

論文

[2041] プレキャストコンクリートはり接合部の曲げ挙動に関する実験的研究

正会員 ○ 藤井 智弘 (金沢大学大学院)

正会員 梶川 康男 (金沢大学工学部)

前川 幸次 (金沢大学工学部)

正会員 榎谷 浩 (金沢大学工学部)

1. まえがき

わが国においては、桁橋、床版橋、スノーシェッドおよびロックシェッド等の多くの土木構造物が、プレストレストコンクリート(PC)、鉄筋コンクリート(RC)、鋼製部材を用いて、多種多様な形式で設計・架設されてきている。また、最近では省力化、建設機械の普及に呼応して、プレキャスト化、施工の機械化、急速施工化の方向にある。そのうちでも、シェッドの施工は供用中の道路上で実施されることが多いことから、品質管理のよい工場で作成されたプレキャストPC部材を、現場で横締め

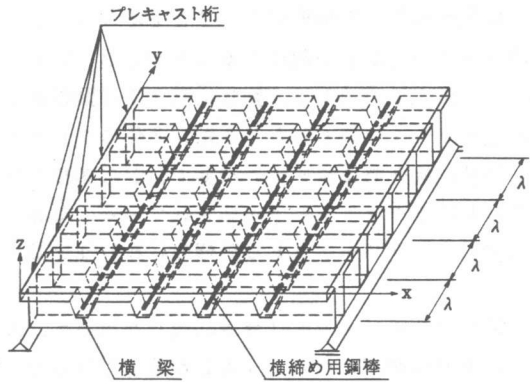


図-1 横締めにより一体化されたプレキャスト桁

たプレキャストPC部材を、現場で横締めにより一体化させ、土木構造物としての機能を有するように仕上げられることが多くなってきている(図-1)。このような横締めにより一体化されたプレキャスト部材上に荷重が作用する場合、部材軸に沿った曲げモーメントが発生すると同時に、部材軸直角方向の横曲げモーメントも発生する。本実験は、この横曲げモーメント分布を、横締めされた部材が完全に一体化していると仮定して全体解析を行うことが可能かどうか、また、可能でなければどのような解析法が妥当かについて検討するための基礎資料を得るために行ったものである^{1),2)}。

2. 静的曲げ載荷実験

2.1 供試体と実験方法

供試体の断面図と載荷状況を図-2に示す。実験に用いた供試体は、幅20cm×高さ40cmで長さ100cmの直方体のプレキャスト鉄筋コンクリートはり2体からなり、それぞれのプレキャスト部材には、上縁より10cm, 20cmおよび30cmの位置にφ32mmのシース孔が配置されている。

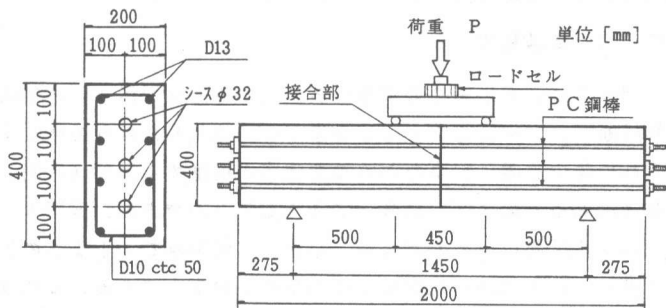


図-2 供試体断面図と載荷状況

これら2体のプレキャスト部材は、所定の緊張位置のシース孔にφ17mmのPC鋼棒を通して、各々10tfの緊張力を与えることによって一体化した構造となっている。

供試体の一覧を表-1に示す。一般にロックシェッドの場合には、荷重作用位置が特定できないことから荷重作用位置によっては、部材軸直角方向に正負全く逆の横曲げモーメントが発生する。この時、緊張力およびPC鋼棒の配置のしかたによって、部材接合部において横曲げモーメントがどのように伝達されていくかを明確にすることが必要となる。そこで、供試体の種類は、緊張位置および緊張本数を変化させた4種類とした。また、2体のプレキャスト部材の接合部は無処理の状態、PC鋼棒とシースの間にはグラウト処理が施されている。なお、供試体のコンクリートとPC鋼棒の材料特性を表-2に示す。

載荷は油圧ジャッキ（容量40tf）を用いて、スパン中央で純曲げとなるように2点載荷で行った。計測項目は、載荷荷重、接合部の開口幅、スパン中央部での鉛直たわみ、コンクリートひずみとPC鋼棒ひずみである。載荷荷重は、油圧ジャッキの先端に取り付けたロードセル（容量50tf）により計測した。荷重が小さい間は、接合部に働くプレストレス力による圧縮力によりプレキャスト部材間に間隙はできないが、荷重が次第に大きくなると、部材接合部の下縁に間隙が生ずるため、スパン中央の上縁と下縁の両側面にπ型変位計を設置することにより接合部の上縁と下縁の開口幅を測定した。さらに、供試体がどれくらいの荷重まで一体化した挙動を示すか確認するため、鉛直たわみ、コンクリートとPC鋼棒のひずみを計測した。これらの計測値は、静ひずみ測定器およびスイッチボックスを介してマイクロコンピュータにデータを取り込み、逐次グラフ化し、供試体の状態を把握しながら実験を行った。

2. 2 実験結果

図-3に、各供試体の荷重-鉛直たわみ関係を示す。各供試体について共通に言えることは、部材断面の下縁応力が零となるまでの一体化したはりの挙動を示す弾性変形区間（区間Ⅰ）と、それ以後の急激に鉛直たわみの変化率が增加する区間（区間Ⅱ）、および破壊にいたるまでの区間（区間Ⅲ）の3区間に分けて考えることができる。区間Ⅰでは、緊張本数および緊張位置の変化による差異はほとんどない。しかし、緊張本数が下1本の供試体G4については、緊張本数が2本以上の供試体に比較して傾きがゆるいようである。これは、接合部でプレキャスト部材が完全に密着していなかったことが原因と思われる。また、区間ⅡおよびⅢでは、接合部に働くプレストレス力による圧縮力の相違、特に引張縁側圧縮応力が荷重-鉛直たわみ関係の傾きに大きく

表-1 供試体一覧

供試体名		G 1	G 2	G 3	G 4
緊張位置	上	●			
	中	●	●	●	
	下	●	●		●
σ_{ou} (kgf/cm ²)		36.09	6.12	12.41	-6.19
σ_{oi} (kgf/cm ²)		36.09	42.46	12.41	30.72
M_0 (tf·m)		1.96	2.28	0.66	1.65

σ_{ou} : プレストレス力によるコンクリート上縁応力
 σ_{oi} : プレストレス力によるコンクリート下縁応力
 M_0 : 下縁応力が零となる時の曲げモーメント

表-2 供試体に用いた材料の特性

コンクリート	圧縮強度(kgf/cm ²)	728
	1/3割線弾性係数(kgf/cm ²)	367000
P C 鋼 棒	呼び名(mm)	17
	種類	A種1号
	公称断面積(cm ²)	2.270
	引張強度(kgf/cm ²)	10300
	降伏点応力(kgf/cm ²)	8900
	弾性係数(kgf/cm ²)	2050000

影響を与えていることがわかる。

そこで、引張縁側圧縮応力の大小差のある供試体G2およびG3について図-4に接合部上縁と下縁に設置した π 型変位計の測定値を示す。図-3および図-4から鉛直たわみの急激な増加は、接合部下縁に開きが生じたためであることがよくわかる。上縁の水平方向変位は下縁の開きとは異なり、ある値から勾配が変化することなくほとんど一定に増加している。

次に、曲げモーメント-開き角関係を各供試体ごとに図-5(a)~(d)に示す。縦軸は曲げモーメントであり、 $M=0.25P$ で表される。また、横軸は開き角であり、 π 型変位計による接合部上縁の水平変位を u_U 、下縁の水平変位を u_L 、部材断面の高さを h とすると、開き角は $\theta = (u_U - u_L) / h$ として計算した。実験値は□印でプロットしてある。これらの図からも、弾性変形区間において、接合部下縁に開きが生じていることから、接合部において一体化していることがうかがえる。また、接合部下縁に開きが生じてからは開き角が急増していることや、引張縁側圧縮応力が曲げモーメント-開き角関係の傾きに大きく影響を与えていることがよくわかる。

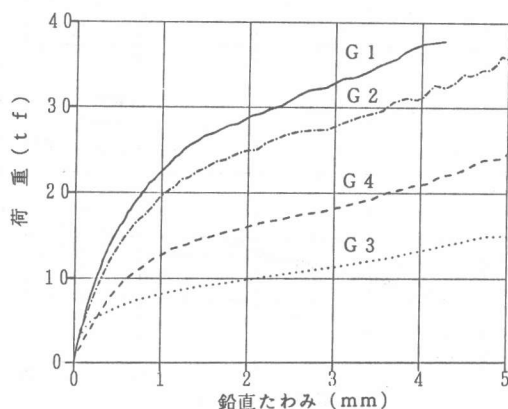


図-3 荷重-鉛直たわみ関係

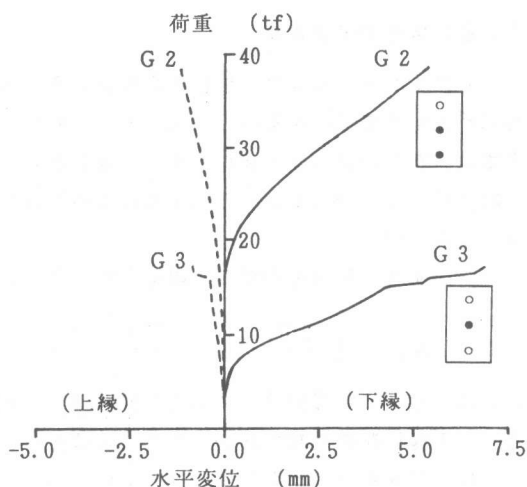


図-4 荷重-水平変位関係

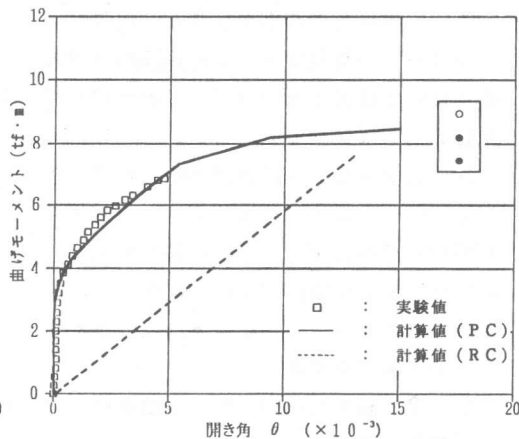
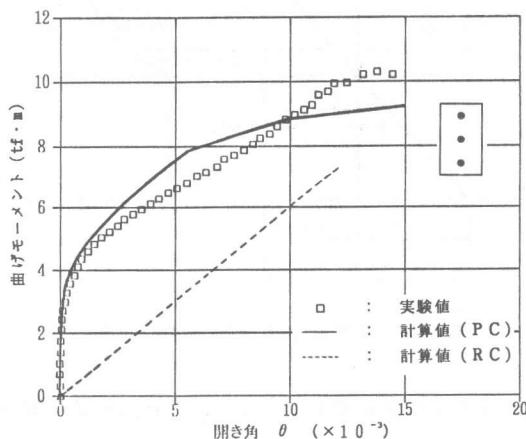


図-5(a) 曲げモーメント-開き角関係(G1供試体) 図-5(b) 曲げモーメント-開き角関係(G2供試体)

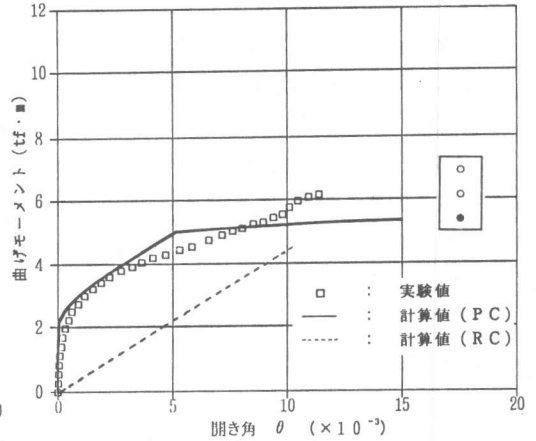
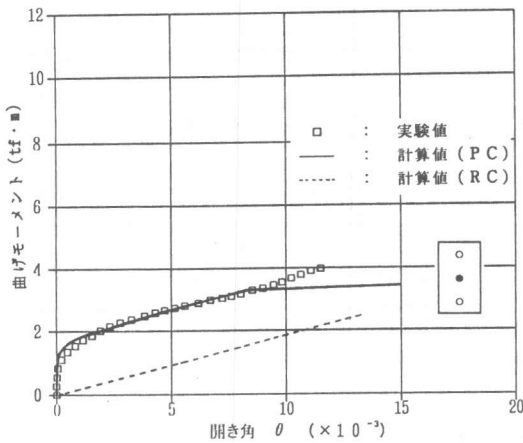


図-5 (c) 曲げモーメント-開き角関係 (G3供試体) 図-5 (d) 曲げモーメント-開き角関係 (G4供試体)

3. 曲げ特性のモデル化

プレストレス力により一体化されたプレキャスト部材の曲げモーメント-開き角の関係を理論的に検証する際に、なるべく簡便にするために、プレキャスト部材接合部の下縁応力が零になるまでは、左右の部材は一体化しているものとし、開き角は生じないものとした。それ以後は、P C鋼棒位置にプレストレス力による軸力の作用した鉄筋コンクリート部材として解析する方法を採用した^{3), 4)}。

プレキャスト部材接合部の下縁応力が零となる曲げモーメントは、次式となる。

$$M_0 = \left(\frac{\sum P_{ti}}{A_c} + \frac{\sum P_{ti} \cdot e_{pi}}{Z_c} \right) \cdot Z_c \quad (1)$$

ここに、 P_{ti} : P C鋼棒1本あたり緊張力、 e_{pi} : 偏心量、 A_c : P C鋼棒換算断面積、 Z_c : 下縁断面係数である。また、 Σ は各P C鋼棒の合計を表している。

次に、プレキャスト部材接合部の下縁応力が零を越えてからの解析を以下の仮定を設けて行った。

① 平面保持の法則が成立し、引張側コンクリートを無視する。また鋼棒のひずみ変化は同じ位置のコンクリートのひずみ変化に等しい (図-6)。

② コンクリート圧縮応力度-ひずみ曲線は、図-7のように変化するパラボラ-矩形にモデル化する。最大圧縮ひずみは0.35%、最大圧縮応力度は $0.85\sigma_{cd}$ に等しいものとする。ここに、 σ_{cd} はコンクリートの圧縮強度である。

③ P C鋼棒の応力-ひずみ曲線は、図-8のようにモデル化する。ここに、 σ_{pu} はP C鋼棒の引張強度である。

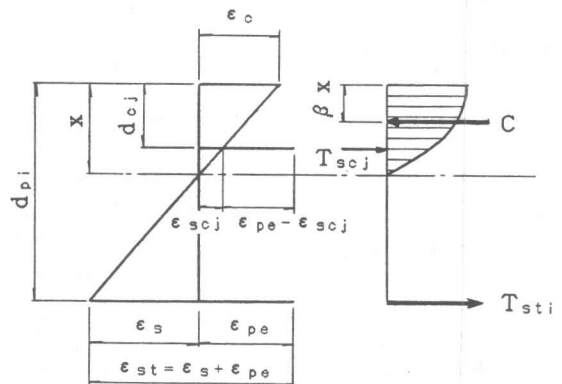


図-6 ひずみおよび応力度の分布

①の仮定より、コンクリートのひずみを ϵ_c 、引張側 P C 鋼棒 i に対して、P C 鋼棒のひずみを ϵ_{si} 、圧縮縁から P C 鋼棒図心までの距離を d_{pi} 、また圧縮側 P C 鋼棒 j に対して、P C 鋼棒のひずみを ϵ_{scj} 、圧縮縁から P C 鋼棒図心までの距離を d_{cj} とし、中立軸位置までの距離を x とすると次式の関係が成立する。

$$\epsilon_c : x = \epsilon_{si} : (d_{pi} - x) = \epsilon_{scj} : (x - d_{cj}) \quad (2)$$

部材断面を幅 b 、高さ h の矩形とすると、圧縮応力度の合力 C 、および圧縮縁から圧縮応力度の合力 C までの作用位置 βx は次式にて表される。

$0 \leq \epsilon_c \leq 0.002$ の場合、

$$C = 0.85 \cdot \sigma_{cd} \cdot b \cdot (\epsilon_c / 0.002) \cdot \{1 - (\epsilon_c / 0.006)\} \cdot x \quad (3. a)$$

$$\beta x = [\{4 - (\epsilon_c / 0.002)\} / \{12 - 4 \cdot (\epsilon_c / 0.002)\}] \cdot x \quad (3. b)$$

$0.002 \leq \epsilon_c \leq 0.0035$ の場合、

$$C = 0.85 \cdot \sigma_{cd} \cdot b \cdot \{1 - 0.002 / (3 \cdot \epsilon_c)\} \cdot x \quad (3. c)$$

$$\beta x = [1.0 - \{0.5 - (0.002 / \epsilon_c)^2 / 12\} / \{1.0 - (0.002 / \epsilon_c) / 3\}] \cdot x \quad (3. d)$$

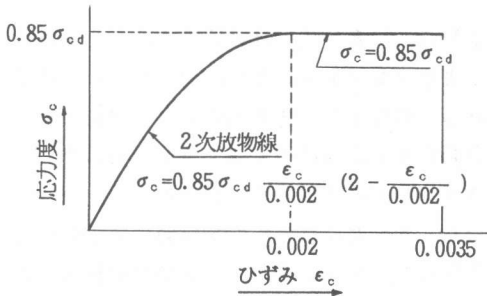


図-7 コンクリートの応力度-ひずみ曲線

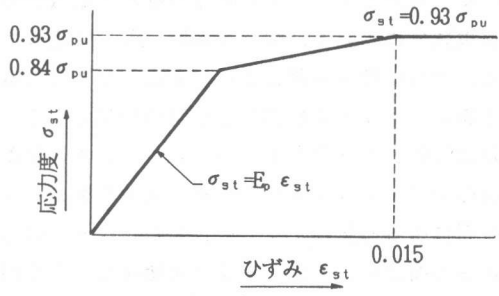


図-8 P C 鋼棒の応力度-ひずみ曲線

P C 鋼棒 1 本あたりの断面積を A_p 、ヤング係数を E_p 、P C 鋼棒の引張応力度を σ_{sti} 、P C 鋼棒の初期緊張力による引張ひずみを ϵ_{pe} とすると、引張側における P C 鋼棒の引張力 T_{sti} は次式にて表される。

$$T_{sti} = A_p \cdot \sigma_{sti} \quad (4)$$

ここに、 σ_{sti} は以下の通りである。

$(\epsilon_{si} + \epsilon_{pe}) \leq 0.84 \cdot \sigma_{pu} / E_p$ の場合、

$$\sigma_{sti} = E_p \cdot (\epsilon_{si} + \epsilon_{pe}) \quad (4. a)$$

$0.84 \cdot \sigma_{pu} / E_p \leq (\epsilon_{si} + \epsilon_{pe}) \leq 0.015$ の場合、

$$\sigma_{sti} = \sigma_{pu} / (0.015 \cdot E_p - 0.84 \cdot \sigma_{pu}) \cdot \{0.09 \cdot E_p \cdot (\epsilon_{si} + \epsilon_{pe}) - 0.84 \cdot (0.93 \cdot \sigma_{pu} - 0.015 \cdot E_p)\} \quad (4. b)$$

$(\epsilon_{si} + \epsilon_{pe}) \geq 0.015$ の場合、

$$\sigma_{sti} = 0.93 \cdot \sigma_{pu} \quad (4. c)$$

次に、圧縮側における P C 鋼棒の引張力 T_{scj} は次式にて表される。

$$T_{scj} = A_p \cdot E_p \cdot (\epsilon_{pe} - \epsilon_{scj}) \quad (5)$$

以上のひずみ適合条件に対して、力の釣合条件より次式が成り立つ。

$$C = \sum_i T_{sti} + \sum_j T_{scj} \quad (6)$$

$$M_1 = \sum_i T_{sti} \cdot (d_{pi} - \beta x) + \sum_j T_{scj} \cdot (d_{cj} - \beta x) \quad (7)$$

ここに、 \sum_i 、 \sum_j はそれぞれ引張側、圧縮側のPC鋼棒の合計を表している。

数値計算は(6)式に、(2)、(3)、(4)、(5)式を代入し、コンクリート上縁ひずみ ϵ_c を逐次増加させて中立軸位置 x を求め、 ϵ_s 、 M_1 を算出した。

また、開き角 θ はPC鋼棒が支持点とスパン中央の midpoint 間の距離 $\lambda = \ell/2$ で固定され、PC鋼棒ひずみに比例すると仮定した時、次式により与えられる。

$$\theta = \epsilon_s \cdot \lambda / (d_p - x) = \epsilon_c \cdot \lambda / x \quad (8)$$

よって、横締めにより一体化されたプレキャスト部材において、接合部の引張縁側応力が零を越えてからの曲げモーメント-開き角関係は、各ステップごとの(7)式、(8)式による計算値を用いて次のように表すことが可能となる。

$$M_1 = K \cdot \theta \quad (9)$$

ここに、 K は各ステップごとの回転バネ定数である。

各供試体について、図-5(a)~(d)中に実線で(7)式、(8)式の計算結果を示してある。また、破線は数値計算において $\epsilon_{pe} = 0$ とした時、つまりプレストレス力の作用していない通常の鉄筋コンクリート断面とした時の結果である。これらの結果より、各供試体共に実験値と計算値は比較的良好に一致していることがわかる。また、引張縁側が開き始めて開き角が急増し終わった後の曲げモーメント-開き角関係の勾配は、プレストレス力の作用していない鉄筋コンクリート断面による計算値とよく一致した。これらのことから、接合部において引張縁側が開き生じてからの曲げモーメント-開き角関係は、PC鋼棒位置にプレストレス力による軸力が作用した鉄筋コンクリート部材としてモデル化することにより表すことができた。

4. まとめ

本研究は、PC鋼棒のプレストレス力によって一体化されたプレキャスト部材の曲げ挙動について検討した。その内容は、実験の範囲内において次のようにまとめられる。

(1) 部材接合部に、適当なプレストレス力による圧縮力を導入してあれば、引張縁側のコンクリート応力度が零になるまでは、接合部で剛結された一体化したはりとしての挙動をすると考えられる。

(2) 部材接合部において、引張縁側が開き生じてからの曲げモーメント-開き角関係は、接合部に作用するプレストレス力による圧縮力の相違、特に引張縁側圧縮応力に大きく依存する。

(3) 部材接合部において、引張縁側が開き生じてからの曲げモーメント-開き角関係は、PC鋼棒位置にプレストレス力による軸力が作用した鉄筋コンクリート部材としてモデル化することにより評価することができた。

参考文献

- 1) 吉田博，梶谷浩，井原朋美，藤井智弘：横締されたプレキャスト・コンクリート版の静的挙動に関する研究，構造工学論文集，Vol. 32A，pp93~105，1986年 3月
- 2) 藤井智弘，梶谷浩，前川幸次，梶川康男：プレキャストPC桁の静的挙動とロックシェッド設計への応用，構造工学論文集，Vol. 36A，pp1293~1303，1990年 3月
- 3) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法，共立出版，1978年
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅲコンクリート橋編，pp112~122，1978年