

[2161] プレキャストセグメント PC はりの曲げせん断挙動

伊藤忠彦*1・山口隆裕*2・池田尚治*3

1. はじめに

本研究は、コンクリート構造物における施工合理化（工期短縮、高品質化、生産性向上）を目的としたプレキャスト部材の大型構造物への活用を考え、プレキャストセグメント構造の基本的な力学的特性を明らかにすることを目的とする。本構造は、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ことが一体打ち構造と明らかに異なる。現行の設計手法では、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コンクリートの許容曲げ引張応力度以下とすることで、一体打ち構造と同等の機能と安全度をもつと評価されている。しかし、荷重条件や支承条件が設計と異なれば、供用中に接合面の開口やひびわれが発生することも十分考えられる。したがって、プレキャストセグメント部材における供用時の性能を把握するために、ひびわれ等の発生後の挙動を明確に把握する必要がある。また、終局曲げ耐力に関しては、現行の設計手法でも接合面をひびわれ面とすることで算定は可能であるが、終局せん断耐力に着目した研究は極めて少ない。ここでは、この力学的特性のうち「せん断特性」に着目した実験的研究をせん断補強筋の無いPCはりで行うものである。

2. 実験のモデル化と実験概要

2.1 供試体の断面形状と荷重条件

一般に、実際のプレストレスコンクリート橋主桁の断面形状は、T型、I型または箱桁等とすることが多く、鉄筋コンクリート構造と比べウェブが薄く、スレンダーな形状となっている。また、PC緊張材を外ケーブルとすることで、さらにウェブを薄くすることが可能となる。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、できるだけウェブ厚を薄くしたT型断面はりで実験を行うことにした。本研究における実験ケース一覧を表-1に、供試体形状寸法を図-1に示す。実験は、はり供試体による一方向繰返し2点荷重で行い、主な実験パラメータは「ケーブル付着の有無」「プレキャストセグメントの有無」の2点とする。シリーズIは基準供試体、シリーズIIIはプレキャストセグメントをモデル化した供試体である。なお、シリーズII

表-1 実験ケース一覧

| | | 付着 | | 初期欠陥 | | セグメント | |
|-----|----|----|---|------|---|-------|---|
| | | 有 | 無 | 有 | 無 | 有 | 無 |
| I | B | ○ | | | ○ | | ○ |
| | UB | | ○ | | ○ | | ○ |
| II | B | ○ | | ○ | | | ○ |
| | UB | | ○ | ○ | | | ○ |
| III | B | ○ | | | ○ | ○ | |
| | UB | | ○ | | ○ | ○ | |

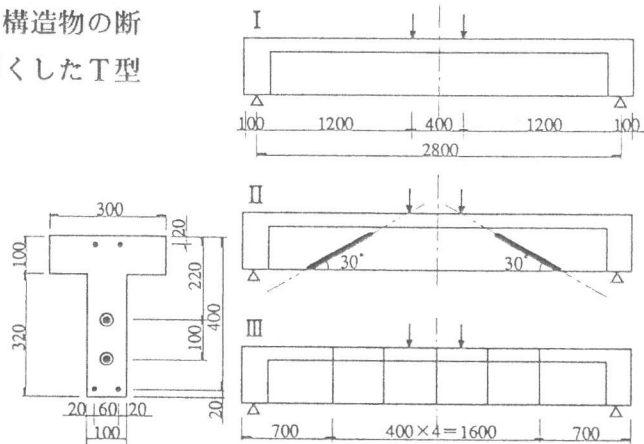


図-1 供試体形状寸法

*1 横浜国立大学大学院 (西松建設(株)技術研究所在籍) (正会員)
 *2 横浜国立大学助手 工学部建設学科 (正会員)
 *3 横浜国立大学教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

はコンクリートの初期欠陥を斜めひびわれでモデル化した供試体で、あらかじめウェブに厚さ2mmの亚克力板を30度で設置(斜めスリットと呼ぶ)してひびわれを表現した。繰返し载荷の除荷点は、①ひびわれ発生荷重、②鉄筋許容応力度の1.5倍に対応する荷重、③鉄筋降伏応力度に対応する荷重の3点とした。ただし、シリーズⅢのプレキャストセグメント供試体は、鉄筋によるモニタリングが不可能なので、基準供試体の、①ひびわれ発生荷重、②鉄筋降伏点変位の2点で繰返すことにした。

2.2 外ケーブルのモデル化

プレキャストセグメント構造では、外ケーブルとの組み合わせも非常に有効であると考えられている。したがって、本研究では緊張材をウェブ内に配置するが、付着を切る(アンボンド化する)工夫を施すことで「外ケーブル」をモデル化することにした。アンボンド化の方法は、今回使用する緊張材が丸鋼棒(表-3)であるので、鋼棒表面にラップフィルムを巻きビニールテープで保護する簡易的な方法で行った。

2.3 プレキャストセグメントのモデル化

プレキャストセグメントの長さは、実際の施工例によると、断面寸法や重量および製作ヤードの広さ等によって異なるが、おおよそ、 $0.5d \sim 1.5d$ (d は断面の有効高さ)程度である。したがって、本研究ではセグメント長を $1.0d$ としてモデル化した。また、実際の構造物では安全のため、接合面にせん断キーを設け接着剤処理されることが多いが、本研究では、このような処理は全く行わないことにした。これは、より危険側の接合条件での挙動を把握することで、プレキャストセグメント部材の安全度を評価するためである。

2.4 供試体の製作

本供試体では、せん断補強筋の無いはりで実験を行うため、せん断区間にスターラップは配置していないが、PC鋼棒定着部はメッシュ筋(D6)およびフープ筋(D6)にて十分に補強した。斜めスリットは、グリースを塗布してコンクリートと完全に付着を切るようにした。なお、プレキャストセグメントはセパレーター方式で製作した。コンクリートは、呼び強度 350kgf/cm^2 、スランプ8cm、粗骨材最大寸法20mmの早強コンクリートを使用した。コンクリート配合を表-2に示す。プレストレス導入はコンクリート打設から2週間後に行い、導入時のコンクリート強度は 405kgf/cm^2 であった。なお、導入直後の断面応力度は実橋の設計例を参考に、下縁で約 100kgf/cm^2 、上縁で約 2kgf/cm^2 とし、全断面が圧縮状態となるようにした。プレキャストセ

表-2 コンクリート配合表 (kg/m^3)

| W/C | W | C | S | G | AE減水剤 | スランプ | 空気量 |
|-------|-----|-----|-----|------|-------|--------------------|-------------|
| 41.5% | 162 | 391 | 731 | 1022 | 1.467 | $8 \pm 2\text{cm}$ | $4 \pm 1\%$ |

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に、シース孔周囲にシール材を薄く塗布して止水処理を行った。今回は、アンボンド供試体にも断面欠損を生じさせないようにグラウト注入を行った。本実験に用いた各材料の特性値を表-3に示す。なお、コンクリートとグラウトについては、载荷実験の中目(コンクリート材令31日、グラウト材令14日)における現場養生供試体による試験値である。

表-3 材料特性一覧 (kgf/cm^2)

| | 圧縮強度 | 引張強度 | ヤング係数 |
|--------------------|--------------------|-------|-------------------|
| コンクリート | 423 ^{***} | 32.5 | 2.7×10^5 |
| グラウト | 582 | — | — |
| | 降伏強度 | 破断強度 | ヤング係数 |
| 鉄筋 ^{**} | 3910 | 5900 | 2.0×10^6 |
| PC鋼棒 ^{**} | 11800 | 12970 | 2.0×10^6 |

*) D13, SD345
 **) $\phi 17$, C種1号 (SBPR110/125)
 ***) 標準養生供試体 $f'_{28} = 411\text{ kgf/cm}^2$

3. 実験結果と考察

3.1 最終破壊形態と終局耐力

実験結果を図-2および表-4に示す。最終的な破壊形態はシリーズIIのアンボンド(II-UB)が曲げ圧縮破壊となったが、他はすべてせん断破壊した。終局耐力は、緊張材に付着の無いアンボンドタイプのほうが、すべてのシリーズでボンドタイプより大きくなった。したがって、本実験では、プレキャストセグメントの影響やコンクリートの初期欠陥の有無にかかわらず、せん断耐力の面からは、アンボンドPCとしても同等以上の性能があることがわかった。また、アンボンドタイプは終局変位量がボンドタイプより大きくなるため、部材としての剛性は小さくなる。しかし、この剛性低下は曲げひびわれ発生前では無視できる程小さく、供用中の部材挙動の差はほとんど無いと考えられる。なお、図-2には部材の破壊までの変形性能を変形エネルギー(荷重-変位曲線下の面積)で評価した結果も示す。シリーズIIはボンドとアンボンドで破壊形態が異なっているが、共にせん断破壊したシリーズIおよびIIIでは、アンボンドタイプの方がボンドより約60%変形エネルギーが大きくなった。

3.2 付着による影響

シリーズIおよびIIIで付着による挙動の差を考察する。シリーズIで付着が有る場合(I-B)は、荷重18.0tfでせん断区間に斜めひびわれが発生し一時的に荷重が低下した。しかし、その後も荷重は上昇し、最終的には軸方向鉄筋が降伏後に斜めひびわれが支点付近へと進展し、ウェブコンクリートの圧縮ストラットが消滅してせん断破壊した。一方、付着が無い場合(I-UB)は、I-Bよりも曲げひびわれ後の剛性および軸方向鉄筋の降伏荷重が低くなった。これは、アンボンド部材では、ひびわれ面でPC鋼棒よりも鉄筋に応力の負担が増加するとともに、ひびわれ部位に変形が集中するためと考えられる。図-3に降伏荷重までの中央断面におけるPC鋼棒と鉄筋のひずみ実験値を示す。ひびわれ後の同一荷重における各々の

表-4 実験結果一覧

| | | 実験値(tf) | | 計算値(tf) | | | | Vu/Vcal.4 |
|-----|----|---------|-------|---------|--------|--------|--------|-------------------|
| | | Pu | Vu | Vcal.1 | Vcal.2 | Vcal.3 | Vcal.4 | |
| I | B | 25.2 | 12.6 | 6.01 | 7.03 | 8.56 | 8.98 | 1.40 |
| | UB | 26.5 | 13.2 | 6.01 | 7.03 | 8.59 | 9.22 | 1.43 |
| II | B | 25.5 | 12.8 | 6.08 | 7.12 | 8.75 | 9.77 | 1.31 |
| | UB | 25.9 | >12.9 | 6.05 | 7.07 | 8.64 | 8.81 | >1.46 |
| III | B | 17.2 | 8.56 | 5.04 | 5.63 | 7.01 | — | 1.22 [*] |
| | UB | 18.4 | 9.18 | 5.01 | 5.60 | 6.99 | — | 1.31 [*] |

*)シリーズIIIはVu/Vcal.3

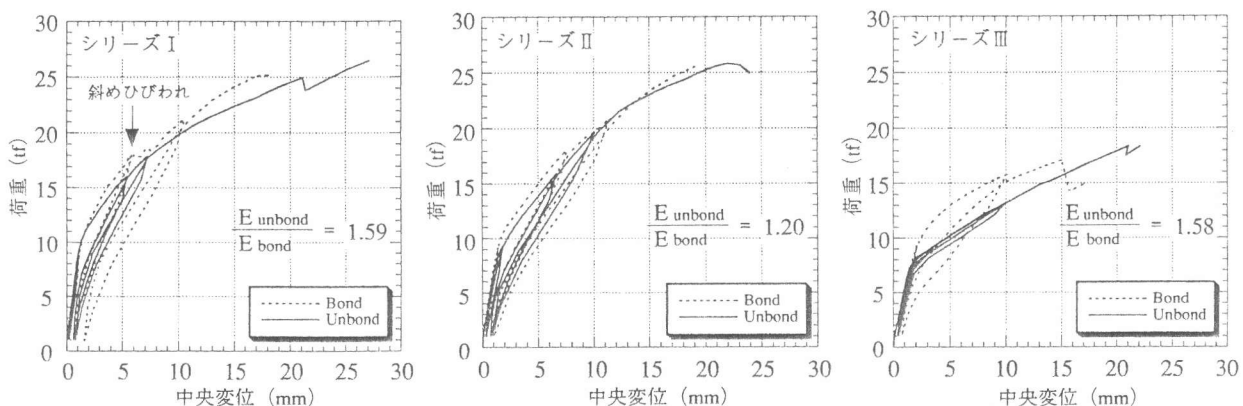


図-2 実験結果(荷重-変位曲線)

ひずみは、PC鋼棒ではアンボンドの方が小さいが鉄筋はアンボンドの方が大きく、上記の推測を裏付けていると考えられる。また、I-UBは鉄筋降伏後も顕著な斜めひびわれは発生せず、最終的には支点付近に発生した付着ひびわれが斜めひびわれへと進展し、フランジコンクリートが圧壊した。以上のように、せん断破壊に至る過程は付着の影響で全く異なるのであり、今回使用したPC鋼棒よりも付着強度の大きいPCストランドや異形鋼棒では、さらにこの差が拡大されることが予想される〔1〕。また、アンボンドの場合は最終的にコンクリートの圧壊が支配的であったので、緊張材定着部の補強を確実に行えば、高強度コンクリートの適用は効果的であるものと予想される。

シリーズIIIでは付着の影響がIよりも明瞭である。すなわち、図-2に示したように、付着のある場合は、ある程度エネルギーを吸収する挙動を示すのに対し、付着の無い場合は、ほとんどヒステリシスを持たず、荷重-変位曲線もバイリニアに近い挙動を示した。セグメント接合面下縁の開口は、ボンドでは各セグメント接合面に分散するが、アンボンドでは完全に中央部に集中した。さらに、ボンドでは除荷によって、PC鋼棒のひずみが初期緊張ひずみより減少するという現象が見られた。本実験では、図-4に示すように中央部の接合面におけるひずみが半減しており、同様な現象が両隣の接合面でも見られた。これはセグメント接合面で局所的な付着劣化が生じたことによる影響と考えられるが、この現象はセグメント間のPC鋼材の局所的な緊張力が減少することを意味していると思われる。なお、アンボンドでは全くこのような現象は見られなかった。

3.3 せん断耐力の検討

せん断耐力における軸方向力の評価については、デコンプレッションモーメント M_0 を使用して軸方向力の影響(β_n)を考慮することが、土木学会コンクリート標準示方書で規定されている。この算定式でせん断耐力を計算した結果が表-4の $V_{cal.1}$ である。ただし、 M_0 は実験でコンクリートの引張縁ひずみがゼロとなった時の荷重から計算した。 $V_{cal.1}$ は実験値に対し、かなり安全側であることがわかる。I-B供試体で斜めひびわれが発生した荷重と比較しても、実験値は計算値の1.58倍である。そこで、示方書で規定されている計算式の基本〔2〕となった式(1)を使用して計算した結果が $V_{cal.2}$ である。ただし、 d はコンクリート圧縮縁から引張鋼材(シリーズI, IIは軸方向鉄筋とPC鋼材、シリーズIIIはPC鋼材のみ)の重心位置までの距離である。

$$V_c = 0.94 \beta_d \beta_p \beta_n (f'_{ck})^{1/3} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) b_w d \quad (1)$$

ここに、 $\beta_d = (100/d)^{1/4}$ 、 $\beta_p = \{100(A_s + A_p)/b_w d\}^{1/3}$ 、 $\beta_n = 1 + 2M_0/M_u$

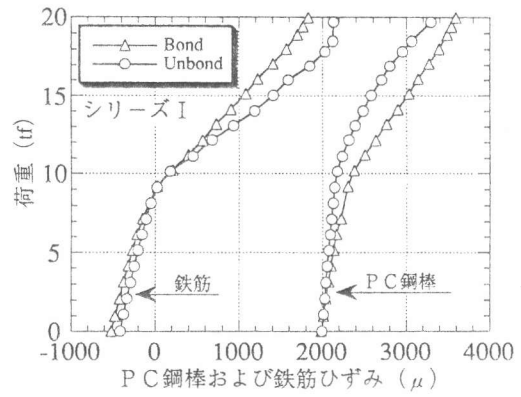


図-3 付着による影響

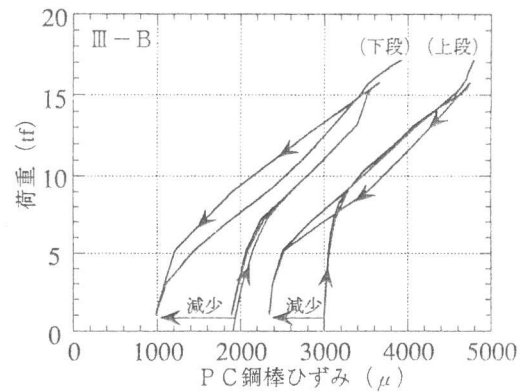


図-4 初期緊張ひずみの減少

Vcal.2はVcal.1の計算結果に比べ多少改善されたようであるが、まだ実験値の方がかなり大きいことがわかる。そこで、デコンプレッションモーメントの基本的な考え方に従い、 M_0 の効果を直接加算して評価する式(2)で計算した結果がVcal.3である。ただし、 V_c は式(1)で $\beta_n = 1$ として計算した。

$$V_u = V_c + V_p = V_c + M_0 / a \quad (2)$$

本実験結果では、Vcal.3でせん断耐力を評価しても十分安全側であった。これは、本実験では曲げひびわれが発生しても、ただちに斜めひびわれが発生することは無かったためであるが、通常のPCはりでも、このことは一般的に成立すると考えられる。そこで、シリーズI, IIのせん断耐力の算定に M_0 でなく、ひびわれ発生モーメントを使用して計算した結果がVcal.4である。実験値と比較するとシリーズI, IIは実験値/計算値が平均で1.40、シリーズIIIが平均で1.27となった。

4. 変形の解析方法と解析結果

4.1 ボンドタイプの解析

本研究ではモーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係を利用したファイバーモデルを用いて変形解析を行った。シリーズIおよびIIIの解析結果を図-5に示す。ファイバーモデルは本来「曲げ挙動」を解析する手法であることから、本解析結果では斜めひびわれ発生後は実験値と解析値がかい離するが、斜めひびわれ発生前の挙動はよく表現できていると思われる。

4.2 アンボンドPC鋼棒ひずみ増分モデル

アンボンドタイプでは、変形に伴うPC鋼棒ひずみと鋼棒位置のコンクリートひずみが一致しないため、アンボンドPC鋼棒のひずみが、はり全長で等しいという変形の適合条件を利用してPC鋼棒のひずみ増分を計算した。すなわち、本モデルでは、はりの変形を円弧と仮定し、その円弧長 L' を曲率 ϕ から計算して、PC鋼棒のひずみ増分 $d\varepsilon_{pi}$ を式(3)で計算したのである。

$$d\varepsilon_{pi} = (L' - L) / L \times d\varepsilon_{ci} / x \quad (3)$$

ただし、 x はコンクリート圧縮縁から中立軸までの距離である。アンボンドタイプの解析結果を図-6に示す。基準供試体では本解析モデルで、部材の変形挙動が精度よく計算することができた。一方、セグメント供

試体では接合面開口後の変形をやや過大に評価するようであるが、PC鋼棒のひずみは実験値とよく一致していた。また、セグメント供試体では初期剛性が解析値より実験値の方が低い、これはセグメント接合面のなじみ等の影響と考えられる。

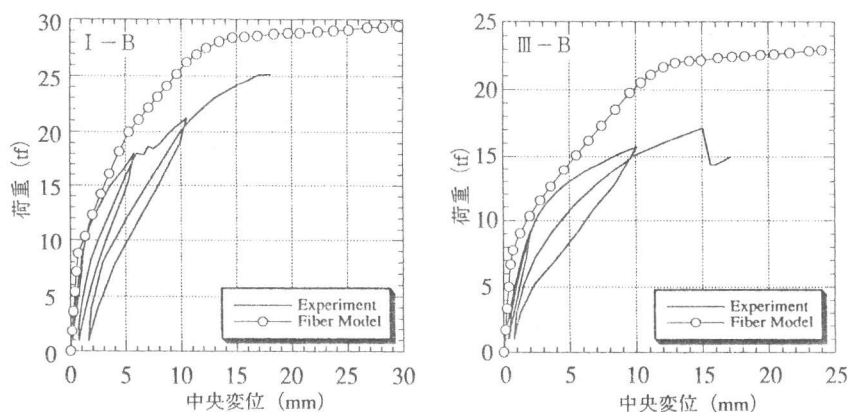


図-5 ファイバーモデルによる解析結果(ボンド)

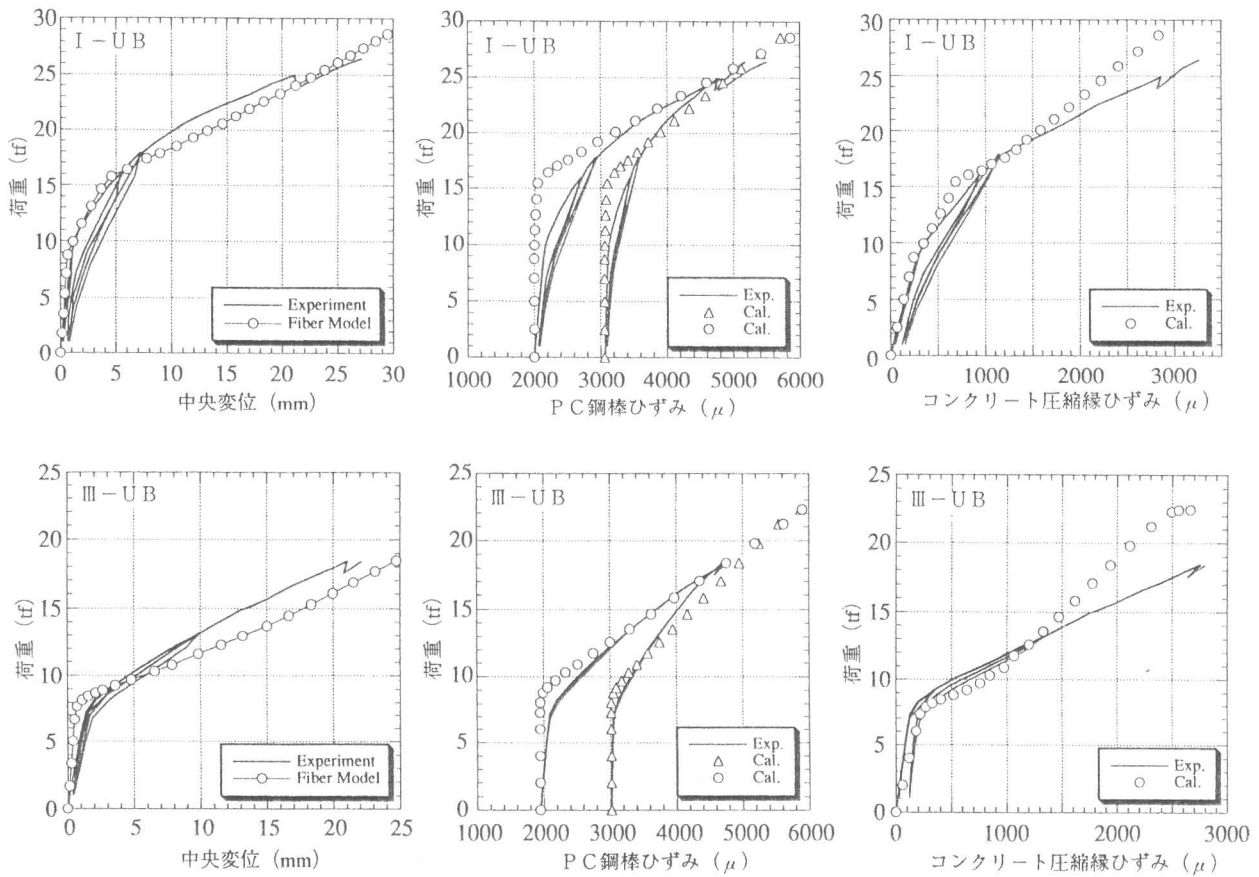


図-6 ファイバーモデルによる解析結果(アンボンド)

5. まとめ

以下に本実験で得られた結果をまとめる。

- ①プレキャストセグメント構造は、PC緊張材の付着の有無で接合面開口後の挙動が全く異なり、アンボンド部材では殆どヒステリシスを持たない挙動を示した。また、ボンド部材では高応力載荷後の除荷時に、セグメント接合部でPC鋼材の局所的な緊張力が減少するメカニズムが観察された。
- ②せん断耐力の算定はプレストレスの効果を β_n で割増すのではなく、プレキャストセグメントはりの場合にはデコンプレッションモーメントを、一体打ちはりの場合にはひびわれ発生モーメントを直接評価するのが適当と思われた。
- ③PC緊張材のひずみ増分を曲率から推定することで、従来のM- ϕ 関係を用いてアンボンドPCはりの曲げ変形挙動を解析することができた。

〔謝辞〕

本研究を実施するにあたり、横浜国立大学技官の森下豊氏および卒研究生の鈴木宣政君の多大な協力を得た。ここに感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1)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,第293号,1980.1
- 2)コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改訂資料,コンクリートライブラリー第61号,1986.10