

論文

[2083] 高強度材料を用いたRC外柱・梁接合部の折曲げ定着耐力に及ぼす諸要因の影響

正会員 ○ 川上 修司 (近畿大学大学院)

正会員 村上 雅英 (近畿大学理工学部)

正会員 窪田 敏行 (近畿大学理工学部)

1. はじめに

高強度コンクリート及び高強度鉄筋を用いた高層建築物の設計規準を定めるために建設省を中心とした委員会が発足し、実験及び解析の両面より研究が行われている。本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」の一部であり高強度材料を用いたRC外柱・梁接合部の梁主筋の定着・付着性状に関する基礎的資料を得るとともに既往の耐力算定式の適用性を調べることを目的とする。

2. 実験実施計画及び実験方法

鉄筋コンクリート造建築物の終局強度型耐震設計指針(案)には、鉄筋コンクリート構造における梁主筋の柱への定着に常用している90度折曲げ定着部の定着耐力式として式(1)に示す藤井・森田式[1]が解説中に紹介されている。[2]

$$P = W \cdot d_b \cdot f_{bear} \cdot \sin \theta \cdot h / (h - j) \cdots (1)$$

W:支圧力評価幅、 d_b :鉄筋径、 f_{bear} :コンクリート支圧強度、 θ :抵抗機構として形成されるコンクリート圧縮束の角度、 h :柱支点間距離、 j :梁応力中心距離

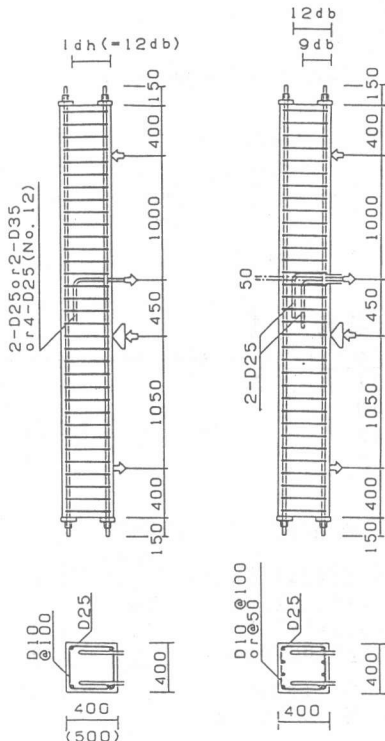


図1 加力方法及び試験体配筋図

しかし、式(1)は普通強度材料($f_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$ 以下、SD40以下)を使用した実験結果に基づき提案されたものであり、高強度材料に対する適用性は未確認である。本実験では式(1)の高強度材料への適用性を調べるために、表1に示すようにコンクリート強度、補強筋量、鉄筋径、かぶり厚、二段筋、多数本配列などを実験変数とした試験体を製作して、比較実験を行った。なお、全ての試験体に対し曲げ内法半径は $3d_b$ 、余長及び投影長さは $12d_b$ とした。コンクリートは試験鉄筋が垂直上向きとなる方向で打設した。加力方法は、図1、2に示すように梁形のない試験体の試験部分で、梁の曲げモーメントにより接合部に生じる応力状態を再現するために、梁筋とコンクリート圧縮応力ブロック部分のコンクリートに直接力を作用させる方式を採用した。なお、軸力はゼロとした。測定方法については、図3に示すように接合部からの鉄筋の抜け出し量と定着耐力の関係を調べるため、接合部の表面部分での梁筋の抜け出し量を測定するとともに鉄筋の歪(作用応力)を測定した。最終的には、梁筋に生じた引張力は、直線部分では僅かしか負担され

ず、大部分が梁筋の折曲げ部分の内側のコンクリートを支圧することによりコンクリートに伝達されるため、定着強度はコンクリートの支圧強度に依存する。そのため、梁筋の折曲げ始点と曲げ終点ですれ量と鉄筋の歪を計測し、梁筋の折曲げ部分がコンクリートを支圧の様子を調べた。また、せん断補強筋が梁筋の定着性能や、接合部のせん断抵抗に与える影響を調べるために、せん断補強筋の歪

も計測した。表2に実験で使った材料の力学的性質を示す。

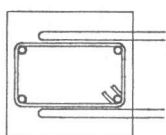


表1 試験体諸元

試験体	打設日	設計基準強度 F_c' (kgf/cm ²)	かぶり厚 C (mm)	鉄筋径 db (mm)	補強筋間隔 (mm)	柱断面 (mm*mm)	Variation
No. 1	9/27	400	65	2D-25@	100	400*400	補強筋無し
No. 2	10/16	800	65	2D-25@	100	400*400	補強筋無し
No. 3	10/16	1200	65	2D-25@	100	400*400	補強筋無し
No. 4	9/27	400	65	2D-25@	100	400*400	補強筋無し
No. 5	10/16	800	65	2D-25@	100	400*400	基本形
No. 6	10/16	1200	65	2D-25@	100	400*400	基本形
No. 7	10/16	800	65	2D-25@	100	400*400	基本形
No. 8	9/27	800	85	2D-35@	100	400*500	かぶり厚大
No. 9	9/27	800	110	2D-35@	100	400*500	太径 (D35)
No. 10	10/16	800	65	2-2D25@	100	400*400	太径、かぶり厚大
No. 11	10/16	800	65	2-2D25@	50	400*400	二段筋
No. 12	9/27	800	65	4-D25@	100	400*400	多数本配列

*：柱のコア外部に梁筋定着 左図参照

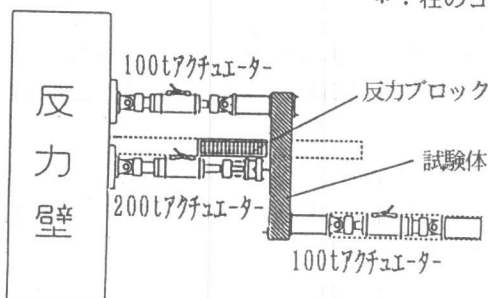


図2 加力装置図

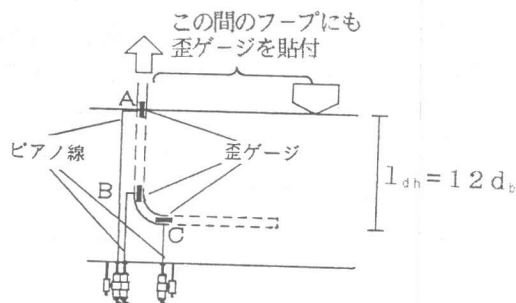


図3 変位・歪測定方法

鉄筋

表2 材料試験結果

鉄筋径	鉄筋種類	降伏応力度 (tonf/cm ²)	最大応力度 (tonf/cm ²)	伸び率 (%)
D10	SD80	8.313	9.856	8.2
D25	SD70	8.240	9.345	13.9
D35	SD70	7.074	9.680	14.8

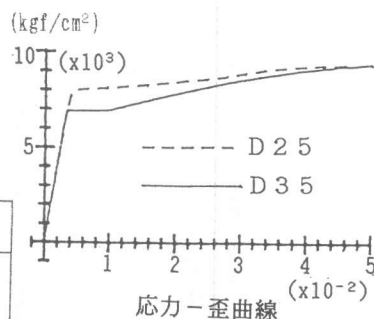
コンクリート (試験日は全て 12/14)

打設日	設計基準強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
9/27	400	2.44×10^5	415	31
9/27	800	3.22×10^5	903	48
10/16	800	3.17×10^5	790	43
10/16	1200	3.53×10^5	1137	56

調合表

打設日	設計基準強度 (kgf/cm ²)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C	S1	S2	G	混和剤*	スランプ° (cm)	Air (%)
9/27	400	53	48	185	349	539	255	936	5.41 (C*1.55%) A	21.2	2.0
9/27	800	31	41	175	565	461	199	970	14.12 (C*2.5%) A	25>	0.8
10/16	800	31	41	175	565	461	199	970	13.0 (C*2.3%) A	23.0	1.9
10/16	1200	20	38	160	680	376	163	902	120 (800*15%) S	25>	1.9

C：セメント S1：海砂 S2：砕砂 G：砂利 (kgf/cm²)
* A：高性能AE減水剤 S：シリカフューム



3. 実験経過及び結果

ひび割れは図4のように以下に示す順で発生した。

- ①梁筋に沿って曲げひび割れが発生し、折曲げ部付近まで伸びた。
- ②曲げひび割れから斜めひび割れが進行した。
- ③柱自由面に曲げひび割れが発生した。
- ④接合部にせん断ひび割れが発生した。
- ⑤フック部を中心に放射状のひび割れが発生した。
- ⑥余長部に斜めひび割れが発生した。
- ⑦せん断補強筋で囲まれたコア内に梁筋が定着

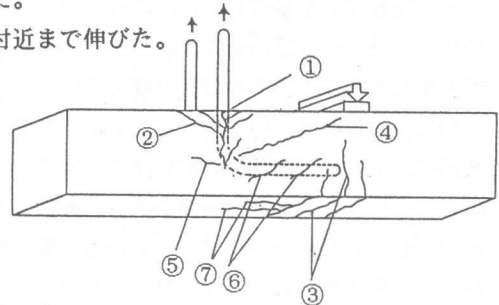


図4 ひび割れ図

- された試験体では余長部に沿ってひび割れが発生した。
- ⑧側面のかぶりが剥離した。

表3 実験結果一覧表

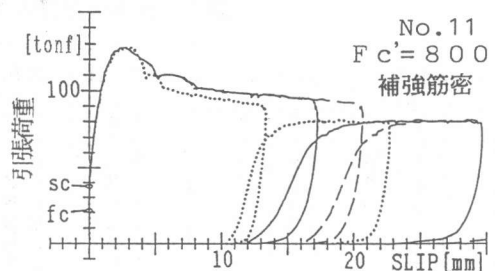
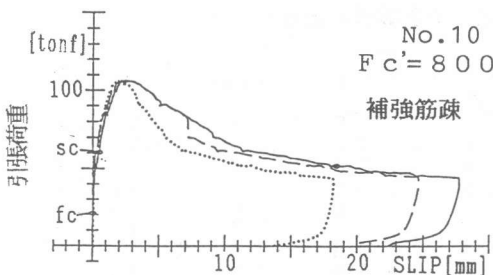
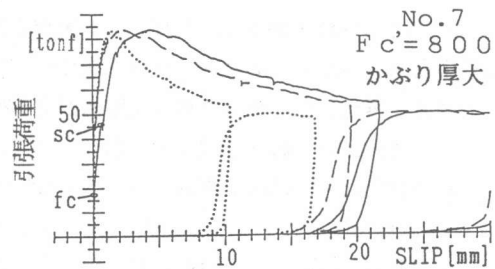
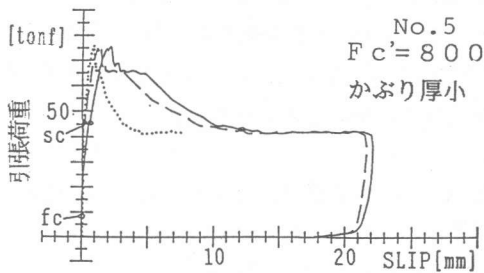
各試験体の最大耐力は、フック部を中心に放射状のひび割れが発生する以前に決定し、No. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11では梁筋の定着破壊により、また、No. 12は接合部のせん断破壊により決定された。なお、No. 8は、梁筋の曲げ起点での破断により実験を終了したため、定着耐力の確認は出来なかった。表3に各試験体の実験結果を示す。No. 7

No	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	曲げひび割れ荷重 (tonf)	接合部せん断ひび割れ荷重 (tonf)	最大荷重 (実驗値) (tonf)	梁筋最大応力 (kgf/cm ²)	破壊モード
1	415	7.6	37.9	41.7	4114	AC
2	790	9.0	44.2	50.0	4934	AC
3	1137	—	51.1	57.8	5704	AC
4	415	15.1	36.2	56.3	5556	AC
5	790	9.7	45.9	75.6	7460	AC
6	1137	14.5	44.9	81.6	8052	AC
7	790	19.0	46.6	83.7	8259	AC
8	903	24.0	74.7	149.2	7799	BR
9	790	25.0	77.7	146.4	7652	AC
10	790	21.7	61.2	106.6	5260	AC
11	790	21.2	39.0	127.7	6301	AC
12	903	20.0	43.0	133.2	6572	SH

No. 3については試験体設置中に曲げひび割れが生じたため曲げひび割れ荷重を確認できず。

*: 圧縮点と梁筋の折曲げ中心部を結ぶ線上付近に生じたひび割れをせん断ひび割れとした。

**: AC 定着破壊 SH せん断破壊 BR 梁筋破断



fc: 曲げひび割れ荷重 sc: せん断ひび割れ荷重
(実線・破線・点線は図3におけるA点・B点・C点のすべり量を示す)

図5 荷重—すべり量関係

8, 9は梁筋が降伏した後に最大耐力に達したが、他は全て梁筋が降伏する前に最大耐力に達した。

せん断補強筋を変数とした場合 (No. 10とNo. 11) と、かぶり厚を変数とした場合 (No. 5とNo. 7) の荷重—すべり量関係を図5に示す。せん断補強筋密及びかぶり厚大の方が、最大耐力後の耐力低下がゆるやかで、やや靱性に富んでいることが確認された。

加力点と折曲げ起点で測定した歪からその直線部分 (のみ込み部) の平均付着応力度 τ を求め、梁筋の作用力 P との関係の例を図6に示す。図中の点線は折曲げ起点に引張力が生じていないと仮定した場合の $P - \tau'$ 関係である。実験値 (実線) が点線からずれ始める点は、折曲げ起点に応力が到達し始める点に対応している。その時の平均付着応力度は、27~73 kgf/cm² で平均44.4 kgf/cm² であった。ただしコンクリート強度との明確な関係はみられなかった。

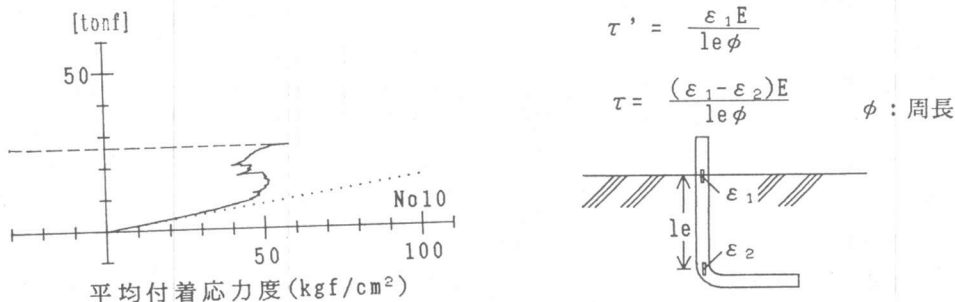


図6 荷重—のみ込み部平均付着応力度関係

4. 既往の算定式の適合性の検証

折曲げ定着耐力の算定式として前述した式 (1) 以外に、以下に示すようなPinc・Watkins・Jirsaの式 (以下 Pinc式と略記) [3]、別所・岡本の式 (以下 別所式と略記) [4]がある。各算定式による計算結果は、表4に示すように各算定式の構成が異なるにも関わらず各式の適合度に大幅な差異は認められなかった。ただし、本実験で行ったNo. 10, 11, 12の試験体は、式 (1) からは直接算出出来ないため、それらの計算方法については後で示す。式 (1) ではのみ込み長さ部分の付着耐力を考慮していないため、実験値が計算値を上回ったものと考えられる。

・別所、岡本の式 $F_R = 5.89 d^2 (0.53 \alpha + 1.17 \beta + \gamma) \cdot f_b \dots (2)$

(d :鉄筋径、 α :のみこみ部/ d 、 β :曲げ半径/ d 、 γ :余長長さ/ d 、 f_b :付着応力度)

・Pinc式 $f_u = 50 \cdot \psi \cdot l_{dh} \cdot \sqrt{f_c} / d_b \text{ (in psi)} \dots (3)$

(ψ :割増し係数、 l_{dh} :投影長さ、 f_c :コンクリート強度、 d_b :鉄筋径)

表4 実験値と算定式による計算値の比較

No	実験値 (tonf)	式1 (tonf)	Pexp/Pcal	別所式 (tonf)	Pexp/Pcal	pinc式 (tonf)	Pexp/Pcal
1	41.7	35.8	1.16	43.8	0.95	46.8	0.89
2	50.0	49.4	1.01	65.6	0.76	64.6	0.77
3	57.8	59.2	0.98	85.8	0.67	77.5	0.75
4	56.3	39.6	1.42	43.8	1.29	46.8	1.20
5	75.6	54.6	1.38	65.6	1.15	64.6	1.17
6	81.6	65.5	1.25	85.8	0.95	77.5	1.05
7	83.7	68.7	1.22	65.6	1.28	64.6	1.30
8	149.2	131.8	1.13	141.4	1.06	130.4	1.14
9	146.4	163.9	0.89	141.4	1.04	130.4	1.12
10	106.6	表5参照	—	—	—	—	—
11	127.7	表5参照	—	—	—	—	—
12	133.2	表5参照	—	—	—	—	—
平均値			1.16		1.02		1.04
標準偏差			0.18		0.21		0.20

5. 二段筋の試算例

二段筋に関しては2種類の仮定を用いて試算する。表5 式(1)による試算結果表 [tonf]

Case1: 定着耐力の低い内側の梁筋の定着破壊により全耐力が決定する場合。

Case2: 各梁筋が定着耐力に達する場合

	No. 10	No. 11
実験値	106.6	127.7
Case 1	95.9	109.1
Case 2	100.1	108.0

表5の計算結果と実験値の比較よりいずれの場合も実験値より下回ることが確認された。なお、No. 12の試験体は接合部がせん断破壊したため定着耐力の確認が出来なかったため試算例から除外した。

6. 最大耐力に影響を及ぼす諸因子

最大耐力に影響を及ぼす諸因子について、本実験結果を用いて式(1)を検討した。

①コンクリート強度と定着耐力 コンクリート強度を変数とした試験体No. 1, 2, 3とNo. 4, 5, 6について定着耐力の比較を図7に示す。定着耐力はかぶり部分の割裂強度に依存しており、式(1)では普通強度コンクリートにおいては圧縮強度の平方根に比例すると評価している。[3]しかし、高強度コンクリートについての本実験結果ではコンクリート強度の増加に伴い、定着耐力が頭打ちとなる傾向が認められた。そのため式(1)では高強度コンクリートを使用した場合には定着耐力が過大評価になる可能性が含まれているため $f_{b, \text{eff}}$ の検討が必要であると思われる。

②横補強筋による拘束効果 本実験値は式(1)による計算値よりも高い値となった。これは、式(1)ではせん断補強筋の強度を考慮していないこともその原因のひとつと考えられる。そこで $f_{b, \text{eff}}$ に考慮されているせん断補強筋の断面積として高強度鉄筋と普通鉄筋の降伏強度比倍した等価断面積を用いて式(1)で試算した。No. 1~9の試験体についてみると、せん断補強筋強度を考慮しない場合は(実験値/計算値)の平均値=1.16、標準偏差=0.18に対して、考慮する場合は平均値=1.06、標準偏差=0.14となり、せん断補強筋に高強度鉄筋を用いる時は降伏強度比を考慮する必要があると思われる。

③かぶり厚さが最大耐力に及ぼす影響 No. 5とNo. 7及びNo. 8とNo. 9は、それぞれかぶり厚のみが異なる試験体である。No. 7の最大耐力はNo. 5より約8ton 大きく、かぶり厚の影響がみられる。しかし、太径のNo. 8とNo. 9はほぼ等しく、かぶりの厚いNo. 9の方が逆にやや小さな最大耐力となっている。しかも、No. 8は破壊モードが梁筋の破断で決まっているため定着耐力はこの値以上と考えられ、かぶり厚による付着耐力の増加はみられなかった。これは、No. 9は他の試験体に比べて梁筋間隔が狭く、最終的に側面のかぶり部分の剥離と同時に梁筋の引張側の面が広い範囲に盛り上がった破壊で他とは多少異なった破壊を示したためと思われる。

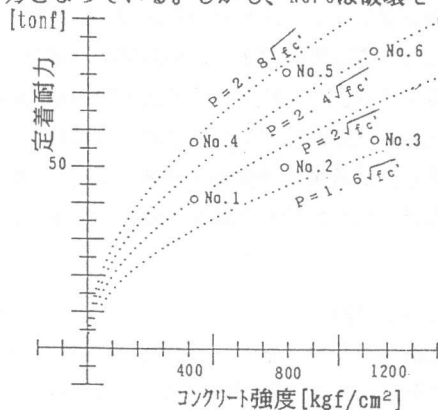


図7 定着耐力ーコンクリート強度関係

7. 鉄筋の移動量とせん断ひび割れの相関関係

曲げ起点と曲げ終点での梁筋の移動開始時の荷重とせん断ひび割れ発生時の荷重との相関関係を図8に示す。ある荷重になると折曲げ起点が移動

し始める。その時、折曲げ終点では引張力の作用方向に固定されており、折曲げ起点に伝達された引張力は大部分が折曲げ部で抵抗するため、コンクリートストラットが圧縮され、応力レベルの増加に伴い斜張力によるひび割れが発生する。そのため、折曲げ起点での梁筋の移動開始時の荷重の方が、せん断ひび割れ発生時の荷重よりも低くなり、また、せん断ひび割れ発生時にコンクリートストラットが変形するため、せん断ひび割れ発生とほぼ同時に梁筋が曲げ終点で引張力の作用方向に移動し始めたものと考えられる。

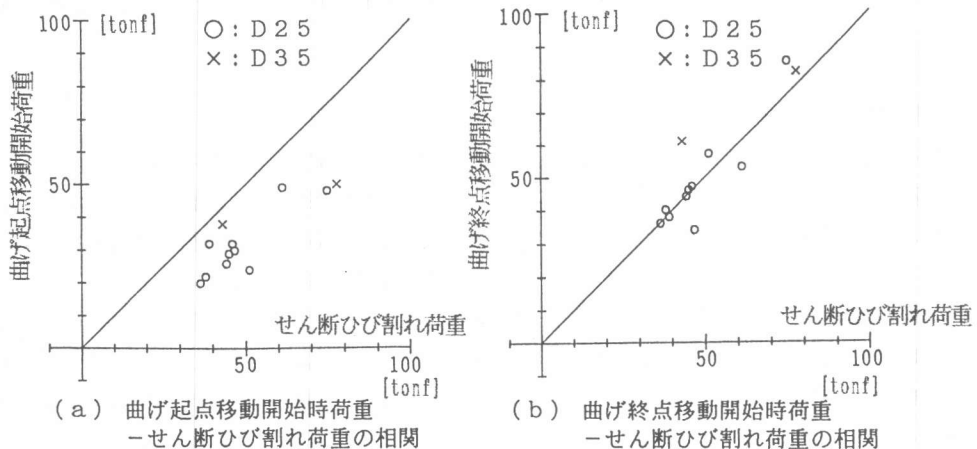


図8 鉄筋移動開始時荷重-せん断ひび割れ荷重の相関関係

8. まとめ

高強度材料からなる外部柱・梁接合部を想定した梁筋の定着実験を行い、以下の知見を得た。

- ① コンクリート強度が定着耐力に及ぼす影響については、本実験結果の範囲では式(1)は若干の過大評価となる。
- ② せん断補強筋に高強度鉄筋を用いた場合、式(1)のせん断補強筋の影響項に降伏強度の影響を考慮する必要がある。
- ③ 高強度コンクリート 800kgf/cm^2 、 1200kgf/cm^2 、接合部の補強筋を D10 @100 ($\sigma_y = 8300\text{kgf/cm}^2$) からなる外柱に、定着投影長さ余長を $12d_b$ 、フックの曲げ内法半径を $3d_b$ 、側面のかぶり厚を 6.5cm とした梁筋 (D25 $\sigma_y = 8240\text{kgf/cm}^2$) の折曲げ定着強度はそれぞれ、 7500kgf/cm^2 、 8050kgf/cm^2 であった。

謝辞 本実験研究は建設省総合プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」の「高強度鉄筋分科会(委員長 京都大学教授 森田司郎博士)」の研究の一部として行われたものである。研究計画の段階から京都大学森田教授、藤井助手、分科会委員の御指導を賜りました。また、コンクリートの配合設計・打設に際し(株)鴻池組内に設置された高強度コンクリート研究会(HSC委員会)の協力、実験実施に際しては近畿大学建築学科卒論生 青木誠一君、高木哲男君、高木靖夫君、日野晴之君の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 近藤、後藤、藤井、森田：建築学会大会梗概集 昭和58年9月 pp. 1821~1824
- [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説 pp. 167~170
- [3] 藤井、後藤、森田、近藤、林：建築学会近畿支部研究報告集 昭和58年6月 pp. 49~52
- [4] 別所、岡本、相沢、福島：建築学会大会梗概集 昭和52年10月 pp. 1793~1798