

論文 RC 造柱の残存軸耐力に及ぼす配筋詳細の影響の評価実験

阿部 博之^{*1}・宮島 雄代^{*1}・本多 良政^{*2}・加藤 大介^{*3}

要旨：RC 造建築物の耐震診断基準 2001 年版では、柱部材の残存軸耐力と軸力支持能力の概念が取り入れられ、第 2 種構造要素の判定に使われており、耐震構造性能指標 I_s 値の評価に大きく影響を及ぼしている。筆者らは、耐震診断基準で示されている残存軸耐力の評価法の妥当性を実験的に検討した。しかしながら、それらの試験体の帯筋比は 0.51% と高かったため、本研究では、より現実的である低い帯筋比を有する試験体を作製し、実験を行った。文献 2) のデータも含め、より広い範囲で検討した結果、どの帯筋の範囲でも実験値が診断基準の安全側となった。

キーワード：鉄筋コンクリート造柱、耐震診断、残存軸耐力、配筋詳細

1. はじめに

RC 造建築物の耐震診断基準 2001 年版¹⁾では、柱部材の残存軸耐力と軸力支持能力の概念が取り入れられ、第 2 種構造要素の判定に使われており、耐震構造性能指標 I_s 値の評価に大きく影響を及ぼしている。しかしながら、この残存軸耐力と軸力支持能力の評価法には明確な実験的な裏付けはなく、検証は十分ではない。

筆者らは、文献 2) で耐震診断基準で示されている残存軸耐力の評価法の妥当性を実験的に検討した。その際、フック形状などの配筋詳細による影響を把握することを主目的としている。しかしながら、それらの試験体の帯筋比は 0.51% と高かったため、本研究では、現存する建物としてより現実的である 0.16~0.41% の帯筋比を有する試験体を作製し、実験を行った。実験パラメータは帯筋比以外には、フック等の配筋詳細と残存軸加力の載荷方法であるが、文献 2) では対象としなかった中子筋の有無による影響も検討した。

2. 残存軸耐力の評価実験の概要

2.1 試験体と加力装置

本研究では 5 シリーズの試験体を作製した。各シリーズの諸元を表 1 に示す。また、具体的な試験体名を表

2 の前半に示す。中子筋以外のシリーズは文献 3) で作製したシリーズと共通であり、計 20 体作成している。これらのうち単純軸圧縮試験体 5 体と曲げせん断加力試験体 7 体の実験結果は文献 3) で既に報告している。試験体は、以下のことに着目して作製した。(1)配筋詳細の悪い古い建物を念頭においた低強度コンクリートを用いる、(2)文献 2) では試験体は断面 (180mm×180mm) に対して帯筋径 (D6) が若干大きかったため、より現実的な比率となる帯筋径 (D4) を用いる、および (3) 文献 2) では対象としていなかった中子筋を用いる場合の 3 点である。

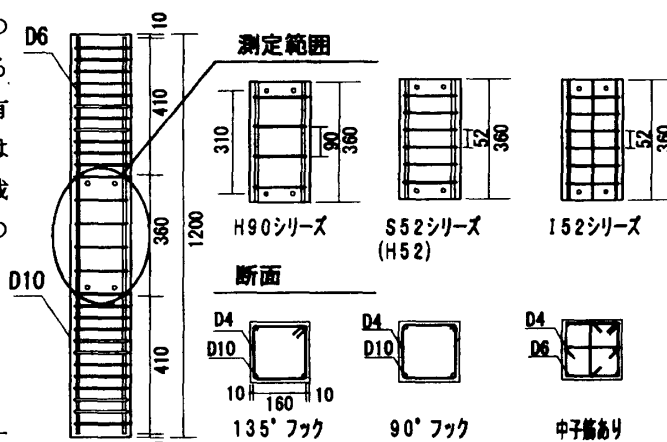


図 1 試験区間の配筋詳細図

表 1 試験体諸元

試験体名	寸法		主筋			帯筋							コンクリート強度 (N/mm ²)		
	断面 (mm)	高さ (mm)	配筋	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	配筋	フック	余長	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	間隔 (mm)	帯筋比 (%)			
H52LLシリーズ	180 × 180	360	4-D10	345	477	2-D4	135度	6d	420	570	52	0.27	16.8		
H90LLシリーズ							90度	4d			90	0.16			
H52Lシリーズ											52	0.27	15.6		
S52Lシリーズ			8-D6	333	478	3-D4	135度	6d			52	0.27			
I52Lシリーズ												0.4			

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境共生科学専攻 (正会員)

*2 共同エンジニアリング (株) 技術部 (正会員)

*3 新潟大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

試験体のシリーズ名の最初の文字は断面の配筋詳細を表しており、H は 135° フック付 (余長 6d) で横補強筋は外周の帯筋のみ、I は 135° フック付 (余長 6d) で横補強筋は帯筋と中子筋、S は 90° フック付 (余長 4d) で横補強筋は帯筋のみである。数字は帯筋間隔を表しており単位は mm である。作製した試験体の配筋及び形状を図-1 に示す。

試験体はせん断破壊が曲げ破壊に先行するように設計した。表-2 には、曲げ強度と文献 4) によるせん断強度が示してある。軸変形は試験体中央部 310mm の区間を試験体の前後 2 箇所ずつ、計 4 箇所測定した。

図-2 に加力装置を示す。試験体は上下の端部を基礎治具で挟み込んだ。軸加力実験では左右の鉛直ジャッキにより試験体の上部の加力治具を水平に保った。また、曲げせん断加力実験では、左右の鉛直ジャッキにより試験体の上下で逆対称変形になるようにした。

2.2 載荷方法 (事前載荷と事後載荷)

各シリーズで載荷条件を変え、計 8 体の残存軸加力実験を行った。各試験体の載荷方法を表-2 の前半に示す。残存軸加力実験の載荷は事前載荷と事後載荷に分けて示した。すなわち、事前載荷として一定軸力下で繰り返し水平載荷を行い、その後、事後載荷としてある部材角において軸圧縮加力を行っている。その際、以下の 3 通りの拘束条件を考慮した。

- (1) 中心載荷—拘束：事前載荷で所定の最大部材角に到達したら、事前載荷での一定軸力を保持したまま水平変形を 0 に戻し (通常の除荷)、その後水平変形を 0 に拘束したまま軸加力を行うもの (以後中心載荷という)。この場合の拘束は水平変形が 0 を保つように水平力を与えることにより行う。
- (2) 偏心載荷—拘束：事前載荷で所定の最大部材角に到達したら、その部材角を拘束して軸加力を行うもの (以後偏心載荷という)。この場合の拘束は水平変形が最大変形を保つように水平力を与えることにより行う。
- (3) 偏心載荷—フリー：事前載荷での最大部材角において軸加力を行うが、水平変形の進行を拘束しないもの。この場合、事前載荷終了時の水平力を作用させたまま軸加力を開始する。従って、軸載荷に伴って水平変形は増加するので、水平力は減少していく (これも偏心載荷であるが、表では拘束状態をフリーと表記)。

表-2 には事前載荷での一定軸力と最大部材角、および、事後載荷時の部材角とその拘束状態を示した。文献 2) での重要な結論は「ある部材角まで加力した後のその

表-2 載荷方法と実験結果

シリーズ	試験体名	載荷方法					強度計算値		実験結果	
		載荷方法	事前載荷		事後載荷		曲げ強度 (kN)	せん断強度 (kN)	最大軸力 (kN)	残存軸力比**
			軸力 (kN)	最大部材角 (rad)	載荷時部材角 (rad)	拘束状態				
H52LL	H52LL-0*	中心軸圧縮					—	—	589	1.00
	H52LL-1*	曲げせん断	300	0.015	0	拘束	82	60	309	0.51
	H52LL-2*		150	0.03	0	拘束	92		161	0.25
	H52LL-3	残存軸力	300	0.01	0	拘束	82		605	1.03
	H52LL-4		300	0.01	0.01	フリー	—		479	0.81
	H52LL-5		150	0.015	0.015	フリー	92		380	0.65
H90LL	H90LL-0*	中心軸圧縮					—	—	572	1.00
	H90LL-1*	曲げせん断	300	0.015	0	拘束	82	48	434	0.52
	H90LL-2*		150	0.03	0	拘束	92		150	0.26
	H90LL-3	残存軸力	150	0.015	0.015	フリー	—		398	0.70
H52L	H52L-0*	中心軸圧縮					—	—	615	1.00
	H52L-1	残存軸力	50	0.015	0.015	フリー	60	57	413	0.67
	H52L-2		250	0.015	0.015	フリー	85		264	0.43
S52L	S52L-0*	中心軸圧縮					—	—	646	1.00
	S52L-1*	曲げせん断	150	0.03	0	拘束	90	57	150	0.23
	S52L-2	残存軸力	150	0.02	0.02	拘束	—		513	0.79
I52L	I52L-0*	中心軸圧縮					—	—	569	1.00
	I52L-1*	曲げせん断	300	0.025	0	拘束	70	70	337	0.53
	I52L-2*		450	0.011	0	拘束	34		450	0.79
	I52L-3	残存軸力	300	0.011	0.011	フリー	70		517	0.91

試験体名の* : 文献 3) で報告した試験体
 残存軸力比** : 最大軸力 (曲げせん断試験体は事前載荷の定軸力) / 対応する中心軸圧縮実験の最大軸力

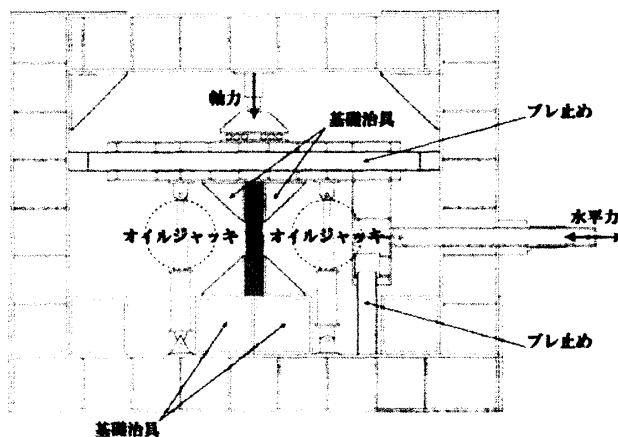


図-2 加力装置

柱の残存軸耐力 (偏心載荷の場合) は、その部材角が軸力保持能力喪失部材角となる曲げせん断加力柱に与えられた一定軸力とほぼ等しかった」というものである。そこで、本実験では、曲げせん断実験で作用軸力を変えて 2 体行っているシリーズの残存軸加力実験では、低い方の軸力を作用させ、高い方の軸力で行われた曲げせん断実験試験体の最大部材角 (すなわち、軸力負担能力喪失点) まで同じ載荷を行うのを基本とした (試験体 H52LL-5, H90LL-3, I52L-3)。また、S52L シリーズではこれらと同じ軸力を受ける試験体を計画した (S52L-2)。その他に、H52LL シリーズでは、事前載荷の作用軸力と最大部材角の影響をみる試験体 (H52LL-5 と H52LL-4)

と事後載荷の拘束状況を比較する試験体 (H52LL-4 と H52LL-3) を計画した。さらに、H52L シリーズでは、事前載荷の作用軸力の影響をみる試験体 (H52L-1 と H52L-2) を計画した。

事前載荷の曲げせん断加力実験で与える水平変形は、1/100, 1.5/100, 2/100, 2.5/100rad, ……、をそれぞれ 2 回ずつを基本としている。なお、曲げせん断試験体も本来の加力終了後に同様の事後載荷を行っているので、表に示してある。

3. 実験結果と考察

3.1 残存軸加力の実験結果の例

図-3 には、残存軸加力実験結果 (H52LL-3) を示す。H52LL-3 の試験体は事前載荷後、変形 0 で拘束して中心載荷をしたもので図-3 (a) は軸力-軸変形関係、図-3 (b) は水平力-軸変形関係を表している。事前載荷の損傷による変形を 0 に拘束するために水平力が作用していることがわかる (図-3 (b))。

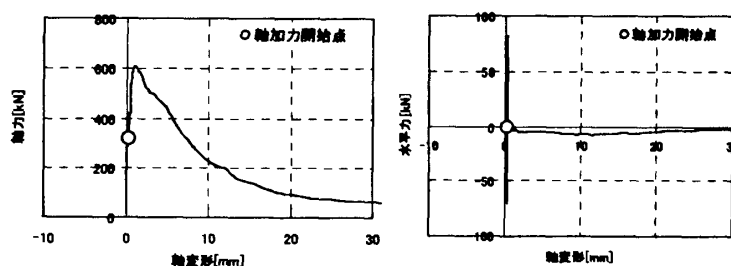
図-4 (a) (b) は、偏心フリー型の試験体 (H52LL-5) の軸力-水平変形関係、水平力-水平変形関係を示したものである。図-4 (a) では、軸加力開始後、最大軸力点まで水平変形があまり変化していない。試験体に原点に戻ろうとする復元力が働き、最大軸力点まで水平力もかかっており (図-4 (b))、その後復元力が減少していくと同時に水平変形も進行する。

3.2 実験結果のまとめ

図-5 は曲げせん断実験結果であるが、実線が軸力の高い試験体 ($N=300\text{kN}$)、点線が軸力の低い試験体 ($N=150\text{kN}$) を表している。前述したように、基本的な残存加力試験体の事前載荷は、軸力の低い試験体の軸力を与え、軸力の高い試験体の最大部材角まで行っている。一方、図-6 は、残存加力試験体の事後載荷における軸力-軸変形関係を単純軸圧縮実験の結果との比較を含めて示したものである。また、事後載荷による最大軸力を表-2 の後半に示す。

残存軸耐力実験結果を以下にまとめる。

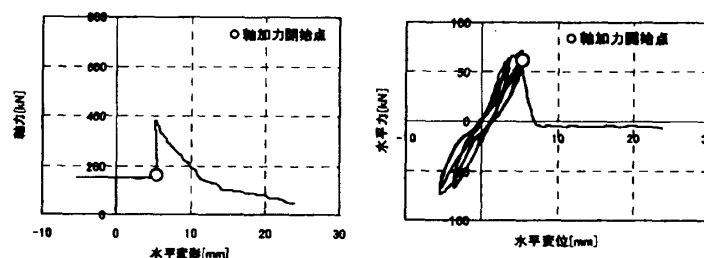
- ・事後載荷時に水平変形を 0 に戻しその変形を拘束して行った場合 (中心載荷)、単純軸圧縮結果の 103% の最大軸耐力を示した (H52LL-3)。なお、文献 2) では 82~97% であった。



(a) 軸力-軸変形関係

(b) 水平力-軸変形関係

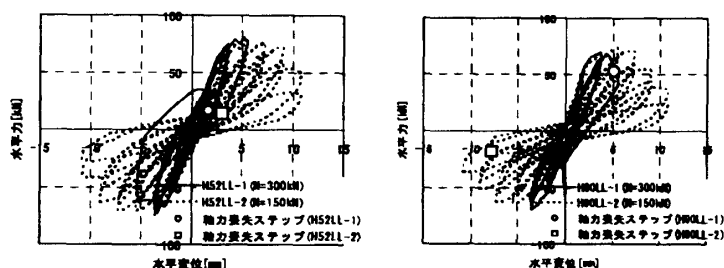
図-3 変形 0 で拘束した試験体 (H52LL-3) の軸力-軸変形関係と水平力-軸変形関係



(a) 軸力-水平変形関係

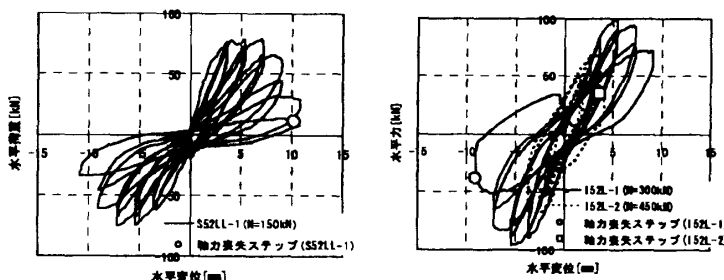
(b) 水平力-水平変形関係

図-4 偏心フリー型試験体 (H52LL-5) の軸力-水平変形関係と水平力-水平変形関係



(a) H52LL シリーズ

(b) H90LL シリーズ



(c) S52L シリーズ

(d) I52L シリーズ

図-5 曲げせん断試験体の結果

- ・事後載荷時に水平変形を 0 に戻さず、事前載荷終了時の変形で拘束しないで (偏心載荷フリー) 載荷した場合、その最大軸耐力は大きく低下する。(H52LL-4, H52LL-5, H90LL-3, I52L-3, H52L-1, H52L-2)
- ・事前載荷軸力の高い試験体と低い試験体を比較すると、

事前載荷軸力の低い試験体のほうが高い残存軸耐力を示した。(H52L-1, H52L-2)

・事前載荷部材角の異なる試験体を比較すると、部材角の小さい試験体 (H52LL-4) の事前載荷軸力が高いにも関わらず、部材角の大きい試験体 (H52LL-5) より高い残存軸耐力を示した。

・事前載荷の条件に近い試験体において、中子筋の有無の影響をみると、中子筋のある試験体の方が高い残存軸耐力を示した (H52LL-4, I52L-3)。ただし、帯筋比は異なるので、今後の検討が必要である。

・事前載荷の条件に近い試験体において、フック詳細の影響をみると、今回の実験ではフック形状が悪い試験体の方が高い耐力を示した (H52LL-5, S52L-2)。ただし、事後載荷の拘束条件がフック形状の悪いものが拘束、良いものがフリーなので、その影響が考えられる。文献 2)では偏心載荷の場合の拘束条件の影響は観察されておらず、今後の検討が必要である。

3.3 実験結果の考察

本節では、実験結果を定量的に評価することを試みる。表-2の右端に残存軸力比の実験結果を示した。この残存軸力比は事前載荷での最大軸力を対応する中心軸圧縮実験の最大軸耐力で除したものであるが、曲げせん断試験体の最大軸力は事前載荷で与えた一定軸力とした。図-7は残存加力試験体の事前載荷時での最大水平部材角と残存軸力比の関係をシリーズ毎に示したものである。ただし、比較のため中心軸圧縮試験体と同じ一定軸力を受けた曲げせん断試験体の実験結果も示してある。いずれの図も曲げせん断試験体を○、偏心フリーの試験体を□または△、偏心拘束の試験体を◇で示した。また事前載荷で同じ軸力を受けている試験体を線で結んでいる。

図を見ると、前述した通り、これらの点 (○□△◇) は中心載荷試験体を大きく下回る点に位置する。これらの図で最も注目すべき点は、偏心試験体 (□△◇) とこれらの偏心試験体の最大部材角が軸力保持性能喪失部材角となる曲げせん断試験体 (○) がほぼ同じ点に位置することである (図-7 (a) (b) (e))。言い換えると、ある部材角まで加力した後の柱の残存軸耐力 (偏心載荷の場合) は、その部材角が軸力保持能力喪失部材角となる曲げせん断加力柱に与えられた一定軸力と等しいと言

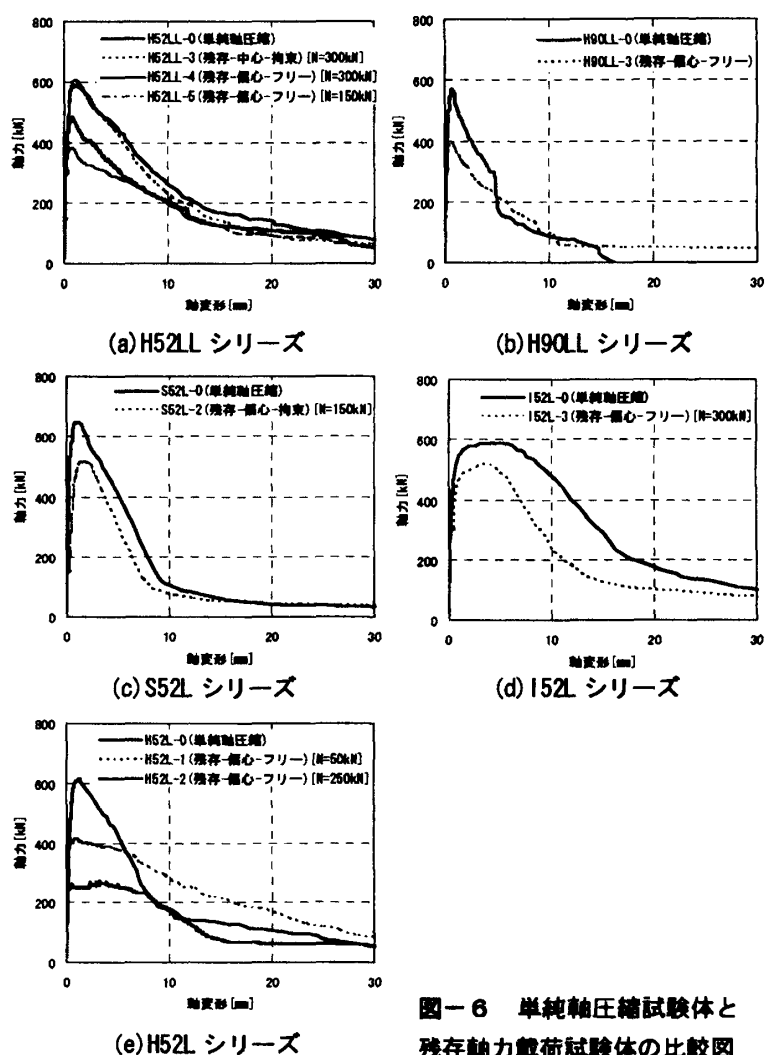


図-6 単純軸圧縮試験体と残存軸力載荷試験体の比較図

える。これは前述したように文献2)の結論であり、今回も同様のことが観察された。文献2)ではこの説明として、軸力を保持する能力は斜めのせん断ひび割れ面の摩擦によるが、偏心載荷の場合と曲げせん断載荷のいずれの載荷の場合も軸力保持能力を失う点の応力状態はほぼ同じ (異なる点は偏心載荷は軸力が変動するのに対し、曲げせん断載荷は水平力が変動) であるからとしている。

したがって、せん断破壊後の残存軸耐力 (偏心載荷の場合) は、せん断破壊後の軸力保持能力喪失部材角により評価できる可能性がある。文献5)ではこのせん断破壊後の軸力保持能力喪失部材角の評価式 (実験値の平均を評価) を提案している。以下にその提案式を示す。

$$R = \frac{0.027}{\eta} \quad \left(\eta = \frac{eN}{P_{f,cal}} \right) \quad (1)$$

$$N = N_0 + Q \frac{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta - 2\mu \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\sin \theta \cdot \cos \theta - \mu \cdot \cos^2 \theta}$$

$$P_{f,cal} = P_{f,0} \cdot \left(1 - 0.5 \cdot \frac{S}{D} \right) \cdot R_d$$

$$P_{fo} = b \cdot D \cdot p_w \cdot \sigma_w \frac{\sin\theta \cdot \cos\theta + \mu \cdot \sin^2\theta}{\sin\theta \cdot \cos\theta - \mu \cos^2\theta} + A_s \cdot \sigma_y$$

ここで、 N は作用軸力、 Q は喪失時のせん断力であるが、せん断強度としてよい。 μ は滑り面での摩擦係数で0.77、 θ は滑り角度で60度、 b 、 D は断面の幅とせい、 p_w 、 σ_w 、 S は帯筋比、降伏応力度、間隔、 A_s 、 σ_y は主筋の全断面積と降伏応力度である。さらに、 R_d は配筋詳細の有効係数で、溶接帯筋で1、90度フック(余長4d)では0.8である。なお、文献4)では中子筋を有する試験体の配筋詳細の有効係数0.9を提案している。なお、式(1)は p_w が0.4~0.68%、 η がおよそ0.7< η <2.8範囲の実験データより導かれている。

図-7(a)~(e)には、式(1)による計算値を点線で示した。この計算値はシリーズごとに作用軸力を変化させ、横軸に式(1)による部材角 R を、縦軸に作用軸力を $(bD\sigma_B + A_s\sigma_y)$ で除したもの(σ_B はコンクリート強度)、をそれぞれとして示したものである(縦軸の軸力比は式(1)の η とは違うので注意)。なお、せん断強度 Q は文献5)によった。この計算値は曲げせん断試験体の結果により導かれたものなので、当然これらの点の近傍を通る。従って、偏心载荷の場合の残存軸耐力も式(1)で評価しうることがわかる。

4. 耐震診断基準の残存軸耐力に関する考察

表-3に耐震診断に示されている想定するF値まで許容される軸力比を帯筋比別に示す。ここで、残存軸耐力とはその柱が保有するF値を超えた場合に支持しうる軸力、軸力支持能力はそのF値に達する前に支持しうる軸力である。文献2)では、診断基準で示されている残存軸耐力は実験範囲内(帯筋比0.51%)では安全側であるが、実験範囲外の0.2%以下のせん断柱でF=1の場合に危険側となる可能性が指摘されている。そこで、本章では耐震診断基準における残存軸耐力の評価法の妥当性をより広い範囲で検討する。

図-8は基本的に図-7と同じ図を示している。すなわち、各試験体の事前载荷での部材角と残存軸力比の関係であるが、診断基準と比較するために横軸の部材角は想定する建物の層間変形角に変換している。換算は式(2)によっている。

$$R_{sory} = \frac{1}{\alpha} \cdot R_{sum} \cdot \frac{h_0}{H} = 0.37 \cdot R_{sum} \quad (2)$$

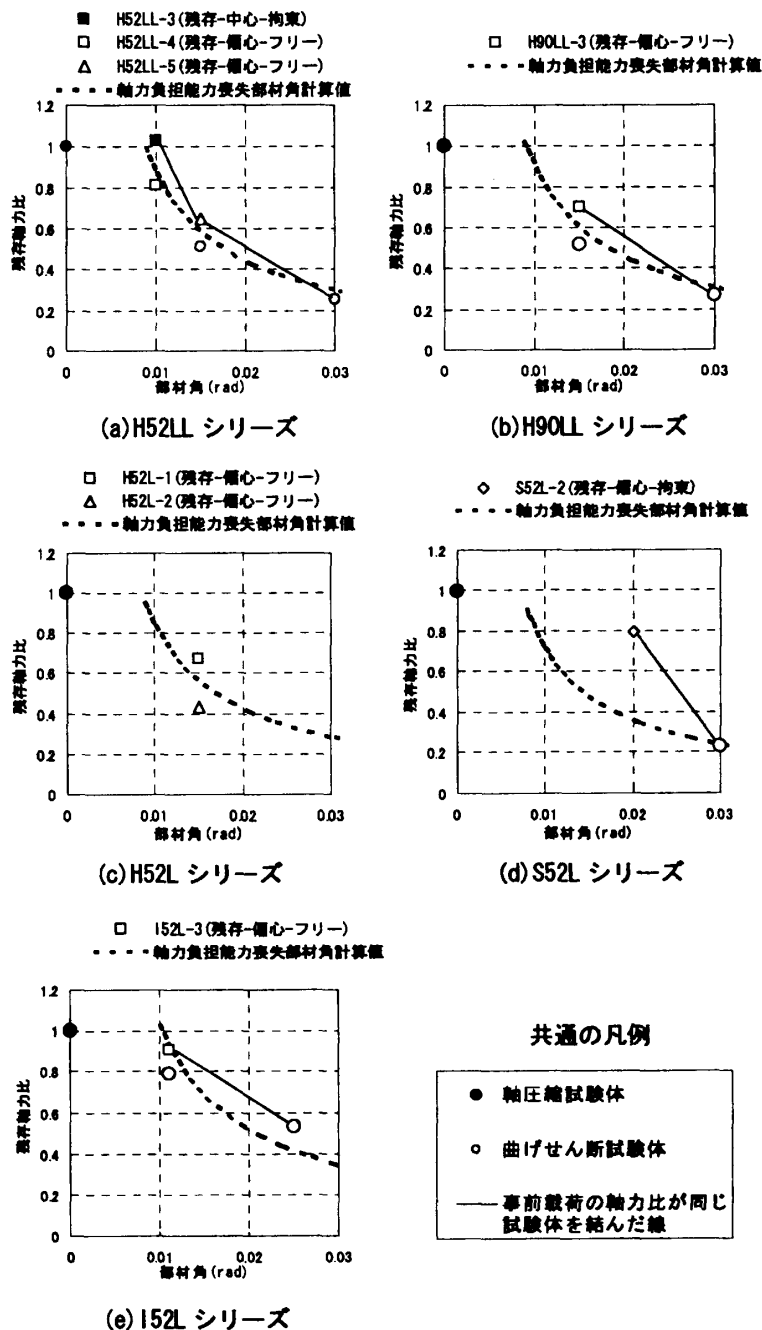


図-7 拘束条件の影響と部材角計算値との比較

表-3 耐震診断¹⁾における残存軸耐力と軸力支持能力の評価法

F値		1	1.27	2	3
層間変形角R(rad)		0.0040	0.0067	0.0123	0.0281
極脆性柱	0.4<pw	0.4	0.3	0.1	0
	0.2<pw<0.4	0.3[0.4]	0.1	0	0
	pw<0.2	0[0.3]	0	0	0
せん断柱	0.4<pw	0.6	0.4	0.2	0
	0.2<pw<0.4	0.5	0.3[0.4]	0.1	0
	pw<0.2	0.4	0[0.4]	0	0
曲げ柱	0.4<pw	0.6	0.6	0.5	0.4
	0.2<pw<0.4	0.5	0.5	0.3[0.4]	0.2[0.3]
	pw<0.2	0.4	0.4	0[0.3]	0[0.2]

表中の[]内の数値は軸力支持能力

ここで、 R_{story} は層間変形角、 R_{mem} は柱部材角、 H は層の高さ、 h_0 は内法高さであるが、本論文では安全側に設定して $h_0/H=0.33$ とした。また、 α は全変形の中の柱の比率であり本論文では 0.9 としている。

図-8 は本実験結果に、文献2)の実験結果も加え、さらに帯筋比別に示している。この図に表-3 に示した極脆性柱とせん断柱の数値を合わせて図示した。なお、診断基準では軸力比はコンクリート断面のみで評価するが、実験値は主筋も含めた軸力比になっている点に注意を要する。

図をみると各帯筋比での実験値をみても、ほとんどの試験体で診断基準を上回っている。文献2)では帯筋比が 0.2%以下のせん断柱の妥当性が問題視されていたが、図-8 (a) では全ての実験値が診断基準の安全側となった。診断基準で主筋を無視していることも考慮に入ると、この実験範囲では、最も不利な偏心載荷の場合でも、診断基準は安全側に設定されていることがわかる。

5. まとめ

- (1)事後載荷時に水平変形を 0 に戻しその変形を拘束して行った場合(中心載荷)、単純軸圧縮結果の 103% の最大軸耐力を示した。
- (2)水平変形を 0 に戻さないで残存軸加力を行った場合(偏心載荷)、その最大軸耐力は水平方向の変形の拘束条件に関わらず大きく低下した。
- (3)ある部材角まで加力した後のその柱の残存軸耐力(偏心載荷の場合)は、その部材角が軸力保持能力喪失部材角となる曲げせん断加力柱に与えられた一定軸力とほぼ等しかった。
- (4)中子筋を配した試験体は、事前載荷後の残存軸耐力が他の試験体に比べ高くなった。
- (5)耐震診断基準における残存軸耐力の評価法の妥当性を文献2)のデータも含め、より広い範囲で検討した結果、どの帯筋の範囲でも実験値が診断基準の安全側となった。

謝辞 本研究は平成 17 年度科学研究費補助金基盤研究(B)「単純軸圧縮挙動に基づいた RC 系柱の軸力保持能力の評価手法の開発」(代表加藤大介) によった。

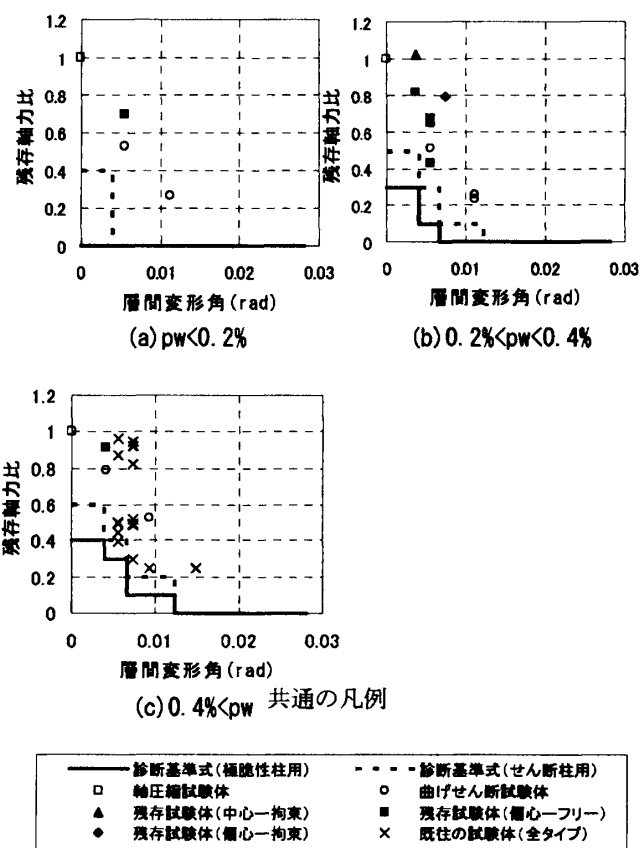


図-8 耐震診断における残存軸耐力と軸力支持能力の評価法と実験結果の比較

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，2001 年 10 月
- 2) 加藤大介，李柱振，中村友紀子，本多良政：RC 造柱の残存軸耐力に関する実験と考察，日本建築学会構造系論文集，第 619 号，pp.127-132，2007 年 9 月
- 3) 宮島雄代，富田泰宇，李柱振，加藤大介：RC 造柱のせん断破壊後の軸力保持能力に及ぼす配筋詳細の影響の評価実験，コンクリート工学年次論文集，vol.29，No.3，2007 年
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999 年
- 5) 加藤大介，李柱振，中村友紀子，本多良政：配筋詳細に着目した RC 造せん断破壊柱の軸力保持性能に関する実験(軸加力実験と曲げせん断加力実験の関係)，日本建築学会構造系論文集，第 610 号，pp.153-159，2006 年 12 月