

## 論文 たれ壁・腰壁付き柱のせん断耐力に関する研究

横濱 茂之\*1

**要旨：**スリットの無い鉄筋コンクリート造たれ壁・腰壁付き柱のせん断耐力を、コンクリート圧壊以前の主筋降伏に伴う滑り破壊や、軸力とせん断補強筋によるトラス機構コンクリート圧縮角度の変化を考慮して、トラス機構とアーチ機構の累加として算定し既往の実験資料と検討を行った。付着破壊した試験体を除けば実験資料の下限を捕らえており設計に適用可能なせん断耐力推定式が得られた。

**キーワード：**腰壁, たれ壁, 柱, せん断耐力, 滑り破壊, トラス機構, アーチ機構

## 1. はじめに

現在, たれ壁・腰壁付き柱のせん断設計は, 剛域を考慮して実験資料を統計処理して得たせん断耐力式を用いて行われることが多い。

武田は, 腰壁・たれ壁付き柱の有効長さを求めせん断耐力実験式を準用する方法を提案している<sup>1)</sup>。しかし, せん断耐力実験式を準用する方法であるため検討の余地を残している。南・若林は, 柱のトラス機構とアーチ機構に加えて, たれ壁・腰壁が取り付けることによるアーチ機構を考慮して終局耐力を理論的に求めている<sup>2)</sup>。しかし, せん断耐力は常に曲げ耐力を上回る事はなく, 曲げ耐力とせん断耐力の比較から破壊モードを決定して進める一般の構造設計には適用出来ない。

一方, 称原・加藤, 南・渡辺・倉本・市ノ瀬らの努力によってトラス機構とアーチ機構を用いて2次元的な力の釣り合いからせん断耐力を求める方法が既に「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」(以下, 指針と称する)に取り入れられている<sup>3), 4)</sup>。

本論は, 指針の延長上でたれ壁・腰壁付き柱の設計に利用出来るせん断耐力式の誘導を試みたものである。なお, 対象となる破壊モードはヒンジを計画しない脆性部材を想定している。

## 2. せん断耐力式の誘導

## 2.1 仮定した抵抗機構

せん断耐力式の誘導に当たって抵抗機構として, 南・若林の柱部のトラス機構 $CQT$ , 柱部のアーチ機構 $CQA$ , たれ壁・腰壁によるアーチ機構 $WQA$ に加えトラス機構 $WQT$ を仮定し, それらの単純累加としてせん断耐力 $Q_{max}$ が求まるものとする(図-1参照)<sup>2)</sup>。なお, 抵抗機構の名称が若林・南理論や指針と同じでも各機構の評価は同一でなく, この点が本論の特徴となる。また, 各抵抗機構は精度検証実験体とは別の実験資料を検討して誘導した。

## 2.2 トラス機構

図-2は, 参考文献5)から12)に示されているせん断破壊した柱・梁の実験資料50体について, 縦軸に材料実験より求まるせん断補強筋の降伏歪み度と加力実験最大耐力時のせん断補強筋の歪み度の比率を取り, 横軸にはせん断補強筋量 $P_w \cdot \sigma_{wy}$ を指針による有効強度係数 $\nu$ とコンクリート強度 $\sigma_B$ の積で除して無次元化して描いたものである。図-2より梁の場合には,  $P_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$ が約0.2以下の場合せん断補強筋は降伏しているが0.2を越えると降伏歪み度には到達していない事がわかる。また, 柱の場合には, ほとんどせん断補強筋は降伏し

\*1 職業能力開発総合大学校東京校 建築施工システム技術科 教授 工修 (正会員)

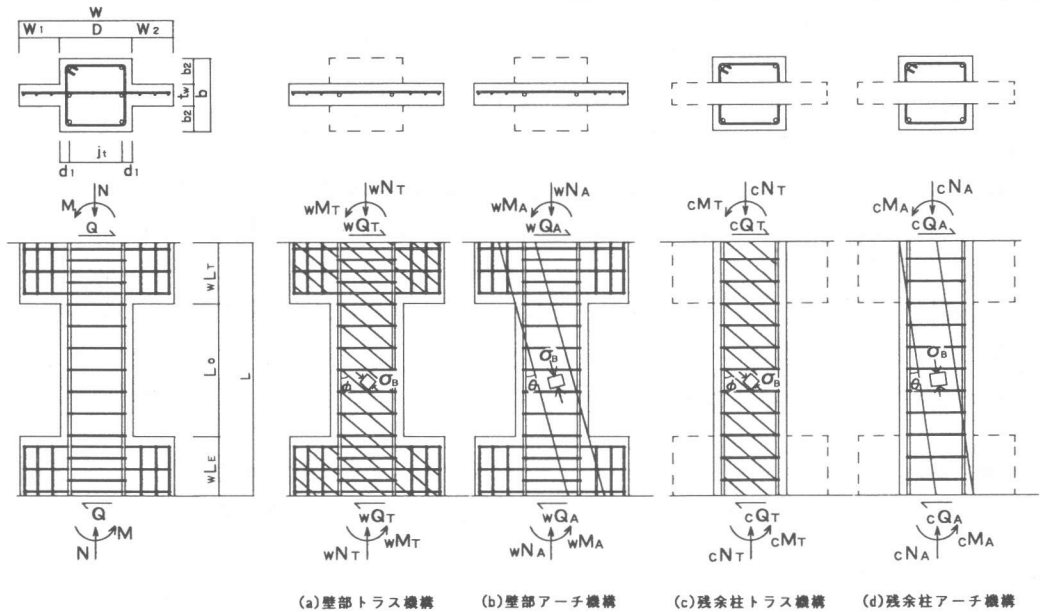


図-1 たれ壁・腰壁付き柱の抵抗機構<sup>2)</sup>

ていない。従って、せん断補強筋の降伏を前提にせん断耐力の評価をするのは実状を反映していない。

図-3は図-2と同一の試験体について、せん断補強筋の歪み度にはアーチ機構は関与しないとして式(1)より見かけの $\cot \phi$ を逆算したものである。梁の場合 $\cot \phi = 1$ となるのは $P_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$ が0.5を越えた付近であり、柱の場合には軸力の影響で $\cot \phi$ は梁より大きな値となることがわかる。従って、 $P_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$ が同一の場合、トラス機構の負担力 $Q_T$ は梁より柱の方が小さくなる。この為、本論では、図-3を参考にして、式(2)より $\cot \phi$ を、式(3)よりせん断補強筋の歪み度 $\epsilon_w$ を求めた後に、式(4)でトラス機構の負担力 $Q_T$ を求めることとした。

$$\cot \phi = \sqrt{\{(\nu \cdot \sigma_B / P_w \cdot E_w \cdot \epsilon_w) - 1\}} \quad (1)$$

$$\cot \phi = 0.6 / (0.1 + P_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B + \eta / 0.3) \quad (2)$$

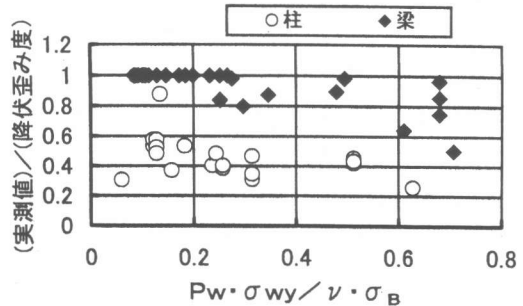


図-2 せん断補強筋の歪み度

$$\epsilon_w = \nu \cdot \sigma_B / P_w \cdot E_w \cdot (1 + \cot^2 \phi) \quad (3)$$

$$Q_T = b \cdot j \cdot t \cdot P_w \cdot E_w \cdot \epsilon_w \cdot \cot \phi \quad (4)$$

ここに、 $P_w$ ：せん断補強筋比、 $\sigma_{wy}$ ：せん断補強筋の降伏点、 $\epsilon_w$ ：せん断補強筋の歪み度(ただし $\epsilon_w \leq \epsilon_{wy}$ 時は $\epsilon_{wy}$ とする)、 $E_w$ ：せん断補強筋のヤング係数、 $\eta$ ：軸圧比( $N/B \cdot D \cdot \sigma_B$ )

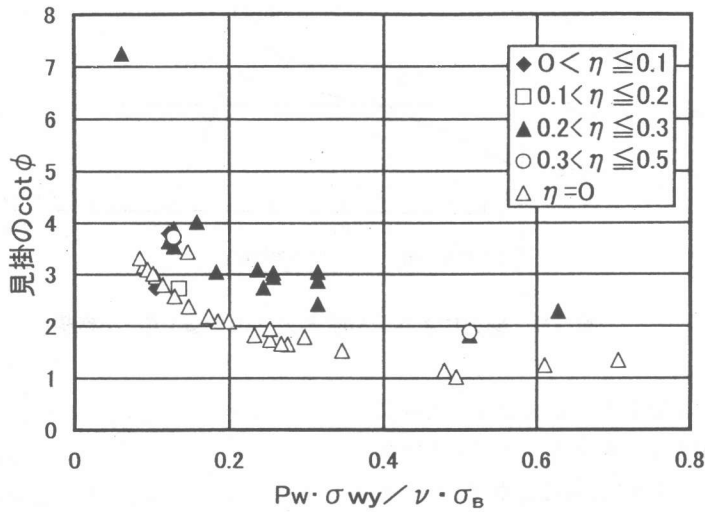
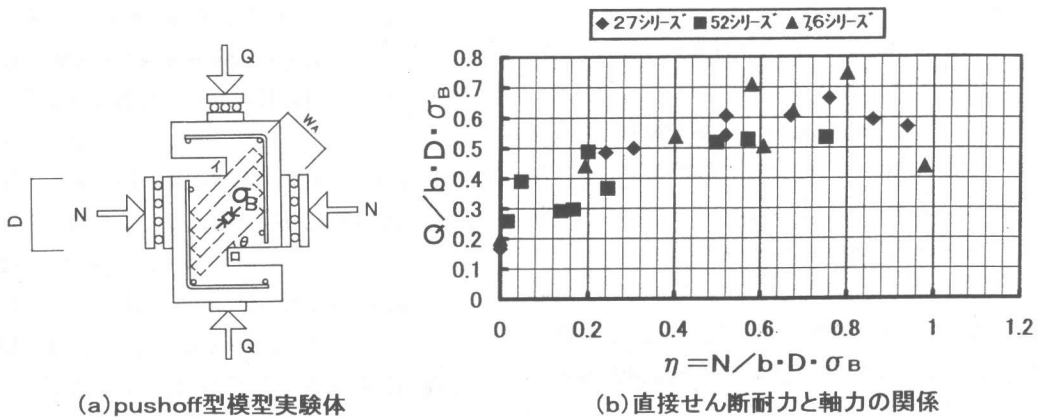


図-3 見掛けのcot φと $P_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$ の関係



(a) pushoff型模型実験体

(b) 直接せん断耐力と軸力の関係

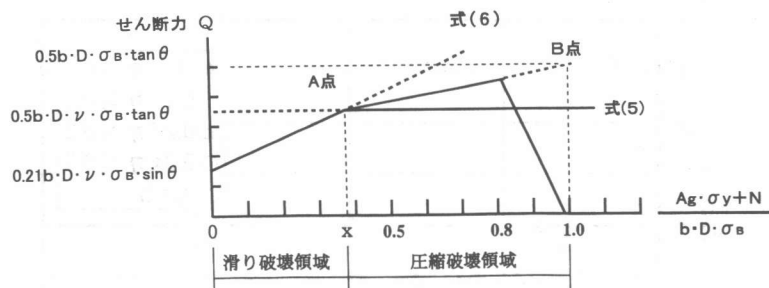
図-4 直接せん断耐力と軸力の関係

### 2.3 アーチ機構

アーチ機構をせん断補強筋が無い部材で考える。梁部材のアーチ機構コンクリート束が圧縮破壊する場合の耐力は式(5)で評価でき、主筋量が少ない場合にはコンクリート束の圧縮破壊以前にせん断面の主筋降伏に伴う滑り破壊が生じ、その時の耐力は式(6)で評価できると仮定する<sup>13)</sup>。

ところで、式(5)で柱部材のアーチ機構耐力を考えている限り軸力による耐力上昇を評価に反映出来ない。そこで図-4(a)に示すせん断面イーロ間が5cm×5cmのpushoff型小型模型

実験体を作成し直接せん断実験を行った。実験変数はコンクリート強度 $\sigma_B$ と軸力 $N$ である。なお、実験体が小型であることを勘案してコンクリートには圧縮強度が7.6N/mm<sup>2</sup>, 27N/mm<sup>2</sup>, 52N/mm<sup>2</sup>のモルタルを用いた。実験結果を図-4(b)に示す。 $\eta$ が0.8程度までは軸力によってせん断耐力が上昇することがわかる。この実験の結果から、大胆ではあるが図-5に示す軸力による耐力上昇を仮定した。そして、A点まではせん断摩擦理論に従って主筋補強量 $A_g \cdot \sigma_y / b \cdot D \cdot \sigma_B$ と軸力 $N / b \cdot D \cdot \sigma_B$ の和がせん断耐力の上昇に寄与するものの、A点を越えると軸力の



図一五 軸力によるせん断耐力への影響(アーチ機構)

みが有効となると仮定した。以上より、A点以降の軸力による耐力上昇を考慮したアーチ機構の耐力は式(7)から式(9)となる。なお、式(8)の $\eta_1$ は、A点に到達する以前に有効となった軸力 $N_1$ を差し引いた軸力から計算した軸圧比である。

$$Q_{A1} = 0.5b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B \cdot \tan \theta \quad (5)$$

$$Q_{A2} = 0.21b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B + 1.06 (A_g \cdot \sigma_y + N) \sin \theta \quad (6)$$

$$N_1 = \nu (0.47 / \cos \theta - 0.2) b \cdot D \cdot \sigma_B \quad (7)$$

$$\eta_1 = (N - N_1) / (b \cdot D \cdot \sigma_B) \quad (8)$$

$$Q_{A3} = (\nu + \eta_1 - \nu \cdot \eta_1) \cdot 0.5b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B \cdot \tan \theta \quad (9)$$

ここに、 $A_g$ ：主筋全断面積、 $\sigma_y$ ：主筋の降伏点、 $\theta$ ：指針案によるアーチ機構の角度

## 2.4 せん断耐力式

前節までの抵抗機構が、たれ壁・腰壁と同一厚さ $t_w$ の壁部及び残余の柱部分において成立すると仮定してせん断耐力を求めるわけであるが、壁部のトラス機構は柱部に中子筋がある場合に限定して考慮した。また、求まるせん断耐力を最大にするために壁部分から計算をする必要がある。

[壁部分せん断耐力 $wQ_{max}$ の計算式]

$$\cot \phi = 0.6 / (0.1 + wP_w \cdot w\sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B) + \eta / 0.3 \quad (10)$$

$$w\epsilon_w = \nu \cdot \sigma_B / wP_w \cdot wE_w \cdot (1 + \cot^2 \phi) \quad (11)$$

$$wQ_T = t_w \cdot j_t \cdot wP_w \cdot wE_w \cdot w\epsilon_w \cdot \cot \phi \quad (12)$$

$$w\beta = (1 + \cot^2 \phi) wP_w \cdot wE_w \cdot w\epsilon_w \quad (13)$$

$$\tan \theta = \sqrt{\{(L_0 / D)^2 + 1\}} - L_0 / D \quad (14)$$

$$wQ_{A2} = 0.21 t_w \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B + 1.06 \cdot (wA_g \cdot w\sigma_y + wN) \sin \theta \quad (15)$$

$$wN_1 = \nu (0.47 / \cos \theta - 0.2) t_w \cdot D \cdot \sigma_B \quad (16)$$

$$w\eta_1 = (wN - wN_1) / (t_w \cdot D \cdot \sigma_B) \quad (17)$$

$$wQ_{A3} = (\nu + w\eta_1 - \nu \cdot w\eta_1) \cdot 0.5 t_w \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B \cdot \tan \theta \quad (18)$$

$$wQ_A = \min(wQ_{A2}, wQ_{A3}) \quad (19)$$

$$wQ_{max} = wQ_T + wQ_A (1 - w\beta) \quad (20)$$

[残余柱部分せん断耐力 $cQ_{max}$ の計算式]

$$\cot \phi = 0.6 / (0.1 + cP_w \cdot c\sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B) + \eta / 0.3 \quad (21)$$

$$c\epsilon_w = \nu \cdot \sigma_B / cP_w \cdot cE_w \cdot (1 + \cot^2 \phi) \quad (22)$$

$$cQ_T = (b - t_w) j_t \cdot cP_w \cdot cE_w \cdot c\epsilon_w \cdot \cot \phi \quad (23)$$

$$c\beta = (1 + \cot^2 \phi) cP_w \cdot cE_w \cdot c\epsilon_w \quad (24)$$

$$\tan \theta = \sqrt{\{(L / D)^2 + 1\}} - L / D \quad (25)$$

$$cQ_{A2} = 0.21 (b - t_w) \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B + 1.06 (cA_g \cdot c\sigma_y + cN) \sin \theta \quad (26)$$

$$cN_1 = \nu (0.47 / \cos \theta - 0.2) (b - t_w) \cdot D \cdot \sigma_B \quad (27)$$

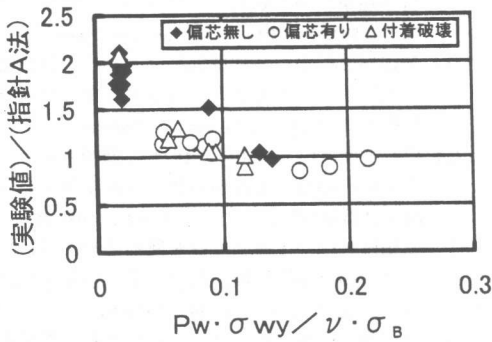


図-6 指針A法の適合性

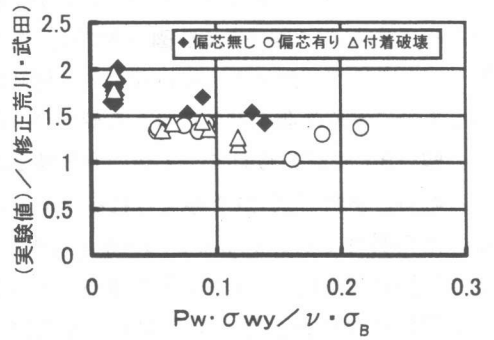


図-7 修正荒川式・武田式の適合性

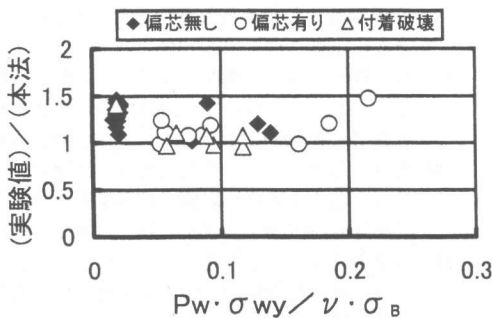


図-8 本法の適合性

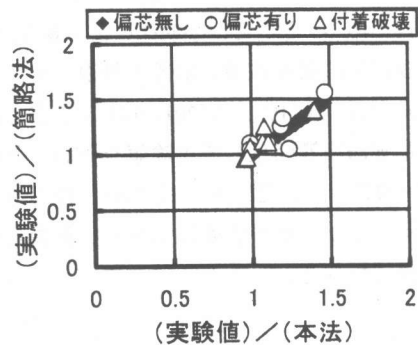


図-9 簡略法の適合性

$$c\eta_1 = (cN - cN_1)(b - t_w) \cdot D \cdot \sigma_B \quad (28)$$

$$cQA_3 = (\nu + c\eta_1 - \nu \cdot c\eta_1) \cdot 0.5 \cdot (b - t_w) \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B \cdot \tan \theta \quad (29)$$

$$cQA = \min(cQA_2, cQA_3) \quad (30)$$

$$cQ_{max} = cQ_T + cQA(1 - c\beta) \quad (31)$$

たれ壁・腰壁付き柱のせん断耐力は上記各式の累加として式(32)より求まる。

$$Q_{max} = wQ_{max} + cQ_{max} \quad (32)$$

なお、式(10)から式(32)で左下付きの $w$ は壁を $c$ は柱を表し式(2)から式(9)を準用した事を示している。

### 3. せん断耐力式の精度検証

せん断耐力式の精度検証は、袖壁のない腰壁・たれ壁付き柱の実験資料の内、せん断破壊が報告されている参考文献 1)及び 14),15),16)

,17)の実験資料 30 体と、参考のために付着破壊が報告されている参考文献 2),15),16),18)の実験資料 8 体を用いて行った。

図-6は、図-1の抵抗機構に指針A法を適用した時のものである。 $P_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$ の小さな領域で実験値と隔たりが認められる。

図-7は、建築物柱の構造設計で良く用いられている修正荒川式に武田が提案した強度増大率 $\alpha = 1 + \{1.73(h_t + h_k)/L\}$ を組み込んだ式(33)を適用した時のものである。危険側の評価をすることは無いが傾向は指針A法と同じである。

$$Q_{max} = \left[ \{0.053Pt^{0.23}(\sigma_B + 180)\} / \left\{ \left( \frac{L}{\alpha} \right) / d + 0.12 \right\} + 2.7\sqrt{(P_w \cdot \sigma_{wy})} \right] b \cdot j + 0.1\sigma_0 \cdot b \cdot j \quad (33)$$

図-8は、本論の方法を適用したものである。 $P_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B$ の全範囲において下限をと

らえており、かつ、ばらつきも少ないのが特徴である。さらに、図-6及び図-7では、たれ壁・腰壁の偏芯の無い場合には安全側、偏芯の有る場合には危険側の評価を与える傾向があるが、図-8では認められず、本法の有効性が認められる。また、式(2)で与えられる  $\cot \phi$  の値は梁の場合でも  $P_w \cdot \sigma_{wy} / \nu \cdot \sigma_B < 0.2$  となれば指針の上限値  $\cot \phi \leq 2$  を超過してしまうが実験値との適合性を見る限り不都合はなく、むしろ、せん断補強筋の少ない領域を正しく評価出来ている。

構造設計への適用を考えた場合、一連の式はやや複雑である。そこで、壁部のトラス機構と、壁部及び柱部の滑り破壊の影響を無視して、式(10)～式(13)、式(19)、式(20)、式(26)、式(30)を削除し本法を簡略化して実験値を評価した結果を図-9に示す。図-8に比べると若干適合性は悪くなるが、その影響は小さく実務設計へも十分適用できる。

#### 4. 結論

柱部のトラス機構・アーチ機構、たれ壁・腰壁によるアーチ機構に加えトラス機構を仮定し、せん断補強筋の歪み度と軸力の影響を考慮することで、たれ壁・腰壁付き柱のせん断耐力推定式が得られた。推定式は、せん断補強筋の歪み度を計算してせん断耐力を求める方法であるため、終局時のおよその部材の状態を把握しやすい特徴を有する。

#### 参考文献

- 1) 武田寛：鉄筋コンクリート造雑壁付柱の耐力及び変形状に関する実験的研究(その2. 梁の剛性の影響)、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp. 457-458, 1985.10
- 2) 南宏一, 若林実：X形配筋を施したRC構造の弾塑性性状に関する基礎的研究(その13)、日本建築学会学術講演梗概集(構造系), pp. 1735-1736, 1984.10
- 3) 加藤勉, 称原良一：鉄骨鉄筋コンクリート部材の耐力、日本建築学会論文報告集, 第266号, pp. 19-29, 1978.4

- 4) 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・同解説, pp. 104-115, 1990
- 5) 渡辺朋之ほか：高強度鉄筋コンクリート造建物の耐震性に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp421-422, 1989.10
- 6) 白石 環ほか：1300 ㎜級のせん断補強筋を用いたRC柱のせん断破壊性状、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp693-694, 1989.10
- 7) 新田隆雄ほか：高強度せん断補強筋を用いたRCはりのせん断実験、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp713-714, 1989.10
- 8) 新田隆雄・高木仁之ほか：RC梁の付着割裂破壊に及ぼすせん断スパン比の影響、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp309-312, 1990.10
- 9) 柴田正隆ほか：1300 ㎜級の高強度補強筋による角スパンとフック付副帯筋を併用したRC柱のせん断破壊性状、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp827-828, 1990.10
- 10) 楊 辞冬ほか：高強度マルチフープを用いた鉄筋コンクリート柱のせん断破壊性状、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp131-132, 1993.9
- 11) 細矢 博ほか：RC部材の耐力と破壊モードに及ぼすひずみ速度の影響：日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp753-754, 1993.9
- 12) 後藤和己ほか：2方向入力を受ける鉄筋コンクリート柱の耐震性能に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp427-428, 1994.9
- 13) 横濱茂之, 竹添芳孝：シアスパン比の短いRC造柱・梁部材のせん断耐力、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp. 633-634, 1992.8
- 14) 武田寛：鉄筋コンクリート造腰壁・垂壁付きラーメンの耐力及び変形状に関する実験的研究(その3. 帯筋量が少ない場合及び純ラーメンの  $h_0/D$  が異なる場合)、日本建築学会北海道支部研究報告集, NO. 54, pp. 56-59, 1981.3
- 15) 武田寛：鉄筋コンクリート造腰壁・垂壁付きラーメンの耐力及び変形状に関する実験的研究(その4. 柱主筋量が多い場合)、日本建築学会北海道支部研究報告集, NO. 55, pp. 27-30, 1982.3
- 16) 武田寛：鉄筋コンクリート造腰壁・垂壁付きラーメンの耐力及び変形状に関する実験的研究(その6. 壁が偏心する場合及び壁厚が変化する場合)、日本建築学会学術講演梗概集(構造系), pp. 1939-1940, 1983.9
- 17) 武田寛：鉄筋コンクリート造雑壁付柱の耐力及び変形状に関する実験的研究、日本建築学会学術講演梗概集(構造系), pp. 1753-1754, 1984.10
- 18) 鍵和田和明ほか：たれ壁・腰壁が偏芯したX形配筋柱の弾塑性挙動(その1)、日本建築学会学術講演梗概集(構造Ⅱ), pp. 549-550, 1987.10