

高強度コンクリートを用いた RC 部材の力学特性に関するアメリカでの研究

文献調査委員会

担当：北山和宏*

1. はじめに

鉄筋コンクリート建物の高層化あるいは軽量化を容易にするためには、靱性に期待した終局強度型設計法の採用とともに、高強度コンクリートや高強度鉄筋の使用が必要である。高強度材料を使用した構造物の地震時挙動を知るために、現在日本においては高強度材料を用いた部材の力学的挙動についての研究が活発に行われており、外国における同種の研究についての関心も高まっている。これらの実験研究は、横補強筋によって拘束された高強度コンクリートの多軸応力状態での挙動や付着試験といった部材の一部を取り出して検討するものと、柱やはりあるいは柱・はり接合部などの部材全体の挙動を検討するものの2つに分けられる。このうち、前者に含まれる柱の中心圧縮試験に関する研究は、すでに一部紹介されているので¹⁾、ここでは、後者の地震力を受ける部材を対象とした研究について、アメリカにおける最近の論文を紹介する。なお、ここで紹介する実験研究においては、すべて普通強度（主に Grade 60 クラス）の鉄筋が使用されている。

2. 最近の研究事例

2.1 セン断強度に関する研究

Elzanaty, Nilson and Slate²⁾ は、せん断補強筋のないはり部材について、コンクリート圧縮強度 (210~805 kgf/cm²)、せん断スパン比 (2~6) および引張鉄筋比 (0.6~3.3%) を実験変数として、ACI Code 318-83³⁾ のせん断強度式の高強度コンクリート部材に対する適用の是非を検討した。実験結果は ACI Code 式による予測値よりも 10~30% 小さくなった。その一例を図-1、2 に示す。ACI Code の式 (11-6, 本文式 (1)) による計

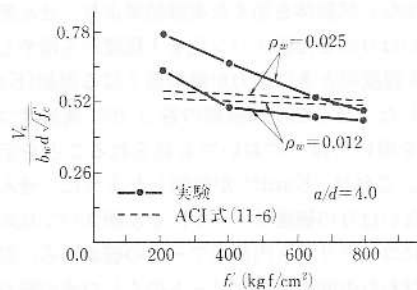


図-1 セン断強度に対するコンクリート強度の影響²⁾

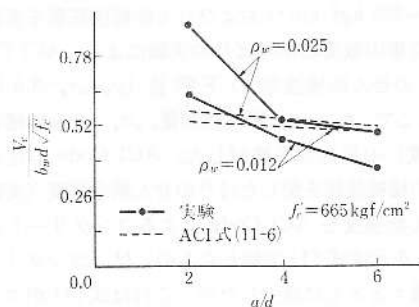


図-2 セン断強度に対するせん断スパン比の影響²⁾

算値は、コンクリート強度あるいはせん断スパン比の増大とともに実験値を過大に評価した。この理由の一つとして、高強度コンクリートでは骨材の破碎によりひびわれ面が平滑になることを挙げた。すなわち、骨材のかみ合いによるせん断抵抗を期待できなくなり、斜めせん断ひびわれ発生後は圧縮コンクリートの圧壊あるいは主筋のだぼ作用によるコンクリートの割裂によって最大耐力に達することを指摘した。また、せん断補強筋を有するはりでは、コンクリート圧縮強度の増大にともない、計算値に対する実験値の比が増加したことから、ACI Code の規定はせん断補強されたはりに対しては安全であるとされた。

*きたやま・かずひろ/千葉大学助手 工学部 建築学科 (正会員)

$$V_c = \left(0.5 \sqrt{f'_c} + 175 \rho_w \frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) b_w \cdot d \quad (1)$$

ここで、 V_c : コンクリートの負担するせん断強度、 f'_c : コンクリート圧縮強度 (単位: kgf/cm²)、 ρ_w : $A_s / b_w \cdot d$ 、 A_s : 引張主筋断面積、 b_w : はり幅、 d : 断面圧縮縁から引張主筋の断面中心までの距離、 V_u : せん断力、 M_u : モーメント、である。ただし、右辺の () で計算されるせん断応力度の単位は kgf/cm² である。

Ahmad, Khaloo and Poveda¹⁾ も同様の研究を行い、コンクリート圧縮強度が 700 kgf/cm² 程度のせん断補強筋のないはり部材に 2 点集中載荷する実験より、Elzanaty らとほぼ同じ結論を導いた。

Ahmad and Lue²⁾ は、文献 4) の試験体とさらに主筋量の少ない試験体を加えた実験結果より、せん断補強筋のないはりのせん断スパン比を 1 程度から増やしていくと 2.5 程度のときに耐力が最も低くなる現象 (Kani³⁾ が提示した「せん断圧縮破壊の谷」が、高強度コンクリートを用いたはりにおいても見られることを示した (図-3)。これは、Kani³⁾ が説明したように、せん断補強筋のないはりの破壊モードが、せん断スパン比の増加とともにコンクリート内部のアーチの破壊から、斜めせん断ひびわれの間のコンクリートのくしの歯が折れることによる破壊に変化するためである。

Johnson and Ramirez⁷⁾ は、コンクリート圧縮強度 (350~735 kgf/cm²) およびせん断補強筋量を変数とした 2 点集中載荷の単純ばりの実験により、ACI Code 318-83 のせん断補強筋の下限値 ($\rho_w \cdot \sigma_w = 3.5$ kgf/cm²)、ここで、 ρ_w : せん断補強筋量、 σ_w : せん断補強筋降伏強度) の妥当性を検討した。ACI Code の定める最小量の横補強筋を配したはりのせん断余裕度 (実験によるせん断強度を ACI Code によるコンクリートの負担分 V_c を示す式 (1) で除したものは、コンクリート強度の増大とともに減少したが、これは式 (1) がコンクリートのせん断力負担分を過大に評価したことが原因なので、コンクリート強度の上限を定める必要があること

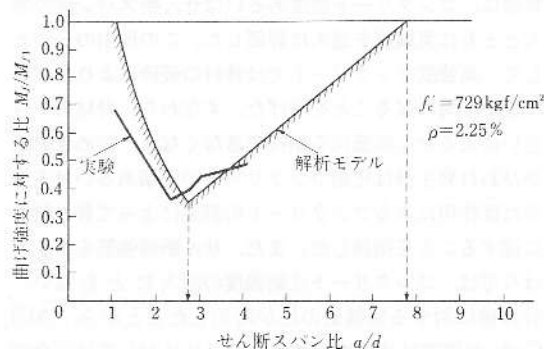


図 3 Kani の解析モデルと実験との比較³⁾

を示した。また、せん断余裕度の低下を防ぐもう一つの方法として、コンクリート強度の増大にともない最小せん断補強筋量を増やす (すなわちせん断補強筋によるせん断力負担割合を増やす) ことが考えられるとした。

Ehsani, Moussa and Vallenilla⁸⁾ は、コンクリート圧縮強度が 670 kgf/cm² 程度の外柱・はり接合部のせん断耐力を実験により調べ、高強度コンクリートを使用する場合には、ACI-ASCE 352 委員会の勧告⁹⁾ を修正する必要があることを指摘し、普通強度コンクリートを用いた場合の隅接合部入力せん断応力度の上限値 $3.2 \sqrt{f'_c}$ (f'_c : コンクリート圧縮強度、単位: kgf/cm²) は、高強度コンクリートを用いた場合には危険側であるので、上限値を $2.8 \sqrt{f'_c}$ とすることを提案した。

2.2 エネルギー吸収能に関する研究

Hanks, McCabe and Darwin¹⁰⁾ は、792~900 kgf/cm² のコンクリート圧縮強度を有する片持ちばりに繰り返し載荷する実験を行い、はり部材の形状、配筋、加力履歴が同じである場合、コンクリート強度を高めることによりエネルギー吸収量は増大したことを示した。高強度コンクリートを用いることによるエネルギー吸収量の増大は主筋量が多い場合に顕著であったことを示した。なお本研究では、エネルギー吸収量を表す指標として以下に定義する D_i を用い、この指標とコンクリート強度 f'_c および作用せん断応力度の最大値 v_m (単位はともに kgf/cm²) との関係が図-4 のように右上がりの直線 (すなわち、コンクリート強度の増加あるいは作用せん断力の減少によりエネルギー吸収量は増大すること) で表せることを示した。

$$D_i = \frac{E}{0.5 P_u \Delta_u [1 + (A'_s/A_s)^2]} \quad (2)$$

ここで、 E : 最大強度が降伏強度の 3/4 以上であるサイクルの吸収エネルギー量の総和、 P_u および Δ_u : はり上端引張り時の降伏強度および降伏変形、 A'_s : はり下端筋断面積、 A_s : はり上端筋断面積。ただし、指標 D_i は塑性率が 3.9~6 の部材に対して適用する。

Ehsani and Alameddine¹¹⁾ は、外柱・はり接合部のせん断耐力について文献 8) と同様の結果を示したほか、単位架構のエネルギー吸収量、接合部に入力される

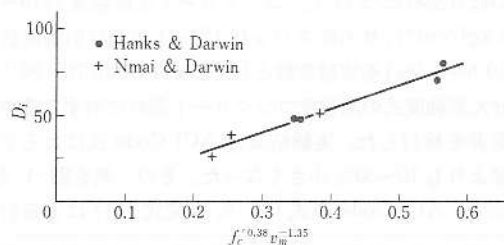


図 4 エネルギー吸収能指標 $D_i - (f'_c)^{0.25} (v_m)^{-1.25}$ 関係⁸⁾

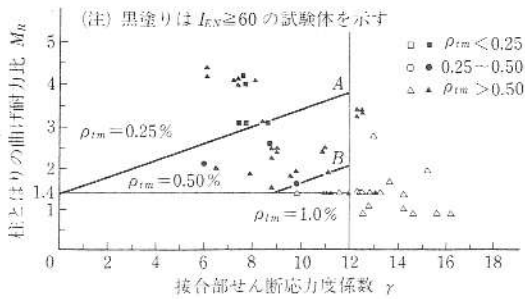


図-5 接合部横補強筋量を定めるための設計チャート¹¹⁾

せん断応力度のレベルおよび柱とはりの曲げ耐力比を考慮して、接合部に必要な拘束筋量を定める図-5を作成した。同図より修正横補強筋比 ρ_{tm} を求め、以下により横補強筋比 ρ_t を算定する。なお修正横補強筋比 ρ_{tm} は実験で用いられた横補強筋比に式(3)の分母を乗じて計算したもので、接合部横補強筋の降伏強度および柱断面積の影響を考慮して実験結果を評価するために導入された。

$$\rho_t = \frac{f_m \cdot \rho_{tm}}{(A_{ch}/A_g) \cdot \sqrt{\sigma_{gh}/2800}} \quad (3)$$

ここで、 f_m : コンクリート強度の影響を表す係数で、 f'_c が 420 kgf/cm² 未満のとき 1.0, 420 kgf/cm² 以上のとき $\sqrt{f'_c}/420$ とする、 A_{ch} : 矩形フープによって囲まれるコアの断面積、 A_g : 柱の全断面積、 σ_{gh} : 接合部横補強筋の降伏強度 (単位: kgf/cm²)、である。また、 I_{EN} は、式(4)によって定義されるエネルギー吸収能を表す指標で、実験結果より指標 I_{EN} が 60 以上であることを良好な耐震性能を得るための基準とした。これは、降伏後のエネルギー吸収能によって、接合部の性能を評価しようとしたものである。

$$I_{EN} = \frac{1}{P_y \delta_y} \cdot \sum_{i=1}^m E_i \frac{K_i}{K_y} \left(\frac{\delta_i}{\delta_y} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 E_i : i 番目サイクルでのエネルギー吸収量、 δ_y 、 K_y 、 P_y : 降伏変形とそれに対応する剛性および荷重、 δ_i 、 K_i : i 番目サイクルの最大変位とそれに対応する剛性、 m : 最大荷重が降伏荷重 P_y の 3/4 以上となるサイクルの数である。

3. まとめ

以上の研究では、ACI Code におけるせん断強度式の高強度コンクリートへの適用拡張の可能性を検討したものが多。なお、1989年に改訂された ACI 318-89¹²⁾ では、せん断強度式の変更はなかったが、コンクリート圧縮強度の上限を 700 kgf/cm² と定めている。高強度コンクリートを用いた部材のエネルギー吸収性能や靱性能も検討され始めており、高強度コンクリート自体は最

大圧縮強度後に脆性的な挙動を示すが、適切な配筋詳細によって、部材としては靱性ある挙動を確保することができると考えられる。ただし、これらの実験研究では、いずれも高強度コンクリートに普通強度鉄筋を組み合わせしており、高強度鉄筋を用いた実験例はない。また、軸力を加えた柱部材の逆対称曲げせん断加力実験や内柱・はり接合部試験体の実験も見当たらない。この点に関しては、日本において現在、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」¹³⁾ で高強度材料を用いた部材および建物の研究・開発が行われており、高強度コンクリートおよび高強度鉄筋を使用した RC 建物の実用化に向けて研究が進められている。

<参考文献>

- 1) 門河直実 : 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱部材に関する最近の研究, コンクリート工学, Vol. 27, No. 12, pp. 48~51, 1989.12
- 2) A.H. Elzanaty, A.H. Nilson, F.O. Slate : Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete, ACI Journal, pp. 290~296, March-April 1986
- 3) American Concrete Institute : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83), revised in 1983
- 4) S.H. Ahmad, A.R. Khaloo, A. Poveda : Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams, ACI Journal, pp. 297~305, March-April 1986
- 5) S.H. Ahmad, D.M. Luc : Flexure-Shear Interaction of Reinforced High-Strength Concrete Beams, ACI Structural Journal, pp. 330~341, July-Aug. 1987
- 6) G.N.J. Kani : The Riddle of Shear Failure and Its Solution, ACI Journal, Proceedings, Vol. 61, No. 4, pp. 441~467, April 1964
- 7) M.K. Johnson, J.A. Ramirez : Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete, ACI Structural Journal, pp. 376~382, July-Aug. 1989
- 8) M.R. Ehsani, A.E. Moussa, C.R. Vallenilla : Comparison of Inelastic Behavior of Reinforced Ordinary- and High-Strength Concrete Frames, ACI Structural Journal, pp. 161~169, March-April 1987
- 9) ACI-ASCE Committee 352 : Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures, ACI Journal, Vol. 82, No. 3, pp. 266~283, 1985
- 10) D.L. Hanks, S.L. McCabe, D. Darwin : Cyclic Behavior of High Strength Concrete Beams, Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, Vol. 2, pp. 697~706, May 20-24, 1990
- 11) M.R. Ehsani, F. Alameddine : Design Recommendations for Type 2 High-Strength Reinforced Concrete Connections, ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 3, pp. 277~291, May-June 1991

- 12) American Concrete Institute : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89), revised in 1989
- 13) 同上開発技術研究センター：平成元年度 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 (New RC) 研究開発概要報告書, 1990.3



図 10 鉄筋率とコンクリート強度の関係 (普通コンクリートと超軽量コンクリート)

この図は、鉄筋率とコンクリート強度の関係を示している。普通コンクリートと超軽量コンクリートの両方とも、鉄筋率が増加するとコンクリート強度は低下する傾向がある。超軽量コンクリートの強度は、普通コンクリートよりも低く、鉄筋率が増加するにつれてその差はさらに大きくなる。

$$f_c = \frac{1}{1 + \frac{1}{10} \left(\frac{f_y}{f_{yk}} - 1 \right)^2} \left(1 - \frac{1}{10} \left(\frac{f_y}{f_{yk}} - 1 \right)^2 \right) f_{ck}$$

ここで、 f_c は鉄筋率を考慮したコンクリート強度、 f_{ck} はコンクリートの軸圧縮強度、 f_y は鉄筋の引張強度、 f_{yk} は鉄筋の降伏強度を示す。この式は、鉄筋率が増加するにつれてコンクリートの強度が低下することを定量的に表している。

$$\left(\frac{f_c}{f_{ck}} \right) = \frac{1}{1 + \frac{1}{10} \left(\frac{f_y}{f_{yk}} - 1 \right)^2} \left(1 - \frac{1}{10} \left(\frac{f_y}{f_{yk}} - 1 \right)^2 \right)$$

この式を整理すると、鉄筋率とコンクリート強度の関係をより明確に示すことができる。鉄筋率が増加するにつれて、コンクリートの強度は徐々に低下していく。

この図と式から、超軽量コンクリートを用いた建築物では、鉄筋率を適切に調整することが重要である。鉄筋率が高すぎると、コンクリートの強度が過度に低下し、建築物の安全性に影響を与える可能性がある。