

(135) プレストレストコンクリート橋脚載荷実験の有限要素法解析

(株)構造計画研究所 解析部 正会員 ○川上 誠
 西松建設(株) 技術研究所 正会員 伊藤忠彦
 横浜国立大学 工学部 正会員 池田尚治

1. はじめに

コンクリート橋脚にプレストレストコンクリート(以下PC)構造を採用することは、曲げ変形に関する耐力や変形復元性の優れた特性を利用できることから、きわめて合理的な構造といえる¹⁾。このようなPC橋脚の耐震性能を把握するための実験的な研究が行われてきているが、破壊までを考慮した解析的な研究はまだ少ないようである。本報告は、筆者らが行ったPC橋脚載荷実験²⁾における破壊挙動を対象とした有限要素法解析を実施し、実験との比較考察を行った結果について報告するものである。

2. 実験概要

解析の対象とした供試体を図-1に示す。柱の断面寸法は30cm x 30cm、載荷位置は柱基部から100cmである。柱の主鉄筋はD10 x 12本(鉄筋比0.95%)で、帯鉄筋はD6を10cm間隔(0.21%)、柱基部では7.5cm間隔(0.28%)とした。PC鋼棒はφ17 x 2本で、アンボンド方式により1本当たり155.kNの緊張力(柱断面軸応力3.5MPa相当)を与えた。柱頂部に柱断面軸応力1.0MPa相当の一定軸力を負荷した状態で、変位制御による静的正負交番載荷を行った。表-1に材料試験から得られた材料物性値を示す。

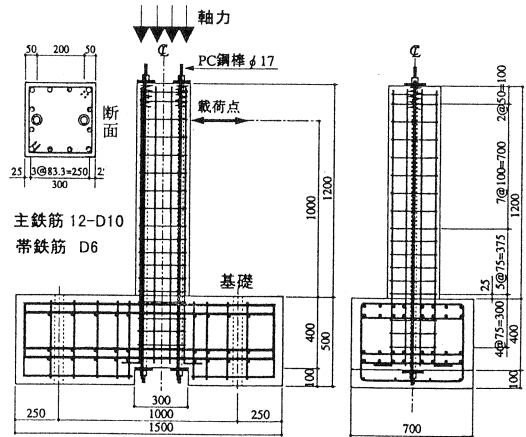


図-1 供試体の諸元

表-1 材料物性値 (MPa)

種類	規格等	降伏	引張	弾性係数
鉄筋	D6 SD345	347	550	1.88x10 ⁵
鉄筋	D10 SD345	401	578	1.84x10 ⁵
PC鋼棒	φ17 C種1号	1225	1284	1.96x10 ⁵
コンクリート	試験材令63日	34.9 (圧縮)	2.71	2.64x10 ⁴

3. 解析方法

解析には有限要素法を適用し、計算プログラムとしてADINA³⁾を使用した。

3.1 有限要素モデル

有限要素モデルは、図-2に示すように柱部分のみを対象とする2次元モデルである。コンクリート部分は2次元平面応力要素でモデル化し、その要素厚さは柱奥行き幅と同じ30cmとした。主鉄筋と帯鉄筋はトラス要素でモデル化し、その節点はコンクリート要素と共有させた(完全付着モデル)。鉄筋トラス要素の断面積は柱奥行き方向に配筋されている鉄筋本数分の合計

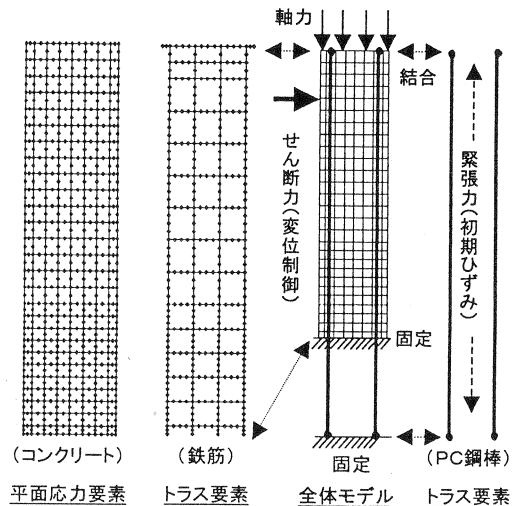


図-2 有限要素モデル

断面積を設定した。境界条件としてコンクリート部と鉄筋部共に柱基部を完全固定した。また1本のPC鋼棒は1本のトラス要素でモデル化し、その下端節点を固定した。PC鋼棒トラス要素の上端節点は柱頂部のコンクリート要素節点にのみ結合し、これ以外のコンクリート節点とは共有節点を持たせていない。このモデル化によりPC鋼棒トラス要素の緊張力はコンクリート要素の柱頂部からのみ柱に伝達されることとなる。荷重は柱頂部に一定の軸方向分布力を負荷した状態で、載荷点に水平方向の強制変位を負荷した。実験では正負交番載荷であるが、解析では柱の部材角が約1/150まで一方向に載荷し、その後、反力が零になるまで除荷した。解法は微小変形仮定の静的解析で、非線形の平衡方程式には平衡反復計算なしの単純増分法(増分変位=0.01mm)を適用した。

3.2 材料モデル

コンクリート材料には非線形性を有するコンクリートモデル⁴⁾を適用した。図-3に1軸の応力-ひずみ関係を示す。圧縮破壊時と終局時のひずみ値は、それぞれ0.2%,0.4%とし、終局応力は圧縮破壊応力の1/2とした。引張破壊後は付着による引張剛性の効果を考慮した。破壊判定には図-4に示すような主応力に関する2軸の応力破壊曲面を考慮した。ひび割れ発生後は低減されたヤング係数とせん断弾性係数を適用した直交異方性材料モデルが仮定され、応力-ひずみ計算が行われる。ポアソン比は0.167で一定とした。本計算法では分布ひび割れモデルを適用しており、応力-ひずみ計算や破壊判定は各有限要素内の応力計算点(要素積分点)において行われる。鉄筋の材料モデルはフォンミーゼス降伏条件によるバイリニア型応力-ひずみ関係の弾塑性モデルを適用した。PC鋼棒は実験と解析で降伏しないため線形弾性とした。PC鋼棒の緊張力は下式で表現されるように、初期ひずみにより考慮した。 $\epsilon_i = N_i / (EA)$, $\sigma = E(\epsilon - \epsilon_i)$
 上式はPC鋼棒トラス要素に関してのみ設定され、 ϵ_i は初期ひずみ、 N_i は緊張軸力、 E はヤング係数、 A は断面積、 σ は軸方向応力、 ϵ は変形に対応する全ひずみである。本式によれば、変形(ϵ)が増大するとPC鋼棒の軸応力(σ)も増大する現象が計算できる。

4. 解析結果

4.1 荷重と変位の関係

図-5に荷重と載荷点変位との関係を示す。解析では柱基部を完全固定として計算したが、実験では柱基部(基礎天端)の回転変位が測定された。そこでこの回転による付加的な載荷点変位を除去した実験の補正曲線を求め、これを解析結果と比較した。荷重-変位関係の剛性が徐々に低減するのは、4.2節、4.3節で述べるように各種の破壊が発生したためである。

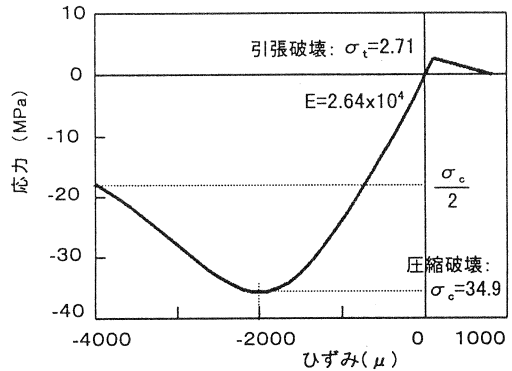


図-3 コンクリートの応力とひずみの関係⁴⁾

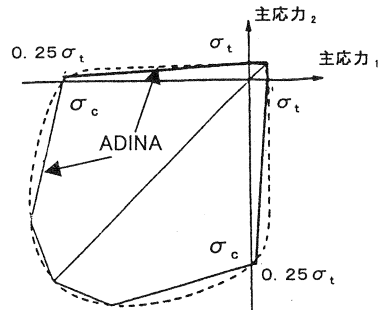


図-4 コンクリートの応力破壊曲面⁴⁾

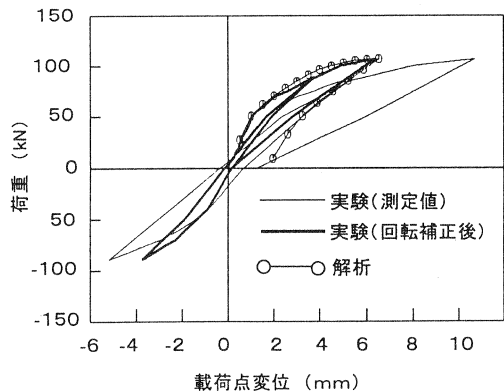


図-5 荷重と載荷点変位の関係

すなわち、i) 変位 1mm で柱基部の引張側コンクリートにひび割れが発生、ii) 変位 3mm で引張鉄筋が降伏し、その後柱基部の圧縮側コンクリートの圧縮破壊が開始、iii) 変位 6.5mm で圧縮鉄筋がほぼ降伏に達する。これらの破壊順序やその荷重、変位のレベルは、解析結果は実験結果とよく一致している。また一般にPC部材の除荷剛性は初期剛性に比較して小さく荷重-変位関係の原点を指向する特性(変形の復元性)があることが指摘されているが、本解析結果もその特徴を表現できていることがわかる。

4.2 コンクリートのひび割れと圧縮破壊

解析におけるひび割れと圧縮破壊の分布を図-6に示す。各種の破壊状態を表す記号(=, #, *)が有限要素内の応力計算点において表示されている。変位 1mm において柱基部の引張側にひび割れが水平方向に発生し始める。荷重の増加に伴いひび割れ発生領域が柱上部方向に拡大し、柱基部の引張側鉄筋が降伏する 3mm 変位時では柱高さの約 40%の位置まで達する。そのひび割れ発生領域は変位 6.5mm では高さ方向には拡大しないが、柱幅方向の曲げ中立軸位置付近まで斜め方向ひび割れとして拡大する。この時、柱基部の圧縮側コンクリートに圧縮破壊が発生しており、その直上部には軸方向圧縮応力により引き起こされる縦方向の割裂ひび割れが発生している。除荷後は 2mm の変位が残留し、ひび割れは閉じている。一方、実験で観察されたひび割れとコンクリート剥落の状況を図-7に示す。解析の一方向載荷とは異なり、実験では交番載荷であるため、ひび割れは左右対称的に発生している。図-8は図-6と図-7の最大破壊時の状況を比較したものである。ひび割れ発生範囲やひび割れ進展方向は、解析結果は実験結果とよく対応している。実験におけるコンクリート剥落が、解析における柱基部の圧縮側コンクリートの割裂ひび割れに起因するものと解釈すれば、両者の発生範囲はよく対応している。

4.3 鋼材のひずみ

図-9に荷重と柱基部の引張鉄筋ひずみとの関係を、図-10に荷重と柱基部の圧縮鉄筋ひずみとの関係を示す。解析値と実験値とは大きな塑性ひずみ領域で定量的な差異を示すものの、全体的にはよく近似した傾向を示している。図-11に荷重と引張側PC鋼棒ひずみとの関係を、図-12に荷重と圧縮側PC鋼

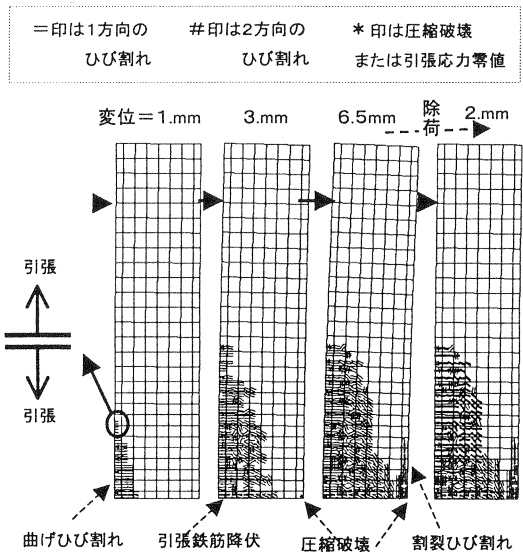


図-6 ひび割れと圧縮破壊の分布(解析)

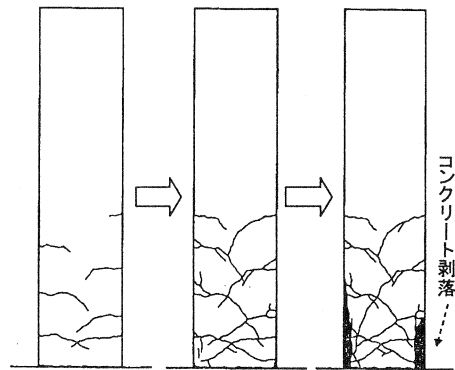


図-7 ひび割れと剥落の分布(実験)

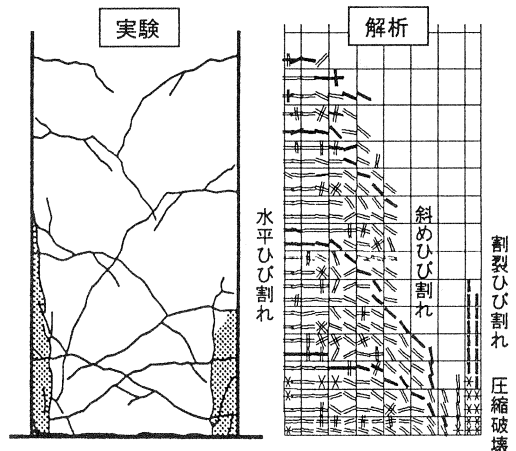


図-8 コンクリート破壊の実験と解析の比較

棒ひずみとの関係を示す。いずれも弾性ひずみである。解析値よりも実験値のほうが大きなひずみ値を示すのは、実験ではP C鋼棒の変位による幾何学的非線形の効果が含まれているが、解析では微小変形仮定のためそれは含まれていないためと考えられるが、両者は定性的には近似した傾向を示している。図-13に荷重と柱基部の帯鉄筋ひずみとの関係を示す。解析結果は実験結果ループの包絡線を形成する傾向にあり、圧縮ひずみから引張ひずみに逆転する現象などの特徴をよく捉えている。

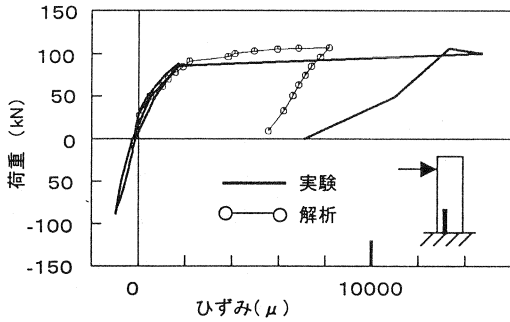


図-9 荷重と引張鉄筋ひずみの関係

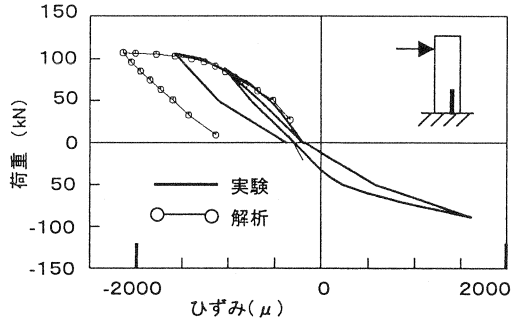


図-10 荷重と圧縮鉄筋ひずみの関係

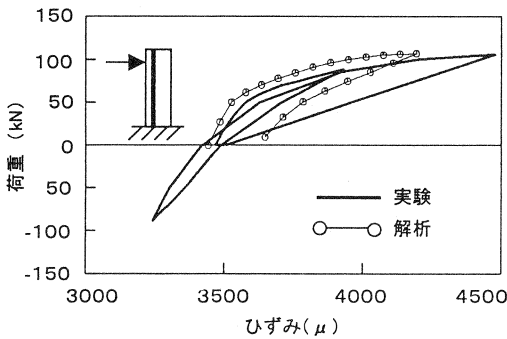


図-11 荷重と引張側P C鋼棒ひずみの関係

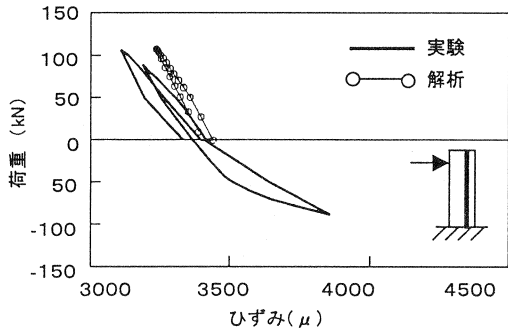


図-12 荷重と圧縮側P C鋼棒ひずみの関係

5. まとめ

コンクリートのひび割れや圧縮破壊、鉄筋の降伏などの非線形挙動を考慮した有限要素法を適用して、P C橋脚の載荷実験を解析した。解析結果によれば、荷重-変位関係、ひび割れ方向とその発生範囲、圧縮破壊の位置、鉄筋の降伏位置と荷重-ひずみ関係、などの観点において、P C橋脚の力学的挙動に関する実験結果を解析的によく表現できることがわかった。

参考文献

- 1) 池田尚治：耐震技術の今後の展望，橋梁と基礎，1996.8
- 2) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治：軸方向プレストレスを有するコンクリート橋脚の耐震性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19-2，1997.6
- 3) ADINA R&D, Inc.: ADINA Theory and Modeling Guide, Report ARD97-7, 1997
- 4) K. J. Bathe: Nonlinear Analysis of Concrete Structures, Computers & Structures, Vol.32, No.3/4, 1989

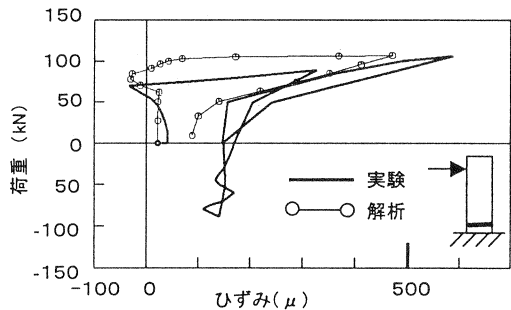


図-13 荷重と帯鉄筋ひずみの関係