

ボックスカルバート載荷実験の損傷に対する FEM 損傷指標の適用性

東北電力(株) 正会員 山口 和英 正会員 伊藤 悟郎 正会員 肥田 幸賢
 (株)大林組 正会員 ○永井 秀樹 米澤 健次 正会員 堤内 隆広

1. はじめに

三次元非線形有限要素法によるコンクリート構造物の損傷評価において、例えば今回のような RC ボックスカルバートが斜め 45 度のピン支持線に対してジャッキ 2 台で載荷され、複雑な損傷・破壊状況となる載荷実験結果を再現する場合に、一般的な照査で用いられている断面力計算によって損傷を評価することは難しい。本報文では、RC ボックスカルバート載荷実験(図 1)での損傷・破壊状況との比較より、実験の事後解析に対して様々な損傷指標を用い、その閾値を含めた適用性について検討を行った。

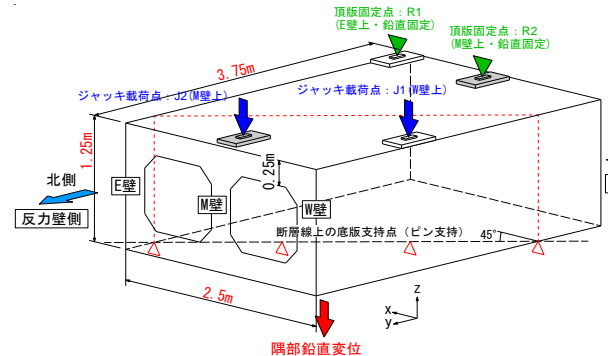


図 1 カルバート載荷実験の概要

2. 損傷指標の選定

今回適用した損傷指標およびその指標の閾値について、表 1 に纏める。コンクリート標準示方書の損傷指標のうち $\sqrt{J_2'}$ は、ひび割れ幅との関係により新たな閾値を提案する。また平均化損傷指標 $D_i(c)$ 、 $D_i(s)$ は、建築構造物の耐震壁における実験およびその再現解析において提案されている指標¹⁾である。

表 1 損傷指標とその閾値

	損傷指標	その指標の閾値
局所	コンクリート圧縮歪 鉄筋歪	コンクリート圧縮歪：ピーク歪(2,000 μ)・圧縮限界歪(10,000 μ) 鉄筋歪：降伏歪(1,725 μ)
	コンクリート標準示方書の損傷指標 $W_n \cdot \sqrt{J_2'}$	圧縮破壊： W_n (正規化累加ひずみエネルギー)=1,500 μ 斜めひび割れ破壊： $\sqrt{J_2'}$ (偏差ひずみ第 2 不変量)=1,000 μ 平均化領域 $r=150\text{mm}$ で重み付き平均を指標値
全体	不釣り合い力比の推移	不釣り合い力比=(収束計算 3 回目の不釣り合い力) / (収束計算 1 回目の不釣り合い力) 不釣り合い力比 > 1 で全体損傷の進行を示す。
	平均化損傷指標 $D_i(c)$ 、 $D_i(s)$	構造物全体で 1 つの指標として、各要素の塑性ひずみエネルギー W_{ep} を要素の体積と最小主ひずみで重み付けしたもの。 $D_i(c)$ 又は $D_i(s) > 1$ で全体損傷を示す。

3. 局所の損傷指標の適用性

(1) コンクリート圧縮歪、鉄筋歪：載荷実験と事後解析の荷重～変位曲線(図 2)は、隅角部鉛直変位：40mm～50mm まで概ね一致し、配力筋降伏のイベントは実験と解析において良く一致している。コンクリート圧縮限界歪は、隅角部鉛直変位：約 145mm でその閾値に達しており、実験において支承部の一部にコンクリート剥離が発生していることから、圧縮状況を適切に捉えていると考えられる。

(2) 損傷指標 W_n の適用性： W_n の最大値は、底版下面の支承部かぶり部分において隅角部鉛直変位：約 92mm で閾値を超える。各部材のかぶりの要素を除いたコンクリートコア部に対しても W_n による評価を行った結果、底版のコア部では隅角部鉛直変位：約 147mm で閾値に達した。底版下面の支承部周辺で局所的に圧縮損傷が徐々に進行していく様子が把握できる。ただし、底版の損傷がコア部に達しているにも関わらず、解析が安定していることから、構造物全体系に影響を及ぼすような損傷でなく、これは実験でも 140mm まで安定していたことと同様に、靱性のある曲げ損傷の特徴を示す。

キーワード 地中構造物、載荷実験、三次元非線形有限要素法、損傷指標、閾値

連絡先 〒980-8550 仙台市青葉区本町 1-7-1 TEL 022-799-6103

(3) $\sqrt{J_2'}$ とひび割れ幅の関係: $\sqrt{J_2'}$ は、曲げひび割れの開口や斜めひび割れの発生といった引張損傷を評価することができることから、ここでは荷重実験において目視で計測可能なひび割れ幅 0.2mm 以下の指標として適用性を確認した。 $\sqrt{J_2'}$ 最大値とカルバート内空の頂版、側壁および中壁で発生した最大ひび割れ幅の比較を、図 3 に示す。閾値 1000 μ に対して最大ひび割れ幅 0.2mm 以下となった。ひび割れ幅 0.2mm 以下は、コンクリート構造物の貯水性能において、「軽微な漏水はあるが、貯水機能に対して問題なし」となる一般的な許容値である。

コンクリート標準示方書に記載される閾値を超える値についても、 $\sqrt{J_2'}$ の最大値とひび割れ幅との関係を整理した。ひび割れ幅に応じた透水係数を想定し、漏水量を評価する場合には、ひび割れ幅の許容値を大きく設定することも可能である。本実験の結果より、ひび割れ幅 2mm まで許容できるとした場合には、閾値 5000 μ とすることができる。 $\sqrt{J_2'}$ とひび割れ幅と関係について隅角部鉛直変位:約 6mm と約 35mm でのカルバート内空の $\sqrt{J_2'}$ とひび割れ分布の比較を、図 4 に示す。 $\sqrt{J_2'}$ 値が大きくなっている部分でひび割れも多数発生しており、その分布状況が良く一致していることが確認できる。

4. 全体を示す指標の適用性

不釣り合い力比は、図 2 に示すように解析の収束性より構造物の損傷状況を推測する指標であり、隅角部鉛直変位:約 56mm で閾値を超えた。平均化損傷指標は、引張側の指標として鉄筋塑性歪が 1.0% を超える時点とする $D_i(s)$ に対して隅角部鉛直変位:約 48mm で閾値を超えた。これらの隅角部鉛直変位は、荷重～変位曲線で実験と解析が概ね一致する範囲 (40mm～50mm) であり、解析の信頼性を示す指標としての適用性が確認できた。

5. まとめ

本報文中では、構造物の局所と全体の損傷に対する指標について適用性を検討した結果、構造物の損傷状況を閾値との比較から把握することができた。また全体の損傷を示す指標については、解析の信頼性を示す指標として有用であることが分かった。今後これらの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。

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同研究として実施した。関係各位に謝意を表す。

参考文献: 1) 赤井, 田嶋, 長沼, 佐藤: 塑性ひずみエネルギーに基づくコンクリート構造物の損傷指標, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 742 号, 1925-1933, 2017.

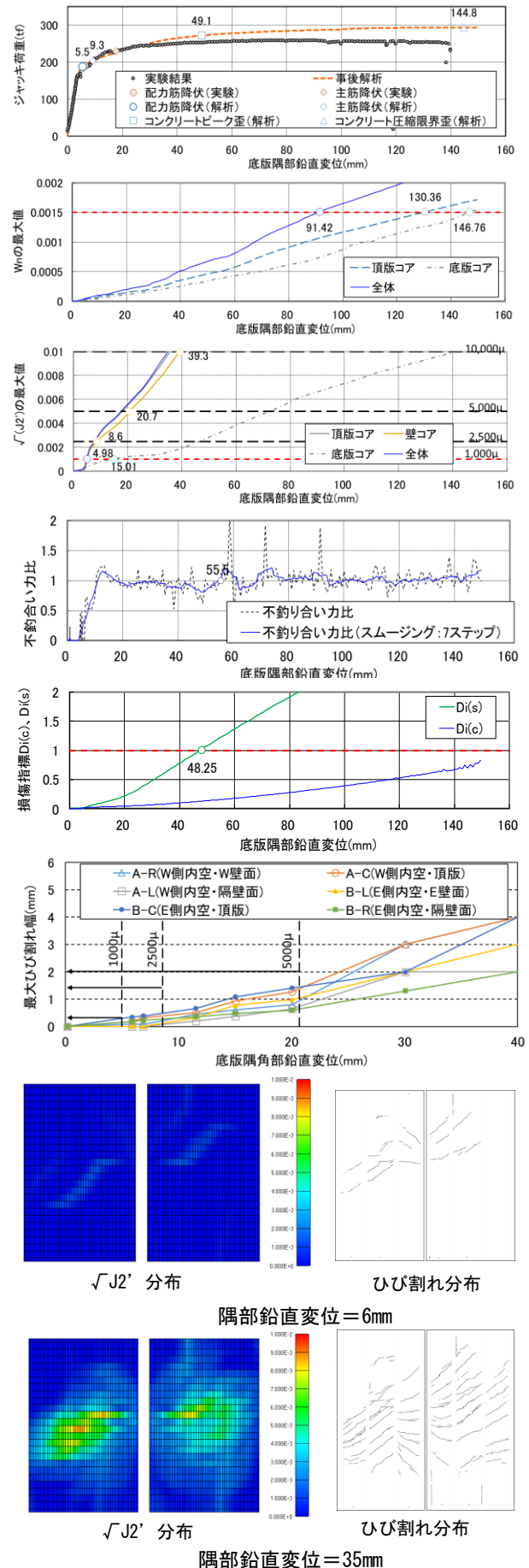


図 4 $\sqrt{J_2'}$ とひび割れ分布の比較