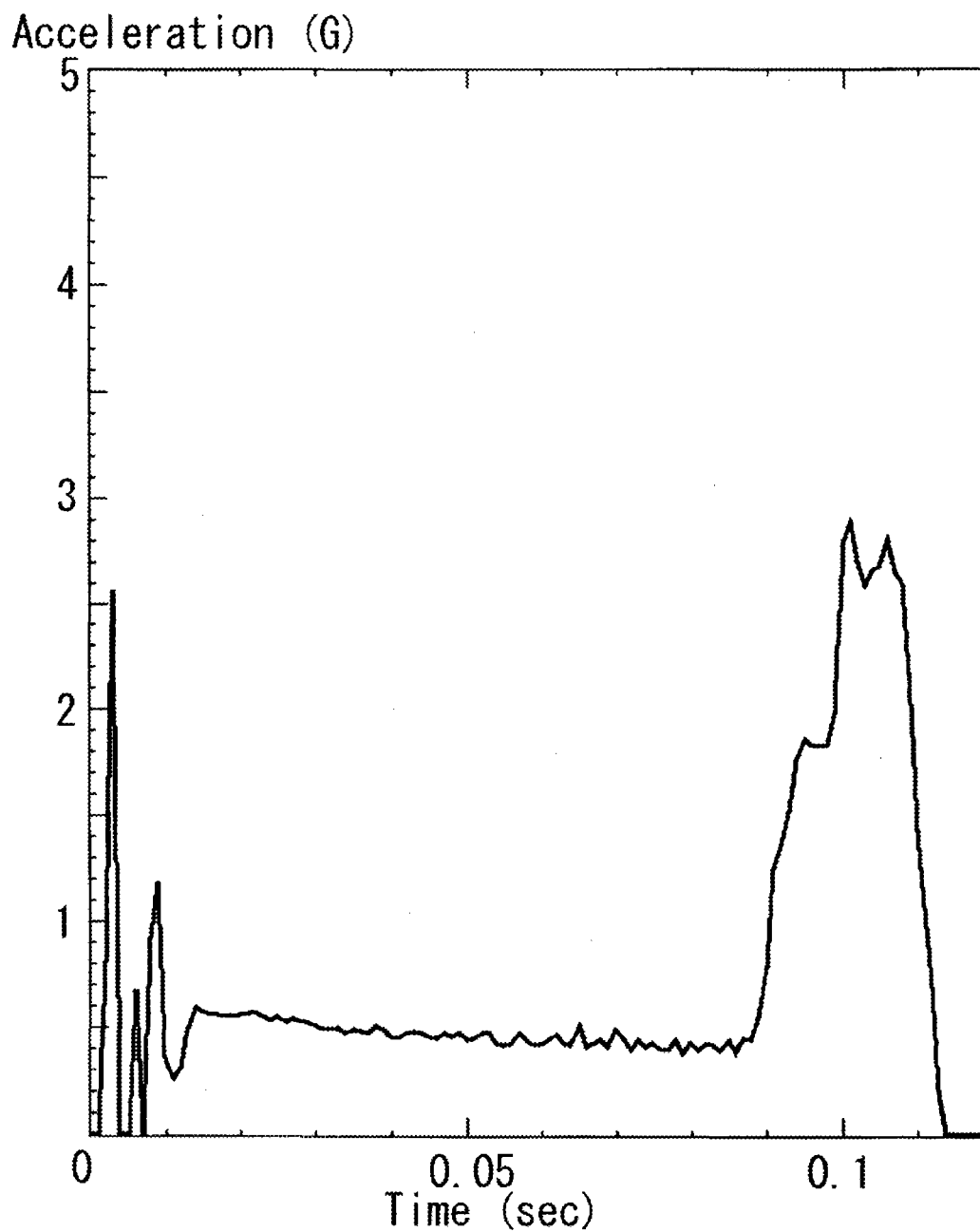


図-3.3.47 衝突体の加速度の時刻歴 (タイプD)

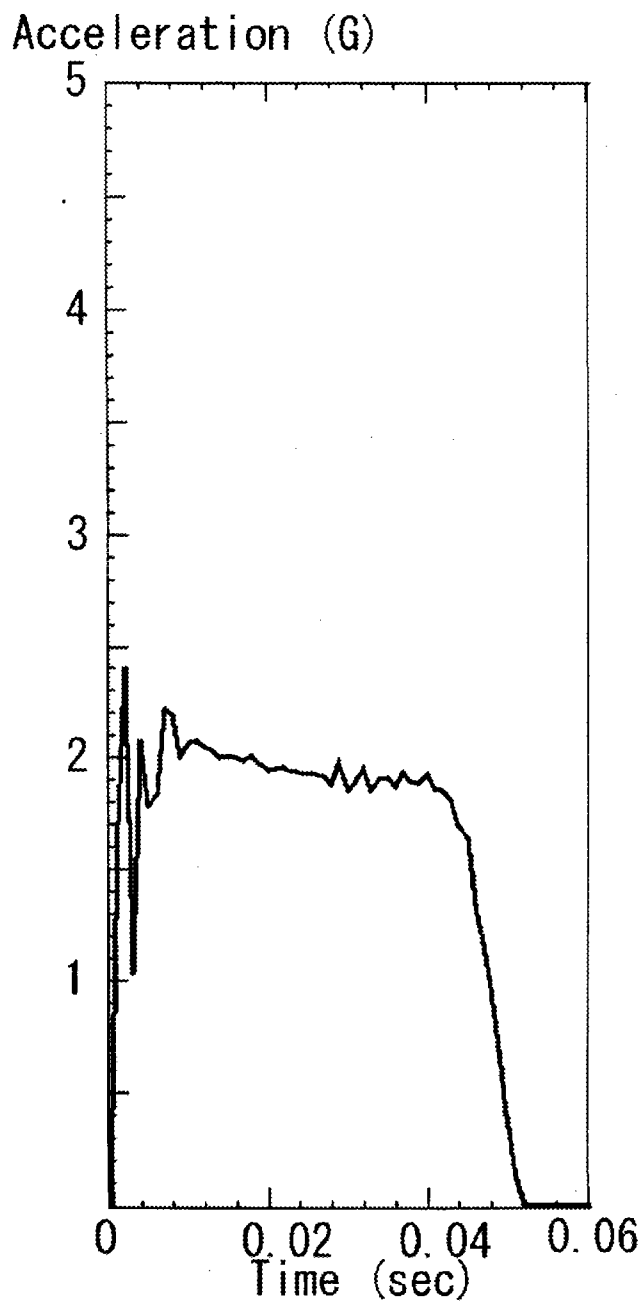


図-3. 3. 48 衝突体の加速度の時刻歴 (タイプE)

(f) 考察

a) FEM解析によるシミュレーションの精度

静的圧縮荷重に対する荷重-変位関係および変形形状の推移について、実験結果と解析結果を比較した。タイプBの場合については、くびれ変形が生じるときに荷重が一旦低下する現象は解析では再現されていない。この原因については現状では不明であるが、メッシュ分割の影響、幾何的非線形性の評価の妥当性、材料特性の影響などが無いとはいえない。しかしながら、その他については、少なくとも荷重-変位のレベルにおいて解析結果は良好に実験結果をシミュレートしており、解析の妥当性は示すことができたと考えている。

b) エネルギー吸収量

測定された荷重-変位関係から、それぞれの試験体のエネルギー吸収量を変位5mmごとに計算した。なお、エネルギー吸収量は下式で計算した。

$$E = \sum \{ (\delta_{i+1} - \delta_i) \times (P_{i+1} + P_i) / 2 \} \quad (i: \text{荷重ステップ})$$

各タイプ別のエネルギー吸収量を計算した結果を表-3.3.19に示す。

また、エネルギー吸収量の比較を図-3.3.49に示す。

表-3.3.19 エネルギー吸収量の計算結果

	変位 (mm)	エネルギー吸収量 E (J・mm)					
		10	15	20	25	30	35
タイプA	シリーズ1	23	61	136	311	723	—
	シリーズ2	10	25	53	108	239	—
	シリーズ3	15	37	75	154	305	—
	平均	16	41	88	191	422	—
タイプB	シリーズ1	185	303	414	526	631	731
	シリーズ2	189	306	419	529	634	732
	シリーズ3	206	324	437	544	648	740
	平均	194	311	423	533	638	734
タイプC	シリーズ1	170	278	383	486	583	682
	シリーズ2	170	278	384	489	588	689
	シリーズ3	174	286	395	502	607	711
	平均	171	281	387	493	593	694
タイプD	シリーズ1	31	57	81	105	126	144
	シリーズ2	36	58	79	99	118	136
	シリーズ3	34	51	69	85	103	119
	平均	33	55	77	96	116	133
タイプE	シリーズ1	110	177	238	292	341	—
	シリーズ2	106	172	231	284	330	—
	シリーズ3	125	197	263	319	373	—
	平均	114	182	244	298	348	—

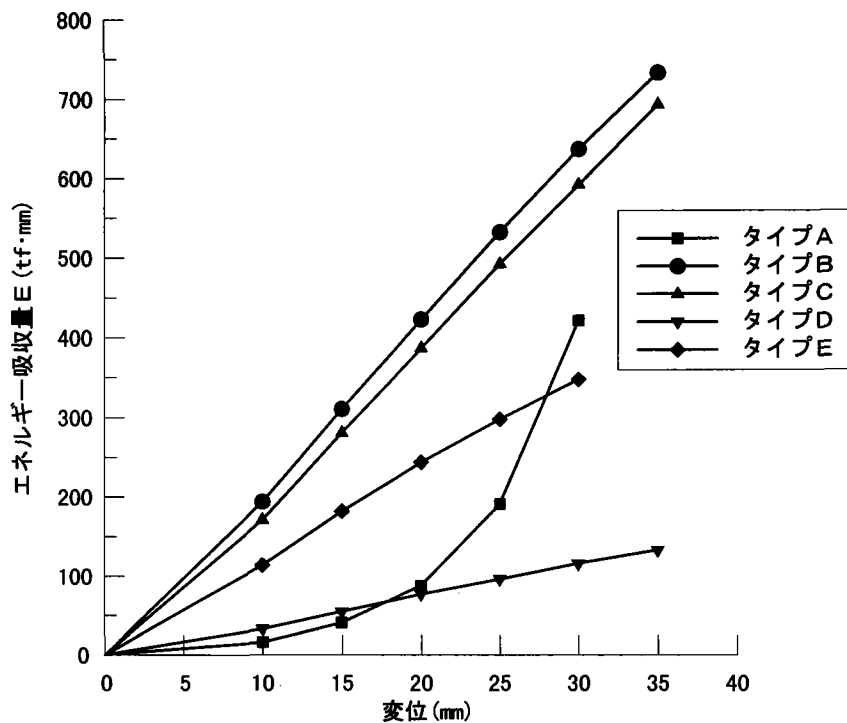


図-3.3.49 エネルギー吸収量の比較

計算結果より、タイプAは変位0～20mm間でのエネルギー吸収量は小さく、荷重が急激に立ち上がる変位20mm以上でエネルギー吸収量が大きくなっている。この部分では大きな力が作用しており、必ずしも緩衝効果が大いとはいえない。これに対してタイプBおよびタイプCのエネルギー吸収量は変位に比例している。このことはコンスタントなエネルギー吸収を示しており、またその値も大きく変位0～30mm間の平均値ではタイプAの1.5倍程度あり緩衝効果は大いといえる。タイプEのエネルギー吸収量も、変位に比例し0～25mm間での値もタイプBおよびタイプCほどではないが、タイプAよりも大きい。

タイプDのエネルギー吸収量は変位に比例してはいるが、値が小さく緩衝効果は他に比べ劣るといえる。

c) 最大荷重

① 実験値

実験で測定された各試験体の最大荷重、およびタイプ別最大荷重の平均値を表-3.3.20に示す。

表-3.3.20 最大荷重(実験値)  $P_{max}$ (tf)

試験体	タイプB	タイプC	タイプD	タイプE
シリーズ1	24.23	22.40	5.46	13.98
シリーズ2	24.04	22.51	4.98	13.79
シリーズ3	24.26	23.00	4.26	15.36
平均値	24.18	22.64	4.90	14.38



## ② 計算値

鋼製緩衝装置のエネルギー吸収量は荷重－変位曲線で囲まれる面積で算出される。

このうち変位量については、部材形状より設定できることから、最大荷重を算出することができれば、エネルギー吸収量を計算によって求める事が可能となる。ここでは、エネルギー吸収量の大きいタイプBタイプCおよびタイプEの鋼製緩衝装置について、最大荷重の算出を試みる。

### i) タイプBの最大荷重の計算値

- ・鋼管の片側部分に作用するモーメントM

$$M = \frac{1}{3} \cdot P \cdot e$$

ただしP：全荷重

e：溶接ビート端部から鋼管の中央断面の中心軸までの距離（=12.0mm）

- ・鋼管の片側部分の全塑性モーメントMp

$$M_p = 2 \cdot d \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{t}{4} \cdot \sigma_{\max}$$
$$= 2 \times 180 \times 3 \times 1.5 \times 64.8 = 105.0 \text{ tf}\cdot\text{mm}$$

ただしd：鋼管の長さ（=180mm）

t：鋼管の板厚（=6mm）

$\sigma_{\max}$ ：鋼棒の引張試験で得られた真応力の最大値（=64.8kgf/mm<sup>2</sup>）

- ・最大荷重Pmax

$$P_{\max} = \frac{3 \cdot M_p}{e} = \frac{3 \times 105.0}{12.0} = 26.25 \text{ tf}$$

### ii) タイプCの最大荷重の計算値

- ・角形鋼管の片側部分に作用するモーメントM

$$M = \frac{1}{4} \cdot P \cdot e$$

ただしP：全荷重

e：溶接ビート端部から鋼管の中央断面の中心軸までの距離（=18.2mm）

- ・鋼管の片側部分の全塑性モーメントMp

$$M_p = 2 \cdot d \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{t}{4} \cdot \sigma_{\max}$$
$$= 2 \times 180 \times 3 \times 1.5 \times 64.8 = 105.0 \text{ tf}\cdot\text{mm}$$

ただしd：鋼管の長さ（=180mm）

t：鋼管の板厚（=6mm）

$\sigma_{\max}$ ：鋼棒の引張試験で得られた真応力の最大値（=64.8kgf/mm<sup>2</sup>）

- ・最大荷重Pmax

$$P_{\max} = \frac{4 \cdot M_p}{e} = \frac{4 \times 105.0}{18.2} = 23.08 \text{ tf}$$

iii) タイプEの最大荷重の計算値

・片側部分に作用するモーメントM

$$M = \frac{1}{4} \cdot P \cdot e$$

ただしP：全荷重

e：溶接ビート端部から鋼管の中央断面の中心軸までの距離 (= 29.0mm)

・鋼管の片側部分の全塑性モーメントMp

$$M_p = 2 \cdot d \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{t}{4} \cdot \sigma_{\max}$$

$$= 2 \times 180 \times 3 \times 1.5 \times 64.8 = 105.0 \text{ tf}\cdot\text{mm}$$

ただしd：鋼管の長さ (= 180mm)

t：鋼管の板厚 (= 6mm)

$\sigma_{\max}$ ：鋼棒の引張試験で得られた真応力の最大値 (= 64.8kgf/mm<sup>2</sup>)

・最大荷重Pmax

$$P_{\max} = \frac{4 \cdot M_p}{e} = \frac{4 \times 105.0}{29.0} = 14.48 \text{ tf}$$

iv) 最大荷重の実験値との比較計算値

最大荷重の計算値と実験値の平均値の比較を表-3.3.21に示す。

表-3.3.21 最大荷重の比較 Pmax(tf)

	タイプB	タイプC	タイプE
実験値	24.18	22.64	14.38
計算値	26.25	23.08	14.48

実験値と計算値の差はどれも1割以下であり、比較的よく一致した。

d) 緩衝装置の変位置

衝撃解析の結果より、緩衝装置の変位置は、衝突体の運動エネルギーと緩衝装置の内部仕事を等価とおくことによって簡便に計算でき、設計も容易になる。ここで、緩衝装置の内部仕事は静的圧縮試験の結果を簡略化して降伏荷重P×変位置 $\delta$ とした。実際には歪速度効果のため降伏荷重は上昇するが、歪速度効果を考慮しない場合安全側の設計となる。タイプBの解析では歪速度は約10~151/secで降伏点は1.1倍程度上昇した。

### e) 製作コストの比較

ゴムを規準とした場合の各試験体の製作コストの比率を表-3.3.22に示す。

なお、製作コストの算出は以下の範囲で行った。

ゴム製緩衝材：ゴム本体と上下鋼板の材料費。上下部工取付部材は含まず。

鋼製緩衝材：鋼材本体と上下鋼板の材料費および溶接費。上下部工取付部材は含まず。

表-3.3.22 各試験体の製作費の比率

試験体	タイプA	タイプB	タイプC	タイプD	タイプE
製作費	1.0	0.8	0.7	0.5	1.5

本実験に使用した試験体の製作費用の比較では、タイプE以外はゴム製緩衝材（タイプA）と比べて安くなっている。実際には鋼製緩衝材をどういった荷重で設計するかによって大きさが変わるため一概にはいえないが、鋼製緩衝部材は、構造も単純で市販の型钢を用いており、比較的安価に製作出来るものと思われる。

### (g) まとめ

ゴムの試験体については、設計許容支圧応力度 $120\text{kgf/cm}^2$ までの試験では、ゴムに多少の残留変位が残る程度であり、さらにその5倍程度の支圧応力度を与えても損傷は見られなかった。このことから現在の許容応力度はほぼ妥当なレベルにあると思われるが、荷重-変位関係を見ると、支圧応力度 $120\text{kgf/cm}^2$  ( $27.0\text{tf}$ ) では、荷重が急激に立ち上がる範囲に入っており、そこまでのエネルギー吸収量は小さい。全体を見てもいずれのシリーズも荷重は変位が増えるにつれ急激に立ち上がり、エネルギー吸収量は小さく、緩衝効果は小さいと思われる。また、荷重-変位関係はシリーズ毎のばらつきがやや大きい、これには以下の要因が影響していると推測される。

1. ゴムの上下面と試験機の接触面の摩擦状態の不均一。
2. ゴム材料のばらつき。
3. 載荷速度の違い。

このうち摩擦力の影響については、ゴムが変形するに従いゴムの側面まで試験機の定盤に接触するようになり、接触面の摩擦力によって変形が拘束されてしまうような状態になった。摩擦力は表面の状態によってばらつきが大きいので、実験結果にもその影響が出たものと考えられる。

鋼製試験体の降伏荷重および圧壊までの変形量は、試験体のタイプにより違いがあったが、どのタイプにおいても塑性後も荷重を維持したまま変形が進行し、特にタイプBおよびタイプCでは荷重および変位量ともに大きく、緩衝効果を期待出来る結果となった。また、タイプBは上下の鋼板へ取り付けるための溶接脚長が、実際は大きめになっており、その影響が出ている。別の取り付け方をすれば違った変形状態になることも考えられる。タイプCも同様のことはいえるが、溶接の影響は試験体Bほど大きくないと思われる。他の2タイプについては、タイプDは変形性能が優れているが、荷重がタイプBおよびタイプCの約 $1/5$ と低く、またタイプEは変形量が4タイプの中で一番小さかった。これ

らもあえて荷重や変位を抑えたい場合に応用できる可能性はある。各試験体ともにシリーズ毎のばらつきが少なく再現性があり、実橋への適用においても十分信頼できるものと思われる。さらに最大荷重は、実験値と簡易式による計算値が比較的良好一致し、実橋に適用する場合の設計も比較的容易に行えるものと思われる。

また、タイプAとタイプBの大きさを比較した場合、タイプAの平面寸法150x150mmに対して、タイプBはつぶれた後の寸法でも180x100mm程度（面積で8割程度）であるので、ゴムに比べて鋼製緩衝材のスペース的な問題は少ない。さらにコスト面の比較からも、鋼製緩衝材はゴム製緩衝材に比べ有利と思われる。以上より鋼製緩衝部材の実橋への適用の可能性は十分有るものと思われる。

実験に用いた鋼製緩衝材の有限要素解析を実施したが、実験結果との比較により少なくとも荷重－変位曲線および変形形状については、解析結果はきわめて正確に実験結果をシミュレートしている。このことにより、本解析と同様な解析により鋼製緩衝装置の荷重－変位曲線を予測することが可能であると考えられる。

今回の実験および解析では、緩衝材の単体の特性を把握したのみであるが、全体系モデルによる解析などを行うことにより、鋼製の緩衝材を実橋に適用するための最適な設計方法を探ることを今後の課題としたい。