

II-27 レベル2地震を対象とした地下RC構造物の耐震性能評価システム

安部 慶一郎
Keiichirou ABE

青戸 拓起
Hiroki AOTO

金 徳印
De-Yin JIN

【抄録】兵庫県南部地震以降、開削トンネル等の地下構造物にも、地震規模、構造物重要度、補修・復旧性に応じ所要の耐震性能の確認が重要となった。稀に生じる大規模地震（レベル2地震）に対しては構造物・地盤の非線形性の考慮が必要とされる。また、現在一般的な解析モデルである部材レベルの解析モデルに比べ、材料レベルの解析モデルの方がより詳細に、RC構造の損傷、ひび割れ検討、せん断破壊等の崩壊安全性の検討が可能である。そこで、土およびRC構造物の材料非線形性を直接考慮できる2次元非線形FEM動的解析法を導入した、性能照査型に対応した耐震性能評価システムを開発し、実務への適用事例を紹介する。

【キーワード】レベル2地震、2次元非線形FEM動的解析、性能照査、耐震性能評価システム

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、大規模地震（レベル2地震）に対する構造物の要求性能が明確化され、その照査において、材料の非線形履歴を考慮できる解析モデルの使用が推奨されている¹⁾²⁾。有限要素法に用いるモデルは、振動モデルを介さずに直接応答解析が可能¹⁾であるだけでなく、材料の非線形履歴を直接考慮できる。また、ひびわれの発生方向やせん断剛性の非線形特性も詳細に評価可能³⁾であり、レベル2地震に対する構造物の耐震性能照査に適している。

また、地中構造物の耐震設計には、応答変位法が一般的に用いられる。しかし、これは地盤および構造物の応答値算定を分けて考える手法である。レベル2地震に対する照査には、地盤と構造物を一体で扱える解析手法の方が、より適していると考えられる。

そこで、RCおよび土材料の非線形履歴を直接考慮でき、それらを一体モデルとして扱える2次元非線形FEM動的解析法⁷⁾⁸⁾⁹⁾を導入し、ひび割れの発生状況、損傷レベルの評価・可視が可能な耐震性能評価システムを開発した。このシステムを、地中RC構造物へ適用した事例を紹介する。

2. 耐震性能評価システムの概要

本耐震性能評価システムは、2次元非線形FEM動的解析機能と、性能評価機能から構成されている。それぞれの概要を次に示す。

2.1 2次元非線形FEM動的解析手法

前川らの、多方向ひび割れを考慮した非線形履歴

RC構成則を有する分散ひび割れモデル、さらに大崎モデルによる土の非線形を考慮した、有限要素モデルによる解析手法⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹¹⁾である。この手法は阪神・淡路大震災の被害分析で中柱がせん断破壊した地下鉄駅舎の被害分析⁴⁾⁵⁾、せん断損傷した橋脚の被害分析⁶⁾などに適用された実績を持ち、実際の被害状況を解析でも十分再現できるほど、その精度は十分に証明されている。また、耐震壁の静的・動的実験⁷⁾¹¹⁾も忠実に再現できる精度を有している。

2.2 耐震性能の定義

構造物が保有すべき耐震性能と、それを具体的に実現するための構造性能は、一般のコンクリート構造物に対し、次のように解説されている¹⁾。

耐震性能1:

地震後にも機能は健全で、補修をしないで使用可能。
→地震後の構造物の残留変形が十分に小さい範囲。鉄筋が降伏せず、圧縮破壊に対して十分に安全。

耐震性能2:

地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない。
→構造物の耐荷力が低下せず、残留変形が許容限度内。
せん断破壊しない。

耐震性能3:

地震によって構造物全体が崩壊しない。
→補修不可能でも崩壊しない。せん断破壊しない。
従って、構造性能は構造物および部材の損傷状態で表現される。本評価システムでは、2次元非線形FEM動的解析手法を適用しているので、損傷状態は式(1)~(3)に示す、ひずみ量で表現される。

耐震性能1:

$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_y \text{ and } \varepsilon_c' \leq \varepsilon_{ca}' \text{ and } \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_{sha} \quad \cdots(1)$$

耐震性能2:

$$\varepsilon_c' \leq \varepsilon_{ca}' \text{ and } \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_{sha} \quad \cdots(2)$$

耐震性能3:

$$\varepsilon_{ca}' \leq \varepsilon_c' \leq \varepsilon_{cu}' \text{ and } \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_{sha} \quad \cdots(3)$$

ここで $\varepsilon_{ca}' = \alpha \cdot \varepsilon_{peak}'$ α : 係数 (≥ 1)

ε_s : 鉄筋ひずみ

ε_y : 鉄筋降伏ひずみ

ε_c' : コンクリートの圧縮ひずみ

ε_{ca}' : コンクリートの許容圧縮ひずみ

ε_{peak}' : コンクリートの圧縮ピーク時ひずみ

ε_{cu}' : コンクリートの圧縮限界ひずみ

ε_{sh} : せん断ひずみ

ε_{sha} : 許容せん断ひずみ

過去の実験結果から、部材が完全に使用不可能の状態になる時は $\varepsilon_c' = 1\%$ 、 $\varepsilon_{sh} = 2\%$ 程度¹⁰⁾という報告から、本事例では $\varepsilon_{cu}' = 1\%$ 、 $\varepsilon_{sha} = 2\%$ と設定した。 α は、圧縮破壊に対しての余裕を考慮し本事例では1と仮定した。これらの値は任意に設定可能であり、構造物および部材の目標とする要求性能に応じて、柔軟に対応することが可能である。

本評価システムでは、式(1)~(3)を各最大ひずみおよび残留ひずみに適用することにより、構造物が受ける最大損傷レベルおよび残留損傷レベルの評価が可能である。ただし、耐震性能3を超える損傷が生じると、その時点で計算がストップするものとした。図-1に本耐震性能評価システムのフローを示す。

3. 適用事例

3.1 解析モデル

地中構造物を例にして適用事例を述べる。解析対象は、幅9.5m、高さ5.62mで、4.0mごとに50cm×200cmの中柱を有する、1層2径間の地中RCボックスカルバートである。応答変位法により、レベル2地震を受けても崩壊しないように設計されたものである³⁾。

図-2(a)、(b)に、解析モデルの要素分割図を示す。本システムの有限要素モデルは、分散ひび割れモデルを適用しており、8節点アイソパラメトリック要素との併用により比較的荒い要素分割でも、精度のよい解を得ることが可能である⁷⁾。

また、RCボックスカルバートと地盤の間には、めり込み・接触・剥離・せん断すべりが考慮できる、ユニバーサルジョイント要素を用いている。

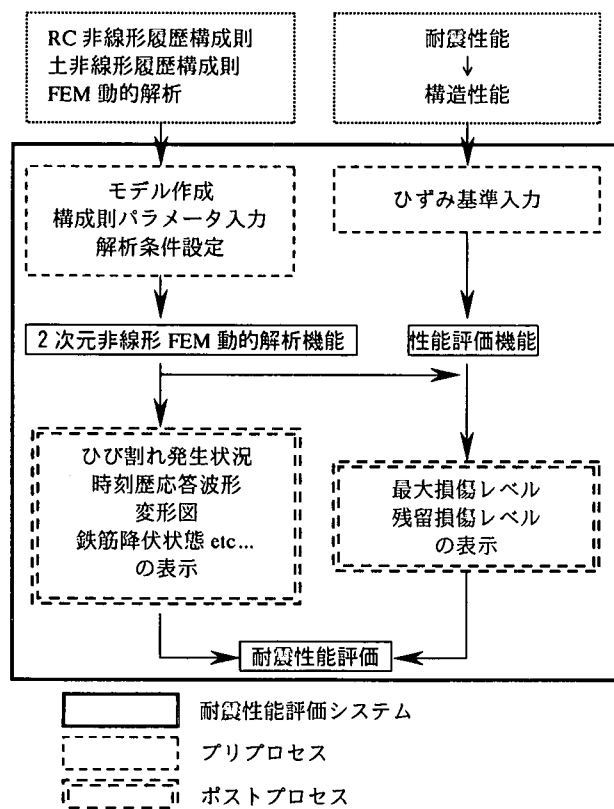
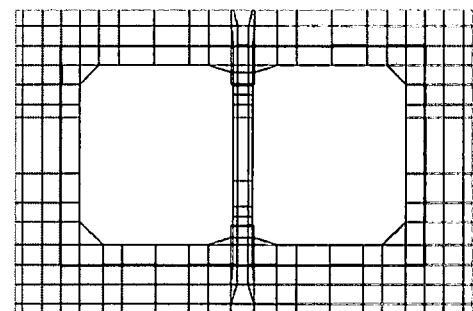
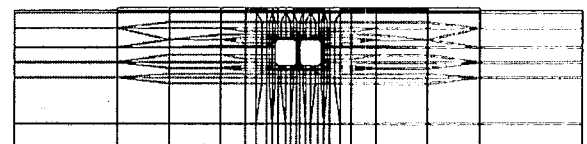


図-1 耐震性能評価システムのフロー



(a) RCボックスカルバート部分拡大図



(b) モデル全体図

図-2 1層2径間の地中RCボックスカルバート

3.2 解析条件

本事例では動的解析を行う。厳密には地盤下端部の応答波形(E+F)が必要であるが、本事例は表層で観測された加速度波形をそのまま入力波形として使用した。波形は兵庫県南部地震で、神戸海洋気象台にて観測された加速度波形を用いた(図-3(a)、(b)、(c))。

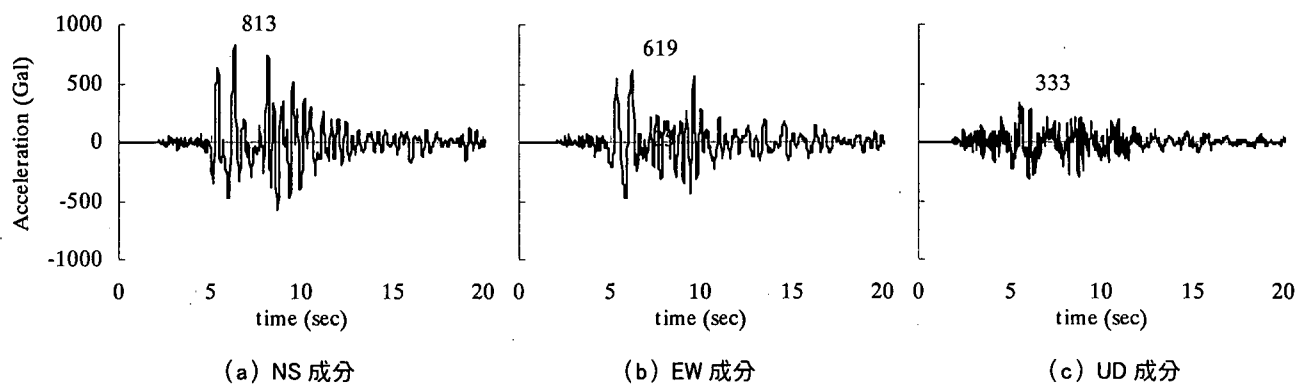


図-3 入力加速度波形

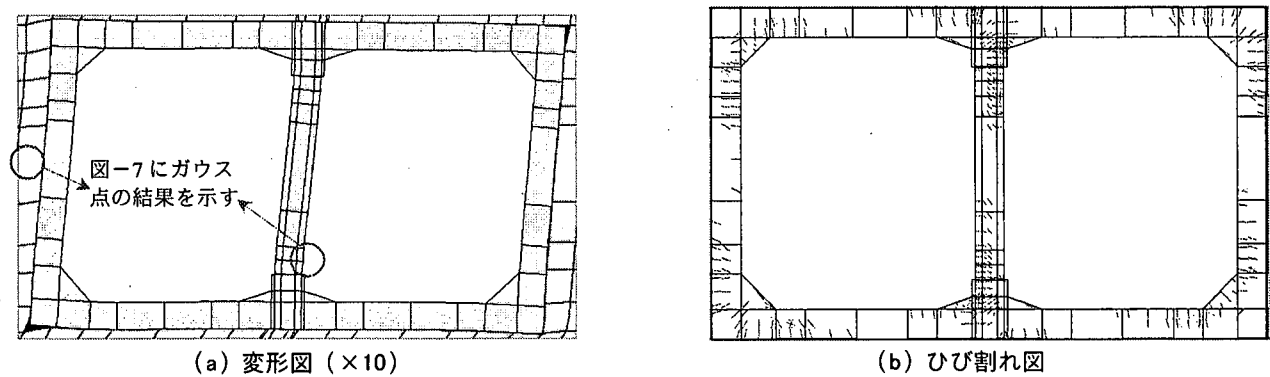


図-4 最大損傷発生時の変形図とひび割れ発生状況 (NS+UD 入力時)

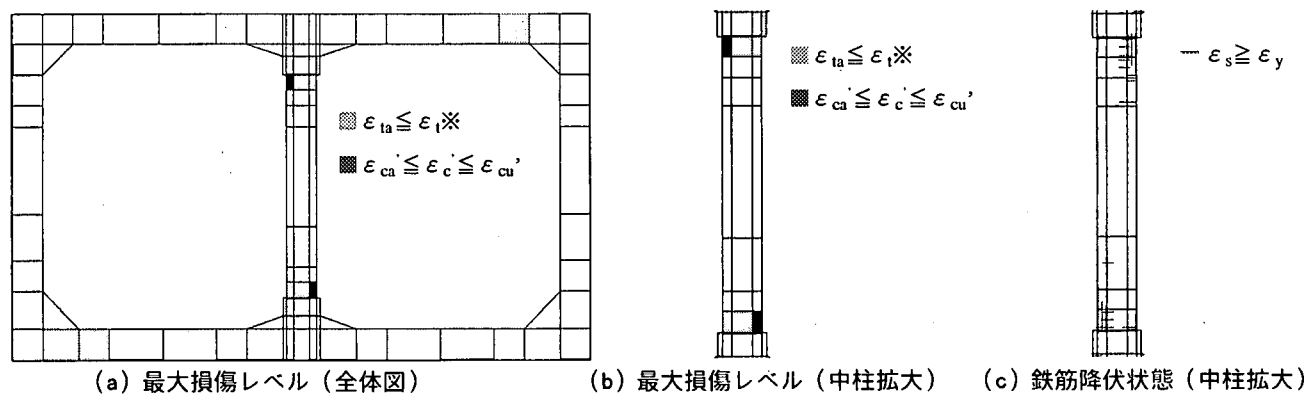


図-5 NS+UD を入力時の最大損傷マップと鉄筋降伏状態

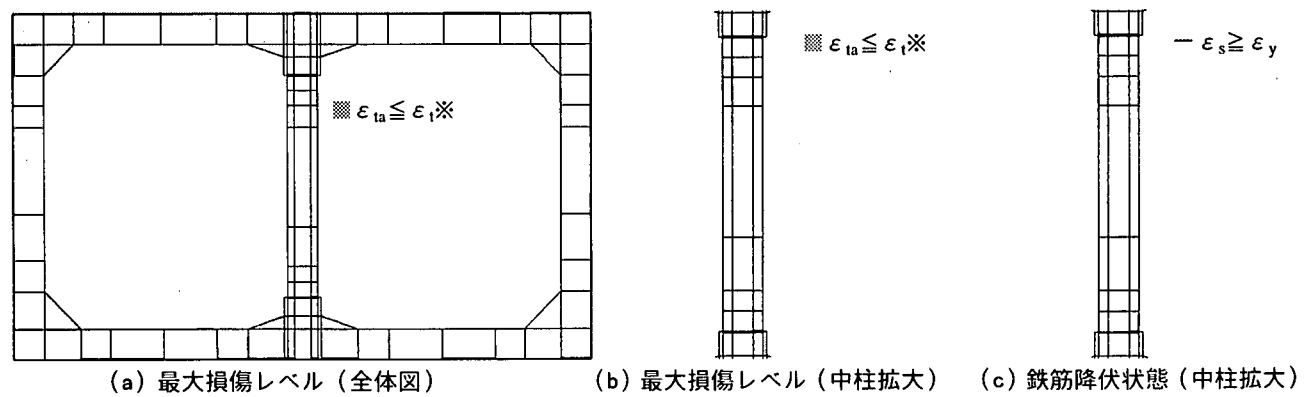


図-6 EW+UD を入力時の最大損傷マップと鉄筋降伏状態

※ひび割れ開口方向のひずみ ϵ_t が、許容ひび割れ幅などから決まる許容値 ϵ_{t0} (本事例では 0.2% と仮定) を超えたことを表す。

解析は、水平加速度、鉛直加速度を同時に入力した（NS+UD、あるいはEW+UD）。地盤下端部は固定、地盤側方の仮想境界は反射波の影響を防ぐために混合境界を設けている。

3.3 解析結果

(a) 応答解析の結果

図-4 に NS+UD を入力した時、最大損傷が発生した時刻での、変形図とひび割れ発生状況を示す。全体の挙動を即座に確認できるため、損傷部位を見落とす危険性が小さい。

図-7 に、図-4 に示した位置の RC 要素の鉛直応力－鉛直ひずみ履歴図と、土要素のせん断応力－せん断ひずみ図を示す。

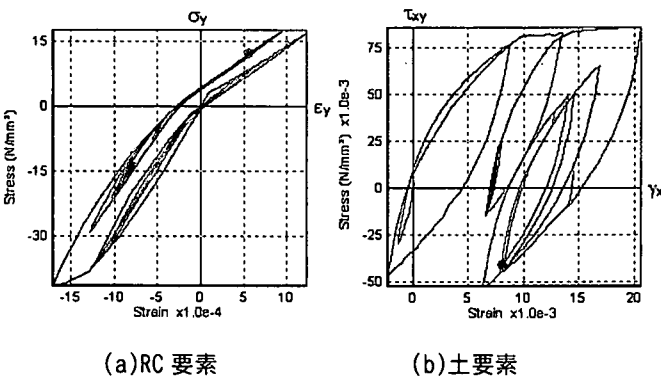


図-7 ガウス点の応力－ひずみ履歴図

図-7 (a) より、RC 要素はコンクリートが大きく圧縮軟化する領域まで達していないことがわかる。同図 (b) より、土の最大せん断ひずみが 1% (10e-3) を超え、塑性化したことを示している。

(b) 耐震性能の評価

この事例では最後のステップまで計算を行ったので、少なくとも耐震性能 3 は確認できている。表-1 に耐震性能の評価結果をまとめる。

表-1 耐震性能の評価結果

	NS+UD	EW+UD
残留損傷	無	無
最大損傷	$\epsilon_s \geq \epsilon_y$ $\epsilon_{ca}' \leq \epsilon_c' \leq \epsilon_{cu}'$ $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_{sha}$	$\epsilon_s \geq \epsilon_y$ $\epsilon_c \leq \epsilon_{ca}'$ $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_{sha}$
	∴耐震性能 3 を確保	∴耐震性能 2 を確保

図-5 に NS+UD を入力した時の、図-6 に EW+UD を入力した時の、最大損傷マップと鉄筋降伏状態を示す。このような損傷マップを解析終了後即座に確認できるため、 α 、 ϵ_{cu}' および ϵ_{sha} を適切に定めれば、容易に耐震性能の評価が可能である。

4. まとめ

本耐震性能評価システムの特徴をまとめる。

- ・ RC および土それぞれの材料の非線形履歴を考慮しているため、大規模なレベル2地震に対する耐震性能評価が可能。さらに、地盤と構造物を一体で解析が可能。
- ・ 精度の高い RC 構成則により、RC 特有のせん断破壊、およびひび割れ発生状況も検討可能。
- ・ 耐震性能に応じた構造性能がひずみ量で簡単に定義でき、さらに損傷レベルが即座に表示される。よって、性能照査型設計に対応した耐震性能評価が容易に可能。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書耐震設計編[平成 8 年制定]，1996.7

2) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，pp.331-341,1999.10

3) 土木学会：開削トンネルの耐震設計，トンネルライブラリー第 9 号，pp.106-113, 1998.10

4) Xuehui AN, Koichi MAEKAWA: Failure Analysis of Under Ground RC Frame Subjected to Seismic Actions, 土木学会論文集，No.571/V-36, pp.251-267,1997.8

5) Xuehui AN, Koichi MAEKAWA: Numerical Evaluation of Overall Seismic Performance of Underground RC Structures, 第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.429-436,1997.1

6) 土木学会：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式[阪神大震災調査研究特別委員会 WG 報告]，コンクリート技術シリーズ 12, 1996.9

7) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂，1991.5

8) 前川宏一，福浦尚之：擬似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No.634/V-45, pp.157-176,1999.11

9) Ashraf SHAWKY, Koichi MAEKAWA: Computational Approach to Path-Dependent Nonlinear RC/Soil Interaction, 土木学会論文集，No.532/V-30, pp.197-207,1996.2

10) Ashraf SHAWKY, Koichi MAEKAWA: Nonlinear Response of Underground RC Structures under Shear, 土木学会論文集，No.538/V-31, pp.195-206,1996.5

11) 前川宏一，福浦尚之：他方向ひび割れを考慮した RC 構成則の部材・構造挙動からの検証，土木学会論文集，No.634/V-45, p.209-225,1999.11