

論文 U型断面 PCa を用いた鉄筋コンクリート造梁部材の純曲げ実験

杉本 訓祥*1・増田 安彦*2・江戸 宏彰*2

要旨:プレキャスト工法として断面がU型の外殻プレキャスト(以下U型PCaと略記)梁部材を開発した。U型PCaは、施工時には型枠として機能し、その後梁主筋を配筋し梁を形成する。U型PCaの施工法として、下端に主筋の他に、PC鋼棒を内蔵しU型PCaにプレストレスを導入する方法を考案した。そこで、型枠としての性能確認実験および梁部材としての純曲げ実験をそれぞれ行った。実験の結果、いずれも期待通りの耐力・変形性能を示し、解析により精度よく評価できた。

キーワード:プレキャスト, 鉄筋コンクリート, プレストレストコンクリート

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の施工性を高める目的で断面がU型の外殻プレキャスト(以下U型PCaと略記)梁を開発した。U型PCaはあばら筋を内蔵するとともに、一部又はすべての下端主筋を内蔵することや、PCaにPC鋼棒を用いてプレストレスを導入することが可能である。

本研究では、U型PCaの型枠性能および構造性能を確認する目的で、U型PCa単体の曲げ実験(型枠性能確認実験)および後打ちコンクリートを打込んだ梁部材の純曲げ実験(構造性能確認実験)を行った。

2. 型枠性能確認実験

2.1. 実験概要

コンクリート打込み時等、施工中に作用する荷重として、部材の側面方向に働く側圧、および鉛直方向に働く荷重があり、それぞれの荷重に対する型枠性能を確認するため、試験体二体に対しそれぞれ「側圧試験」及び「外殻曲げ試験」を行った。

試験体断面寸法を図-1に、試験体形状および加力方法を図-2に示す。また、材料特性を表-1に示す。断面は幅550mm×せい770mmとし、側面部板厚は75mm、底部板厚は110mm、底部に下端主筋の一部を想定して2-D25を内蔵した。また、

あばら筋は2-D13@150mmとした。側圧試験体は全長約2m、外殻曲げ試験体はせん断スパン2.1mとした(全長5m)。また、U型PCaの内面は、チェッカープレートを使用した鋼製型枠を用いることで、凹凸を形成した。

側圧試験はU型断面の上部両側面を断面幅方向に押し開くように加力し、側板部と底部との付け根部分にモーメントを作用させ、側圧が作用した状態を再現した。一方、外殻曲げ試験はU型PCa梁を単純梁支持中央点載荷して鉛直方向の施工荷重を再現した。プレキャスト床板の施工による偏荷重を考慮して、鉛直荷重を左右の側板部に別々に作用するように加力した。すなわち、ジャッキAによりひび割れ荷重の半分(50kN)まで加力し、続いてジャッキAを50kNに保ち、ジャッキBで同様に50kNまで加力した。その後、ジャッキA、Bを同じ荷重を保ち加力した。さらに、ひび割れ発生後、一旦除荷した後、再びジャッキA、Bを同じ荷重を保ち、主筋の降伏が確認されるまで加力した。また、ジャッキA、Bの直下にあたる位置でそれぞれ変位(δ_A , δ_B)を測定し、その平均値を中央点のたわみと定義した。

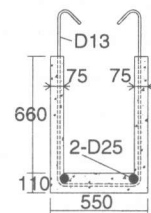


図-1 断面形状
単位:[mm]

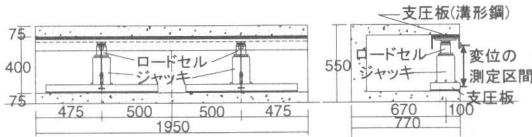
*1 (株)大林組 設計本部 修(工) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 工博 (正会員)

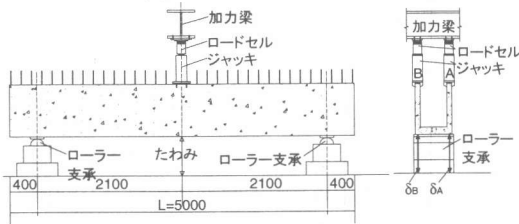
表-1 材料特性 単位:[N/mm²]

	コンクリート ¹⁾	D25(主筋)	D13(あばら筋)
圧縮強度	51.0	---	---
引張強度	3.70 (割裂強度)	358 (降伏強度)	367 (降伏強度)
ヤング係数	2.52×10^4	1.89×10^5	1.89×10^5

*) 現場封かん養生テストピースの試験体加力時強度



(a) 側圧試験体と加力方法



(b) 外殻曲げ試験体と加力方法

図-2 試験体形状と加力方法(単位:[mm])

2.2. 実験結果

実験結果一覧を表-2 に示す。各試験体の荷重-変形関係を図-3 に示す。側圧試験体の荷重は、部材軸方向の単位幅当たりのモーメントで表した。

(a) 側圧試験

モーメント 4800N・mm/mm 程度で、軸方向端部の梁内側隅角部に曲げひび割れが発生し、徐々に剛性が低下した。その後、上下方向の開きが5mm 程度に達して耐力が上がらなくなり、梁内側隅角部のひび割れが部材軸方向全長にわたって開き、変形の増大と耐力の低下が進んだ。

(b) 外殻曲げ試験

ジャッキ A を一定に保ち、ジャッキ B のみで加力を始めていくと若干剛性が変化するが、ひび割れ発生まで概ね様な剛性を保った。加力点(部材中央部)の曲げひび割れが発生したところで変形が進んだ。除荷後の再載荷時に曲げひび割れ発生荷重を超えると、斜めひび割れが発生し、徐々に剛性が低下した。加力点のたわみが 7mm 程度のところで下端主筋の降伏が見られ、耐力はほぼ

頭打ちとなった。

2.3. 結果の検討

(a) 側圧試験

曲げひび割れ発生荷重および初期剛性は、鉄筋を無視して、片持ち梁載荷時の単位幅あたりの曲げ荷重および剛性として算出した(図-5(a))。計算結果は図-3(a)に実験結果と比較して示した。

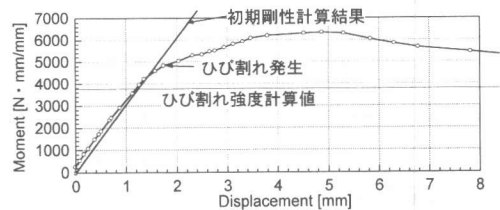
曲げひび割れ強度・初期剛性ともに、計算値は実験結果を精度よく評価できている。

(b) 外殻曲げ試験

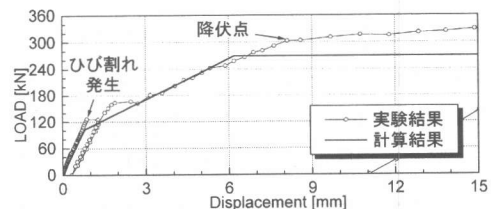
曲げひび割れ発生点はU型断面の断面係数を用いてひび割れ荷重を算出し、また、曲げおよびせん断剛性を考慮して変形を求めた。降伏荷重は、U型断面を平面的に要素分割して、平面保持を仮定した断面解析により求めた。断面解析において、コンクリートは Kent-Park モデル¹⁾を、鉄筋は降伏点で折れ曲がるバイリニアモデルを用いた。降伏点の変位は、バイリニアな曲率分布を仮定して積分したものを曲げ変形とした。また、鉄筋の伸びによる変形も考慮して算定した(図-5(b))。計算結果は図-3(b)に実験結果と比較して示した。

表-2 実験結果一覧

	側圧試験 ひび割れ [N・mm/mm]	外殻曲げ試験	
		ひび割れ [kN]	降伏 [kN]
実験値	4830	126	302
計算値	3780	103	270
実/計	1.28	1.22	1.12



(a) 側圧試験結果



(b) 外殻曲げ試験結果

図-3 荷重-変形関係

ひび割れ発生強度の計算結果は、安全側に実験結果を評価できている。また、初期剛性も精度よく評価できている。実験値のうち、二点で測定した変位およびそれらの平均値を弾性範囲について拡大して図-4に示す。図には、初期剛性計算結果およびひび割れ強度計算値も示す。偏荷重の影響から、加力側の変形が進む傾向が見られるが、平均値に対しては精度よく評価できている。

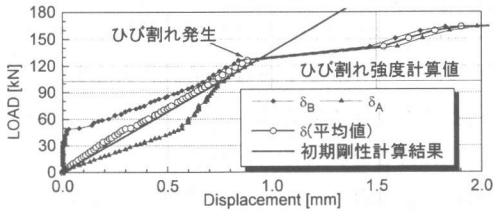


図-4 荷重-変形関係(外殻曲げ試験:弾性範囲)

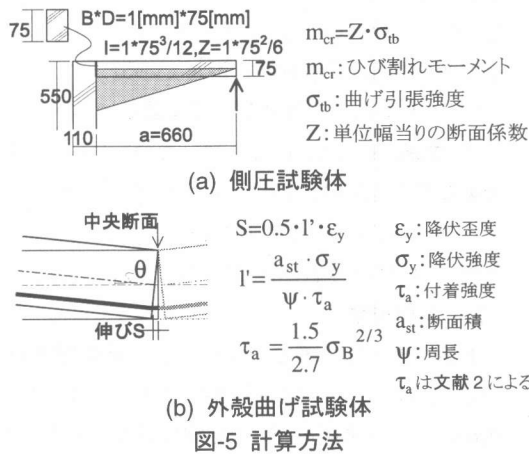


図-5 計算方法

3. 構造性能確認実験

3.1. 実験概要

構造性能確認実験では、U型PCaの内部に主筋(後打主筋と呼ぶ)を配筋し、後打ちコンクリートを打込み製作した梁部材に単純梁支持の二点載荷により純曲げを与える実験を行った。U型PCa内面は2章の試験体と同様の方法で荒した。

試験体は、普通鉄筋の内蔵の有無、プレストレスの有無をパラメータとして計3体(試験体U-A, U-B, U-PS)製作した。試験体諸元を表-3に、使用したコンクリートおよび鉄筋の材料特性を表-4に示す。

全試験体とも、純曲げ区間の下端主筋に歪ゲージを貼付した。試験体U-PSは、主筋およびPC鋼棒の純曲げ区間以外に歪ゲージを貼付し、また、30cmの鉄筋(D10)の中央部に歪ゲージを貼付した(鉄筋計と呼ぶ)を外殻PCa部に埋め込み、プレストレス導入時等の歪度変化を測定した。コンクリートの乾燥収縮および温度変化の影響を除外するため、ダミー供試体(200×400×90, 110[mm³]の二種)を製作し、鉄筋計を埋め込み歪度を測定した。

加力方法を図-6に示す。加力は、支点間距離を6.45m、純曲げ区間を2.25mとする純曲げ加力とした。載荷は、純曲げ区間のたわみで制御する一方方向繰り返し載荷とした。制御変形は試験体U-Aを基準とし、下端最外縁主筋(PCa内蔵主筋)の降伏時変形を塑性率1とし、塑性率1~7まで各2回繰り返し、その後破壊を確認するまで押し切った。

表-3 試験体諸元

試験体名	U-A	U-B	U-PS
断面 詳細			
後打主筋	5-D25(上端), 5-D25(下端)	5-D25(上端), 7-D25(下端)	5-D25(上端), 5-D25(下端)
内蔵主筋	2-D25(下端)	2-D16(下端:組立筋)	異形PC鋼棒 2-22mm
鋼材量	$p_t=0.72\%$	$p_t=0.73\%$	$p_t=0.53\%$, $p_p=0.16\%$
あばら筋	2-D13@150, $p_w=0.31\%$		
プレストレス	なし		プレストレス量=200kN/1本

p_t :引張鉄筋比, p_p :PC鋼材比, p_w :せん断補強筋比

3.2. プレストレスの導入

試験体 U-PS は 施工中に生じる荷重を負担することを想定し、プレテンション方式によるプレストレス導入を行った。自重の2倍の施工荷重が作用すると仮定し、スパン 7m の単純支持時に、中央点の下端に引張応力が生じないように、また、導入時の U 型 PCa 断面の上端応力がコンクリートの曲げ引張強度以下となるように、導入量を決めた。

表-4(a) 材料特性(コンクリート) 単位:[N/mm²]

		U-A	U-B	U-PS
外 殻 部	圧縮強度	42.5	48.8	51.5
	ヤング係数	2.81×10^4	2.72×10^4	2.88×10^4
	割裂強度	3.82	3.70	4.17
後 打 部	圧縮強度	29.8	31.5	27.1
	ヤング係数	2.83×10^4	2.73×10^4	2.60×10^4
	割裂強度	2.24	2.82	2.23

現場封かん養生テストピースの試験体加力時強度

表-4(b) 材料特性(鉄筋) 単位:[N/mm²]

	降伏強度	ヤング係数
D13	367	1.89×10^5
D16	386	1.83×10^5
D25(内蔵)	358	1.89×10^5
D25(後打)	375	1.87×10^5
異形 PC 鋼棒 22mm	1180	2.00×10^5

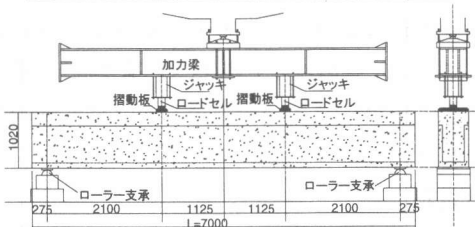


図-6 構造試験体の加力方法(単位:[mm])

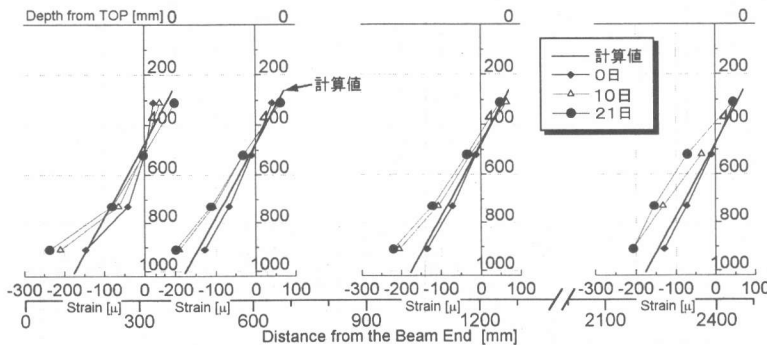


図-7 歪度測定結果

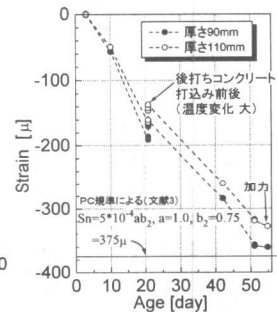


図-8 収縮歪度

PC 鋼棒は、U型PCaコンクリート打込み直前に緊張し、導入力は荷重計で管理した。作業は、プレストレス導入を材令 3 日、後打ちコンクリートの打込みを材令 21 日、加力を材令 55 日で行った。

3.3. プレストレス導入時歪度計測結果

プレストレス導入前後から後打ちコンクリート打込み後までの部材軸方向の鉄筋計の歪度計測結果を図-7 に示す。図は、計測位置を大きな横軸の緊張側梁端部からの距離にあわせ、また、引張歪度を正にとった。また、U型断面の断面係数を用いて算出した初期歪度計算結果も示す。図は、ダミー供試体の計測値を用いて乾燥収縮および温度変化の影響を取り除いた数値で示した。

図より、梁端部から 300mm の距離では歪度分布に偏りが見られるが、600mm の距離からは直線に分布しており、ほぼ均等にプレストレスが導入されていることがわかる。また、導入後のクリープによる歪度の変動もほぼ直線状に進んでいる。

ダミー供試体の歪度計測結果を図-8 に示す。図には、文献 3 による収縮歪度計算値も示した。材令 4 週では、計測値は実験値の半分程度であるが、コンクリート打込み後、加力までの 7 週(約 50 日)程度で、ほぼ計算値に近づいている。

3.4. 実験結果

実験結果一覧を表-5 に示す。また、純曲げ区間のモーメント-たわみ関係を図-9 に示す。図には、次節に述べる断面解析による解析結果も示す。また、試験体 U-PS の場合の、加力終了時のひび割れ発生状況の例を図-10 に示す。

試験体 U-A および U-B は、後打主筋の降伏後耐力が頭打ちとなった。一方、試験体 U-PS は、後打主筋の降伏後、やや剛性が低下したが、耐力は上昇し、PC 鋼棒の降伏後、耐力は頭打ちとなった。全試験体とも、加力点近傍で曲げ圧壊した。

ひびわれ発生状況から、後打ちコンクリートとの打ち継ぎ部となる境界面で、ひび割れが発生しているところもあるが、目視により大きな目開きは発生しておらず、最終破壊時まで、一体性は保たれていたと考えられる。

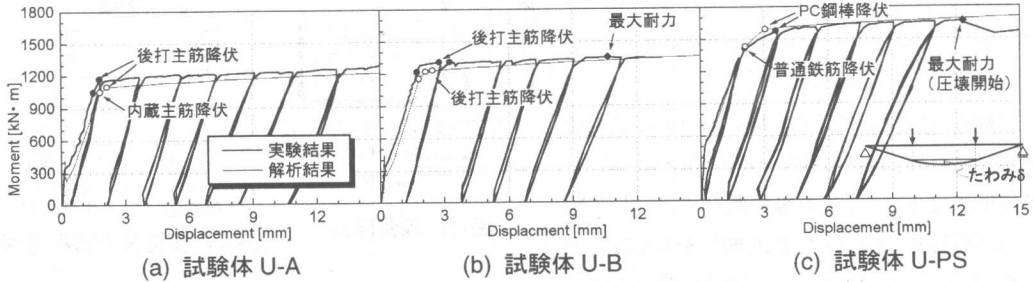


図-9 実験結果(荷重-変形関係)

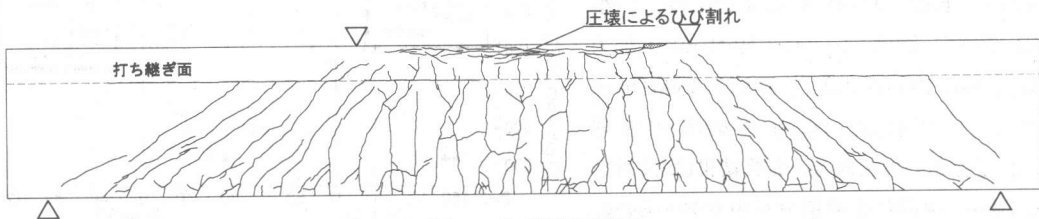


図-10 最終破壊状況

表-5 構造試験体実験結果一覧(曲げモーメント)

		試験体 U-A	試験体 U-B	試験体 U-PS
曲げひび割れ強度 [kN·m]	計算 ^{*1)}	350(外殻強度) 294(後打ち強度)	326(外殻強度) 301(後打ち強度)	385(外殻強度) 280(後打ち強度)
	実験(目視)	335	311	385
降伏強度 [kN·m]	解析	1050(内蔵主筋) 1100(後打主筋)	1220(一段目主筋) ^{*3)} 1230(二段目主筋) ^{*3)}	1430(後打主筋) 1590(PC鋼棒)
	実験(実/計)	1050 (1.00) 1170 (1.07)	1310 (1.07) 1310 (1.06)	1420 (0.99) 1580 (0.99)
最大耐力 [kN·m]	解析 ^{*2)}	1270	1420 ^{*3)}	1720
	実験	1290 (1.01)	1350 (0.96)	1670 (0.97)

*1) 外殻強度:外殻のコンクリート強度で算定。後打ち強度:後打ちコンクリートの強度で算定, *2) 最大耐力解析値は圧縮縁歪度 0.3%時の耐力, *3) 試験体 U-Bの解析では、組立鉄筋(2-D16)を含む。

3.5. 結果の検討

曲げひび割れ強度は矩形断面の断面係数を用い、特に試験体 U-PS では、プレストレス量を考慮して算出した³⁾。また、平面保持を仮定した断面解析により断面のモーメント-曲率関係を求め、純曲げ区間の曲率を一定と仮定して純曲げ区間のたわみを算定した。モーメント-たわみ関係の解析結果は図-9 に示した。材料特性は 2 章と同様とした

が、コアコンクリートについては、拘束効果を考慮した修正 Kent-Park モデル^{リ)}を用いた。降伏荷重および最大耐力は、断面解析により各位置の鉄筋が降伏歪度に達した時、および圧縮縁歪度が 0.3%に達した時として求めた。いずれの試験体についても精度よく評価できている。特に、ひび割れ強度は、外殻のコンクリート強度を用いた計算結果の方が実験結果との対応が比較的良好。

各試験体の各サイクルピーク時のたわみ (δ_{peak}) および残留変形 (δ_{res}) の関係を、残留変形のピーク時たわみに対する比 ($\delta_{res} / \delta_{peak} [\%]$) を縦軸にとり、図-11 に示す。試験体 U-A と U-B を比較すると、内蔵主筋の有無による残留変形の差はほとんど生じていない。一方、試験体 U-PS と他の二体を比較すると、残留変形が小さく、プレストレス導入の効果がでている。

試験体 U-PS では、プレストレス導入の効果を考慮するため、U型断面にのみプレストレスによる初期歪度を与え、その後の载荷では、中立軸からの距離に比例させて歪度増分を与える方法で解析を行った(図-12)。実験時に測定した歪度と、上述の断面解析結果を比較して図-13 に示す。図は、モーメント ($[kN \cdot m]$) 0 (加力前)、300, 500 (降伏前)、および 1300 (降伏時) について示した。図より、外殻部と中央部の歪度分布の解析結果と実験結果はよく対応しており、载荷時歪度増分が中立軸からの距離に比例するとした平面保持仮定が試験体でも成立していると同時に、U型PCaと後打ちコンクリートの一体性は良好であったといえる。

4. まとめ

U型断面の PCa 梁を開発した。

型枠性能確認実験では以下の知見を得た。

- (1) 側圧試験では、初期剛性を精度よく、また、ひび割れ発生強度は安全側に評価できた。
 - (2) 外殻曲げ試験では、初期剛性・ひび割れおよび降伏強度とも、比較的精度よく評価できた。
- 以上より、U型PCaの施工段階における型枠性能は、安全側に評価できるといえる。

構造性能確認実験では以下の知見が得られた。

- (3) いずれの試験体も、耐力・剛性とも平面保持を仮定した曲げ解析で比較的精度よく評価できた。
- (4) 試験体 U-A, U-B について、内蔵主筋の有無は構造性能において有意な差を生じなかった。
- (5) プレストレスを導入した試験体についても、プレテンションによる初期歪度を考慮した断面解析

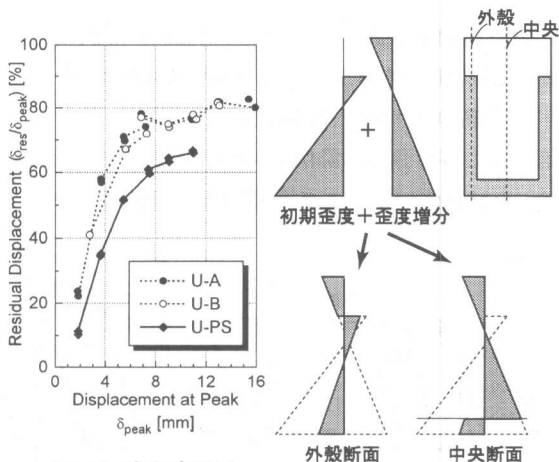


図-11 残留変形

図-12 歪度分布の概念図

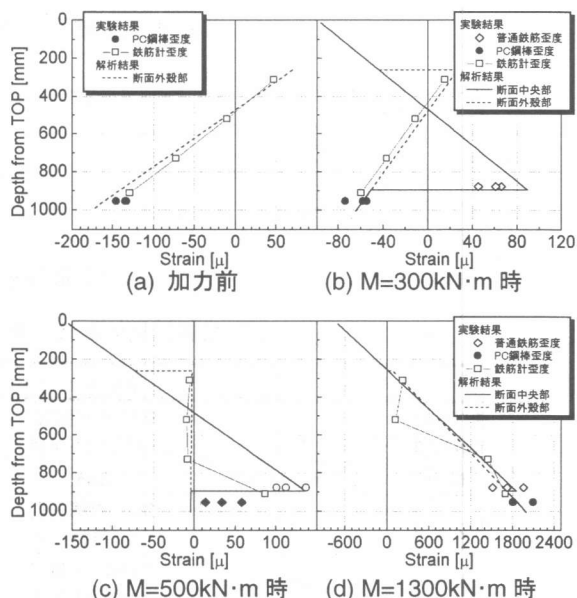


図-13 断面内の歪度分布

により、耐力・剛性ともに精度よく評価できた。

参考文献

- 1) Robert Park, M.J.Nigel Priestley and Wayne D. Gill : DUCTILITY OF SQUARE-CONFINED CONCRETE COLUMNS, Proceedings ASCE, Vol.108, No.ST4, pp.929~950, April, 1982
- 2) 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, 日本建築学会, 1999
- 3) プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説, 日本建築学会, 1998

謝辞: 試験体製作にあたり、三菱マテリアル建材(株)およびネツレン(株)の協力を得た。ここに謝意を表す。