

地盤の半無限性を考慮した大規模構造物の地震時 終局安定性検討システムの構築

竹澤請一郎¹・○山田雅行²・原田秀敏³・露口雄次⁴・宇高竹和⁵

¹正会員 株式会社 ニュージェック 技術開発部 (〒542-0082 大阪府大阪市中央区島之内1-20-19)

²正会員 工修 株式会社 ニュージェック 技術開発部 耐震設計室 (同上)

³工修 株式会社 ニュージェック 技術開発部 耐震設計室 (同上)

⁴正会員 工修 株式会社 関西興産 耐震設計室 (〒577-0058 大阪府東大阪市足代北1-5-21)

⁵工博 株式会社 地震工学研究所 (〒162-0067 東京都新宿区富久町2-19-108)

3次元地震応答解析によって大規模構造物の地震時安定性を検討する際、地盤の半無限性を考慮するために周波数領域の有限要素法の汎用コードが用いられている。しかし、この手法では地盤の半無限性を考慮できるが、構造物は線形弾性体（等価線形化を含む）として取り扱われるため、地震時の終局限界状態を議論することはできない。終局限界状態を定量的に解析するためには3次元弾塑性解析コードに地盤の半無限性を導入することが実務上有効である。

著者らは汎用の3次元弾塑性解析コードを用いて地盤の半無限性を考慮できるシステムを構築し、大規模構造物の地震時終局挙動を例として、その有効性を定量的に評価した。

Key Words: earthquake engineering, ultimate stability, 3-D elastic-plastic analysis, semi-infinite ground, viscous boundary, concrete dam

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、3次元地震応答解析によって大規模構造物の地震時安定性を検討するケースが増加している。しかし、地盤の半無限性を考慮するために周波数領域の有限要素法の汎用コードが用いられている場合が多い。この手法では地盤の半無限性を考慮できるが、構造物は線形弾性体（等価線形化を含む）として取り扱われるため、地震時の終局限界状態を議論することはできない。終局安定性を定量的に解析するためには3次元弾塑性解析コードに地盤の半無限性を導入することが実務上有効である。

著者らは汎用の3次元弾塑性解析コードを用いて地震応答解析を行う場合に地盤の半無限性を考慮できるシステムを構築し、大規模構造物の地震時終局挙動を例として、その有効性を定量的に評価した。

本論文では、その解析手法とコンクリートダムへの適用例を紹介する。

2. 汎用の3次元弾塑性解析コードにおいて地盤の半無限性を考慮する手法

(1) 地盤の半無限性を考慮する手法

FEMの定式化において、実体波のみを対象とすると、粘性境界を用いて地盤の無限性を表現することが可能である。モデル境界が座標軸に直交な断面を持つ場合、時間領域で地盤の無限性を付加した運動方程式を(1)式に示す¹⁾。

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{U} + (C + C_s + C_b) \cdot \dot{U} + K \cdot U = \\ C_s \cdot \dot{U}_f + C_b \cdot (2\dot{E}) + G \cdot U_f + F \end{aligned} \quad (1)$$

M, C, K : 従来の質量、減衰、剛性マトリックス
 $\ddot{U}, \dot{U}, U$: 未知の加速度、速度、変位ベクトル
 C_s, C_b : 側面と底面の粘性境界マトリックス
 $\dot{U}_f, U_f$: 側面自由地盤の速度、変位ベクトル
 $2\dot{E}$: 底面自由地盤の入射波速度ベクトル
 C_s, C_b : 側面と底面の粘性境界マトリックス
 G : 側面の境界剛性マトリックス
 F : 静的外力(自重、静水圧、温度等)

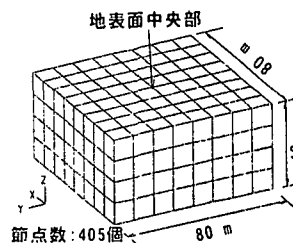


図-1 直方体均質モデル

表-1 物性値一覧

	均質
せん断波速度(m/s)	500.0
単位体積重量(t/m ³)	2.0
減衰定数(%)	0.1
ポアソン比	0.4

(2) 汎用の3次元弾塑性解析コードの選定

汎用の3次元弾塑性解析コードとして、上述の粘性境界の取り扱いが可能な「ADINA」²⁾を採用した。このコードはまた、コンクリート構造物の地震時における終局限界状態（ひびわれの進展）を追跡することに適用可能であり、かつ、使用実績が比較的多い。

粘性境界要素を作成するために、速度比例型減衰マトリックスの追加機能を利用して、(1)式における左辺の粘性項を付加することとした。また、(1)式における右辺の変数（側面・底面自由地盤の速度、変位ベクトル）は、準備段階で別途実施する自由地盤解析（地盤のみの線形応答解析）によって決定することとした。なお、自由地盤解析には、「SHAKE（米国NISEE）」と「SuperFLUSH/3DC³⁾」を用いた。

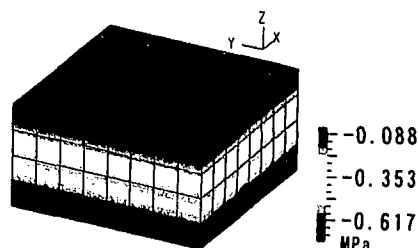


図-2 応力分布（通常の境界条件の場合）

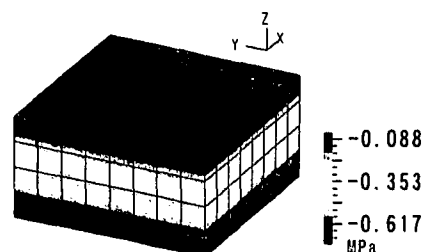


図-3 応力分布（静的境界反力を用いた場合）

(3) 地震時挙動解析における初期条件の求め方

コンクリート構造物の弾塑性解析の場合は、静的解析の結果を地震時挙動解析の初期条件として物性の変化を評価しなければならない。そこで、採用したコードを用いて静的解析と地震時挙動解析を連続して実施するものとし、両者の境界条件を同一として次の手順により解析を行った。①静的境界反力の算出：準備段階として、底面－完全固定、側面－鉛直ローラの境界条件のもとで静的解析を実施し、静的境界反力を求める。②常時応力状態の解析：自重、静水圧等の静的荷重と、前述の静的境界反力を静的外力として、粘性境界のみを考慮した境界条件の下で静的解析を行う。このとき静的外力による応答速度は発生しないので、粘性境界は機能しない。③地震時挙動解析：②の結果を初期条件として地震時挙動解析を実施する。応答速度が発生し、粘性境界が機能し始める。

3. 提案した手法の妥当性の検討

(1) 直方体均質モデルを用いた解析

前章で提案した解析手法を直方体均質モデルに対

して適用した。図-1に直方体均質モデル(H=40m)、表-1にモデルの物性値を示す。

①静的（自重）解析結果

図-2、3にそれぞれ側面－鉛直ローラ、底面－完全固定の境界条件の下で静的（自重）解析を行った結果と境界条件を静的境界反力で置き換えた場合（粘性境界も付加）の静的解析結果の鉛直応力分布を示す。両者は、よく一致しており、静的境界反力を用いた場合（粘性境界も付加）の結果の妥当性が確認できた。

②地震時挙動解析結果

図-4にモデル底面にエルセントロNS波を入力した際の、a)「SHAKE」による地表面加速度応答、b)粘性境界を付加した状態で地震時挙動解析のみを行った際の地表面中央部加速度応答、c)粘性境界を付加した状態で静的自重解析に続いて地震時挙動解析を行った際の地表面中央部加速度応答の波形を示す。いずれの加速度応答波形もよく一致しており、一連の地震時挙動解析における粘性境界を用いた境界条件の妥当性が確認できた。

(2) コンクリートダムモデルへの適用

前章で提案した解析手法をコンクリートダムモデ

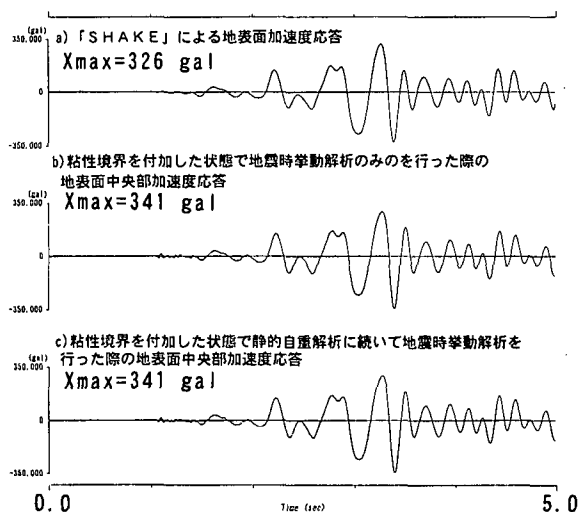


図-4 地表面中央部加速度波形
(X方向、絶対加速度)

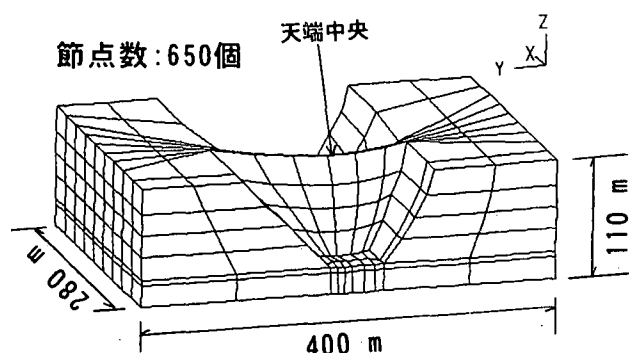


図-5 コンクリートダムモデル

ルに対して適用した。図-5にコンクリートダム(H=110m)のモデル、図-6に入力地震波、表-2、表-3にそれぞれ岩盤部、コンクリート部の物性値一覧を示す。なお、ここでは解析手法の妥当性を評価するために、「Super-FLUSH/3DC」の解析結果との比較を実施した。

図-7に天端中央における加速度波形の比較結果を示す。天端加速度波形において両者はよく一致している。また、図-8、9に両手法による天端最大変位(下流方向)時の応力分布を示す。最大引張応力はいずれの手法でも堤体上流面の低標高中央に発生していることがわかる。なお、ここでは動的増分値のみを比較検討するため自重等の静的外力は考慮していない。天端加速度波形、応力分布ともに両手法による解析結果はよく一致しており、提案した解析手法の妥当性が確認できたと考えられる。

4. コンクリートダムモデルを用いた大規模地震時弾塑性解析

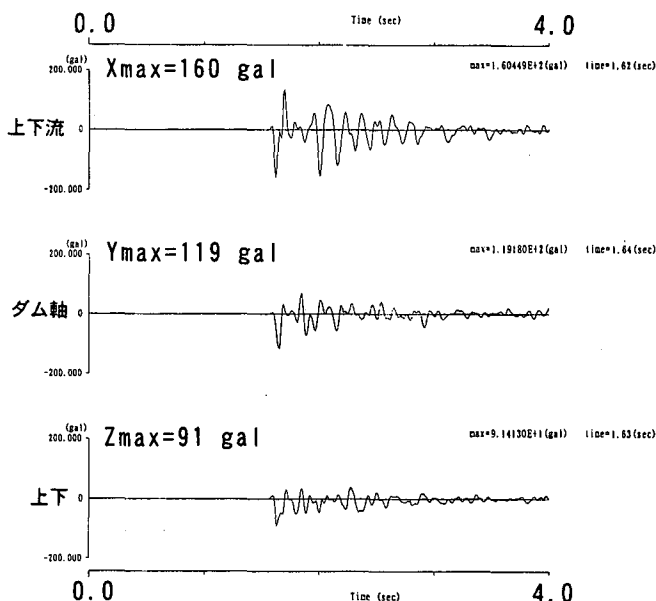


図-6 入力地震波(2E)

表-2 岩盤物性値一覧

		不均質
弾性係数(MPa)	EL85m以上	14,310.
	EL85m以下	27,930.
ポアソン比		0.3
単位体積重量(tf/m³)		2.65
減衰定数(%)		3.0

表-3 コンクリート物性値一覧

	均質
弾性係数(MPa)	19,600.
ポアソン比	0.2
単位体積重量(tf/m³)	2.35
減衰定数(%)	3.0

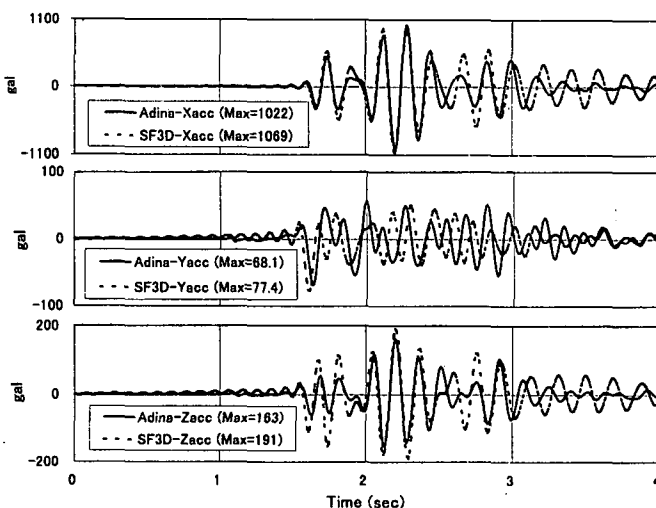


図-7 天端加速度

2章で提案した解析手法をコンクリートダムモデルに対して適用し、地震時弾塑性解析を行った。このとき入力地震動は図-6の波形の振幅を拡大したのを用い、堤体コンクリートの一軸応力ひずみ曲線は図-10に示す関係を用いた。なお、問題を単純化するため、静的外力は自重のみとした。

図-11, 12にそれぞれ右岸岩盤表面で最大加速度800galと1200gal入力時の堤体のひび割れ状況、図-13にそれぞれの場合における上流面天端中央部の左右岸方向応力～ひずみ関係を示す。

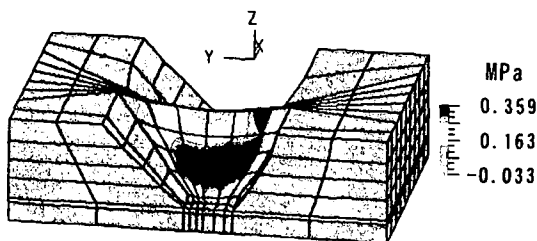


図-8 ADINAによる引張応力分布(2.2sec)

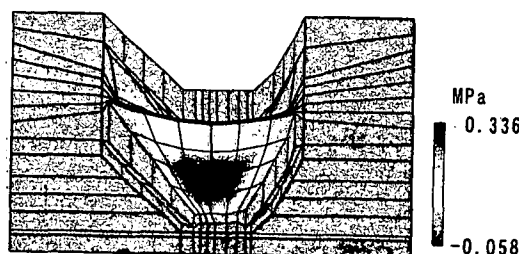


図-9 SF-3DCによる引張応力分布(2.2sec)

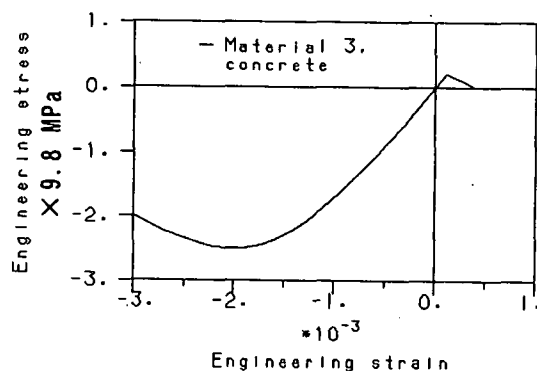


図-10 一軸応力～ひずみ曲線

800gal入力時にはダム天端中央部にひび割れが発生し、1200gal入力時にはその領域が天端全体に拡大してゆく様子が追跡できていると考えられる。また、応力～ひずみ関係を見ると、800gal入力時にはひび割れが進展途上（剛性を有している）であるが、1200gal入力時にはひび割れがほぼ完了（剛性がほぼなくなっている）していることが推察できる。

5. まとめ

- (1) 汎用の3次元弾塑性解析コードを用いて地震応答解析を行う場合に地盤の半無限性を考慮したシステムを構築した。
- (2) 直方体均質モデルやコンクリートダムモデルに対して適用することにより、提案した手法の妥当性を確認した。
- (3) コンクリートダムモデルに対して地震時弾塑性

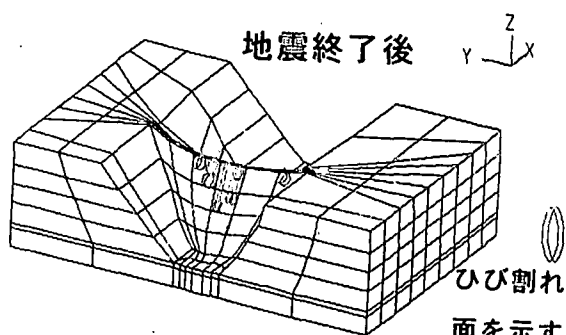


図-11 最大加速度800gal入力時のひび割れ状況

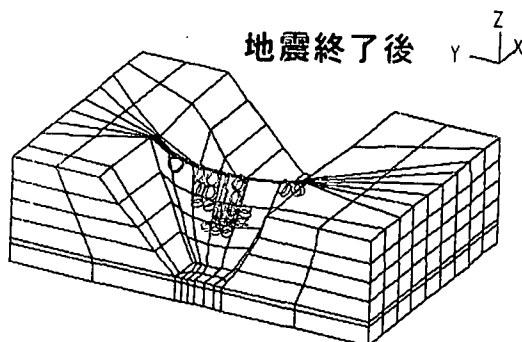


図-12 最大加速度1200gal入力時のひび割れ状況

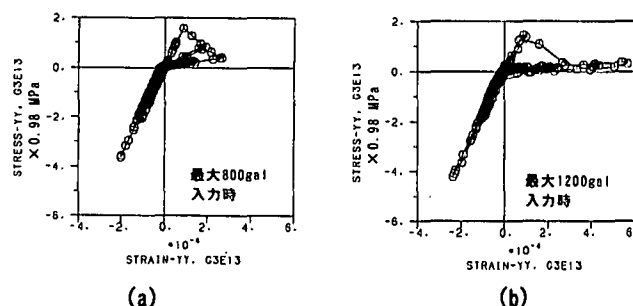


図-13 上流面天端中央部の
左右岸方向応力～ひずみ関係

解析を実施することにより、ここで提案した手法を用いて高い靱性を有するコンクリート構造物の地震時終局安定性の検討を行うことができることを示唆した。

参考文献

- 1) 三浦房紀, 沖中広志: 仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物—地盤系の動的解析手法, 土木学会論文集第404号/I-11, pp395-404, 1989.
- 2) ADINA R&D, Inc.: ADINA Theory and Modeling Guide, 1997.
- 3) 地震工学研究所, 構造計画研究所, 基礎地盤コンサルタンツ: Super FLUSH/3DC 理論説明書, 1994.