

U型 PCa 梁「クリアビーム」の開発（その1）

型枠性能確認実験および梁部材純曲げ実験

増田 安彦
江戸 宏彰

杉本 訓祥
(設計本部 設計第12部)

U-shaped Precast Concrete Shell “Clear-Beam” (Part1)

Confirmation Tests on Formability and Bending Tests on Beam Members

Yasuhiko Masuda Kuniyoshi Sugimoto
Hiroaki Eto

Abstract

A “Clear-Beam” has been developed for use in a R/C structure comprising a U-shaped precast concrete shell. This report describes the results of confirmation tests on formability and of bending tests on beam member. The outlines of these test results are as follows. The Clear-Beam demonstrated expected strength and good deformation ability, and these results corresponded closely with analytical data. The effect of prestressing in the Clear-Beam was to decrease the remaining deformation.

概要

断面がU型の梁用外殻プレキャスト「クリアビーム」を開発した。本報告では、クリアビームの型枠としての性能を確認するため、側圧試験と外殻曲げ試験を実施した結果と、クリアビームを用いた梁部材の曲げ耐力性状を確認するために実施した純曲げ実験の結果について述べる。実験の結果、いずれも期待通りの耐力・変形性能を示し、これらは解析により精度よく評価できた。また、プレストレスを導入したクリアビームを用いた梁では、残留たわみが小さいなどの効果が得られた。

1. はじめに

クリアビーム工法とは梁の内のりスパンにU型外殻プレキャスト(以後 PCa と省略する)「クリアビーム」を使用する鉄筋コンクリート梁部材の構築工法である。

SI(スケルトン・インフィル)建築では架構の長寿命化と梁のロングスパン化が望まれる。クリアビームは、それらの達成を目的として開発したもので、高強度・高耐久の外殻部分にプレストレスを導入するなどの手法を用いてロングスパン化を試みている。これにより、梁の外殻 PCa に求められる、軽量化と支保工などの仮設材を低減することも同時に可能となる。

本報告では、まずクリアビームの型枠性能を確認する目的で、クリアビームの側圧試験と外殻曲げ実験(型枠性能確認実験)を実施した結果について述べる。次に、クリアビームに主筋を内蔵した場合や、プレストレスを導入した場合における、合成梁としての構造性能、特に曲げ耐力性状を確認するために実施した純曲げ実験(構造性能確認実験)の結果について報告する。

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など、施工中に作用する荷重として、クリアビーム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2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 Fig.1 に、材料特性を Table 1 に示す。クリアビームには下端主筋の一部を想定した 2-D25 を内蔵させた。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、クリアビームの内型枠にチェッカープレートを使用して凹凸を形成した。

加力方法を Fig.2 に示す。側圧試験は外殻側面を材軸直交方向に押し開くように加力した。外殻曲げ試験は単純梁の中央点集中荷重とした。実際の施工中にはプレキャスト床板の据え付けなどで外殻部分に偏荷重が作用する可能性があることを考慮して、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、Fig.2(b)中のジャッキ A によりひび割れ荷重計算値の半分(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。以後は、ジャッキ A, B の荷重を同一として加力した。変位は、ジャッキ A, B の直下にあたる位置のそれぞれ変位 (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。

2.2 実験結果および考察

実験結果一覧を Table 2 に示す。各試験体の荷重-変形関係を Fig.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示した。

2.2.1 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。

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 (Fig.5(a))。曲げひび割れ強度・初期剛性とともに、計算値は実験結果を精度よく評価できている。

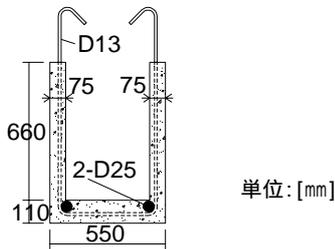


Fig.1 クリアビームの断面形状
Section of Clear-Beam

Table 1 材料特性

Characteristics of Materials 単位: [N/mm²]

	コンクリート*)	D25 (主筋)	D13 (あばら筋)
圧縮強度	51.0	---	---
引張強度 (割裂強度)	3.70	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

Table 2 実験結果一覧
Test and Calculation Results

	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

2.2.2 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しますが、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

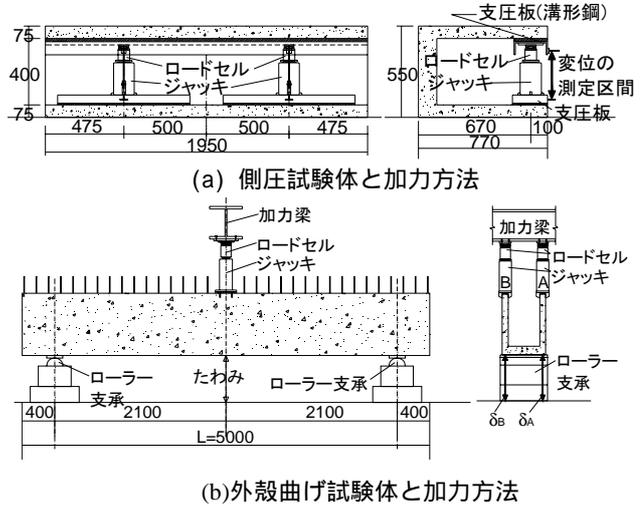
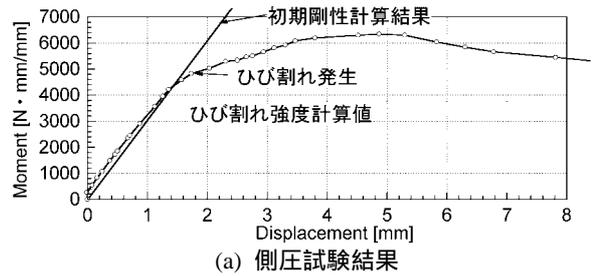
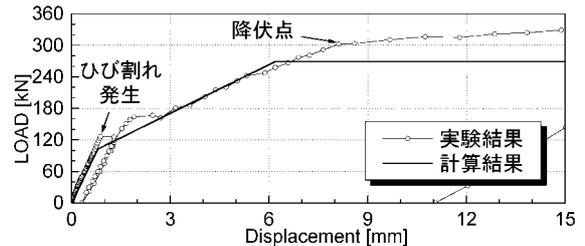


Fig.2 試験体形状と加力方法 (単位: [mm])
Shape of Specimens and Test Methods



(a) 側圧試験結果



(b) 外殻曲げ試験結果

Fig.3 荷重-変形関係
Load - Displacement Relationships

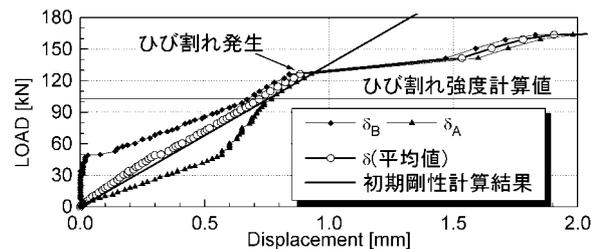


Fig.4 荷重-変形関係 (外殻曲げ試験: 弾性範囲)
Load - Displacement Relationships (Elastic Area)

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。

Table 2 および Fig.3 に示す計算結果のうち、降伏荷重はファイバーモデルを用いた断面解析により求めた。その際、平面保持を仮定するとともに、コンクリートの関係には Kent-Park モデル¹⁾を、鉄筋はバイリニアモデルを用いた。降伏点の変位は、試験体の曲率分布を直線状のバイリニアな分布と仮定して積分して算出した。鉄筋の伸びによる変形は Fig.5(b) に示す様に考慮した。

実験値のうち、加力点直下の二点で測定した変位とそれらの平均値を弾性範囲について拡大して Fig.4 に示す。同図には、初期剛性計算結果およびひび割れ荷重計算値も示す。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、初期剛性は平均値に対して精度よく評価できている。

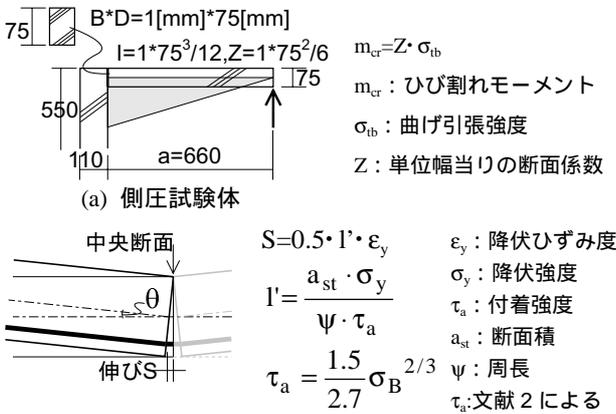


Fig. 5 計算方法
Calculation Methods

以上の検討に示す方法で、打込み側圧および鉛直方向の施工荷重に対して、ひび割れが発生しない外殻厚さを求めることが可能であること、また、その際に偏荷重の影響は特に考慮する必要がないことが言える。

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、クリアビームの内部に主筋(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実大梁部材を対象に純曲げ加力実験を行った。

試験体諸元を Table 3 に、使用したコンクリートおよび鉄筋の材料特性を Table 4 に示す。試験体は主筋の内蔵の有無、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。クリアビーム内表面はチェッカープレートにより凹凸を成形している。

加力時のひずみ計測は、純曲げ区間の下端主筋を対象に実施した。これに加えて、試験体 U-PS では、プレストレス導入時のひずみ分布や、その後のひずみの推移、加力時の応力状態を調べるため、主筋および PC 鋼棒の純曲げ区間以外にもひずみゲージを貼付した。さらに、鉄筋(D10, L=300mm)の中央部にひずみゲージ、熱電対を取付けたもの(鉄筋計と呼ぶ)をクリアビーム内部に埋め込み、コンクリート打ち込み直後から加力直前まで継続的にひずみを測定した。

加力方法を Fig.6 に示す。加力は、支点間距離を 6.45m、純曲げ区間を 2.25m とし、純曲げ区間の相対たわみで制御する一方向繰り返し載荷とした。制御変形は試験体 U-A における下端最外縁主筋(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。

Table 3 試験体諸元
Specimens of Bending Test

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	$p_t=0.72\%$ (下端)	$p_t=0.73\%$ (下端)	$p_t=0.53\%$, $p_p=0.16\%$ (下端)
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 のクリアビームには、プレテンション方式によりプレストレスを導入した。プレストレスの導入は、より長いスパンに対してクリアビームを効率よく使用可能とすることを目的とするとともに、たわみやひび割れの制御、耐久性向上などの効果を得ることを目的としている。

試験体の導入プレストレス力は、梁自重の2倍の荷重に対してスパン 7m を両端のみで支持し、中間部に支保工を使用しない場合でも、梁の中央点下端に引張応力が生じないように計画した。なお、実際の施工時の応力は支保工による支点間距離、スラブの PCa 施工計画や支持条件などの施工条件を考慮した荷重を用いる必要がある。またプレストレス導入時にクリアビーム上端にひび割れが生じないように注意が必要である。

PC 鋼棒にはネジ式の異形 PC 鋼棒(ネジボン)を使用し、クリアビームのコンクリート打込み直前に緊張した。導入力は荷重計で管理した。プレストレス導入は材令 3 日、後打ちコンクリートの打込みは材令 21 日、加力は材令 55 日(後打ちコンクリートの材令で 34 日)で行った。

3.3 プレストレス導入時ひずみ計測結果

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ひずみ計測結果を Fig.7 に示す。同図では、縦軸に断面せい方向の高さをとり、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、引張ひずみを正にとって示した。また、図中にクリアビームの断面係数を用いて弾性計算したひずみ分布計算値も示す。同図より、梁端部から 300mm の位置の計測値は、J 字型分布を示し、600mm からはほぼ計算値に等しい傾きを有する直線状に分布していることがわかる。これより定着長さは 300~600mm の間であることが推定される。

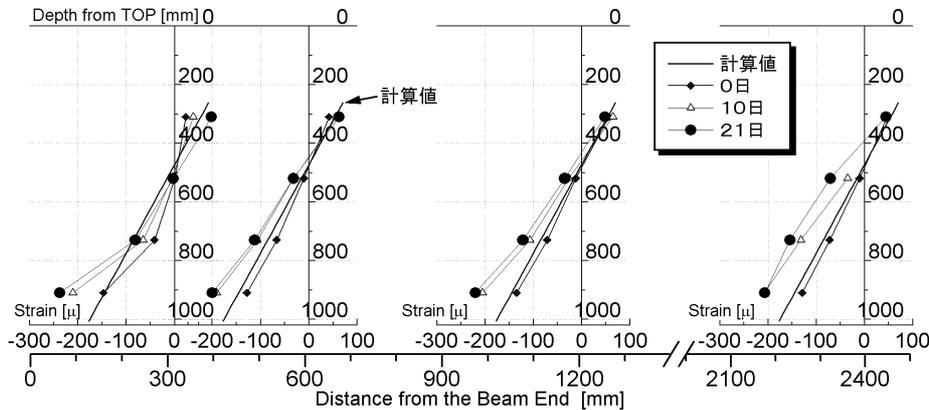


Fig.7 ひずみ度測定結果 Results of Strain Measurements

3.4 実験結果

実験結果一覧を Table 5 に示す。また、純曲げ区間のモーメント-たわみ関係を Fig.8 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している。また、試

Table 4 材料特性 Characteristics of Materials

(a)コンクリート 単位：[N/mm²]

		U-A	U-B	U-PS
外 殻	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

(b) 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

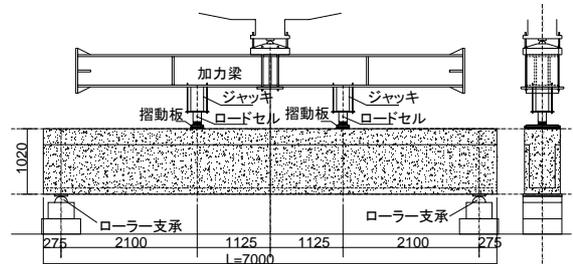


Fig.6 構造試験体の加力方法 (単位：[mm]) Loading Methods for Bending Test

試験体 U-PS の、加力終了時のひび割れ発生状況を Fig.9 に例示する。

試験体 U-A および U-B は、後打ち主筋(下端筋)の引張降伏後耐力が頭打ちとなった。一方、試験体 U-PS は、後打ち主筋の引張降伏後、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。

最終破壊時には、クリアビームと後打ちコンクリートとの打ち継ぎ部となる境界面で、ヘアクラックが部分的に観察された。しかしながら、ひび割れ幅の拡大は生じておらず、最終破壊時まで両者の一体性は保たれてい

たと考えられる。

3.5 結果の検討

3.5.1 荷重-変形関係 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 Fig.8 に示している。解析における材料特性は2章と同様としたが、コアコンクリートの - 関係については、あ

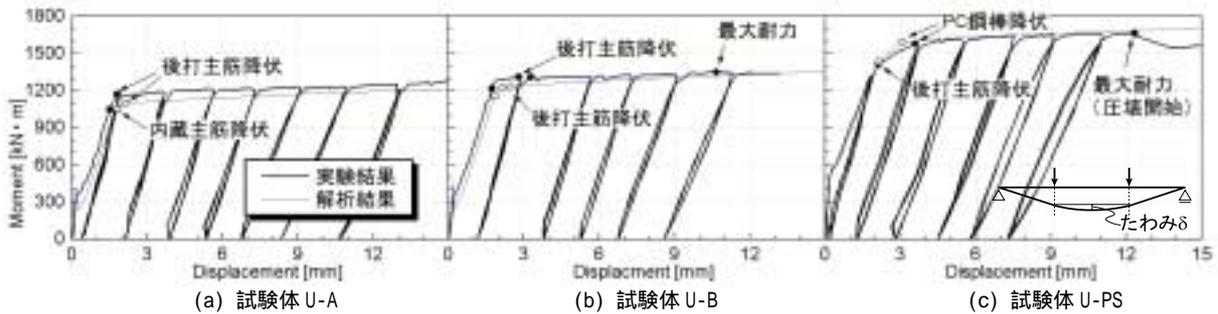


Fig.8 実験結果（荷重-変形関係）
Load – Displacement Relations

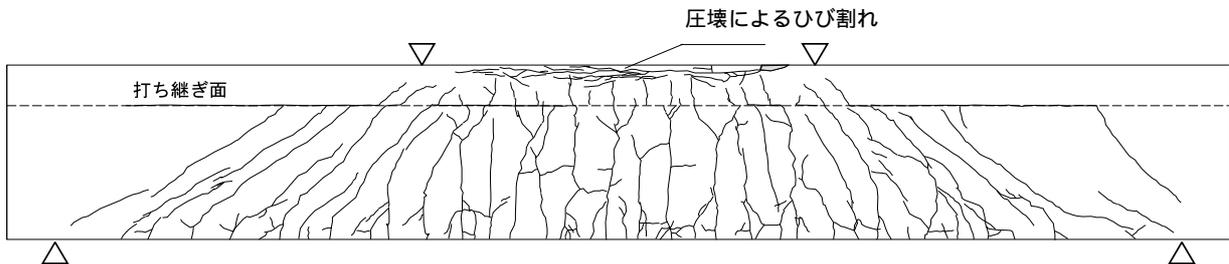


Fig.9 最終破壊状況
Final State of Specimen U-PS

Table 5 構造試験体実験結果一覧（曲げモーメントで表示）
Results of Bending Test

		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 (後打ち主筋)	1220 (一段目主筋) ^{*3)} 1230 (二段目主筋) ^{*3)}	1430 (後打ち主筋) 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ひずみ度 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。

ら筋の拘束効果を考慮した修正 Kent-Park モデル¹⁾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ひずみに達した時、および圧縮縁ひずみ度が0.3%に達した時として求めた。解析結果は、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よい。

3.5.2 プレストレスの効果 Fig.10は、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 ($\delta_{res}/\delta_{peak}$ [%]) を縦軸にとり示したものである。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、PC 鋼棒降伏 ($\delta_{peak}=3\text{mm}$) 以前では 1/2 ~ 2/3 倍程度と残留変形が小さく、プレストレス導入の効果が観察された。

3.5.3 荷重時ひずみ分布 試験体 U-PS の断面解析では、プレストレス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ひずみ度を与え、その後の荷重では、中立軸からの距離に比例させてひずみ度増分を与える方法で解析を行った (Fig.11)。実験時に測定したひずみ分布と、上述の断面解析結果を比較して Fig.12 に示す。図は、モーメント ([kN・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、外殻部と中央部のひずみ分布の解析結果と実験結果はよく対応しており、荷重時ひずみ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、クリアビーム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

通常の RC 梁部材から、SI 建築を視野に入れたロングスパン架構までを対象とする外殻プレキャスト「クリアビーム」を開発した。

クリアビームの型枠性能確認実験では以下の知見を得た。

(1) 側圧試験、外殻曲げ試験ともに、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。この評価式により、打込み側圧および施工荷重に対して必要な型枠性能を有するクリアビームの設計が可能である。

クリアビームを用いた梁の構造性能確認実験では以下の知見が得られた。

(2) 試験体 U-A, U-B においては、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。一方、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。

(3) プレストレスを導入したクリアビームを用いた試験体は、残留変形が小さいなどの効果が確認できた。

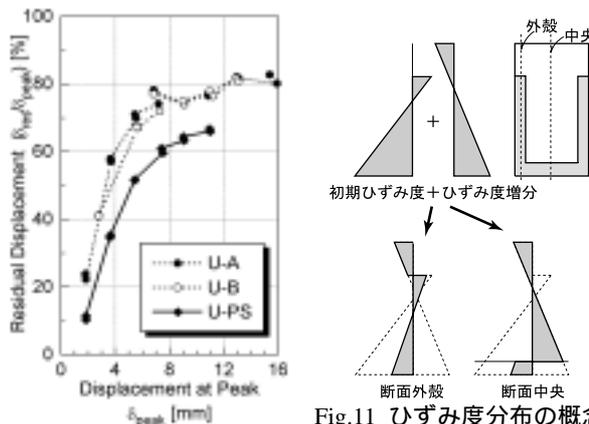


Fig.10 残留変形 Remained Deformation

Fig.11 ひずみ度分布の概念図 Outline of Strain Distribution on Prestressed Members Section

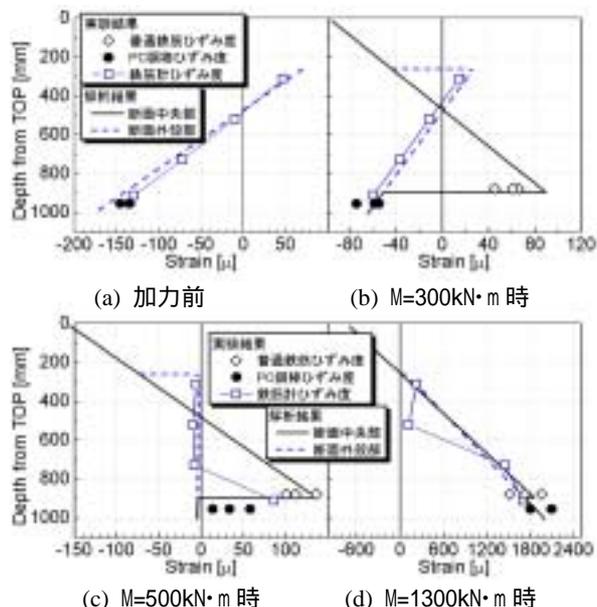


Fig.12 断面内のひずみ度分布 Strain Distribution of U-PS Section

また、その断面解析では、プレテンションによる初期ひずみを考慮することで、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) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 日本建築学会, 1998

