

プレストレストコンクリート橋脚の耐荷挙動および大規模地震時挙動

Static Loading Behavior and Seismic Response with Level 2 ground motion of Pre-stressed Concrete Pier

株式会社ドーコン ○正会員 小林 竜太 (Ryuta KOBAYASHI)

株式会社ドーコン 正会員 工藤 浩史 (Hiroshi KUDO)

株式会社ドーコン 正会員 千賀 規宏 (Norihiko SENGA)

株式会社ドーコン 正会員 井上 雅弘 (Masahiro INOUE)

1. はじめに

本研究では、柱軸方向にプレストレスを導入して一体化を図った既設橋のプレストレストコンクリート橋脚を対象として、その基礎的な耐荷挙動や大規模地震時における動的挙動を把握することを目的として、材料非線形性を考慮した数値シミュレーション解析を実施した。

本研究では、静的な耐荷力特性や終局時の破壊形態を精度良く予測するために三次元非線形有限要素解析を適用し、同時に梁理論に基づいたファイバーモデルの適用性についても検討を行った。また、大規模地震（レベル2地震動）を想定した動的非線形解析では、その適用性を静的非線形解析における荷重－変位関係や水平変位分布および有限要素の損傷状態を比較する形で検証した上で、ファイバーモデルを用いた動的応答解析を実施した。

2. 解析対象の概要

本研究における解析対象は、円形中空断面を有する柱高 22.0m の単柱式のプレストレストコンクリート橋脚（以後、PC 橋脚）である。本橋脚は、柱軸方向に 7 分割された直径 2,980mm の円環状の鉄筋コンクリート（RC）製プレキャストセグメントを順次積み重ねて構築し、セグメント内に配置された計 36 本の PC 鋼棒を緊張することで柱軸方向にプレストレスを導入して一体化を図った構造である。なお、柱基部から 4.5m 上方まで、および柱天端から 1.2m 下方までの領域においては中空部にコンクリートが充填されている。また、柱基部から 5.0m 上方までの領域においては、セグメントの外周部に部材厚 300mm の鉄筋コンクリートが巻立てられている。図-1 には解析対象の形状寸法を示している。

3. 数値解析の概要

3. 1 三次元有限要素モデル

図-2(a)には三次元有限要素モデルにおける要素分割状況を示している。上梁部材は形状を詳細に再現せず、荷重載荷点位置まで柱部と同様な要素形状でモデル化した。但し、上梁重量と上部工死荷重反力を適切に考慮する必要があることから、当該要素の質量密度を調整する形で所定の重量を考慮している。適用した有限要素は、コンクリート要素は8節点アイソパラメトリックソリッド要素、PC 鋼棒および鉄筋は2節点埋め込み鉄筋要素とし、コンクリートと鋼材間は完全付着を仮定した。境界条件はフーチング下端を完全固定としている。なお、本解析には汎用有限要素解析コード **DIANA** を使用した。

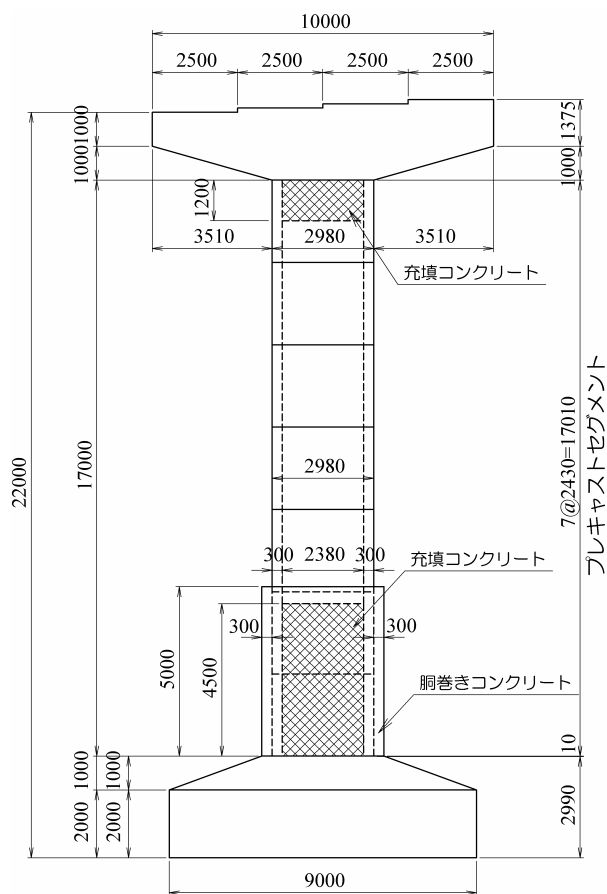
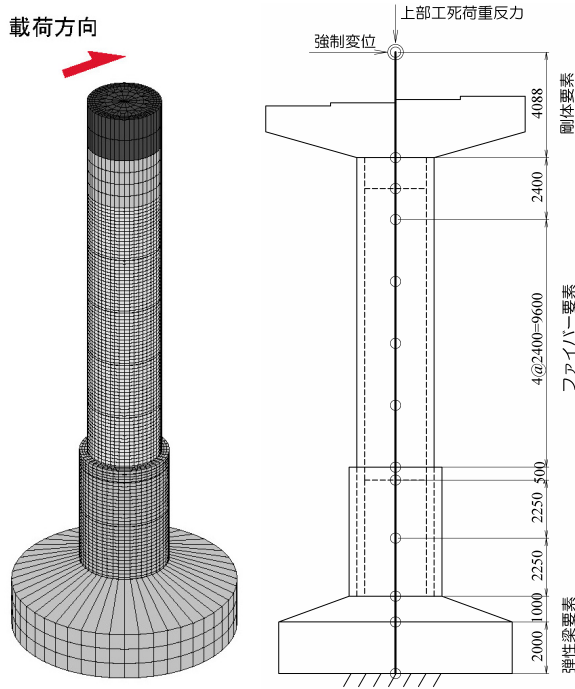


図-1 本解析で対象とした PC 橋脚の形状寸法

(1) コンクリートのひび割れモデル

本解析では、橋脚全体の非線形挙動を把握することを目的としていることから、ひび割れを巨視的に取り扱う分布ひび割れモデル (Smeared Crack Model) に分類される固定ひび割れモデル (多方向固定ひび割れモデル) を採用した。このモデルは、最大主応力がコンクリートの引張強度 f_t に達した段階で最大主応力の方向と直交する方向に第 1 ひび割れが発生し、第 1 ひび割れ発生後は既存ひび割れの方向と最大主応力の成す角度がひび割れ閾角度 α を超えた場合に新たなひび割れが発生すると仮定したモデルである。ここで、ひび割れ閾角度は $\alpha = 90^\circ$ 、ひび割れ発生後のせん断剛性低減係数は $\beta = 0.01$ と仮定し、コンクリートの 1 軸引張強度 f_t は、コンクリート標準示方書【構造性能照査編】に基づいて 1 軸圧縮強度 (本解析では設計基準強度) から推定することとした。



(a) 三次元有限要素モデル (b) ファイバーモデル
図-2 有限要素モデル（要素分割状況）

(2) 材料構成モデル

本解析に用いたコンクリートの材料構成モデルは、圧縮応力場に対しては弾塑性理論に立脚した構成モデル、引張応力場に対しては非線形破壊力学モデルを考慮した多方向固定ひび割れ構成モデルである。図-3にはコンクリート要素に用いた1軸の応力-ひずみ関係を示している。圧縮領域に対しては、圧縮ひずみ $3,500\mu$ まではコンクリート標準示方書【構造性能照査編】に基づいて定式化し、 $3,500\mu$ 以降は初期弾性係数の 0.05 倍で $0.2f'_c$ まで線形的に軟化するモデルを設定した。ここで、降伏判定には Drucker-Prager の降伏基準を用いて、内部摩擦角は $\theta = 30^\circ$ を仮定した。一方、引張領域に対しては、コンクリート標準示方書【構造性能照査編】における2直線モデルの引張軟化特性を考慮した。なお、引張破壊エネルギー G_F は CEB-FIP Model Code 1990 に基づいて算定し、要素の等価長さは要素体積 V の3乗根と仮定して、ひび割れ幅を引張ひずみに変換した。

図-4(a)にはPC鋼棒要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。PC鋼棒はコンクリート標準示方書【構造性能照査編】に準拠した Tri-linear モデルとした。

図-4(b)には鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。鉄筋は Bi-linear モデルとし、降伏後の塑性硬化（2次勾配）は弾性係数 E_s の 1% と仮定した。ここで、PC鋼棒および鉄筋要素の降伏判定には von Mises の降伏基準を用いた。なお、本解析では鋼材の座屈および破断は考慮しないものとした。表-1、2にはコンクリートおよび鋼材の力学的特性値を示している。

3. 2 ファイバーモデル

図-2(b)にはファイバーモデルの要素分割状況を示している。柱部材はファイバー要素、フーチング部材は

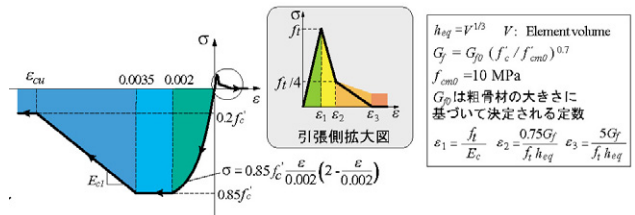
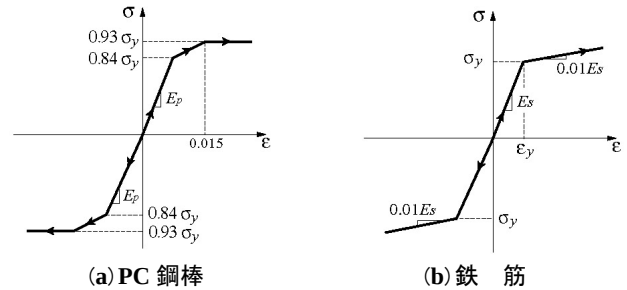


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係



(a) PC 鋼棒 (b) 鉄筋
図-4 鋼材の応力-ひずみ関係

表-1 コンクリートの力学的特性値

材 料	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比
コンクリート*1	50.0	3.12	33.0	0.2
コンクリート*2	30.0	2.22	28.0	0.2
コンクリート*3	21.0	1.75	23.5	0.2

*1: プレキャストセグメント

*2: フーチング、充填コンクリート

*3: 胴巻きコンクリート

表-2 鋼材の力学的特性値

材 料	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比
PC 鋼棒	1,080.0	200.0	0.3
鉄 筋	345.0	200.0	0.3

弾性梁要素を適用し、柱天端から荷重載荷点位置までは剛体要素を用いてモデル化を行った。本解析で用いたファイバー要素は、Timoshenko 梁理論に基づいた曲げによるせん断変形を考慮した3節点アイソパラメトリック梁要素である。境界条件は、フーチング下端を完全固定としている。なお、本解析には変位法に基づいた汎用骨組構造解析コード UC-win/FRAMe(3D)を使用した。

材料構成モデルは、コンクリート要素に対しては、後の動的非線形解析の実施を考慮してコンクリート標準示方書【耐震性能照査編】に基づいた弾塑性破壊モデルを適用した。ここで、本示方書では簡略化してコンクリートの引張応力領域を無視しているが、本解析では引張領域を考慮することとし、かつ、ひび割れ発生後のテンションスティフニング効果も考慮した。一方、PC鋼棒および鉄筋要素に対しては、三次元有限要素モデルで用いた応力-ひずみ関係と同じであるが、地震時の繰り返し载荷によって応力が正負反転することから、その履歴特性にバウシンガー効果を考慮することとした。

3. 3 解析手法

(1) 静的非線形解析法

静的非線形解析では、自重、軸圧縮力および PC 鋼棒に有効プレストレス (PC 鋼棒 1 本当たりの緊張力: $P_t=538.0\text{kN}$) に相当する応力を初期応力として導入した後に、荷重点位置を水平方向に 300mm まで強制変位させる変位制御方式による増分解析を行った。ここで、収束計算手法には Newton-Raphson 法を採用した。

(2) 動的非線形解析法

動的非線形解析は、直接積分法による時刻歴応答解析とし、数値積分は陰解法に基づいた Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) によって積分時間間隔 Δt は 1/100 秒と設定した。

入力地震波形は、道路橋示方書 V【耐震設計編】のレベル 2 地震動における標準波形とし、これをフーチング下端節点に入力した。なお、粘性減衰は第 1 次固有振動数に対して $h=2.0\%$ となる剛性比例型減衰を採用した。

4. 解析結果および考察

4. 1 静的非線形解析結果

(1) 荷重－変位関係

図-5 には静的非線形解析で得られた荷重点位置における水平荷重－水平変位関係を三次元有限要素モデルとファイバーモデルで比較して示している。図より、変位約 50mm 時点から剛性が顕著に低下し始めたが、急激な荷重低下は見られず、安定した荷重－変位関係が得られた。また、三次元有限要素モデルとファイバーモデルを比較すると、水平変位 50mm 近傍において若干の差異が見られるが両者は比較的精度良く一致しており、本橋脚の曲げ耐荷挙動は簡便な手法であるファイバーモデルによっても概ね評価可能であるものと考えられる。

(2) 柱軸方向における橋脚の水平変位分布

図-6 には PC 鋼棒降伏時および解析終了時における柱軸方向に関する水平変位分布を各モデルで比較して示している。図より、いずれのモデルも良く一致していることが分かる。また、橋脚基部の胴巻きコンクリート上面を境界として変形曲率が変化していることから、胴巻きコンクリートおよび中空部の充填コンクリートによる変形抑制効果が顕著に現れていることが確認できる。

(3) コンクリートおよび PC 鋼棒要素の損傷状況

図-7 には三次元有限要素モデルにおけるコンクリートおよび PC 鋼棒の鉛直方向ひずみ分布を示している。図中、赤色 (橙色) の領域はコンクリート要素ではひび割れが開口した状態、PC 鋼棒要素では降伏した状態を表している。図より、コンクリート要素では、柱基部から約 4D (D: 断面直径) の領域で水平方向の曲げひび割れが分散して発生しており、本橋脚は曲げ破壊によって終局状態に至るものと推察される。一方、PC 鋼棒要素では柱基部および胴巻きコンクリート直上で降伏が生じているが、胴巻きコンクリート直上の方が柱基部と比較して降伏領域が広いことが確認される。図-8 には解析終了時における柱基部および胴巻きコンクリート直上要素の断面内ひずみ分布を示している。これより、いずれの解析モデルも同様な傾向を示しており、ひび割れ領域は中立軸よりも圧縮側まで進展していることが分かる。

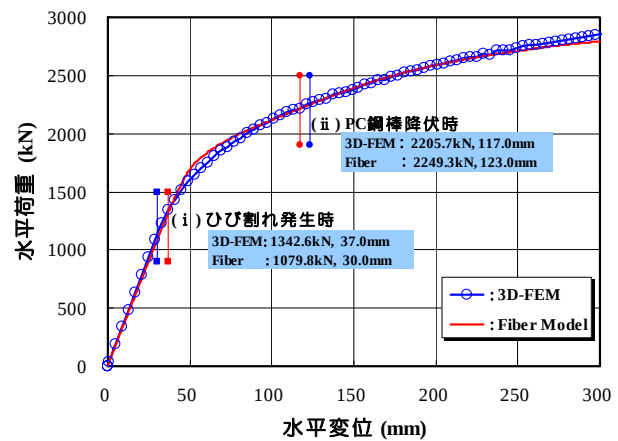


図-5 荷重点位置における荷重－変位関係

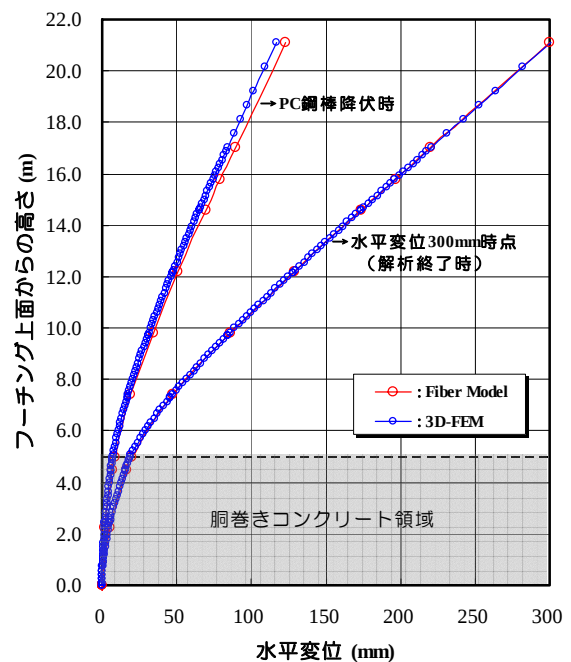
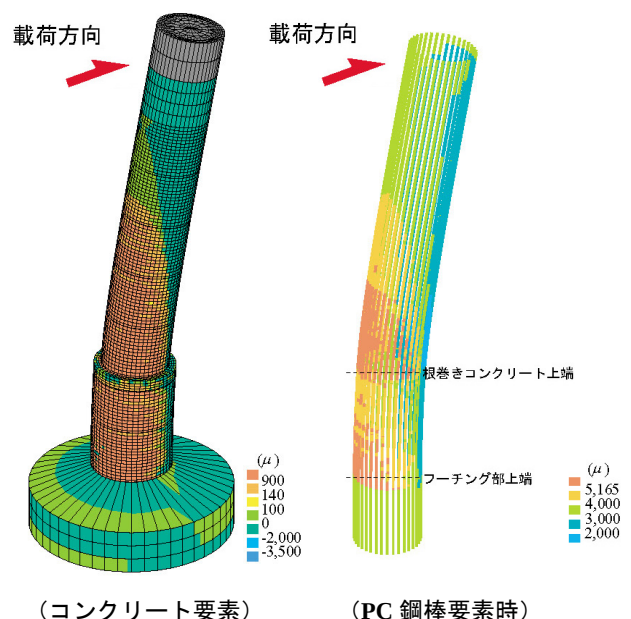


図-6 柱軸方向における橋脚の水平変位分布



(コンクリート要素) (PC 鋼棒要素時)

図-7 解析終了時における各要素のひずみ分布

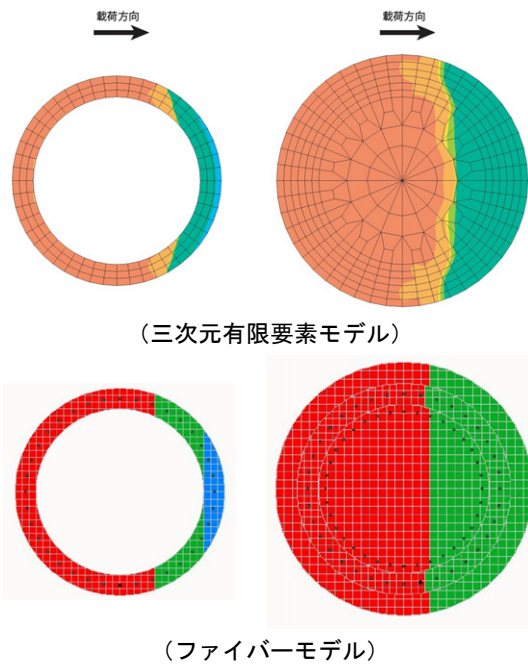


図-8 コンクリート要素の断面内ひずみ分布

4. 2 動的非線形解析結果

表-3 には動的非線形解析によって得られた慣性力作用位置における応答値を一覧にして示している。また、図-9 には応答波形の一例として、タイプII地震動入力時における慣性力作用位置の応答波形を示している。表より、最大応答加速度および最大応答変位に着目すると、タイプI地震動入力時ではそれぞれ 577.6gal, 100.8mm であり、タイプII地震動入力時では 993.1gal, 223.0mm であった。また、入力地震波形の継続時間終了後に 10 秒間の自由振動解析を行って評価した残留変位は、各地震動に対してそれぞれ 0.6mm, 3.2mm であり、プレストレスの効果によって残留変位量はいずれの場合も小さいことが分かる。一方、PC 鋼棒要素の損傷状態に着目すると、タイプI地震動入力時には降伏状態には至らないことが確認された。

図-10 には柱基部および胴巻きコンクリート直上の要素における曲げモーメントー曲率関係を示している。紙面上の都合により、タイプII地震動入力時に限定して示すものとする。ここで、図中点線は PC 鋼棒が第1降伏点に到達する時点の曲率値を示している。図より、いずれの着目断面においてもその復元力特性は PC 構造特有の原点指向型を呈していることが分かる。また、胴巻きコンクリート直上要素の応答曲率が柱基部と比較して大きく、胴巻きコンクリート直上近傍で損傷程度が大きくなる傾向にある。しかし、初期緊張力の低下が懸念される第2降伏点には至っていないため、大規模地震時における耐震安全性は確保されているものと考えられる。

これより、PC 橋脚の地震時における動的応答特性は、プレストレスの効果によってその復元力特性は原点指向型に近づき、鉄筋コンクリート(RC)橋脚と比較してエネルギー吸収性能は低下する傾向にあるが、一方で、残留変位を小さくすることが可能となることから PC 橋脚は地震後の復旧性能に優れた構造であるものと考えられる。

表-3 動的非線形解析における応答値一覧

項 目	入力地震動(レベル2地震動)	
	タイプ I	タイプ II
最大応答加速度(gal)	577.57	993.05
最大応答変位(mm)	100.84	222.93
残留変位(mm)	0.56	3.18
PC 鋼棒の降伏状態	降伏しない	第1降伏点到達

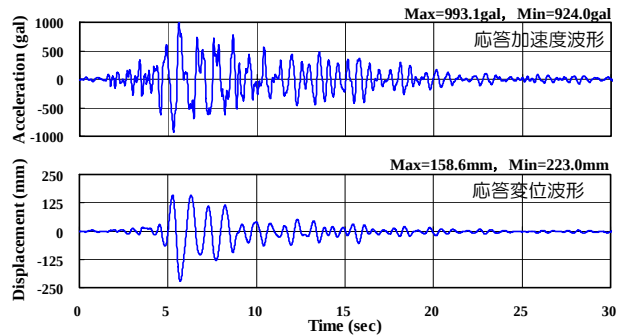


図-9 慣性力作用位置における応答波形の一例

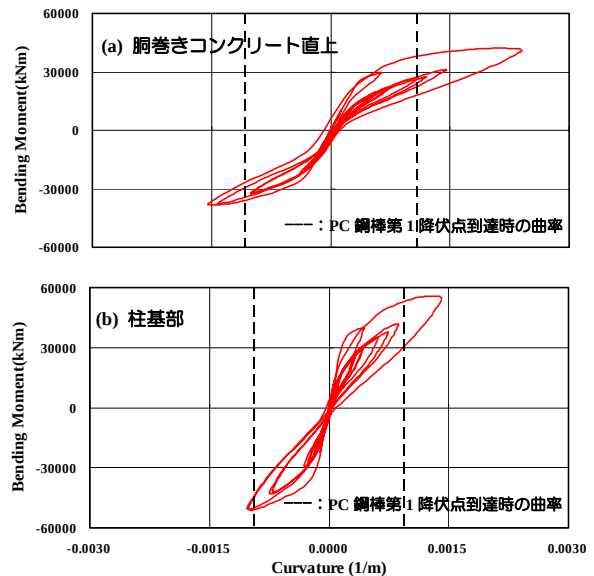


図-10 曲げモーメントー曲率関係(タイプII地震動)

5. まとめ

本研究で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- 1) 静的非線形解析より、安定した荷重ー変位関係が得られ、本橋脚は曲げ破壊によって終局状態に至ることが確認された。また、三次元有限要素モデルとファイバーモデルは比較的精度良く一致し、本橋脚の曲げ耐荷挙動は比較的簡便なファイバーモデルによっても概ね評価可能であることが明らかとなった。
- 2) 動的非線形解析より、PC 橋脚はプレストレスの効果によって復元力特性は原点指向型に近づくため、エネルギー吸収性能は低下する傾向にあるが、残留変位量を小さくできることから地震後の復旧性能に優れた構造であるものと考えられる。

謝辞：三次元非線形有限要素解析の実施にあたっては、室蘭工業大学建設システム工学科の岸徳光教授にご指導頂きました。ここに記して謝意を表します。