

剛体バネモデルによるPHC杭の破壊挙動解析

名古屋大学			○鞠	誠
名古屋大学	正会員	博(工)	中村	光
関西大学	正会員	博(工)	上田	尚史
岐阜大学	正会員	博(工)	国枝	稔

Abstract : In order to realistically evaluate the behavior of PHC-pile until post-peak region, Rigid Body Spring Method was used, which can show discontinuous behaviors such as cracking directly. The results of Rigid Body Spring Method were compared with experimental results of PHC-pile with load-displacement curves, crack damage area and spalling behavior, and the applicability was confirmed. Moreover, the effect of the confinement pressure and axial force as external factors were analyzed. It was shown that the axial force influences to the compression failure zone and even the low confinement pressure improve the ductility remarkably.

Key words : PHC-pile , Deformation performance , Confinement pressure, Axial force

1. はじめに

大地震時に構造物が損傷を受けた場合、復旧作業の難易度を考え、基礎構造に大きな損傷を生じさせるような設計は好ましくないと考えられている¹⁾。基礎形式としては、許容応力が大きく確保できるPHC杭が用いられる場合が多く、基礎の合理的設計を行うために、その変形性能を評価する検討が、実験的ならびに解析的に行われてきている²⁾。解析的な研究として、星隈ら³⁾は、スパイラル筋の拘束効果を考慮したモーメント-曲率関係を評価する手法を、今村ら⁴⁾は地盤の拘束効果を考慮したモーメント-曲率関係を算定する方法を提案し、梁要素への適用を可能にしている。白戸ら⁵⁾は、地盤の拘束力を考慮したファイバーモデルを用いた梁要素を用いる手法を提案している。また、山本ら⁶⁾は、3次元有限要素解析を用いてPHC杭のせん断破壊挙動の解析を行なっている。梁要素を用いる手法は断面のモーメント-曲率関係や材料の応力-ひずみ関係を用いることで、部材の荷重-変位などのマクロな挙動は評価可能であるが、ひび割れなどの損傷や圧縮破壊などの局所的な挙動を評価できない。また、有限要素解析は、ひび割れ状況を概ね評価できるが、局所化の影響で損傷領域などを評価できない問題がある。そのため、PHC杭の損傷が局所的に顕在化するポストピーク域までの挙動を解析的に正確に評価できる手法を開発すれば、PHC杭の変形性能を考慮したより合理的な設計や照査だけでなく、大地震時の構造物の復旧性の評価にも有用になると考えられる。

そこで、本研究では、ひび割れのような不連続現象を直接的に評価可能な剛体バネモデルを用いてPHC杭をモデル化し、その適用性を実験値との比較で確認した。更に、PHC杭の変形性能に影響を及ぼす外的な作用として繰返し中に増減する軸力や杭周囲からの拘束圧を取り上げ、その影響を解析的に評価した。

2. 解析手法

2.1. 3次元剛体バネモデル(3D RBSM)

本研究では、ボロノイ分割を用いたランダムな要素形状を有する3次元RBSM⁷⁾により解析を行った。本研究で用いたRBSMでは、図-1に示すように、各要素内の任意点(本研究では要素重心)に6自由度の3次元剛体変位を設

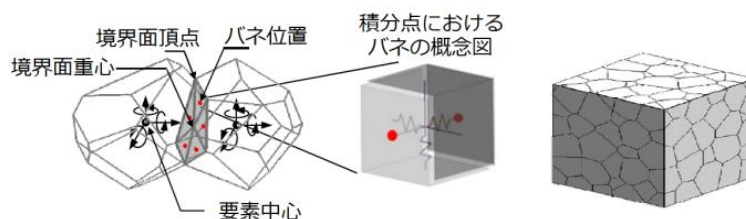


図-1 RBSMの概要

定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定した。積分点は、境界面を境界面重心と境界面頂点からなる三角形に分割し、その三角形の重心に設定した。積分点には、境界面法線方向および接線方向に、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置した（垂直バネが1個、せん断バネが2個）。

2.2. コンクリートモデル

コンクリートの材料特性は、垂直バネに圧縮・引張挙動、せん断バネにせん断すべり挙動をモデル化することで表される。RBSMにおいて、バネのひずみは積分点において算出される隣接要素の相対変位が特性長さ h で除されたものとして定義される。なお、本研究では、特性長さ h は隣接する二つの要素それぞれの重心から要素境界面に下ろした垂線長さの和とした。垂直バネの引張挙動は、図-2(a)に示すように1/4モデルでモデル化し、圧縮挙動は、図-2(b)に示すようにコンクリートの静水圧圧縮挙動を再現できるように、2つの2次関数を用いた逆S字曲線でモデル化した。このモデルを用いることで、拘束効果の影響も適切に評価できるモデルとなっている⁷⁾。せん断バネは、図-2(c)に示すようなせん断応力-せん断ひずみ関係でモデル化した。なお、同図にそれぞれの除荷経路を明記した。せん断強度以降の軟化勾配は、図-2(d)に示す関係を用い、垂直バネの応力に依存したモデルとしている。せん断強度は、図-2(e)に示すモール・クロン型の破壊挙動を使用する。

本解析で用いた図-2中のパラメータを表-1に示す。表中の上付き*は、材料試験により得られる材料特性値であることを示しており、 E^* ：ヤング係数、 f_t^* ：引張強度、 G_f^* ：破壊エネルギー、 f_c^* ：圧縮強度である。

図-3に後述の解析で用いるコンクリートの圧縮応力下の応力-ひずみ関係を示す。本解析に用いるRBSMでは、供試体寸法レベルの応力-ひずみ曲線が、構成モデルとしての入力データではなく、RBSMで解析することで得られる出力データとなる。したがって、この図はシリンダー供試体を後述のPHC杭

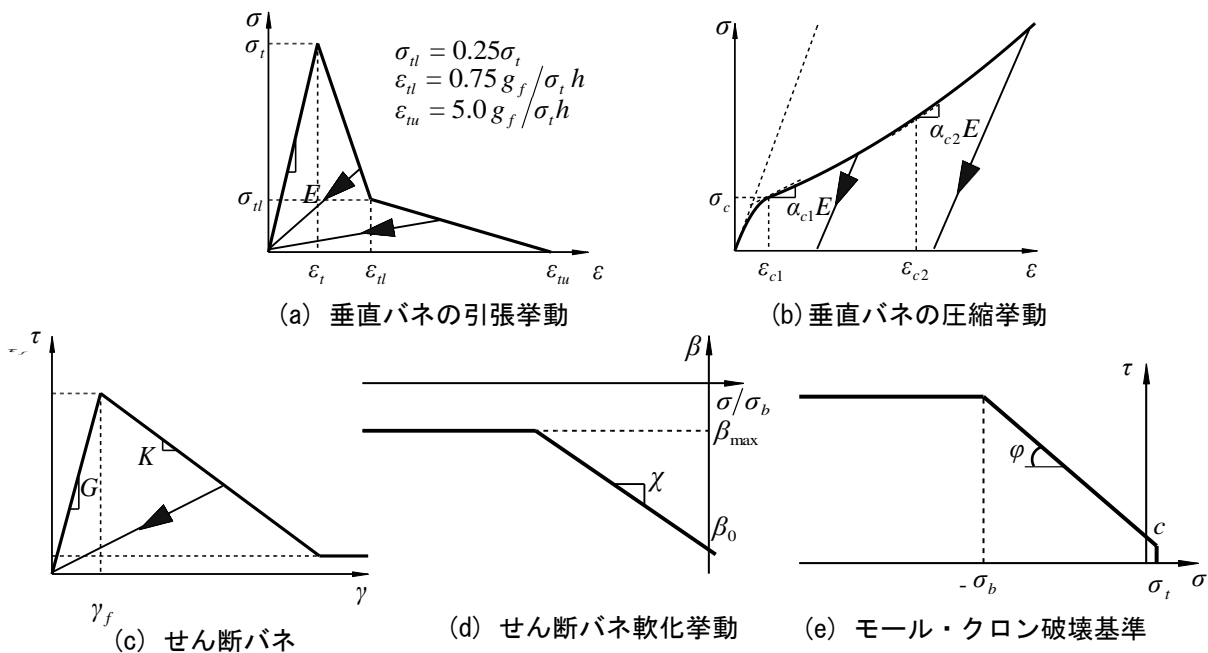


図-2 解析に用いた各バネの応力-ひずみ関係

表-1 解析パラメータ

Normal spring						Shear spring								
Elastic modulus	Tension		Compression			Elastic modulus	Fracture criterion		Softening behavior					
E N/mm ²	σ_t N/mm ²	g_f N/mm ²	σ_c N/mm ²	ϵ_{c2}	α_{c1}	α_{c2}	$\eta = G/E$	c N/mm ²	ϕ degree	σ_b N/mm ²	β_0	β_{max}	χ	κ
$1.4E^*$	$0.8f_t^*$	$0.5G_f^*$	$1.5f_c^*$	-0.015	0.15	0.25	0.35	$0.14f_c^*$	37	f_c^*	-0.05	-0.02	-0.01	-0.3

* The macroscopic material parameters obtained from the concrete specimens tests

を用いたモデルとほぼ同寸法の 20mm の平均要素寸法を用いてモデル化して一軸圧縮解析を行うことで得られたものである。図には、応力-ひずみ関係中の黒丸での RBSM による変形挙動も示しているが、ポストピーク領域において、急激に応力低下するとともに、局所化を伴いながら破壊する挙動を評価できている事がわかる。

2.3. 鉄筋モデル

鉄筋の要素は、コンクリート要素と関係なく自由に設置したトラス要素でモデル化した。図-4 に示すように鉄筋要素はコンクリート要素と長さ 0 であるリンク要素でつながっている。このリンク要素は鉄筋軸方向に対しては、コンクリート要素と鉄筋要素の相対変位に対して付着力の伝達を行い、鉄筋軸直交方向に対しては相対的な変位は生じないようにモデル化した。

鉄筋要素には、bilinear 型の応力-ひずみ関係を適用した。降伏後の硬化係数は 1/100 とした。鉄筋軸方向リンク要素には菅らが提案した付着応力-すべり関係⁸⁾を与えた。

3. PHC杭の曲げ挙動解析

3.1. 解析対象モデル

解析は宮川らが行った PHC 杭の静的水平載荷実験⁹⁾を対象として行った。宮川らの実験供試体は、図-5 に示すように、長さ 3m の $\phi 300$ B 種 PHC 杭 (外径 300mm, 厚さ 60mm) である。供試体には $\phi 7$ mm の緊張 PC 鋼線 12 本を配置し、 $\phi 3$ mm のらせん鉄筋は 100mm 間隔で配置されている。また、プレストレス導入量は 8MPa である。実験は、圧縮軸力 200kN を作用させた後、正負繰返し交番載荷で、ポストピーク領域まで載荷を行なわれている。解析は、宮川らが行った実験のうち横拘束圧がない場合の供試体に対して行った。図-6 に、ボロノイ分割により作成した解析モデルと鉄筋配置を示す。解析ではフォーミング上部からの実験区間部のみをモデル化し、平均要素寸法は 20mm とし、内厚部に 3, 4 要素程度配置できるようにした。PC 鋼線およびらせん鉄筋は、トラス要素により離散鉄筋として配置した。解析は PC 鋼線に内力として所定のプレストレスを導入後 (PHC $\phi 300$ B 種, プレストレス量 8N/mm²)、軸力を載荷し、水平一方向載荷により行った。なお、載荷方式の違いによる影響に関して、実験では最大荷重までの繰返しによる損傷が少なく、最大荷重後一方向の載荷で急激な荷重低下しているため載荷方式の違いによる影響が少ないと推定している。

3.2. 解析結果

図-7 に実験値と解析値の荷重-変位関係を示す。なお、実験値は包絡線を示している。また、実験

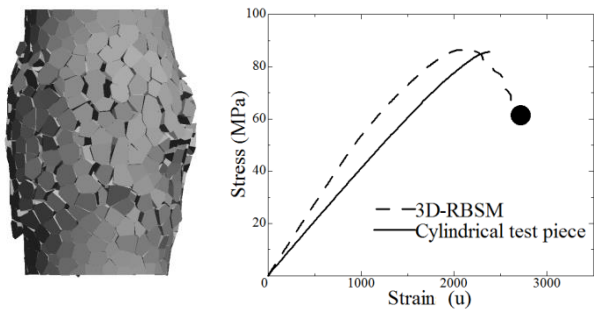


図-3 圧縮載荷試験のモデルと応力-ひずみ関係

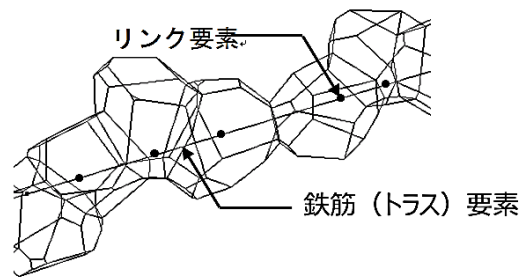


図-4 鉄筋モデル

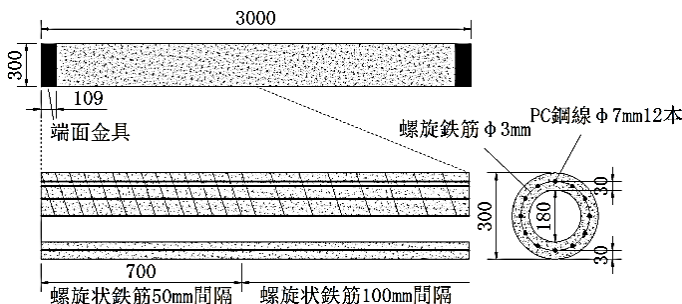


図-5 解析対象供試体

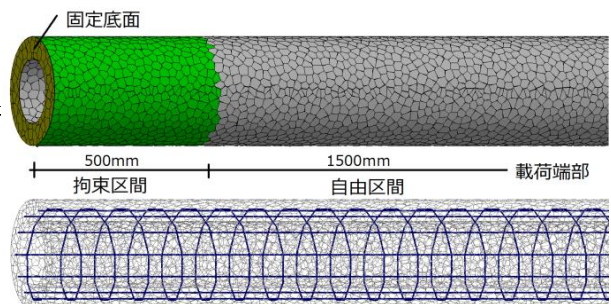


図-6 解析モデル

後の内部観察では、軸方向鉄筋の破断は観察されていない。解析値の初期剛性は実験値より大きな値を示している。しかし、その勾配は弾性理論に得られた値と一致している。一方、終局時の変形が実験値より若干大きくなっているが、最大荷重後の急激に荷重が低下する挙動など、実験の傾向とよく一致していることが分かる。

図-8に実験の最大荷重時である変位50mm時点と荷重低下後の変位60mm時点での損傷状況写真と、RBSMにより得られた急激な荷重低下直前の変位62mmと荷重低下後の変位70mmでの変形状を示す。実験では、最大荷重時点では杭下端部に圧壊が生じていることがわかる。また、荷重低下後は、広範囲にわたって圧縮部コンクリートの剥離が生じている。解析結果の変形状も実験結果と同様に急激な荷重低下前で杭下端部に圧壊が生じ、その後広範囲にわたる圧縮域で損傷の発生が生じている。解析上も圧壊の領域が実験とほぼ一致している。このように、RBSMを用いれば、PHC杭の荷重-変位関係のみならず、ポストピークまでの挙動をその局所のひび割れや損傷領域まで妥当に再現することが示された。

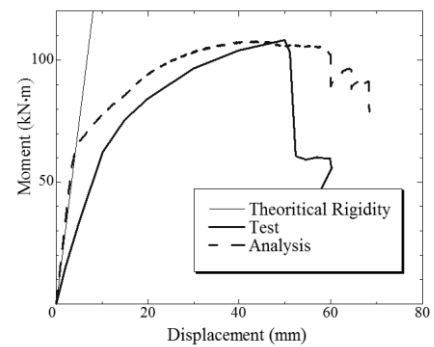


図-7 荷重-変位関係

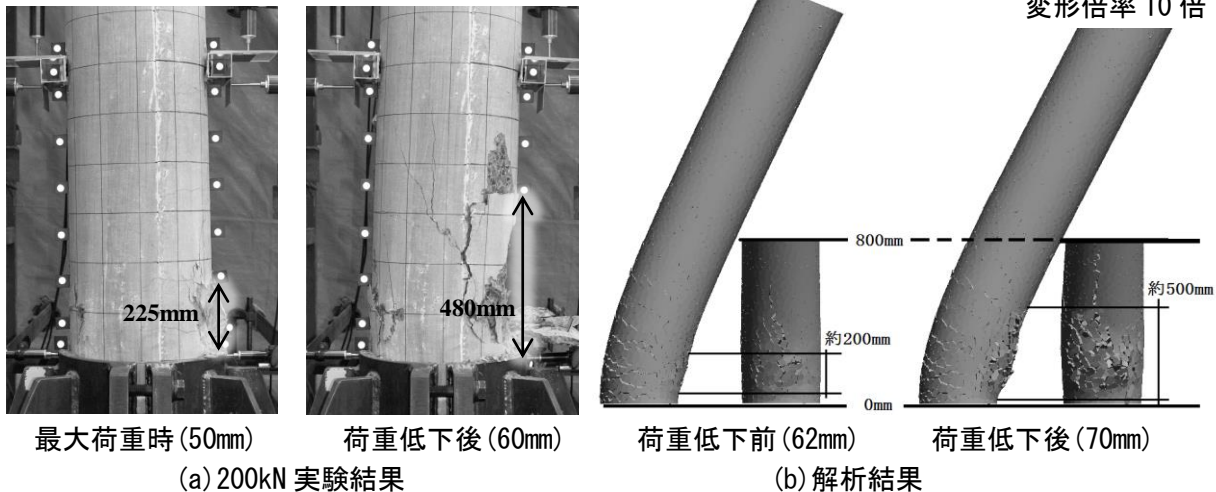


図-8 損傷領域の比較

4. 軸力の影響評価

杭基礎構造は、地震時には作用軸力が常に変化するような状態で荷重が作用する。したがって、軸力の変化によるポストピーク挙動への影響を評価することは、PHC杭の変形性能を評価する上で重要である。そこで、本章では、3章で示した供試体に対し、軸力の大きさを、引張軸力80kN、軸力なし、圧縮軸力200kN、400kNと変化させた解析を行い、軸力の影響を評価した。

図-9に、解析より得られた荷重-変位関係を示す。また、引張軸力80kN、圧縮軸力200kNの場合は、実験が行われているので⁹⁾、実験値も併せて示した。図より、圧縮軸力が大きくなることで、ひび割れ発生後の曲げ剛性や最大荷重が増加する傾向が得られた。一方、最大荷重時の変位は、圧縮軸力が大きいほど小さくなり、一般的によく知られてい

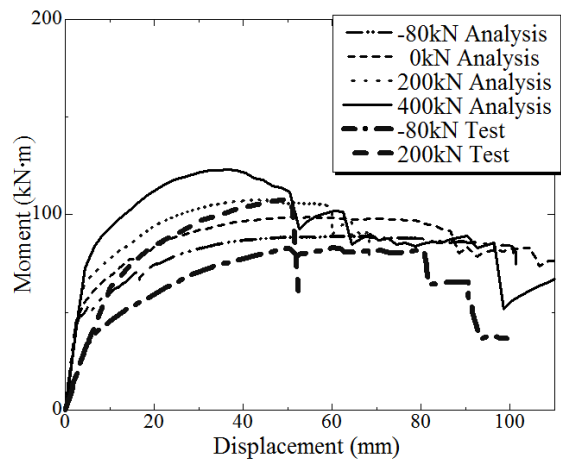


図-9 軸力による荷重-変位関係の比較

る傾向となっている。また、軸力が大きくなるほど、最大荷重後の荷重低下も著しくなっている。

図-10に、各軸力レベルでの荷重低下時の変形性状を示す。引張軸力 80kN を作用させた場合には、曲げひび割れが卓越した変形性状となっているが、圧縮軸力が大きくなるに従い、曲げひび割れが減少する傾向がある。また、引張軸力 80kN の場合は、基部から 200 ミリ程度の領域でコンクリートの圧壊が生じているが、圧縮軸力が大きくなるに従い、損傷領域が部材高さ方向に広がる傾向がある。圧縮軸力 400kN の場合では、基部から 500 ミリ程度の領域にわたってコンクリートの圧壊が生じていることが確認できる。このことから、圧縮軸力が増加することで、損傷領域が顕著に変化することが示された。

5. 拘束圧の影響評価

PHC 杭の実験のほとんどは気中で行われているが、その地盤中の挙動をより適切に評価するために、近年、地盤の拘束効果に着目した研究が行われている。既往の実験結果からは、地盤の拘束効果により、変形性能が改善することが明らかになっている^{4), 9)}。そこで、拘束圧を PHC 杭下部の 500mm の区間に静水圧として作用させた解析を行い、拘束圧の影響を評価した。なお、実験では拘束用鉄筋により等方的に拘束力を作用させているため、解析での拘束圧は実験と同様に等方的に作用させている。

静水圧としては、0.0MPa, 0.05MPa, 0.15MPa, 0.30MPa の 4 ケースとした。地盤による拘束圧は、G. L. - 15m で 0.25MPa (静止土圧) 程度と考えられ、比較的小さい場合の拘束圧を想定した。

図-11にそれぞれの静水圧により得られた荷重-変位関係を示す。拘束圧が増加することで最大荷重は若干しか増えないが、変形性能は大きく改善されることが分かる。このような結果は実験において既

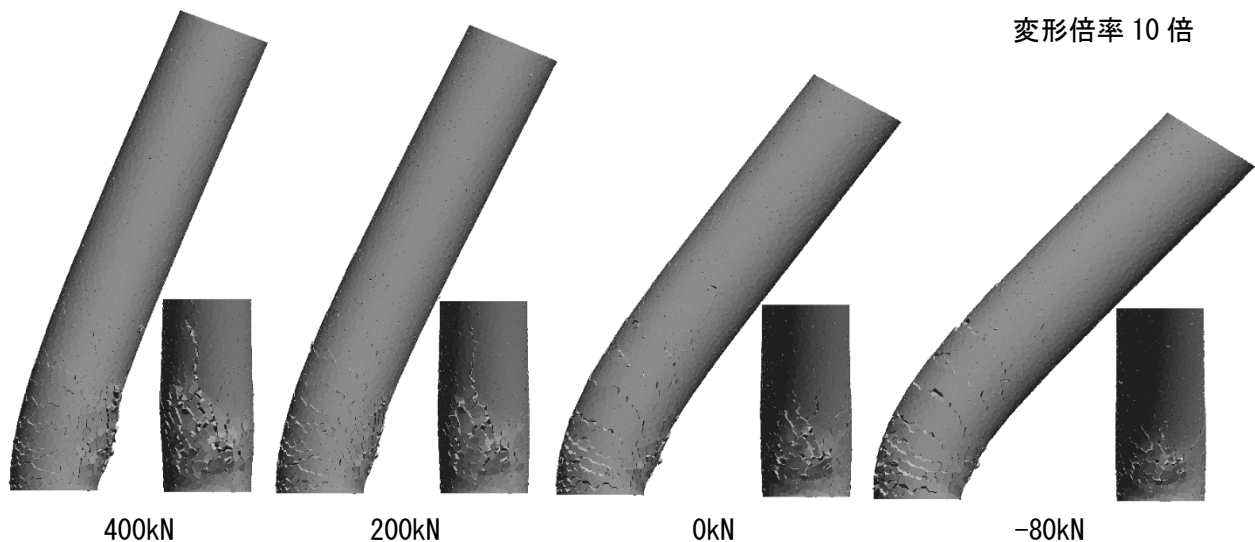


図-10 軸力の違いによる破壊性状の比較

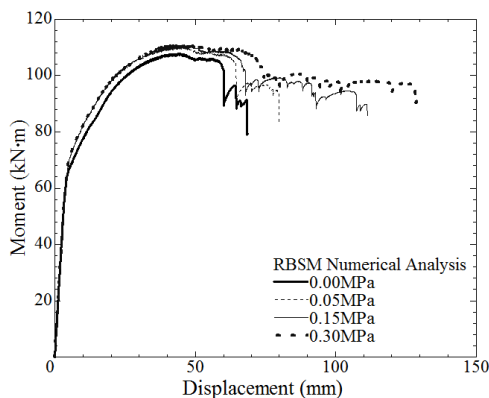


図-11 拘束圧による荷重-変位関係

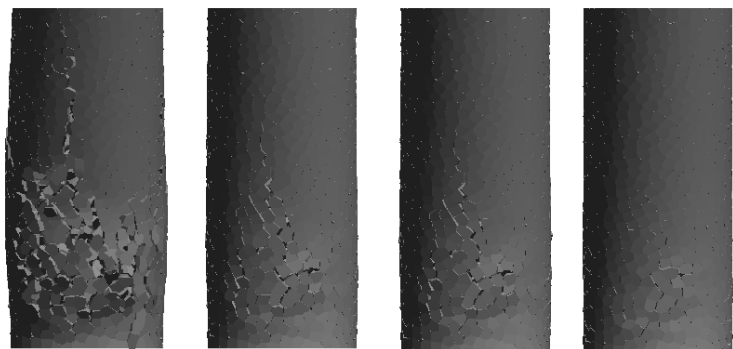
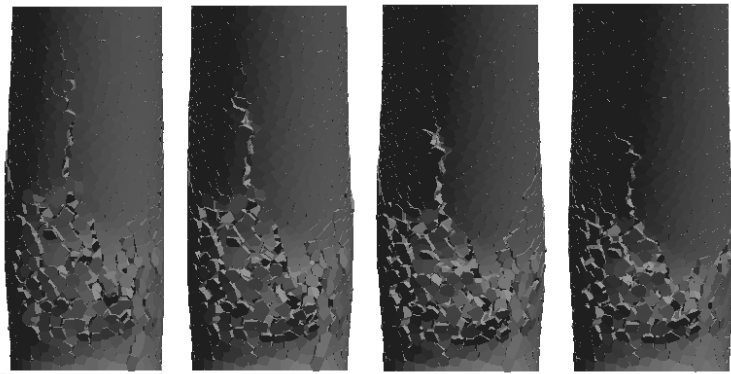


図-12 各拘束圧の同じ変位時点 (A: 70mm) での変形性状

に確認されているが、解析的にも比較的小さい拘束力で、最大荷重後に延性的な挙動を示すようになる

ことが示された。図-12 に各拘束圧における、水平変位 70mm 時点での杭下部の変形性状を示す。拘束圧がない場合には、水平変位 70mm 程度でコンクリートの圧壊が生じたが、他のケースは圧壊は生じていないことが分かる。また若干の拘束力の差異であっても、拘束力が大きいほど、圧壊が顕著に抑制されていることが分かる。図-13 に、荷重-変位関係の終局時である各時点での杭下部の変形性状を示す。その時の破壊性状や損傷領域は拘束圧の大きさによらずほぼ一致している。このことから、地盤から受ける程度の低い拘束圧は拘束効果によりコンクリート力学特性を改善させるのではなく、コンクリートの圧壊を遅らせる効果として働いていることが推測される。



a) 0.00MPa b) 0.05MPa c) 0.15MPa d) 0.30MPa

図-13 各拘束圧での終局変位（終点）での変形性状

その時の破壊性状や損傷領域は拘束圧の大きさによらずほぼ一致している。このことから、地盤から受ける程度の低い拘束圧は拘束効果によりコンクリート力学特性を改善させるのではなく、コンクリートの圧壊を遅らせる効果として働いていることが推測される。

6. 結論

本研究では、PHC 杭のポストピーク域までの変形挙動をより実現象に近い形で評価するために、不連続現象を直接的に評価可能な剛体バネモデルを用いた解析を行い、以下の結論を得た。

- 1) 本研究で用いた 3D-RBSM を用いれば、PHC 杭の荷重-変位関係のみならず、ポストピークまでの挙動をその局所のひび割れや損傷領域まで妥当に再現することができる。
- 2) 圧縮軸力が大きくなれば、PHC 杭の耐力は大きくなるが変形性能は小さくなり、急激な荷重低下を示すようになる。また圧縮損傷領域の大きさは軸力の影響を顕著に受けることが解析的に示された。
- 3) 地盤からの拘束程度の比較的小さい拘束力であっても、PHC 杭の変形性能は大きく改善されることが解析的に示された。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV 下部構造編，2012.
- 2) 黒正清治，和田章，小林克己，光木史朗，上田邦成：軸力と水平力を受ける高強度 PC 杭の力学的性状に関する実験，高強度 PC 杭の耐力変形性能向上に関する研究(1)，日本建築学会論文報告集，Vol. 376，pp. 71-80，1987.
- 3) 星隈順一，大塚久哲，津田和義，長屋和弘：高強度プレストレストコンクリート杭の変形性能とその評価法，土木学会論文集，No570/I-40，pp. 239-247，1997.
- 4) 今村年成，室野剛隆，永尾拓洋：地盤による拘束圧を考慮した RC 杭の変形性能の評価手法に関する検討，土木学会地震工学論文集，pp. 1-7，2005.
- 5) 白戸真大，福井次郎，中谷昌一：ファイバー要素を用いた数値解析による場所打ち杭基礎の性能評価，日本地震工学会論文集，Vol. 6，No. 4，pp. 38-53，2006.
- 6) 山本直孝，岸田慎司，香取慶一，林静雄：大口徑 PHC 杭のせん断破壊性状に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 20，No. 3，pp. 379-384，1998.
- 7) 山本佳士，中村光，黒田一郎，古屋信明：3 次元剛体バネモデルによるコンクリートの高速圧縮破壊解析，土木学会論文集，Vol. 32，No. 2，pp. 721-726，2010.
- 8) 菅満宣，中村光，檜貝勇，斉藤成彦：RC はりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 3，pp. 295-300，2001.
- 9) 宮川義範，河村精一，白鳥洋平，水野雅：地盤の拘束効果を想定した横拘束圧を受ける PHC 杭の変形性能，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 2，pp. 595-600，2012.