

アンボンドPC圧着プレキャストコンクリート造実大2層骨組の施工実験及び水平載荷実験
(その6 水平載荷実験における梁端部の非線形挙動と部材の復元力特性)

(株) 竹中工務店 正会員 ○高津比呂人
(株) 大林組 杉本 訓祥
鹿島建設(株) 永井 寛
京都大学 正会員 西山 峰広

1. はじめに

本研究では、アンボンドプレストレス圧着工法による架構の構造設計手法を検討課題の一つとしている。本報告では、地震時応力解析を想定し、本工法による圧着部を含む部材の復元力特性評価について述べ、水平載荷実験における梁端部の非線形挙動との適合性に関する検討結果を示す。

2. 復元力特性の評価

アンボンドプレストレス圧着工法による圧着部を含む柱または梁部材は、復元力特性評価にあたり、特に圧着PC鋼材に付着がないことの影響を考慮する必要がある。詳細な復元力特性評価を行う場合には、PC鋼材のアンボンド長さを考慮して、変形の適合条件を満たして収束計算を行う必要があり、これまでもいくつかの方法が提案されている^{1),2)}が、ここでは実務設計にも適用可能な簡略的な方法により評価を行なう。なお、RC系部材では、部材の荷重～変形関係の包絡線を3折れ線によりモデル化することが従来から行われていることから、ここでも、簡略的に2折れ点と3折れ線により表現することを基本とする。

2. 1 曲げ耐力評価法

曲げ耐力は、断面の力の釣り合いにより求める。

アンボンドPC部材の接合面での断面の力の釣り合い状況を図-1に示す。同図(a)は、曲げモーメントが上昇し、引張側の応力度がゼロとなる時(ディコンプレッションモーメント:プレストレスによる圧縮力が、引張縁においてキャンセルされるとき)を示している。

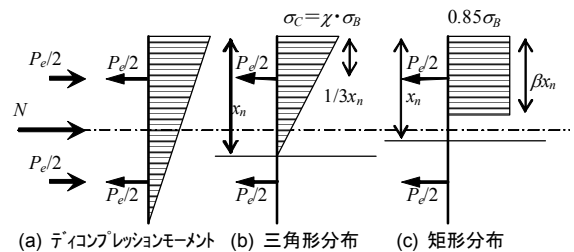


図-1 断面応力分布の仮定

このときの曲げモーメントは、PC鋼材を挿入するシー

ス管による断面欠損やPC鋼材の断面二次モーメントへの影響を無視し、簡略的に表現すると、次式(1)のようになる。なお、鋼材の影響に加えて、普通鉄筋が接合面を貫通して配置されている場合に、長期軸力とプレストレス導入力による応力負担を考慮して一般化した場合に対しては、次式(2)が提案されている³⁾。式(1)および(2)は、鉄筋およびPC鋼材の影響の考慮の有無による違いである。なお、このとき、普通鉄筋とPC鋼材のコンクリートに対するヤング係数比を5~10程度、断面積比を1~3%程度とすると、各係数は、1/1.3~1/1.05程度となる。従って、式(2)による耐力は、式(1)による耐力の70~90%程度になる。

一方、図-1(b)は、圧縮応力度を三角形分布と仮定した模式図である。圧縮側コンクリートが概ね弾性範囲にある条件として、圧縮縁コンクリート応力度を、圧縮強度の1/2~1/3程度としている。同図(c)では、さらにひずみが増加し、圧縮側コンクリートの非線形な挙動を応力ブロックで置換している。これらの場合の曲げモーメントは、次式(3)、(4)により表すことができる。

$$M_b = \frac{1}{6} \cdot (\eta_o + \eta_e) \cdot BD^2 \sigma_B \quad (1)$$

$$M_{lc} = \left(\frac{P_e}{E_c \cdot A_c + E_s \cdot A_s} + \frac{N}{E_c \cdot A_c + E_p \cdot A_p + E_s \cdot A_s} \right) \cdot Z = \frac{1}{6} \left(\frac{1}{1 + \eta_p \cdot p_p + \eta_s \cdot p_g} \cdot \eta_0 + \frac{1}{1 + \eta_s \cdot p_g} \cdot \eta_e \right) \cdot BD^2 \cdot \sigma_B \quad (2)^3$$

$$M_{la} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\eta_0 + \eta_e}{3/4 \cdot \chi} \right) (\eta_0 + \eta_e) BD^2 \cdot \sigma_B \quad (3)$$

$$M_{ll} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\eta_0 + \eta_e}{0.85} \right) (\eta_0 + \eta_e) \cdot BD^2 \cdot \sigma_B \quad (4)$$

ここで、 η_0 、 N ：軸力比および軸力（柱の場合）、 η_e 、 P_e ：有効プレストレス比および有効プレストレス力、 B 、 D ：断面幅およびせい、 Z ：断面係数、 σ_B 、 E_c ：コンクリートの圧縮強度とヤング係数、 ϵ_s 、 ϵ_p ：普通鉄筋およびPC鋼材のヤング係数、 A_c 、 A_s 、 A_p ：コンクリート、普通鉄筋、PC鋼材の断面積、 η_s 、 η_p ：普通鉄筋およびPC鋼材のコンクリートに対するヤング係数比、 p_g 、 p_p ：普通鉄筋およびPC鋼材の鉄筋比（鋼材比）、 χ ：三角形分布で仮定した圧縮縁応力度の圧縮強度に対する比、である。

上式(1)、(3)、(4)は、表-1に示す係数 α を用いることで、次式(5)のように、一般化して表現することができる。

$$M = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\eta_0 + \eta_e}{\alpha} \right) \cdot (\eta_0 + \eta_e) \cdot BD^2 \cdot \sigma_B \quad (5)$$

表-1 係数 α と断面の応力状態の関係

状態	図-1(a) M_{lb}	図-1(b) $\sigma_c = 1/3 \sigma_B$	図-1(b) M_{la} $\sigma_c = 1/2 \sigma_B$	図-1(c) M_{ll}	M_{ll} 0.85
α	1.5 $(\eta_0 + \eta_e)$	1/4	3/8	0.85	$\eta_e \rightarrow \eta_v^*)$

*) 式(5)中の η_e を η_v (PC鋼材降伏時応力のプレストレス比)に置換

2. 2 変形評価法

変形の評価方法として、以下の手法を考える。

- i) 弾性剛性により求める (式(6))
- ii) 部材の曲率分布を仮定し、その積分として求める
- iii) 部材の変形が圧着面での回転により生じると仮定し、PC鋼材の抜け出し量の和として回転角を求める

曲率分布を積分する場合は、その仮定により複数の方法が考えられる。ここでは、図-2のように曲率分布を仮定して変形を評価する方法を考える。同図(a)はバイリニア形の分布とした仮定に、同図(b)は塑性域内を一定曲率とした仮定³⁾であり、それぞれ式(7)、(8)となる。

一方、鋼棒の抜け出し量による場合は、鋼棒の歪度の仮定が必要となるが、評価方法は式(9)となる。

$$R_{l, II} = \frac{M_{II, II}}{3E_c I / a} \quad (6)$$

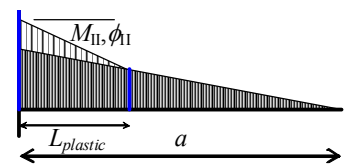
$$R_{rec} = \frac{1}{2a} \cdot \left[\phi_{II} \cdot \left\{ L_{plastic}^2 + L_{plastic} \cdot (2a - 2L_{plastic}) \right\} + \frac{2M_{II} / a \cdot (a - L_{plastic})^3}{3E_c \cdot I} \right] \quad (7)^3$$

$$R_{tri} = \frac{a}{6} \cdot \left(\phi_{II} - \frac{M_{II}}{E_c I} \right) \cdot \frac{L_{plastic}}{a} \cdot \left(3 - \frac{L_{plastic}}{a} \right) + \frac{a}{3} \cdot \frac{M_{II}}{E_c I} \quad (8)$$

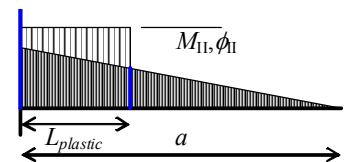
$$R_{III} = \frac{\Delta \epsilon_{pc}}{0.5D - x_n} \cdot \frac{L_{PC}}{2} + \frac{M_{III}}{3E_c I / L} \quad (9)$$

ここで、 a ：せん断スパン、 I ：断面二次モーメント、 $L_{plastic}$ ：ヒンジ領域長さ(=D：梁せい)、 L_{PC} ：PC鋼材の定着端間長さ、 x_n ：中立軸深さ、 $\Delta \epsilon_{PC}$ ：PC鋼材の伸びによる断面せい方向重心位置のひずみ度増分、である。

また、ひずみ度増分として、プレストレス導入時ひずみ度(ϵ_{pe})から降伏ひずみ度(ϵ_{py})までとする方法のほか、終局限界状態として 10000μ を仮定して、 $\Delta \epsilon_{PC} = 10000 \mu - \epsilon_{pe}$ とする方法も考えられる。ここでは、 10000μ を仮定したが、限界状態については、例えば破断に至らないPC鋼棒ひずみ度の上限など、設定方法を検証する必要がある。



(a) バイリニア分布



(b) ヒンジ領域を仮定³⁾

図-2 曲率分布の仮定

2. 3 各折れ点の評価方法

前節までに述べた耐力および変形の評価法を組み合わせて、折れ点を求める方法を検討する。ここでは、スパンが短く、長期荷重による軸力を考慮する必要のある柱部材と、スパンが長く、長期荷重による軸力がない梁部材の場合を区別することとする。

両者に対して、前節までに述べた評価式と復元力特性評価法について、表-2に示す。特性点は3つに限定できないため、3折れ線とするための選択方法として同表に例示した。

表-2 復元力特性の算定方法一覧

	柱部材	梁:小変形モデル	梁:大変形モデル
第一折れ点	M_{Ib}, R_I	M_{Ib}, R_I	M_{II}, R_{II}
第二折れ点	M_{II}, R_{rec}	M_{II}, R_{Iri}	M_{III}, R_{III} $\Delta\epsilon_{PC} = \epsilon_{py} - \epsilon_{pe}$
第三折れ点(第二折れ点後の指向点)	M_{III}, R_{III}	M_{III}, R_{III} $\Delta\epsilon_{PC} = 10000\mu - \epsilon_{pe}$	M_{III}, R_{III} $\Delta\epsilon_{PC} = 10000\mu - \epsilon_{pe}$

3. 水平載荷実験結果との比較・検討

3. 1 実験における圧着部のモーメント・変形の算出方法

水平載荷実験では、一部の梁において、梁端部のPC鋼棒の緊張力をロードセルにより直接計測するとともに、圧着端部の変位計測を行っている。計測および算定方法の概念図を図-3に、変位計設置状況を写真-1に示す。計測値を用いて、以下の式により、梁端部のモーメントと回転角の関係を算出した。

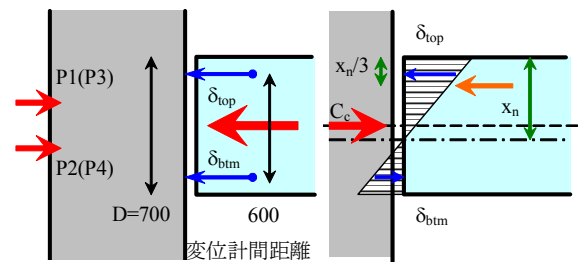


図-3 計測および算定方法の概念図

$$M = \sum P_n \cdot (D/2 - x_n/3) \tag{10}$$

$$x_n = \begin{cases} \frac{600 \cdot \delta_{top}}{\delta_{top} - \delta_{btm}} + 50 & \text{上端圧縮時} \\ 650 - \frac{600 \cdot \delta_{top}}{\delta_{top} - \delta_{btm}} & \text{下端圧縮時} \end{cases} \tag{11}$$

$$R = \frac{\delta_{top} - \delta_{btm}}{600} \tag{12}$$

ここで、M：梁端部のモーメント、 $\sum P_n$ ：4本のPC鋼棒緊張力の和 (n=1~4)、D：梁せい (=700)、 x_n ：圧縮縁からの中立軸深さ、 δ_{top} 、 δ_{btm} ：上端・下端で計測した軸方向変形、R：梁端の回転角、である。



写真-1 変位計設置状況

3. 2 復元力特性のモデル化

本実験の計測では、梁の圧着端部の局所的な変形を計測していることから、部材の弾性挙動は計測データに含まれていないと考えられる。そこで、非線形成分のみを評価するため、前章に示した復元力特性評価法 (大変形梁モデル) を用いて、次式により3折れ線でモデル化する。

第一折れ点

$$M_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\eta_e}{0.85}\right) \cdot \eta_e \cdot BD^2 \cdot \sigma_B \quad (\text{状態 } M_{II}) \tag{13}$$

$$R_1 = 0 \tag{14}$$

$$x_n = \frac{P_e}{0.85\sigma_B \cdot \beta B} \tag{15}$$

第二折れ点

$$M_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\eta_y}{0.85}\right) \cdot \eta_y \cdot BD^2 \cdot \sigma_B \quad (\text{状態 } M_{III}) \tag{16}$$

$$R_2 = \frac{\Delta\epsilon_{PC}}{0.5D - x_n} \cdot L_{PC}, \quad \Delta\epsilon_{PC} = \epsilon_{py} - \epsilon_{pe} \tag{17}$$

$$x_n = \frac{P_y}{0.85\sigma_B \cdot \beta B} \tag{18}$$

ここで、 M_1, M_2 ：第一、第二折れ点時梁端モーメント、 R_1, R_2 ：第一、第二折れ点時回転角、B：梁幅、 P_y ：PC鋼棒の降伏時の荷重、である。

なお、履歴については、既報⁴⁾に示したように、第二折れ点までは、非線形弾性とし、第二折れ点後

の除荷剛性を包絡線の第二勾配と等しいルールとしている。

3. 3 実験結果との比較

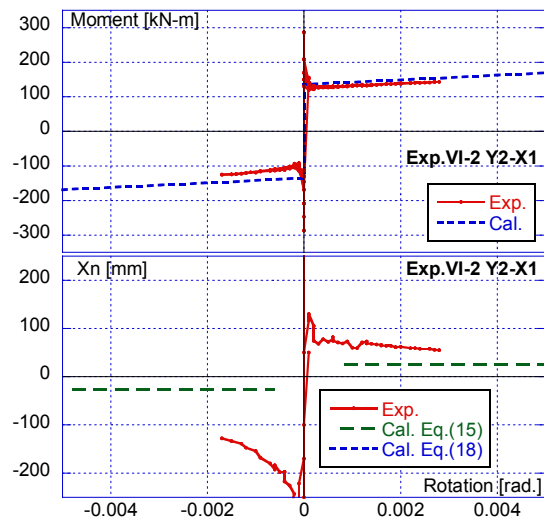
各実験について、梁端部のモーメント～回転角関係、中立軸深さと回転角の関係を図-4に示す。なお、実験VI-4については、除荷時の計算値もあわせて示した。

実験VI-2, 3では、ほぼ第二勾配までの範囲内となっており、モーメント～回転角関係は、計算値とよく対応している。特に、実験VI-2では、第二勾配上を推移し、非線形弾性挙動を示していることがわかる。一方、実験VI-3では、中立軸深さが、計算で仮定している値にほぼ漸近していることがわかる。一方、実験VI-4では、モーメント～回転角関係は、計算値と概ね対応しているものの、中立軸深さは、計算において仮定している値よりも小さな値へと漸近しており、計算仮定との対応がやや悪い。また、正負が非対称となっており、負側の対応がやや悪い傾向がある。これは、変形の増大に伴って、コンクリートの損傷が進み、計算仮定との相違が徐々に大きくなっていることによると考えられる。除荷時の剛性は、包絡線の第二勾配とほぼ等しくなっており、モデルとよく対応している。つまり、アンボンドPC圧着部材の履歴特性には、鋼材の降伏後の挙動が現れていると考えられる。

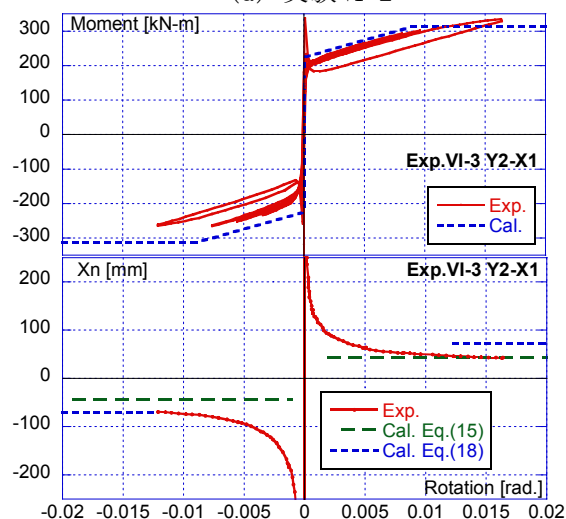
以上から、耐震性能を評価する際の復元性（地震被災前の状態に戻り、変形が復帰すること）を対象とすると、本モデルにおける第二折れ点を限界状態のひとつとして扱うことも可能と考えられる。ただし、本実験では、プレストレス導入量がコンクリート強度や部材断面に対して比較的小さいこと、長期荷重として自重程度しか負担していないこと、といった点から、コンクリートが損傷しにくい状況である。そのため、これらの点に着目した実験データの蓄積が望まれる。

4. まとめ

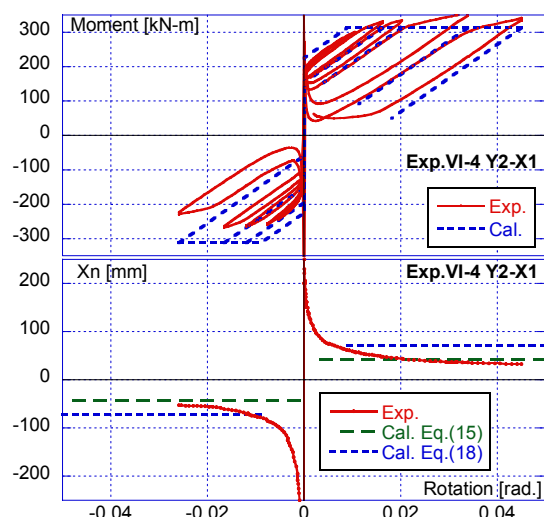
本報では、水平載荷実験結果のうち、梁端圧着部の挙動に着目し、非線形性状を検討した。ここで示した復元力特性モデルによる計算結果は概ね実験結果と対応した。ただし、損傷が進むにつれて対応が悪くなっており、これに着目して限界状態を定義できる可能性を示すとともに、さらなるデータ取得の必要性があることがわかった。



(a) 実験VI-2



(b) 実験VI-3



(c) 実験VI-4

図-4 圧着端部のモーメント・中立軸深さ～回転角関係

[参考文献]

1)岡本・太田：切り欠き付きプレキャスト梁による合成梁を用いたアンボンド PC 梁・柱圧着架構の地震荷重下における力学性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.1003-1004，2000.9 2)中塚・阿波野：丸形 PC 鋼棒圧着型片持ち PC 梁の荷重-変形関係のマクロモデルによる推定，日本建築学会構造系論文集，No.555，pp.141-148，2002.5 3)谷・西山：プレキャストプレストレストコンクリート圧着柱の曲げせん断性状と変形性能，日本建築学会構造系論文集，No.623，pp.103-110，2008.1 4)川久保・石岡・西村・細井・荒金・金川・竹田：構造安全性と生産合理性の融合を目指した鉄筋コンクリート造事務所ビル建築に関する研究（その10），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.669-670，2008.9