

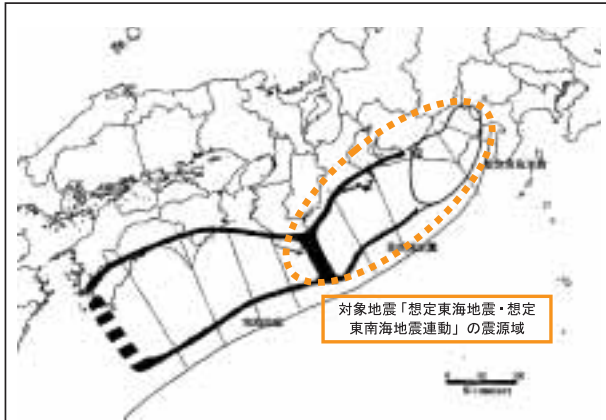
木曾三川下流部堤防での地震時変形解析手法



常盤 敏
調査第一部
首席主任研究員

研究の背景と目的

現在、東海地震の発生は、いつ起きてもおかしくない状況にあり、東南海地震についても今後30年間の発生確率が60%と言われている。中央防災会議の東海地震に関する専門調査会や東南海・南海地震等に関する専門調査会では、防災対策を推進する上での基本計画をまとめ公表している。関連する地方自治体では地域の特性に即したきめ細かな地震・津波対応を急いでいる。



図一 東海、東南海、南海地震 想定震源域
(中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」(第3回)説明資料に加筆)

木曾川、長良川、揖斐川が集まる木曾三川下流地域の河口付近は、発達するデルタの大部分が海拔1m以下であり、ゼロメートル以下の地域も広い範囲に広がっている。また、沖積層は、100m以上の厚さで堆積しており、河川堤防は三角州成の緩い砂層から構成される地盤上に築堤されているため、液状化に対する潜在的危険性をもっている。このため、木曾川下流地域では、地震に伴い堤防が沈下し、その直後に大規模な津波が来襲すると、最悪の場合、地域の長期間の孤立など大規模な被害の発生が想定される。

河川堤防の耐震対策は、平成7年兵庫県南部地震を契機



写真一 木曾川下流部周辺の地形概観

に全国的に耐震点検が行なわれ、その対策が進められてきた。

そこでの耐震性の評価手法としては、標準設計水平震度 $kh=0.20$ を想定して堤防土塊に地震時慣性力を作用させた場合と堤防基礎地盤の液状化後の過剰間隙水圧上昇を考慮した場合の円弧すべり計算を実施し、その安全率と過去の被害事例をもとに沈下量を推定するものである。

堤防のような土構造物の地震時の変形量を予測する手法には、上記のような比較的簡便な手法から有限要素法に基づく動的変形解析手法まで種々のものがある。木曾三川下流部堤防での耐震性評価にあたっては、堤防基礎地盤の土質特性を考慮できることはもちろんであるが、東海地震および東南海地震の特徴といわれる大規模でかつ震動継続時間が長い地震動特性を考慮して適切に変形量を予測できることが求められる。しかし、一般に動的解析手法は、液状化後の土の強度を表すパラメータ等の設定に解析技術者の熟練を要する。また、河川堤防は延長が長いことから、耐震性評価に必要な断面数が多くなり、堤防の変形予測には多くの費用と時間が必要となる。このため、比較的簡便な方法である静的解析手法の適用性を明らかにしておくことが大規模地震を対象とした耐震点検と耐震対策を効果的に推進する上で重要となる。

本研究は、木曾三川下流部堤防を対象に東海地震および東南海地震に対する堤防の耐震性評価手法を検討するため、静的解析手法としてALID¹⁾を、動的解析手法とし

てLIQCA²⁾を取り上げ、代表断面での地震時変形解析を行い、堤防基礎地盤の土質特性や大規模でかつ震動継続時間が長い地震動特性を考慮した場合の解析結果の違いについて比較検討を行ったものである。

検討方針

1 対象地震動

(1) 対象地震

対象地震は、対象地域における想定される地震の規模が最も大きく発生確率が高いこと、また、地震による堤防被災後の津波による二次災害の影響が懸念されることなどから、「想定東海地震・想定東南海地震連動」とした。

(2) 工学的基盤における入力地震動

検討に用いる工学的基盤面での加速度波形は、杉戸らが提案している強震動予測法EMPR³⁾を用いて推定するものとした。これについては、中央防災会議により想定されている加速度波形との比較を行った結果、EMPRによる計算結果は中央防災会議と同程度かやや上回る加速度を示すこと、EMPRでは任意の地点に対して算出が可能であることなどの特徴がある。

2 堤防の地震時変形量の解析手法

(1) ALID

ALIDは、液状化層の剛性低下を考慮して、液状化層上部の土や構造物の荷重により生じる変形量を静的有限要素法によって求める解析手法である。変形量は、液状化抵抗率FLと細粒分含有率によって液状化層の剛性低下率を考慮し算定する。なお、液状化判定に用いる地表最大加速度は、SHAKE⁴⁾と杉戸らが提案した周波数依存性を考慮した等価ひずみによる等価線形化手法(FDEL⁵⁾)を用いて算出し、比較を行った。解析結果は、SHAKEでは、減衰が著しく過少と考えられる加速度値が得られたが、

周波数特性を考慮したFDELでは、著しい減衰は見られず妥当性が高いと考えられる加速度値が得られた。このため、杉戸らが提案した周波数依存性を考慮した等価ひずみによる等価線形化手法(FDEL)を用いることとした。なお、EMPRにより算出した加速度波形はVs=500m/s相当層での波形であるため、応答計算での入射基盤と設定したVs=300m/s相当層での波形に変換する必要があることから、翠川⁶⁾によるS波速度と地震動最大振幅の関係を参考にして、EMPR波形をVs=300m/s相当層での波形に変換し、応答計算の入力地震動とした。

(2) LIQCA

地震時の変形を時刻歴にしたがって追跡していく動的変形解析手法である。地震動(時刻歴波形)をモデル底面に入力し、地盤中の応力、ひずみ、間隙水圧等の動的挙動を解析によって求める。地震動の特性(振幅、振動数、継続時間等)が反映された結果が得られる。

3 検討断面の選定と検討手順

検討手順を図-2に示した。

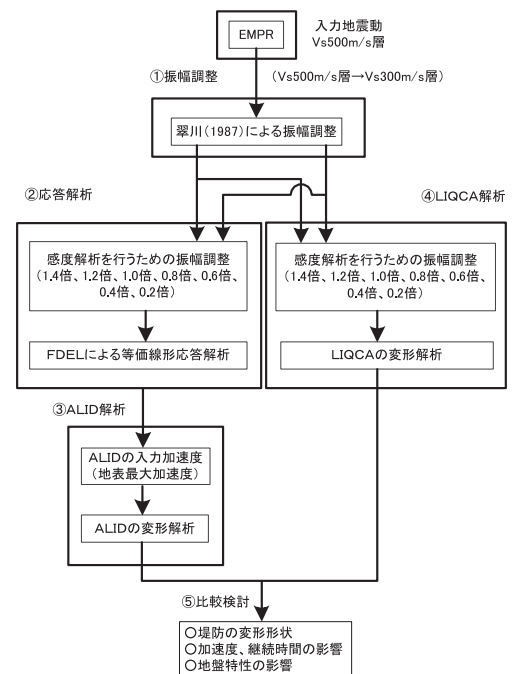


図-2 検討フロー

検討断面は、木曾三川下流部の堤防の形状や基礎地盤条件を代表する8断面を選定した。代表断面の選定にあたっては、堤防の変形や沈下量に影響を及ぼすと考えられる液状化層厚や液状化層上部の被覆層の有無、また、堤防の変形を抑制すると考えられる高水敷の幅に着目し、分類整理を行い、代表断面を選定した。



写真-2 木曾川左岸4k 堤外側状況



写真-3 木曾川左岸4k 堤内側状況

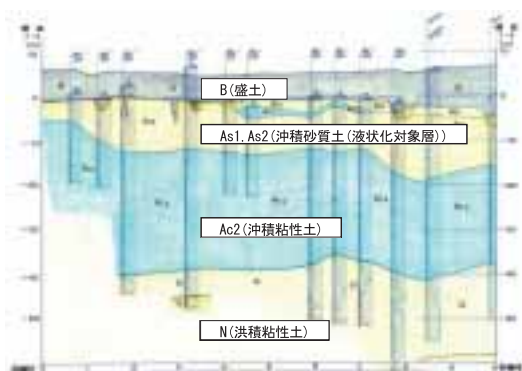


図-3 木曾川（左岸）土質縦断面図（0～10km）

次に、変形解析にあたっては、表層の砂質土の液状化の程度に堤防の変形は大きく依存すると考えられること、さらに液状化の程度は、基盤地震動の大きさと地表面に伝播するまでの応答に依存すると考えられることから、図-2 に示すように工学的基盤での基盤加速度を0.2倍～1.4倍まで振幅調整をおこない、パラメトリックに漸増させALID、LIQCAそれぞれの解析を試みることにした。

検討結果

1 変形解析結果

ALIDおよびLIQCAによる堤防天端沈下量についてみると、液状化層厚や高水敷幅、液状化層中の粘性土層の有無との相関はあまり認められなかった。また、天端沈下量が解析手法によって大きく異なる断面がみられた。そこで、以下では変形モードや入力地震動、基礎地盤表層砂層のN値、FL値が天端沈下量に及ぼす影響について考察を行った。

(1) 変形モードによる影響

LIQCAによる変形図をみると、堤体のり尻付近にみられる変形モードにより、すべり型と沈下型の2つに分けられる（図-4、図-6）。すべり型は、液状化層の厚さが10mより小さい場合に生じている。すべり型を示す断面において、LIQCAでは、FL値にあまり依存せず天端沈下量が大きく予測される。しかし、ALIDではこのような変形モードは現れず、天端沈下量は比較的小さいことがわかった。（図-5、図-7）

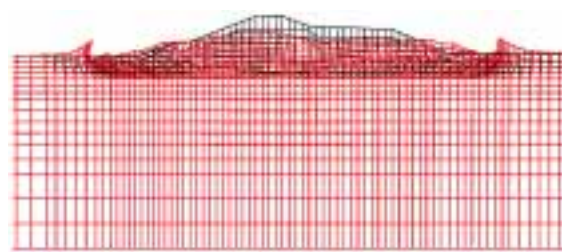


図-4 LIQCAによる変形図（すべり型）（木曾川左岸0k800）

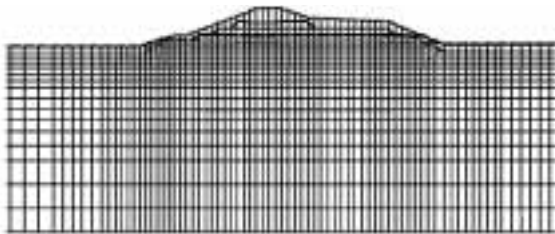


図-5 ALIDによる変形図(木曾川左岸0k800)

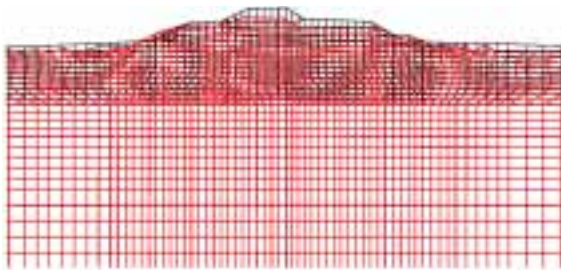


図-6 LIQCAによる変形図(沈下型)(木曾川左岸4k000)

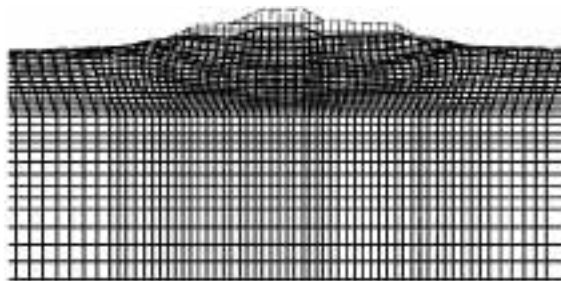


図-7 ALIDによる変形図(木曾川左岸4k000)

(2) 入力地震動やN値、FL値が天端沈下量に及ぼす影響

入力地震動と天端沈下量との関係をもとに、図-8に示すように、LIQCAでは基盤入射最大加速度の増加とともに天端沈下量が徐々に大きくなる傾向を示す。一方、ALIDでは、ある加速度値に達するまではほとんど沈下量は発生せず、その値を超えると加速度の増加とともに沈下量が増加する傾向を示す断面(Aタイプ)と、小さな加速度レベルから加速度の増加とともに沈下量が増加する傾向を示す断面(Bタイプ)の2つに大別できることがわかった。

Aタイプは、図-9に示すように液状化層の平均FL値が0.7より大きい場合に相当し、この場合にはLIQCAでは天端沈下量が大きく求められるが、ALIDによる沈下量は

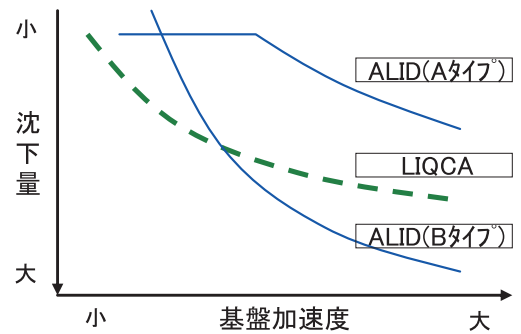


図-8 基盤加速度と沈下量の関係図

過小に求められる傾向にある。比較的液状化層のN値が高くAタイプに分類された木曾川右岸5k000でのLIQCAにより計算された堤防天端での地震加速度、鉛直変位、過剰間隙水圧の時刻歴変化を図-10に示した。この断面は、液状化層のN値が14と比較的大きいため、平均FL値は、1.38である。このため、ALIDでは、解析上液状化しないと判定され、その沈下量は小さく計算される。一方、LIQCAでは、地震動の時刻歴波形が入力値であることから対象地震動の継続時間の長い影響が考慮されていること、また、有効応力解析であるため、過剰間隙水圧の上昇に伴う液状化層の剛性低下が考慮された結果によるものと考えられる。

次に、Bタイプは液状化層の平均FL値が0.7より小さい場合に相当するが、このタイプの沈下型を示す断面に着目し、液状化対象層の平均FL値と天端沈下率との関係を図-11、図-12に示す。ここで、平均FL値は、先に示した振幅調整した入力地震動毎により算出している。この結果をみると、平均FL値0.7前後を閾値として、ALIDによる天端沈下量がLIQCAよりも大きく求められる傾向にあることがわかった。これについては、ALIDにおいて、FL値が小さい領域における液状化層の剛性低下率を過大に評価している可能性も考えられる。

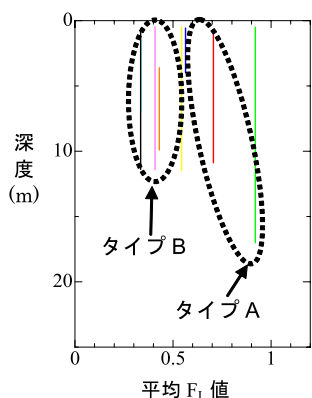


図-9 各検討断面での平均FL値の深度方向分布図

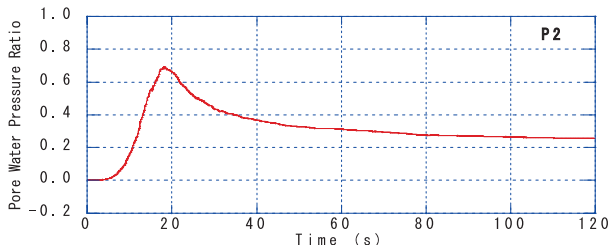
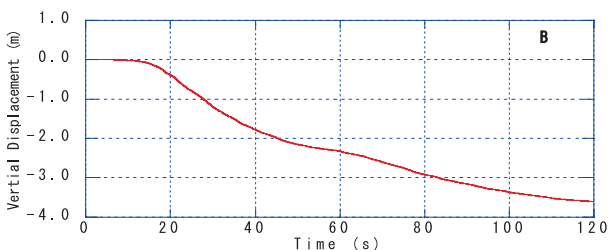
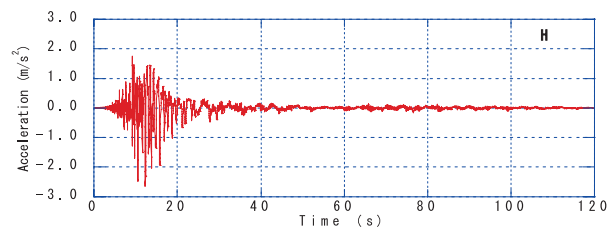
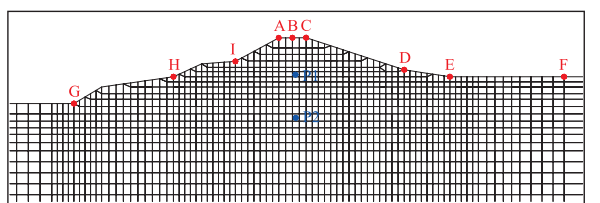


図-10 木曾川右岸5k000(Aタイプ)における応答加速度(法尻)、鉛直変位(天端)、過剰間隙水圧比($\Delta u/\sigma_v'$)の時刻変化

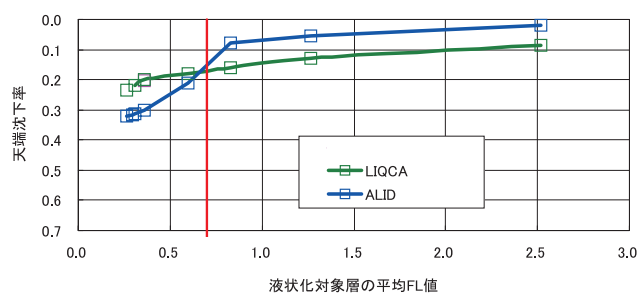


図-11 液状化対象層の天端沈下率～平均FL値の関係 (木曾川左岸6k000 (Bタイプ))

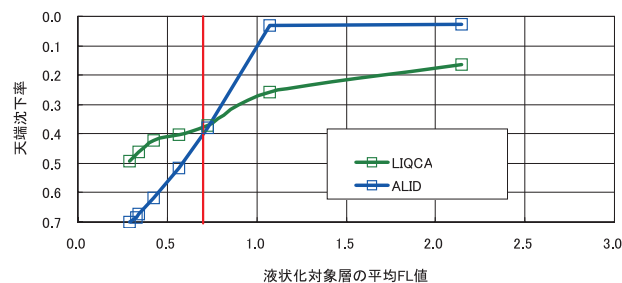


図-12 液状化対象層の天端沈下率～平均FL値の関係 (木曾川左岸4k000 (Bタイプ))

表-1 解析結果(予測沈下量)一覧表

液状化層厚 (N≦20)	Ac1層の有無	高水無極	検討断面	基礎入射加速度 (Gal)	最大加速度 (Gal)		液状化層厚 (N≦20) (m)	Ac2層の平均FL値	As2層の平均FL値	予測沈下量(m)		加速度レベルと沈下量の関係による分類	変形モード
					FDEL(地表)	LIQCA(天端)				LIQCA	ALID		
10m以下	Ac1層有り	10m以下	揖斐川右岸 9k600	215	250	130	6.0	8.1	0.59	2.1 (34%)	0.7 (11%)	Bタイプ	すべり型
		10m以上	木曾川右岸 5k000	228	209	177	4.0 (14.0) ^{※1}	21.4	1.38	3.6 (67%)	0.2 (5%)	Aタイプ	沈下型
	Ac1層無し	10m以下	揖斐川右岸 10k600	214	291	119	8.5	4.5	0.36	3.0 (43%)	1.5 (21%)	Bタイプ	すべり型
		10m以上	木曾川左岸 0k800	241	252	249	5.5	12.5	0.82	3.2 (56%)	0.4 (7%)	Aタイプ	すべり型
10m以上	Ac1層有り	10m以下	木曾川右岸 2k200	236	224	208	11.5	12.8	0.76	3.1 (46%)	1.0 (15%)	Aタイプ	沈下型
		10m以上	木曾川左岸 6k000	241	421	80	15.0	8.4	0.36	1.1 (20%)	1.6 (31%)	Bタイプ	沈下型
	Ac1層無し	10m以下	木曾川左岸 10k800	219	217	147	11.5	7.0	0.55	1.7 (20%)	3.2 (38%)	Bタイプ	沈下型
		10m以上	木曾川左岸 4k000	232	236	116	12.0	5.7	0.42	1.9 (37%)	3.2 (62%)	Bタイプ	沈下型

※1 ()内はN>20を含む砂層厚(LIQCAにおける液状化層厚)を表す

解析手法の適用性

木曾三川下流部の堤防を対象に、東海・東南海地震を想定した場合の変形量について、ALIDとLIQCAを用いて比較検討を行った結果、以下のことがわかった。

- ・ LIQCAによる解析結果をみると、地盤条件により変形モードが大きく異なる場合がある。

- ・ALIDとLIQCAとの比較において、沈下量に大きな差異が認められる一要因として、震動継続時間の影響が大きいと考えられる。

このように、継続時間が長い東海、東南海地震に対する堤防の耐震性評価に当たっては、対象地震動の特性と地盤の土質構成を勘案して、適切な地震時変形予測手法を適用することが重要である。さらに、今回得られた知見から、比較的簡便である静的解析手法のALIDならびに動的解析手法であるLIQCAの適用にあたっては、以下のようなことに留意する必要があると考えられた。

1 液状化層厚による変形モードに着目した分類

LIQCAによる変形解析の結果では、液状化層厚が10m前後より小さくなると変形モードが「すべり型」となる可能性があり、ALIDとLIQCAによる沈下量の差異が大きくなることがわかった。これらの主な要因としては、LIQCAでは震動継続時間の長さの影響を考慮できるのに対して、ALIDでは考慮できない点があげられる。このため、液状化層厚が10m以下の区間でのALIDの適用は、危険側の結果を与える恐れがあるため、LIQCAを適用することが望ましい。

2 液状化層の平均FL値に着目した分類

液状化層厚が10mを超える場合には、LIQCAでの変形モードが「沈下型」となる可能性があり、ALIDの適用性が高くなると考えられる。

地震動をパラメトリックに漸増させたALID、LIQCAの解析結果によれば、液状化層の平均FL値が0.7前後より小さい場合については、ALIDによる沈下量はLIQCAによる沈下量と同程度かやや大きい値を示しており、ALIDにより適切な予測を行うことは可能と判断された。

一方、液状化層の平均FL値が0.7前後より大きい場合については、ALIDによる沈下量はLIQCAによる沈下量に比べて過小となる傾向がみられる。これについては、

LIQCAでは震動継続時間の影響が考慮されていることによるものと考えられる。したがって、液状化層の平均FL値が0.7前後より大きい区間についてのALIDの適用は、危険側の結果を与える恐れがあるため、LIQCAを適用することが望ましい。

おわりに

木曾三川下流部では、地震に伴い来襲する津波高さを地震被災後の堤防高さが下回る場合、広範囲なゼロメートル地帯を抱えていることから、浸水による二次災害の発生の可能性が高い。このため、二次災害防止に向けて沈下量が大きく想定されるような区間では、堤防の地震対策工等を施す必要があるが、現在のところ大規模地震に対する対策工の設計や対策規模の考え方が確立されていない。

今後は、大規模地震に対する堤防基礎地盤の地盤改良等の液状化対策工について、その対策規模や対策効果に対する評価手法等の課題が残されており、これらについて、引き続き検討していきたいと考えている。

ご指導・ご協力を頂いた杉戸真太委員長（岐阜大学流域圏科学研究センター センター長 教授）をはじめ「木曾三川下流部地震防災検討委員会」の各委員に末筆ながらここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) ALID研究会：2次元液状化流動解析プログラム ALID/WIN、2003
- 2) 液状化解析手法LIQCA開発グループ：LIQCA2d04（2004年公開版）資料、2004
- 3) M.Sugito, Y.Furumoto, and T.Sugiyama : Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra Proc. of the 12th WCEE, CD-ROM, Oakland, New Zealand, 2000
- 4) P.B. Schnabel, J. Lysmer and H.B. Seed : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972
- 5) 杉戸真太、合田尚義、増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察、土木学会論文集、No493/III-27、pp.49-58、1994.6
- 6) 翠川三郎：関東平野を対象とした震度分布予測、構造工学論文集、Vol.33B、pp.43-48、1987
- 7) 常盤敏、中山修、倉橋智、宮本高行、八嶋厚：木曾三川下流部堤防での地震時変形解析手法の比較検討、第40回地盤工学研究発表会 平成17年度発表講演集、pp.1357-1358、2005.7