

委員会報告 高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会報告

菅野 俊介^{*1}・藤田 学^{*2}・勅使川原 正臣^{*3}・須田 久美子^{*4}・木村 秀樹^{*5}

要旨：近年，建築構造物，土木構造物共に，現行基準が定める範囲を超える「高強度コンクリート」を用いるようになってきた。本稿は，①高強度コンクリートのニーズ，研究，実例を調査して技術の現状と課題を明らかにする，②今後の発展・普及を図るために必要な資料を整備すること，を目的とした本委員会の調査研究の結果を「構造性能」と「構造設計」の観点から紹介する。
キーワード：高強度コンクリート，構造性能，構造設計，建築構造物，土木構造物

1. はじめに

高層化，長スパン化，軽量化，断面縮小などのために，現行基準等で定められた範囲（建築 60N/mm²，土木 80N/mm²）を超える「高強度コンクリート」が用いられるようになってきた。本委員会では，この状況に鑑みて①高強度コンクリートのニーズ，研究および実例について調査して技術の現状と課題を明らかにする，②高強度コンクリートを用いた構造の発展・普及を図るために必要な技術資料を整備する，ことを目的として調査研究を進めてきた。本稿では，「構造性能」および「構造設計」の観点から，

調査結果の概要を紹介する。なお，2006年7月20日に東京工業大学において，本委員会の活動成果を広く会員諸兄に報告する予定である。

2. 高強度コンクリート構造物の構造性能

2.1 概要

高強度コンクリートは，土木分野では主として橋桁に用いられ，他に地下タンクなどに用いられている。一方，建築分野では，超高層共同住宅の下層階の柱に主として用いられる他に連層耐震壁にも用いられている。以上のほかに，両分野で共通の既製杭にも用いられている。

現在のところ土木学会では，80N/mm²までのコンクリートに対して示方書を用意しており，その中には高強度コンクリートの特性である自己収縮の影響を含めて部材性能の評価が可能となっている。一方，建築分野では，設計規準強度 (F_c) が F_c=60N/mm²までのコンクリートに対して設計・施工規準が用意されている。

本章では，高強度コンクリート，鉄筋の材料特性と高強度コンクリート部材の構造性能について，これまでの研究成果に基づきまとめた。

2.2 高強度コンクリートと鉄筋の材料特性

2.2.1 強度特性

(1) 圧縮強度

表一2.1 委員構成

| | |
|-------------|--|
| 委員長 | 菅野俊介(広島大学大学院) |
| 副委員長 | 井上範夫(東北大学大学院) |
| | 鈴木基行(東北大学大学院) |
| 幹事 | 藤田 学(三井住友建設)，勅使川原正臣(名古屋大学大学院)，須田久美子(鹿島建設)，木村秀樹(竹中工務店)，寺岡 勝(フジタ) |
| 委員 | 稲井栄一(山口大学工学部)，熊谷仁志(清水建設)，津田和郎(大林組)，西山峰広(京都大学大学院)，丸田 誠(鹿島建設)，福山 洋(建築研究所)，村上秀夫(鴻池組)，秋山充良(東北大学大学院)，渡邊学歩(東京工業大学大学院)，渡辺博志(土木研究所)，谷村幸裕(鉄道総合技術研究所)，原 夏生(前田建設工業)，玉木一清(三井住友建設)，和泉信之(戸田建設)，小室 務(大成建設)，石川裕次(竹中工務店)，渡辺一弘(都市再生機構)，一宮利通(鹿島建設技術研究所)，猪爪一良(オリエンタルコンサルタンツ)，大城壮司(日本道路公団技術部)，岡田稔規(八千代エンジニアリング)，下村 匠(長岡技術科学大学)，大山博明(ピーエス三菱) |
| 事務局 | 林 季穂 (2006年3月) |

*1 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 工博 (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 土木研究開発部 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 工博 (正会員)

*4 鹿島建設(株) 土木設計本部 プロジェクト設計部 博(工) (正会員)

*5 (株)竹中工務店 技術研究所 建設技術開発部 工博 (正会員)

a) **水セメント比と圧縮強度**： 特殊な混和材を用いないコンクリートは、高性能減水剤を用いて水セメント比を 40%以下（セメント水比 2.5 以上）にすることができ、材齢 28 日で 80N/mm^2 以上の圧縮強度が得られる。圧縮強度はセメント水比にほぼ比例して増加するが[1][2]水セメント比（水結合材比）25%以下になると圧縮強度は増加せず約 120N/mm^2 で横ばいの傾向を示す[3]。

b) **材齢と圧縮強度**： 圧縮強度は材齢とともに増加するが、増加割合は養生方法によって異なる[2]。また、水セメント比が小さく強度が高いほど早期材齢における強度発現が大きい[4]。一方、高強度コンクリートはセメント量が多いため温度ひび割れの発生、長期強度の伸びが小さい点が指摘されており、これに対して低熱ポルトランドセメントの適用が検討されている。低熱セメントを用いた場合の圧縮強度は、普通ポルトランドセメントに比べて、初期強度は低い材齢 28 日以降の強度の伸びは大きく、材齢 91 日では普通ポルトランドセメントよりも高くなる傾向を示している[5]。

c) **各種混和材と圧縮強度**： シリカフェーム、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末などの各種混和材を用いた高強度コンクリートの性状に関する研究が行われ、置換率と圧縮強度の関係等について検討されている[6]。

(2) **割裂強度、曲げ強度**： 割裂引張強度および曲げ強度は圧縮強度の増加に伴い増大するが、高強度領域では増加割合が低下する[7]。

(3) **疲労特性**： 圧縮強度の増加に伴って圧縮疲労強度の静的強度に対する比率が低下する傾向も見受けられるが、実験データによりその傾向は異なっている[8][9]。

2.2.2 変形特性

(1) **収縮**： 高強度になるにしたがい、乾燥収縮が小さくなり自己収縮の割合が大きくなる[10]。土木学会では、高強度コンクリートの自己収縮予測式が示されている。

(2) **クリープ**： 圧縮強度が高くなるほど、クリープ係数は小さくなり、また相対湿度が小さ

い程クリープ係数は小さくなる傾向にある[11]。

(3) **耐久性**： 高強度コンクリートは、構造性能の向上とともに、硬化体組織の緻密化により、鋼材腐食性物質の浸入に対する抵抗性が飛躍的に高まり、耐久性の向上にも大きな期待をされている材料である。その一方、自己収縮の顕在化、単位セメント量の増大による温度応力の卓越などによって、若材齢時でのひび割れが生じやすいとの指摘がある。RC 構造物の耐久性を支配する塩化物イオンの浸入は、拡散係数が小さい緻密なコンクリートほど、ひび割れの影響が敏感に現れることが示唆されており、材料レベルでの高耐久化だけではなく、構造レベルにおける厳格なひび割れ幅制御が重要である。

(4) **耐火性**： 水セメント比が低い高強度コンクリートでは爆裂が発生する可能性が高く、また深くなることが実験的に確認されている[12]。

2.2.3 付着

付着強度は、破壊モードの違いによって異なり、割裂破壊が発生する場合は主筋にそった縦方向のひび割れの発生によって付着強度が決まる場合が多く、コンクリートの強度、横補強筋などの影響を受ける。一方、割裂破壊が生じない場合の付着強度はフーチング等からの純粋な鉄筋の抜け出しに対する強度として考える必要がある。一般的にコンクリートの圧縮強度が大きくなるほど付着強度は大きくなるが、その増加の割合は小さくなる。

2.2.4 鉄筋

鉄筋に関しては、コンクリート圧縮強度とのバランスを考慮して、その種類を選定することが肝要である。この参考となるよう、鉄筋の利用状況を示している。継手性能、曲げ加工性能に関しても示している。さらには、高強度せん断補強筋の種類とその特性、鉄筋の高温化での力学性状に関してもまとめている。

2.3 高強度コンクリート部材の構造性能

2.3.1 梁および柱

一軸圧縮を受ける RC 柱では、圧縮強度発現後の荷重低下につれて、ひずみ進展領域(破壊の局

所化領域), ひずみ後退領域, およびひずみ停滞領域に区分される。高強度コンクリートを使用した場合, 破壊の局所化が生じ易く, 普通強度 RC 柱に比べてひずみ進展領域の拡がり狭くなり, 圧縮強度発現後に脆性的に耐力を失う。横拘束筋体積比を大きくした上で高強度な横拘束筋を使用し, 横拘束圧が大きくなる横拘束筋の拘束形状を用いれば, 高強度コンクリートを使用した場合でも, ひずみ進展領域が拡がり, 圧縮強度発現後の軟化勾配が改善される[13]。

高強度 RC 部材の曲げひび割れ幅は, コンクリート強度の増加に伴って小さくなることが知られている[14]。また, 曲げひび割れ強度も高くなるためひび割れ発生と同時に主筋が降伏しないような鉄筋量を配置する必要がある, したがって最小鉄筋比も普通強度コンクリート部材よりも大きくしなければならない。主筋に高強度鉄筋を用いると鉄筋の降伏ひずみが大きくなり, 部材の曲げ降伏時変形も大きくなるため変形性能を評価する際には留意しなければならない。

高強度コンクリートは普通強度コンクリートよりも弾性的な圧縮応力度-ひずみ関係を示す。部材が曲げを受けた場合には, 曲げ圧縮部の応力度は三角形分布に近くなる。等価ストレスブロックを用いて曲げ強度を計算すると, ACI318 の方法では計算値が実験値のほぼ中央値となり, NZS3101 の方法では計算値が実験値のほぼ下限値になることが実験的に確認されている。

せん断特性については, 土木分野では主に梁を対象として, 横補強筋がある場合および無い場合のせん断特性を 130N/mm^2 程度までのコンクリートを用いた単純梁形式の載荷実験によって検討している。一方, 建築分野では主に柱を対象として 170N/mm^2 程度までのコンクリートを用いた拘束梁形式の載荷実験によって検討している。横補強筋が無く, せん断スパン比が大きい場合には, せん断破壊の中でも斜め引張破壊することが知られている。この場合, 破壊はコンクリートの引張性状に影響されるので, コンクリート強度を増加してもせん断強度があま

り上昇しないとされている[15]。それに対して建築分野の柱など比較的せん断スパン比が小さく横補強筋が多い場合には, コンクリート強度の増加に伴ってせん断強度も上昇し, 既往の設計式を準用してせん断強度が評価できることが実験的に確認されている。

2.3.2 柱梁接合部および骨組

柱梁接合部のせん断強度をはじめとする弾塑性性状は, $\sigma_B < 120\text{N/mm}^2$ では既往の算定式によりほぼ評価可能である[16]。骨組の履歴特性も同様である[17]。しかし, $\sigma_B > 120\text{N/mm}^2$ では実験データが少なく今後の検討課題である。

2.3.3 耐震壁

耐震壁のせん断強度は, 主にひびわれ後のコンクリート圧縮ストラットの有効圧縮強度に左右される。高強度コンクリートでは, 有効圧縮強度係数は, それに対応した算定式を用いる必要がある[18]。近年, 高層建物で用いられる立体耐震壁では, 曲げ強度は 2 方向入力の間を考慮する必要がある[19]。せん断強度に関しては 2 方向入力の影響は小さい[20]。実験データは $\sigma_B < 130\text{N/mm}^2$ のものが大半であり, 今後, データの蓄積が望まれる。

2.3.4 杭

Fc105 コンクリートを用いた PHC 杭が実用化されている。遠心成型で高強度を確保するためには, ①骨材の選定, ②最大化速度 20g 程度の中速回転の遠心力, ③蒸気養生の積算温度を $1,000^\circ\text{C h}$ に近づける, などが必要となる。また, このような杭の変形能力は, 高一様伸び PC 鋼棒と横拘束筋を用いることにより改善される[21]。

2.4 まとめ

高強度コンクリートおよびそれを利用した部材に関し, 主な特性は以下のとおりである。

(1) 圧縮強度時のひずみが増大する傾向にあるが, 圧縮強度以降の強度低下の割合が大きく, 脆性的な破壊となる。

(2) 圧縮強度が 100N/mm^2 以上のコンクリートは硬化過程初期において大きな自己収縮ひず

みを示し、硬化後の特性の内ヤング係数、曲げ強度および引張強度に頭打ちの傾向が見られる。

(3) せん断ひび割れ面は、極めて平滑状態となる。

(4) 圧縮時の局所ひずみの顕著化に伴いより一層脆性的な破壊を示すようになる。

(5) 高強度コンクリートを有効利用するには、最小鉄筋比を含めた適切な補強が必要となる。

(6) 部材が曲げを受けた場合には、曲げ圧縮部の応力度は三角形分布に近くなる。等価ストレスブロックを用いて曲げ強度を計算すると、ACI318の方法では計算値が実験値のほぼ中央値となり、NZS3101の方法では計算値が実験値のほぼ下限になることが実験的に確認されている。

(7) 横補強筋が少なく、せん断スパン比が大きい場合、コンクリートの引張性状に影響される斜め引張せん断破壊となり、コンクリート強度を増加してもせん断強度があまり上昇しないとされている。それに対して建築分野の柱など比較的せん断スパン比の小さく横補強筋が多い場合には、コンクリート強度の増加に伴ってせん断強度も上昇し、既往の設計式を準用してせん断強度が評価できることが実験的に確認されている。ただし、ひびわれ後のコンクリート圧縮ストラットの有効圧縮強度に左右され、適切な算定式を用いる必要がある。

3. 高強度コンクリート構造物の構造設計

3.1 概要

この章では最初に高強度コンクリートを用いた建築構造物、土木構造物に関してその設計法の現状を紹介している。次に建築構造物に関しては、既存高層 RC 造建物の構造特性について、日本建築センター発行のビルディングレター掲載のデータに基づき分析を行い、設計の実情を明らかにしている。さらに、特徴のある 7 件の適用事例を取り上げ、それぞれの設計法、施工法、品質管理法、プレキャスト工事などについてより詳しい紹介を行っている。土木構造物については、橋梁、タンク、その他の構造物への

適用の現状を概括し、特徴的な橋梁 22 件の適用事例を紹介している。

3.2 構造設計法の現状

3.2.1 建築構造物の設計

高強度コンクリートを使用する建築物のうち、代表的な例は高層 RC 造住宅である。ここでは高層 RC 造住宅を主な対象として、構造設計について、以下の項目に従って概要を述べている。

- (1) 高層建築物の構造設計の経緯
- (2) 高層 RC 造建築物の誕生とその後の推移
- (3) 高層 RC 造技術検討委員会の活動
- (4) New RC プロジェクトの成果
- (5) 現行規定による高層 RC 造建築物の構造設計
- (6) 高層 RC 造建築物の耐震設計

一般の RC 造建築物の構造設計において、現在、実用設計で準拠している計算規準は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」

(RC 規準) である。RC 規準で対象とするコンクリートの設計基準強度は、上限値を 60N/mm^2 としている。また、RC 造部材の終局強度設計に参照されることが多い日本建築学会「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」(靱性保証指針) においても、コンクリートの設計基準強度は、 600kgf/cm^2 以下としている。そのため、 60N/mm^2 を超える高強度コンクリートを使用する RC 造部材の設計では、前述した New RC プロジェクトの成果報告書や各研究者による構造実験の研究成果報告などを参考にして、必要に応じて構造実験や施工実験を行い、その構造性能を検証しているのが現状である。

3.2.2 土木構造物の設計

土木学会コンクリート標準示方書は、土木学会コンクリート委員会が作成するコンクリート構造物の設計規準であり、わが国の土木分野の設計規準として、最も古い歴史を持ち、コンクリートに関する技術の拠り所として広く適用、参照されている。ここでは、示方書において高強度コンクリートへの対応がどのような変遷をたどってきたかを概観している。

昭和 61 年版示方書では、それまでの許容応力度設計法から、現在まで続く限界状態設計法による設計体系に設計の基本的枠組みを移行した。ここでは、示方書全体を通じたコンクリート強度の適用範囲を明確に定めているわけではない。個別の記述や各種算定式において、その記述や式の適用範囲が必要に応じて示されているに過ぎない。昭和 61 年版示方書の「3 章 材料の設計用値」には、「コンクリート構造物に用いられるコンクリートには各種のものがあり、通常のセメントを用いたコンクリートでも 100~1000 kgf/cm² 程度の圧縮強度のものが用いられている。」との記述が見られる。ただしこれは一般的な事実を述べたに過ぎない。昭和 61 年版示方書では、明確な断りはないが、概ね設計基準強度 $f'_{ck}=180\sim400$ kgf/cm² の範囲のコンクリートの使用を想定していたように読み取れる。

平成 8 年版示方書では、高強度コンクリートに対して随所に具体的な対応がみられる。コンクリートの各種設計強度の一覧表では、設計基準強度 $f'_{ck}=18, 24, 30, 40, 60, 80$ N/mm² の場合の標準値が示されている。この範囲の強度のコンクリートを標準と位置づけ、示方書でカバーしようというスタンスであると考えられる。しかし、高強度コンクリートへの拡張は慎重な姿勢が見られる。終局限界状態の検討におけるコンクリートの材料係数 γ_c は、 $f'_{ck}<60$ N/mm² の場合は 1.3、 $f'_{ck}\geq 60$ N/mm² の場合は 1.5 との値が標準値として示された。

2002 年版示方書では、全編にわたって「性能照査型設計」が導入された。平成 8 年版示方書から本格的に取り組まれ始めた高強度コンクリートへ対応は、2002 年版示方書においてさらに進められ、新しい知見が加えられるとともに各所の記述や算定式の再構成が図られた。また、全体にわたりコンクリート強度の適用範囲を 80 N/mm² としたことが冒頭に明記された。設計基準強度 f'_{ck} が 80 N/mm² 以下であれば、終局限界状態の検討におけるコンクリートの材料係数 γ_c を 1.3 としてよいこととなった。

3.3 実構造物への適用

3.3.1 建築構造物

(1) 既存高層 RC 造建物の構造特性： 高強度コンクリートの建築構造物への適用は、高層 RC 造集合住宅がその大半を占める。ここでは、わが国における高層 RC 造建物の現状を把握するために、その構造特性データを収集し分析を行っている。その主なものは以下のようである。

a) 構造規模：①地上階階数，②建物高さ，③アスペクト比，④柱支配面積，⑤地下階階数，⑥基礎構造，等

b) 使用材料：①コンクリート強度，②主筋強度，③せん断補強筋強度 など

c) 構造設計データ：①1次固有周期－建物高さ，②1次固有周期－ベースシア係数関係，③最大層間変形角(Level 1, 2)，④最大塑性率 (Level 2)、⑤最大・最小軸力比，⑥最大層間変形角 (Level 1－Level 2) 関係、⑦最大層間変形角 (Level 2)－最大塑性率 (Level 2) 関係，等

(2) わが国における適用事例：ここでは、圧縮強度が 100N/mm² を超えるコンクリートを用いているもの、40 階を越える高さのもの、免震超高層、制震超高層など、特徴のある高層 RC 造集合住宅 7 件を取り上げ、工事概要、設計法、施工法、品質管理法などについて紹介している。

(3) 海外における適用事例：高強度コンクリートを使用した海外の主要な鉄筋コンクリート造建築物を紹介している。高強度コンクリートの使用のメリットは、鉛直荷重の大きい高層建築物の下層階柱の断面寸法を低減できるという経済性にあり、シカゴ、ニューヨークを中心とした高層建築物に広く用いられてきた。1980 年代中頃までには、50~60 MPa (N/mm²) 級の強度のコンクリートが用いられるようになってきたが、1988 年竣工のシカゴ 225 Wacker Drive では、地下階に 117MPa (N/mm²) のコンクリートが用いられた。

他地域を見ると、1990 年以降、ドイツでは 100 MPa (N/mm²) 級のコンクリートを用いた高層建

建築物が建てられている。アラブ首長国連邦，マレーシアにおいても 80 MPa (N/mm²) 級のコンクリートを用いた高層建築物が建設されている。また，比較的地震荷重の大きいアメリカ西海岸，ニュージーランド，上海（中国）においても高強度コンクリートを用いた高層建築物が建設されてきており，高強度コンクリートの使用は世界的に広まっている。

ここに紹介する高層建築物の多くは，センターコア+チューブの構造形式を持ち，その用途も事務所，多目的といったものが多い。我が国の住宅を中心とした高層鉄筋コンクリート造建築物とは様相が大きく異なっている。

3.3.2 土木構造物

(1) 橋梁： 土木構造物における高強度コンクリートの適用例は「橋梁」が最も多い。ここでは道路橋，鉄道橋における高強度コンクリートの使用状況，採用理由などについて分析が行われており，20 を超える事例の紹介がなされている。

(2) タンク： 地下タンクでは，コンクリート強度を高くすることにより側壁と地中連続壁の厚さを薄くすることができ，掘削量を減らせるため 50~60N/mm² の高強度コンクリートが用いられる場合がある。地上タンクでは，液圧によって円周方向に引張力生じる PC 防液堤に高強度コンクリートが用いられることがある。

(3) その他： 海洋構造物の PC 栈橋や PC 矢板，防災施設のシェッドやシェルター，舗装，地価構造物のシールドトンネル用セグメントや PC ウェル，プレキャスト PC 製品の PC ポール，PC 杭，PC 枕木などが紹介されている。

<参考文献>

[1] 長滝重義：高強度コンクリートの諸性質，コンクリート工学，Vol. 14, No. 3, pp. 38-41, 1976.
 [2] 近藤時夫：高強度コンクリートの諸性状に関する研究，土木学会論文報告集 第 263 号, pp. 362-365, 1976.
 [3] 友澤史紀，阿部道彦，榎田佳寛：高強度コンクリートの開発，コンクリート工学，Vol. 32, No. 10, pp. 11-19, 1994. 10.
 [4] 友沢史紀，榎田佳寛，安田正雪：高強度軽量コンクリートの基礎的物性—超高層 RC 建築物への適用—，コンクリート工学，Vol. 24, No. 4, pp. 14-21,

1986.
 [5] 田中恭一，佐藤孝一，菅一雅，齊藤力：低熱ポルトランドセメントを用いた超高強度コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 1, pp. 31-36, 1993.
 [6] 例えば，長滝重義：高強度コンクリートに関する研究とその実用化，コンクリート工学年次論文報告集 10-1, pp. 61-68, 1988.
 [7] 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学的特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号, pp. 11-16, 1995.
 [8] 林宏信，高木宣章，小島孝之：高強度コンクリートの圧縮疲労特性，土木学会論文集，No. 641/V-46, pp. 67-76, 2000.
 [9] 菅田紀之，尾崎初，水吐則行：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの疲労特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No. 1, pp. 1067-1072, 1995.
 [10] 田澤栄一：水和反応によるセメントペーストの自己収縮，セメント・コンクリート，No. 565, pp. 35-44, 1994.
 [11] 土木学会 308 委員会：コンクリートのクリープおよび乾燥収縮 II，コンクリート技術シリーズ 39, 2000.
 [12] 森田武，西田朗，橋田浩，山崎庸行：火災時における鉄筋コンクリート部材の爆裂性状の改善に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 544 号, pp. 171-178, 2001. 6
 [13] 秋山充良ほか：普通強度から高強度までの構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験と圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No. 788/V-67, pp. 81-98, 2005.
 [14] 五角亘：コンクリートの品質が RC 部材のひび割れ幅に及ぼす影響，コンクリート工学論文集，Vol. 23, No. 3, pp. 1333-1338, 2001.
 [15] 鈴木基行ほか：コンクリート圧縮強度 130MPa までを対象とした腹鉄筋のない RC はりのせん断強度式，土木学会論文集，No. 739/V-60, pp. 75-91, 2003.
 [16] 村上秀史，藤井栄，石渡康弘，森田司郎：鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部のせん断強度に関する検討（接合部データベース解析 その 1），日本建築学会構造系論文集，第 530 号, pp. 85~92, 1998. 1.
 [17] 寺岡勝，佐々木聡，林和也：鉄筋コンクリート造十字形柱・梁接合部の力学性状に関する研究（その 12 梁部材の変形性能の評価），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造，pp. 111~112, 1995. 10.
 [18] 長沼一洋：平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その 1），日本建築学会構造系論文報告集，第 421 号, pp. 39-48, 1991. 3.
 [19] 小西覚ほか：鉄筋コンクリート造 L 型断面耐震壁に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 2, pp. 1083-1088, 1997 年
 [20] 丸田誠：鉄筋コンクリート立体耐震壁の地震時弾塑性性状に関する研究，千葉大学学位論文，2001. 1.
 [21] 六車ほか：超高強度 PC くい曲げ靱性改善，第 7 回コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 7, pp. 465-468, 1985.