

論文 壁柱・フラットプレート架構の地震荷重下における履歴復元力特性

太田 義弘^{*1}・岡本 晴彦^{*2}・山本 正幸^{*3}・室屋 哲也^{*4}

要旨: 壁柱・フラットスラブ架構における履歴復元力特性のスケルトンカーブの性状把握を目的として、直交壁の有無と対象とする壁柱の架構内位置をパラメーターとして、壁柱・フラットプレート架構の水平加力実験を行った。

実験結果から、初期剛性と曲げ降伏時の耐力と変形に関しては、直交壁の有無および壁柱位置の違いによる影響はないが、直交壁はパンチング破壊耐力の向上に寄与することを明らかにした。また、パンチング破壊耐力とスラブ有効せいに対する柱せいの比並びにパンチング破壊時の変形とスラブ有効せいに対する柱せいの比との関係について述べた。

キーワード: 壁柱, フラットプレート, スケルトンカーブ

1. はじめに

フラットプレート構造は、建物の階高の有効利用、内部空間におけるデザインの自由性、また型枠および鉄筋工事の簡略化等の利点を有している。しかし、フラットプレート構造は柱とスラブの接合部においてスラブの脆性破壊を生じやすい弱点を有しており、その接合部の力学的性状を明らかにするために、多くの研究がなされてきた。^{例1, 2)}

しかし、はり間方向を壁式構造とし桁行方向を壁柱とフラットプレートからなる架構構造とする壁柱・フラットプレート架構の耐震性に関しては、その研究は少なく²⁾、また直交壁が剛性や耐力等に与える影響を考慮すると、その耐震性に関しては明らかにする必要がある。

本報においては直交壁を有する壁柱・フラットプレート架構の水平加力実験を行い、その実験結果を基にして、地震荷重下における壁柱・フラットプレート架構の履歴復元力特性におけるスケルトンカーブを規定する各段階での剛性、耐力に関する検討を行う。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体一覧表を表-1に、試験体図を図-1および材料試験結果を表-2に示す。

試験体は3体である。試験体CW1が基本試験体である。試験体CW1は対象とする柱を中柱とし、加力方向に対して直交壁を有する。試験体CN1は対象とする柱を中柱とし、直交壁はない。試験体SW1は対象とする柱を側柱とし、加力方向に対して直交壁を有する。

試験体は直交壁付き壁柱とスラブからなる架構を対象とした約1/3のモデルであり、壁柱を層の中央において、スラブをスパン中央において切り取った形状としている。

以上の3体の試験体について実験を行い対象とする柱の位置の違いおよび直交壁の有無による履歴復元力特性への影響について検討を行う。

表-1 試験体一覧表

試験体名	対象柱	加力方向に対する直交壁
CW1	中柱	有
CN1	中柱	無
SW1	側柱	有

* 1 (株)竹中工務店技術研究所 研究員 工修 (正会員)

* 2 (株)竹中工務店技術研究所 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

* 3 (株)竹中工務店東京本店設計部 構造課長 工修

* 4 (株)竹中工務店東京本店設計部 主任 構造担当

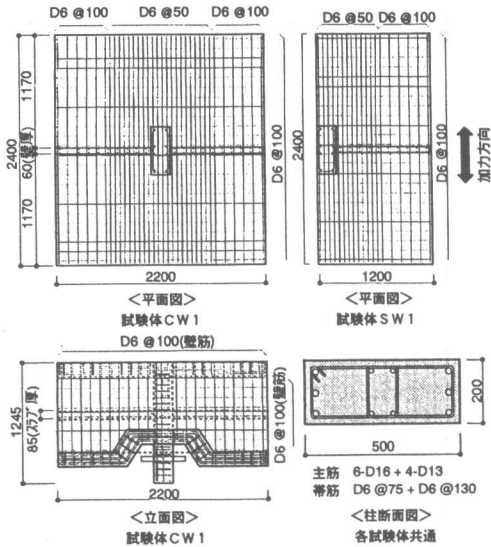


図-1 試験体図

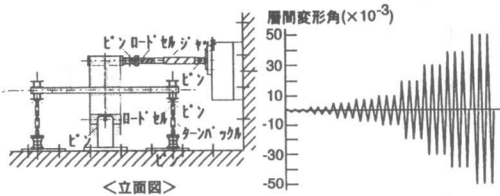


図-2 加力装置図と加力履歴

表-2 材料試験結果

<コンクリート>

	圧縮強度 MPa	圧縮強度 時のひずみ %	弾性係数 1) $\times 10^4$ MPa	引張強度 2) MPa
4週	32.3	0.173	2.74	—
実験時	34.1	0.172	2.82	2.66

1)弾性係数は1/3割線弾性係数
2)引張強度は割裂強度試験による

<鉄筋>

	使用箇所	弾性係数 $\times 10^5$ MPa	降伏強度 MPa	引張強度 MPa	のび %
D6	壁・スラブ主筋	2.06	362	569	37.0
D13	柱帯筋	1.86	330	483	34.1
D16	柱主筋	1.91	376	566	33.6

2.2 加力方法

加力装置と加力履歴を図-2に示す。

スラブの2辺を支持し、柱上部の油圧ジャッキにより逆対称の断面力分布を与える水平力を加えた。また、スラブ自重の影響を打ち消すため、スラブ支持部のロードセル付きターンバックルによりスラブに元応力を与えた。層間変形

角 $R=1.0, 2.5, 5, 7.5, 10, 20, 30, 40, 50 \times 10^{-3}$ において正負繰返し载荷を行った。

2.3 測定方法

柱、壁およびスラブ主筋のひずみをひずみゲージにより、スラブの支点反力をロードセルにより測定した。

3. 実験結果と検討

3.1 破壊性状

実験結果一覧を表-3に、スラブ上面の最終ひびわれ状況を図-3に、柱せん断力と層間変形角の関係を図-4に示す。

各試験体の破壊経過は以下のとおりである。

試験体 CW1

まず、柱とスラブの接合部隅角部位置にひびわれが発生し、その後スラブ面には直交壁と平行なひびわれが発生し伸展した。スラブ主筋は層間変形角 $R=6.0 \times 10^{-3}$ の時に、柱とスラブの接合部位置において降伏ひずみに達し、その位置と直交壁との平行線上のスラブ主筋が柱近傍からスラブ自由端へと順次降伏ひずみに達した。層間変形角 $R=20 \times 10^{-3}$ をこえる付近から、スラブの柱とスラブの接合位置においてコンクリートの圧壊が開始した。層間変形角 $R=30 \times 10^{-3}$ でスラブおよび直交壁に直交壁と鉛直方向にひびわれが発生した。その後、大きな耐力の低下がおこることなく、層間変形角 $R=50 \times 10^{-3}$ の繰返し载荷を終え、実験を終了した。

試験体 CN1

試験体 CW1 と同様に、まず上下スラブ面の柱とスラブの接合位置にひびわれが発生した。その後は試験体 CW1 と異なりスラブ面には放射状のひびわれが発生し伸展した。スラブ主筋は層間変形角 $R=3.5 \times 10^{-3}$ の時に柱とスラブの接合位置において降伏ひずみに達した。層間変形角 $R=20 \times 10^{-3}$ をこえる付近から、スラブの柱とスラブの接合位置においてコンクリートの圧壊が開始しするとともに、スラブに加力方向と平行な方向にひびわれが発生した。層間変形角 $R=30 \times 10^{-3}$ の正载荷時にパンチング破壊の兆候が見られ、正载荷繰返し時にパンチング破壊をおこ

表-3 実験結果一覧表

	ひびわれ発生								鉄筋 降伏 荷重 kN	コンクリート		最大荷重時				破壊 形態
	スラブ上面				スラブ下面					圧壊開始荷重 kN	負載荷 kN	正載荷		負載荷		
	荷重 kN	R $\times 10^{-3}$	荷重 kN	R $\times 10^{-3}$	荷重 kN	R $\times 10^{-3}$	荷重 kN	R $\times 10^{-3}$				荷重 kN	R $\times 10^{-3}$	荷重 kN	R $\times 10^{-3}$	
CW1	22.6	0.86	-10.7	-0.67	22.6	0.86	-21.4	-1.25	40.5	75.2	-74.5	75.4	29.3	-76.1	-40.1	曲げ
CN1	14.7	0.05	-8.0	-1.00	17.9	0.20	-8.0	-1	43.9	64.5	-59.2	64.5	20.2	-61.3	-28.1	パンチング
SW1	6.5	0.49	-8.0	-0.81	6.5	0.49	-8.0	-0.81	24.9	42.8	-41.3	43.1	39.7	-43.4	-50.1	曲げ

R: 層間変形角を示す。

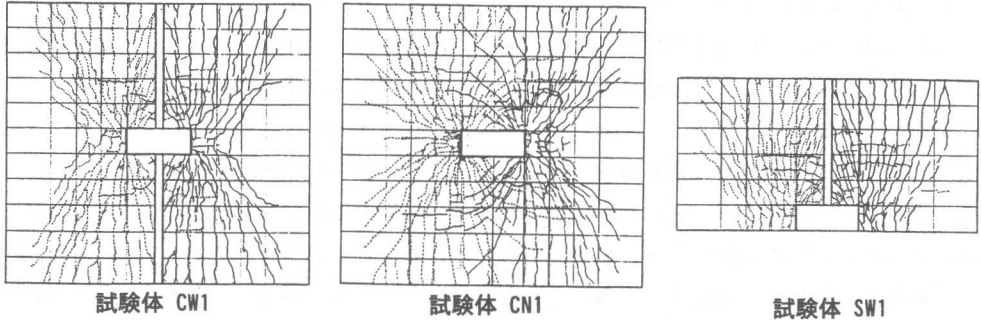


図-3 最終ひびわれ図

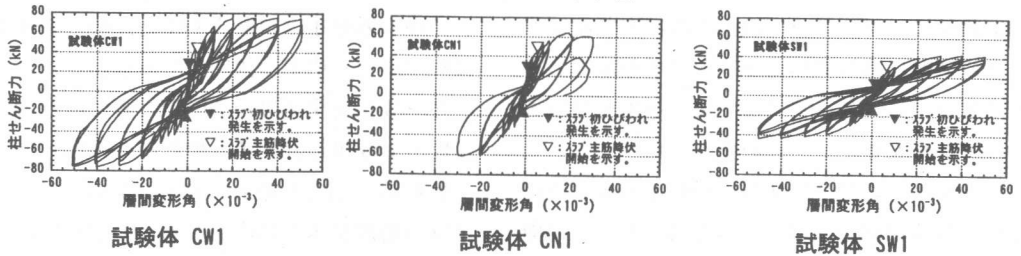


図-4 柱せん断力と層間変形角の関係

し急激に荷重が低下したので実験を終了した。

試験体 SW1

破壊の進展状況は試験体 CW1 とほぼ同様であった。

3. 2 スケルトンカーブに関する検討

(1) スケルトンカーブの概要

図-4に柱せん断力と層間変形角の関係を示す。

試験体 CW1 においては、初期の段階からスラブにひびわれが発生したため、柱せん断力と層間変形角の間に線形的な関係は見られない。その後、柱せん断力と層間変形角の関係において傾きが大きく変化するのは層間変形角 20×10^{-3} 以降である。ここまでの経過は他の試験体 2 体においてもほぼ同様であり、層間変形角 20×10^{-3} の点を今回の実験における曲げ降伏とする。試験体 CW1, SW1 においてはその後層間変形角

50×10^{-3} まで大きく荷重が低下することなく変形が進んだ。試験体 CN1 においては、層間変形角 30×10^{-3} においてパンチング破壊をおこし、荷重が低下した。

本実験の柱せん断力と層間変形角から想定したスケルトンカーブのモデルを図-5に示す。

以下にこのモデルを規定する事項に関して検討を行う。

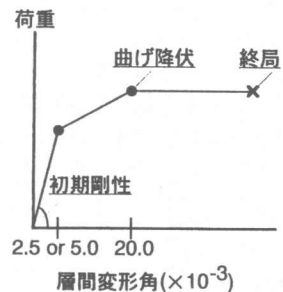


図-5 スケルトンカーブのモデル

(2) 初期剛性に関する検討

表-4に各試験体における初期剛性の実験値と実験値に対するスラブの弾性換算有効幅とスラブ全幅の比率を示す。ここで、スラブの弾性換算有効幅は、ある剛性に対して柱および壁とスラブを弾性であるとして変形を算定する時のスラブの有効幅を示す。

初期剛性1は層間変形角 1.0×10^{-3} において3回繰返し加力を行ったときの柱せん断力と層間変形角の最小二乗法による回帰直線の傾きとし、初期剛性2は層間変形角 2.5×10^{-3} のときの柱せん断力と層間変形角の回帰直線の傾きとした。直交壁のある試験体 CW1 と直交壁のない試験体 CN1 の初期剛性とはほとんど差がなく、初期剛性に対しての直交壁の影響はないと考えられる。

実験値に対するスラブの弾性換算有効幅は、柱と直交壁に関してはスラブ部分を剛域として変形を算定し、スラブに関しては柱部分を剛域として変形を算定して求めた。

初期剛性1に関してスラブ全幅に対する弾性換算有効幅の割合は 40.7~46.9%であり、初期剛性2に関してスラブ全幅に対する弾性換算有効幅の割合は 23.7~26.7%であった。狩野らによる壁柱タイプの実験結果²⁾において、層間変形角 2.5×10^{-3} 時の剛性に関するスラブ全幅に対する弾性換算有効幅の割合は約 17~24%であり、本実験結果はほぼ一致した値となった。

また、中柱タイプの試験体 CW1 と CN1 における弾性換算有効幅の割合と側柱タイプの試験体 SW1 における弾性換算有効幅の割合とはほとんど差がないことから、中柱と側柱の違いによる初期剛性への影響はないと考えられる。

表-4 初期剛性

	初期剛性1	換算有効幅1	有効幅1 / 全幅	初期剛性2	換算有効幅2	有効幅2 / 全幅
	kN/rad	mm	%	kN/rad	mm	%
CW1	17.5	997	45.3	9.3	522	23.7
CN1	18.0	1031	46.9	9.5	537	24.4
SW1	8.7	488	40.7	5.7	320	26.7

(3) 曲げ降伏に関する検討

図-6に正載荷の層間変形角 20×10^{-3} 時にお

ける引張側となるスラブ上端主筋のひずみ分布を示す。

試験体 CW1 においては柱隅角部を通して加力方向に対して直交する線である図中 U2 線上の主筋のひずみはスラブ中央からスラブ自由端方向に向かうにしたがって減少するが、すべて降伏ひずみに達した。U1, U3 線上の主筋のひずみはスラブ中央からスラブ自由端方向に向かうにしたがって増加したが、U3 線上の主筋のひずみは降伏ひずみには達しなかった。

試験体 SW1 においてもひずみの分布は試験体 CW1 と同じようなひずみ分布となった。

試験体 CN1 におけるひずみ分布は試験体 CW1 と異なり、スラブ中央からスラブ自由端方向に向かうにしたがって U1 線上では主筋のひずみは減少し、U3 線上では増加した。また、U2 線上のひずみ分布は試験体 CW1 と比較して柱近傍にひずみが集中する傾向となった。

表-5に層間変形角 20×10^{-3} 時における柱せん断力実験値と計算値との比較を示す。

計算値1はU2線上でスラブ全幅においてスラブ主筋がすべて降伏した場合の柱せん断力を算定した値である。計算値2-1はU2線を耐力算定線としてU2線上において実測された鉄筋のひずみから計算した応力を基に算定した柱せん断力を示す。計算値2-2は加力方向と平行な線上でU1~3のひずみ実測値を比較しその最大値を示す点を結んだ線を耐力算定線としてその線上における実測された鉄筋のひずみから計算した応力を基に算定した柱せん断力を示す。実測していない鉄筋のひずみは線形補間をした。

表-5より、直交壁のある試験体 CW1 と SW1 においては計算値1と計算値2-1は実験値とよく一致する。直交壁のない試験体 CN1 においても計算値1は実験値とよく一致しが、計算値2-1はやや過大評価になる。このことから、曲げ降伏耐力はU2線上、すなわち柱隅角部を通して加力方向に対して直交する線状のスラブ全幅においてスラブ主筋が降伏した場合の曲げ耐力でほぼ算定されるが、直交壁のない場合は多少過

大評価となる。

これらのことから、架構における曲げ降伏時に関して直交壁の有無は、スラブ主筋のひずみ分布には影響するものの、曲げ降伏耐力に対する影響は少なかったと言える。

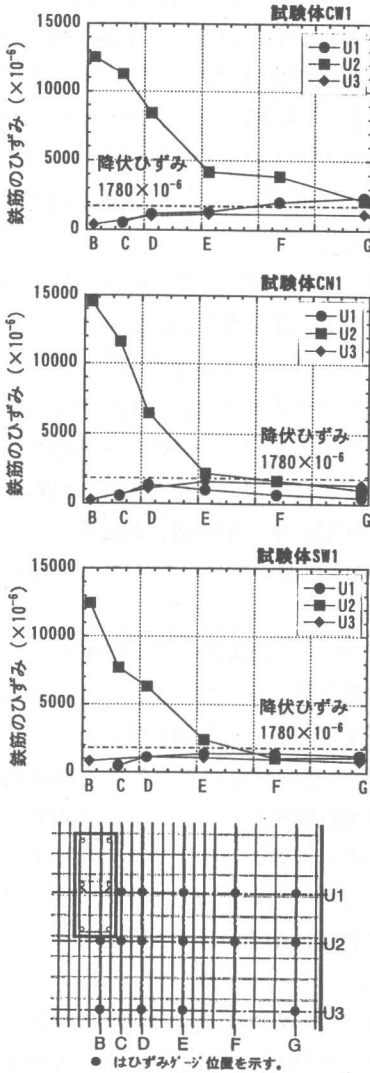


図-6 スラブ主筋のひずみ分布図

表-5 曲げ降伏耐力

	実験値	計算値	実験値/	計算値	実験値/	計算値	実験値/
	kN	kN	計算値	2-1	計算値	2-2	計算値
CW1	75.2	71.6	1.05	71.6	1.05	68.4	1.10
CN1	64.5	71.6	0.90	64.1	1.01	75.5	0.85
SW1	39.8	40.0	1.00	36.6	1.09	34.9	1.14

(4) 終局時に関する検討

表-6 に各試験体について正載荷時の最大耐

力時の接合部におけるモーメント実験値と RC 規準³⁾のパンチングに関する終局伝達モーメント計算値およびその比率を示す。ただし、ここでは試験体 CW1 と SW1 のパンチング破壊時の接合部モーメント計算値には壁による影響は考慮していない。また、表-6 には終局時の接合部におけるモーメント実験値および最大耐力時の接合部におけるモーメント実験値と終局時の接合部におけるモーメント実験値の比率、終局時の層間変形角も示す。ただし、ここでの終局時は曲げ破壊をした試験体 CW1 と SW1 では層間変形角 50×10^{-3} (3 サイクル目) 時とし、パンチング破壊をした試験体 CN1 ではパンチング破壊時とした。

パンチング破壊に関しては以下のことが明らかになった。

- ①試験体 CN1 では実験値と計算値はほぼ一致した。これより RC 規準のパンチング破壊に関する終局伝達モーメント計算値は壁柱と架構を形成するフラットプレートにおいても有効である。
- ②試験体 CW1 と SW1 では破壊経過においてパンチング破壊の兆候と思われるスラブの加力方向と平行なひびわれが入った時に直交壁にもたてひびわれが入ったこと、試験体 CW1 では実験値が計算値を大きく上回ってパンチング破壊を生じなかったことから、直交壁がパンチング破壊耐力の向上に寄与したと判断される。

また、曲げ破壊した試験体 CW1 と SW1 に関しては最大耐力時の接合部におけるモーメント実験値と終局時の接合部におけるモーメント実験値の比率は 0.91, 0.84 であり、層間変形角 50×10^{-3} 時においても耐力の低下が少なかった。

図-7 に本実験においてパンチング破壊をした試験体 CN1 と狩野らによる既往の実験^{1), 2)}の結果に関して、(パンチング破壊時の接合部モーメント実験値)/(RC 規準のパンチング破壊に関する終局伝達モーメント計算値)と(柱せい)/(スラブの有効せい)との関係および(パンチング破壊時の層間変形角)と(柱せい)/(スラブの有効せい)との関係を示す。

データとしては、加力方法は水平加力のみで、スラブに関するせん断スパン比が 11~13 の実験結果を採用した。図-7より以下のことが述べられる。

①パンチング破壊に関する終局伝達モーメント計算値は(柱せい)/(スラブの有効せい)が大きいと実験値と良く一致するが、小さいと過小評価する。

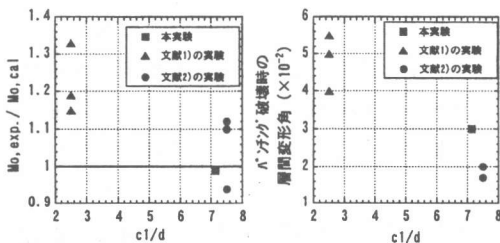
②パンチング破壊時の層間変形角は(柱せい)/(スラブの有効せい)が大きい方が小さくなる。

②に関してはコンクリートのせん断応力が最大せん断応力に達した時にパンチング破壊が脆性的に起こると仮定した場合に、(柱せい)/(スラブの有効せい)が大きい方がその時の柱位置でのスラブの回転角は小さくなりスラブの変形が小さくなることとスラブの有効せいが同じならば柱の変形も小さくなるので、パンチング破壊時の層間変形角は(柱せい)/(スラブの有効せい)の大きい方が小さくなると考えられる。

表-6 終局耐力と変形

	M_{max} kNm	$M_{o,cal}$ kNm	$M_{max}/M_{o,cal}$	M_u kNm	M_u/M_{max} $\times 10^{-2}$	R_u	破壊形式
CW1	69.4	59.9	1.16	63.2	0.91	5.0	M
CN1	59.4	59.9	0.99	55.2	0.93	3.0	P
SW1	39.6	44.4	0.89	33.1	0.84	5.0	M

M_{max} : 最大耐力時の接合部におけるモーメント実験値
 $M_{o,cal}$: パンチング破壊に関する終局伝達モーメント計算値(RC規準)
 M_u : 終局時の接合部におけるモーメント実験値
 R_u : 終局時の層間変形角
 ここで、終局時は以下の時点とする。
 CW1, SW1-層間変形角 5×10^{-2} (3サイクル目)時
 CN1-パンチング破壊時(層間変形角 3×10^{-2})時
 破壊形式: M-曲げ圧壊 P-パンチング破壊



$M_{o,exp.}$: パンチング破壊時の接合部におけるモーメント実験値
 $M_{o,cal}$: パンチング破壊に関する終局伝達モーメント計算値(RC規準)
 C1: 柱せい d: スラブの有効せい

図-7 パンチング破壊と(柱せい)/(スラブの有効せい)の関係

4. まとめ

壁柱・フラットスラブ架構の水平加力実験により、スケルトンカーブに関して以下の知見が得られた。

(1)初期剛性に関しては、実験値に対する弾性換算有効幅を求めた。層間変形角 1.0×10^{-3} 時の実験値についてはスラブ全幅に対する弾性換算有効幅の割合は 41~47%であり、層間変形角 2.5×10^{-3} 時の実験値についてはスラブ全幅に対する弾性換算有効幅の割合は 24~27%であった。また、直交壁の有無による初期剛性の影響はなかった。

(2)曲げ降伏に関しては、曲げ降伏時の変形を層間変形角 20×10^{-3} とした場合には、曲げ降伏耐力は柱隅角部から加力方向と直交な方向に対して平行線上のスラブ全幅においてスラブ主筋が降伏した場合の曲げ降伏耐力として算定することができるが、直交壁のない試験体 CN1 に関して算定結果はやや過大評価となった。

(3)終局時に関しては、以下のことが明らかになった。

a) パンチング破壊時の接合部モーメント計算値と実験値が一致した。また、直交壁はパンチング破壊耐力向上に有効に働いた。

b) 今後の検討が必要と思われるが本実験と狩野野の実験結果から以下の相関性が考えられた。

・パンチング破壊に関する終局伝達モーメント計算値は(柱せい)/(スラブの有効せい)が大きいと実験値と良く一致するが、小さいと過小評価する。

・パンチング破壊時の層間変形角は(柱せい)/(スラブの有効せい)の大きい方が小さくなる。

参考文献

- 狩野芳一・吉崎征二：フラットプレート構造の柱-スラブ接合部に関する研究 その1 水平荷重を受ける接合部の実験，日本建築学会 日本建築学会論文報告集，第 228 号，pp39-47，1980.2
- 狩野芳一・吉崎征二：フラットプレート構造の柱-スラブ接合部に関する研究 その4 終局せん断強度算定法とその確認実験，日本建築学会 日本建築学会論文報告集，第 309 号，pp29-40，1981.11
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，日本建築学会，pp110-113，1988.12