河川堤防の耐震性評価における継続時間の長い地震動に

対する有効応力解析の適用性の検討

Applicability of effective stress analysis to seismic assessment for river dike during a long-time-duration-earthquake

吉澤睦博*,酒井久和**,渦岡良介***

Yoshizawa Mutsuhiro, Sakai Hisakazu, Uzuoka Ryousuke

*工修,主任研究員,竹中工務店技術研究所(〒270-1395千葉県印西市1-5-1) **博(工),広島工業大学准教授,工学部建築工学科(〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1) ***博(工),東北大学大学院准教授,工学研究科土木工学科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

In order to investigate the applicability of the effective stress analysis for the seismic assessment of a river dike during a long-time-duration-earthquake, we conduct the earthquake response analyses based on two analytical codes using two type earthquakes. One is a sinusoidal wave which is frequently used for shaking table tests, and the other is a long-time-duration-earthquake such as a subduction earthquake. From the results of earthquake response analyses, the difference of the prediction crown settlements of the dikes between two codes using the long-time-duration-earthquake is larger than one using a sinusoidal wave. We consider this tendency is derived from the difference of modeling for the characteristics of the post-liquefaction phenomena.

Key Words: river dike, liquefaction, long time duration earthquake, effective stress analysis

キーワード:河川堤防,液状化,長時間継続地震,有効応力解析

1.はじめに

河川堤防のような土構造物は,過去の被害地震のたび に少なからず損傷を受けていたが,その復旧の容易性か ら耐震設計が行われることが稀であった.その後,1995 年の兵庫県南部地震における淀川河川堤防の甚大な被害 を受けて,河口部の河川堤防が破堤し,堤防丁部が海水 面よりも低くなった場合に,3大都市部などに広がるゼ ロメートル地域に甚大な被害が及ぶことが想定され,国 土交通省により河川堤防の耐震点検¹⁾が実施された.こ の際,河川堤防は一般に延長が長く,地震時の耐震性を 詳細に全川にわたって点検することは困難であり合理的 ではないため,過去の被災履歴などによる1次スクリー ニングを経た後,円弧すべり法の安全率と沈下量の経験 的関係をもとに耐震性評価を行っていた.しかしながら, この評価手法では変形量を直接計算せず安全側に判定し ているため沈下量を過大評価する場合が多い².そのた め近年では, 土構造物の地震時変形量を直接計算できる 変形解析手法に基づいた耐震性評価が注目されてきている.

河川堤防の過去の大きな被害は基礎地盤の液状化に起 因するものがほとんどである.基礎地盤の液状化を考慮 した盛土の変形解析手法では,地盤の初期条件・境界条 件を考慮して,力のつりあい式を数値解析により解く必 要があり,これまでに様々な解析手法が提案されている. 解析手法を分類すると以下の二つに分けられる.

・有効応力解析:

多孔質体理論に基づいた土・水連成の動的な支配方程 式に,土の繰返しせん断変形特性および体積変形特性を 表現できる構成モデルを組み込んだ解析手法である.地 震中から地震後の変形を扱うことができる.支配方程式 の空間離散化には有限要素法が用いられる.

·残留变形解析:

土・間隙水を一体と仮定した全応力解析の支配方程式

に, 土の液状化時の変形特性を表現した構成モデルを組 み込んだ解析手法である. 地震後のみの挙動を対象とす るので,その構成モデルの材料定数設定に地盤の液状化 判定が必要である.支配方程式の空間離散化には有限要 素法が用いられる.この手法は,2007年3月に国土交通 省によって策定された"河川構造物の耐震性能照査指針 (案)同解説 に耐震性評価手法として提示されている.

これらの変形解析手法では設計用地震力としてレベル 2 地震動や,検討地点に大きな影響を与える震源断層を 特定して地震動を作成するサイト波が用いられる現在, 東海地震などの駿河 南海トラフ沿いの地震に対する対 策が急務となっており,サイト波として海溝型巨大地震 に対する検討が求められている.

海溝型巨大地震は広い震源域をもち、そこから発せら れる地震動は長い継続時間を有し,長周期成分を多く含 む特徴がある,液状化地盤上の十構造物に対する正弦波 入力実験では,地震動の継続時間が大きく影響すること が示されている3).有限要素法による地震応答解析によ り土構造物の地震時変形解析を行った事例では,地震動 の最大加速度が同じでも、地震動の卓越周期が長周期で 継続時間が長い方が大きな変形量となることが指摘され ている4)、しかし、巨大海溝型地震のように継続時間が 300 秒を超える長い地震動に対する適用性についての検 証は少ない. 例えば, 継続時間の長い地震動に対する自 由地盤での FL 法の検討事例では,既往の判定方法では 危険側の判定を与える可能性があることが指摘されてい る⁵⁾.また筆者らは,後者の残留変形解析として解析コ ード ALID⁶を用いた盛土の沈下量を検討し,継続時間の 長い地震動に対しては,累積損傷度法による FL 判定が 適していることを示している²⁾.

一方,有効応力解析に関しては,澤田⁷は巨大海溝型 地震が直下型地震に比べて液状化しやすいことを示して いるが,その他,海溝型長時間継続地震動の与える影響 を検討した事例は非常に少ない.そこで本論文では継続 時間の短い正弦波入力による振動実験が既に行われてい る盛土の遠心模型実験モデルを対象に,継続時間の長い 地震動を入力した場合の予測変形量について,複数の有 効応力解析による変形解析手法による結果を比較し,手 法間の予測変形量のばらつきから,変形解析手法の巨大 海溝型地震動に対する適用性を検討する.

2. 長時間継続地震による液状化地盤の盛土の変形量

液状化時の地盤変形量を解析する手法は,幾つかのブ ラインドシミュレーションの結果(例えば文献8)~910)) を見ることによって,1990年代以降,特に兵庫県南部地 震以後に急速にその精度を向上させてきたことがわかる. すなわち,兵庫県南部地震以前では,解析結果と正解値 が1オーダー異なる程度にばらついていたのに対し,解 析技術の急速な進歩によって最近では解析結果が正解値 の2,3 倍から2,3 分の1程度の範囲に収まるようになってきた.しかしこれらの土構造物の変形解析手法は, これまで比較的継続時間の短い地震動での被災シミュレーションや模型振動実験等に対して,解析の妥当性が検証されてきた.しかし,巨大海溝型地震のような継続時間が長い地震動に対する適用性については,ほとんど検証がなされていない.

そこで,継続時間が短い入力動に対して変形予測精度 の検証が既になされている盛土の遠心模型実験を対象と して,継続時間の長い地震動を入力した際の予測変形量 について,複数の変形解析手法の結果を比較する.手法 間の予測変形量のばらつきが,地震動の種類に依存する かどうかを確認し,変形解析手法の巨大海溝型地震動に 対する適用性を検討する.

ここでは河川堤防を対象として既に変形予測精度の検証が行われている有効応力解析手法として,実務でも利用されているLIQCA¹¹⁾,FLIP¹²⁾を対象とした.解析に用いたバージョンはFLIP-ver6.17,LIQCA2D04である.

2.1 検討対象

検討対象は,液状化地盤上の盛土の遠心模型実験¹⁰に おける無対策のケースの解析とする.各解析手法の変形 予測精度の検討においては,まずブラインドシミュレー ションを行い,事前解析の精度を確認した後,事後解析 が実施されている¹³.

解析対象となる遠心模型実験の地盤モデルおよび解析 用の有限要素法のメッシュを図 - 1 に示す.実験は50G 場で実施されており,図は実スケールで示しており,解 析も実スケールのモデルを対象とする.7 号硅砂は非液 状化対象層の支持地盤を想定したものであり,相対密度 約90%と十分に締固められている.一方,江戸崎砂層は 液状化対象層で相対密度60%を目標に作成されている. また,盛土も液状化層と同様に江戸崎砂からなる.土槽 は剛土槽であり,間隙流体には水が用いられている.表 - 1 に実験で用いられた砂の諸特性を示す.



地盤材料			江戸崎砂			7号硅砂		
物理特性	土粒子の密度		2.684			2.642		
	粒度	レキ分(%)	0			0		
		砂分(%)	89.2			99.3		
		シルト分(%)	4.9			0.7		
		粘土分(%)	5.9			0		
		均等係数Uc	4.24			1.59		
		平均粒径D ₅₀ (mm)	0.181			0.169		
	最大最小乾燥密度	最大乾燥密度	1.522			1.627		
	(g/cm ³)	最小乾燥密度	1.145			1.256		
力学特性	CD試験	相対密度(%)	40	61	80	50	60	70
		乾燥密度(g/cm ³)	1.27	1.35	1.43			
		'(°)		34.01	34.1	42.6	44.2	45.2
		C'(kPa)		0.02	0.04	0.0	0.0	0.0
	初期体積弾性係数 (MPa)	σ'c = 98 k Pa		109	122			
		σ'c = 49 k Pa					441	
	透水試験(cm/s)			3.9×10 ⁻³	1.7×10-3			

表 - 1 実験で用いられた砂の諸特性

実験で用いた入力動は,正弦波7波の後に2.5秒の間 隔をおいて余震を想定した小振幅(約70cm/s²)の正弦波 4波を3サイクル付加したものを用いた.入力動の時刻 歴波形を図-2に示す.



 ⁽b) 正弦波(中;最大2.45m/s²)
図 - 2 実験で用いられた入力動

2.2 既往の実験結果に対するキャリブレーション

図 - 2の入力動を用いてLIQCAおよびFLIPによる解 析結果と実験結果とを比較した.

(1)LIQCA による解析結果

振動実験のシミュレーションで用いた地盤モデルのパ ラメータを表 - 2 に,液状化強度曲線を図 - 3 に示す. 材料パラメータは江戸崎砂,硅砂の室内試験結果に基づ き設定したブラインドシミュレーション用のパラメータ をベースとして,事後解析で再度調整したパラメータで ある.透水係数は,遠心模型実験では間隙流体として水 を用いたため,そのシミュレーションでは実際の値の50 倍(遠心加速度)した値を用いた.

なお境界条件はモデルの両端部は鉛直ローラー,底面 を固定とした.間隙水の境界条件は,盛土の直下も含め て,地表面のみ排水(過剰水頭ゼロ)とする.その他の 境界は全て非排水とする. その他の解析条件として,初期剛性比例型の Rayleigh 減衰を用い,その係数は 0.003 とした.また,時間積分 には Newmark 法を用い,その係数は 0.6 0.3025 とした.また,計算時間増分は 0.001 秒とした.

入力動に正弦波の大加振(最大487Gal)および中加振 (最大245Gal)を用いた場合の,盛土天端の沈下量の時 刻歴の比較を図 - 4 に示す.大加振の場合の最終沈下量 は実験結果より1m程度大きいが,主要動の10数秒まで は概ね対応している.中加振の場合は主要動後もよく対 応しており,設定したパラメータは継続時間の短い正弦 波実験による盛土天端の沈下量を良く再現している.

表 - 2 設定したパラメータ一覧(LIQCA)



(2)FLIP による解析結果

シミュレーションで用いた地盤モデルのパラメータを 表 - 3に,液状化強度曲線を図 - 5に示す.パラメータ は江戸崎砂, 硅砂の室内試験結果に基づき設定したブラ インドシミュレーション用のパラメータをベースとして 事後解析で再度調整したパラメータである.



表-3 設定したパラメータ一覧(FLIP)



図-6にFLIPの解析で用いたメッシュ図を示す.変 位に関する境界条件は,底面は剛基盤とし,側方は,水 平方向固定,鉛直方向自由境界とする.なお,本解析で は間隙水の浸透は考慮されていない.その他の解析条件 として,初期剛性比例型のRayleigh減衰を用い,その係 数は0.005としたまた時間積分にはWilson法(=1.4) を用い,計算時間増分は0.01秒とした.

図 - 7 に盛土天端の沈下量の時刻歴を実験結果と比較して示す.全体として実験結果をよく再現している.

以上より,継続時間が約50秒(主要動は約15秒)の 正弦波による振動実験に対して,LIQCA およびFLIPで は,地盤モデルのパラメータを適切に設定すれば予想さ れる沈下量は実験結果と整合的であり,大きくばらつか ないことが確認された.

2.3 海溝型長時間継続地震に対する検討結果

遠心場での振動実験結果に対する沈下量の予測精度の 対応が確認された LIQCA および FLIP の地盤モデルを用 いて,入力動を正弦波から海溝型長時間継続地震に変え たシミュレーションを行った.図-8に計算に用いた地 震動(三の丸波,EW 成分)を示す.三の丸波¹⁴は名古屋 市三の丸地区で想定される東海地震-東南海地震連動発 生タイプのサイト波であるが,今回は海溝長時間継続地 震の例として選んだ.入力地震動はサイト特性を含んで いるが,対象構造物は架空の設定となっている.



図-8 入力地震動(三の丸波, EW 成分)

(1)LIQCA による検討結果

LIQCA による地震応答解析結果のうち,盛土天端における応答加速度と鉛直変位の時刻歴を図 - 9 に示す.なお,2.1(1)の解析では遠心場での実験結果をシミュレーションするために透水係数を50 倍したが,ここでの解析では50 倍はしていない.(b)に示すように地震開始後約100秒を経過した時点で発生可能沈下量(過去の地震被害事例による,盛土高さの75%程度)を越えており,微小変形理論に基づく本解析手法では表現できない大きな沈下が発生している.図 - 4 に示したように,大きな入力地震動のもとでは沈下量を過大に評価する傾向にあることも,過大な沈下量が発生した原因と思われる.

図 - 10 に過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧を初期有効 上載圧で除した値)のコンターと変形図を示す.(b)にみ られるように盛土が基礎地盤にめり込むように大きく沈 下しているが,要素の変形モードもおかしく,得られた 沈下量の信頼性は低い.



(2)FLIP による検討結果

FLIP による地震応答解析結果のうち,盛土天端におけ る応答加速度と鉛直変位の時刻歴を図 - 11 に示す.(b) に示すように沈下量は入力動の成分が小さくなる100秒 付近以降では沈下量が増えずに一定量に留まっている. FLIP の解析では,図 - 7 の正弦波入力時にも沈下量が 進行せずに止まる傾向にあった.

図 - 12 に過剰間隙水圧のコンターと変形図を示す. 図 - 10のLIQCAの結果と比較すると,支持層の7号硅 砂の水圧上昇が低い傾向がある.これは7号硅砂の液状 化強度のフィッティングで,20回以上の繰返し回数の多い領域ではFLIPの方がLIQCAよりも大きめに評価している影響が出たと考えられる.

また土と水の二相系の運動方程式を解くための定式化 で,LIQCA は排水条件であるため江戸川砂で発生した過 剰間隙水圧が7号硅砂の水圧に影響を及ぼす.一方 FLIP では非排水条件であるため江戸川砂で発生した過剰間隙 水圧が7号硅砂の水圧に影響を与えない.この定式化の 違いによる影響も含まれると考えられる.



(a)加速度





(b) 応答 100 秒後 図 - 12 過剰間隙水圧のコンターと変形図 (FLIP)

FLIP による盛土天端の沈下量は 3m 程度と,図-9に 示した LIQCA の結果の3割と小さな値となっており, 両解析結果の差は遠心模型実験のブラインドシミュレー ションの差よりも大きなものになっている.継続時間の 長い海溝型地震動を入力した際には,継続時間の短い地 震動を入力した場合と比較して有効応力解析による予測 精度がばらつく可能性があると言える.

この原因には今回,解析手法の比較として用いた LIQCA および FLIP では,土と水の二相系の運動方程式 を解くための定式化の違い(LIQCA:排水条件,FLIP: 非排水条件)の影響も挙げられるが,液状化強度曲線の フィッティングの影響,および過剰間隙水圧が上昇した 以降の応力-歪み関係などのモデル化の差異が解析手法 間で現れたと考えられる.

通常,液状化を対象とした有効応力解析での地盤モデ ルのパラメータ設定は液状化強度曲線の15~20回強度 のフィッティングを元に行う.液状化強度曲線では軸歪 み両振幅5%で定義されるが,今回の正弦波(大)入力 時や三の丸波入力の場合には法尻直下の液状化地盤で 10~50%程度の大歪みが発生した.微小変形理論による 解析手法の適用性の限界もあるが,液状化後の応力-歪 み関係を再現して解析手法同士のばらつきを低減するに は,液状化強度曲線のフィッティングだけでは歪みレベ ルが不十分である可能性がある.継続時間の長い地震動 を対象とする場合には,液状化後の繰返しせん断応力-歪み関係を評価した試験結果などを用いた構成モデルの キャリブレーションが必要となると考える.

3. まとめ

近年,河川堤防などの土構造物に対して,有効応力解 析や静的残留変形解析などの変形解析による適用事例が 増加している.このうち,有効応力解析に基づく変形解 析手法として,LIQCA とFLIP について,海溝型の巨大 地震のような継続時間が長い地震動に対する変形解析の 適用性を検討した.その成果を以下に示す.

既往の遠心模型実験に対してキャリブレーション済み の2つの有効応力解析において,継続時間の長い地震 動を入力したところ,いずれの解析でも過去の地震被 害での最大沈下量(盛土高さの75%程度)前後の盛土 天端沈下量が発生した.

2 つの有効応力解析による盛土の沈下量予測のばらつ きは,継続時間の長い地震動を入力した場合の方が入 力動の継続時間の短い振動実験のシミュレーションの 場合よりも大きかった.

の原因として,入力地震動の継続時間が長い場合に は,二相系の定式化の違いによる過剰間隙水圧の伝播 の影響や,過剰間隙水圧が上昇した以降での応力-歪 み関係などのモデル化の違いによる影響が考えられる. 特に液状化後の挙動を構成モデルが表現できていない 可能性があるため,構成モデルの設定方法にさらに詳 細な検証が必要である. 謝辞

本研究を進めるにあたり,土木学会巨大地震災害への 対応検討特別委員会・耐震診断および耐震対策部会(西 村昭彦主査)の筆者等を除く土構造物WGの委員(大林 淳,岡島充典,岡村未対,澤田俊一,長縄卓夫,渡邉弘 行各委員)には,河川堤防の耐震性評価を行う上で貴重 なご助言,ご議論を頂いた.記して各位に感謝の意を表 す.

参考文献

- 建設省河川局治水課:河川堤防耐震点検マニュアル・ 解説,1995.
- 2) 酒井久和,吉澤睦博,岡島充典:液状化流動解析を用 いた河川堤防の耐震性評価におけるFL算定法の影響, 第12回地震工学シンポジウム論文集,No.126, pp.610-613,2006.
- 3) 中原知洋,一井康二,三藤正明,秋本哲平:地盤の透水性と地震動の継続時間を考慮した緩傾斜式護岸構造物の耐震性評価,地震工学論文集,Vol.28,2005.
- リバーフロント整備センター:高規格堤防盛土設計・ 施工マニュアル,2000.
- 5) 吉田望,澤田純男,中村晋:海溝型長時間継続地震動 に対する簡易液状化判定に関する検討,第42回地盤 工学研究発表会,pp.1903-1904,2007.
- 6) 安田進,吉田望,安達健司,規矩大義,五瀬伸吾,増 田民夫:液状化に伴う流動の簡易評価法,土木学会論 文集,No.638/III-49,pp.71-89,1999.
- 7) 澤田純男:長大構造物は大丈夫か,第5回比較防災ワ ークショップ資料,2005.
- 2) 土質工学会:地盤と土構造物の地震時挙動に関するシンポジウム発表論文集,1989.
- VELACS: Proc. Int. Conf. Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Balkema, 1993.
- 10) 建設省土木研究所:有効応力に基づいた弾塑性 FEM による河川堤防の地震時変形量に関する解析,土木研 究所試料,第3700号,2000.
- 11) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R.: FEM- FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 12) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 13) 国土技術研究センター(2002): 河川堤防の地震時変 形量の解析手法、JICE 資料第 102001 号, 2002.
- 14) 愛知県設計用入力地震動研究協議会:愛知県設計用入力地震動の作成 想定地震による強震動予測,2002.

(2008年9月18日受付)