高強度横拘束コンクリートの応力―歪関係における寸法効果に関する実験的研究

（13650626）

平成１３年度～平成１４年度科学研究費補助金（基盤研究（ｃ）（２））研究成果報告書概要

平成 16 年 3 月 31 日

研究代表者　田中仁史
（京都大学･防災研究所･地震災害研究部門）

平成１４年度科学研究費補助金実績報告書

研究種目　　基盤研究（C）（２）
研究機関　　平成１３年度　～　平成１４年度
研究番号　　13650626
研究課題名　高強度横拘束コンクリートの応力―歪関係における寸法効果に関する実験的研究

研究組織

研究代表者　：　田　中　仁　史　(京都大学･防災研究所･地震災害研究部門)
研究分担者　：　諸　岡　繁　洋　(京都大学･工学研究科･建築学専攻)
研究分担者　：　中　治　弘　行　(豊橋技術科学大学・工学部･建設工学科)

交付決定額　(配分額)　　　　　　　　　　　　　(金額単位：　千円)

	直接経費	間接経費	合　計
平成 13 年度	1,800	0	1,800
平成 14 年度	1,900	0	1,900
総　計	3,700	0	3,700

研究発表

（１）　学会誌等

疋田次峰、倉本　洋、田中仁史、中治弘行
「コンクリート一軸圧縮応力―ひずみ関係に及ぼす寸法効果の影響」
コンクリート工学年次論文集、第 24 巻・第 2 号、2002 年、pp.193-198

疋田次峰、田中仁史、中治弘行
「横拘束コンクリートの応力―歪関係における寸法効果に関する実験的研究
その１　実験概要と結果」
日本建築学会大会学術講演概要(関東)　C-2,　23004　2001 年、pp.7-8

中治弘行、田中仁史、疋田次峰、
「横拘束コンクリートの応力―歪関係における寸法効果に関する実験的研究
その２　寸法効果を考慮した横拘束コンクリートの応力―歪関係モデルの提案」
日本建築学会大会学術講演概要(関東)　C-2,　23005　2001 年、pp.9-10

HITOSHI TANAKA , TSUGUO HIKIDA AND HIROYUKI NAKAJI,

" THE SCALE EFFECTS ON THE REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH HIGH AXIAL LOAD"

Proceedings of The 3rd Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, pp.147-158, 2001, pp.147-158

研究成果による工業所有権の出願・取得状況

なし

研究課題

高強度横拘束コンクリートの応力-歪関係における寸法効果に関する実験的研究

1. 研究目的

現在日本では、高層鉄筋コンクリートアパートの建設が盛んで、その耐震設計においては、高軸力を受ける大断面柱部材の地震時力学的挙動の正確な把握が急務となっている。しかしながら、従来は、通常の試験機能力の限界から、縮尺1/5といった縮小モデル試験体を使った準静的試験が行われるのが、一般的であり、実際の大断面柱の地震時動的挙動については、推測の域をでないのが実情である。1999年改定となった日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準」では、通常の設計におけるコンクリート設計基準強度の上限値が、従来の36MPaから60MPaまで大幅に引き上げられたが、同規準書にも解説されているようにまだまだ実績が不十分のため、60MPa程度からそれを超えるような高強度コンクリートを使用した場合についての評価が、今後の重要課題の一つとなっている。

本研究では、高層アパートなど高軸圧を受ける鉄筋コンクリート柱の地震時曲げ耐力評価のための横拘束コンクリートの応力-歪関係について、豊橋技術科学大学の島津製10Mサーボを用いて実験的評価を行ったものである。その実験概要および結果の概要については、本報告書の末尾に添付した学会誌掲載論文等を参照されたい。

2.実験概要

本節では、平成１４年度に行われた実験概要を述べる。平成１３年度の実験概要およびその成果については、日本建築学会大会学術講演概要(関東)　C-2,　2001年、pp.7-10に掲載の「横拘束コンクリートの応力―歪関係における寸法効果に関する実験的研　その１　実験概要と結果、その２　寸法効果を考慮した横拘束コンクリートの応力―歪関係モデルの提案」を参照されたい。

本実験では、無筋及び高強度横補強筋を用いた断面50cm角、29.4cm角、24.4cm角、19.4cm角のコンクリート角柱の中心軸圧試験を行い、それぞれの圧縮応力―歪関係を求め、寸法効果による無筋及び横拘束コンクリートの強度及び靭性の変化に対する評価を目的としている。本実験では、

① 無筋及び横拘束コンクリートの圧縮応力―歪関係を求めるため、試験体は無筋（以後、無筋タイプと表記）のもの及び横補強筋で横拘束したもの（以後、横拘束タイプと表記）を用いた。また、横補強筋量の違いによる強度及び靭性への影響を評価するため、横補強筋のコアコンクリートに対する体積比として 1.5%、2.0%、2.5%（以後、1.5%、2.0%、2.5%タイプと表記）の3種類を採用した。

② 寸法効果評価のため、試験体サイズは柱試験体断面を試験機の最大容量の関係から50cm角、29.4cm角、24.4cm角、19.4cm角の4種類を用いた。

③ 1999 年度改定となった日本建築学会「コンクリート構造計算規準」で、通常の設計に

おけるコンクリート設計基準強度の上限値が、従来の 36MPa から 60MPa まで大幅に引き上げられたことから、試験機の最大容量の関係から 50cm 角に関しては 20MPa を、29.4cm 角、24.4cm 角、19.4cm 角に関してはコンクリートの圧縮強度を 50MPa とした。
以上の 3 点を目的とした。

3. 実験変数

実験は無筋タイプの試験体、続いて横拘束タイプの試験体の順に中心軸圧試験を行った。無筋タイプの試験体では、単調載荷による圧縮応力―歪関係を求める。横拘束タイプの試験体に関しては、無筋タイプで得られた圧縮応力―歪曲線の履歴を考慮して弾性域・歪軟化領域と共に繰り返し載荷を行った。また、載荷速度に関しては、第 2 章 **2.3.** 節に述べるように、圧縮載荷時の応力―歪曲線の形状は、コンクリートの品質が同じであっても載荷速度又は歪速度によって相違することから、載荷速度は応力―歪レベルにおいて各シリーズの試験体で同条件となるように制御ソフトウェアの設定を行った。

前述した本実験の目的に伴い、実験変数は**表 3-1** に示す角柱試験体断面寸法、コンクリートの圧縮強度、横補強筋量とした。

柱試験体断面寸法は、50cm 角、29.4cm 角、24.4cm 角、19.4cm 角としそれぞれ無筋タイプ、1.5%、2.0%、2.5%タイプと 4 種類ずつ作成した。公称コンクリート圧縮強度は試験機の最大容量の関係から、50cm 角の試験体は 20MPa とし、29.4cm 角、24.4cm 角、19.4cm 角の試験体は 50MPa である。

表 3-1 実験変数

試験体寸法 (cm)	50×50×100
	29.4×29.4×58.8
	24.4×24.4×48.8
	19.4×19.4×38.8
横拘束筋の配筋量 (%)	無筋
	1.5
	2.0
	2.5
公称コンクリート圧縮強度 (MPa)	20 (50cm 角)
	50 (29.4cm 角、24.4cm 角 19.4cm 角)

3.1. 試験体

3.1.2 試験体の種類

試験体の種類は、50cm 角シリーズ、29.4cm 角シリーズ、24.4cm 角シリーズ、19.4cm 角シリーズの 4 種類である。また、各シリーズに無筋タイプ、1.5%、2.0%、2.5%タイプと 4 種類用意した。各断面シリーズにおける各横拘束タイプに配筋される横補強筋は、寸法効果を考慮して、体積比が同等になるように配筋を行った。

試験体寸法及び配筋、歪ゲージの貼付位置は**図 3-1**、**図 3-2** に示す。各シリーズにおける体積比、試験体断面寸法は**表 3-2** に、試験体本数、各試験体のφ10cm シリンダー強度は、**表 3-3** に別途示す。

3.1.3 50cm 角シリーズ

試験体寸法は、幅 50cm 角の断面を持つ高さ 100cm である（**図 3-1（a）**参照）。配筋は前述したように寸法効果を考慮し、D16 の異形鉄筋を用い突合せ溶接を行った。また、横補強筋の組み立て筋としてφ6mm の丸鋼をその隅角部に 4 本配筋した。なお、試験体を載荷装置にセッティングするため、無筋タイプ、横拘束タイプそれぞれの試験体に M16 六角長ナットに M16 の全ねじを通した吊り上げ専用治具を埋め込んだ。

3.1.4 29.4cm 角シリーズ

試験体寸法は、幅 29.4cm 角の断面を持つ高さ 58.8cm である（**図 3-1(b)**参照）。配筋は D10 の異形鉄筋を用い突合せ溶接を行った。また、横補強筋の組み立て筋としてφ6mm の丸鋼をその隅角部に 4 本配筋した。なお、試験体を載荷装置にセッティングするため、無筋タイプ、横拘束タイプそれぞれの試験体に M10 六角長ナットに M10 の全ねじを通した吊り上げ専用治具を埋め込んだ。

3.1.5 24.4cm 角シリーズ

試験体寸法は、幅 24.4cm 角断面を持つ高さ 48.8cm である（**図 3-1(c)**参照）。配筋は D10 の異形鉄筋を用い突合せ溶接を行った。また、横補強筋の組み立て筋としてφ6mm の丸鋼をその隅角部に 4 本配筋した。なお、試験体を載荷装置にセッティングするため、無筋タイプ、横拘束タイプそれぞれの試験体に M10 六角長ナットに M10 の全ねじを通した吊り上げ専用治具を埋め込んだ。

3.1.6 19.4cm 角シリーズ

試験体寸法は、幅 19.4cm 角断面を持つ高さ 38.8cm である（**図 3-1(d)**参照）。配筋は D10 の異形鉄筋を用いた。なお、このシリーズの横補強筋は、溶接の加工機械の性能により 135°フックを採用した。また、横補強筋の組み立て筋としてφ6mm の丸鋼をその隅角部に 4 本配

筋した。

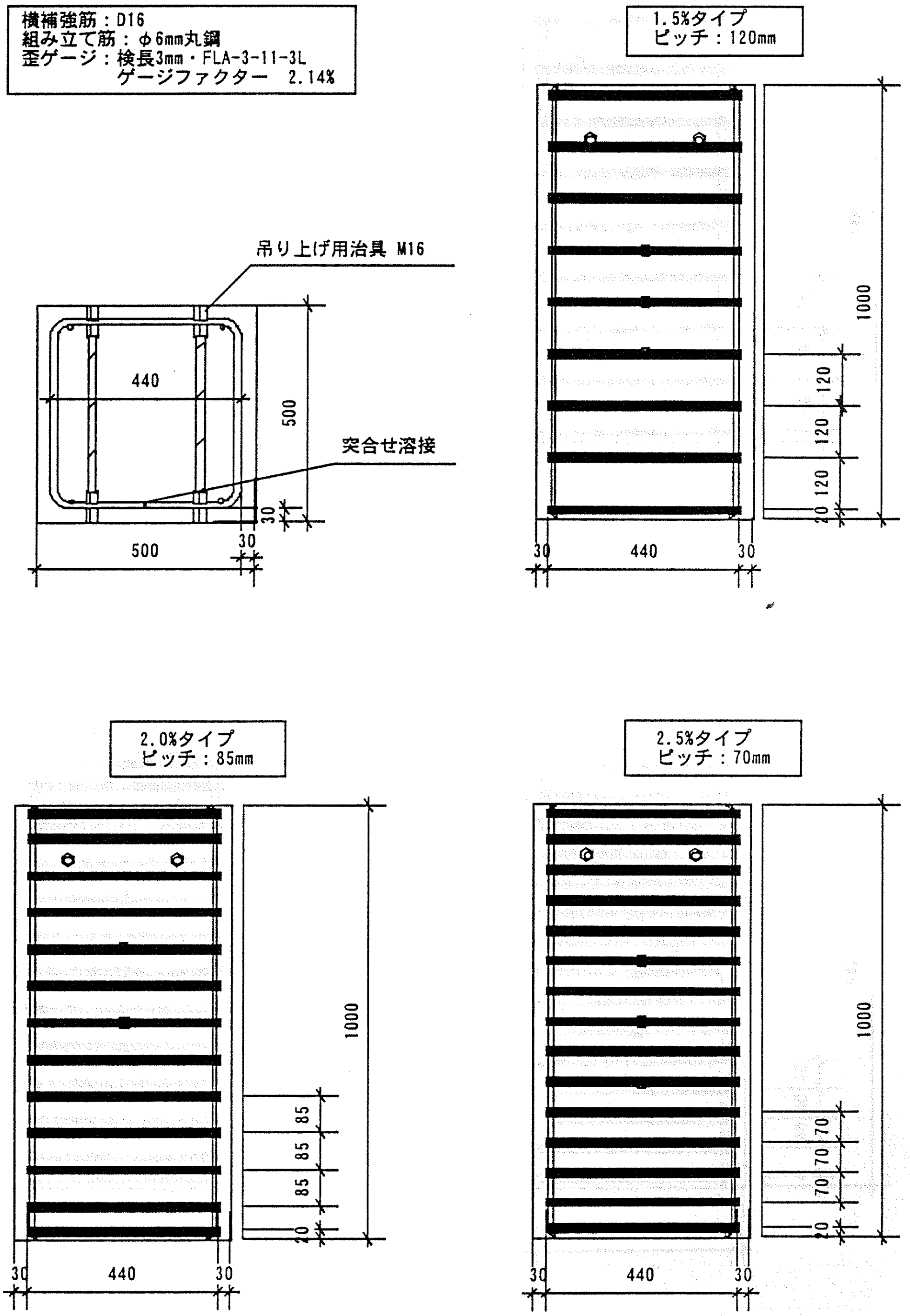


図 3-1(a)　50cm 角シリーズの試験体寸法

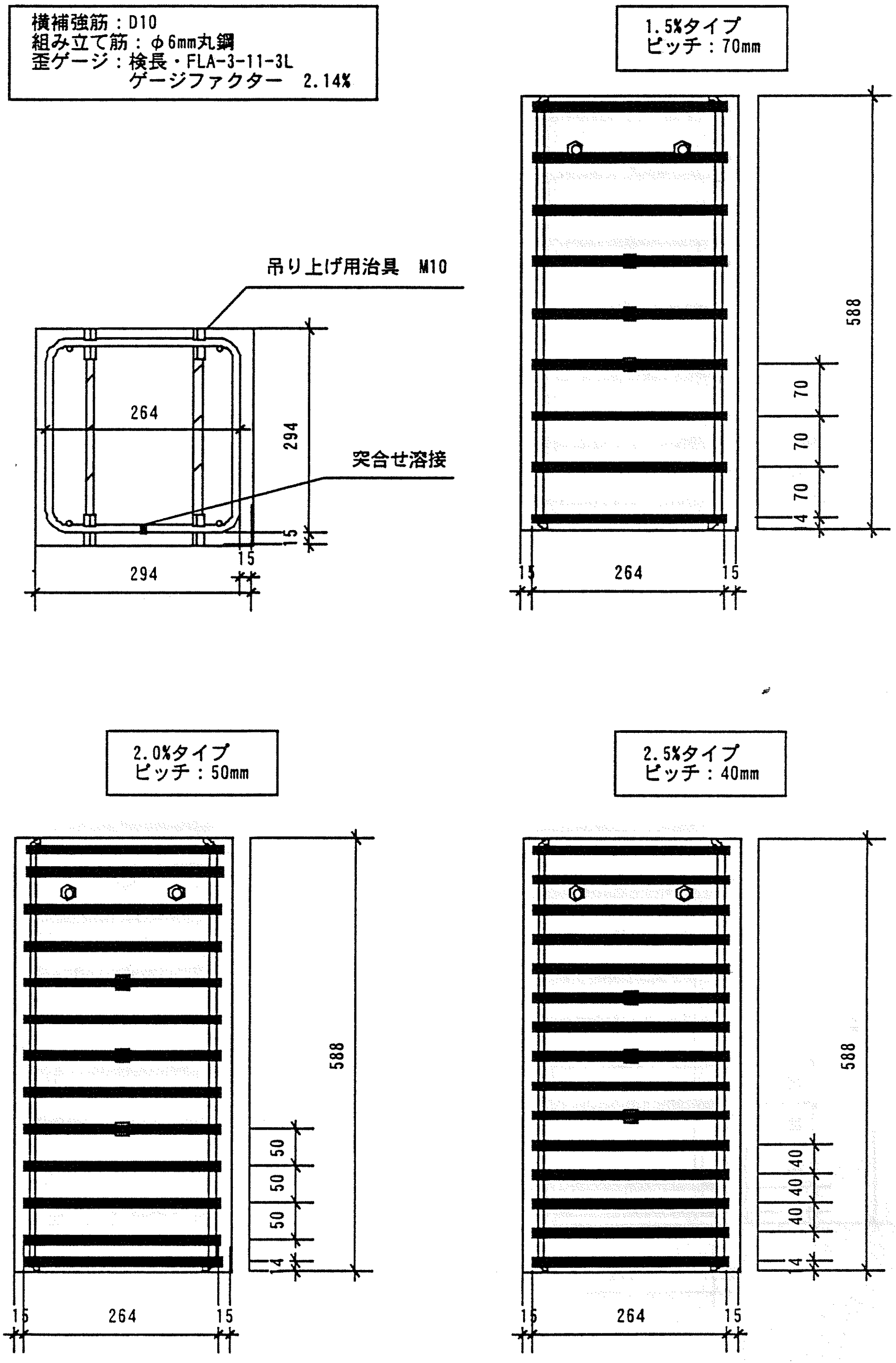


図 3-1(b)　29.4cm角シリーズの試験体寸法

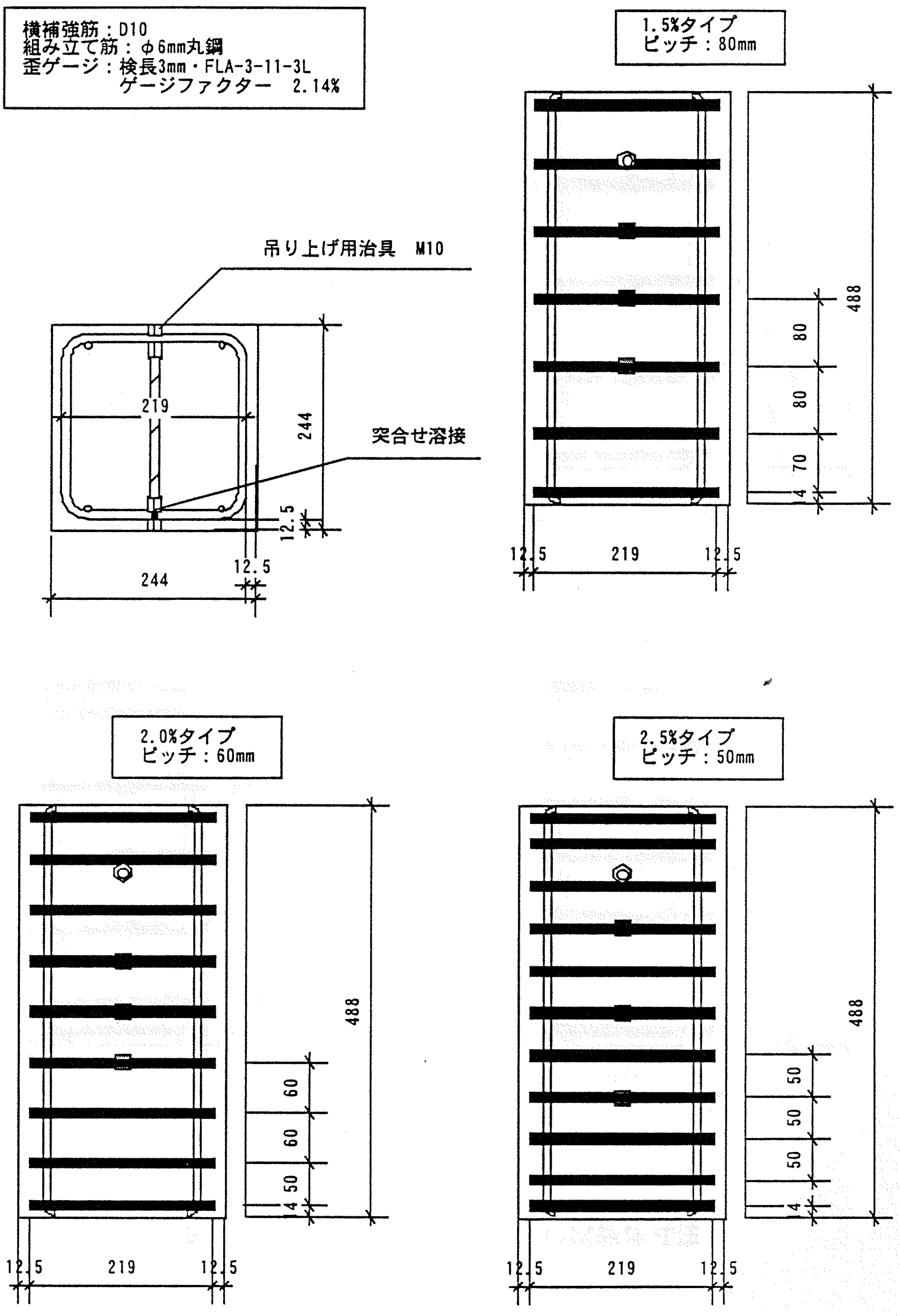


図 3-1(c)　24.4cm 角シリーズの試験体寸法

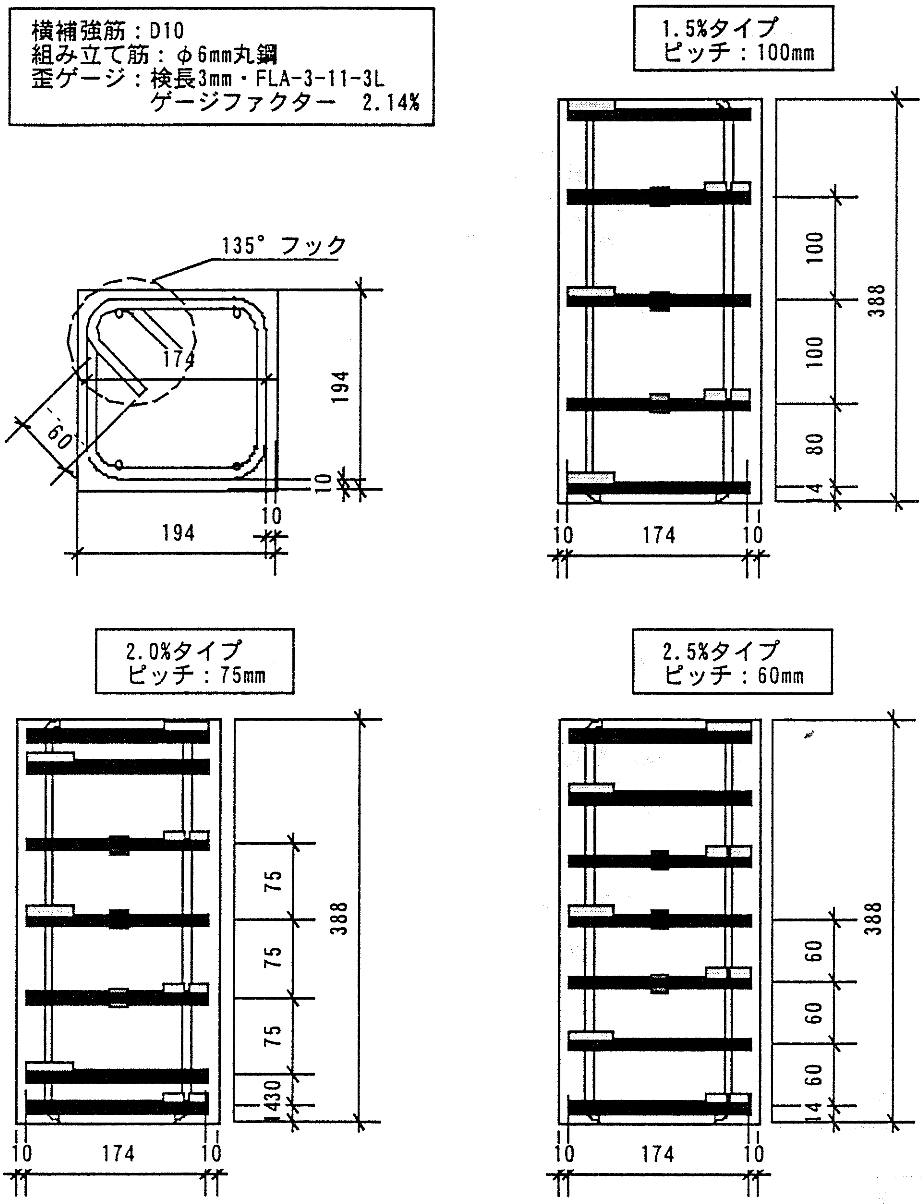


図 3-1(d)　19.4cm角シリーズの試験体寸法

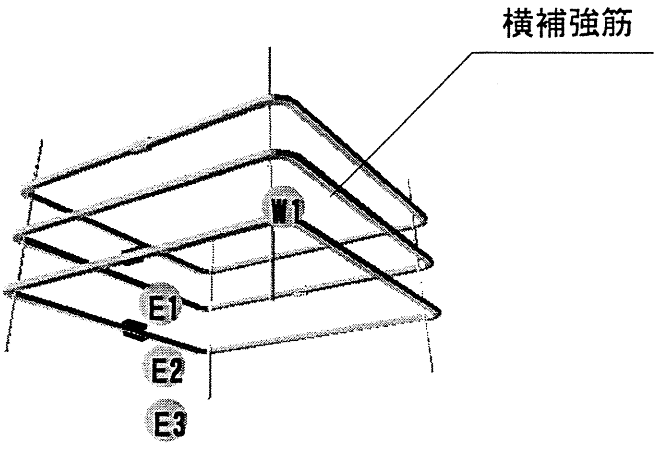


図 3-2　歪ゲージ取り付け位置

表 3-2　試験体の形状及び角型横補強筋データ

試験体シリーズ	寸法 (cm)	横補強筋の公称呼び径	横補強筋の公称降伏強度 (MPa)	かぶり (cm)	ピッチ (cm)	横補強筋の体積比 (%)
50cm 角	50×50×100	D16	785	3.0	12	1.56
					8.5	2.21
					7	2.70
29.4cm 角	29.4×29.4×58.8	D10		1.5	7	1.56
					5	2.20
					4	2.70
24.4cm 角	24.4×24.4×48.8			1.25	8	1.65
					6	2.20
					5	2.64
19.4cm 角	19.4×19.4×38.8			1.0	10	1.67
					7.5	2.23
					6	2.78

3.1.7　試験体名称

表 3-1 に本実験における実験変数を示す。**表 3-2** に今回使用した試験体の形状及び使用した角型横補強筋のデータを示す。なお、試験体の名付け方は**図 3-3** に示す通りである。50cm 角シリーズの試験体は、コンクリート強度 20MPa を用いて無筋タイプを 3 体、横拘束タイプは各横補強筋量について 1 体ずつの計 6 体、29.4cm 角シリーズ、24.4cm 角シリーズ、19.4cm 角シリーズの試験体は、コンクリート強度 50MPa を用いて無筋タイプを各 1 体、横拘束タイプは各横補強筋量について各 1 体ずつの計 12 体である。

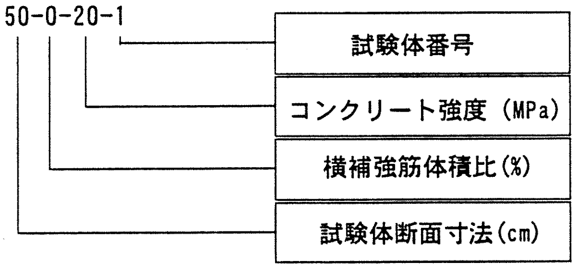


図 3-3　試験体名

表 3-3　試験体名称及びシリンダー圧縮強度

試験体名	コンクリートの種類	φ10mm 標準シリンダー 圧縮強度(MPa)	体積比 (%)
50-0-20-1 50-0-20-2 50-0-30-3	20MPa-1	31.2[*1]	0
50-1.5-20	20MPa-2	25.9[*2]	1.56
50-2.0-20			2.21
50-2.5-20			2.70
29.4-0-50	50MPa	61.2	0
29.4-1.5-50			1.56
29.4-2.0-50			2.20
29.4-2.5-50			2.70
24.4-0-50	50MPa		0
24.4-1.5-50			1.65
24.4-2.0-50			2.20
24.4-2.5-50			2.64
19.4-0-50	50MPa		0
19.4-1.5-50			1.67
19.4-2.0-50			2.23
19.4-2.5-50			2.78

*1　：φ10 シリンダー試験体 3 本の平均値、
シリンダー 8 週強度(2001 年 7 月 23 日打設)
*2　：φ10 シリンダー試験体 3 本の平均値、
シリンダー 9 週強度(2001 年 7 月 31 日打設)
*3　：φ10 シリンダー試験体 9 本の平均値、
シリンダー13 週強度(2001 年 8 月 8 日打設)

3.2.　使用材料の性質

3.2.1.　鉄筋

本実験で用いた角型横補強筋は、**表 3-2** に示した通り 2 種類あり、それぞれの呼び強度

は785MPa、鉄筋径は16mm、10mmの異形鉄筋を使用した。また、今回の試験体は前述したように主筋を用いないため、角型横補強筋を配筋する際に組み立て筋としてφ6mmの丸鋼を用いた。以上の鉄筋の機械的性能は**表 3-4** に別途示す。

表 3-4　鉄筋の機械的性質

鉄筋の種類	呼び径	呼び強度	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
横補強筋	D16	KSS785(*)	839	1024
	D10		1069	1178
主筋	φ6	SR295	351	447

(*)　神戸製鋼社製高強度横補強筋

3.2.2.　コンクリート

表 3-5 に本実験で使用したコンクリートの配合を示す。目標強度は25MPaと60MPaとし、混和剤として高性能AE減水剤チューポールEX−20及びHP−8を用いた。

表 3-5　コンクリートの配合表

目標強度 (MPa)	目標スランプ (mm)	セメント (kg/m³)	水 (kg/m³)	細骨材 (kg/m³)	粗骨材 (kg/m³)	混和剤 (kg/m³)
25	12	285	171	845	998	0.570*1
25	12	285	171	845	998	0.570*1
55	18	454	168	827	974	3.405*2

*1：チューポールEX−20（AE減水剤）

*2：チューポールHP−8（高性能AE減水剤）

比重：セメント3.16　細骨材2.65　粗骨材2.66

表 3-6 に硬化したコンクリートの機械的性質を示す。なお、表中の値はコンクリート打設時に作成したシリンダー試験体から得られたものである。表中の圧縮強度は JIS A 1108 圧縮試験により測定した。**図 3-4(a)** にシリンダー試験体を用いた圧縮試験から得られた応力―歪関係を示す。それぞれの値は検長60mmの箔歪ゲージ2枚の平均である。また、圧縮を正、引張を負として応力及び歪を図示した。また**図 3-4(b)** に、コンクリートの材令強度を示す。

表 3-6 コンクリートの機械的性質

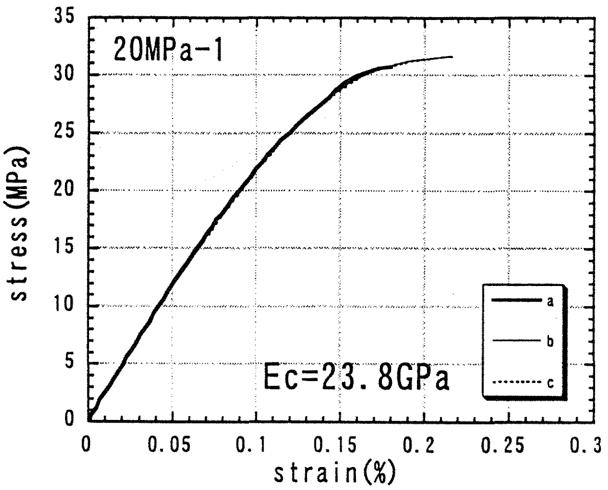
コンクリートの種類	圧縮強度*3 (MPa)	引張強度*4 (MPa)	弾性係数 (GPa)	使用試験体名
20MPa-1*1	31.2	11.4	23.8	50-0-20-1・50-0-20-2・50-0-20-3
20MPa-2*1	25.9	8.7	21.2	50-1.5-20・50-2.0-20・50-2.5-20
50MPa*2	61.2	16.5	33.1	29.4-0-50・29.4-1.5-50 29.4-2.0-50・29.4-2.5-50 24.4-0-50・24.4-1.5-50 24.4-2.0-50・24.4-2.5-50 19.4-0-50・19.4-1.5-50 19.4-2.0-50・19.4-2.5-50

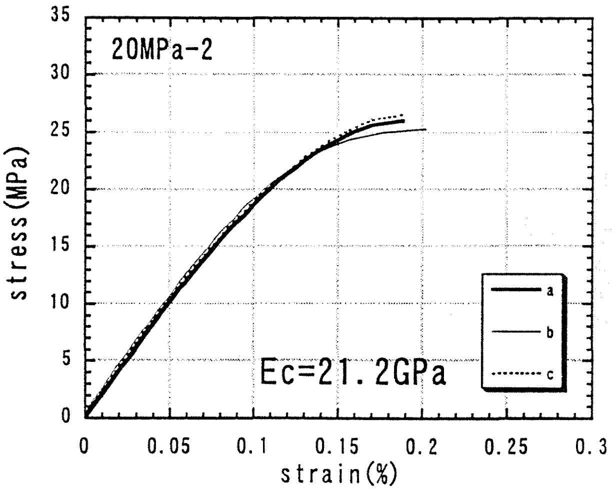
*1:表 3-5 中の目標強度 25MPa のコンクリート

*2:表 3-5 中の目標強度 55MPa のコンクリート

*3:φ10cm 標準シリンダー3 体の平均

*4:φ10cm 標準シリンダー3 体の割裂試験の平均





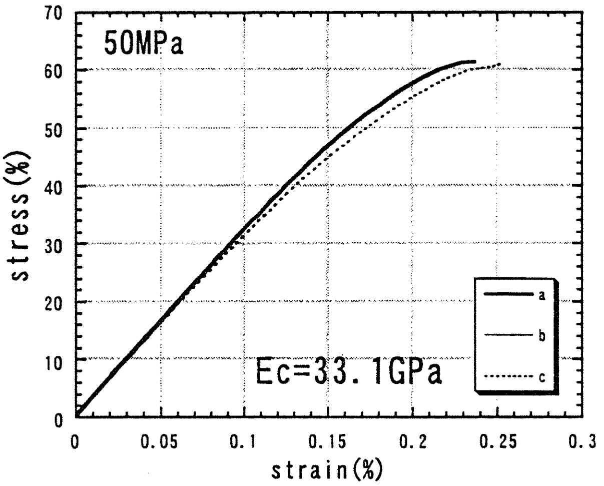
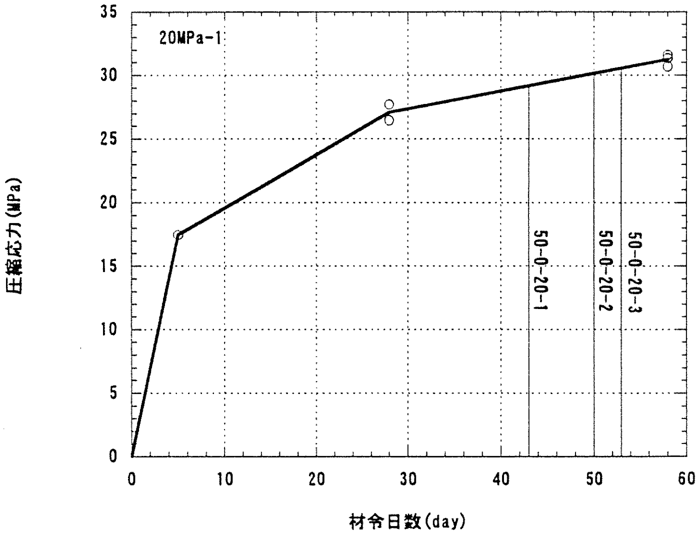
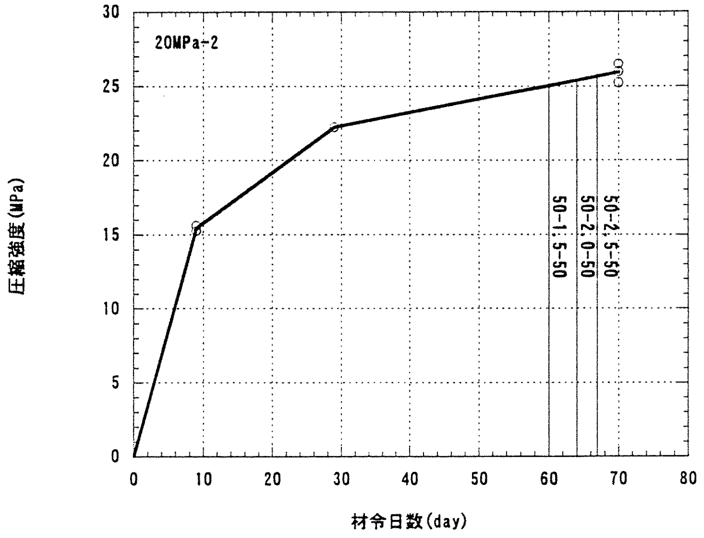


図 3-4(a)　コンクリートの応力―歪曲線





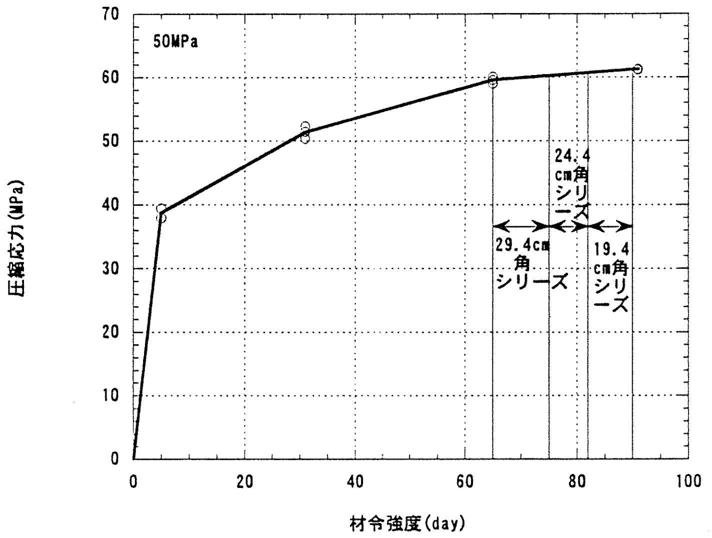


図 3-4(b)　コンクリートの材令強度

3.3 載荷方法と測定方法

3.3.1. 載荷装置

本実験は、島津サーボパルサー1000tf 大型構造物試験機を用いて行った。試験機の概要・性能は以下に述べる通りである。

本試験機は電気油圧式サーボ機構を応用した試験機である。エネルギー伝達媒体として油圧を用いているため、高エネルギーを試験体に供給でき大荷重・高速試験を可能にする。また、信号伝達媒体として電気量を用いているため、高度なエレクトロニクス技術が利用でき、複雑な命令信号を設定できる。

最大試験荷重は軸力として、動的負荷で±6.6MN・静的負荷で±10MN であり、ピストンストロークは最大±250mm である。軸力のランプ速度は、最大負荷（10MN）状態において、最大 10mm/sec 以上が得られる。また、最大負荷（±10MN）状態において、正弦波駆動、1Hz で±0.9mm 以上の振幅で動作する。試験機本体フレームは、圧盤を使用した時、その間隔 3000mm にて、トータル 1mm/10MN 以上の剛性を有する構造である。また、制御装置はフルデジタルであり、動的な繰り返し試験（定形繰り返し波）における自動振幅補正機能、自動平均値補正機能がついている。内蔵波形の内部生成分解能は 32 ビットであり、繰り返し波形（正弦波、三角波、矩形波、ハーバサイン波）の発振周波数は、0.00001 ～100Hz の範囲をカバーする。なお載荷装置の配置を**図 3-5** に示す。

3.3.2. 載荷方法

本実験の中心軸圧試験は、下圧盤に試験体を設置した後上部クロスヘッド(**図 3-5①**)を上下させ、試験体サイズに合わせクロスヘッドを設定し、容量±10MN、試験空間 4000mm の地下アクチュエーター(**図 3-5⑥**)を用いて押し側を＋とする準静的加力で行った。各試験体の試験体上面、下面は、コンクリート打設後平滑な状態ではないため各試験体を下圧盤に設置する際、試験体上面、下面に住友大阪セメント株式会社製無収縮グラウト材フィルコン R『プレミックスタイプ』(以後無収縮グラウト材と表記)を敷き、無収縮グラウト材が硬化するまで荷重を加え、本試験で均等に試験体に荷重を伝えるように考慮した。また、試験機のストロークの問題から 29.4cm・24.4cm・19.4cm の試験体では、試験体と圧盤との間に φ400×950mm の円柱をはさみ、試験を行った。(**図 3-6** 参照)

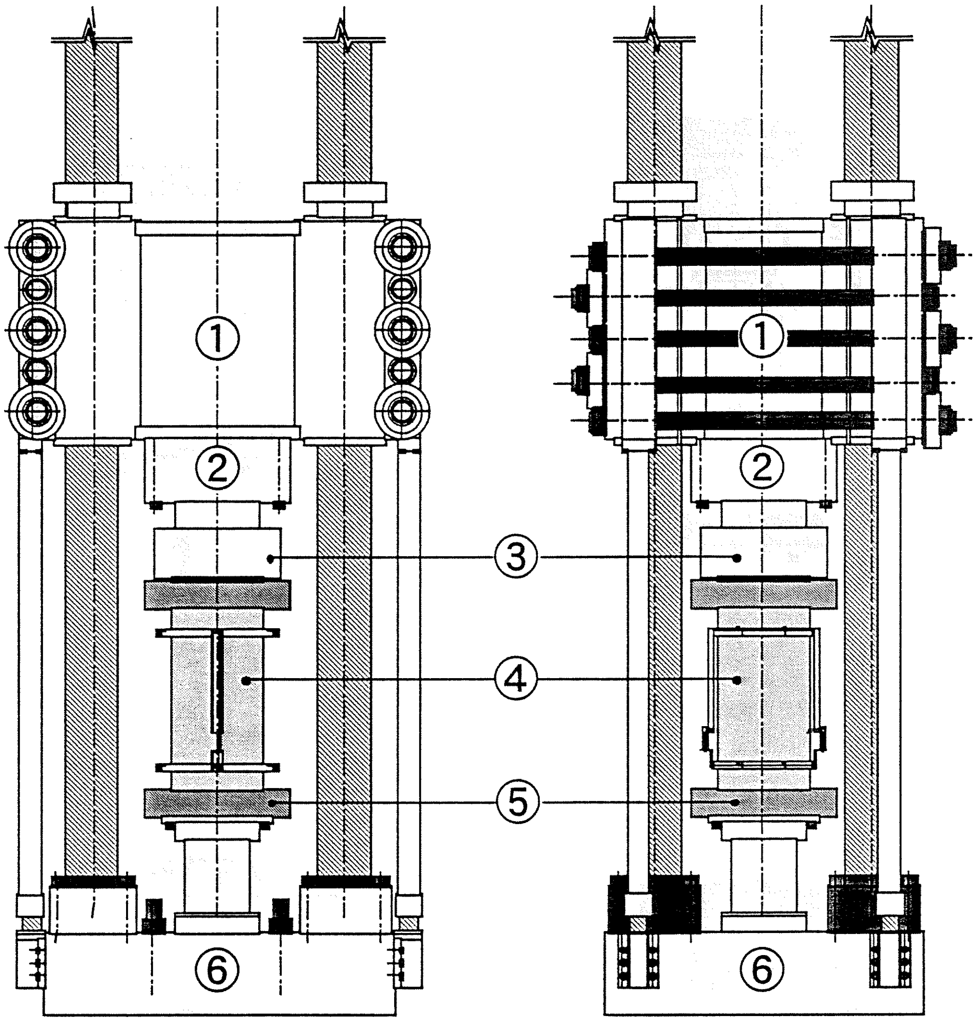
本試験における載荷は島津サーボパルサ 48000 形/4880 形制御装置試験機制御ソフトウェア(以後制御ソフトウェア)を用いて弾性域・塑性域において、すべて変位制御で載荷を行った。なお変位制御に関しては、載荷を制御ソフトウェアで行っているため、試験機の特性上、載荷装置のストロークの変位を基に載荷スピードを設定している。

載荷速度は、本論文第 2 章 **2.3.** 節で示した Scott 等の研究(**図 2-3** 参照)で歪速度が

0.0167/秒の高速で与えられる場合には、横拘束コンクリートの最大耐力及び下り勾配の大きさが準静的試験に比べ約 1.25 倍になることが報告されているが、本実験では寸法効果を考慮して、圧縮応力―歪レベルにおいて各シリーズの試験体で同条件となるよう制御ソフトウェアの設定を行った。載荷速度に関しては**表 3-7** に別途示す。また、実際の実験で 0.1%載荷するのに要した時間と、1 秒あたりのひずみを**表 3-8** に示す。

試験は各シリーズで無筋タイプの試験体、続いて横拘束タイプの試験体の順に中心軸圧試験を行った。載荷の手順として、無筋タイプの試験体で各シリーズ共に、試験体の単調載荷による圧縮応力―歪関係を確認する。単調載荷における目標歪は最終的に 0.6%に達するまで行った。

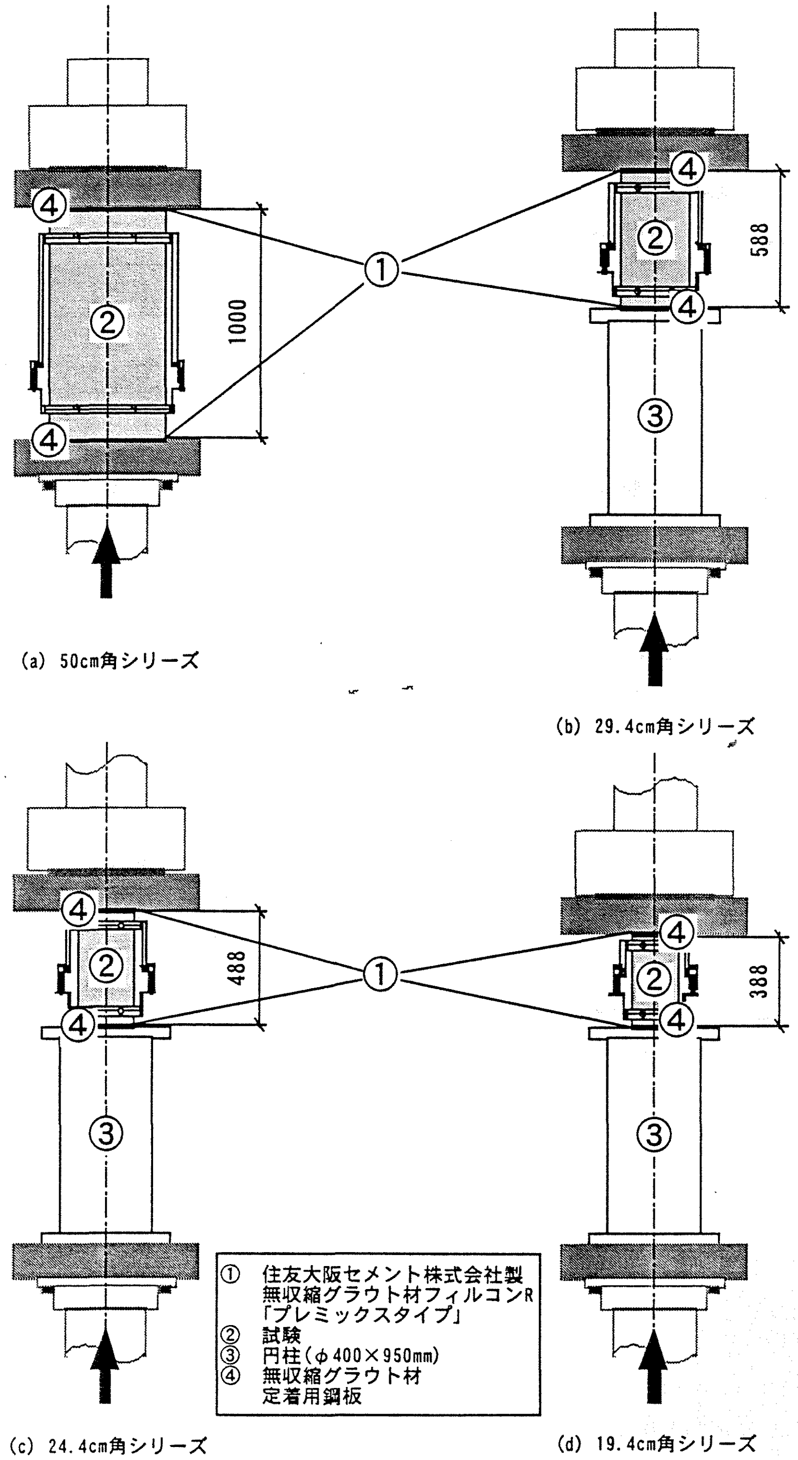
横拘束タイプの試験体では、無筋タイプの試験体でおよその応力―歪関係の履歴を確認した後、先の測定で得られた単調載荷による圧縮応力―歪の関係を考慮して、弾性域、歪軟化領域において、試験体測定範囲の歪が押し側(+方向)で目標とする歪に到達後、50cm 角シリーズでは 0.15MN、29.4cm 角シリーズでは 0.1MN、24.4cm 角シリーズでは 0.75MN、19.4cm 角シリーズでは 0.5MN まで荷重を除荷するという方法で、繰り返し載荷を行った。繰り返し載荷における目標歪は、試験体測定範囲の歪が弾性域で 0.1%、圧縮応力―歪履歴カーブが最大耐力後の下り勾配を確認した後、歪軟化領域では 0.4%、0.6%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%に至るまで繰り返し載荷を行った。無筋タイプ、横拘束タイプの載荷履歴を**図 3-7** 示す。



(a)　載荷装置-1　正面配置図　　　(b) 載荷装置-2　側面配置図

① クロスヘッド
② ロードセル
③ 圧盤(上部球座式)
④ 試験体
⑤ 圧盤（下部)
⑥ 10MN±250mmアクチュエータ

図 3-5　載荷装置配置図



④
②
1000
①
④
(a) 50cm角シリーズ
④
②
588
④
③
(b) 29.4cm角シリーズ
④
②
488
④
③
(c) 24.4cm角シリーズ
④
②
388
④
③
(d) 19.4cm角シリーズ
① 住友大阪セメント株式会社製
無収縮グラウト材フィルコンR
「プレミックスタイプ」
② 試験
③ 円柱(φ400×950mm)
④ 無収縮グラウト材
定着用鋼板

図 3-6　載荷方法詳細図

表 3-7　載荷速度*1

試験体名	変位制御*1 (mm/sec)	備考
50-0-20-1	0.0035	変位制御 1分間に±0.208mm
50-0-20-2		
50-0-20-3		
50-1.5-20		
50-2.0-20		
50-2.5-20		
29.4-0-50	0.0021	変位制御 1分間に±0.123mm
29.4-1.5-50		
29.4-2.0-50		
29.4-2.5-50		
24.4-0-50	0.0017	変位制御 1分間に±0.102mm
24.4-1.5-50		
24.4-2.0-50		
24.4-2.5-50		
19.4-0-50	0.0013	変位制御 1分間に±0.0808mm
19.4-1.5-50		
19.4-2.0-50		
19.4-2.5-50		

*1：制御ソフトウェアにより設定

表 3-8　実際の実験における載荷速度

	0.1%載荷するのに要した時間(sec)	1秒当りの歪
50-0-20-1	935	1.154×10^{-6}
50-0-20-2	838	1.212×10^{-6}
50-0-20-3	857	1.182×10^{-6}
50-1.5-20	597	1.168×10^{-6}
50-2.0-20	645	1.557×10^{-6}
50-2.5-20	690	1.474×10^{-6}
29.4-0-50	915	1.122×10^{-6}
29.4-1.5-50	975	1.026×10^{-6}
29.4-2.0-50	1042	9.725×10^{-7}
29.4-2.5-50	906	1.104×10^{-6}
24.4-0-50	1200	8.444×10^{-7}
24.4-1.5-50	990	1.103×10^{-6}
24.4-2.0-50	991	1.020×10^{-6}
24.4-2.5-50	908	1.110×10^{-6}
19.4-0-50	1253	8.140×10^{-7}
19.4-1.5-50	879	1.138×10^{-6}
19.4-2.0-50	885	1.134×10^{-6}
19.4-2.5-50	1076	9.387×10^{-7}

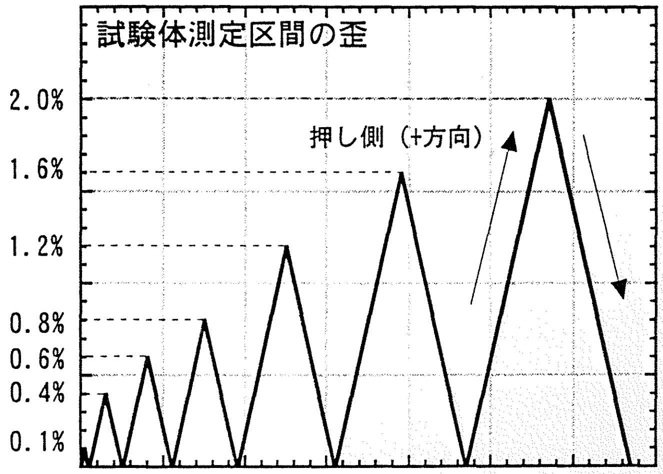


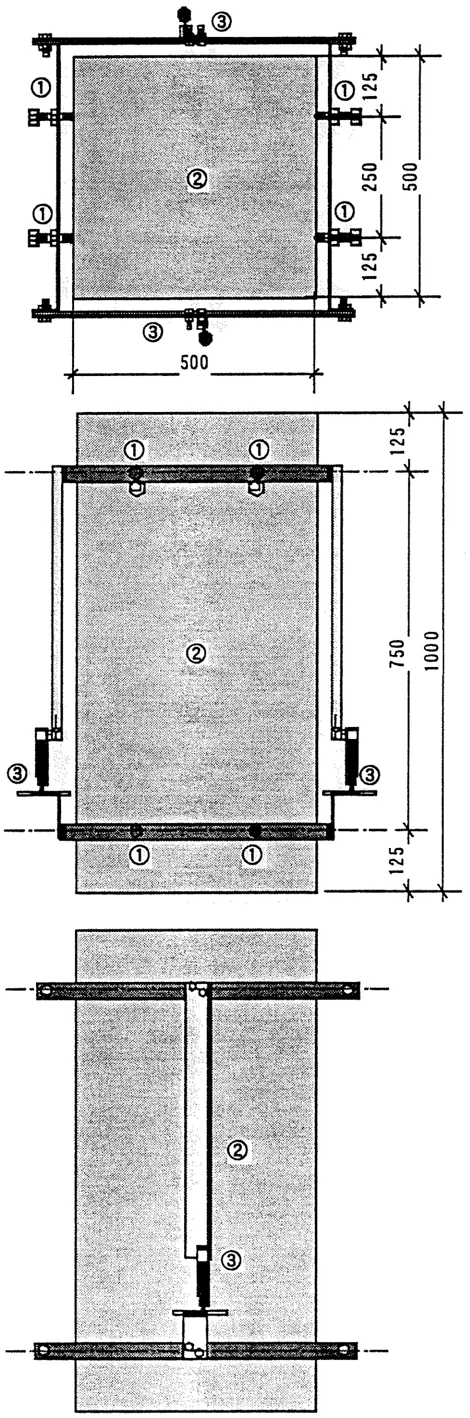
図 3-7　横拘束タイプの載荷サイクル

3.3.3. 測定方法

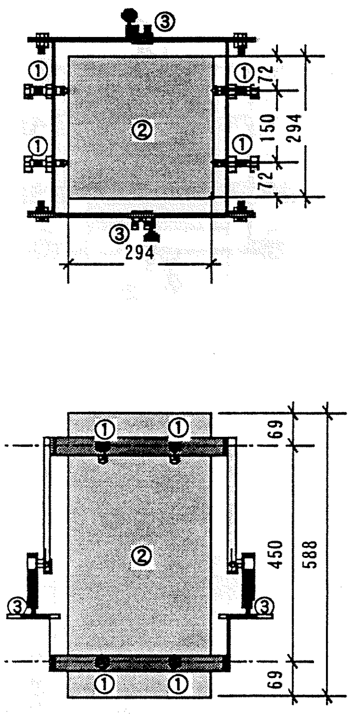
地下アクチュエーター(**図 3-5⑤**)からの荷重は、試験機上部に取り付けられたロードセル(**図 3-5①**)によって測定した。変位計の取り付け位置は**図 3-8** に示す。測定区間の変位は試験体の上部・下部を測点(**図 3-8** 参照)とする、試験体両側に設置された検長 25mm の変位計(東京測器研究所 CDP－25)によって測定した。なお試験体の変位は 2 本の変位計の平均とする。試験体と変位計の接続は、M24 のボルト先端部を鋭利にしたもの(**図 3-8** 参照)で両側から試験体を挟み込むタイプとした、これは試験体に取り付け治具を直接埋め込むタイプでは、試験体圧縮時に試験体の歪、あるいは治具周辺での破壊形状等により取り付け治具自体の位置が当初の位置からずれるため、測点を確保できないためである。また測点は試験体の中でも比較的変形の少ない位置に設けた。また試験体を挟み込む部分(**図 3-8** 参照)の変位計の材質は鋼材を使用した、これは試験体圧縮時において試験体が膨張した際、試験体を拘束することなく試験体の膨張に伴って変位計がバネの代わりとなり、現状を維持出来ると仮定したためである。

各シリーズにおける試験体歪測定検長は 50cm 角シリーズで 75cm、29.4cm 角シリーズで 44.1cm、24.4cm 角シリーズで 36.6cm、19.4cm 角シリーズで 29.1cm である。

また横補強筋の歪に関しては**図 3-1** に示す位置に検長 3mm の歪ゲージ(東京測器　商品番号 FLA－3－11－3L ゲージファクター：2.14±1%)を用いて測定した。



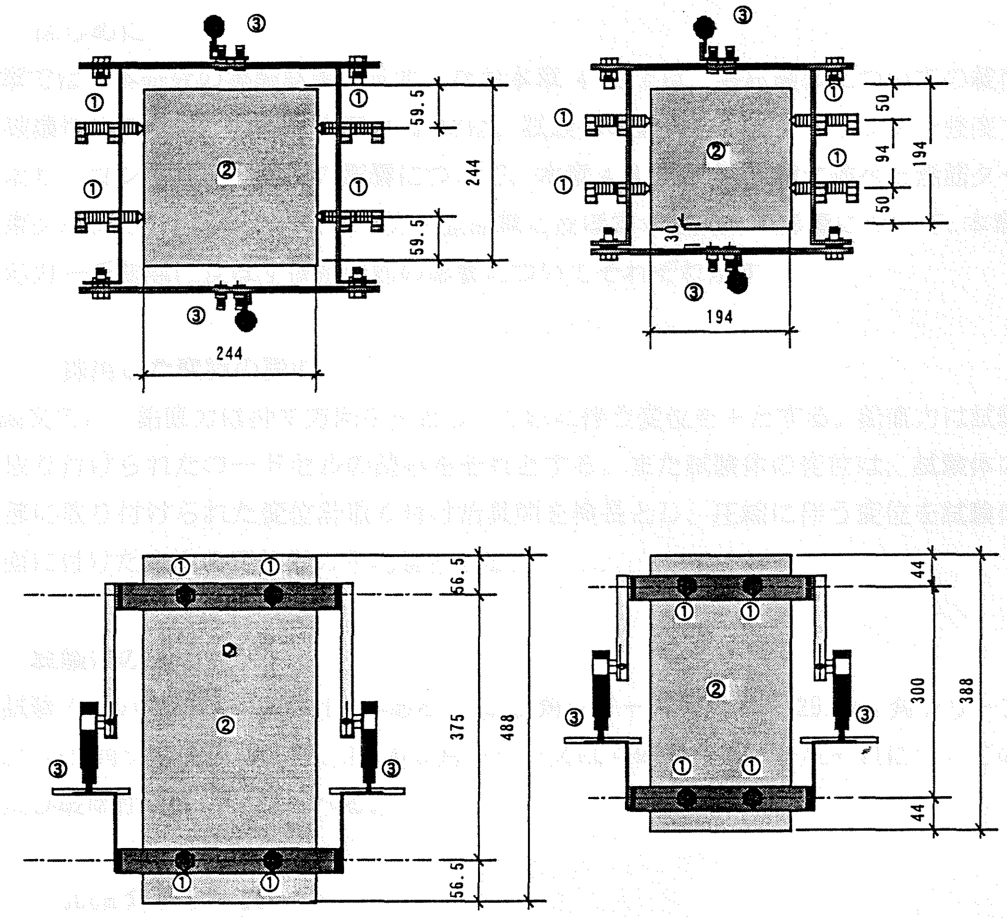
(a) 50cm角シリーズ



(b) 29.4cm角シリーズ

①	M16　変位計取り付け治具
②	試験体
③	変位計・東京測器研究所　CDP-25
※	50cm角シリーズ検長　750mm 29.4cm角シリーズ検長　450mm

図 3-8(a)　試験体変位計取り付け位置



(d) 19.4cm角シリーズ

(c) 24.4cm角シリーズ

①	M16 変位計取り付け治具
②	試験体
③	変位計・東京測器研究所 CDP-25
※	24.4cm角シリーズ検長 375mm 19.4cm角シリーズ検長 300mm

図 3-8(b) 試験体変位計取り付け位置

4. 実験結果

4.1. はじめに

本章では、本研究の実験結果を示す。なお本章 4.2. では、各試験体についての載荷状況及び破壊性状を示す。また、本章 **4.3.** では、試験体の最大応力度をシリンダー強度で除した値より、コンクリート強度の影響について、本章 4.4. では第 3 章に述べた無筋タイプと横拘束タイプに分類し、それぞれ応力—歪曲線に及ぼす寸法効果の影響について、本章 4.5. では応力—歪曲線に及ぼす横補強筋の影響についてそれぞれ示す。

4.1.1. 採用した変数の説明

本論文では、鉛直力は押す方向を＋とし、これに伴う変位を＋とする。鉛直力は試験機上部に取り付けられたロードセルの読みをそれとする。また試験体の変位は、試験体の上部と下部に取り付けられた変位計取り付け治具間を検長とし、圧縮に伴う変位を試験体北面と南面に付けた 2 本の変位計の平均値とする。

4.2. 試験体の破壊性状

本試験で用いた試験体は計 18 体ある。50cm 角シリーズは 6 体、29.4cm 角シリーズは 4 体、24.4cm 角シリーズは 4 体、19.4cm 角シリーズは 4 体である。それぞれについての載荷状況及び破壊性状を以下に述べる。

4.2.1. 50cm 角シリーズ

以下に本試験で行った 50cm 角シリーズの載荷状況、及び破壊性状を示す。このシリーズの試験体の公称コンクリート強度は 20MPa である。なお載荷方法は (a)50-0-20-1、(b)50-0-20-2、(c)50-0-20-3 は単調載荷、(d)50-1.5-20、(e)50-2.0-20、(f)50-2.5-20 は繰り返し載荷で行った。また、(a)～(c) までの試験体は、今回の実験において試験機の操作方法に慣れるためという目的で、無筋タイプの試験体を 3 体用意し、試験を行った。

50cm 角シリーズの代表的破壊性状として、無筋タイプ (50-0-20-1) の載荷後の写真を**写真 4-1** に、横拘束タイプ (50-2.5-20) を**写真 4-2** に示す。また、2.5%タイプにおける鉄筋の破断状況の写真（**写真 4-3**）を載せる。載荷状況として載荷速度は第 3 章に示す**表 3-7** に載せた。また 50cm 角シリーズの各試験体の最大応力及び、歪の値は**表 4-1** に示す。

表 4-1　50cm 角シリーズの試験体強度

試験体名称	最大応力(MPa)	最大応力時の歪(%)
50-0-20-1	19.81	0.119
50-0-20-2	20.94	0.154
50-0-20-3	22.29	0.161

50-1.5-20	20.01	0.266
50-2.0-20	20.79	0.263
50-2.5-20	21.11	0.247

(a)　50-0-20-1

この試験体は、本研究で最初に行った実験である。したがって、試験機の操作に慣れるため、単調載荷で行った。最大荷重 4952kN を応力で 19.81MPa、歪が 0.119%の時に記録した。最終的に、歪が 0.6%程度で載荷をやめ、除荷した。

この試験体は、変位計取り付け治具を東面と西面に取り付けるべきであったところを、設置ミスにより、北面と南面に取り付けて行った。この試験体には、東面と西面に吊り上げ専用治具を取り付けており、そのため東面と西面の横方向への膨張が少なく、北面と南面への膨張は大きい。そのため、北面と南面は上方向へずれる可能性があり、北面と南面に変位計取り付け治具を設置することは、ピーク後の正確な挙動を追えない可能性がある。したがって、ピーク後の塑性域に関しては、データの信頼性は低いと考えられる。今回の実験でも、南側の変位計が塑性域に達してからマイナスになっており、ピーク後の変位は試験機のジャッキストロークの値を採用している。

破壊状況は、載荷に伴い、東面と西面にある試験体吊り上げ専用治具付近にひび割れを生じた。この試験体は、養生時の乾燥収縮のため、荷重をかける前から東面と西面の試験体吊り上げ専用治具付近にひび割れが生じていた。そのため荷重が 3272kN、応力で 13.09MPa、歪で 0.063%の時に、西面にあったひび割れが大きく広がり、荷重が 4671kN、応力で 18.68MPa、歪で 0.101%の時に、東面にあったひび割れが大きくなった。荷重の増加に伴い、そのひび割れが大きくなり、最終的には V 字型のひび割れを生じた。北面、南面は、上部のコンクリートが剥がれ落ち、局所的に破壊した。全面にわたったひび割れは入らなかった。

(b)　50-0-20-2

この試験体も、単調載荷で行った。最大荷重 5234kN を応力で 20.94MPa、歪が 0.154%の時に記録した。その後、荷重が 1634kN、応力で 6.54MPa、歪で 0.568%の時に、ひび割れ等の原因で変位計がすべり、変位計の北側の値が 1mm 増加し、南側の値が 2mm 減少したため、以後変位計の値は信用できないものとみなし、試験機のジャッキストロークの値を採用した。最終的に、ジャッキストロークで 0.6%まで載荷を行い、除荷した。

破壊状況としては、ピーク後に東面、西面にある試験体吊り上げ専用治具付近に V 字型のひび割れを生じた。また、南面の上部のコンクリートが剥がれ落ちた。北面の上部のコンクリートは、ほとんど剥がれ落ちず、縦方向にひびを生じた。

(c)　50-0-20-3

この試験体も、単調載荷で行った。最大荷重 5573kN を応力で 22.29MPa、歪が 0.161%の時に記録した。その後、荷重が 1094kN、応力で 4.28MPa、歪で 0.575%の時に、ひび割れ等の原因で変位計がすべり、以後変位計の値は信用できないものとみなし、試験機のジャッ

キストロークの値を採用した。最終的に、ジャッキストロークで 0.6%まで載荷を行い、除荷した。

破壊状況としては、ピーク後に西面にある試験体吊り上げ専用治具付近に V 字型のひび割れを生じた。東面は、V 字型のひび割れも入っているが、それにあわせて東面上部中央から北面中央にかけて、ひび割れを生じている。また、南面の上部のコンクリートが剥がれ落ちた程度で、ひび割れは少ない。また、北面の上部のコンクリートは、ほとんど剥がれ落ちなかったが、縦方向に多数のひびを生じた。これは、試験体上面が水平ではなく、また試験体の品質等の関係により、偏心して荷重が載荷され、北面に荷重がより多く載荷されたものであると考えられる。

(d)　50-1.5-20

この試験体は、本試験最初の繰り返し載荷を行った。繰り返し載荷のサイクルの予定は、0.1%（0.75mm）→0.1MN→0.4%（3mm）→0.1MN→0.6%（4.5mm）→0.1MN→0.8%（6mm）→0.1MN→1.2%（9mm）→0.1MN→1.6%（12mm）→0.1MN→2.0%（15mm）→0.1MN であった。0.1%のサイクルを終え、0.4%まで押している途中に最大荷重 5002kN を記録した。(応力で 20.01MPa、歪が 0.266%の時）その後、荷重が 3030kN、応力で 12.12MPa、歪で 0.799%の時に、北側上部の欠落が見られ、それが変位計取り付け治具に直撃した。そのため、変位計による計測ができなくなり、以後は試験機のジャッキストロークの値を採用した。その後、2.0%まで押し切り、除荷した。

破壊状況としては、ピーク時に北面に横一本のひび割れが入った。その後、東面は縦方向に、西面は横方向にひび割れが入った。0.6%の除荷を終えた時点で、各面ともカバーコンクリートの欠落が見られた。0.8%の除荷を終えた時点では、試験体の角部の欠落が激しかった。

(e)　50-2.0-20

この試験体は、50cm 角の横拘束タイプであり、繰り返し載荷を行った。繰り返し載荷のサイクルの予定は、前回の試験と同様である。0.1%のサイクルを終え、0.4%まで押している途中に最大荷重 5197kN を記録した。(応力で 20.79MPa、歪が 0.263%の時) その後、1.2%のサイクルを終え、1.6%まで押している途中 (変位計の平均値で 10.2mm) に、南北のカバーコンクリートが変位計取り付け治具に接触したため、1.47% (変位計の平均値で 11mm) で除荷を行い、2%まで押し切り、除荷して終了した。

破壊状況としては、ピーク後に東面の上部に V 字型のひびが入った。その後、北西面に縦方向のひび割れを生じ、北面にひび割れが多く発生した。そのため、北側の変位計の値が南側に比べて大きく、北面がよく変位していった。0.8%を過ぎたあたりから東面と西面の縦方向のひび割れが大きくなり、それが原因でカバーコンクリートの変位計取り付け治具への接触を招いた。

(f)　50-2.5-20

この試験体は、50cm 角の横拘束タイプであり、繰り返し載荷を行った。繰り返し載荷のサイクルの予定は前回の試験と同様である。0.1%のサイクルを終え、0.4%まで押している途中に最大荷重 5276kN を記録した。(応力で 21.11MPa、歪が 0.247%の時) そこで、いったん除荷を行い、再び 0.4%の載荷サイクルを行った。その後、1.2%のサイクルを終える寸前で、変位計取り付け治具の東側のボルト付近が崩れ落ちたため、除荷を行い、2%まで押し切り、除荷して終了した。

破壊状況としては、ピーク後に東面の上部に V 字型のひびが入った。その後、南面と東面、西面に縦方向のひび割れを生じ、次第に南面のひび割れが大きくなっていった。そのため、南側の変位計の値が北側に比べて大きく、南面がよく変位していった。また、目に見えるほど試験体中央部が膨らみ、カバーコンクリートが剥がれ落ちていった。この剥がれ落ちたカバーコンクリートが、変位計取り付け治具に直撃するのを防ぐため、各載荷サイクルが終わった後に変位計の読みに注意しながらコンクリート片の除去を行った。また、2%まで押し切っている途中 (試験機のジャッキストロークで 24.9mm) に、試験体南西上部の横拘束筋が破断した。

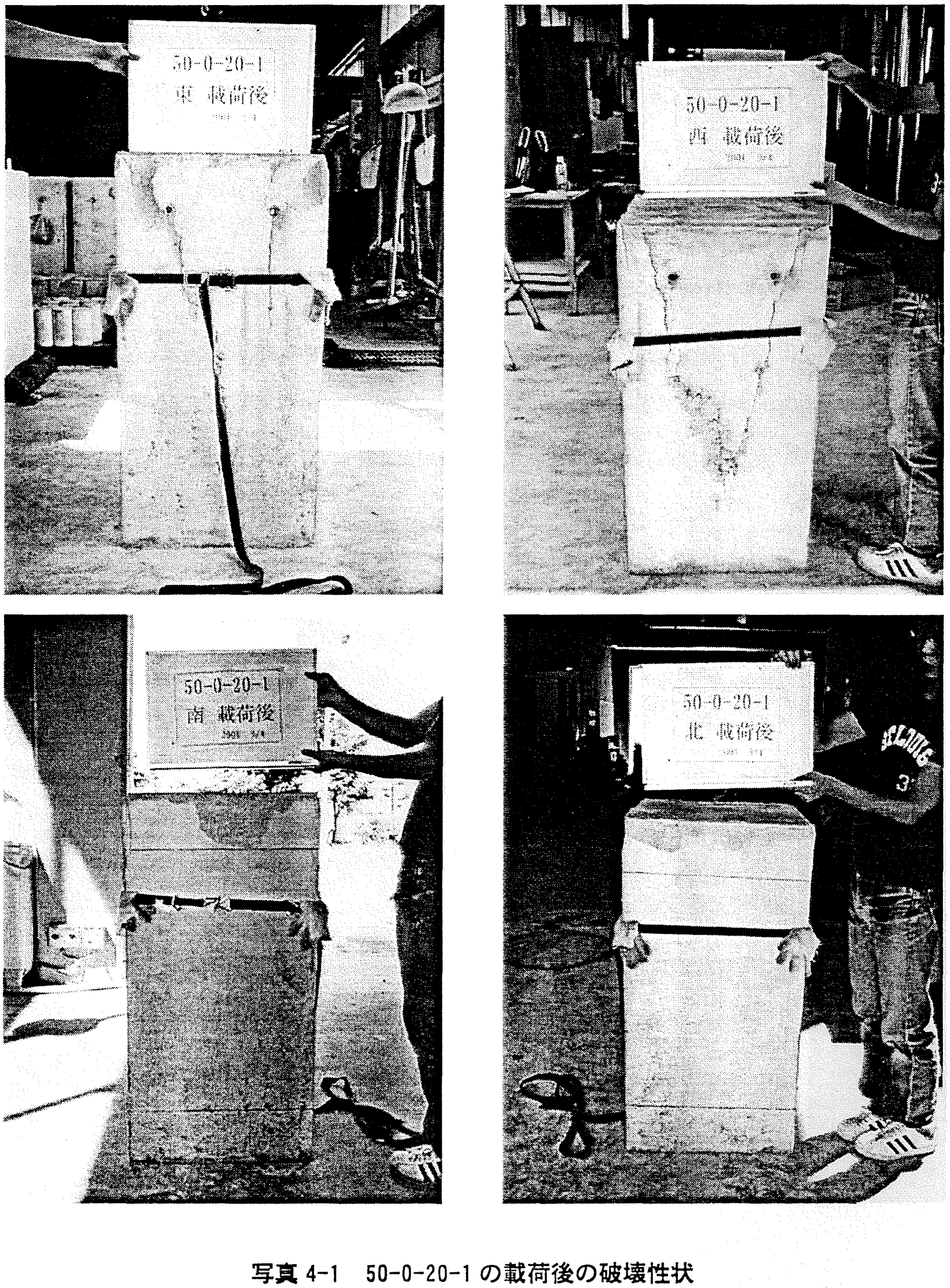


写真 4-1　50-0-20-1 の載荷後の破壊性状

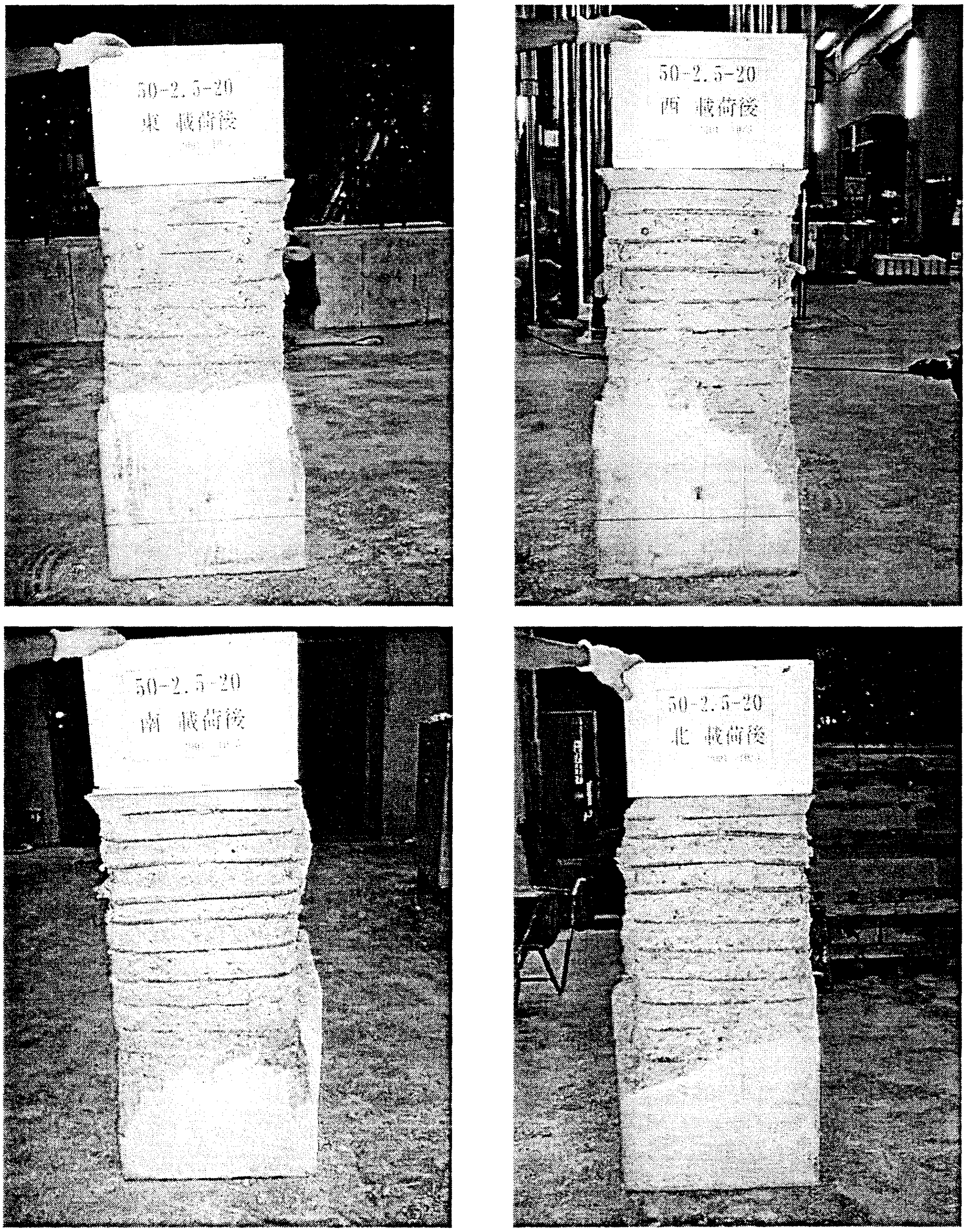


写真 4-2　50-2.5-20 の載荷後の破壊性状

写真 4-3　50-2.5-20 における鉄筋の破断状況

4.2.2.　29.4cm 角シリーズ

以下に 29.4cm 角シリーズの試験体の載荷状況、破壊性状を示す。このシリーズの試験体の公称コンクリート強度は 50MPa である。なお載荷方法は(g)29.4-0-50 は単調載荷、(h)29.4-1.5-50、(i)29.4-2.0-50、(j)29.4-2.5-50 は繰り返し載荷で行った。このシリーズの代表的破壊性状として、無筋タイプ(29.4-0-50)を**写真 4-4** に、横拘束タイプ(29.4-1.5-50)を**写真 4-5** に載せる。また 29.4cm 角シリーズの載荷速度は、変位制御で 0.0021mm/sec である。繰り返し載荷のサイクルの予定は、50cm 角シリーズと同様である。

29.4cm 角シリーズの各試験体の最大応力及びその時の歪は、**表 4-2** の通りである。

表 4-2　29.4cm 角シリーズの試験体強度

試験体名称	最大応力(MPa)	最大応力時の歪(%)
29.4-0-50	46.35	0.258
29.4-1.5-50	50.84	0.306
29.4-2.0-50	47.91	0.336
29.4-2.5-50	50.74	0.312

(g)　29.4-0-50

この試験体は、単調載荷で行った。最大荷重 4007kN を応力で 46.35MPa、歪が 0.258%の時に記録した。最終的に、歪が 0.26%の時に西面上部のカバーコンクリートの落下により、変位計がずれ、除荷して終了した。

破壊状況としては、50cm 角シリーズとは異なり、試験体全面に縦方向のひび割れが見ら

れた。

(h)　29.4-1.5-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 4394kN を応力で 50.84MPa、歪が 0.306% の時に記録した。その後、1.2%を目指して押していたときに、北面のカバーコンクリートが剥離し、変位計取り付け治具に直撃し、治具がずれたため、載荷をやめ、2.0%（試験機のジャッキストロークで 12mm）まで押し切り、試験を終了した。

破壊状況としては、ピーク後に東面と南面にひび割れを生じた。その後、西面、北面にもひび割れを生じた。コンクリート強度が 20MPa の 50cm 角シリーズでは、カバーコンクリートが剥離していたが、コンクリート強度が 50MPa の 29.4cm 角シリーズでは、まず、表面のモルタル部分が剥離し、その後でカバーコンクリートが剥がれ落ちていた。

(i)　29.4-2.0-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 4141kN を応力で 47.91MPa、歪が 0.336% の時に記録した。その後、歪が 1.6%の時に、南面と北面のカバーコンクリートが、変位計取り付け治具に接触した。したがって、変位計のデータは信頼性がないと判断し、試験機のジャッキストロークで 2.0%まで押し切り、除荷して終了した。

破壊状況としては、まず、北面の上部の両隅角部にひび割れを生じた。その後、全面に縦方向のひび割れを生じ、前回の試験と同様の傾向を見せた。

(j)　29.4-2.5-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 4385kN を応力で 50.74MPa、歪が 0.312% の時に記録した。各載荷サイクルが終わった後に変位計の読みに注意しながらコンクリート片の除去を行った結果、今回の試験では、カバーコンクリートが変位計取り付け治具に直撃することなく、歪で 2.4%まで行うことができた。これは、横補強筋体積比が小さいと、大きなカバーコンクリートが落下する可能性が高く、これが変位計取り付け治具に直撃しやすく、載荷を 2.0%程度まで続けることが困難であるが、横補強筋体積比が大きいと、カバーコンクリートが早い段階から崩れ落ち、変位計取り付け治具に大きいカバーコンクリートが直撃する可能性が低く、載荷を 2.0%以上続けることが可能だということが言える。この時点で、応力一定域に達していたので、除荷して終了した。

破壊状況としては、前回と同様、全面に縦方向のひび割れを見せた。

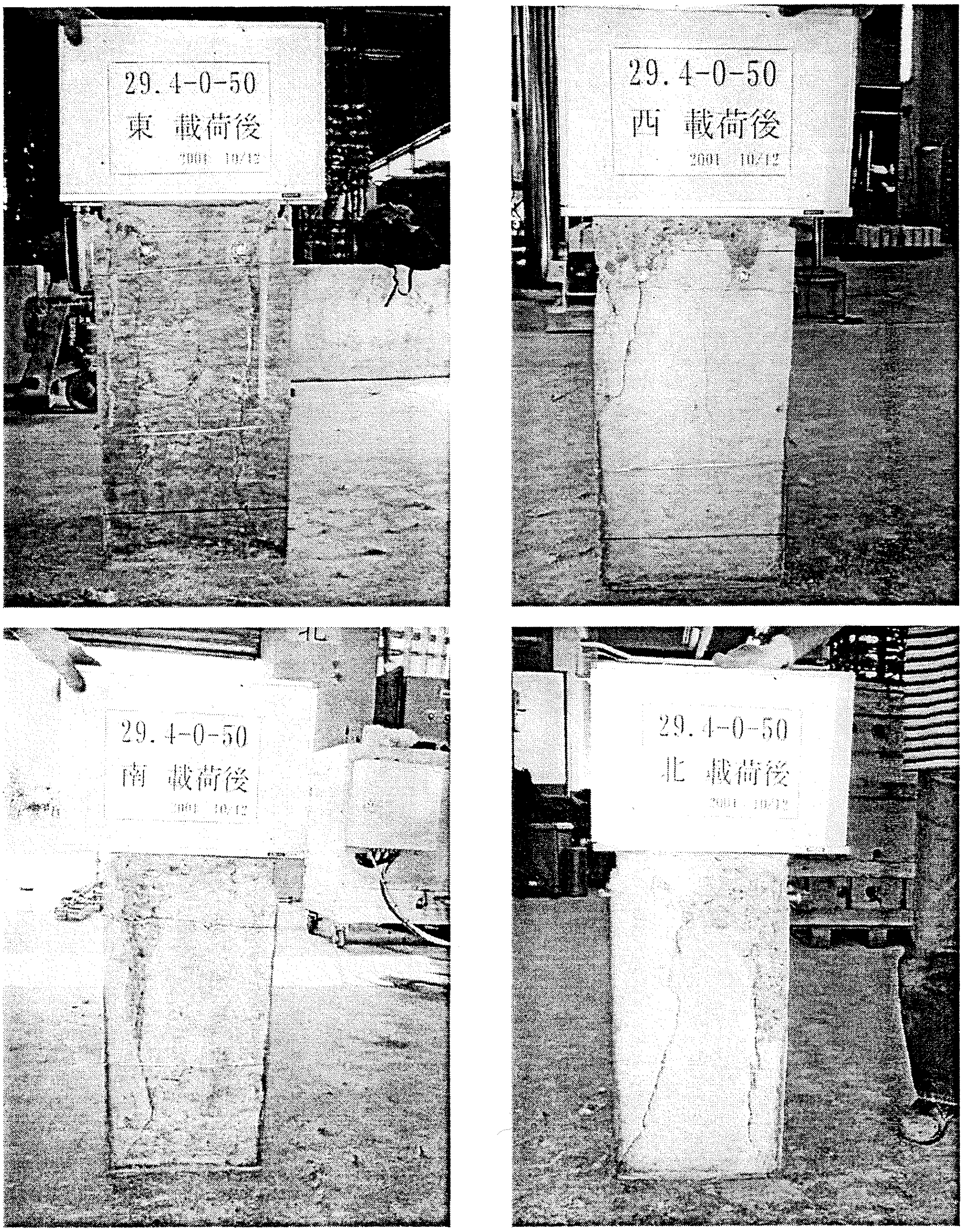


写真 4-4　29.4-0-20 の載荷後の破壊性状

写真 4-5　29.4-1.5-20 の載荷後の破壊性状

4.2.3. 24.4cm 角シリーズ

以下に 24.4cm 角シリーズの試験体の載荷状況、破壊性状を示す。このシリーズの試験体の公称コンクリート強度は 50MPa である。なお載荷方法は(g)24.4-0-50 は単調載荷、(h)24.4-1.5-50、(i)24.4-2.0-50、(j)24.4-2.5-50 は繰り返し載荷で行った。そして、2.0%タイプの横補強筋破断状況を**写真 4-6** に、このシリーズの代表的破壊性状を無筋タイプ(24.4-0-50)は**写真 4-7** に、また横拘束タイプ(24.4-2.0-50)は**写真 4-8** に示す。また 24.4cm 角シリーズの載荷速度は、変位制御で 0.0017mm/sec である。繰り返し載荷のサイクルの予定は前回と同様であるが、除荷を 0.75MN まで行っている。

24.4cm 角シリーズの各試験体の最大応力及びその時の歪は、**表 4-3** の通りである。

表 4-3　24.4cm 角シリーズの試験体強度

試験体名称	最大応力(MPa)	最大応力時の歪(%)
24.4-0-50	39.42	0.157
24.4-1.5-50	48.57	0.283
24.4-2.0-50	49.74	0.331
24.4-2.5-50	52.14	0.315

(k)　24.4-0-50

この試験体は、単調載荷で行った。最大荷重 2347kN を応力で 39.42MPa、歪が 0.157%の時に記録した。最終的に、歪が 1.6%の時に南面の崩壊により、変位計がずれたため、終了した。

破壊状況としては、29.4cm 角シリーズと同じく、試験体全面に縦方向のひび割れが見られた。

(l)　24.4-1.5-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 2892kN を応力で 48.57MPa、歪が 0.283%の時に記録した。その後、歪が 0.6%の時に、カバーコンクリートが落下し、変位計取り付け治具が傾いた。したがって、変位計のデータは信頼性がないと判断し、試験機のジャッキストロークで 2.0%まで押し切り、除荷して終了した。

破壊状況としては、隅角部の欠落が全面に見られた。また、29.4cm 角シリーズに比べ、カバーコンクリートの剥離が小規模で行われている。

(m)　24.4-2.0-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 2962kN を応力で 49.74MPa、歪が 0.331%の時に記録した。その後、歪が 1.64%の時に、カバーコンクリートが落下し、変位計取り付け治具が傾いた。したがって、変位計のデータは信頼性がないと判断し、試験機のジャッキストロークで 2.0%まで押し切り、除荷し 64 了した。

破壊状況としては、全面に縦方向のひび割れが見られた。また、0.6%の除荷が終了し、0.8%を目指して載荷していた時、鉄筋が切れたような音が聞こえ、急に荷重が下がった。その時は気が付かなかったが、1.2%の除荷が終わり、カバーコンクリートの除去作業をしていた時に、南面中央部の横補強筋の溶接部分が破断していることに気づいた。鉄筋が切れたような音がした時、急に荷重が下がったのは、横補強筋が破断したためだと分かった。

写真 4-6　鉄筋破断状況

(n)　24.4-2.5-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 3104kN を応力で 52.14MPa、歪が 0.315%の時に記録した。各載荷サイクルが終わった後に変位計の読みに注意しながらコンクリート片の除去を行った結果、カバーコンクリートが変位計取り付け治具に直撃することなく、歪で 2.0%まで行うことができた。この時点で、応力一定域に達していたので、除荷して終了した。

破壊状況としては、前回と同様、全面に縦方向のひび割れを見せた。

写真 4-7　24.4-0-50 の載荷後の破壊性状

写真 4-8　24.4-2.0-50 の載荷後の破壊性状

4.2.4. 19.4cm 角シリーズ

以下に 19.4cm 角シリーズの試験体の載荷状況、破壊性状を示す。このシリーズの試験体の公称コンクリート強度は 50MPa である。なお載荷方法は(g)19.4-0-50 は単調載荷、(h)19.4-1.5-50、(i)19.4-2.0-50、(j)19.4-2.5-50 は繰り返し載荷で行った。このシリーズの代表的な破壊性状として、無筋タイプを 19.4-0-50 の載荷後の写真（**写真 4-9** 参照）、横拘束タイプは 19.4-1.5-50 の載荷後の写真（**写真 4-10** 参照）を載せた。また 19.4cm 角シリーズの載荷速度は、変位制御で 0.0013mm/sec である。繰り返し載荷のサイクルの予定は前回と同様であるが、除荷を 0.5MN まで行っている。

19.4cm 角シリーズの各試験体の最大応力及びその時の歪は、**表 4-4** の通りである。

表 4-4　19.4cm 角シリーズの試験体強度

試験体名称	最大応力(MPa)	最大応力時の歪(%)
19.4-0-50	47.26	0.207
19.4-1.5-50	52.76	0.292
19.4-2.0-50	55.12	0.300
19.4-2.5-50	47.67	0.601

(o)　19.4-0-50

この試験体は、単調載荷で行った。最大荷重 1779kN を応力で 47.26MPa、歪が 0.207%の時に記録した。最終的に歪が 0.6%まで載荷した。

破壊状況としては、24.4cm 角シリーズと同じく、試験体全面に縦方向のひび割れが見られた。

(p)　19.4-1.5-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 1986kN を応力で 52.76MPa、歪が 0.292%の時に記録した。その後、歪が 1.2%の時に、カバーコンクリートの落下が原因で、変位計取り付け治具が傾いた。したがって、変位計のデータは信頼性がないと判断し、試験機のジャッキストロークで 2.0%まで押し切り、除荷して終了した。

破壊状況としては、前回の実験と同様で、試験体全面に縦方向のひび割れが見られた。また、組み立て筋の座屈が見られた。これは、50cm 角シリーズ等に比べ配筋間隔が広く、組み立て筋にかかる応力が大きかったためだと思われる。

(q)　19.4-2.0-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 2074kN を応力で 55.12MPa、歪が 0.300%の時に記録した。各載荷サイクルが終わった後に変位計の読みに注意しながらコンクリート片の除去を行った結果、カバーコンクリートが変位計取り付け治具に直撃することなく、歪で 2.0%まで行うことができた。この時点で、応力一定域に達していたので、除荷して終

了した。

破壊状況としては、ピーク後、0.4%程度で、東面と西面に顕著なひび割れが発生した。そして 0.6%に達するまでに、全面に縦方向のひび割れが確認できた。その後は、次第にカバーコンクリートが剥がれていった。

(r)　19.4-2.5-50

この試験体は、繰り返し載荷で行った。最大荷重 1794kN を応力で 47.67MPa、歪が 0.601%の時に記録した。この試験は、ピークに達していないが、0.4%になったので除荷したところ、はっきりとした最大荷重の測定が行えなかった。そのため、本来なら 0.3%程度で最大荷重が測定できるが、今回は 0.6%の時に測定された。各載荷サイクルが終わった後に変位計の読みに注意しながらコンクリート片の除去を行った結果、カバーコンクリートが変位計取り付け治具に直撃することなく、歪で 2.0%まで行うことができた。この時点で、応力一定域に達していたので、除荷して終了した。

破壊状況としては、0.4%に達するとき、西面、東面の変位計取り付け治具のボルト位置付近でひび割れが発生した。その後、全面に縦方向のひびが入り、0.8%程度でカバーコンクリートが剥がれ落ち始めた。

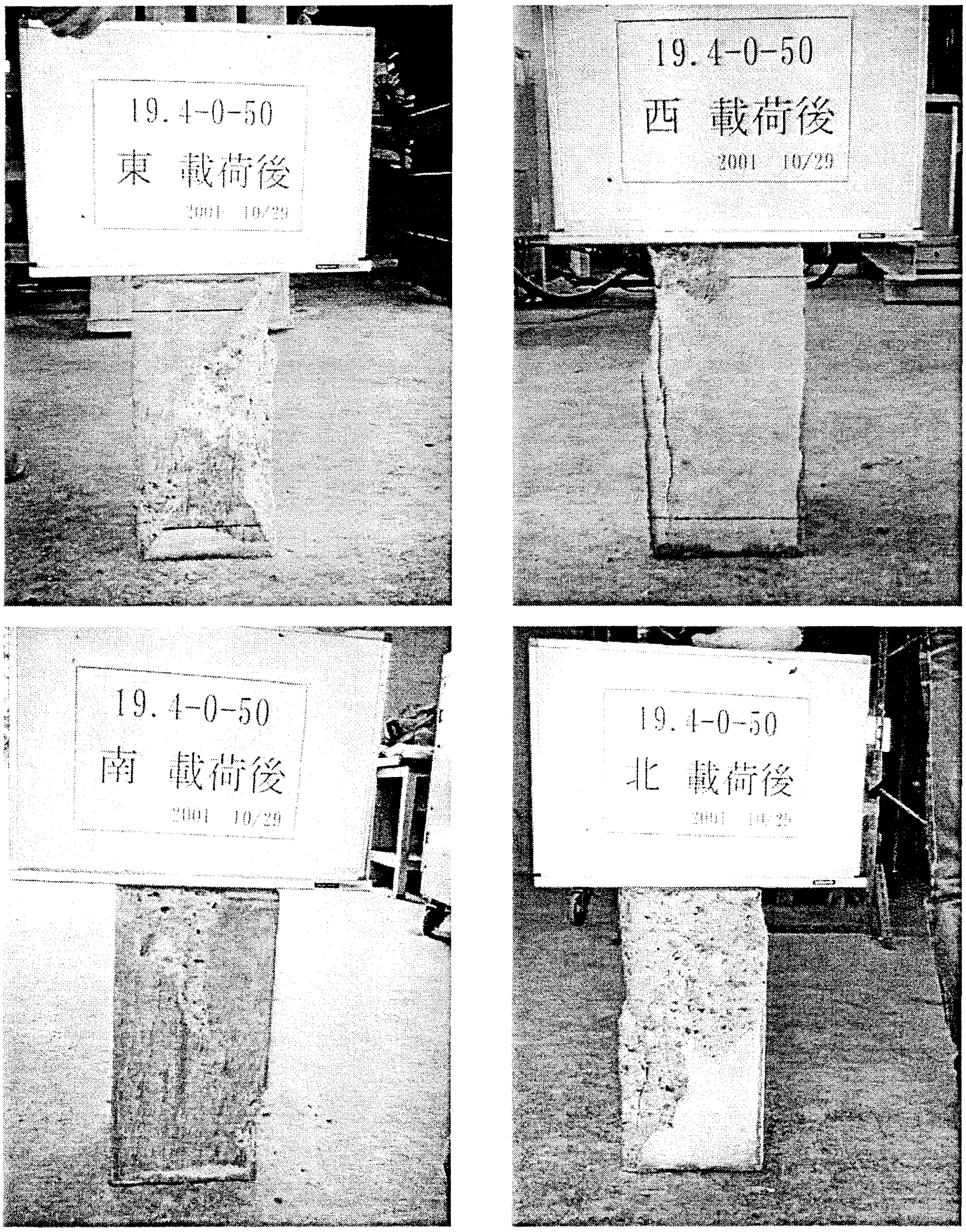


写真 4-9　19.4-0-50 の載荷後の破壊性状

写真 4-10　19.4-1.5-50 の載荷後の破壊性状

4.3.　コンクリート強度の影響

横軸にシリンダー強度σ_b、縦軸に試験体の最大耐力σ_{max}をシリンダー強度で除した相対強度σ_{max}/σ_bをとった図を**図 4-1** に示す。

このグラフは、試験体の最大耐力σ_{max}をシリンダー強度で除した相対強度σ_{max}/σ_bを縦軸にとった図であるため、コンクリート強度が異なる試験体どうしでも、相対強度の増減を評価することが可能である。無筋タイプよりも有筋タイプの方が、横拘束効果により相対強度が大きい傾向が出ている。また、試験体寸法の増大に対応して相対強度が低下する寸法効果の傾向が見られる。50cm 角シリーズとその他の試験体では、横軸の値に違いがあるのは、コンクリート強度の違いによるものだと言える。またプロットした点を結んでみると、右上がりの直線で結ぶことが可能だが、横補強筋量が増加するとともに、その直線の勾配が小さくなっていくことがわかる。これは、横補強筋により、寸法効果の影響が少なくなっているためであるといえる。

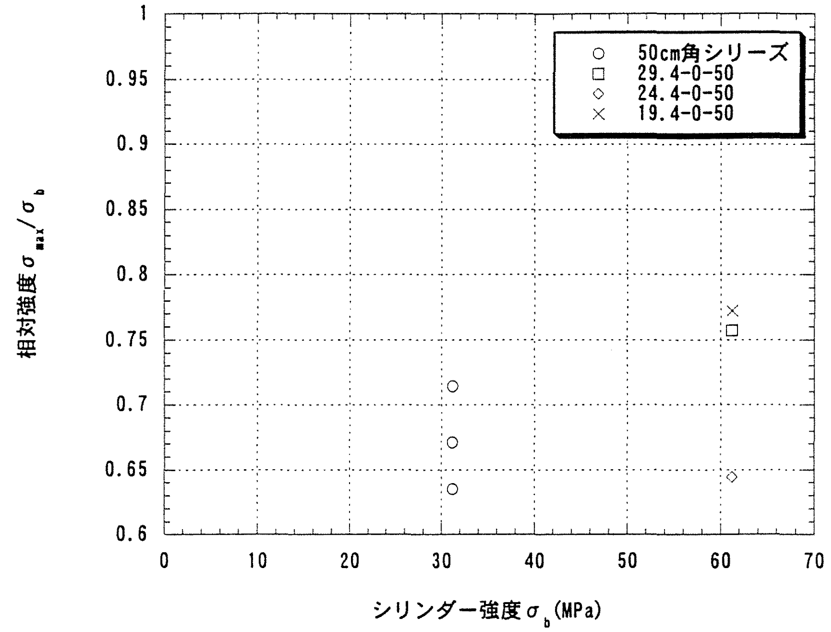
無筋タイプについては、24.4-0-50 の試験体を除いて、相関関係が若干見られる。24.4-0-50 の試験体の相対強度が低い原因として考えられるのは、荷重が偏心してかかり、そのためひび割れが生じて強度が低下したと考えられる。

また、1.5%タイプについては、相関関係が若干見られる。しかし、本来ならば、寸法効果により、寸法の小さい試験体のほうが相対強度の増加が見込めるはずであるが、29.4-1.5-50 の試験体より 24.4-1.5-50 の試験体の方が、相対強度が低い。この原因として考えられることは、荷重が偏心して載荷されたことによる最大耐力の低下であると考えられる。

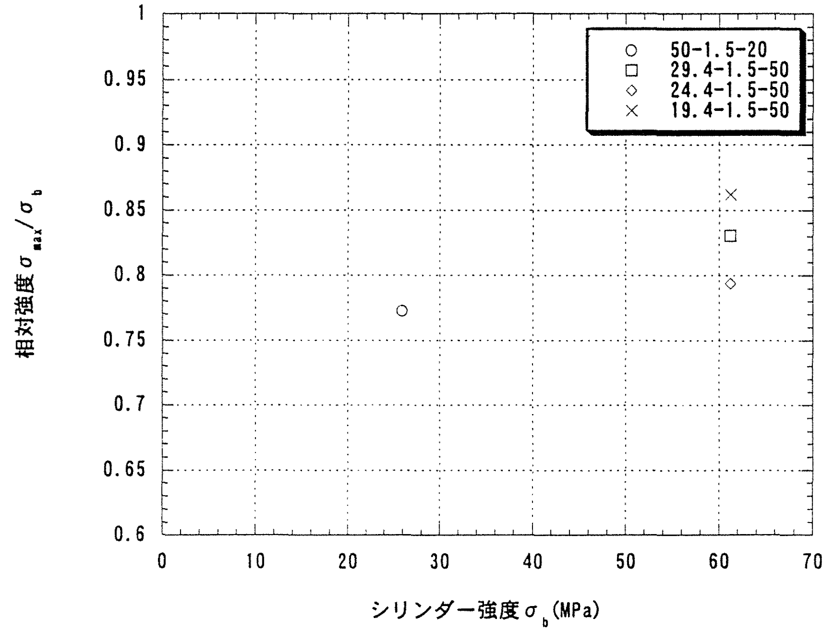
2.0%については、良好な相関関係が得られている。

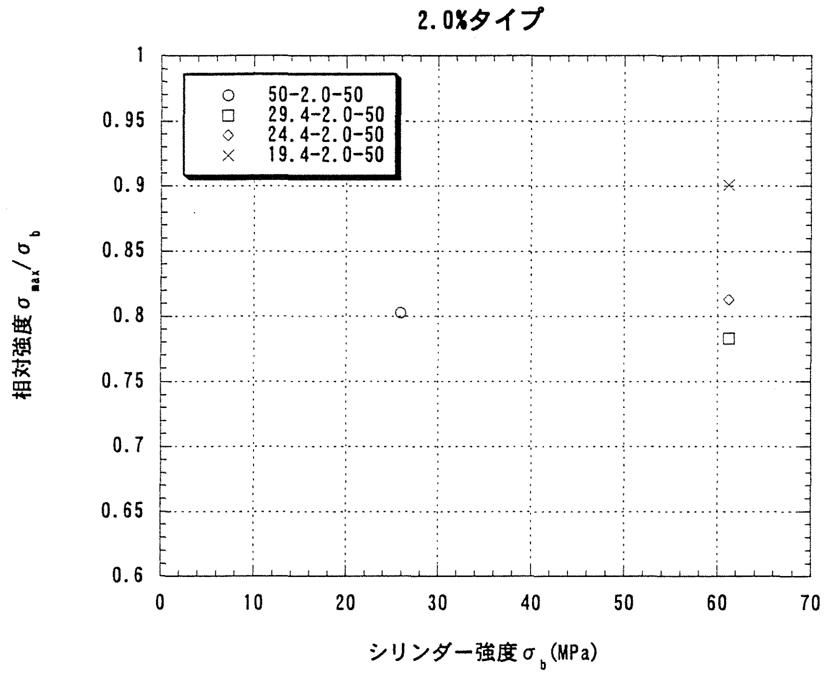
2.5%についても相関関係が見られる。なお、19.4cm 角シリーズの横補強筋量 2.5%タイプは、ピークに達していないが、規定の 0.4%になったので除荷したところ、はっきりとした最大荷重の測定が行えなかったため、この図には描いていない。

無筋タイプ


50cm角シリーズ
29.4-0-50
24.4-0-50
19.4-0-50
相対強度σmax/σb
シリンダー強度σb(MPa)

1.5%タイプ


50-1.5-20
29.4-1.5-50
24.4-1.5-50
19.4-1.5-50
相対強度σmax/σb
シリンダー強度σb(MPa)



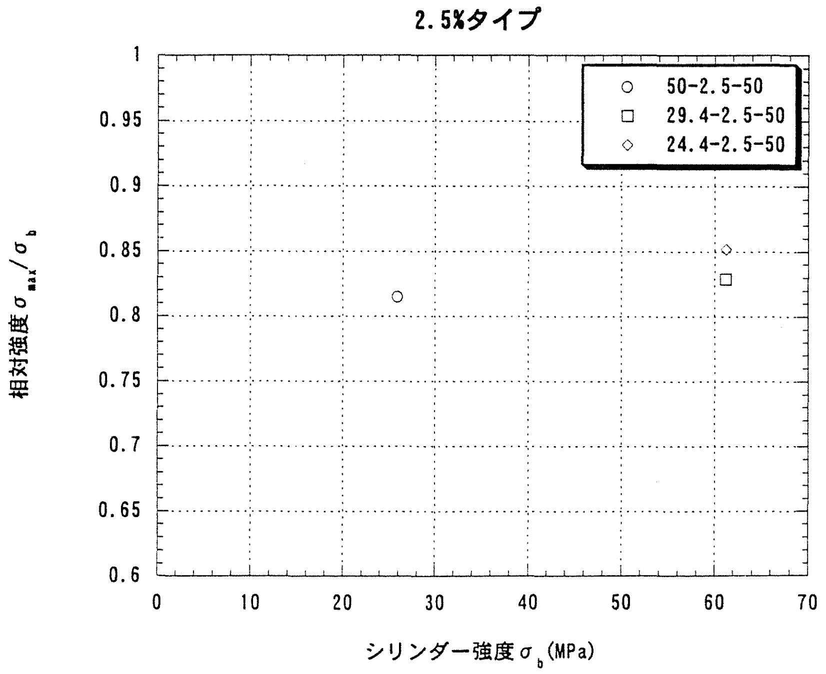


図 4-1　コンクリート強度の影響

4.4. 寸法効果の影響

ここでは実験結果より見られる寸法効果の影響を考察する。横補強筋量別に試験体のサイズが応力―歪曲線に及ぼす寸法効果の影響について考察する。無筋タイプと帯筋体積比1.5%、2.0%、2.5%の 4 種類があるので、**4.4.1.**、**4.4.2.**、**4.4.3.**、**4.4.4.**に章分けして考察する。

4.4.1. 無筋タイプの比較

無筋タイプの試験体は、50cm 角シリーズが 3 体、29.4cm 角シリーズ、24.4cm 角シリーズ、19.4cm 角シリーズがそれぞれ 1 体づつある。それぞれの最大応力を比較することで寸法効果の影響を見る。また、シリンダー強度と比較して、どの程度の試験体強度が出ているかを、相対強度として表し、評価する。

50cm 角シリーズの平均相対強度は 67.35%、29.4cm 角シリーズは 75.74%、24.4cm 角シリーズは 64.41%、19.4cm 角シリーズは 77.22%である。各試験体の相対強度は**表 4-5** に示す。**図 4-2** は、試験体寸法を横軸、相対強度を縦軸にとったグラフである。24.4cm 角シリーズを除き、試験体寸法が大きくなるにつれて、相対強度が小さくなる寸法効果が見られる。これは、本論文第 2 章に前述した通り、試験体が大きいほど、弱点あるいは弱い欠陥を持った要素が介入する可能性があるためであると考えられる。また、コンクリート設計基準強度が 20MPa である 50cm 角シリーズは修正 Neville20MPa の提案式の算定結果に、基準強度が 50MPa である 29.9cm 角シリーズと 19.4cm 角シリーズは修正 Neville50MPa の提案式の算定結果と酷似しており、今回の実験値と修正 Neville の式の算定結果には、相関関係が見られた。また、24.4cm 角シリーズは、修正 Neville20MPa の近似曲線から外れており、試験体寸法に対する相対強度が低い。原因として考えられるのは、荷重が偏心してかかり、そのためひび割れが生じて強度が低下したと考えられる。

表 4-5 無筋タイプの相対強度

試験体名	最大応力 (MPa)	相対強度 (%)
50-0-20-1	19.81	63.49
50-0-20-2	20.94	67.12
50-0-20-3	22.29	71.44
50cm 角平均	―	67.35
29.4-0-50	46.35	75.74
24.4-0-50	39.42	64.41
19.4-0-50	47.26	77.22

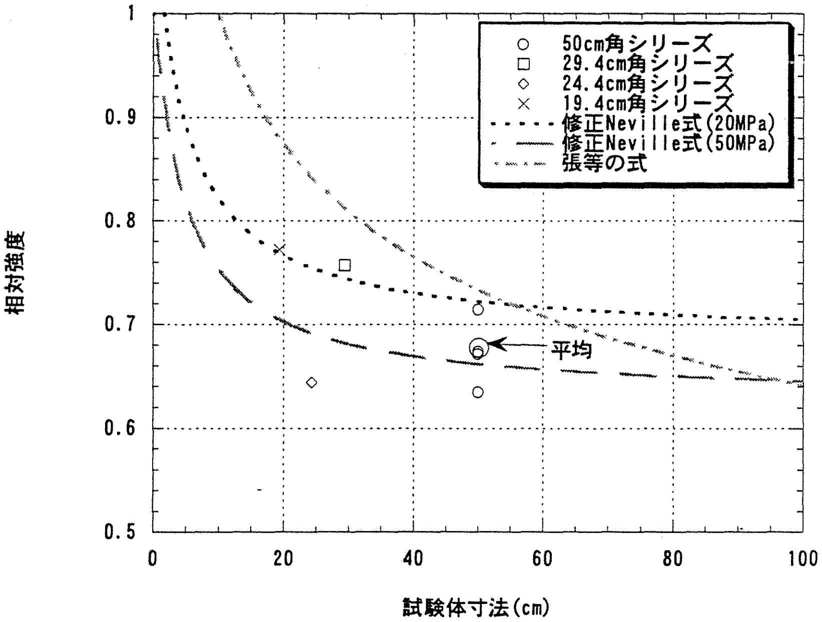


図 4-2　無筋タイプにおける寸法効果

4.4.2.　　帯筋体積比 1.5%タイプの比較

帯筋体積比 1.5%タイプの試験体は、50cm 角シリーズ、29.4cm 角シリーズ、24.4cm 角シリーズ、19.4cm 角シリーズがそれぞれ 1 体づつ、計 4 体ある。

50cm 角シリーズの相対強度は 77.26%、29.4cm 角シリーズは 83.07%、24.4cm 角シリーズは 79.36%、19.4cm 角シリーズは 86.21%である。各試験体の相対強度は**表 4-6** に示す。**図 4-2** の試験体寸法に対する相対強度のグラフを見ると、24.4cm 角シリーズの値が若干低いが、右下がりの近似曲線で結ぶことが出来、寸法効果が見られる。24.4cm 角シリーズの低下量は、誤差の範囲ではあるが、原因として荷重が偏心して載荷されたことによる最大耐力の低下であると考えられる。

表 4-6　帯筋体積比 1.5%タイプの相対強度

試験体名	最大応力（MPa）	相対強度（%）
50-1.5-20	20.01	77.26
29.4-1.5-50	50.84	83.07
24.4-1.5-50	48.57	79.36
19.4-1.5-50	52.76	86.21

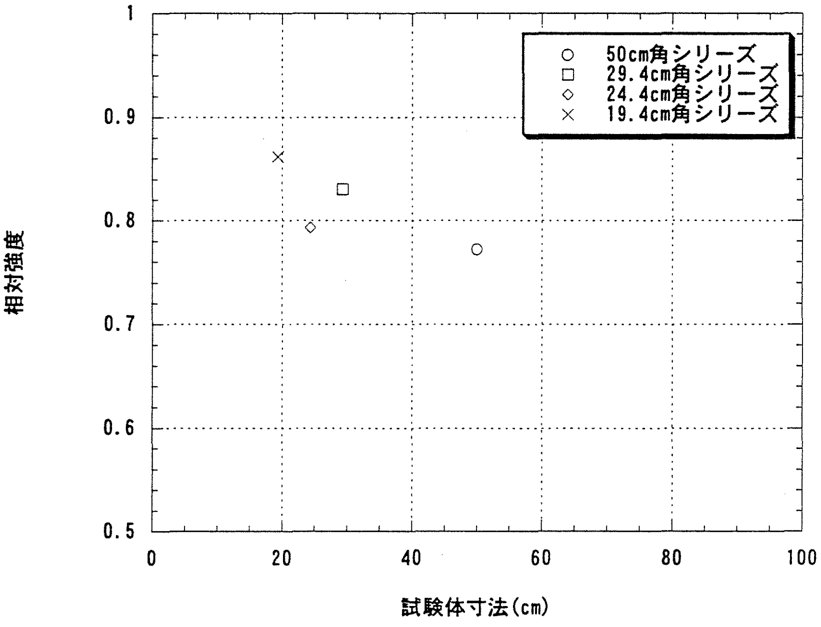


図 4-3　帯筋体積比 1.5%タイプにおける寸法効果

4.4.3.　帯筋体積比 2.0%タイプの比較

帯筋体積比 2.0%タイプの試験体は各シリーズそれぞれ 1 体づつ、計 4 体ある。

50cm 角シリーズの相対強度は 80.27%、29.4cm 角シリーズは 78.28%、24.4cm 角シリーズは 81.27%、19.4cm 角シリーズは 90.06%である。各試験体の相対強度は**表 4-7** に示す。**図 4-4** は、試験体寸法を横軸、相対強度を縦軸にとったグラフである。29.4cm 角シリーズは若干異なるが、だいたい右下がりの近似曲線で結ぶことが出来、寸法効果が見られる。29.4cm 角シリーズの相対強度の低下量を見る限り、誤差と考えてもよい範囲だが、荷重が偏心して載荷されたことによる最大耐力の低下とも考えられる。

表 4-7　帯筋体積比 2.0%タイプの相対強度

試験体名	最大応力 (MPa)	相対強度 (%)
50-2.0-20	20.79	80.27
29.4-2.0-50	47.91	78.28
24.4-2.0-50	49.74	81.27
19.4-2.0-50	55.12	90.06

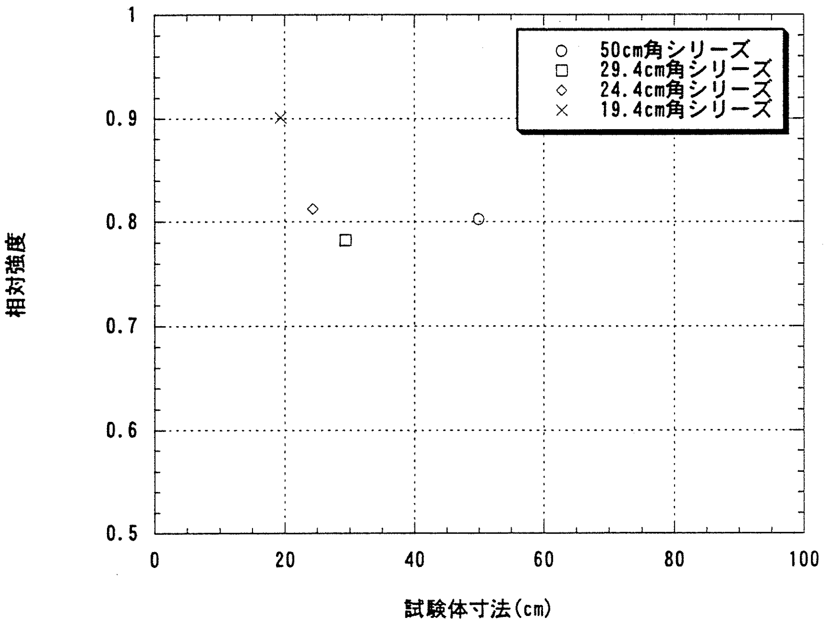


図 4-4　帯筋体積比 2.0%タイプにおける寸法効果

4.4.4.　帯筋体積比 2.5%タイプの比較

帯筋体積比 2.5%タイプの試験体は、50cm 角シリーズ、29.4cm 角シリーズ、24.4cm 角シリーズ、19.4cm 角シリーズがそれぞれ 1 体づつ、計 4 体ある。

50cm 角シリーズの相対強度は 81.51%、29.4cm 角シリーズは 82.91%、24.4cm 角シリーズは 85.20%、19.4cm 角シリーズは 77.89%である。各試験体の相対強度は**表 4-8** に示す。**図 4-5** は、試験体寸法に対する相対強度のグラフである。グラフを見ると、右下がりの近似曲線で結ぶことが出来、寸法効果が見られる。なお、19.4cm 角シリーズの横補強筋量 2.5%タイプは、ピークに達していないが、規定の 0.4%になったので除荷したところ、はっきりとした最大荷重の測定が行えなかったため、この図にはプロットしていない。

表 4-8　帯筋体積比 2.5%タイプの相対強度

試験体名	最大応力 (MPa)	相対強度 (%)
50-2.5-20	21.11	81.51
29.4-2.5-50	50.74	82.91
24.4-2.5-50	52.14	85.20
19.4-2.5-50	47.67	77.89

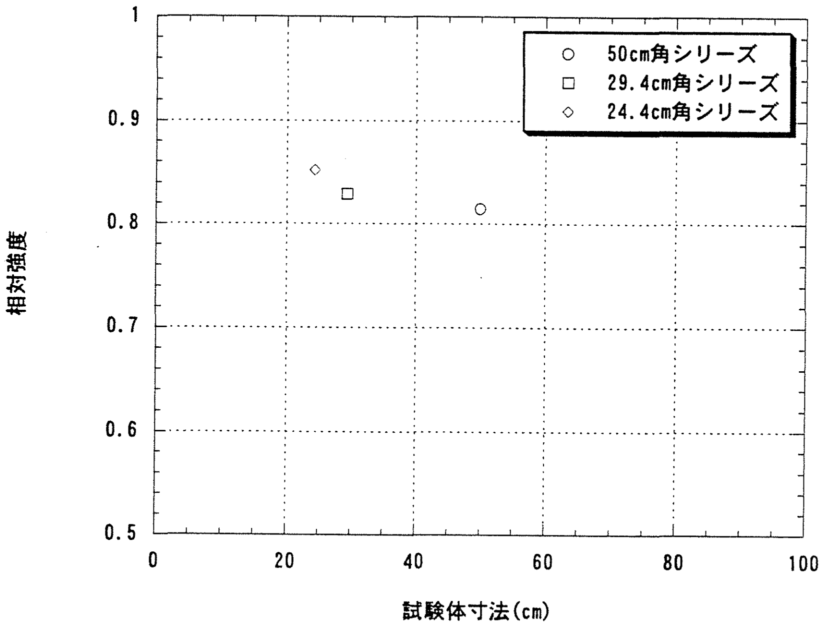


図 4-5 帯筋体積比 2.5%タイプにおける寸法効果

4.5. 横補強筋量の影響

実験結果より試験体サイズ別に、無筋タイプと横拘束タイプで、横補強筋が応力－歪曲線に及ぼす横拘束効果の影響について考察する。主として、最大応力の比較、終局歪の比較によって、横補強筋の影響を評価する。なお、各実験値に示す終局歪は、歪軟化領域における最大応力の 0.85%時の歪と仮定した値である。

4.5.1. 50cm 角シリーズの比較

ここでは、50cm 角シリーズの無筋、横拘束タイプでの比較を行う。**表 4-9** に 50cm 角シリーズの終局歪を示す。50cm 角シリーズは、無筋タイプ（50-0-20-1、50-0-20-2、50-0-20-3）のコンクリート圧縮強度は 31.2MPa、横拘束タイプ（50-1.5-20、50-2.0-20、50-2.5-20）は 25.9MPa と圧縮強度に違いがあるため、応力上昇率を計算しているが、比較についての考察は行わない。横拘束タイプでは、最大応力が 1.5%では 20.01MPa、2.0%で 20.79MPa、2.5%で 21.11MPa であり、横補強筋量の違いによる最大応力の増加は少ない。また、終局歪に対しては、1.5%では 0.405、2.0%では 0.425、2.5%では 0.428 であり、若干の増加が見られる。

また、**図 4-6** に 50cm 角シリーズの繰り返しループの包括線をとった応力－歪関係を示す。

最大応力後の応力降下域での勾配は、無筋タイプは歪の進行に対する応力の低下が大きく、勾配が急になっている。一方、横拘束タイプは最大応力後の勾配が緩やかで、応力一定域に入っている。このことから、横補強筋によって変形性能が改善され、試験体の靭性が大きくなったと考えられる。

また、**図 4-7** から**図 4-9** に各横拘束タイプの試験体歪－鉄筋歪関係を示す。なお 2.5%タイプについては、試験体歪が 0.3%付近で、カバーコンクリートの欠落により歪ゲージが切断され、それ以降のデータは取れていない。試験体歪で 1～1.5%まで載荷しているが、その時点での鉄筋の降伏は見られない。図を見てもわかるように、一番上に設置された歪ゲージ(E1)が一番伸びており、試験体の上部が膨らんでいることがわかる。理由としては、試験体下部は自重で拘束されており、かつ打設が縦打ちのため、骨材が上部に少なくなり上部の強度が低下することが考えられる。

表 4-9　50cm 角シリーズの終局歪

	最大応力(MPa)	応力上昇率(%)	最大応力時の歪(%)	終局歪(%)
50-0-20-1	19.81	－	0.119	0.149
50-0-20-2	20.94	－	0.154	0.191
50-0-20-3	22.29	－	0.161	0.223
50-1.5-20	20.01	95.23	0.266	0.405
50-2.0-20	20.79	98.94	0.263	0.425
50-2.5-20	21.11	100.46	0.247	0.428

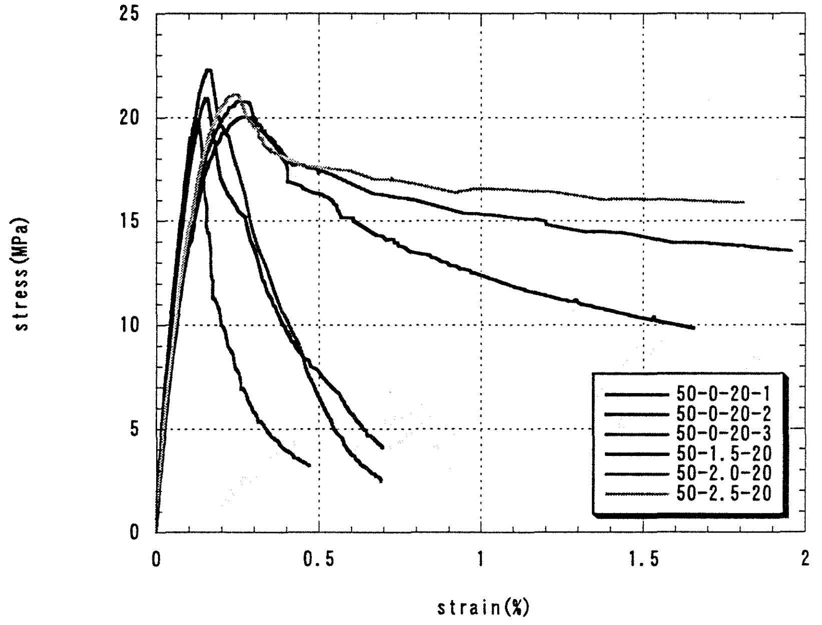


図 4-6　50cm 角シリーズの応力－歪関係

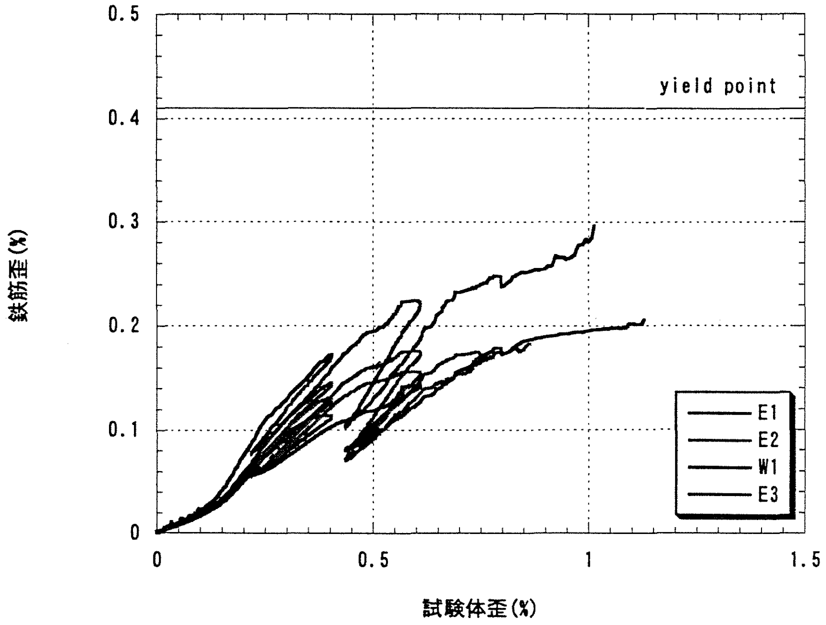


図 4-7　1.5%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

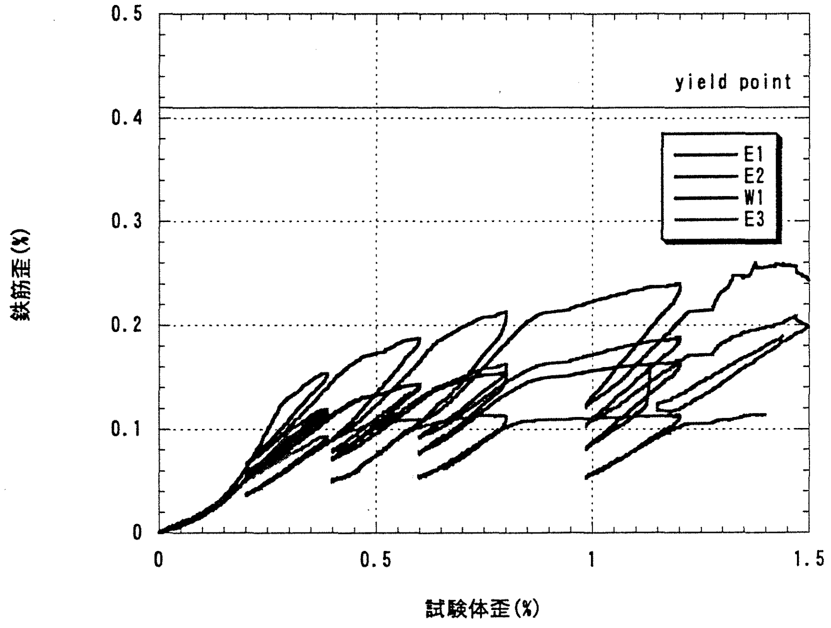


図 4-8　2.0%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

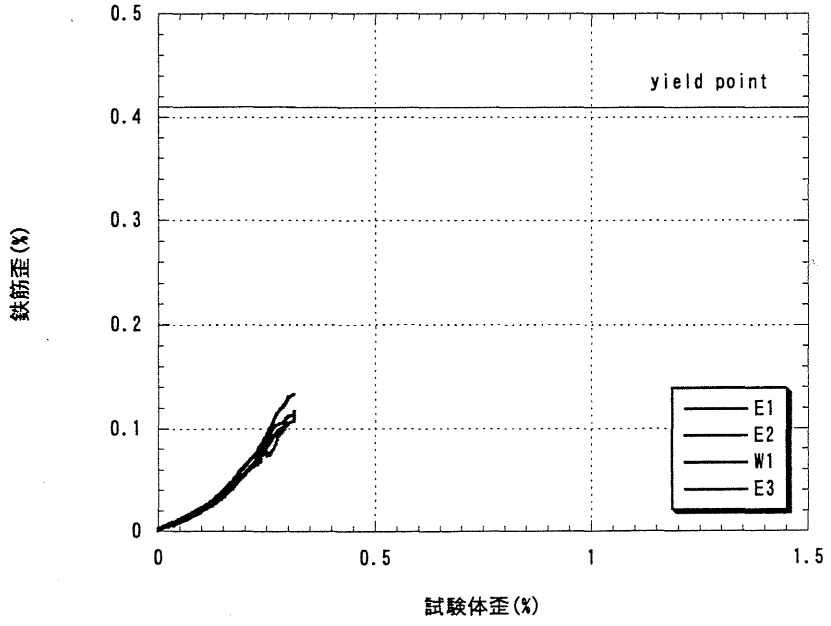


図 4-9　2.5%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

4.5.2.　29.4cm 角シリーズの比較

ここでは、29.4cm 角シリーズの無筋、横拘束タイプそれぞれの応力－歪関係を比較する。**表 4-10** に 29.4cm 角シリーズの終局歪を示す。このシリーズのコンクリート強度は 61.2MPa である。最大応力の上昇率は、1.5%が 109.69%、2.0%が 103.37%、2.5%が 109.47%であり、無筋タイプに比べ、横拘束タイプは最大応力が 5%程度上昇していることがわかる。横拘束タイプでは、最大応力が 1.5%では 50.84MPa、2.0%で 47.91MPa、2.5%で 50.74MPa であり、横補強筋量の違いによる最大応力の増加は見られない。2.0%の最大応力が他のそれと比べると低く、その要因として考えられるのは、荷重が偏心して載荷されたことによる最大耐力の低下であると考えられる。また、終局歪に対しては、1.5%では 0.367、2.0%では 0.558、2.5%では 0.704 であり、顕著な増加が見られる。

また、**図 4-10** に 29.4cm 角シリーズの繰り返しループの包括線をとった応力－歪関係を示す。最大応力後の応力降下域での勾配は、50cm 角シリーズと同様で、無筋タイプは歪の進行に対する応力の低下が大きく、横拘束タイプは最大応力後の勾配が緩やかである。このことから、試験体の変形性能が横補強筋によって改善され、よりよい靭性を持ったものと考えられる。また、無筋タイプと横拘束タイプを比べると、横拘束タイプの弾性域が長いことがわかる。このことから、弾性域内での吸収エネルギーが大きいことがわかる。

また、**図 4-11** から**図 4-13** に各横拘束タイプの試験体歪－鉄筋歪関係を示す。試験体歪で 1.5%程度まで載荷しているが、その時点での鉄筋の降伏は見られない。図を見てもわかるように、一番上に設置された歪ゲージ(E1)が一番伸びており、試験体の上部が膨らんでいることがわかる。

表 4-10　29.4cm 角シリーズの終局歪

	最大応力(MPa)	応力上昇率(%)	最大応力時の歪(%)	終局歪(%)
29.4-0-50	46.35	－	0.258	0.275
29.4-1.5-50	50.84	109.69	0.306	0.367
29.4-2.0-50	47.91	103.37	0.336	0.558
29.4-2.5-50	50.74	109.47	0.312	0.704

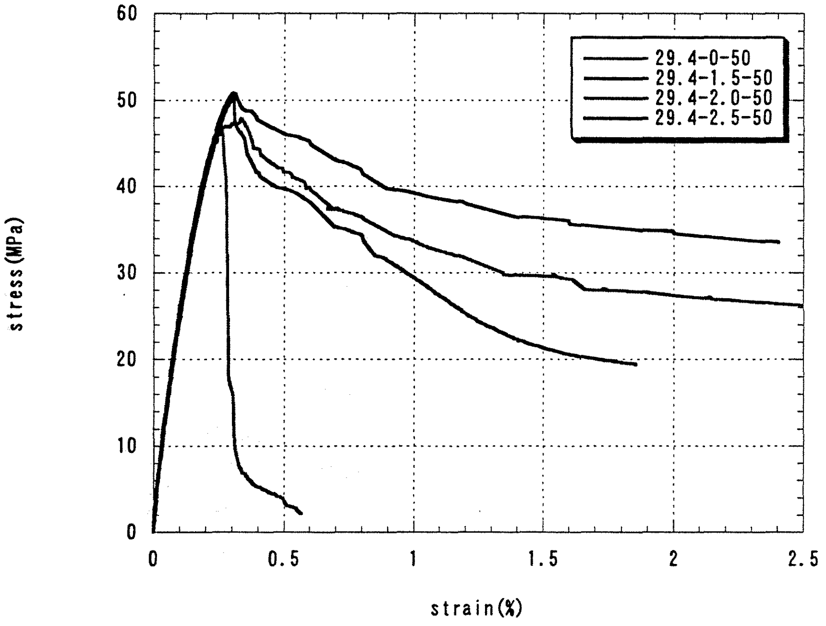


図 4-10　29.4cm 角シリーズの応力－歪関係

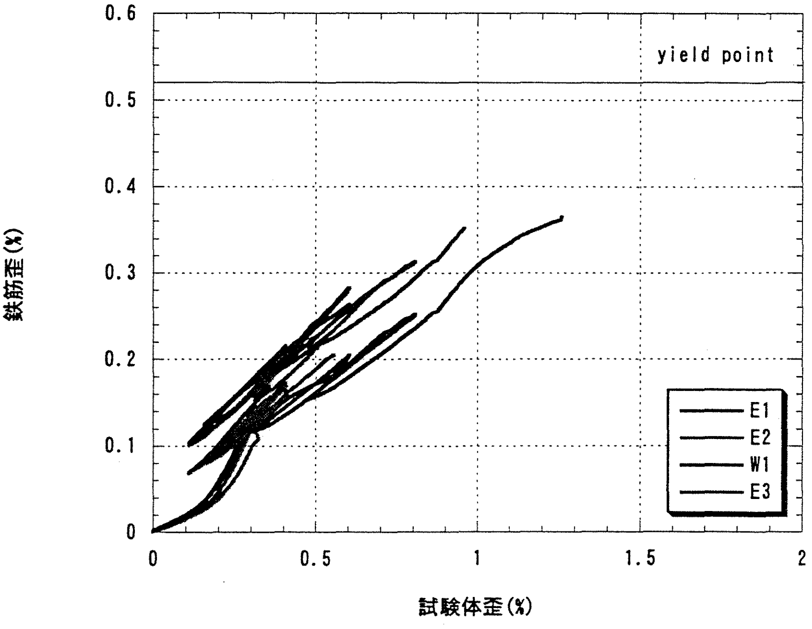


図 4-11　1.5%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

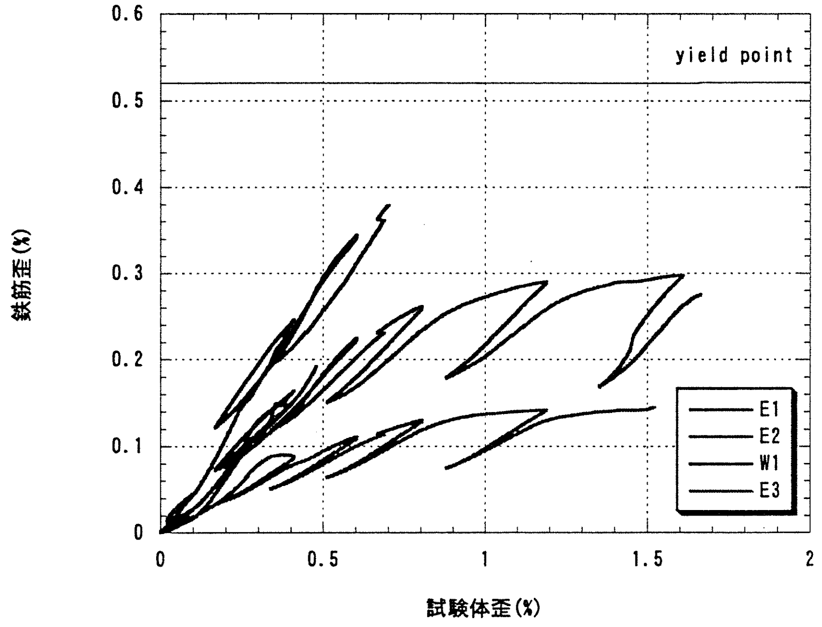


図 4-12　2.0%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

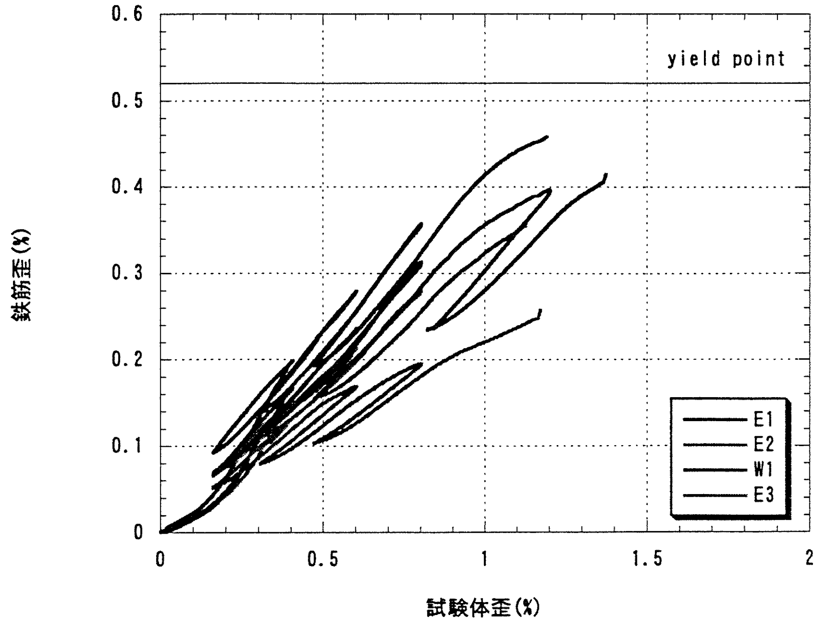


図 4-13　2.5%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

4.5.3.　24.4cm 角シリーズの比較

ここでは、24.4cm 角シリーズの無筋、横拘束タイプそれぞれの応力－歪関係を比較し、考察する。**表 4-11** に終局歪を示す。コンクリート強度は、29.4cm 角シリーズと同様である。最大応力の上昇率は、1.5%が 123.21%、2.0%が 126.18%、2.5%が 132.27%であり、無筋タイプに比べ、横拘束タイプは最大応力が大幅に向上していることがわかる。また、横拘束タイプでは、最大応力が 1.5%では 48.57MPa、2.0%で 49.74MPa、2.5%で 52.14MPa であり、横補強筋量の違いによる最大応力の増加が見られる。また終局歪は、1.5%では 0.470、2.0%では 0.585、2.5%では 0.620 であり、増加が見られる。

また、**図 4-14** に繰り返しループの包括線をとった応力－歪関係を示す。最大応力後の応力降下域での勾配は、50cm 角シリーズ、29.4cm 角シリーズと同様である。このことから、試験体の変形性能が横補強筋によって改善され、横補強筋量の増加により靭性が増加したことがわかる。

また、**図 4-15** から**図 4-17** に各横拘束タイプの試験体歪－鉄筋歪関係を示す。2.5%タイプでは、中間部西側に設置された鉄筋が降伏している。それ以外のタイプでは、試験体歪で 2%程度まで載荷しているが、鉄筋の降伏は見られない。また、図を見てもわかるように、2.5%タイプを除き、上部の鉄筋(E1)が一番伸びており、試験体の上部が膨らんでいることがわかる。2.5%タイプは中間部の鉄筋（E2、W1）が上部の鉄筋(E1)より伸びており、試験体の中央部が膨らんでいることがわかる。理由としては、試験体の品質の不均一性が考えられる。

表 4-11　24.4cm 角シリーズの終局歪

	最大応力(MPa)	応力上昇率(%)	最大応力時の歪(%)	終局歪(%)
24.4-0-50	39.42	－	0.157	0.259
24.4-1.5-50	48.57	123.21	0.283	0.470
24.4-2.0-50	49.74	126.18	0.331	0.585
24.4-2.5-50	52.14	132.27	0.315	0.620

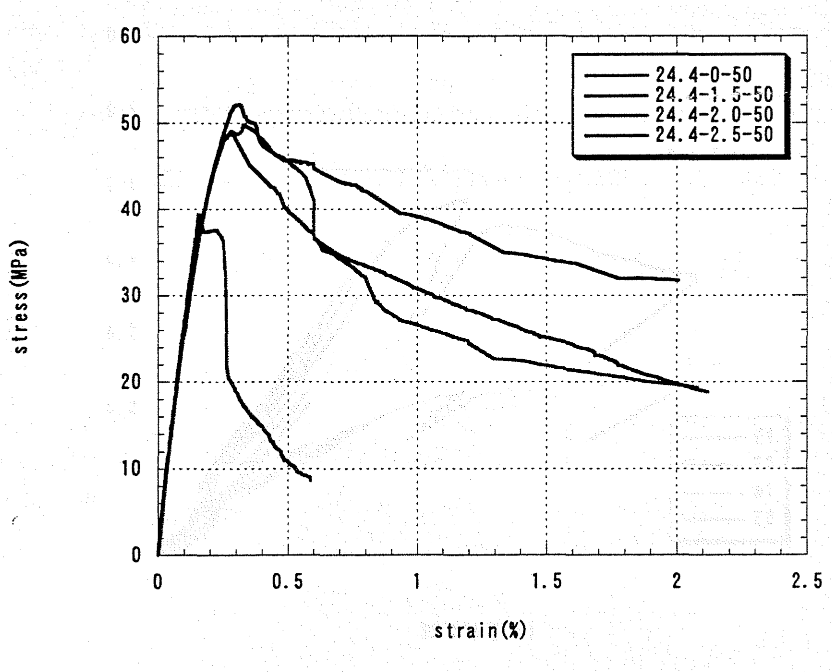


図 4-14 24.4cm角シリーズの応力ー歪関係

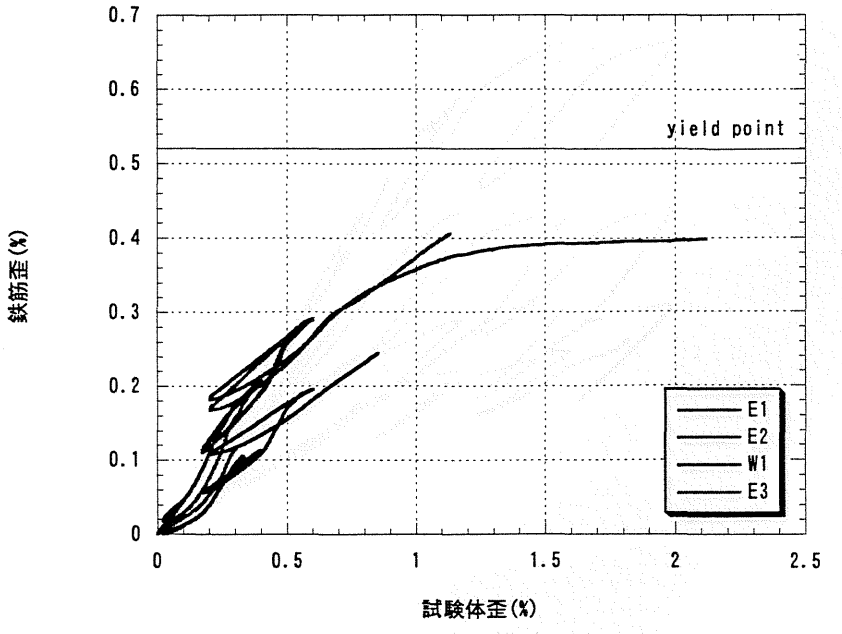


図 4-15 1.5%タイプの試験体歪ー鉄筋歪関係

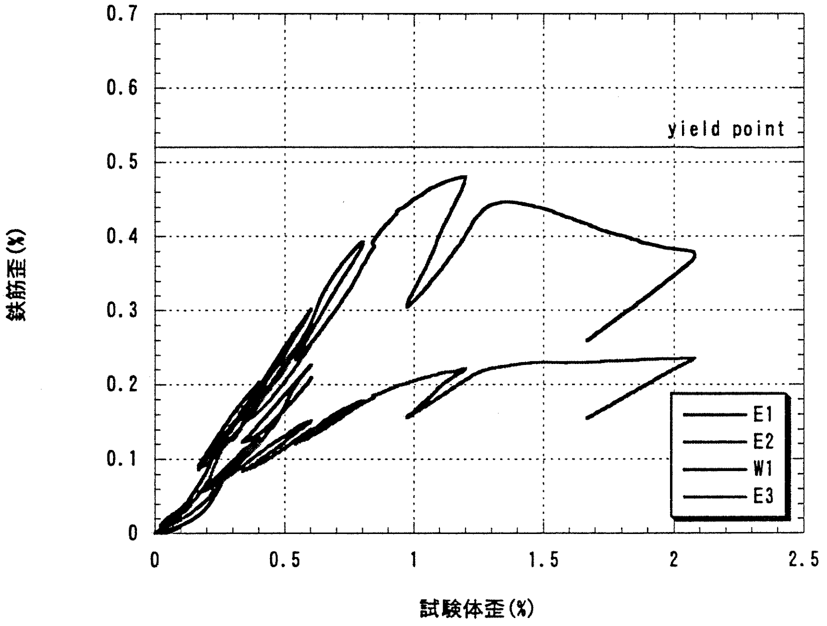


図 4-16　2.0%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

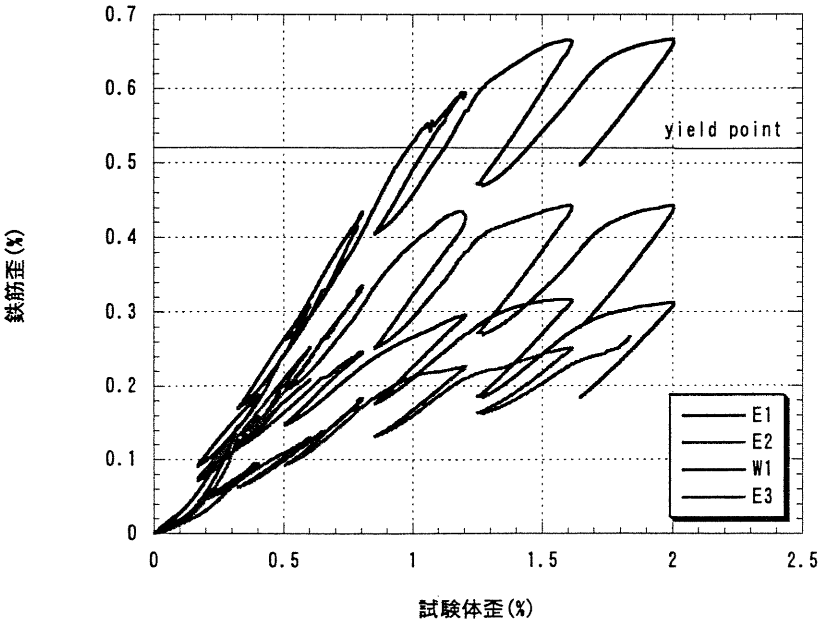


図 4-17　2.5%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

4.5.4.　19.4cm 角シリーズの比較

ここでは、19.4cm 角シリーズの無筋、横拘束タイプでの比較を行う。**表 4-12** に終局歪を示す。コンクリート強度は、前シリーズと同様である。最大応力の上昇率は、1.5%が 111.64%、2.0%が 116.63%、2.5%が 100.87%であり、2.5%以外は、横拘束タイプの最大応力が大幅に向上していることがわかる。2.5%の試験は、ピークに達する前に 0.4%になったので除荷したところ、はっきりとした最大荷重の測定が行えなかったため、無筋タイプに比べ応力上昇率が低くなったと考えられる。そのため、2.5%に対しての比較は以下行わない。また、横拘束タイプでは、最大応力が 1.5%では 52.76MPa、2.0%で 55.12MPa であり、横補強筋量の違いによる最大応力の増加が見られる。また終局歪は、1.5%では 0.405、2.0%では 0.584 であり、増加が見られる。

また、**図 4-18** に繰り返しループの包括線をとった応力ー歪関係を示す。最大応力後の応力降下域での勾配の形状は、前シリーズと同様である。このことから、横補強筋量の増加により靭性が増加したことがわかる。

また、**図 4-19** から**図 4-21** に各横拘束タイプの試験体歪ー鉄筋歪関係を示す。全タイプにおいて、鉄筋の降伏は見られない。また、図を見てもわかるように、2.5%タイプは上部の鉄筋(E1)が一番伸びており、試験体の上部が膨らんでいることがわかる。2.5%タイプ以外は中間部の鉄筋（E2、W1）が上部の鉄筋(E1)より伸びており、試験体の中央部が膨らんでいることがわかる。理由としては、試験体の品質の不均一性が考えられる。

表 4-12　19.4cm 角シリーズの終局歪

	最大応力(MPa)	応力上昇率(%)	最大応力時の歪(%)	終局歪(%)
19.4-0-50	47.26	−	0.207	0.250
19.4-1.5-50	52.76	111.64	0.292	0.405
19.4-2.0-50	55.12	116.63	0.300	0.584
19.4-2.5-50	47.67	100.87	0.601	1.349

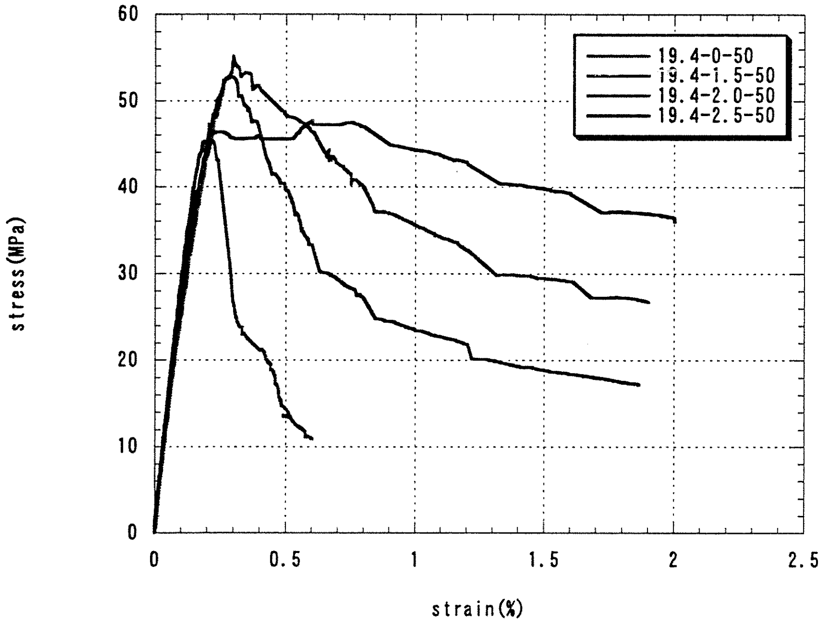


図 4-18　19.4cm 角シリーズの応力－歪関係

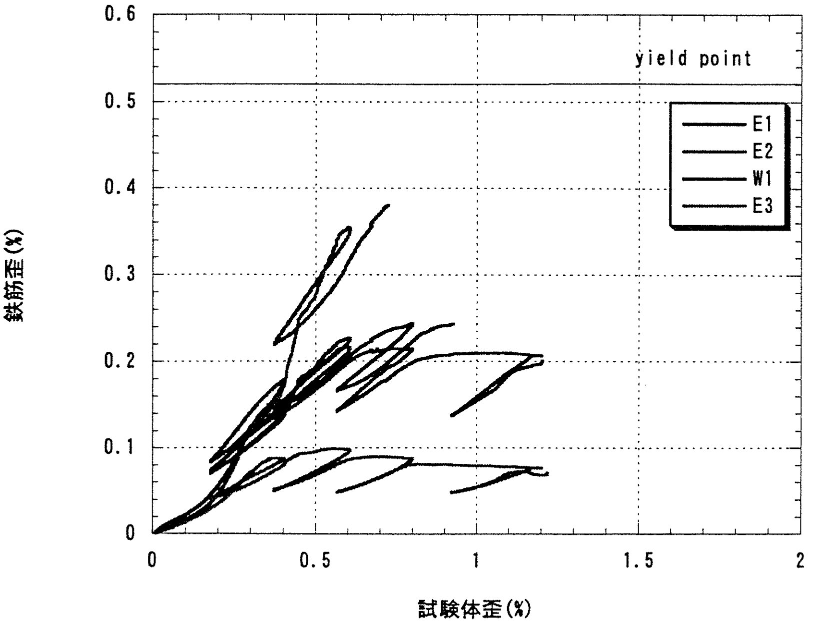


図 4-19　1.5%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

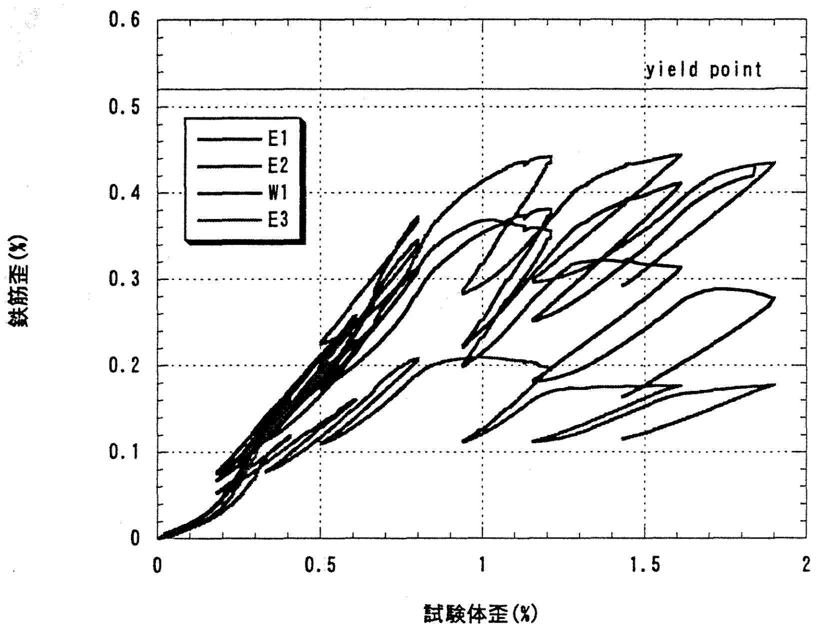


図 4-20　2.0%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

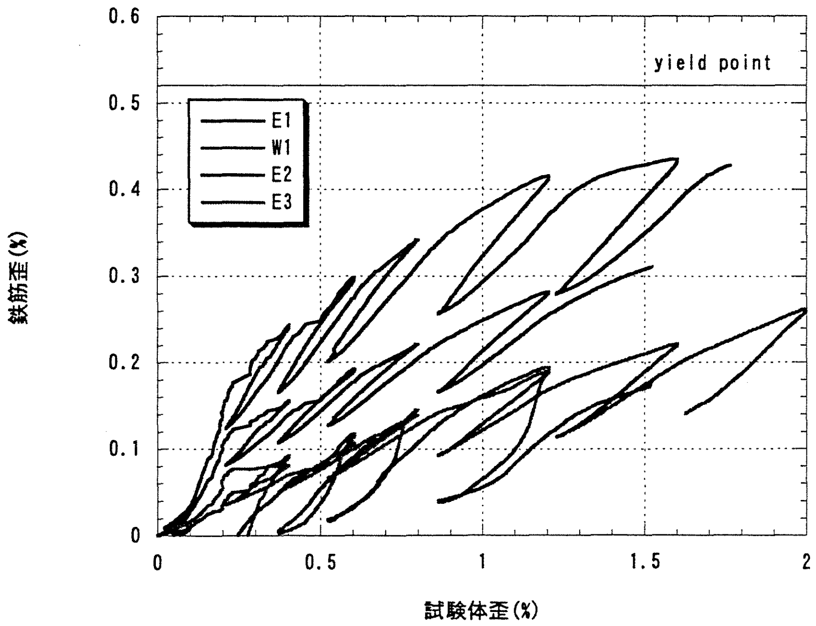


図 4-21　2.5%タイプの試験体歪－鉄筋歪関係

4.5.5. 横補強筋量の影響

横軸に横拘束力 P_w と鉄筋の降伏応力 σ_{wy} をかけ、縦軸に試験体の最大応力 σ_{max} をシリンダー強度 σ_b で除した相対強度 σ_{max}/σ_b をとった図を**図 4-22** に示す。この図を描くことにより、横補強筋量の異なる試験体シリーズを比較することが可能となる。この図から横補強筋量が増えるとともに相対強度も上がっていることがわかる。また、試験体の寸法の増大に比例して相対強度も減少し、寸法効果が見られる。19.4cm 角シリーズの横補強筋量 2.5%タイプは、ピークに達していないが、規定の 0.4%になったので除荷したところ、はっきりとした最大荷重の測定が行えなかったため、この図には描いてない。29.4cm 角シリーズの一点（横補強筋量 1.5%タイプ）が外れている理由については、試験体の品質の不均一性が原因であると考えられる。

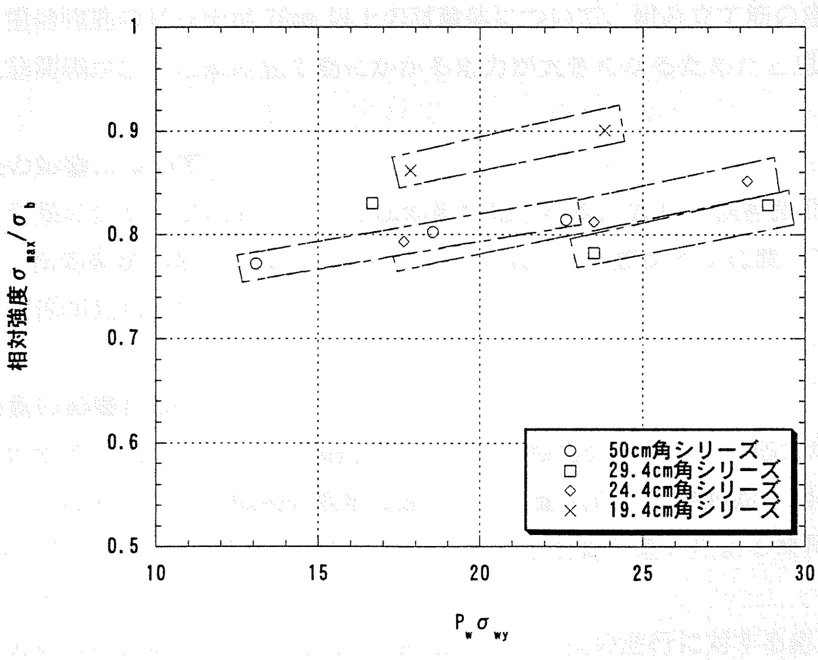


図 4-22 横補強筋量の影響

まとめ

ここでは、本章で述べた結果をまとめる。

・ **試験体の破壊性状について**

破壊形状について、コンクリート強度が 20MPa の試験体は、東西面に V 字型のひび割れを生じるが、50MPa の試験体は縦方向のひび割れが見られる。また、20MPa の試験体ではカバーコンクリートが剥離していたが、50MPa の試験体は、まず、表面のモルタル部分が剥離し、その後でカバーコンクリートが剥がれ落ちていた。

また横補強筋体積比が小さいと、大きなカバーコンクリートが落下する可能性が高く、これが変位計取り付け治具に直撃しやすく、載荷を 2.0%程度まで続けることが困難であるが、横補強筋体積比が大きいと、カバーコンクリートが早い段階から崩れ落ち、変位計取り付け治具に大きいカバーコンクリートが直撃する可能性が低く、載荷を 2.0%以上続けることが可能だということが言える。

また、横補強筋のピッチが 70mm 以上の試験体について、組み立て筋の座屈が見られた。これは、配筋間隔が広いと組み立て筋にかかる応力が大きくなるためだと思われる。

・ **寸法効果の影響について**

横補強筋量の全タイプにおいて、寸法効果が見られる。また、横補強筋量が大きくなるにつれて、寸法効果が小さくなることがわかった。また、無筋タイプに関しては、修正 Neville 式と相関関係が見られた。

・ **横補強筋量の影響について**

試験体のサイズにかかわらず、横拘束タイプは、無筋タイプに比べ応力が向上する。また、横拘束タイプにおいては、横補強筋量の違いによる最大応力の増加が、24.4cm 角シリーズと 19.4cm 角シリーズについて見られた。また、横補強筋量の違いによる終局歪の増加が、全サイズにおいて見られた。

最大応力後の応力降下域での勾配は、無筋タイプは歪の進行に対する応力の低下が大きく、横拘束タイプは最大応力後の勾配が緩やかである。このことから、試験体の変形性能が横補強筋によって改善され、横補強筋量の増加により靭性が増加したことがわかるまた、無筋タイプと横拘束タイプを比べると、横拘束タイプの弾性域が長いことがわかる。このことから、弾性域内での吸収エネルギーが大きいことがわかる。

5.既往の研究との比較

本章では、第 4 章に示した本試験における実験結果をもとに、本論文第 2 章で述べた角型横拘束筋により横補強されたコンクリートの歪軟化領域を含む圧縮応力－歪曲線に関する既往の提案式との比較を行う。

5.1. 既往の提案式に用いたデータについて

比較に用いた既往の提案式は、コンクリート圧縮強度が普通強度から 60MPa を超える高強度の場合についても横拘束コンクリートの応力－歪関係について表せるとしている Mander 式、Watanabe 式、Suzuki 式、NewRC 式、修正 Kent&Park 式の 5 つを用いた。なお、本論文第 2 章 2.3.6. で述べた Sheikh、Uzumeri モデルは、高強度コンクリートは適用範囲外なので比較の対象からはずしている。また、NewRC モデルを除く上記提案式に用いたプレーンコンクリートの強度は、φ10×20cm シリンダー強度の値を用いた。なお、NewRC モデルの場合は、シリンダー強度からプレーンコンクリートの強度を表すようになっている。

50cm 角シリーズの無筋タイプのコンクリート強度（プレーンコンクリート強度かシリンダー強度か明確に）は 31.2MPa、横拘束筋タイプは 25.9MPa、29.4cm 角シリーズ、24.4cm 角シリーズ、19.4cm 角シリーズの無筋タイプ、横拘束タイプは 61.2MPa である。なお、コアコンクリート断面積の算定については、試験体に埋め込まれている組み立て筋、吊り上げ専用ボルト等は、今回の比較では取り扱っていない。検証に用いた実験データについて**表 5-1** に示す。

表 5-1　検証に用いたデータ

	コンクリート強度？ (MPa)	公称呼び径	公称降伏強度 (MPa)	かぶり (cm)	ピッチ (cm)	体積比 (%)
50-0-20-1	31.2	−	−	−	−	−
50-0-20-2	31.2	−	−	−	−	−
50-0-20-3	31.2	−	−	−	−	−
50-1.5-20	25.9	D16	785	3	12	1.56
50-2.0-20	25.9	D16	785	3	8.5	2.21
50-2.5-20	25.9	D16	785	3	7	2.70
29.4-0-50	61.2	−	−	−	−	−
29.4-1.5-50	61.2	D10	785	1.5	7	1.56
29.4-2.0-50	61.2	D10	785	1.5	5	2.20
29.4-2.5-50	61.2	D10	785	1.5	4	2.70
24.4-0-50	61.2	−	−	−	−	−
24.4-1.5-50	61.2	D10	785	1.25	8	1.65
24.4-2.0-50	61.2	D10	785	1.25	6	2.20
24.4-2.5-50	61.2	D10	785	1.25	5	2.64
19.4-0-50	61.2	−	−	−	−	−
19.4-1.5-50	61.2	D10	785	1	10	1.67
19.4-2.0-50	61.2	D10	785	1	7.5	2.23
19.4-2.5-50	61.2	D10	785	1	6	2.78

5.2.　最大耐力の算定結果

本実験から得られた無筋タイプの最大耐力 σ_{co}、横拘束タイプの最大耐力 σ_{cc} を、既往の提案式から得られた予想耐力で除した値と試験体寸法の関係を表 5-2、表 5-3 と図 5-1、図 5-2 に示す。

表 5-2　無筋タイプにおける最大耐力の算定結果

試験体名	最大耐力 (MPa)	コンクリート強度？ (MPa)	σ_{co}/σ_{cal}				
			Mander	Watanabe	Suzuki	NewRC	修正 Park
50-0-20-1	19.81	31.2	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
50-0-20-2	20.94	31.2	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
50-0-20-3	22.29	31.2	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
29.4-0-50	46.35	61.2	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
24.4-0-50	39.42	61.2	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
19.4-0-50	47.26	61.2	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
平均			0.70	0.70	0.70	0.70	0.70

表 5-3　横拘束タイプにおける最大耐力の算定結果

試験体名	最大耐力 (MPa)	コンクリート強度？ (MPa)	σ_{cc}/σ_{cal}				
			Mander	Watanabe	Suzuki	NewRC	修正 Park
50-1.5-20	20.01	25.9	0.55	0.63	0.58	0.66	0.51
50-2.0-20	20.79	25.9	0.51	0.60	0.52	0.64	0.47
50-2.5-20	21.11	25.9	0.48	0.57	0.47	0.62	0.44
29.4-1.5-50	50.84	61.2	0.68	0.75	0.70	0.77	0.65
29.4-2.0-50	47.91	61.2	0.59	0.67	0.60	0.70	0.56
29.4-2.5-50	50.74	61.2	0.58	0.69	0.59	0.72	0.56
24.4-1.5-50	48.57	61.2	0.65	0.72	0.69	0.72	0.61
24.4-2.0-50	49.74	61.2	0.62	0.70	0.65	0.71	0.58
24.4-2.5-50	52.14	61.2	0.61	0.72	0.64	0.72	0.58
19.4-1.5-50	52.76	61.2	0.73	0.79	0.81	0.77	0.66
19.4-2.0-50	55.12	61.2	0.71	0.79	0.77	0.77	0.64
19.4-2.5-50	47.67	61.2	0.57	0.66	0.61	0.63	0.52
平均			0.61	0.69	0.64	0.70	0.57

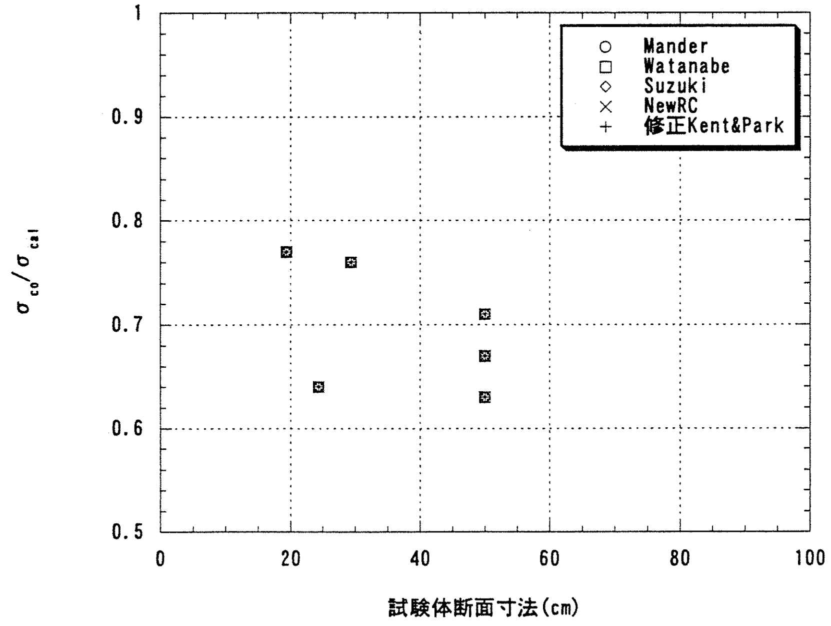


図 5-1　無筋タイプの最大耐力の算定結果と試験体寸法の関係

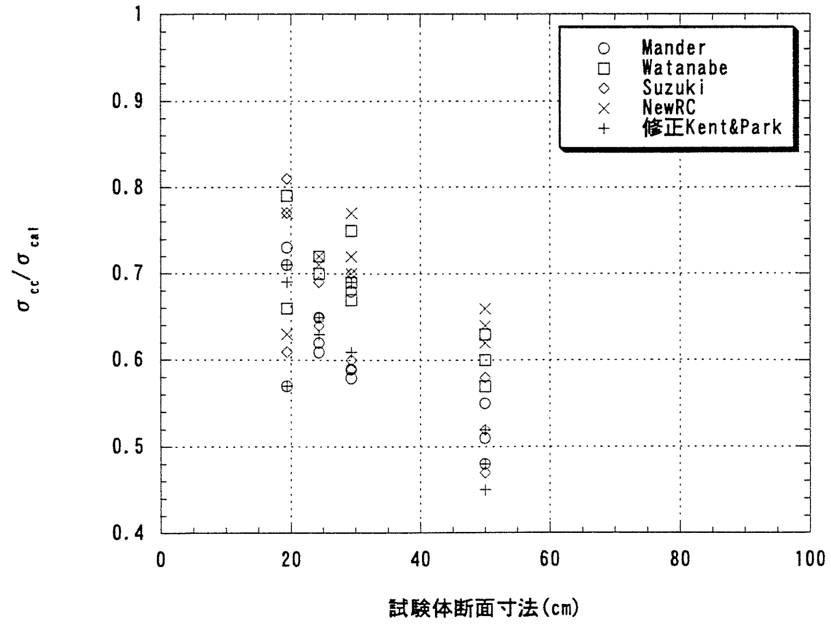


図 5-2　横拘束タイプの最大耐力の算定結果と試験体寸法の関係

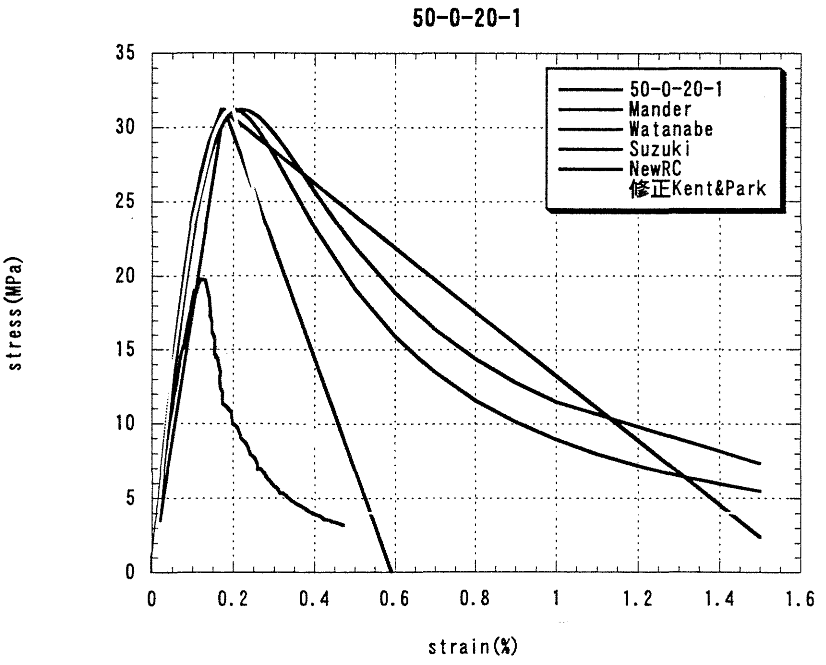
これらより、無筋タイプ及び横拘束タイプの最大耐力は、すべての提案式において 0.44 から 0.81（何に対する何の比かを明確に書くこと！グラフや表の注釈を読めというの言うのはだめ。本文中で明確に記述すること）の範囲で過大評価されている。これは、すべての提案式において寸法効果を評価する項が含まれていないことから、寸法効果によるものであるといえる。

無筋タイプの最大耐力については、シリンダー強度から求められるプレーンコンクリートの最大耐力と、提案式から予想される無筋コンクリートの最大耐力は、すべての提案式において良好な値になっている。したがって、無筋タイプはコンクリート強度に関係なく、提案式から求められる最大耐力に一致することがわかる（意味不明、提案式から求められる最大耐力に一致するなら寸法効果を考えなくて良いということだが？）。したがって、モデルの算定時に、プレーンコンクリートの圧縮強度に寸法効果の影響を検討する必要があると考えられる。

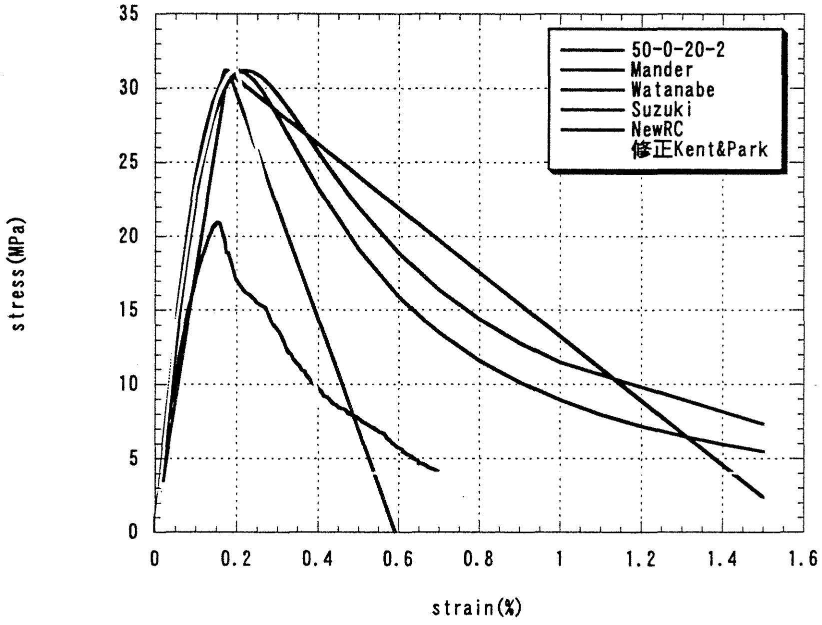
横拘束タイプは、無筋タイプに比べ、各提案式による最大耐力の予想にばらつきが見られる。特に、修正Kent&Parkモデルは、その他の提案式で予想されたσ_{cc}/σ_{cal}値に比べ約0.1程度、Manderモデルでは約0.05程度過大評価する傾向が見られる。

5.3.　既往の提案式との比較

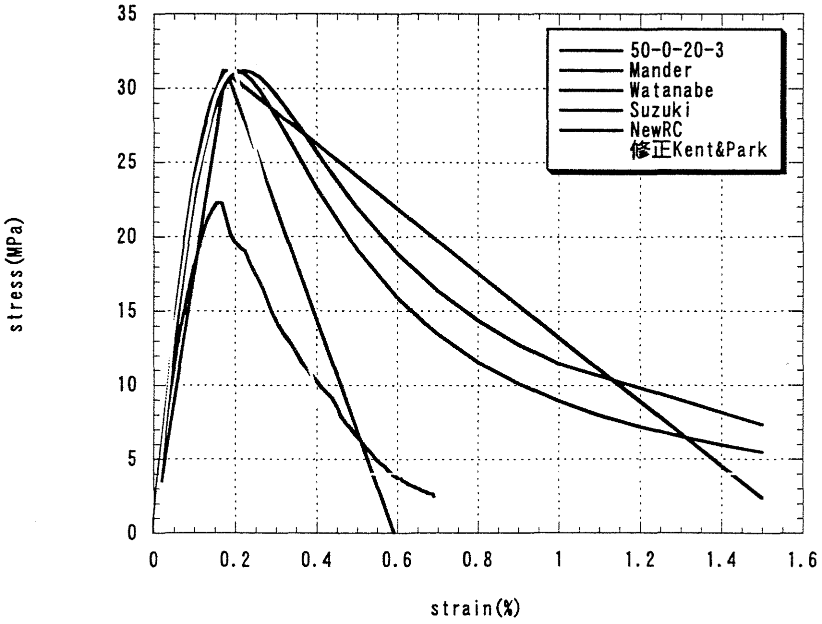
図 5-3 に実験値と各 5 モデルとの比較を示す。また、図 5-4 に履歴形状を見るために応力軸を無次元化した実験値と各 5 モデルとの比較を示す。

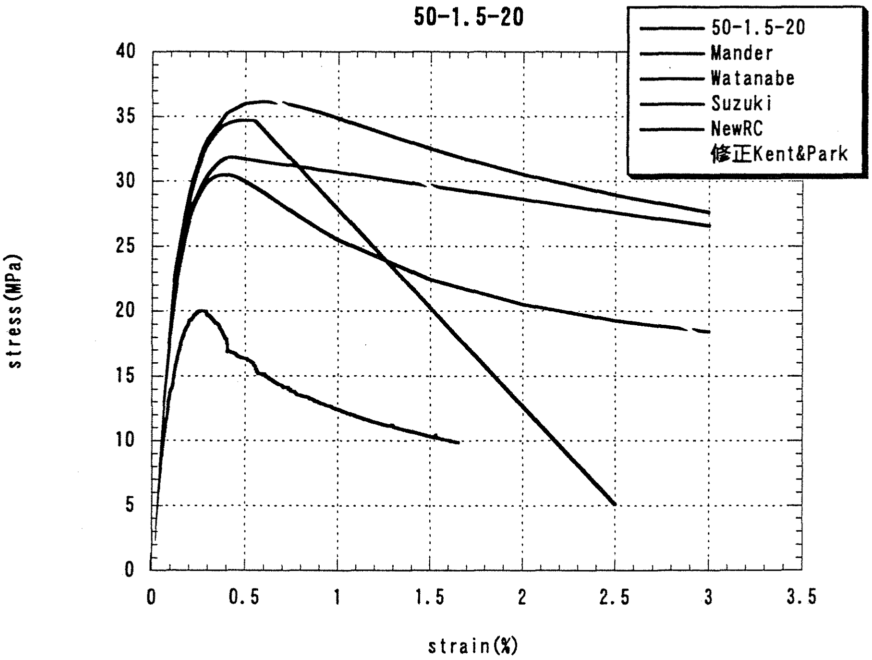


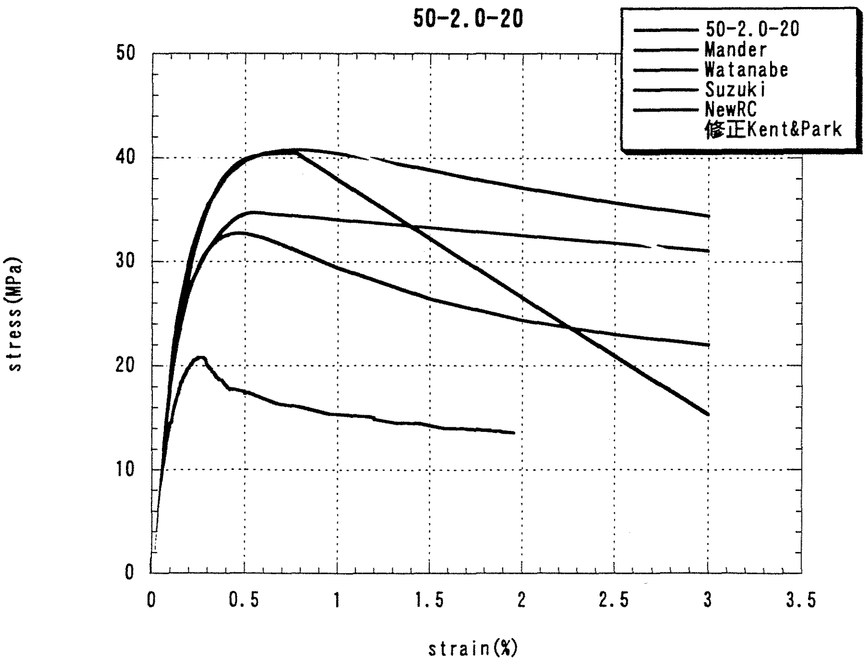
50-0-20-2

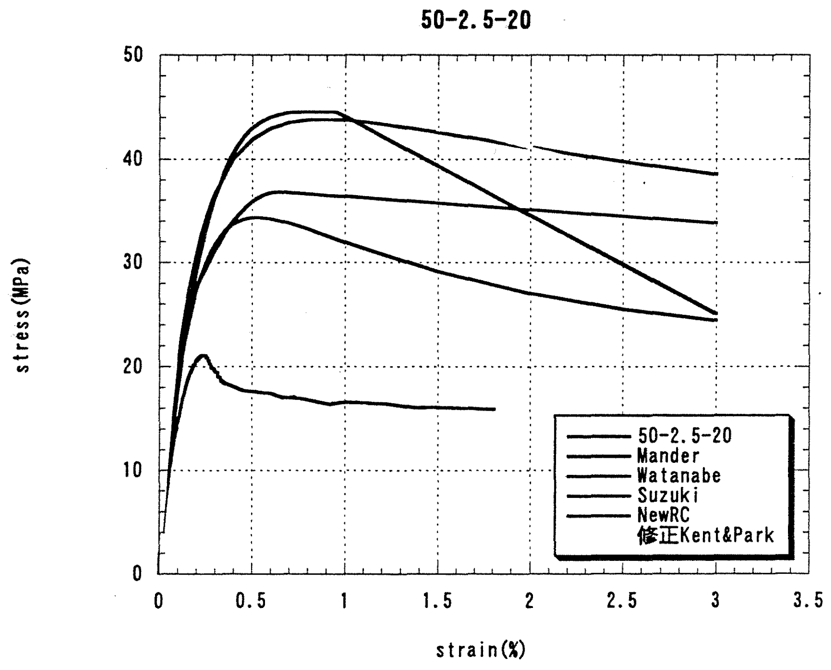


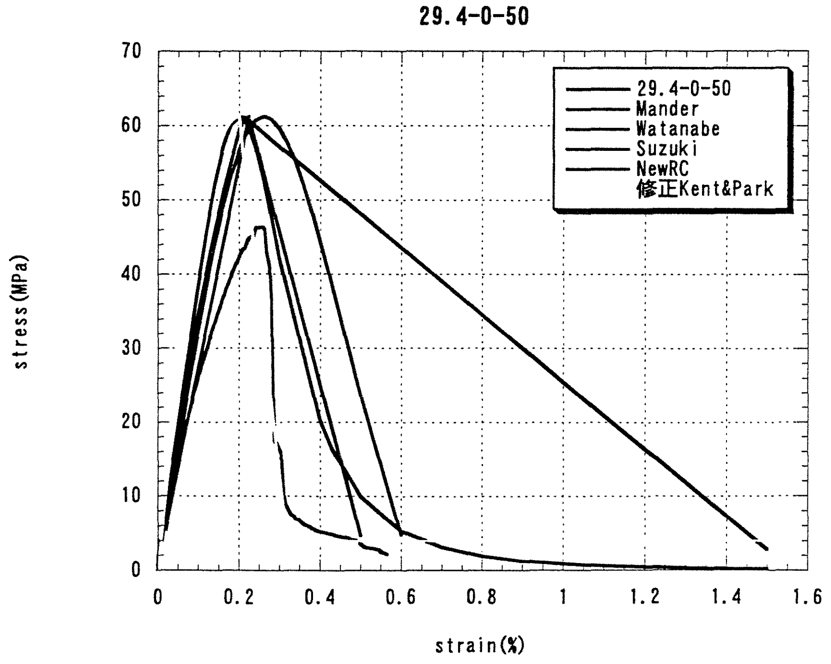
50-0-20-3

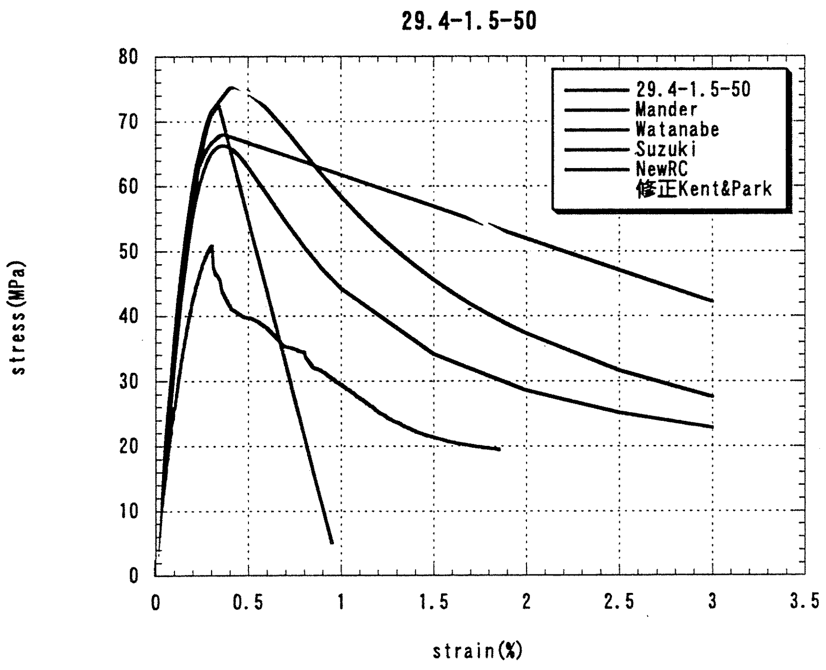


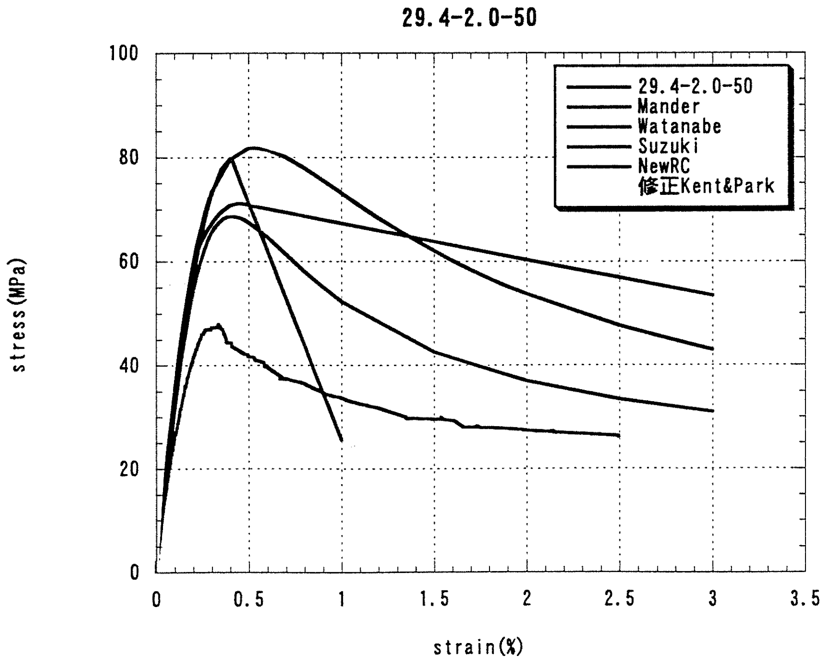

50-1.5-20
50-1.5-20
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
stress(MPa)
strain(%)

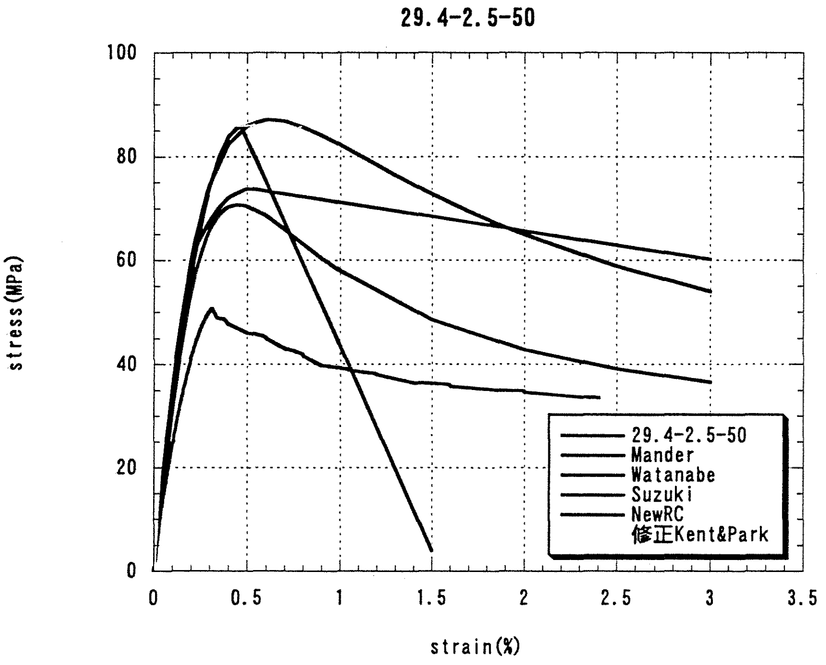

50-2.0-20
50-2.0-20
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park
50
40
30
20
10
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
stress(MPa)
strain(%)

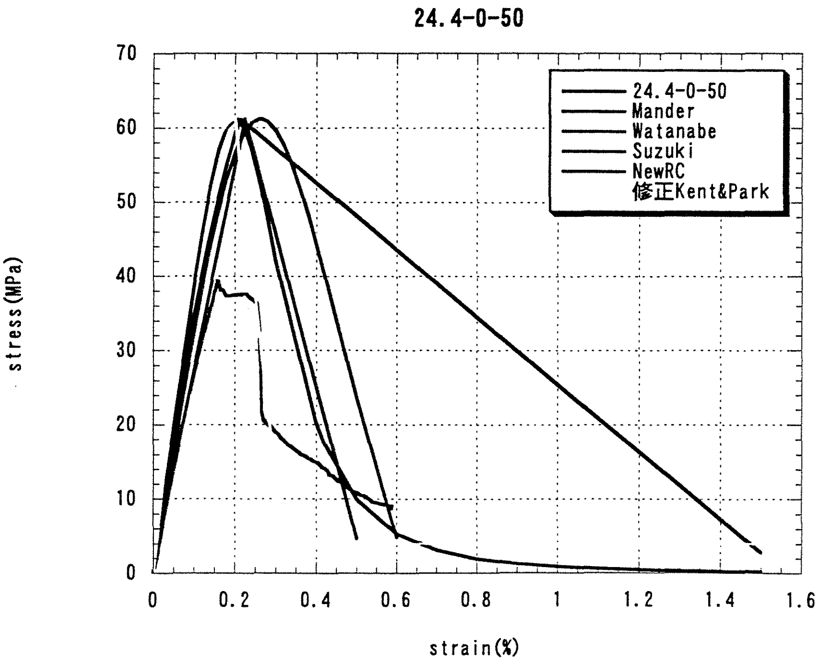

50-2.5-20
stress(MPa)
50
40
30
20
10
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
strain(%)
50-2.5-20
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

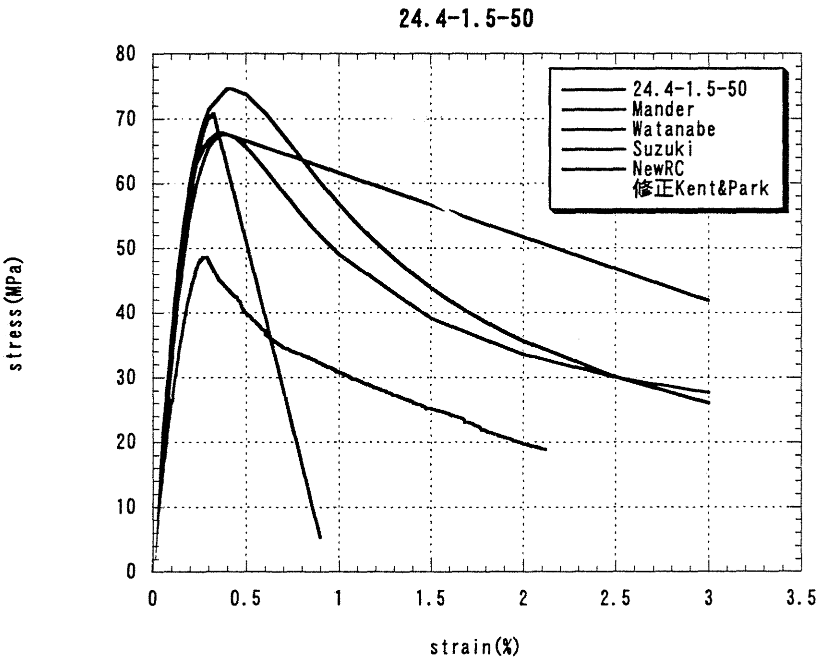

29.4-0-50
stress(MPa)
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
strain(%)
29.4-0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

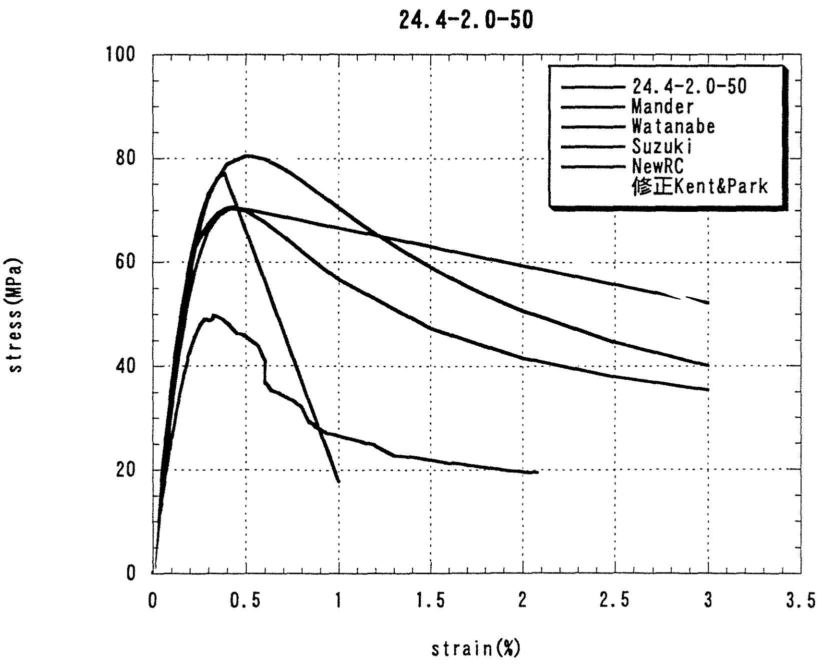

29.4-1.5-50
29.4-1.5-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park
stress(MPa)
strain(%)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5

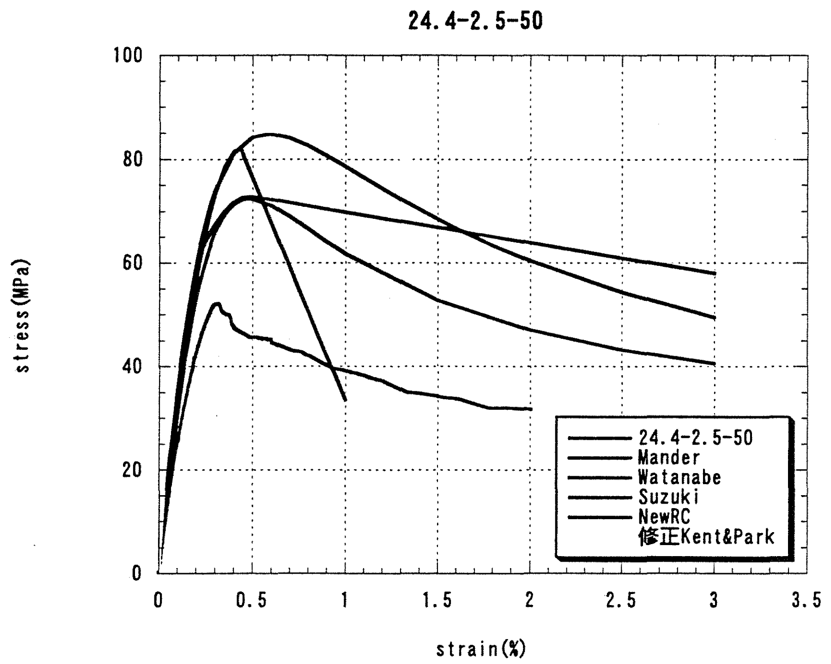

29.4-2.0-50
29.4-2.0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park
stress(MPa)
strain(%)
100
80
60
40
20
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5

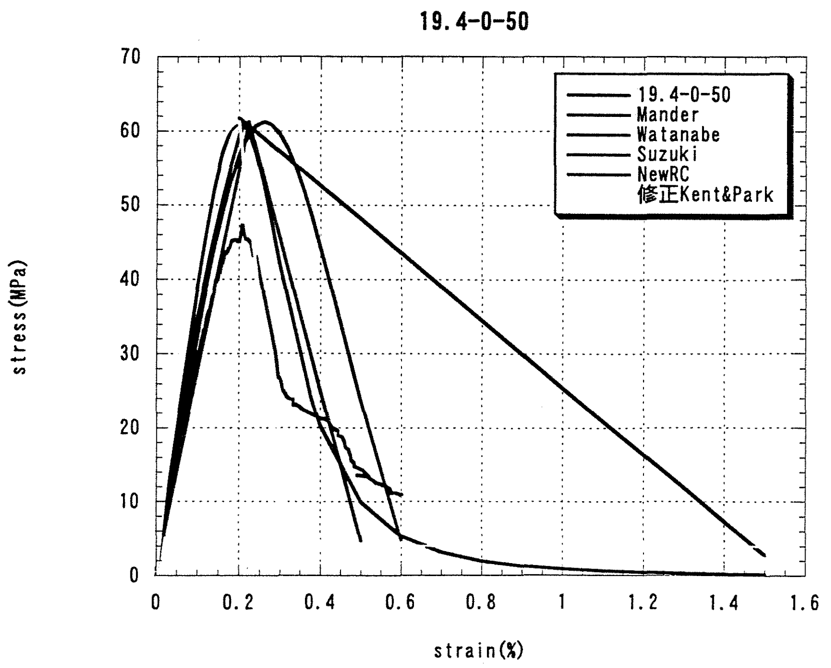

29.4-2.5-50
stress(MPa)
strain(%)
100
80
60
40
20
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
29.4-2.5-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

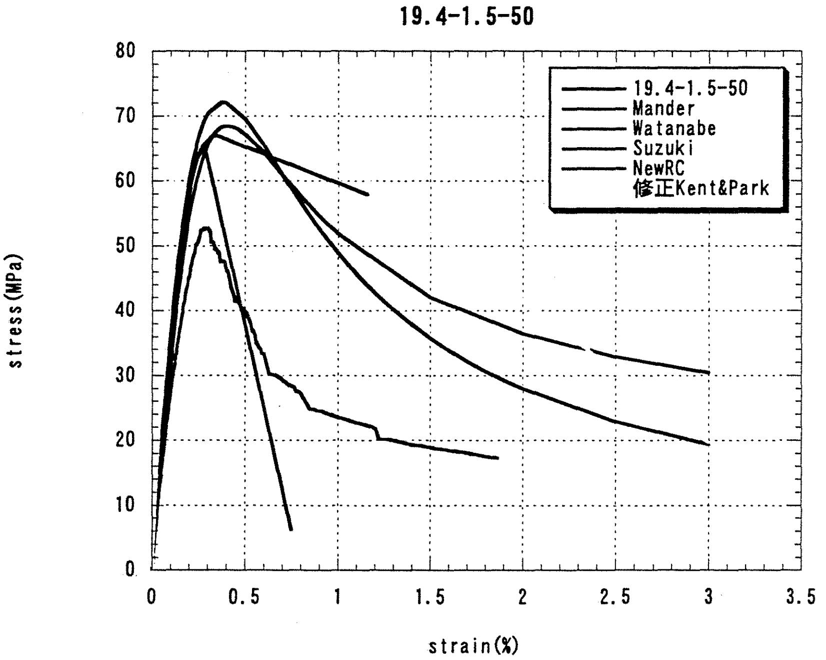

24.4-0-50
stress(MPa)
strain(%)
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
24.4-0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

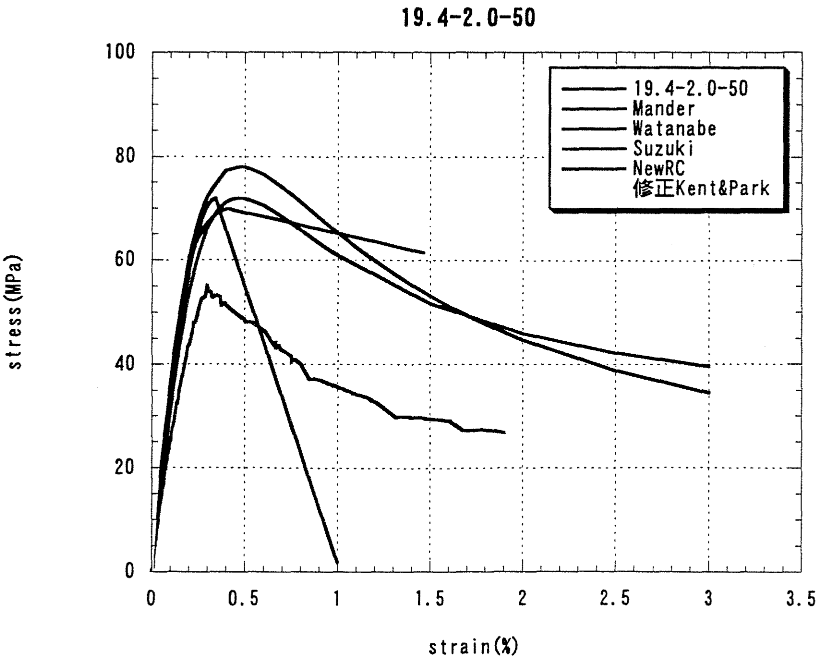

24.4-1.5-50
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
stress(MPa)
strain(%)
24.4-1.5-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park


24.4-2.0-50
100
80
60
40
20
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
stress(MPa)
strain(%)
24.4-2.0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park


24.4-2.5-50
100
80
60
40
20
0
stress(MPa)
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
strain(%)
24.4-2.5-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park


19.4-0-50
70
60
50
40
30
20
10
0
stress(MPa)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
strain(%)
19.4-0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park


19.4-1.5-50
stress(MPa)
strain(%)
19.4-1.5-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park


19.4-2.0-50
stress(MPa)
strain(%)
19.4-2.0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

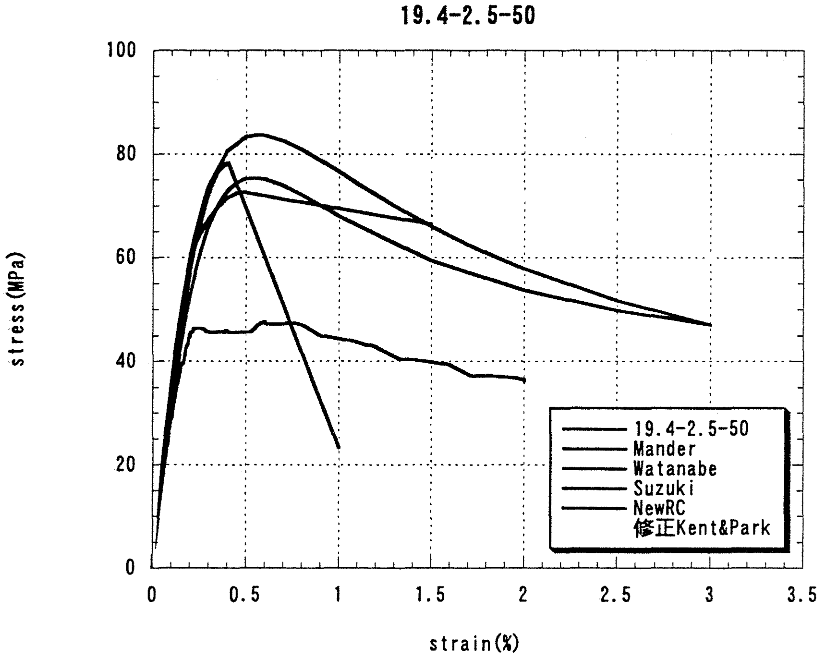
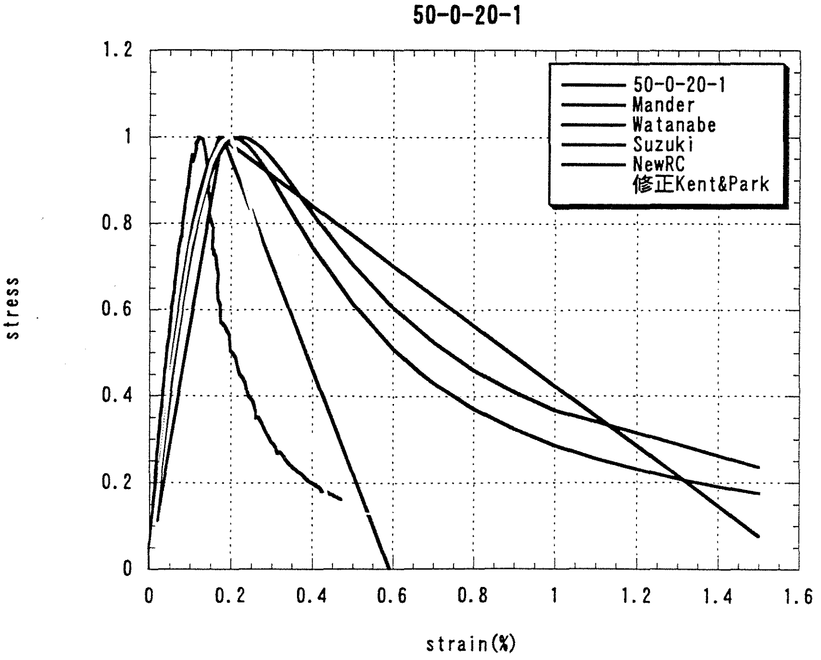
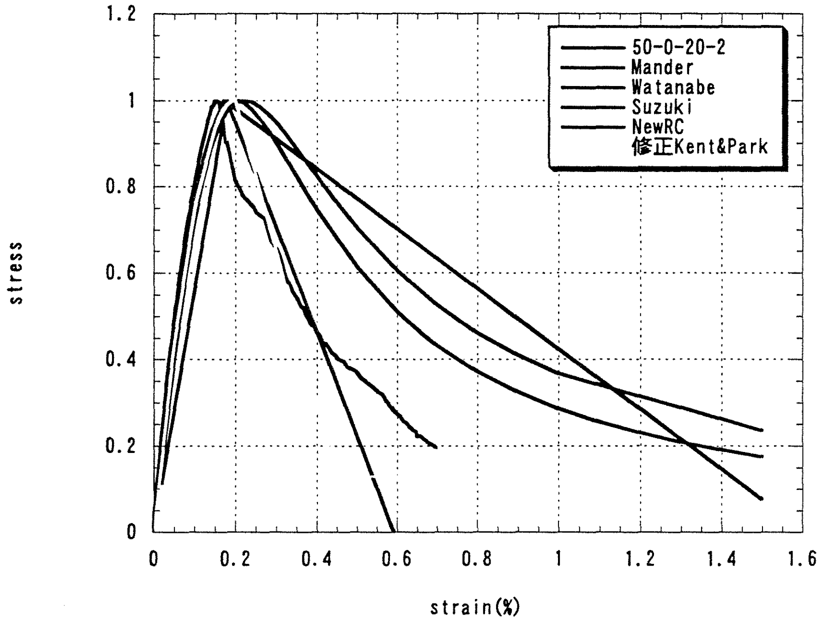


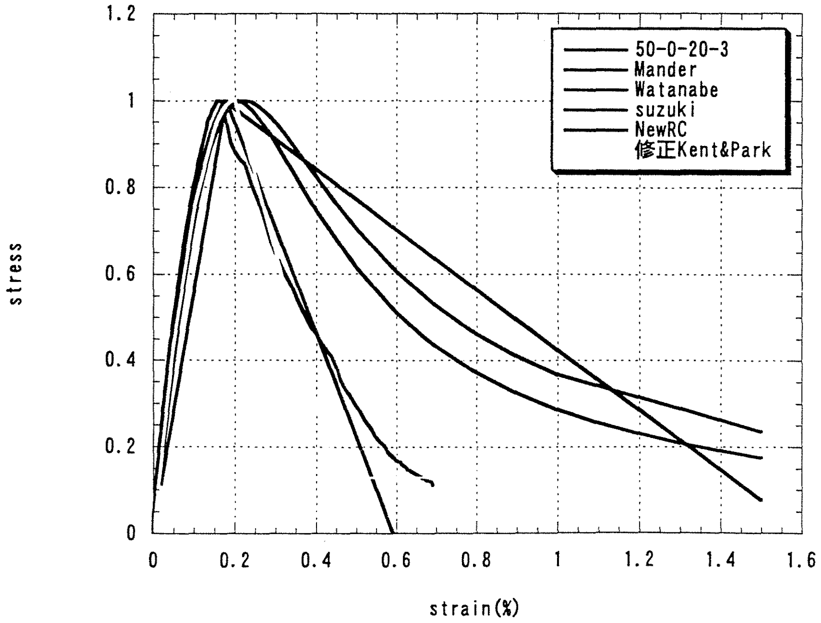
図 5-3　実験値と各モデルとの比較

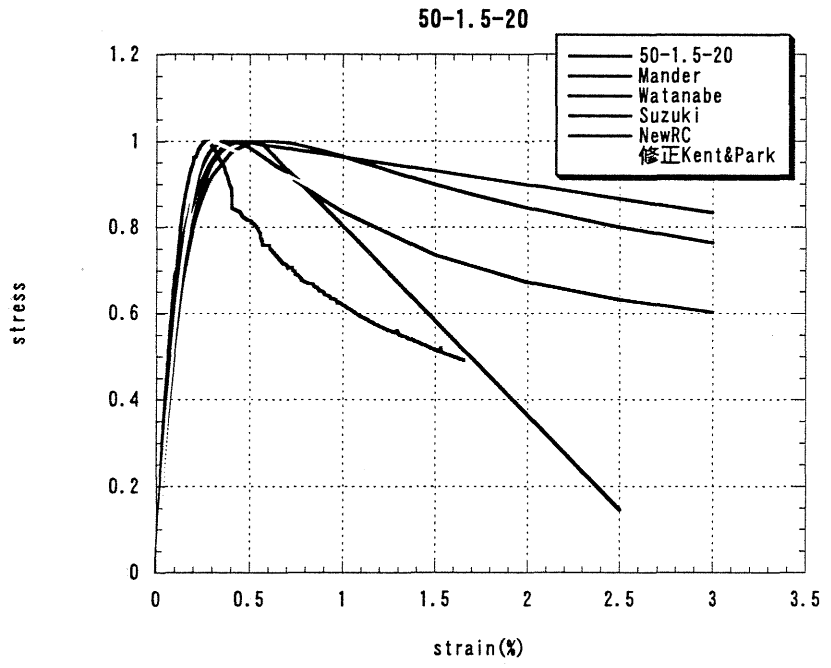


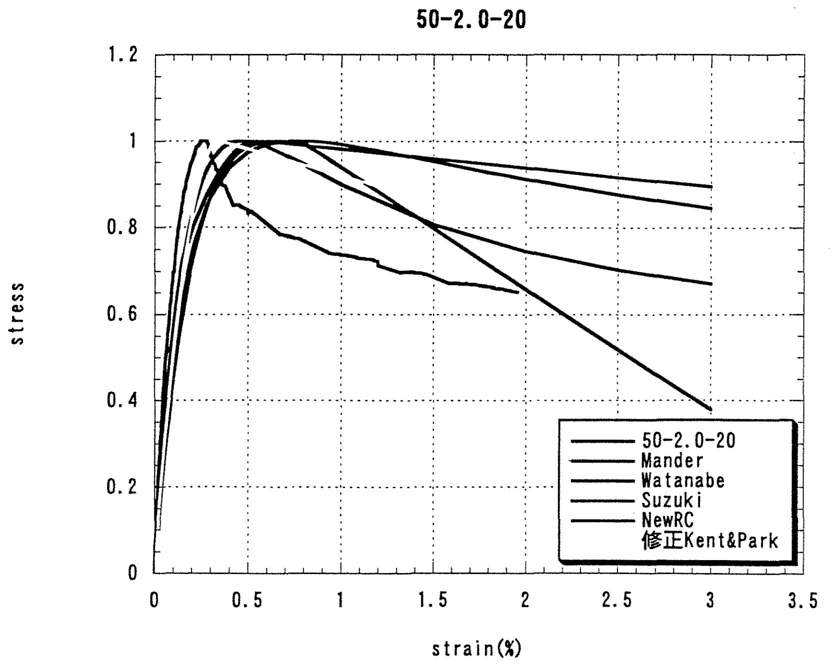
50-0-20-2

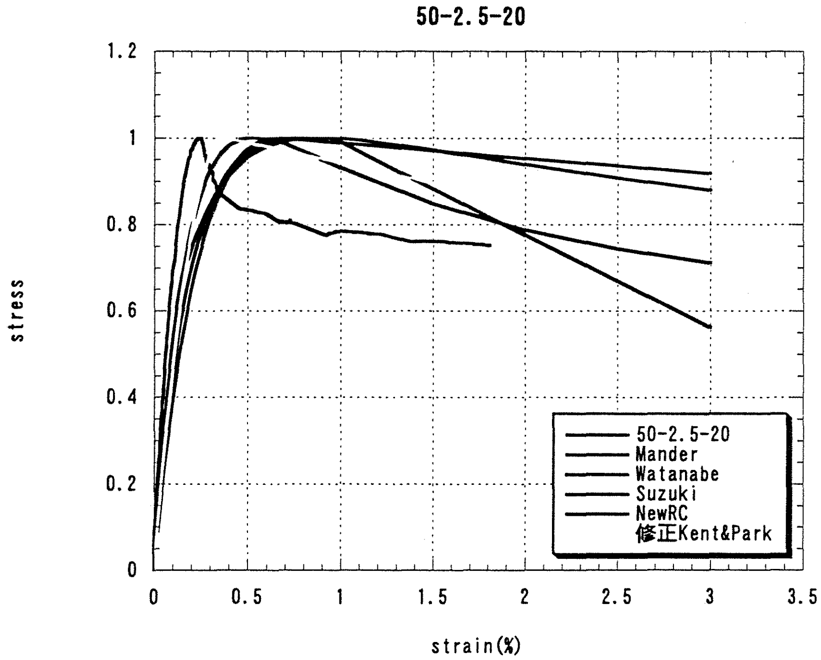


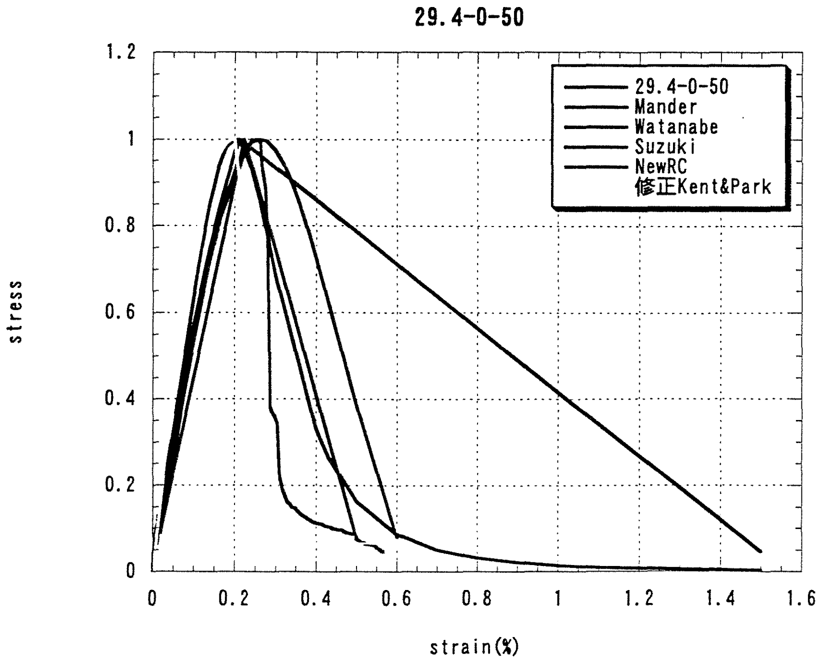
50-0-20-3



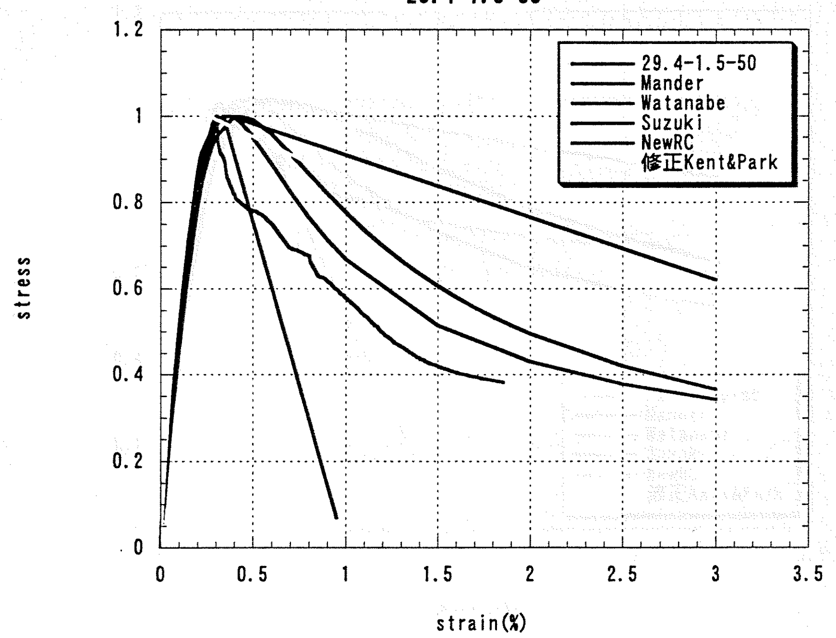

50-1.5-20
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
stress
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
strain(%)
50-1.5-20
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park


50-2.0-20
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
stress
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
strain(%)
50-2.0-20
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

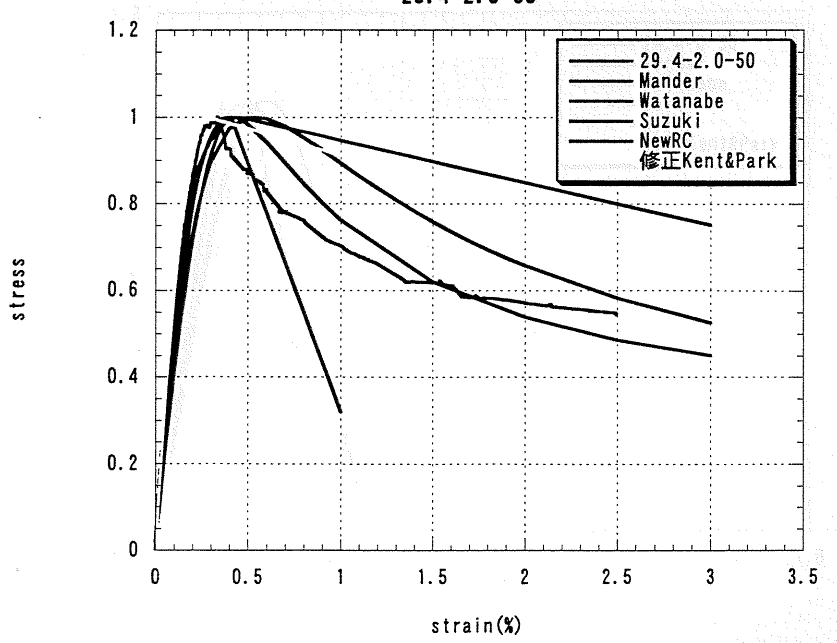

50-2.5-20
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
stress
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
strain(%)
50-2.5-20
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

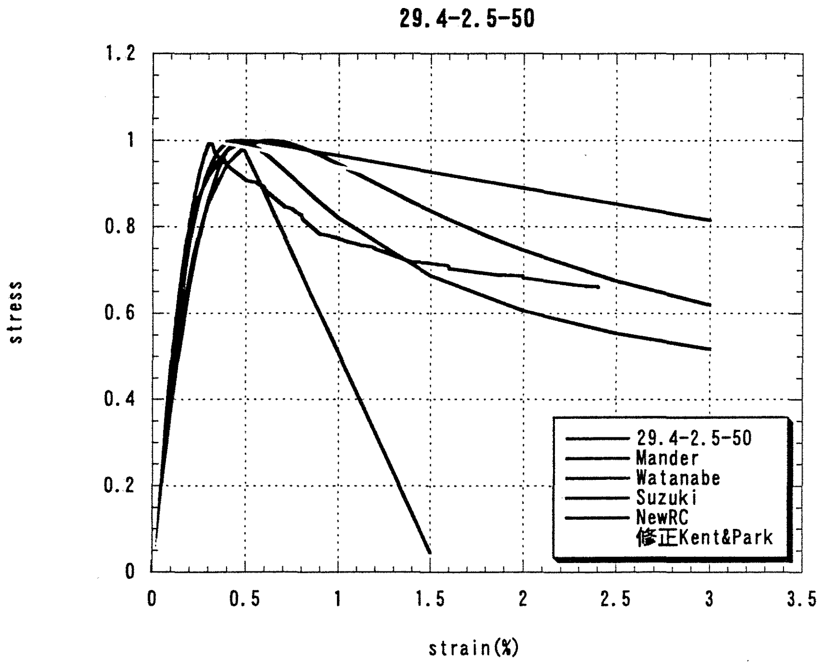

29.4-0-50
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
stress
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
strain(%)
29.4-0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

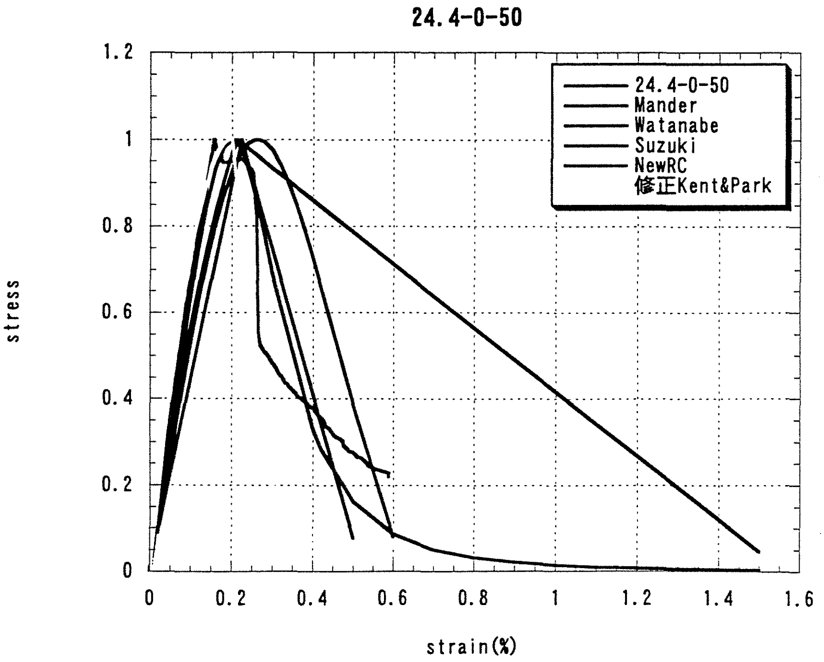
29.4-1.5-50



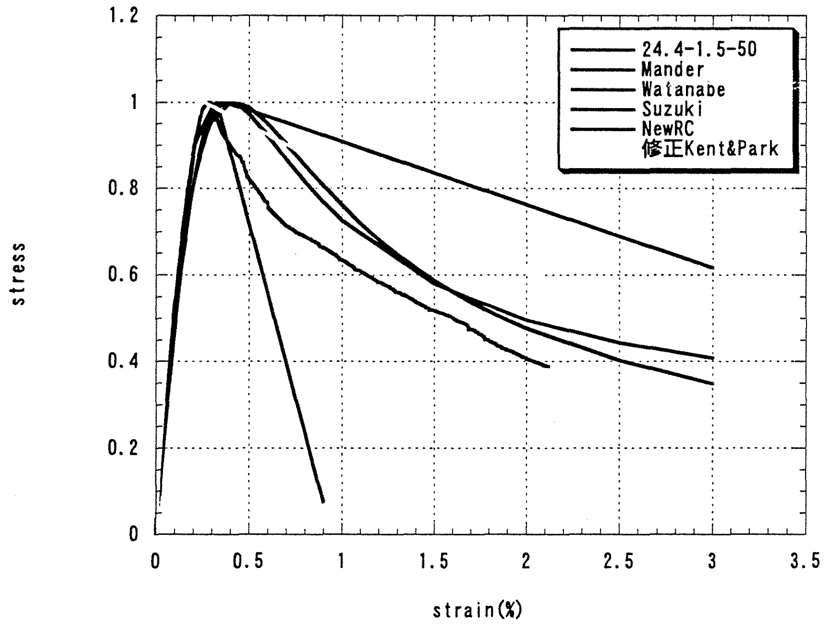
29.4-2.0-50



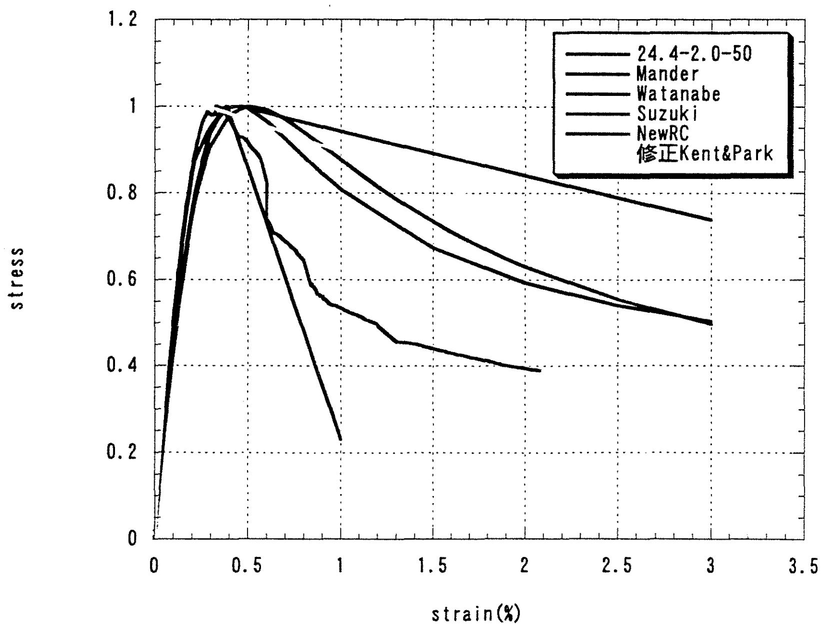

29.4-2.5-50
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
stress
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
strain(%)
29.4-2.5-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

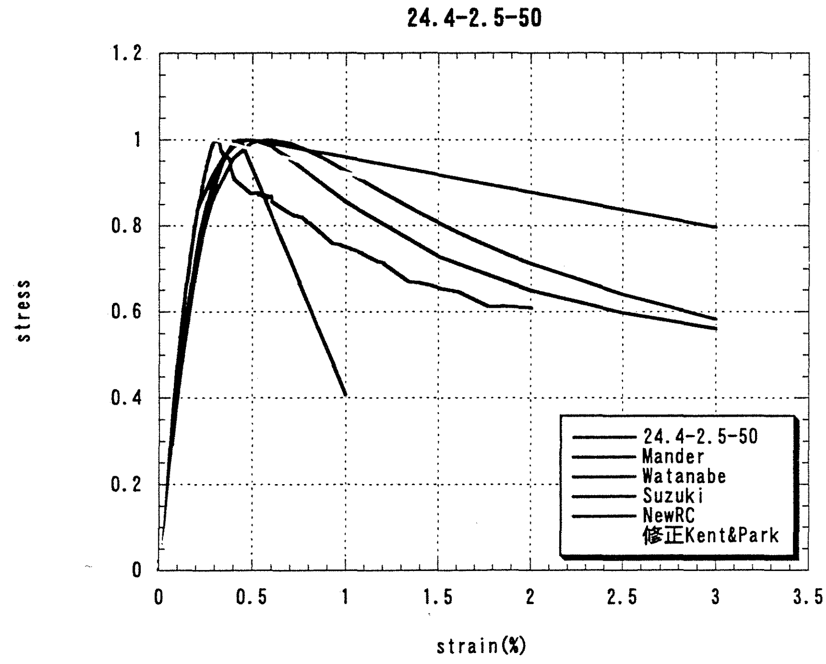

24.4-0-50
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
stress
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
strain(%)
24.4-0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park

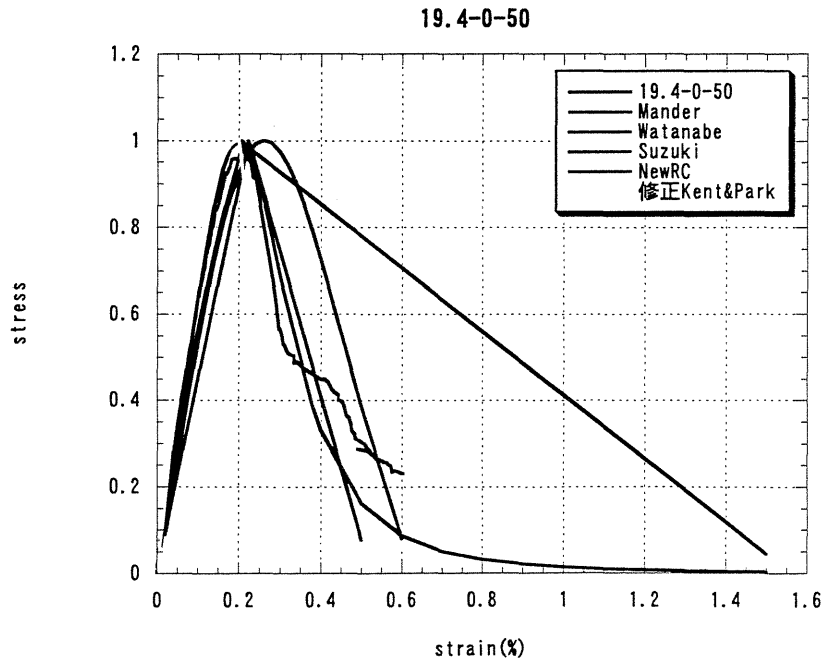
24.4-1.5-50

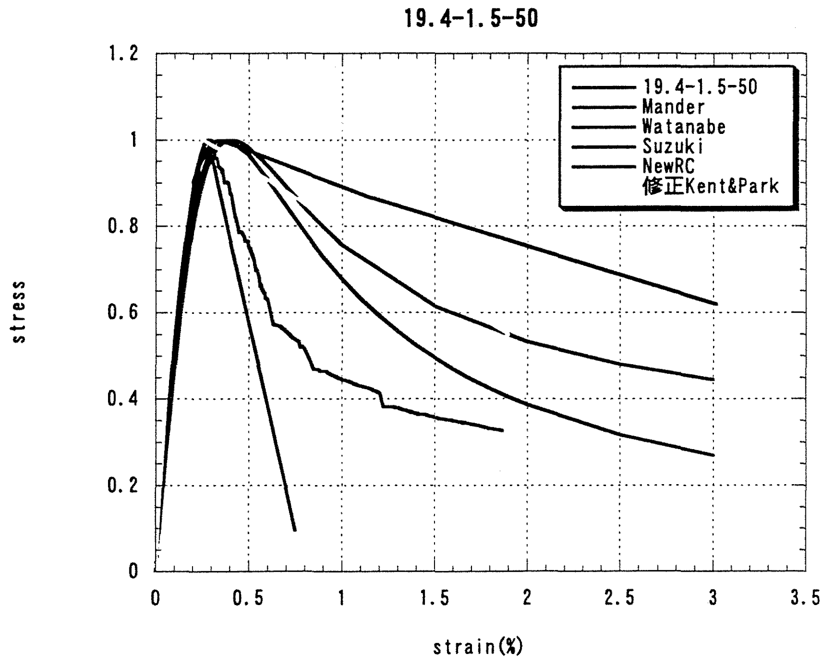


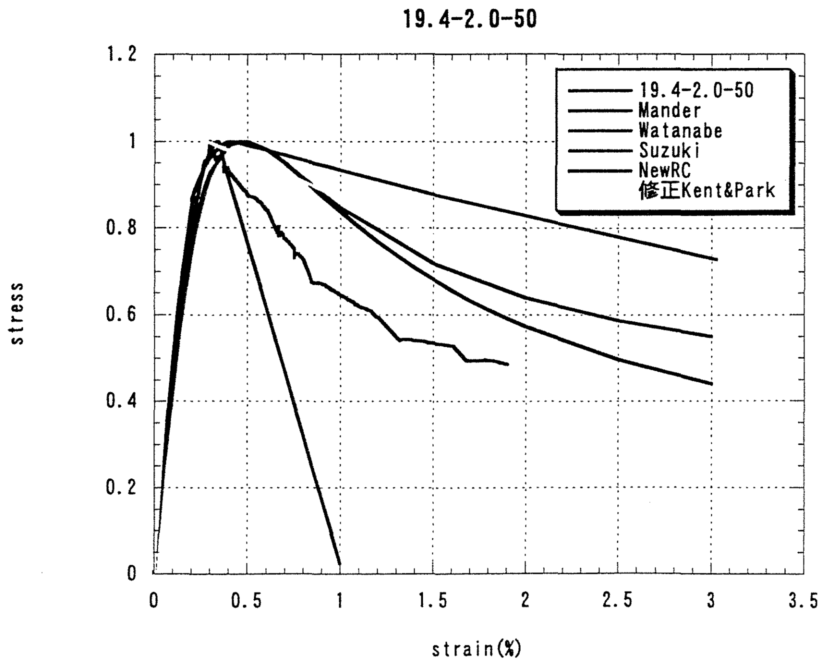
24.4-2.0-50




24.4-2.5-50
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
stress
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
strain(%)
24.4-2.5-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park


19.4-0-50
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
stress
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
strain(%)
19.4-0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park


19.4-1.5-50
19.4-1.5-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park
stress
strain(%)
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5


19.4-2.0-50
19.4-2.0-50
Mander
Watanabe
Suzuki
NewRC
修正Kent&Park
stress
strain(%)
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5

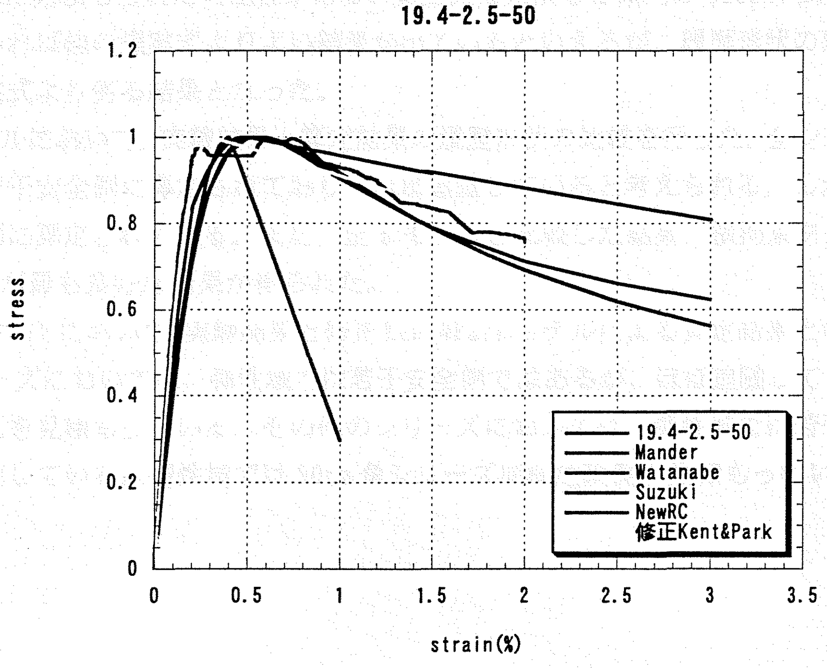


図 5-4　応力軸をそれぞれ無次元化した実験値と各モデルとの比較

Mander モデルにおいて、実験結果と算定結果の応力-歪関係履歴曲線の形状は、無筋タイプについては良好な結果が得られているが、横拘束タイプについては塑性域に関して、危険側（定義を明確に：同じ歪に対し応力を過大評価するということか？）に見積もる結果となった。全 5 モデルと比較した結果、無筋タイプについては、Mander モデルが最も良好な結果が得られた。また応力-歪関係履歴曲線の形状については、19.4cm 角の無筋タイプがもっともよい結果が得られた。

Watanabe モデルにおいて、実験結果と算定結果の応力-歪関係履歴曲線の形状は、弾性域に関しては、良好な結果が得られたが、塑性域に関しては大きな開きを生じた。これは、本論文 2 章で述べたように、Mander 等のモデルに比べ Watanabe モデルは、基本モデルの主データとなった中心軸圧試験体では、中間帯筋及び軸方向主筋が用いられていないこと、また、歪測定検長が、コアコンクリートの断面せいの 2 倍であり、比較的長い等の理由により、角型横拘束筋による横拘束効果を安全側（定義を明確に：同じ歪に対し応力を過小評価するということか？）に見積もる傾向にあるためだと考えられる。また履歴形状については、19.4cm 角の 2.5%タイプがもっともよい結果が得られた。

Suzuki モデルより実験結果と算定結果の履歴形状の比較を行った。50cm 角シリーズは、塑性域では危険側に見積もられているが、その他のシリーズでは、弾性域は大体追随しており、塑性域では安全側に見積もっている。よって Suzuki モデルは、他の提案式と比べると安全側に見積もる

傾向が見られる。これは、Suzuki モデルでは横拘束コンクリートの強度及び弾性係数を決定する際、中間帯筋の本数によりその強度が割増し、そのため中間帯筋を用いていない本実験の塑性域では、安全側に見積もられた可能性がある。安全側に見積もる傾向の Suzuki 式は、安全性の評価を行うのであれば他の提案式よりよい結果が出ているといえるが、履歴形状の評価を行うのであれば他の提案式より劣る結果となった。

NewRC モデルにおいて、実験結果と算定結果の履歴形状の比較を行った。全シリーズにおいて、弾性域では若干安全側に算定されており、ほぼ追随していると考えられる。しかし、塑性域については危険側に算定されている。また、全 5 モデルと比較した結果、横拘束タイプについては、NewRC モデルが最も良好な結果が得られた。

修正 Kent&Park において、実験結果と修正 Kent&Park モデルによる算定結果との比較を行った。50cm 角シリーズにおいては、弾性域では若干安全側ではあるが、ほぼ追随している。しかし塑性域では危険側を見積もっている。その他のシリーズにおいては、弾性域では若干危険側ではあるが、ほぼ追随している。塑性域では 50cm 角シリーズ同様危険側を見積もっている。

5.4. まとめ

最後に本章で述べた既往の提案式との比較をまとめる。

・ 最大耐力の算定について

無筋タイプ及び横拘束タイプの最大耐力は、すべての提案式において過大評価されており、提案式に寸法効果を評価する項が含まれていないことから、寸法効果によるものであると言える。また、最大耐力の算定について、無筋タイプにおいては、すべての提案式において良好な値が得られている（意味不明、前文の寸法効果ありに矛盾）。横拘束タイプについては、各提案式により、ばらつきが見られる。

・ Mander モデルについて

無筋タイプについては良好な結果が得られているが、横拘束タイプについては塑性域に関して、危険側に見積もる結果となった。また、全 5 モデルと比較した結果、無筋タイプについてはMander モデルが最も良好な結果が得られた。

・ Watanabe モデルについて

弾性域に関しては、良好な結果が得られたが、塑性域に関しては算定結果と実験結果とで大きな開きを生じた。これは、Watanabe モデルが、角型横拘束筋による横拘束効果を安全側に見積もる傾向にあるためだと考えられる。

・ Suzuki モデルについて

50cm 角シリーズは、塑性域では危険側に見積もられているが、その他のシリーズでは、弾性域は大体追随しており、塑性域では安全側に見積もっている。よって Suzuki モデルは、他の提案式と比べると安全に見積もる傾向が見られる。

・ NewRC モデルについて

弾性域では、若干安全側に算定されておりほぼ追随しているが、塑性域については危険側に算定されている。また、全 5 モデルと実験結果との比較の結果、横拘束タイプについてはNewRC モデルが最も良好な結果が得られた。

・ 修正 Kent&Park モデルについて

弾性域は、ほぼ追随しており良好な結果が得られたが、塑性域では危険側に見積もる結果となった。

6. 結論

6.1. 本研究の成果

本研究の実験結果より、以下の成果が得られた。

- 本研究では、現在の高層建築物建設のニーズに伴い、高強度コンクリートを用い、高強度の横拘束筋を使用した試験体を作成し、挙動評価を行うことが出来た。
- 鉄筋コンクリートの角型補強筋による横拘束効果の評価を、従来の試験機性能の限界によりできなかった範囲で行うことができた。また、実大寸法の試験体で評価を行うことにより、実際のコンクリート構造物の挙動により近い結果が得られた。
- 寸法効果の評価を行うべく、実大寸法の試験体を作成し、実験を行った。コンクリート強度20MPa で 50cm 角の試験体、コンクリート強度 50MPa で 29.4cm 角、24.4cm 角、19.4cm 角の計18 体で実験を行い、寸法の増大に伴う強度の減少を確認できた。
- 本実験によって得られた応力－歪関係を、角型補強筋により横拘束された鉄筋コンクリートの応力－歪関係を提案している Mander モデル、Watanabe モデル、Suzuki モデル、NewRC モデル、修正 Kent&Park モデルと比較を行った。その結果、モデルごとに特徴があり、いくつかの問題点があることがわかった。
- 応力－歪関係を提案する既存のモデルには、寸法効果を評価する項が存在していない。各モデルにおける最大応力は、シリンダー強度および横拘束筋による圧縮強度の増加を見込んだ項があるだけである。そのため、寸法効果による最大応力の減少を評価できるモデルを新たに提案する必要がある。
-

6.2. 今後の課題

- 応力－歪関係を提案する既存のモデルには、寸法効果を評価する項が存在していないため、寸法効果による最大応力の減少を評価できるモデルを新たに提案する必要がある。
- 実験中のカバーコンクリートの剥落により変位計取り付け治具がずれたため、変位計の正確なデータを取ることが出来ない場合があった。特に、横拘束筋体積比の小さい試験体については、大きなカバーコンクリート片が剥落する可能性が高く、載荷を試験体歪で 2.0%以上続けることが困難であった。また、試験体破壊状況を見ると、塑性域に達してからの試験体の横方向の膨張を、変位計取り付け治具が拘束している可能性も考えられる。以上のことから、変位計取り付け形状を今後、改良する必要がある。

5.4. まとめ

最後に本章で述べた既往の提案式との比較をまとめる。

・ **最大耐力の算定について**

無筋タイプ及び横拘束タイプの最大耐力は、すべての提案式において過大評価されており、提案式に寸法効果を評価する項が含まれていないことから、寸法効果によるものであると言える。また、最大耐力の算定について、無筋タイプにおいては、すべての提案式において良好な値が得られている（意味不明、前文の寸法効果ありに矛盾）。横拘束タイプについては、各提案式により、ばらつきが見られる。

・ **Mander モデルについて**

無筋タイプについては良好な結果が得られているが、横拘束タイプについては塑性域に関して、危険側に見積もる結果となった。また、全 5 モデルと比較した結果、無筋タイプについてはMander モデルが最も良好な結果が得られた。

・ **Watanabe モデルについて**

弾性域に関しては、良好な結果が得られたが、塑性域に関しては算定結果と実験結果とで大きな開きを生じた。これは、Watanabe モデルが、角型横拘束筋による横拘束効果を安全側に見積もる傾向にあるためだと考えられる。

・ **Suzuki モデルについて**

50cm 角シリーズは、塑性域では危険側に見積もられているが、その他のシリーズでは、弾性域は大体追随しており、塑性域では安全側に見積もっている。よって Suzuki モデルは、他の提案式と比べると安全に見積もる傾向が見られる。

・ **NewRC モデルについて**

弾性域では、若干安全側に算定されておりほぼ追随しているが、塑性域については危険側に算定されている。また、全 5 モデルと実験結果との比較の結果、横拘束タイプについてはNewRC モデルが最も良好な結果が得られた。

・ **修正 Kent&Park モデルについて**

弾性域は、ほぼ追随しており良好な結果が得られたが、塑性域では危険側に見積もる結果となった。

付録

研究発表論文

著　者　名	論　文　標　題
疋田次峰、倉本　洋 田中仁史、中治弘行	コンクリート一軸圧縮応力ーひずみ関係に及ぼす寸法効果の影響

雑　誌　名	巻・号	発　行　年	ペ　ー　ジ
コンクリート工学年次論文集	第24巻・ 第2号	2002	193—198

著　者　名	論　文　標　題
疋田次峰、田中仁史、 中治弘行	横拘束コンクリートの応力ー歪関係における寸棒効果に関する実験的研究 その1実験概要と結果

雑　誌　名	巻・号	発　行　年	ペ　ー　ジ
日本建築学会大会学術講演概要(関東)	C・2	2001	7—8

著　者　名	論　文　標　題
中治弘行、田中仁史、 疋田次峰	横拘束コンクリートの応力ー歪関係における寸棒効果に関する実験的研究 その2　寸法効果を考慮した横拘束コンクリートの応力—ひずみ関係モデルの提案

雑　誌　名	巻・号	発　行　年	ペ　ー　ジ
日本建築学会大会学術講演概要(関東)	C・2	2001	9—10

著　者　名	論　文　標　題
Hitoshi TANAKA , Tsuguo HIKIDA and Hiroyuki NAKAJI	THE SCALE EFFECTS ON THE REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH HIGH AXIAL LOAD

雑　誌　名	巻・号	発　行　年	ペ　ー　ジ
Proceedings of The 3rd Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures		2001	pp.147-158

[図　書]