

プレキャストセグメントはりの曲げせん断特性に関する実験的研究

伊藤 忠彦^{*1}・山口 隆裕^{*2}・池田 尚治^{*3}

1. はじめに

近年、建設工事の施工合理化や熟練労働者不足の対策の一つとして、プレキャストセグメント工法による橋梁建設が注目されている。我が国においては、1966年に首都高速度道路公団の目黒架道橋で本工法が本格的に採用されて以来、現在まで25橋以上の施工実績(箱桁橋)¹⁾があり、日本道路公団の重信川高架橋では内外ケーブル併用方式で本工法が計画され現在施工中²⁾である。

プレキャストセグメントはりは、セグメント接合面で部材内の軸方向鉄筋が不連続となる特徴を有する。したがって、現行の設計法^{3),4)}では、接合面が活荷重作用下でフルプレストレス状態、過載活荷重作用下でもコンクリートの許容曲げ引張応力度以下と厳しくすることで、一体打ち構造のはりと同等の供用性を持つと評価されている。また、破壊安全度の検討はセグメント接合面を無視した一体打ち構造のほりを基本とし、別途終局荷重に対する接合キーの検討が規定されている。しかし、フルプレストレスで設計されたはりでも、供用限界状態の荷重設定が過小であったり、支点の不等沈下や地震等が発生した場合は、セグメント接合面近傍に曲げひび割れが集中して発生する可能性がある。この場合、プレキャストセグメントはりは、ひび割れ幅制御の機能を有する軸方向鉄筋が不連続であるため、一体打ち構造のはりとは異なった挙動を示すと思われる。これらに関する研究は海外において古くから行われていた⁵⁾が、最近では国内においても活発に行われるようになり^{6),7)}、プレキャストセグメントはりの曲げ挙動に関する研究成果が報告されている。しかし、せん断挙動に関する研究は未だ少ないのが現状であり、これらの実験的資料の蓄積が今後のプレキャストセグメント工法の発展に必要な不可欠と思われる。

本論文は、筆者らがプレキャストセグメントはりの曲げせん断特性を明らかにすることを目的として行った実験結果^{8)~11)}と、その解析的検討を中心にとりまとめた

ものである。

2. 実験方法

2.1 供試体

一般に、プレストレスコンクリート(以下、PC)橋主桁の断面形状は、T形、I形または箱桁等とすることが多く、鉄筋コンクリート(以下、RC)構造と比べウェブが薄くなっている。したがって、本研究ではこのような実際の構造物の断面形状を考慮して、ウェブの厚さを10cmと薄くしたT形断面はりで実験を行うことにした。

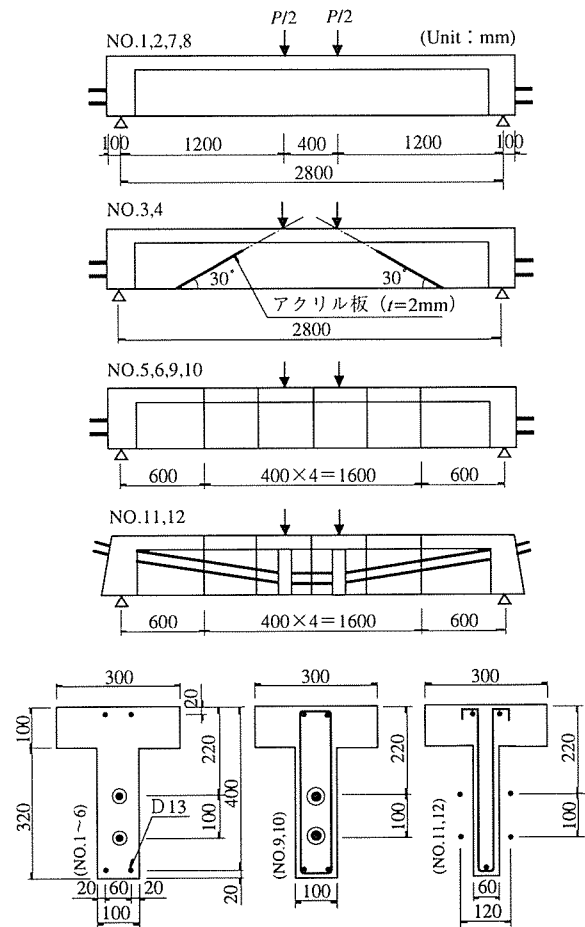


図-1 供試体形状寸法

*1 Tadahiko ITO : 横浜国立大学大学院 工学研究科 (西松建設(株)技術研究所在籍)

*2 Takahiro YAMAGUCHI : 横浜国立大学 工学部建設学科 助手

*3 Shoji IKEDA : 横浜国立大学 工学部建設学科 教授

◇論文◇

図-1に実験供試体の形状寸法一覧を示す。供試体の形状寸法のうち、フランジ幅 30 cm, はり高 42 cm, スパン 280 cm はすべての供試体で共通である。表-1に実験ケース一覧を示す。供試体は全部で 12 体であり、シリーズ I と II は、それぞれ実験時期が約 1 年異なっている。供試体は、PC 緊張材をウェブ内側に 2 本配置した供試体 NO. 1~10 (以下、内ケーブル供試体) と、ウェブ外側に 4 本配置した供試体 NO. 11, 12 (以下、外ケーブル供試体) があり、外ケーブル供試体はウェブ厚を 6 cm にしている。これは緊張材を外ケーブル配置とすることで、一般にウェブ厚を減少できることを考慮したものである。なお、外ケーブル緊張材はディビエータを設けて曲上げ配置 (5.5°) するため、PC 鋼 7 本より線を使用した。ディビエータは RC 構造であり、載荷点下のフランジおよびウェブと一体構造とした。また、内ケーブル緊張材は PC 鋼棒を使用してウェブ内に直線配置した。内ケーブル供試体は緊張材とコンクリートとの間に付着がある供試体 (以下、ボンドはり) と、付着がない供試体 (以下、アンボンドはり) の 2 種類がある。表-1 に示した付着の欄の記号 B はボンドはりを示し、記号 UB はアンボンドはりを示す。また、記号 EX は外ケーブル供試体を示す。同様に、供試体名の最初の記号 M は一体打ちはりを示し、記号 S はプレキャストセグメントはりを示す。プレキャストセグメントはり供試体は、図-1 に示したように 6 個のセグメントで構成されており、スパン中央部にセグメント接合面を有する構造となっている。今回の実験では、セグメント接合面はドライジョイントとしており、接合面に接合キー等は全く設けなかった。したがって、本供試体はせん断に対

して危険側の接合条件となっている。また、ドライジョイントとしているため、はり上縁には引張応力が発生しないように緊張力を定めた。写真-1 にプレキャストセグメントはり供試体の接合前の状況を示す。なお、今回の供試体はすべて計算せん断耐力が計算曲げ耐力を下回るように計画されている。

シリーズ I の供試体 No. 3, 4 は、はりのせん断区間のウェブ部分 2 ヶ所にアクリル板 ($t=2$ mm) を断面図心位置から下方へ傾き 30° で埋め込んだ供試体である。これは、コンクリートの初期欠陥ひび割れを模擬したもの (以下、初期欠陥供試体) であり、予めウェブコンクリートに斜めひび割れが発生した場合を想定している。一般に、コンクリートの初期欠陥ひび割れは、施工状況や養生条件により様々な形態が考えられるが、今回の実験では、せん断に対して不利な条件となる上記のような斜めひび割れを初期欠陥ひび割れとした。なお、軸方向鉄筋はアクリル板位置で連続しており、アクリル板にはコンクリート打込み前にグリースを塗布しておいた。ま

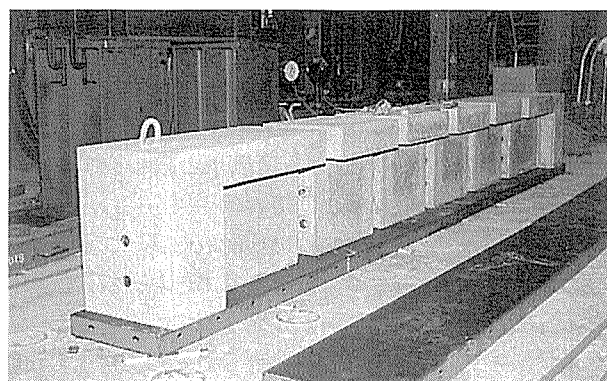


写真-1 接合前のプレキャストセグメント供試体

表-1 実験ケース一覧

シリーズ	NO.	供試体名*1	付着	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	下縁プレストレス (kgf/cm ²)	緊張材	引張鉄筋 (鉄筋比)	スターラップ (鉄筋比)					
I	1	M-B 100	B	400	100	φ17 (C種1号)	2 D 13 (0.63%)	なし					
	2	M-UB 100	UB										
	3	M-B 100-IDC	B										
	4	M-UB 100-IDC	UB										
	5	S-B 100	B										
	6	S-UB 100	UB										
II	7	M-B 100-NTR	B	400	100	φ17 (C種1号)	なし	なし					
	8	M-UB 100-NTR	UB										
	9	S-B 150	B	700	150	φ23 (C種1号)	2 D 13 (不連続)	D 6 @200 (0.32%)					
	10	S-UB 150	UB										
	11	S-EX 100	EX						400	100	φ12.4	1 D 13 (不連続)	D 6 @200 (0.53%)
	12	S-EX 150	EX										

*1: ○-△-□

○(はり構造)/M: 一体打ちはり, S: プレキャストセグメントはり

△(緊張材配置とプレストレス)/B: 内ケーブル付着あり, UB: 内ケーブル付着なし, EX: 外ケーブル

数字: 断面下縁の導入プレストレス (kgf/cm²)

□(特殊項目)/IDC (Initial Diagonal Crack): 初期欠陥, NTR (No Tensile Reinforcement): 引張鉄筋なし

た、プレキャストセグメントはりの接合面も、ある意味では部材軸直角方向の初期欠陥ひび割れと見なすことができると思われる。

2.2 実験要因

シリーズI（以下、I）は、PC はりの曲げせん断特性に与えるプレキャストセグメント化の影響および初期欠陥ひび割れの影響を一体打ちはりと比較するものである。Iのコンクリート強度および導入プレストレスは、表-1に示したように各供試体で共通であり、それぞれ400 kgf/cm² および 100 kgf/cm² である。ただし、既往の研究^{12),13)}により、RC および PC はりのせん断特性は、コンクリートと引張鋼材の間の付着性状に影響されることが報告されているため、今回の実験では上記の実験因子にそれぞれ緊張材の付着の有無を考慮することにした。また、Iの供試体はスターラップ等のせん断補強鉄筋を配置しなかった。

シリーズIIは、Iの実験結果を踏まえて計画されたものである。供試体 NO. 7, 8 は、一体打ちはりで軸方向引張鉄筋を省略したものであり、Iのプレキャストセグメントはりと比較するものである。したがって、コンクリート強度や導入プレストレス等はIと共通である。

供試体 NO. 9, 10 はプレキャストセグメントはりに圧縮強度 700 kgf/cm² の高強度コンクリートを使用して、Iの1.5倍のプレストレスを与えたものであり、はりの曲げせん断特性に与えるコンクリート強度およびプレストレスの影響を見るものである。したがって、使用する緊張材の径はIのそれと異なっている。また、本供試体はIに比べて破壊荷重が大きく脆性的な破壊をすることが予想されたので、はりのせん断区間にはスターラップを配置した。

供試体 NO. 11, 12 は、プレキャストセグメントはりに外ケーブルを組み合わせたものであり、はりの曲げせん断特性に与える外ケーブルの影響を見るものである。NO. 11のコンクリート強度や導入プレストレスはIと共通であるが、ウェブを薄くしている分だけ緊張力はIよりも少ない。また、NO. 12は圧縮強度 700 kgf/cm² の高強度コンクリートを使用して、NO. 11の1.5倍のプレストレスが与えられている。ただし、本供試体も脆性的な破壊を防止するため、はりのせん断区間にはス

ターラップを配置した。

2.3 供試体製作

プレキャストセグメントはりの製作方法には、マッチキャスト方式とセパレータ方式⁴⁾の2種類があるが、今回の供試体は後者の方法で製作した。内ケーブル供試体のプレストレス導入はコンクリート打込みから約2週間後に行い、外ケーブル供試体のそれは載荷直前となる約4週間後に行った。内ケーブル供試体はプレストレス導入後、すべてにグラウト注入を行った。ただし、アンボンドはりの緊張材は、事前に鋼棒表面にラップフィルムを巻きビニルテープで保護しておくことで、グラウト材との付着を切るようにした。なお、内ケーブル方式のプレキャストセグメント供試体は接合面からのグラウト漏れを防ぐため、予め接合面のシース孔周囲にシール材を薄く塗布しておいた。表-2に今回の実験に使用した材料試験結果をまとめて示す。実験に使用したコンクリートのスランプは8 cm、粗骨材最大寸法は20 mm、セメントは早強ポルトランドセメントである。

2.4 載荷方法

内ケーブル供試体は、グラウト注入から2週間後に載荷を開始したが、今回の実験では、グラウト養生期間中のクリープひずみ等の影響を把握するため、プレストレス導入時から載荷時まで6~12時間ごとに自動計測を行った。外ケーブル供試体はプレストレス導入後、直ちに載荷を行った。載荷方法は純曲げ区間40 cmの一方向繰返し2点載荷とした。繰返し載荷の除荷点は、①ひび割れ発生荷重、②鉄筋応力度 2 700 kgf/cm² に対応する荷重、③鉄筋降伏応力度に対応する荷重の3点とした。ただし、プレキャストセグメントはり供試体は、鉄筋の応力度による実験制御ができなため、①ひび割れ発生荷重、②中央変位 10 mm（たわみ支間比 1/280）の2点で繰返すことにした。

3. 実験結果と考察

3.1 ボンドはりの挙動

実験結果一覧を表-3にまとめて示す。なお、表-3に示した計算せん断耐力と計算曲げ耐力は、それぞれの材料試験値を用いて計算した。ただし、計算せん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書¹⁴⁾に規定されたコン

表-2 材料試験結果一覧

(kgf/cm²)

シリーズ	供試体 NO.	コンクリート			PC 緊張材				グラウト強度
		圧縮強度	引張強度	弾性係数	種類	降伏強度	引張強度	弾性係数	
I	NO. 1~6	423	32.5	2.7×10 ⁵	φ17	11 800	13 000	2.0×10 ⁶	582
	NO. 7~8	476	31.4	2.7×10 ⁵		11 900	13 100		461
II	NO. 9~10	670	33.4	2.8×10 ⁵	φ23	12 000	13 100		—
	NO. 11	550	40.3	3.1×10 ⁵	φ12.4	16 600	18 500		
	NO. 12	728	44.8	3.3×10 ⁵	φ12.7	17 700	19 400		

表-3 実験結果一覧

(tf)

NO.	供試体名	曲げひび割れ	斜めひび割れ	鉄筋降伏	破壊荷重	破壊形態	計算せん断耐力 ^{*3}	計算曲げ耐力 ^{*4}
1	M-B 100	9.2	18.0	21.2	25.2	せん断	12.0	28.0
2	M-UB 100	9.1	25.0	17.9	26.5	せん断	12.0	22.0
3	M-B 100-IDC	9.1	8.1 ^{*1}	20.9	25.5	せん断	12.2	28.0
4	M-UB 100-IDC	9.2	8.3 ^{*1}	19.7	25.9	せん断	12.1	22.0
5	S-B 100	7.3	15.7	-	17.2	せん断	10.1	22.3
6	S-UB 100	7.2	18.4	-	18.4	せん断	10.0	16.1
7	M-UB 100-NTR	9.9	発生せず	-	24.2	曲げ引張	10.5	22.4
8	M-UB 100-NTR	9.6	発生せず	-	21.6	曲げ圧縮	10.3	16.0
9	S-B 150	13.8	17.8	-	28.7	せん断	14.5	40.0
10	S-UB 150	12.9	21.0	-	20.8	せん断	14.1	29.0
11	S-EX 100	5.9	発生せず	-	18.2	曲げ圧縮	6.40	18.2
12	S-EX 150	7.9	発生せず	-	20.8	曲げ圧縮	7.68	21.0

*1: コンクリート初期欠陥部分の開口

*2: $f_{sy}=3\ 910\ \text{kgf/cm}^2$ (SD 345)

*3: コンクリートが受け持つせん断耐力(土木学会コンクリート標準示方書)

*4: アンボンドはりおよび外ケーブルはりは緊張材の降伏強度を30%減じて計算した値

クリートが受け持つせん断耐力であり、プレストレスによって発生する断面下縁の圧縮応力を打ち消すのに必要なモーメント(デコンプレッションモーメント)は実験値を用いた。また、アンボンドはりの計算曲げ耐力はPC緊張材の降伏強度を70%に減じて算定した。なお、今回の実験では、供試体N0.7を除きPC緊張材は降伏しなかった。

シリーズIのボンドはり(M-B 100, M-B 100-IDC, S-B 100)の荷重たわみ曲線を図-2に示す。図中の矢印はせん断区間のウェブコンクリートに初めて斜めひび割れが発生した時期を示し、●印は鉄筋が降伏した時期を示す。

一体打ち供試体(M-B 100)は、計算せん断耐力の約1.5倍の荷重で明確な斜めひび割れが発生して一時的に荷重が低下したが、M-B 100はその後も荷重増加に耐え、鉄筋降伏後に斜めひび割れが支点付近へと延びた。

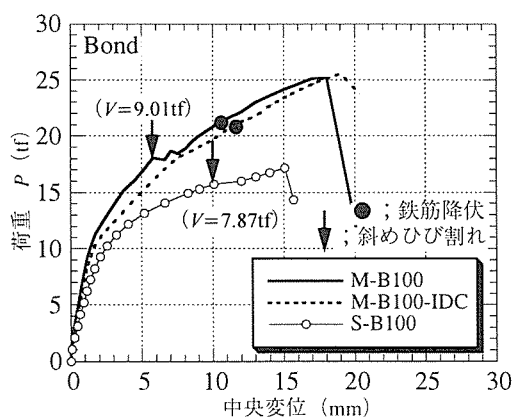
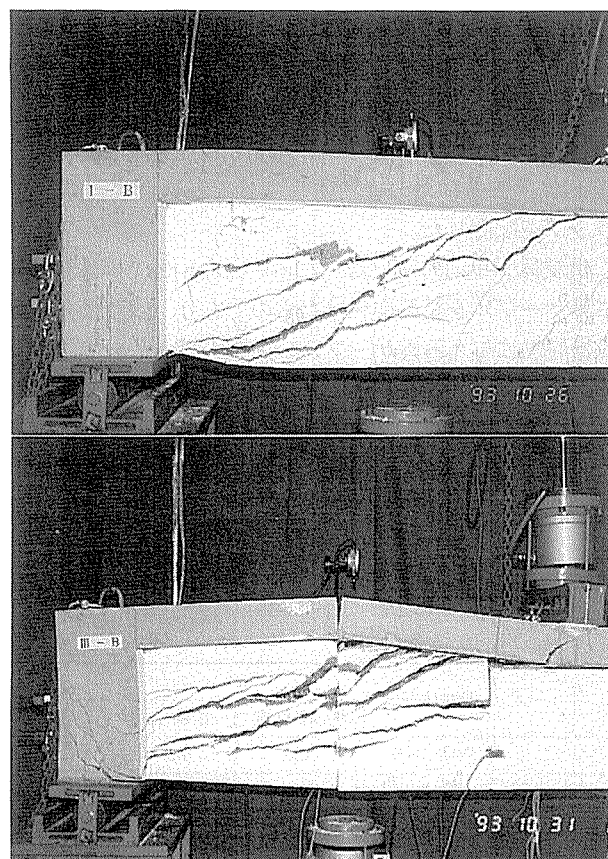


図-2 ボンドはりの荷重たわみ曲線

最終的な破壊形態はウェブコンクリートの圧縮ストラットが消滅したことによるせん断破壊(写真-2上)であった。

初期欠陥供試体(M-B 100-IDC)は、スパン中央部の曲げひび割れ発生よりも、アクリル板によるコンク

上: M-B 100 下: S-B 100
写真-2 ボンドはりの破壊状況

リート初期欠陥部分の開口が早期に生じて、はりの初期剛性が M-B 100 に比べて約 15% 小さくなった。しかし、曲げひび割れ発生後の剛性は M-B 100 と同程度であり、鉄筋降伏荷重および破壊荷重はそれぞれ M-B 100 と等しくなった。また、最終的な破壊形態は初期欠陥部分の外側（支点側）にも斜めひび割れが発生して M-B 100 と似たものとなった。したがって、PC はりにおけるこの種のコンクリート初期欠陥は、はりの初期剛性に若干の影響を及ぼす程度であることが明らかとなった。

プレキャストセグメント供試体 (S-B 100) は、接合面をドライジョイントとしているため、曲げひび割れ（セグメント開口）発生荷重が M-B 100 に比べて約 20% 小さくなった。ただし、これはコンクリートの引張強度を無視した計算値と一致する。また、S-B 100 は計算せん断耐力の約 1.6 倍の荷重で明確な斜めひび割れがセグメント内に発生したが、斜めひび割れ発生後も若干の荷重増加に耐え、その後、新たな斜めひび割れが接合面を挟んで連続的に発生して荷重が低下した。最終的な破壊形態は M-B 100 と類似なせん断破壊（写真-2 下）となった。S-B 100 の斜めひび割れ発生荷重および破壊荷重は、M-B100 と比較すると、それぞれ約 15% および約 30% 小さくなった。なお、今回の実験で S-B 100 の初期剛性は M-B 100 の約 70% であったが、これは供試体をマッチキャスト方式で製作していないため接合面の精度が影響したものと思われる。

3.2 アンボンドはりの挙動

シリーズ I のアンボンドはり (M-UB 100, M-UB 100-IDC, S-UB 100) の荷重たわみ曲線を図-3 に示す。M-UB 100 と M-B 100 を比較すると、曲げひび割れ発生荷重は同じであったが、M-UB 100 の方が曲げひび割れ発生後の剛性が若干小さくなり鉄筋降伏荷重が約 15% 小さくなった。しかし、M-UB 100 は鉄筋降伏荷重に至るまでに斜めひび割れは観察されず、計算せん断耐力の約 2.1 倍の荷重で支点近くのウェブコンクリート

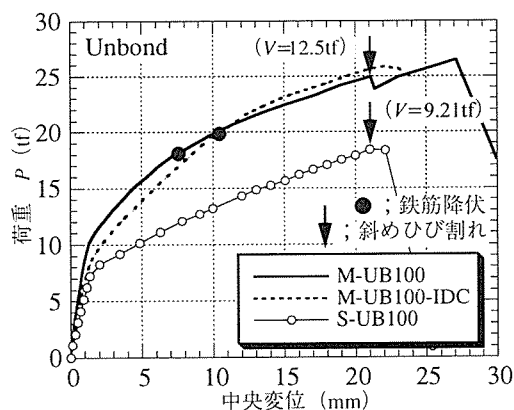
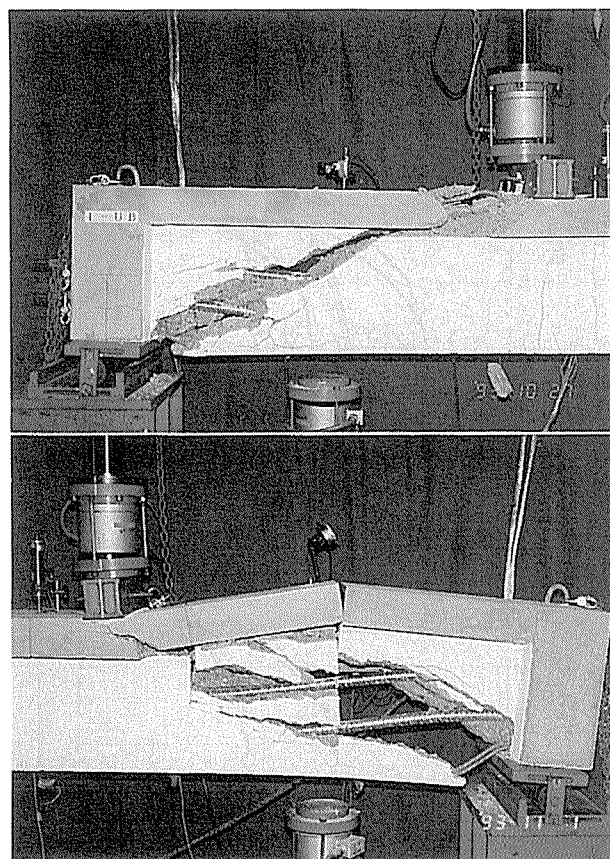


図-3 アンボンドはりの荷重たわみ曲線

に斜めひび割れが複数発生して荷重が低下した。その後さらに変形を加えたところ、M-UB 100 は斜めひび割れ上部のフランジコンクリートが爆裂音とともに急激なせん断破壊（写真-3 上）をした。このように、一体打ちはりには付着の有無でせん断破壊に至る挙動が全く異なり、鉄筋コンクリートはりの場合と同様¹²⁾に、せん断に対してはアンボンドはりの方が斜めひび割れが発生し難い構造であることが示された。

M-UB 100-IDC は M-B 100-IDC と比較すると、表-3 に示したように、鉄筋降伏荷重等に付着の差は認められなかった。したがって、M-UB 100-IDC の鉄筋降伏荷重は M-UB 100 よりも大きくなった。また、M-UB 100-IDC は初期欠陥部分の外側（支点側）に斜めひび割れは発生せず、最終的には初期欠陥上部のフランジコンクリートが圧壊した。

S-UB 100 は、S-B 100 で観察されたようなセグメント内の斜めひび割れは発生せず、計算せん断耐力の約 1.8 倍の荷重で支点近くのウェブコンクリートに斜めひび割れが発生した。その後、若干の変形を加えたところ、S-UB 100 は、荷重保持中に大きな爆裂音とともに急激なせん断破壊（写真-3 下）をした。したがって、最終的な破壊形態は M-UB 100 と似かよったものと



上：M-UB 100 下：S-UB 100
写真-3 アンボンドはりの破壊状況

◇論文◇

なった。S-UB 100 の曲げひび割れ（セグメント開口）発生荷重，斜めひび割れ発生荷重および破壊荷重は，M-UB 100 と比較すると，それぞれ約 20%，約 35 % および約 30% 小さくなった。同様に S-B 100 と比較すると，セグメント開口荷重は同じであったが，斜めひび割れ発生荷重と破壊荷重は S-B 100 よりも大きくなった。したがって，プレキャストセグメントはりにおいても，せん断に対してはアンボンドはりの方が有利であることが示された。ただし，セグメント開口後のたわみは S-UB 100 の方が S-B 100 の約 1.5～2 倍大きくなった。

3.3 プレキャストセグメントはりの PC 緊張材の局部的な緊張力の減少

ボンドはり（S-B 100）の span 中央部（セグメント接合面）における PC 緊張材のひずみ変化を図-4 に示す。また，図-4 には後述する有限要素法による解析結果も示す。今回の実験では，S-B 100 の緊張材ひずみはセグメント接合面開口後の除荷時に初期緊張ひずみより減少するという特異な挙動が観察されたが，これは接合面が開口するとセグメント接合面近傍で緊張材とグラウト材との間に局部的な付着劣化（すべり）が生じたことによる影響と思われる。また，この現象はセグメント間の PC 緊張材の局部的な緊張力が除荷後に減少すること

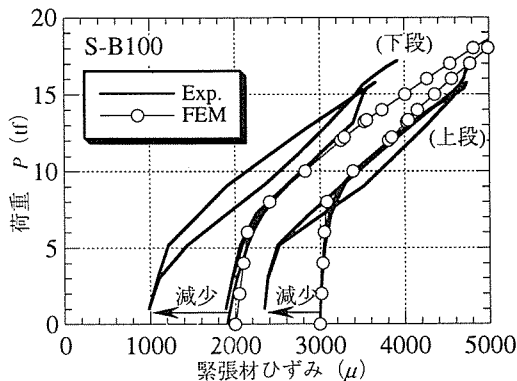


図-4 PC 緊張材の荷重とひずみの関係 (S-B 100)

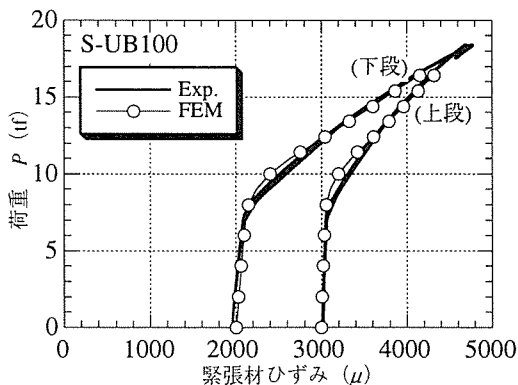


図-5 PC 緊張材の荷重とひずみの関係 (S-UB 100)

を意味している。今回の実験では，この局部的な緊張力の減少によって，再載荷時のセグメント開口荷重は約 30% 低下したのである。したがって，曲げひび割れの発生を許容しない現行のプレキャストセグメントはりの設計法は妥当であると思われる。なお，アンボンドはり（S-UB 100）では，全くこのような現象は見られなかった。図-5 に S-UB 100 における PC 緊張材のひずみ変化を示す。

3.4 セグメント接合面近傍の局部的なコンクリート圧縮応力度の増加

一体打ち供試体（M-B 100，M-UB 100）とプレキャストセグメント供試体（S-B 100，S-UB 100）の span 中央部におけるコンクリート圧縮縁ひずみの実験結果を図-6 に示す。ひずみの値は曲げひび割れ（セグメント開口）発生荷重までは 4 つの供試体で差は少なかったが，それ以降は構造形式および付着の有無で大幅に異なっていた。すなわち，コンクリートの曲げ圧縮ひずみは，曲げひび割れ発生後の同一荷重で比較すると，一体打ち供試体よりもプレキャストセグメント供試体の方が大きく，同じ構造形式ならば，ボンドはりよりもアンボンドはりの方が大きくなった。付着の有無による影響は，一体打ち供試体では鉄筋降伏荷重以降で明確に認められるようになったが，プレキャストセグメント供試体ではセグメント開口直後から顕著に認められた。したがって，プレキャストセグメントはりでは，接合面開口後の接合面近傍の圧縮縁コンクリートに局部的な応力が増加するので，この点を留意することが必要である。

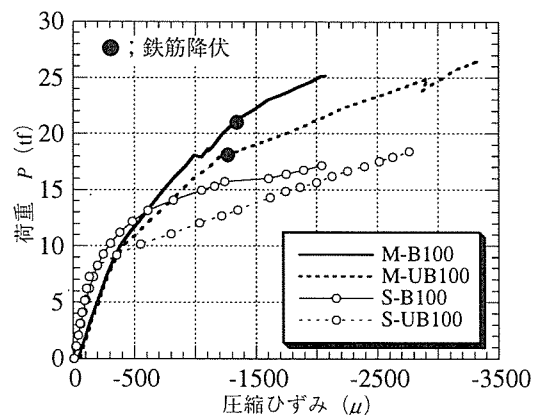


図-6 セグメント接合面近傍の圧縮縁ひずみと一体打ち供試体の圧縮縁ひずみの比較

3.5 プレキャストセグメント相互の一体性

プレキャストセグメント接合面におけるセグメント相互の相対的な鉛直変位（以下，ズレ）の計測結果を図-7 (a)，(b) に示す。今回の実験では，セグメントのズレはボンドはりの方がアンボンドはりより大きくなっていったが，その量は破壊直前でも 0.3 mm 程度と極めて

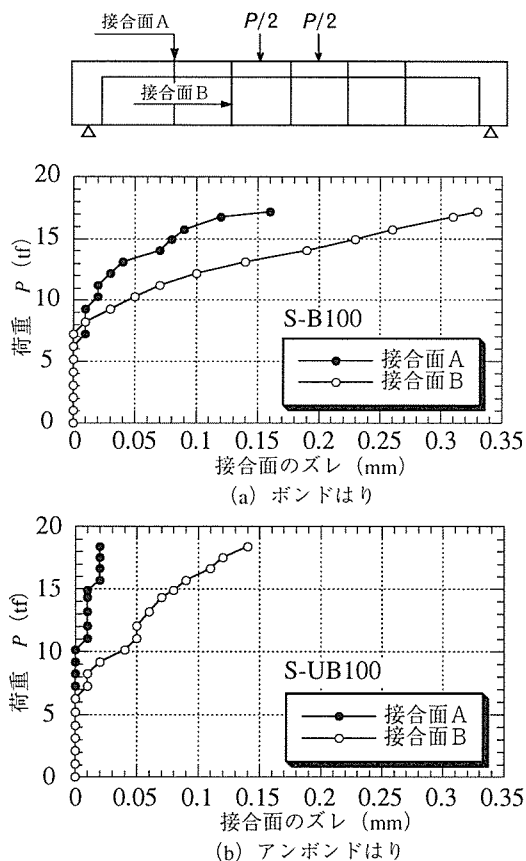


図-7 セグメント相互の相対的鉛直変位

小さいものであった。また、せん断破壊面は写真-2, 3に示したようにセグメント間で連続しているため、今回のような接合キーを設けないドライジョイントであっても、セグメント相互の一体性は破壊まで十分保たれていたと思われる。ボンドはりのズレがアンボンドはりよりも大きくなった理由は、ボンドはりではPC緊張材の付着による影響でセグメントの開口が各接合面に分散するのに対し、アンボンドはりではスパン中央部の接合面にのみ開口が集中するため、アンボンドはりの方がセグメント間のズレが生じ難かったものと思われる。この付着の有無による接合面開口状況の違いは、後述する非線形有限要素法の解析結果(図-17)にも示されている。また、セグメント接合面のズレは10 tf程度($V/b_w h = 12 \text{ kgf/cm}^2$)で生じていたが、この結果からセグメント間の摩擦係数を計算すると $\mu = 0.2$ 程度となる。一般に、セグメント接合面に接合キーを設けて接着剤を塗布する処理をすれば、摩擦係数は $\mu = 0.9$ 程度⁴⁾となるため、実際の構造物は極めて安全側になっていると思われる。

3.6 高強度コンクリートを使用したプレキャストセグメントはりの挙動

シリーズIIのプレキャストセグメントはりに高強度コンクリートを使用した供試体(S-B 150, S-UB 150)の荷重たわみ曲線を図-8 (a), (b)に示す。(a)および

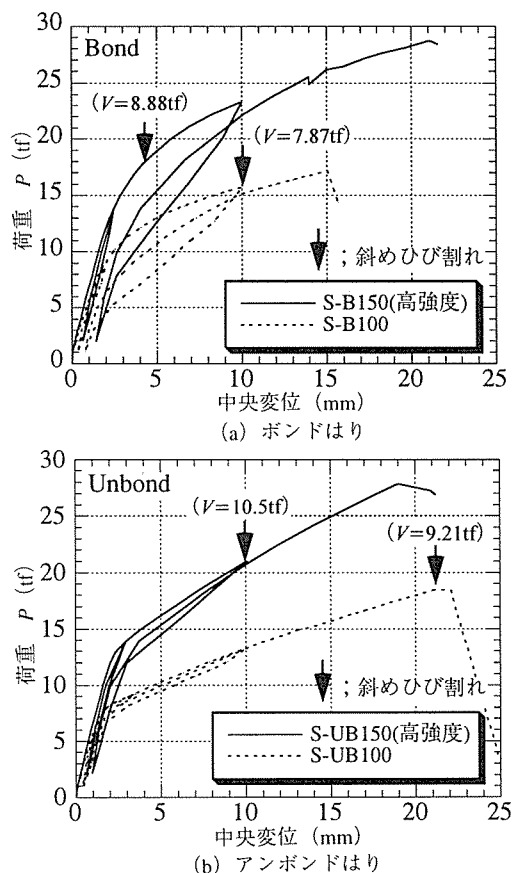


図-8 高強度コンクリートを用いたプレキャストセグメントはりの荷重たわみ曲線

(b)には比較のため、それぞれシリーズIのS-B 100およびS-UB 100の結果も示してある。供試体S-B 150およびS-UB 150は、高強度コンクリートを用いた部材の特性¹⁵⁾を生かすために、導入プレストレスをS-B 100およびS-UB 100より大きくしている。

ボンドはり(S-B 150)は、コンクリートが分担する計算せん断耐力の約1.2倍の荷重でせん断区間に付着ひび割れが斜めに発生し、約1.6倍の荷重で明確な斜めひび割れに成長した。しかし、S-B 150はスターラップを配置してあるため直ちに破壊には至らず、その後も荷重増加に耐えた。最終的な破壊は斜めひび割れ上部にあたるスパン中央部のフランジコンクリートの圧壊であった。S-B 100と比較すると、S-B 150の斜めひび割れ発生荷重および破壊荷重は、それぞれ約15%および約65%大きくなった。

アンボンドはり(S-UB 150)は、計算せん断耐力の約1.5倍の荷重で支点付近のウェブコンクリートに斜めひび割れがPC緊張材位置に沿って複数発生した。しかし、S-UB 150はS-B 150と同様に直ちに破壊には至らず、最終的な破壊状況はS-B 150と同様であった。S-UB 100と比較すると、S-UB 150の斜めひび割れ発生荷重および破壊荷重は、それぞれ約15%および約50

◇論文◇

% 大きくなった。したがって、高強度コンクリートを用いて導入プレストレスを大きくすると、供用性能の向上とともにせん断に対する安全度が改善できることが確認された。なお、これらに関するせん断耐力の評価は、後の表-4 にまとめて示す。また、S-B 150 および S-UB 150 は斜めひび割れが発生後も荷重の増加が認められ、プレキャストセグメントはりにおいても、スタラップが有効に機能することが明らかとなった。また、S-B 150 および S-UB 150 の破壊性状は、シリーズ I に比べて極めて穏やかであった。

3.7 緊張材を外ケーブル配置したプレキャストセグメントはりの挙動

プレキャストセグメントはりの緊張材を外ケーブル配置とした供試体 (S-EX 100, S-EX 150) の荷重たわみ曲線を図-9 に示す。なお、図-9 には比較のため S-UB 100 の実験結果も示してある。S-EX 100 および S-EX 150 は外ケーブル構造の利点を考慮して、ウェブ厚を S-UB 100 より 40% 薄くしたのであるが、せん断区間に斜めひび割れは全く発生せず、両供試体ともにスパン中央部の圧縮縁コンクリートが圧壊した。今回の実験では、S-EX 100 と S-EX 150 で最終破壊形態に差は見られなかった。また、緊張材の内外配置方式の違いで斜め

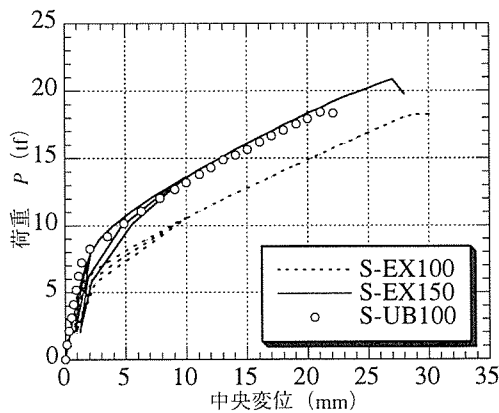


図-9 外ケーブルを用いたプレキャストセグメントはりの荷重たわみ曲線

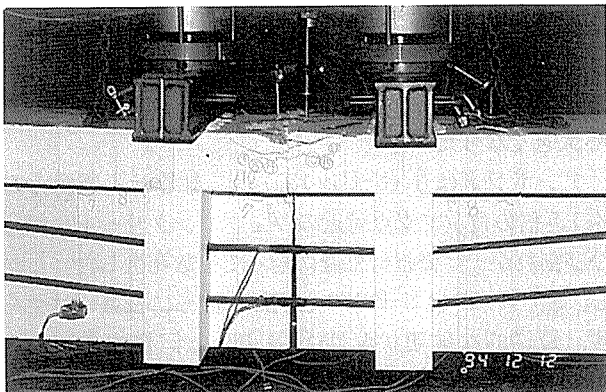


写真-4 外ケーブル供試体 (S-EX 150) の破壊状況

ひび割れの発生状況が異なることが示された。ただし、S-EX 150 は S-EX 100 に比べてセグメント開口荷重および破壊荷重の増加が図られるため、供用性能および破壊安全度が向上することが確認された。写真-4 に S-EX 150 の破壊状況を示す。S-EX 150 のひび割れはスパン中央部のフランジ下面およびフランジ内部の水平方向に発生した。また、S-EX 150 は PC 緊張材量およびコンクリート断面積が S-UB 100 に比べ、それぞれ 13% および 21% 少ないが、その変形挙動は図-9 に示したように S-UB 100 と同等以上であった。

図-10 は外ケーブルの曲げ上げ配置によって発生する逆向きのせん断力が、はりの変形に伴って変化する状況を載荷せん断力と作用せん断力の関係で示したものである。ここに、 ΔT はせん断区間位置における外ケーブルの張力増加量を示し、 α は外ケーブルの曲げ上げ角度を示す。今回の実験では、作用せん断力はセグメント開口発生後から徐々に減少し始め、破壊直前でのそれは載荷せん断力の 80% 程度まで減少した。したがって、外ケーブルの曲げ上げ配置は、はりのせん断に対しても安全側の効果を与えていることが示された。なお、今回の実験における外ケーブルの張力増加量は 38~78 kgf/mm² であって、上段よりも下段に配置した緊張材の方が増加量は多くなった。

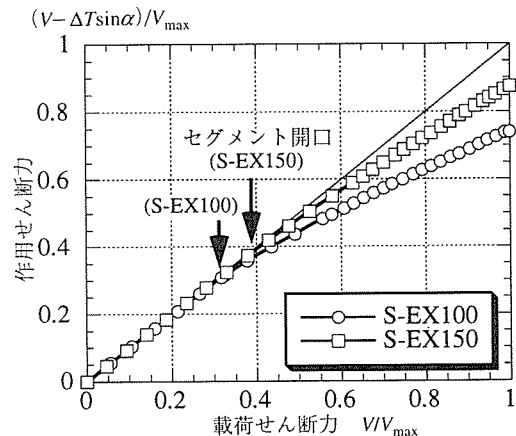


図-10 はりの変形に伴う作用せん断力の変化

3.8 せん断耐力の評価

一般に、プレストレスが与えられている部材は斜めひび割れの発生が鉄筋コンクリート部材に比較して遅れるため、せん断に対しては有利な構造である。土木学会のコンクリート標準示方書¹⁴⁾では、この有利な影響をデコンプレッションモーメント M_0 を使用した係数 β_n で考慮している。表-4 に示すせん断耐力の計算値 (A) は、式 (1)~(3) に示す示方書の式で計算した結果である。ただし、 M_0 は実験値から計算し、有効高さ d はコンクリート圧縮縁から引張鋼材 (一体打ちはりは引張鉄

表-4 せん断耐力の実験値と計算値の比較

(tf)

記号	実験値				計算値(A)*1					計算値(B)*2			計算値(C)*3			
	NO.	供試体名	斜めひび割れ V _c (①)	破壊 P _{max} /2 (②)	τ _m =②/ b _w d*4	V _c (③)	V _s (④)	V _p *5 (⑤)	①/③	② ③+④+⑤	V _{c2} (⑥)	①/⑥	② ⑥+④+⑤	斜めひび割れ (⑦)	①/⑦	破壊 (⑧)
1	M-B 100	9.01	12.6(せん断)	40	6.01	0	0	1.50	2.10	8.33	1.08	1.51	9.5	0.95	13.5	0.93
2	M-UB 100	12.5	13.2(せん断)	42	6.01	0	0	2.08	2.20	8.30	1.51	1.59	12.0	1.04	12.1	1.09
3	M-B 100-IDC	4.05*6	12.8(せん断)	40	6.08	0	0	-	2.11	8.29	-	1.54	-	-	-	-
4	M-UB 100-IDC	4.13*6	12.9(せん断)	41	6.05	0	0	-	2.13	8.34	-	1.55	-	-	-	-
5	S-B 100	7.87	8.58(せん断)	32	5.04	0	0	1.56	1.70	6.66	1.18	1.24	8.0	0.98	10.0	0.86
6	S-UB 100	9.21	9.21(せん断)	34	5.01	0	0	1.84	1.84	6.42	1.43	1.43	8.0	1.15	8.2	1.12
7	M-B 100-NTR	発生せず	12.1(曲げ)	45	5.24	0	0	-	>2.31	8.10	-	>1.49	-	-	-	-
8	M-B 100-NTR	発生せず	10.8(曲げ)	40	5.14	0	0	-	>2.10	7.91	-	>1.37	-	-	-	-
9	S-B 150	8.88	14.2(せん断)	53	7.25	3.08	0	1.23	1.37	11.2	0.79	0.99	-	-	-	-
10	S-UB 150	10.5	13.9(せん断)	51	7.04	3.08	0	1.49	1.37	10.7	0.98	1.01	-	-	-	-
11	S-EX 100	発生せず	9.12(曲げ)	56	3.20	3.08	1.66	-	>1.15	5.13	-	>0.92	-	-	-	-
12	S-EX 150	発生せず	10.4(曲げ)	64	3.84	3.08	2.35	-	>1.12	6.42	-	>0.88	-	-	-	-

*1: 土木学会コンクリート標準示方書による評価 *2: 提案による評価 *3: FEM 解析による評価

*4: 破壊時の平均せん断応力度 (kgf/cm²) *5: 変形による PC 緊張材の張力増分は含まない。 *6: アクリル板による初期欠陥部分の開口

筋と PC 緊張材、プレキャストセグメントははり PC 緊張材のみ)の重心位置までの距離とした。また、材料係数等の部分安全係数は全て 1.0 とし、プレキャストセグメントはりの計算では β_p の算定における軸方向鉄筋量 A_s は無視した。

$$V_c = 0.9 \beta_d \beta_p \beta_n (f'_c)^{1/3} \cdot b_w d \dots\dots\dots (1)$$

$$V_s = A_w f_w / s \cdot d / 1.15 \dots\dots\dots (2)$$

$$V_p = P_p \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

f'_c: コンクリート圧縮強度 (kgf/cm²)

b_w: ウェブ厚 (cm), d: 有効高さ (cm)

$$\beta_d = (100/d)^{1/4},$$

$$\beta_p = \{100(A_s + A_p) / b_w d\}^{1/3},$$

$$\beta_n = 1 + 2 M_0 / M_U$$

A_w: スターラップ断面積 (cm²)

f_w: スターラップ降伏強度 (=4 140 kgf/cm²)

s: スターラップ間隔 (cm)

P_p: 導入プレストレス力 (kgf)

α: 外ケーブル曲げ上げ角度

今回の実験では、せん断破壊となった供試体の斜めひび割れ発生荷重および破壊荷重を式 (1)~(3) で評価しても安全側であった。ただし、高強度コンクリートを使用した供試体 (S-B 150, S-UB 150) は、計算値の安全率が他と比べて低くなっていた。これは、実験に使用した高強度コンクリートの引張強度が乾燥収縮の影響で普通強度コンクリートのそれと差がなかったことによる影響と思われる。また、せん断補強鉄筋 (腹鉄筋) のないプレキャストセグメント供試体の斜めひび割れ発生荷重および破壊荷重の実験値は、同じプレストレスを与えた腹鉄筋のない一体打ち供試体のそれよりも小さくなって

いたが、せん断耐力の計算上からも引張鉄筋を無視することで同様の結果を得ることが示された。

今回の実験では、外ケーブル供試体 (S-EX 100, S-EX 150) および軸方向引張鉄筋を省略した供試体 (M-B 100-NTR, M-UB 100-NTR) がせん断破壊をしなかったが、計算値 (A) は少なくともこれらのせん断耐力を安全側に評価していることがわかった。

また、表-4 に示した計算値 (B) は、コンクリートが分担するせん断耐力を式 (4) で評価したものである。

$$V_{C2} = 0.9 \beta_d \beta_p (f'_c)^{1/3} \cdot b_w d + M_C / a \dots\dots (4)$$

ここに、

M_C: ひび割れ発生モーメント (kgf・cm)

a: はりのせん断スパン長 (cm)

式 (4) はプレストレスによる有利な影響を係数 β_n で考慮する代わりに、直接 M_C/a を加算して評価したものである。ここで、M_C/a は曲げひび割れが発生するまでの増加せん断力を表す。計算値 (B) は (A) よりも比較的良好にせん断耐力を評価した。また、計算値 (B) による外ケーブル供試体のせん断耐力は、実験曲げ耐力を上回った。なお、実際の設計ではせん断スパン長 a を特定できないため、これを有効高さ d で示すのがよいと思われる。ちなみに、今回の実験では、一体打ち供試体は a=3.8 d、プレキャストセグメント供試体は引張鉄筋を無視すると a=4.4 d であった。なお、計算値 (C) は以下に述べる非線形有限要素法による解析結果である。

4. 非線形有限要素法による解析結果と考察

4.1 解析モデルおよび解析方法

今回の解析は非線形有限要素法 (以下、FEM) を用いた汎用構造解析プログラム (ADINA) によって行っ

た。解析対象としたのは、シリーズ I の一体打ち供試体 (M-B 100, M-UB 100) およびプレキャストセグメント供試体 (S-B 100, S-UB 100) の 4 体である。本解析において、コンクリートは 9 節点平面応力要素、軸方向鉄筋はトラス要素、PC 緊張材 (鋼棒) はビーム要素を使用した。緊張材をビーム要素としたのは、鋼棒のプレキャストセグメント接合面でのせん断力の伝達 (ダウエル作用) を考慮するためである。プレキャストセグメントはりの解析は、接合面がドライジョイントであることを考慮するため、セグメント接合面に接触要素を用いた。本解析の接触要素は、圧縮応力作用時には接触両面の平面形状を一致させながら接触力 (法線方向圧縮力と接線方向摩擦力) を伝達し、引張応力作用時には力の伝達はしないというものである。ここで、接触要素間の摩擦係数は実験結果から $\mu=0.2$ とした。図-11 に各材料の解析モデルを示す。

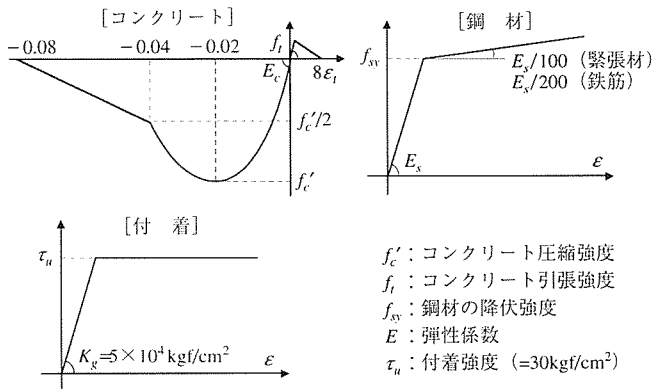


図-11 解析モデル

解析方法は最初の荷重ステップで自重およびプレストレスを与え、次にボンドはりのみ付着を表す非線形バネ要素でコンクリート節点と緊張材節点を各々結合する。その後、解析は鉛直荷重をゼロから逐次漸増させる方法として、今回は繰返し載荷の計算は行っていない。ただし、付着を表す非線形バネ要素は PC 緊張材と平行方向にのみ考慮して、鉛直方向はコンクリートと緊張材が同一変形するものとした。なお、解析は部材および荷重の対称性から、はりの右半分のみをモデル化して行った。

4.2 一体打ち供試体の解析結果

M-B 100 および M-UB 100 の解析結果を図-12 に示す。解析値は M-B 100 の斜めひび割れ発生後の剛性を若干高めに評価したが、全体的な挙動は実験結果と良く一致している。特に解析値は M-B 100 の実験で観察された明確な斜めひび割れの発生や、M-UB 100 の実験で示された軸方向鉄筋降伏荷重の低下といった特徴的な挙動と極めて良く一致した。図-13 は一体打ち供試体のスパン中央部における軸方向鉄筋および PC 緊張材のひずみ変化を示したものである。曲げひび割れ発生後の同

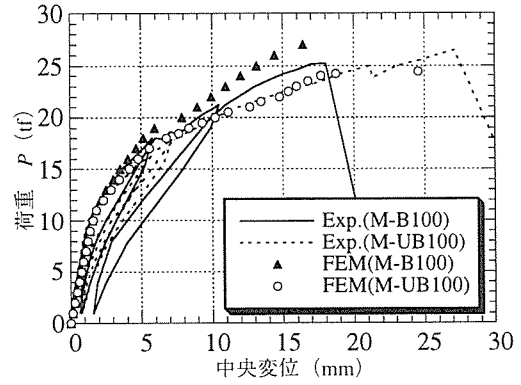


図-12 一体打ちはりの解析による荷重たわみ曲線

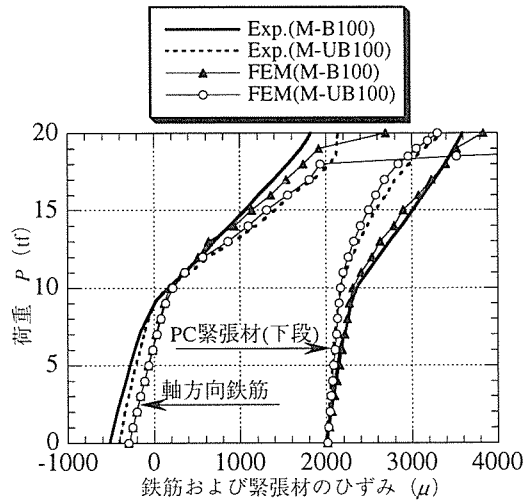
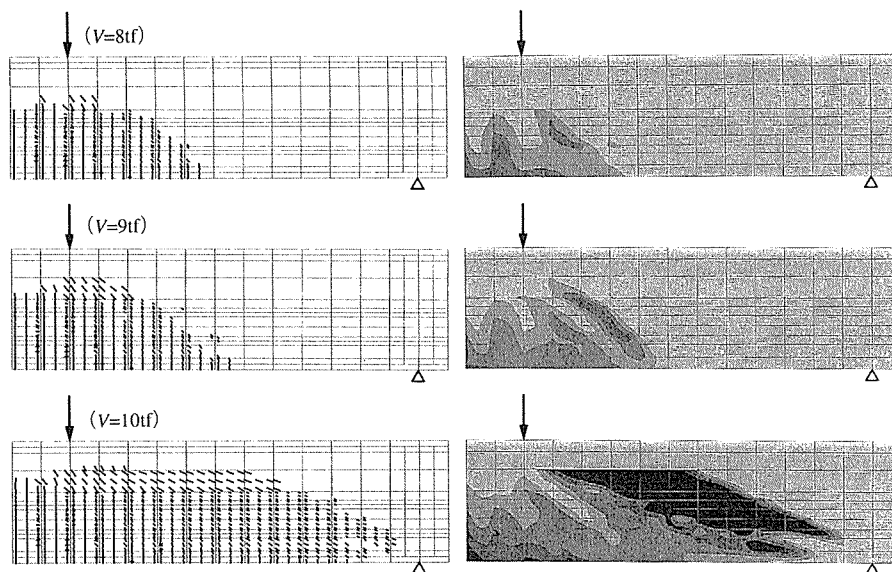


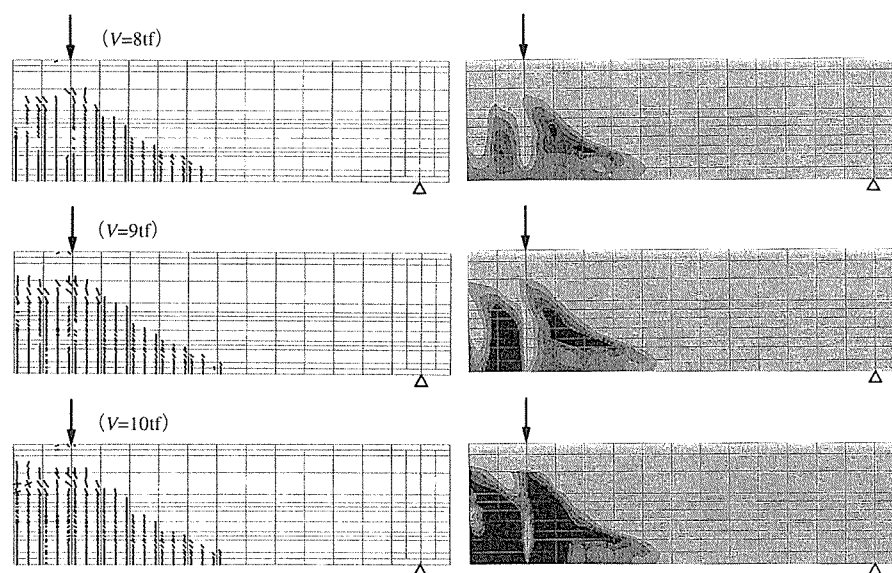
図-13 一体打ちはりの荷重と鉄筋ひずみおよび緊張材ひずみの関係

一荷重における各々のひずみに着目すると、PC 緊張材のひずみは付着のない M-UB 100 の方が当然小さくなるが、鉄筋のひずみは逆に M-UB 100 の方が大きく、解析値も同様な結果を示していた。したがって、M-UB 100 の鉄筋降伏荷重が M-B 100 よりも低下した理由は、M-UB 100 の曲げひび割れ発生後の鉄筋の応力負担が M-B 100 より増加するためであることが明らかとなった。

図-14 (a) および (b) に示す解析結果は、M-B 100 の実験で明確な斜めひび割れの発生が観察された荷重前後に対応するひび割れ図および主引張ひずみのコンター図である。ただし、コンター図は色が濃いほど大きな引張ひずみが生じていることを示す。M-B 100 は荷重の増加に伴い引張ひずみが曲げ区間からせん断区間に移行する挙動が明確であるのに対し、M-UB 100 は引張ひずみがせん断区間よりも曲げ区間に分布する傾向にあることがわかる。このように、一体打ち構造の PC はりは、PC 緊張材の付着の有無によってコンクリートに発生する引張応力の流れが大幅に異なることが解析的にも示さ



(a) M-B100



(b) M-UB100

図-14 FEM 解析による一体打ち供試体のひび割れ図および主引張りひずみコンター図

れたのである。

4.3 プレキャストセグメント供試体の解析結果

S-B 100 および S-UB 100 の解析結果を図-15 に示す。解析値は S-B 100 のセグメント接合面開口後の剛性をやや大きく評価していたが、これは解析に用いた付着強度が若干高めであったこと、および実験値は局所的な付着劣化の影響で剛性低下を起こしていること等によるものと思われる。また、S-UB 100 の解析による破壊荷重は実験値より 10% 程度小さくなったが、これは曲げ変形の集中によりフランジコンクリートの圧壊が解析上早期に生じたためと思われる。

図-16 (a) および (b) に示す解析結果は、S-B 100 の

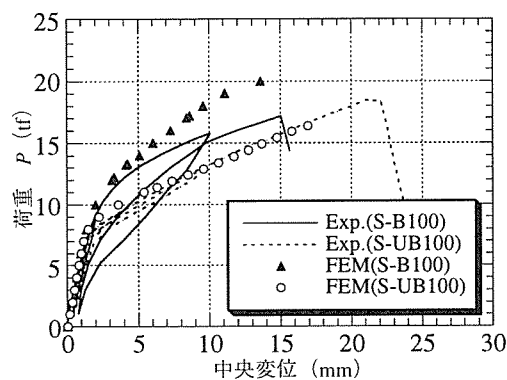


図-15 プレキャストセグメントはりの解析による荷重たわみ曲線

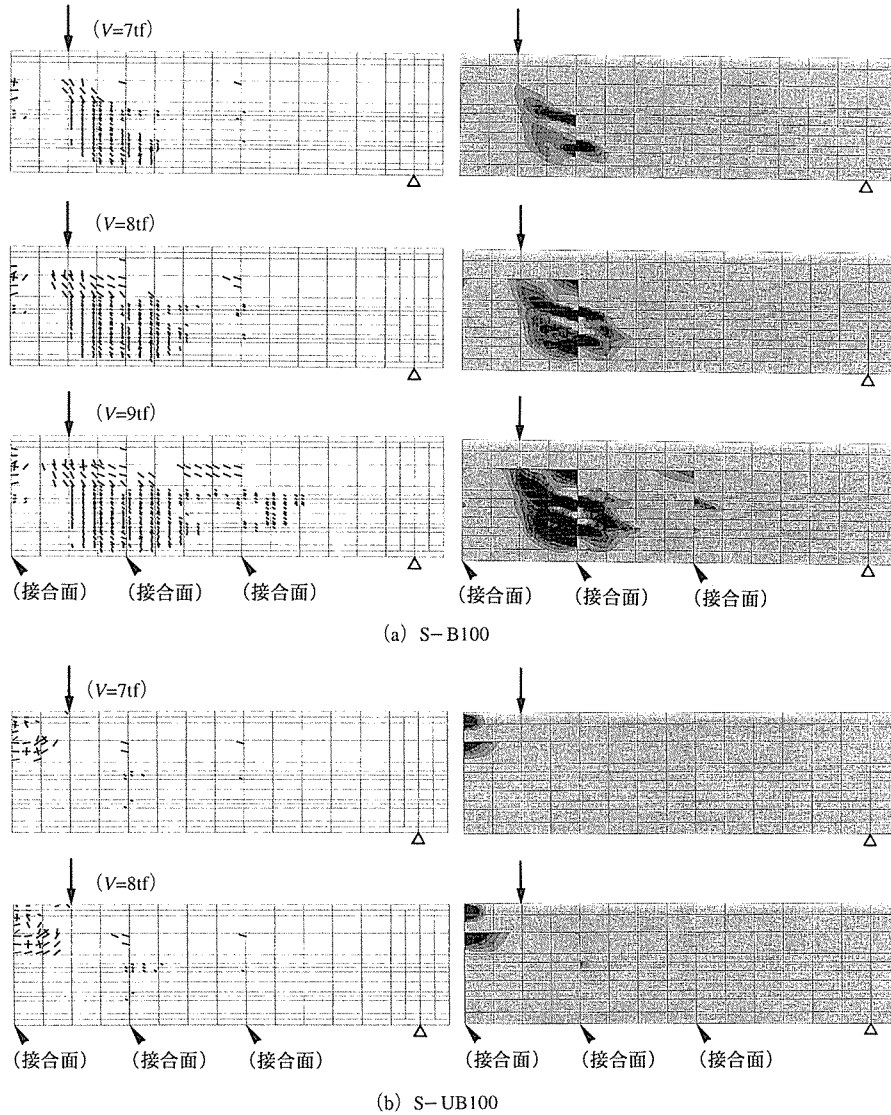


図-16 FEM 解析によるプレキャストセグメント供試体のひび割れ図および主引張ひずみコンター図

実験で明確な斜めひび割れの発生が観察された荷重前後に対応するひび割れ図および主引張ひずみのコンター図である。S-B 100 の解析結果は、一体打ちはりと同様に、荷重増加に伴うコンクリート引張ひずみのせん断区間への移行が示されている。ただし、斜めひび割れの発生範囲は一体打ちはりより狭く、コンクリートの引張ひずみはセグメント接合面の PC 緊張材位置から斜め 20° ~ 30° 方向に大きく発生する傾向にあることが明らかとなった。S-UB 100 の解析結果は一体打ちはりとは異なり、引張ひずみがスパン中央部のフランジ下面とウェブとの境界面およびフランジ内部の水平方向に集中する傾向が示されている。これは、S-UB 100 の曲げ変形がスパン中央部のセグメント接合面の開口にのみ集中するためである。図-17 に S-B 100 および S-UB 100 の変形図を示す。今回の解析では、付着の有無によるセグメント接合面の開口状況の違いが実験結果と良く一致していた。

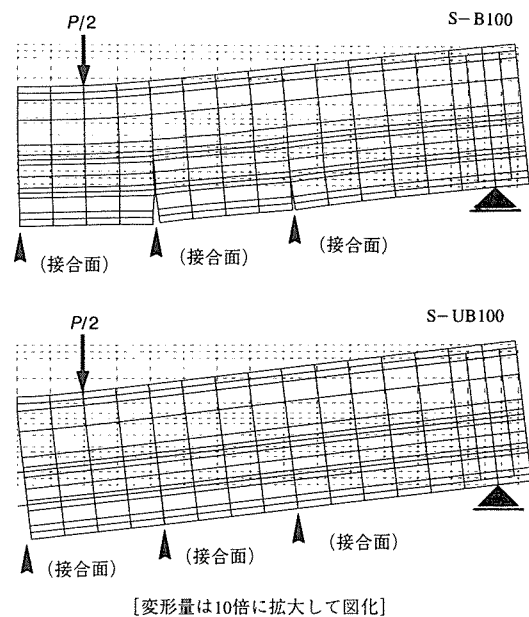


図-17 FEM 解析による変形図

4.4 荷重に伴う PC 緊張材の応力度分布変化の解析結果

図-18 (a)~(c) の解析結果は、荷重に伴う PC 緊張材の応力度分布の変化を示したものである。S-UB 100 の緊張材応力度は、はり全長にわたって一定であるのに対し、付着のある S-B 100 の緊張材応力度はセグメント接合面で局部的に増加する様子が示されている。また、一体打ち構造の M-B 100 では軸方向鉄筋によりひび割れが分散されるため、このような PC 緊張材の局部的な応力度の増加は見られない。したがって、付着のあるプレキャストセグメントは、セグメント接合面が開口すると接合面近傍で局部的な付着劣化が生じやすい構造的特徴があることが解析的にも明らかとなった。今

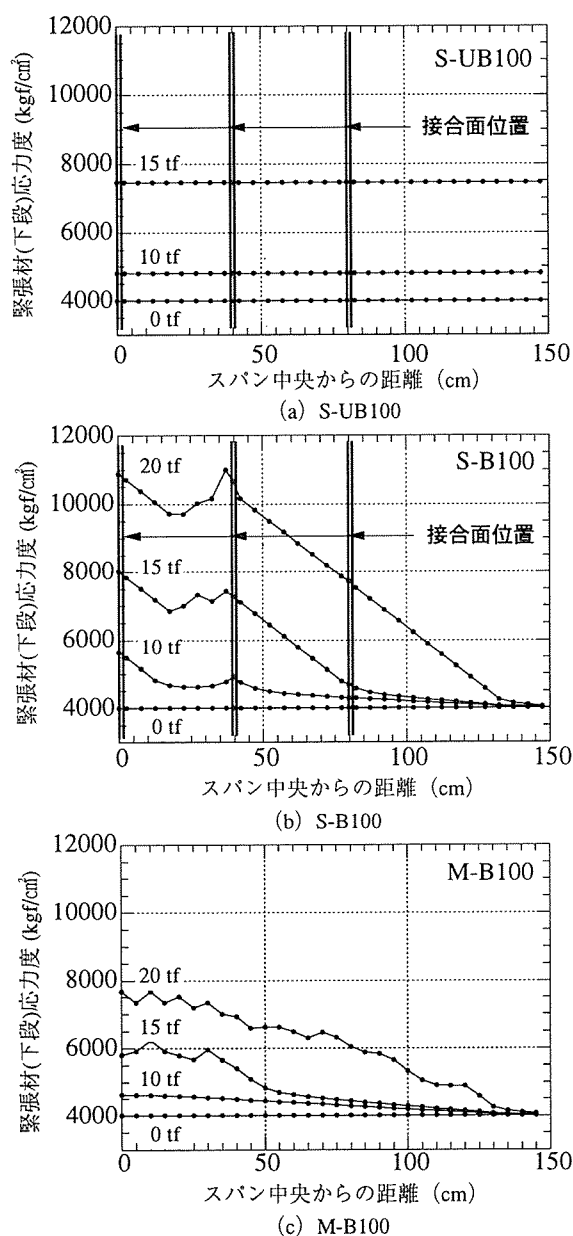


図-18 PC 緊張材の応力度分布の解析値

回の実験に用いたグラウト材の圧縮強度は、表-2 に示したように 500 kgf/cm² クラスのもので、一般的に使用されるグラウト材よりかなり高強度であった。しかし、付着のあるプレキャストセグメントは、わずか 1 回の 1 方向繰返し荷重によって局部的な付着劣化（すべり）が生じたのである。

5. まとめ

プレキャストセグメントはりの曲げせん断特性に及ぼすいくつかの要因を実験的および解析的に検討した。以下に本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめる。

- 1) プレキャストセグメントはりの斜めひび割れ発生荷重は付着の有無によって異なり、一体打ちはりと同様、PC 緊張材とコンクリートとの付着のないアンボンドはりの方が付着のあるボンドはりより大きくなった。
- 2) 腹鉄筋のないプレキャストセグメントはりのせん断破壊荷重は、ボンドはりとアンボンドはりで差は少なく、同じプレストレスを与えた腹鉄筋のない一体打ちはりよりも約 30% 小さくなった。
- 3) プレストレストコンクリートはりに意図的に設けたコンクリートの斜め引張方向の初期欠陥ひび割れは、はりの初期剛性に若干の影響を及ぼす程度で、せん断耐力には殆ど影響を及ぼさなかった。
- 4) PC 緊張材とコンクリートとの付着があるプレキャストセグメントはりは、セグメント接合面が開口すると接合面近傍で緊張材とグラウト材との局部的な付着劣化（すべり）が生じる構造的特徴があることが明らかとなった。
- 5) プレキャストセグメントはりは、セグメント接合面に変形が集中するため、一体打ちはりよりもセグメント接合面近傍の圧縮縁コンクリートに局部的な応力の増加があることが示された。
- 6) セグメント相互の一体性は、セグメント接合面に接合キーを設けないドライジョイントであっても、ほとんど問題のないことが示された。
- 7) プレキャストセグメントはりに高強度コンクリートを使用すれば、導入プレストレスも大きくできるため、はりの供用性能およびせん断に対する破壊安全度を向上させることが可能であった。
- 8) プレキャストセグメントはりにおいても、せん断補強鉄筋（腹鉄筋）が有効に機能することが示された。
- 9) プレキャストセグメントはりと外ケーブルの組合せは、施工合理化だけでなくウェブ厚の縮小や鋼材量の減少といった経済的な断面設計が可能であることが確認された。

◇論文◇

- 10) 外ケーブルの曲げ上げ配置は、はりの変形に伴うケーブル張力の増加によって、せん断に対して好ましい効果があることが示された。
- 11) プレキャストセグメントはりの終局せん断耐力は、軸方向鉄筋を無視することで式(4)で表す一体打ちはりの算定式を用いて評価することができた。この場合、式(4)は普通強度コンクリートを用いたはりに対しては若干安全側の評価を示し、高強度コンクリートを用いたはりに対しては、ほぼ実験値に対応した値を示すことができた。
- 12) セグメント接合面をドライジョイントとしたプレキャストセグメントはりの曲げせん断挙動に関し、接合面に接触要素を用いた非線形有限要素法で解析した結果、はりの斜めひび割れ、破壊耐力、変形等の挙動をほぼ妥当に評価することができた。

謝 辞

本実験を実施するにあたり横浜国立大学技官の森下豊氏、大学院生の鈴木宣政君(現(株)ピー・エス)、飯島基裕君の御協力を戴いた。また、解析の実施にあたり(株)構造計画研究所の川上誠氏に貴重な御助言を頂いた。さらに、本研究を遂行するにあたっては、西松建設(株)技術研究所長の栗原和夫博士に格別な御配慮を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) プレストレストコンクリート構造の現況と設計方法の動向, 土木学会コンクリート技術シリーズ, No. 5, 1994.
- 2) 松田哲夫・湯川保之・木水隆夫: 内外ケーブル併用プレキャストセグメント橋の概要と破壊試験, プレストレストコンクリート, Vol. 38, No. 2, 1996, pp. 29-39
- 3) 道路橋示方書(Ⅲコンクリート橋編)同解説, 日本道路協会, 1992
- 4) プレキャストブロック工法によるプレレスト T げた道路橋設計施工指針, 日本道路協会, 1992

- 5) S.E. Moustafa : Ultimate Load Test of a Segmentally Constructed Prestressed Concrete I-Beam, J. of PCI, Vol. 19, No. 4, 1974, pp. 54-75
- 6) 山口統央・睦好宏史・Matupayont Songkiat・徳山清治: プレキャストブロックと外ケーブルを用いた PC 部材の曲げ性状, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 4, 1994, pp. 25-30
- 7) 山口統央・睦好宏史・小関喜久夫・徳山清治: プレキャストブロックと外ケーブルを用いた PC 単純梁及び連続梁の曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17-2, 1995, pp. 749-754
- 8) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治: プレキャストセグメント PC はりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16-2, 1994, pp. 967-972
- 9) T. Ito, T. Yamaguchi and S. Ikeda : Flexural Shear Behaviour of Prestressed Concrete Beams Fabricated by Precast Segmental Construction, Proc. of The 3rd International KERENSKY Conference, 1994, pp. 241-248, Singapore
- 10) 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: プレキャストセグメント構造のせん断耐力について, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 4, 1994, pp. 45-50
- 11) 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: 外ケーブルを用いたプレキャストセグメントはりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17-2, 1995, pp. 773-778
- 12) 池田尚治, 宇治公隆: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol. 293, 1980, pp. 101-109
- 13) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 児島孝之, 畑村博行: アンボンド PC はりの曲げおよびせん断挙動に関する 2,3 の考察, セメント技術年報, Vol. 35, 1981, pp. 471-474
- 14) コンクリート標準示方書(平成3年版)設計編, 土木学会, 1991
- 15) 池田尚治, 河野広隆: 高強度コンクリートを用いた部材の特性, コンクリート工学, Vol. 32, No. 7, 1994, pp. 33-36

【1996年9月24日受付】