

## RBSM-FEM 結合解析手法を用いた RC 杭-地盤連成系の損傷評価解析

名古屋大学大学院 学生会員 ○北川 晴之

名古屋大学大学院 正会員 山本 佳士, 中村 光, 三浦 泰人

### 1. はじめに

近年, コンクリート構造物の耐震設計は, 震災後の復旧の難易度, 工事費までを考慮することが必要になってきている. このような背景から, 特に, 一度損傷を受けると機能の復旧が困難になる地中構造あるいは基礎構造を含む構造全体系の非線形応答を高精度で再現可能な数値解析手法の確立が望まれている. そこで著者らは, コンクリートの強非線形域の応答を再現可能な剛体バネモデル(RBSM)に地盤の非線形力学応答を再現可能な有限要素法(FEM)を結合した解析手法の開発を試みた. ここでは, 既往の実験との比較により, 提案モデルの妥当性および有用性を検証する.

### 2. 解析手法

コンクリートを Voronoi 分割によるランダム多面体要素を用いた RBSM により, 地盤を 8 節点ソリッド要素 FEM によりモデル化した. RBSM のバネの構成モデルにはコンクリートの引張, 圧縮軟化・局所化挙動, 拘束圧依存性等を再現可能なモデルを適用したり, 地盤の

構成則には, 双曲線型の Hardin-Drnevich モデルを偏差応力-偏差ひずみ関係に導入したモデルを適用した<sup>3)</sup>. RBSM と FEM は垂直バネおよびせん断バネで構成されるリンク要素により結合する. 当初, リンク要素は, FEM の節点ごとに配置していた(図-1). しかしながら, 本研究で適用しているコンクリートのバネの構成モデルでは, 高い精度を実現するために比較的小さい RBSM 要素寸法を必要とし, FEM よりも要素寸法が小さくなるケースがほとんどであるが<sup>4)</sup>, その場合, 図-1 の方法では, 結合位置に偏りが生じる. そこで, 本研究ではさらに RBSM 要素の境界面を重心と頂点からなる 3 角形に分割し, その 3 角形の重心一つ一つに対しリンク要素を配置するモデルも開発した(図-2). これにより, 結合点の偏りを小さくすることができ, さらに異材料間のモーメントの伝達も再現することができる.

### 3. 地盤中における RC 杭の水平載荷解析

#### 3.1 実験および解析概要

提案モデルの妥当性を検証するために, 牧らによって行われた乾燥砂中の RC 杭の正負交番載荷実験<sup>2)</sup>を対象に解析を行った. 実験概要を図-3 に示す. 土槽底面に RC 製の杭を固定し, 乾燥砂を充填することで模型地盤を作製している. 表-1 に実験ケースを示す. 模型地盤には緩詰と密詰の 2 種類を用いている. 緩詰は乾燥砂を一定高さから自由落下させることで作製し, 密詰ではさらに, 地盤深さ 300mm 毎にコンクリートブロックで均一に突き固めることで締固めが行われている.

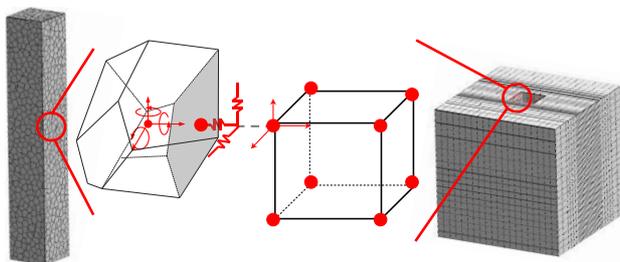


図-1 従来の FEM-RBSM 結合手法

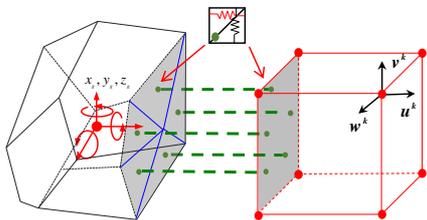


図-2 改良された FEM-RBSM 結合手法

表-1 供試体概要

供試体名	主鉄筋	地盤状態	相対間隙率 (%)
RCX-L-R	4-D10	緩詰	55.53
RGR-L-R	4-D6	緩詰	55.53
RGR-D-R	4-D6	密詰	67.27

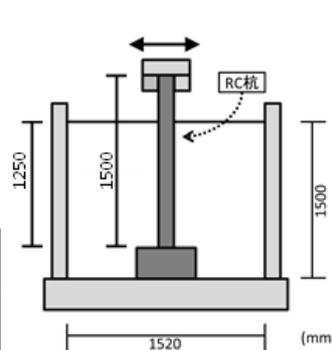


図-3 実験概要

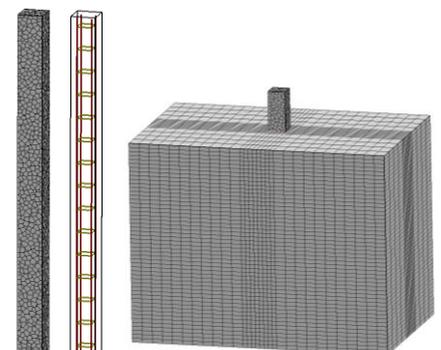


図-4 解析モデル概要

キーワード コンクリート構造-地盤連成系, 剛体バネモデル, 有限要素法

連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 工学部 9 号館 526 号室 TEL 052-789-4484

RC 杭は主鉄筋に D6 および D10 を使用した 2 種類の供試体が用いられている。図-4 に解析モデルを示す。RBSM のバネの材料特性は文献<sup>1)</sup>により算定し、緩詰、密詰地盤の材料特性は、文献<sup>2), 3)</sup>を参考に、砂の相対間隙率および土圧に伴う拘束圧を考慮して算定した。

3.2 解析結果

図-5 に、RC 杭頭部における荷重-変位関係を示す。RCX-L-R および RCR-L-R では、初期剛性を過大評価しているものの、最大荷重は概ね一致している。一方、RCR-D-R では最大荷重を過小に評価している。図-6 に RC 杭のひび割れ図と変形図を示す。最大荷重が一致した緩詰のケースでは、ひび割れ集中箇所も概ね一致している。密詰では荷重-変位関係と同様に実験との乖離が見られた。この実験との乖離は、ほぼ同様の砂のモデルを用いた牧らの FEM による解析でも見られた。牧らはこの乖離の理由として、締固めによる材料特性の変化を表現できていないことを挙げている。本研究では、この指摘を参考に、砂のせん断強度が解析結果に与える影響を検証した。図-7 からせん断強度が上昇するにつれ、最大荷重も上昇していることが確認され、せん断強度を 3 倍と仮定した時が最も実験に近い最大荷重を示した。また、図-8 より、せん断強度が上昇するにつれ、ひび割れ集中箇所が上昇し、せん断強度を 3 倍と仮定した時が最も実験に近い性状を示した。なお、図-

1 に示す結合方法で同様の解析を行った場合、実験では確認されていないコンクリートの圧壊とそれに伴う荷重の低下が確認された。一方、図-2 の手法では、RC-地盤間の応力伝達が適切に表現され、実験と同様に圧壊は生じていない。すなわち地盤による拘束効果を良好に再現できたと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。  
 (1)提案モデルは適切に材料パラメータを評価することで最大荷重、ひび割れ性状の変化を概ね再現できる。  
 (2)リンク要素の配置方法の変更によりコンクリートと地盤の相互作用及び地盤による拘束効果をより良好に再現できた。  
 (3)地盤のモデル化については締固めの影響等、適切に材料パラメータを評価できる、より高度な構成則を導入する予定である。

参考文献

1) 山本佳士ほか：3 次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol64, No.4, pp.612-630, 2008. 2) 牧剛史, 陸好宏史：鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性と変形性状に関する研究, 土木学会論文集 No.683/V-52, pp.103-108, 2001. 3) 石田毅, 渡辺啓行, 伊藤洋, 北原義浩, 松本正毅：低拘束圧下の模型実験材料(岐阜砂等)の静的・動的物性, 電力中央研究所研究報告, No.380045, 1981.5.

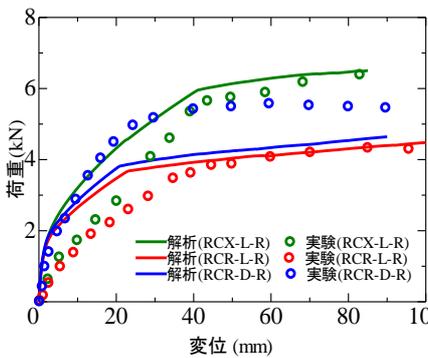


図-5 荷重-変位関係

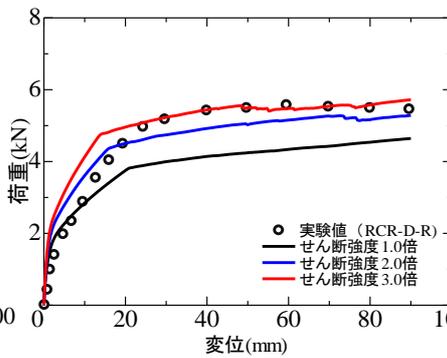


図-7 砂のせん断強度の影響

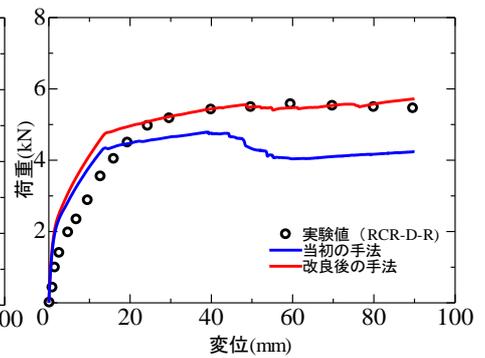


図-9 結合手法の違いによる荷重-変位関係への影響

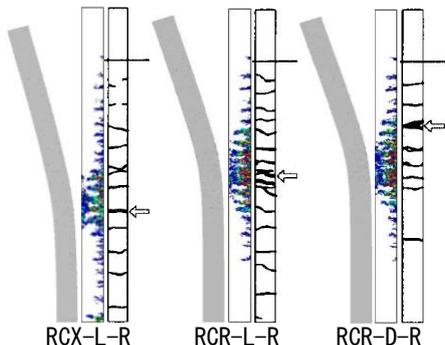


図-6 ひび割れおよび変形図  
(変位:80mm, 変形倍率 3 倍)

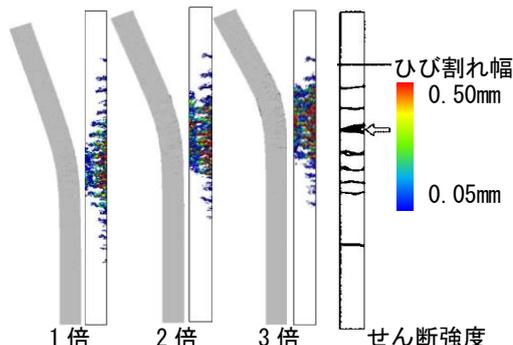


図-8 感度解析のひび割れおよび変形図  
(変位:80mm, 変形倍率 3 倍)



当初の手法 改良後の手法  
 図-10 結合手法の違いによるひび割れ性状の変化  
(変位:80mm, 変形倍率 3 倍)