

三次元モデルによる地中ボックスカルバートの損傷指標評価

東北電力(株) 正会員 ○伊藤 悟郎 菊地 裕
(株)大林組 正会員 永井 秀樹 正会員 米澤 健次

1. はじめに

地中構造物が地震などにより損傷を受けた場合のFEM解析に対して損傷指標を用いて評価を行うことが求められている。本研究では、地中構造物に対して三次元ソリッドモデルを用いた変位制御単調載荷解析を行い、コンクリート標準示方書¹⁾に規定されている損傷指標による評価を実施し、その適用性について検討した。

2. 対象構造物

対象とする地中構造物は、土被り厚さ約 20m の図 1 に示す 2 連ボックスカルバートとした。支持層を岩盤とし、部材厚は 1.0m~1.4m である。中壁にせん断補強鉄筋がほとんど配置されておらず、中壁のせん断破壊が先行する鉄筋コンクリート構造物である。側壁にせん断補強鉄筋を配置し、中壁の主筋量を増やしたモデルとした。そのため、大規模地震が発生した場合には、脆性的なせん断破壊が起こることが想定される。

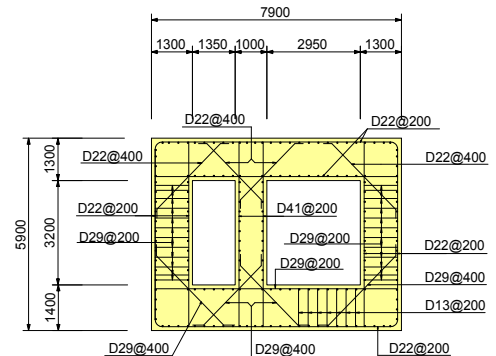


図1 対象構造物

3. 単調載荷解析の「荷重～変位関係」と「不釣合力比」

三次元ソリッドモデルの解析は、コンクリート構造物非線形有限要素法プログラム「FINAL」にて行った。コンクリートおよび鉄筋のモデル図を、図 2 に示す。コンクリートを六面体要素、鉄筋をトラス要素でモデル化し、コンクリート構成則は、修正 Ahmad モデルおよび長沼モデル、鉄筋をバイリニアでモデル化した。なお、カルバートの Z 方向に対しては、構造物が連続するような境界条件としている。

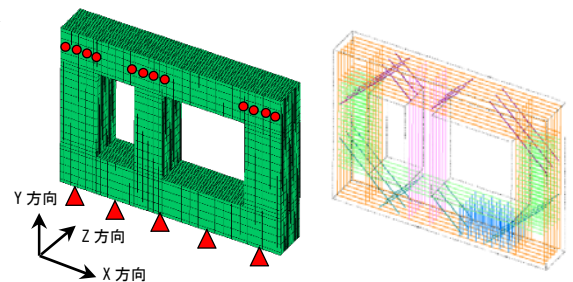


図2 解析モデル（コンクリート、鉄筋）

解析は、図 2 に示すように底版下面を固定し、常時荷重を作用させた後に、壁上の頂版に強制変位を漸増する手法とした。

単調載荷解析による荷重～変位関係および不釣合力比による損傷評価の結果を、図 3 に示す。構造物が破壊する際には、解析における不釣合力が大きくなる。そこで、不釣合力が収束計算 1 回目よりも 3 回目の方が大きくなった時が、構造物の破壊が大きく進展した時と考え、ここでは損傷指標の一つとして不釣合力比を採用した。不釣合力比は、ステップ毎に（収束計算 3 回目の不釣合力）/（収束計算 1 回目の不釣合力）を算出し、1.0 以上となった場合に、損傷進展と判断した。不釣合力比が 1.0 以上となる層間変形角は、初期で約 0.2%~0.45% となり、その後、1% を超えると連続して大幅に 1.0 以上となることから、構造全体が損傷していると判断した。交番載荷解析による荷重～変位関係を、単調載荷解析の結果に重ねて図 4 に示す。最大水平荷重となる時の水平変位は、5 サイクル目の約 0.42% であり、6 サイクル目から 7 サイクル目に入った直後に解析が発散し、構造物が破壊する結果となった。

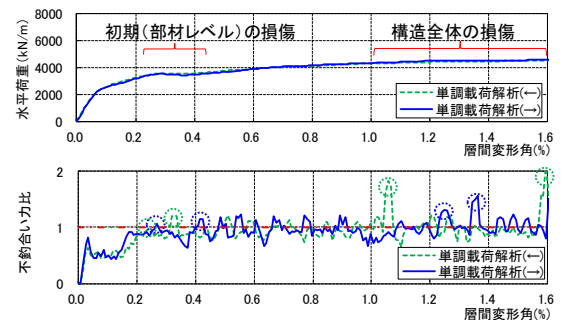


図3 不釣合力比による損傷評価

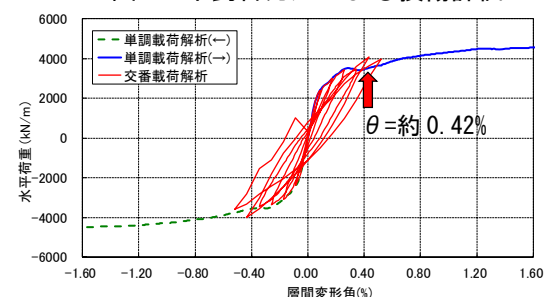


図4 単調・交番の荷重～変位関係

キーワード 鉄筋コンクリート、地中構造物、損傷指標、三次元解析

連絡先 〒980-8550 仙台市青葉区本町 1-7-1 TEL 022-799-6103 FAX 022-262-5851

4. 損傷指標による評価

コンクリート標準示方書¹⁾にある「材料の損傷に基づく破壊の照査指標と限界値」を、表1に示す。損傷評価では、平均化領域 $r=150\text{mm}$ で重み付き平均を取った指標値とした。なお、本検討では、要素中心のみを応力剛性評価点とする要素を用いた。

表1 材料の損傷に基づく破壊の照査指標と限界値¹⁾

材 料	事 象	指 標	限界値	照査項目
コンクリート	圧縮破壊	正規化累加ひずみエネルギー(W_n)	1500μ	曲げ破壊,せん断圧縮破壊
	斜めひび割れ破壊	偏差ひずみ第2不変量($\sqrt{J_2}$)	1000μ	斜め引張破壊
鉄 筋	軸方向鉄筋座屈	軸方向鉄筋の応力またはひずみ	座屈挙動に対応する応力または歪み	曲げ破壊

ここに、 $\sqrt{J_2'} = \sqrt{\frac{1}{2}e_{ij}e_{ij}}$, $W_n = \frac{1}{f}\sum_{k=1}^n(\sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij})^{(k)}$, e_{ij} :偏差ひずみテンソル, σ_{ij} :応力テンソル, $d\varepsilon_{ij}$:ひずみ増分テンソル, f :正規化パラメータ

損傷指標による評価結果を、図5に示す。

- (1) $\sqrt{J_2'}$ の最大値～層間変位関係より限界値を超えるのは、層間変形角が約0.08% (①)であり、約0.2~0.45%に比較して小さい変形で限界値を超える結果となった。せん断補強した左壁下端の曲げひび割れで限界値を超える結果となり、中壁のせん断による損傷よりも先行する結果となった。
- (2) W_n の最大値～層間変位関係より限界値を超えるのは、層間変形角が約0.43% (③)であり、概ね約0.2~0.45%に一致した。中壁がせん断破壊し、両側壁に水平荷重が再分配された後に、中壁の付根で圧縮破壊が進行したことを示しており、中壁が大きな損傷を受けたと評価できる。

(3) 不釣合力比と損傷指標の関係

不釣合力比では、層間変形角が約0.27% (②)で僅かに1.0以上となり、また $\sqrt{J_2'}$ の損傷分布より中壁全体が赤色になっており、この時点で中壁にせん断による損傷が発生したことが把握できる。

層間変形角が約0.43% (③)では、不釣合力比も1.0以上となり、 W_n 値と合わせて、中壁が大きな損傷に至る状況が把握できる。

層間変形角が約1.24% (④)では、不釣合力比が大幅に1.0を上回り、 $\sqrt{J_2'}$ のコンター図よりカルバート左上端部で剛域部の大きな損傷が見られ、構造物全体の破壊(崩壊)を把握できる。

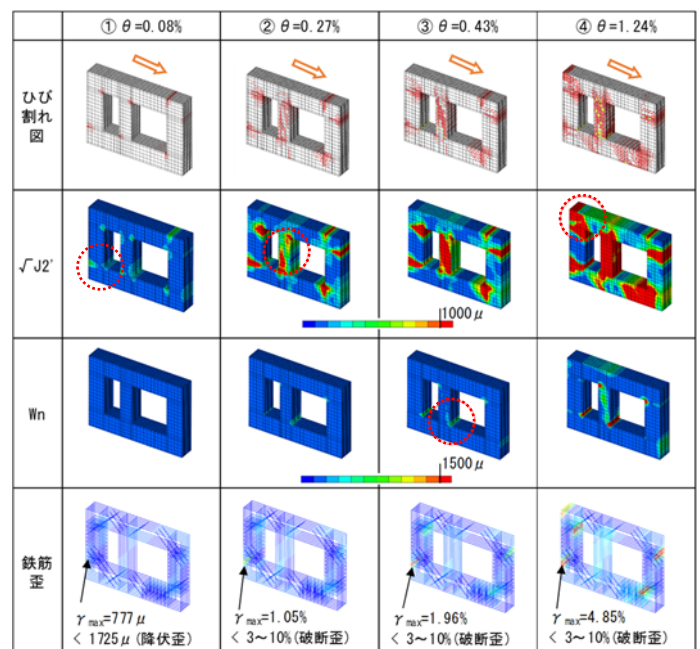
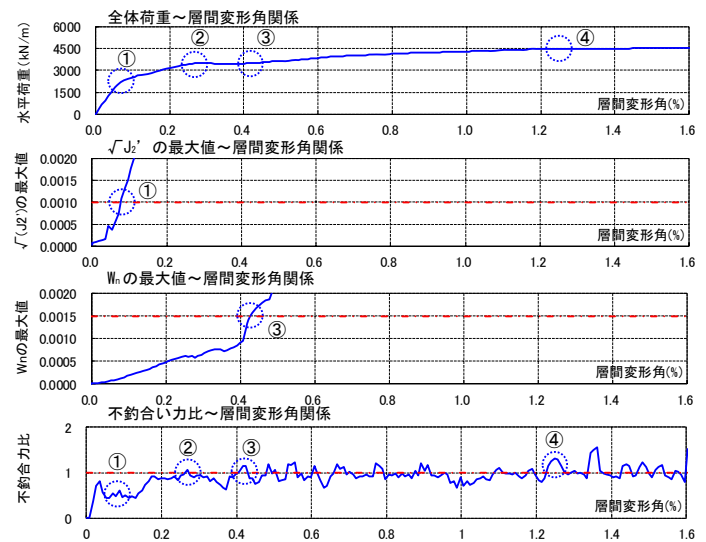


図5 損傷指標による評価

5. おわりに

今回、コンクリート標準示方書にある損傷指標、荷重～変位関係および不釣合力比を合わせて評価することで、カルバートの破壊過程を詳細に把握できたと考える。今後、様々な損傷～破壊モードに対して本指標の適用性を検証し、地中構造物の照査に実務レベルで適用を図りたい。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書設計編, pp481, 2012.
- 2) 大村, 尾崎:三次元解析モデルによる地中構造物の変形性能, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013.