

断層の直撃を受ける RC 構造の損傷モードと 人工岩盤による損傷制御の可能性

横浜国立大学 正会員 ○ 山野井 悠翔, 正会員 前川 宏一
東電設計 正会員 小林 正幸, 正会員 船場 翔

1. 背景と目的

構造破壊が甚大な被害に繋がる重要構造物に対しては、設計外力を超えた事態においても最低限の機能維持や Resilience (回復力) を発揮するような、残余のリスクを考慮した設計と備えが求められる。本研究では、地盤中を走る断層の直撃を受ける RC 構造の損傷モードに着目し、自然免震を模擬した人工岩盤による損傷制御効果について、実験と解析の両面から定量分析を行った。

2. 数値解析による事前検討

2. 1 解析概要

断層変位を岩盤の局所的なせん断破壊の連続と捉え、岩盤—RC 構造—地盤のそれぞれが相互作用を及ぼしながら、せん断局所変形が進展する高次の非線形現象として解析を実施した。本研究では連成構造を一体とした解析対象と捉え、せん断軟化を模擬可能な構成則を含む 3 次元非線形解析¹⁾を用いて、全体系に展開する損傷モードを数値的に検討した。使用したモデルは、支持層の上に配置された地中ボックスカルバートを想定した対称の有限要素モデルである (図 1 参照)。支持層と表層地盤は dilatancy を考慮した multi-plastic function 地盤モデル²⁾を用い、ボックスカルバートは非直交多方向ひび割れ RC モデルを使用した。各解析用物性値を表 1 に示す。岩盤に対しては相対密度を 99.9% に設定し、破壊面が凹凸の無い平面を模擬した。支持層上盤端部に強制変位を与えることにより、地盤に局所化せん断変形の発生と進展を再現し、その延長上に RC 構造を据えている。

2. 2 地盤と地中 RC カルバートの相互損傷モード

対象構造の損傷モードを検討した結果、断層がスラブのせん断破壊を励起し、RC 底版を貫通した。構造物の剛性や支持層、表層地盤の剛性等を変動させると、RC 構造と周囲 (支持層、表層地盤) との相対的な剛性差によって、①スラブの局所的なせん断破壊モードと、②ウェブも含めた RC 構造全体で変形する損傷モードが確認できた (図 2)。さらに、RC 地中構造と支持層間に 1 層の人工岩盤 (例えば柏崎原子力発電所⁴⁾) を模擬した弱層を設けたところ、大きな損傷制御効果が得られた。

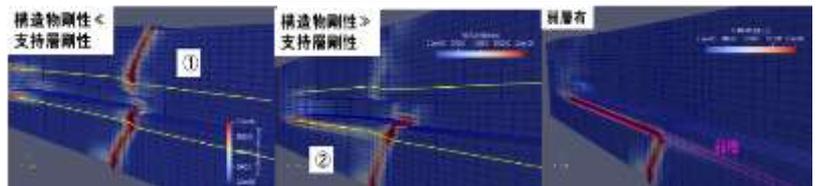


図 2 損傷モードの比較 (主ひずみコンター図)

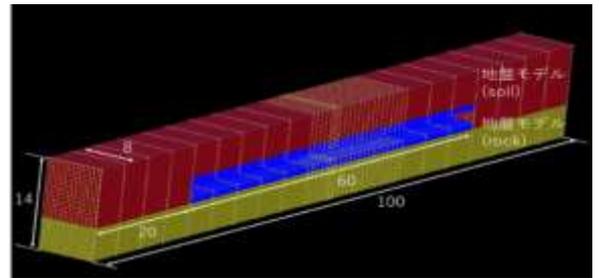


図 1 数値解析モデル概要 (単位: m)

表 1 解析用物性 (ベースモデル)³⁾

コンクリートモデル		躯体	人工岩盤
ヤング係数	(kgf/cm ²)	220000	9760
圧縮強度	(kgf/cm ²)	300	36.9
引張強度	(kgf/cm ²)	26	6.8
地盤モデル		表層	支持層
初期せん断剛性	(kgf/cm ²)	633	5296
せん断強度	(kgf/cm ²)	2.6	17.9
付着力	(kgf/cm ²)	1.65	5.00
内部摩擦角	(deg.)	30	35
残留内部摩擦角	(deg.)	20.0	24.6

3. 連成梁を用いた模擬実験による破壊モードの確認

損傷モードの相互作用の解析信頼性を検証するため、RC 構造に岩盤断層変位が伸展する様子を想定した実験を行った。岩盤に相当する高強度モルタル、人工軟岩を模擬した低強度コンクリートを複合してせん断を作用させた。

キーワード 断層, 連成構造, 人工岩盤, 損傷制御

連絡先 〒247-0072 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 土木工学棟 TEL 045-339-4045

3. 1 実験概要

試験体は 150×300×1500 (mm) の直方梁とし、2 層梁は上層から岩盤を模擬した高強度モルタル層と RC 構造物を模擬した普通強度コンクリート、3 層梁は 2 層間に人工岩盤を模擬した弱層コンクリートが挿入された構成とした。予備試験と事前解析から、せん断破壊が高強度層から普通強度層へ伸展することを意図した層配置である。図 3 に荷重形式を示す。純せん断破壊に近い挙動の再現を意図して、支点は全て回転を許さない平坦固定とし、水平方向の摩擦をできるだけ小さくするように、シートを介在させた。

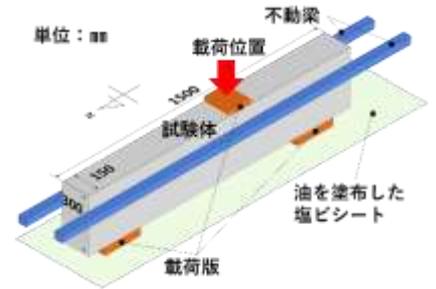


図 3 荷重形式模式図

3. 2 損傷モードの解析

各梁の破壊状況を図 4 に示す。2 層梁は上下層を貫くせん断ひび割れが確認できた。3 層梁では弱層でせん断と圧縮が混在する破壊が集中し、その結果、上下層の損傷は広範囲に分散し、損傷制御効果が確認できた。

弱層に対してコンクリートモデルを準用したケース（低圧縮強度を入力）と、地盤モデルを準用したケースでせん断破壊解析を実施した（表 1 参照）。両解析においては、主として弱層の変形に対する拘束圧依存性に違いがある（地盤モデルはコンクリートモデルよりも大きな拘束圧依存性を与える）。



図 1 各梁の破壊状況（左：2 層，右：3 層）

荷重点での荷重—変位関係と主ひずみの分布を図 5，図 6 に示す。損傷モードは弱層にコンクリートモデルを準用した解析が良好であるが、破壊時の荷重は地盤モデルを基にした解析の方がむしろ適合が良い。ただし、支点の水平摩擦力により反力が大きく影響されるので、弱層の物性の検討と併せて今後、検討を深化させたい。

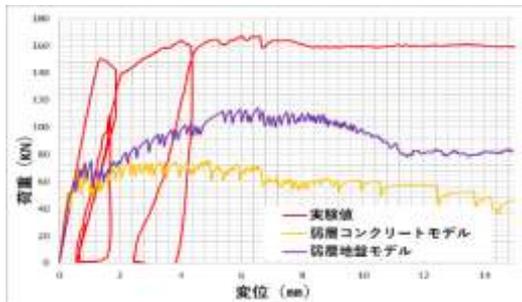


図 2 荷重点鉛直方向の荷重—変位曲線

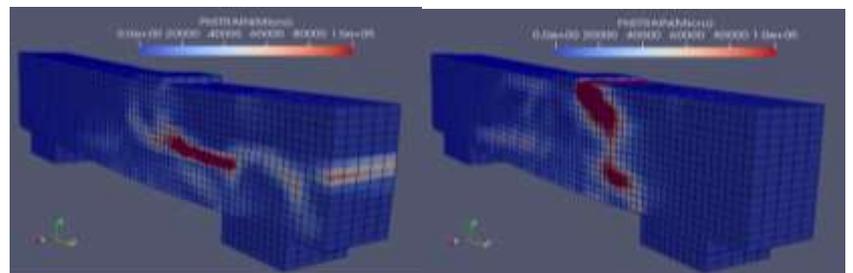


図 6 損傷モードの比較（左：コンクリートモデル，右：地盤モデル）

4. まとめ

RC 構造と支持層の間に弱層を設けることにより、構造側に対する損傷制御効果が期待できることを実験解析の両面から確認した。相対的に強度と剛性の小さい人工岩盤の特性のモデル化については、拘束圧依存性の観点から構成モデルの精度の向上が必要と考えられる。

[参考文献]

- 1) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, CRC Press, 2003.
- 2) Soltani, M. and Maekawa, K.: Numerical simulation of progressive shear localization and scale effect in cohesionless soil media, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 69 (March), 1–13, 2015.
- 3) 小林正幸, 船場翔: 地中ボックスカルバートの断層変位問題に関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演会, 2018.
- 4) 岸清, 技術開発賞 その後 人工軟岩材料の開発, 土木学会論文集 N0. 522/VI-28, 45-49, 1995.9.
- 5) 米澤健次, 樋口俊一, 穴吹拓也, 渡辺伸和, 伊藤悟郎, 三次元 FEM 解析による地中 RC 構造物の岩盤変位に対する損傷評価, 構造工学論文集 Vol.62A, 2016.3.