

ボックスカルバート载荷実験の変形・損傷に対する FEM 解析の追従性

東北電力(株) 正会員 ○肥田 幸賢 正会員 山口 和英 正会員 伊藤 悟郎
 (株)大林組 正会員 田中 浩一 正会員 佐々木智大 正会員 永井 秀樹

1. はじめに

地中のボックスカルバートに断層による強制変位が作用し、三次元的に複雑な変形が生じた場合に、どのような損傷が生じ破壊に至るかは十分検討されていない。そこで、ボックスカルバートの1/4縮小試験体に対して三次元的に交差する断層変位の作用を模擬した载荷実験を実施し、構造物が強非線形領域に至るまでの鉄筋ひずみ、変位をはじめとする実験データを得た。本稿では、上記の载荷実験を対象に三次元非線形 FEM 解析による再現解析を実施し、解析の追従性について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

载荷実験の概要を図1に示す。2連のボックスカルバートを、構造物軸線に対し45°で斜交する断層線を模擬した線状の支承で支持し、縦ずれ変位作用時の岩盤による構造物の支持条件を模擬した。また、構造物の頂版に作用する土被り荷重を、2台のジャッキと2点の固定点反力により模擬した。実験では図1中の隅部鉛直変位が140mmに達するまで载荷を行った。実験において計測した頂版のひずみは100000 μ を超え、ひび割れ幅は10mmを超えるなど、構造物が大きく非線形化する範囲を含む実験である¹⁾。

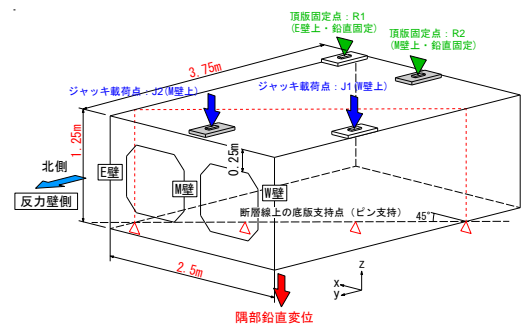


図1 カルバート载荷実験の概要

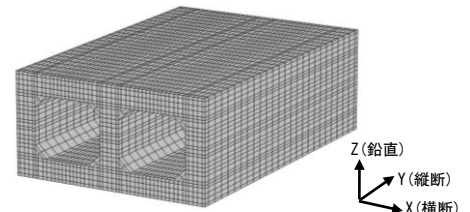


図2 解析モデル図

3. 再現解析

解析は非線形有限要素法プログラム「FINAL」により行った。構造物はコンクリートを六面体要素(図2)、鉄筋は構造物横断面内の主筋とハンチ筋をトラス要素、縦断方向の配力筋とせん断補強筋を埋め込み鉄筋要素でモデル化し、コンクリートと鉄筋それぞれに非線形特性と、材料試験による強度を考慮した。

実験と解析によるP(ジャッキ2台の合計荷重)~ δ (図1隅部鉛直変位)の比較を図3に、 $\delta=140$ mm時の最終変形モードの比較を図4に示す。実験では $\delta \approx 5$ mmで頂版の配力筋が初降伏したのち、 $\delta=30$ mm以降は荷重がほぼ横ばいのまま $\delta=140$ mmまで到達しており、高靱性な構造物の曲げ降伏の挙動を示している。解析での頂版鉄筋の初降伏のタイミングは実験と近く、また $\delta=40$ mm程度、すなわち通常的设计対象範囲とされる降伏変位の8倍程度までは、P~ δ 関係は実験結果を良く再現出来ている。変位がそれ以上に大きくなると、解析による荷重が実験値をやや過大に評価する傾向はあるが、実験と同様に安定した推移を示している。また図4に示す最終変形モードが良く一致していることから、 $\delta=40$ mmを超える範囲でも、断層線を支点として頂版側が引張、底版側が圧縮となる構造物全体の曲げによる損傷/破壊モードは精度良く再現出来ていると言える。

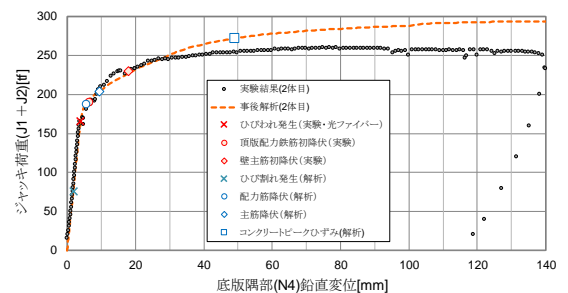
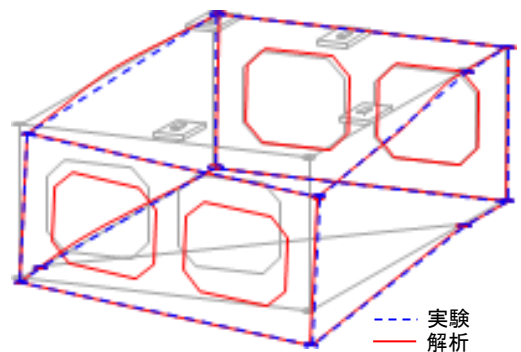
図3 実験と解析のP- δ 比較

図4 実験と解析の最終変形モード比較

キーワード 地中構造物, 断層変位, 载荷実験, ひび割れ幅計測, 鉄筋コンクリート, 三次元非線形 FEM
 連絡先 〒980-8550 仙台市青葉区本町 1-7-1 TEL 022-799-6103

4. 頂版・内空のひび割れ写真撮影とその評価

実験における構造物の損傷過程として、頂版のひび割れが断層線を模擬した支承の方向に進展し、そのひび割れの範囲が壁伝いに下降してくると想定した。そこで、頂版および内空を遠隔操作可能なカメラで撮影し、ひび割れ進展の状況を計測した。内空は実験中の無人での撮影のため、カルバートの内空にレールを通し、その上にカメラを取り付けた台車を走行させて撮影を行った(図5)。



図5 カルバート内空の撮影状況

実験で観察されたひび割れの進展状況と解析結果を対応付けるため、頂版・内空のひび割れ写真に再現解析による最大主ひずみコンターを重ね合わせた図を表1に示す。頂版は外側から見た場合と内空側から見た場合のいずれも、ひび割れが大きく開く箇所と大きな最大主ひずみが発生する箇所は良く対応している。また内空写真は、構造物縦断方向での抽出位置を、頂版で最もひび割れが開く位置としている。本実験でのひび割れは構造物軸線方向に対し斜めに進展したため、W壁面やM壁面でひび割れが最も開く位置は写真上の端部に寄っているが、解析による最大主ひずみ分布は、このようなひび割れ進展の特徴も捉えられている。

表1 頂版・内空ひび割れ写真と再現解析による最大主ひずみコンターの比較

隅部鉛直変位 δ	頂版		内空(W側)		
	W壁~M壁	W壁~M壁	W壁面	頂版	M壁面
40mm					
140mm					
	50000 0 (最大主ひずみ 単位: μ)				

(※Cw: 写真の範囲での最大ひび割れ幅[mm])

5. おわりに

本稿では、地中構造物に断層変位が作用した場合を模擬した強非線形領域までの載荷実験を対象として、再現解析の追従性について検討を行い、荷重~変位関係を良く再現できる範囲や、強非線形領域においても変形・損傷モードを良く再現できることを明らかにした。本実験で得られた様々な計測データを活用した、構造物の解析による損傷評価との関連付けも行っており、今後は一連の検討で得られた知見を、実務の照査の中で適用できるよう体系化を図っていく予定である。

謝辞: 本研究は、電力9社と日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)による原子力リスク研究センター共通研究として実施した。関係各位に謝意を表す。

参考文献 1) 山口, 伊藤, 肥田 「断層変位が作用するボックスカルバートの載荷実験」 2019/1, 第9回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム