

沿岸部に敷設する道路盛土の耐震性能設計に関する一考察

栗林 健太郎¹・原 忠²・品川 大地³・黒田 修一⁴

¹正会員 株式会社エイト日本技術開発 防災保全部（〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町3-1-21）
²正会員 工博 高知大学 防災推進センター（〒783-8502 高知県南国市物部乙200）
³非会員 高知大学大学院 総合人間自然科学研究科（〒783-8502 高知県南国市物部乙200）
⁴正会員 株式会社エイト日本技術開発 防災保全部（〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町3-1-21）

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では沿岸部に設置された道路盛土構造物が津波抑制効果を発揮し、発災直後の避難や津波浸水地域の迅速な物資の輸送に機能を発揮した。大地震における津波抑止対策として、特に沿岸部の高規格道路など道路盛土の利活用が検討されている¹⁾²⁾。

筆者らは、津波の被災が懸念される海岸平野部に分布するような軟弱地盤上に設置された道路盛土の変形性について、沖積層の液状化が天端沈下量に及ぼす影響に着目している。南海トラフ地震による被災が予測される高知県沿岸部の道路盛土を想定し、沿岸堆積層の地盤工学的特徴や沖積層の繰返し非排水三軸試験結果に基づき、2 次元有効応力動的解析を実施している。本報では、解析結果を元に液状化に伴う道路縦断方向における盛土天端の沈下量を、定量的にかつ簡便に推定する手法を提案する。

2. 道路盛土の耐震性能設計に対する課題

現行の盛土工指針³⁾における要求性能と評価手法は表-1の通りである。レベル2地震動において道路盛土構造物に要求される耐震性能は性能2～性能3であり、盛土変形量に対する性能照査を実施することとなっている。

ただし、道路盛土の変形量照査において、以下の2点が課題として挙げられる。

(1) 盛土変形量の許容値の設定

変形量照査を行う場合、道路盛土に発生する変形量の許容値を設定する必要がある。例えば、「道路

表-1 現行指針における道路盛土の要求性能と評価手法

要求性能	盛土の境界状態	構成要素	構成要素の境界状態	照査項目	照査手法
性能1	想定する作用によって生じる盛土の変形・損傷が盛土の機能を確保できる境界の状態	基礎地盤	基礎地盤の力学特性に大きな変化が生じず、盛土・路面から要求される変位にとどまる境界の状態	変形	変形照査
		盛土	盛土の力学特性に大きな変化が生じず、かつ路面から要求される変位にとどまる境界の状態	安定	安定照査
	想定する作用によって生じる盛土の変形・損傷が修復を容易に行い得る境界の状態	基礎地盤	復旧に支障となるような過大な変形や損傷が生じない境界の状態	変形	変形照査
		盛土	損傷の修復を容易に行い得る境界の状態	安定	安定照査
性能2	想定する作用によって生じる盛土の変形・損傷が修復を容易に行い得る境界の状態	基礎地盤	隣接する施設へ甚大な影響を与えるような過大な変形や損傷が生じない境界の状態	変形	変形照査
性能3	想定する作用によって生じる盛土の変形・損傷が隣接する施設等への甚大な影響を防止し得る境界の状態	基礎地盤	隣接する施設へ甚大な影響を与えるような過大な変形や損傷が生じない境界の状態	変形	変形照査

震災対策便覧（震災復旧編）」（以下、道路震災対策便覧）⁴⁾では道路盛土の被災パターンに対して盛土の変形量と被害の程度について整理がなされている。しかし、変形量の許容値の設定方法については設計者の判断に委ねられる場合が多く、多くは道路震災対策便覧や過去の被災事例、既往文献等から設定されている。

例えば、依藤ら⁵⁾は実車両の段差走行実験から、一般車両が徐行速度で走行できる路面段差量として10cm以下を示しており、新道路技術会議レポート⁶⁾では簡易な復旧等で通行機能の確保が比較的容易な路面段差量として25cm以下を提案している。

(2) 盛土変形量の算出方法

現行の盛土工指針では、安定計算に置き換えて所定の安全率が確保できていれば変形性能も満足するものと判断する手法と、残留変形解析により盛土変形量を直接的に算出する手法に大別される。近年、

盛土および基礎地盤の残留変形解析手法の向上により盛土構造物の残留変形量を直接的に求めることが比較的容易になったことから、道路盛土においても大規模地震時における変形量照査を採用する事例が増加している。

残留変形解析手法としては、盛土そのもののすべり変形量はニューマーク法⁷⁾、基礎地盤の液状化による変形量は有限要素法を用いた弾塑性解析⁸⁾⁹⁾が一般的に実施されている。しかし、これらの手法は地盤条件の整理や解析に時間と手間を要するため、対象路線の地盤条件から変形量が厳しいと想定される断面を代表断面として設定し、局所的な変形量に対して照査を実施するにとどまっている。

ここで、道路走行において支障が生じる段差量は、主に橋台背面やカルバート等の構造物との取り合い部に発生する段差によることが、これまでの地震被災事例から分かっている。これらの構造物は、選定された代表断面に限らず路線内で複数設置されることが想定されるため、代表断面で算定される沈下量のみで路線全体を評価することは過度に安全側の評価となる可能性がある。

以上から、道路縦断方向の盛土沈下量を簡便に評価する手法が、道路盛土の耐震性能設計を実施する上で有効であると言える。

4. 沿岸堆積層に着目した液状化解析

沿岸堆積層のモデルケースとして、液状化が生じやすいとされる河川氾濫堆積物が平野部に広く分布している、高知県土佐市の仁淀川河口付近の堆積層に着目し、表層地盤の液状化による盛土天端の沈下量を有効応力動的解析により算定した。有効応力動的解析には、液状化時の変形および過剰間隙水圧消

散時の解析が可能であるLIQCA⁹⁾を使用した。

仁淀川河口付近の地盤情報を収集したボーリング位置と試料採取箇所をプロットした土地条件図、および対象区間における地盤のボーリング柱状図を図-1に示す。対象区間のボーリング柱状図等の地盤情報は、四国地盤情報データベース¹⁰⁾を参照した。

a) 地形の特徴

仁淀川流域は、河口近くまで山地が迫り下流域で宇治川や日下川、波介川等の支川が合流するため、洪水による河川の氾濫が過去に頻繁に発生した地域である¹¹⁾。地形区分でも河口付近の平野部の大半は氾濫平野に区分されている。

b) 地層構成

仁淀川河口付近は厚い砂礫層が表層に堆積している。礫質土の液状化は、1995年兵庫県南部地震での埋立地盤¹²⁾等いくつかの事例が報告されており、相対密度 Dr が60%以下の緩い礫質土は過剰間隙水圧の上昇により地震後に大きな体積圧縮ひずみが生じることが既往の実験結果より得られている¹³⁾。

本報では、この砂礫層（以下、仁淀川砂礫層）を液状化対象層として、解析を実施する。

c) 採取試料

本報で使用する試料は、仁淀川砂礫層を対象に採取されたものである¹³⁾。図-1の土地条件図より、採取地点では高水敷にあたる地点で、採取深度は概ねGL-1.0m程度¹³⁾、採取地点でのせん断波速度 V_s は250m/sである¹⁴⁾。

採取試料の物理特性を表-2に、対象区間のボーリングより得られている試料と採取試料の粒径加積曲線を図-2に示す。ここで、四国地盤情報データベースで公開されている情報は礫、砂、シルト、粘土の割合のみであるため、それぞれの粒径範囲において一様の直線で表現している。

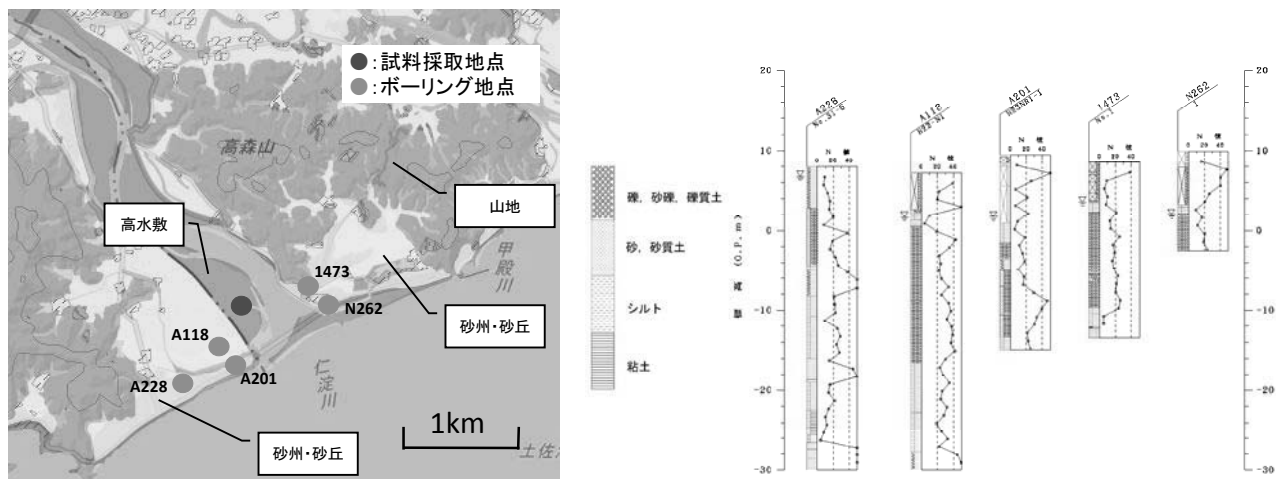


図-1 仁淀川河口付近の土地条件図¹¹⁾およびボーリング柱状図¹⁰⁾

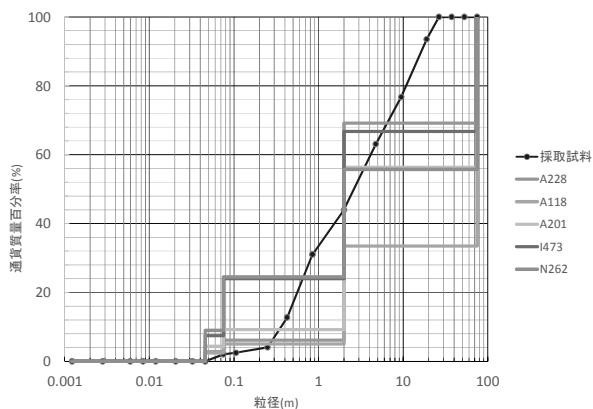


図-2 仁淀川河口付近ボーリングおよび採取試料の粒径加積曲線

表-2 採取試料の物理特性

ρ_s (g/cm^3)	ρ_d (g/cm^3)	U_c	D_{50} (mm)	F_c (%)	G_c (%)
2.727	1.975	11.4	2.70	2.0	66.7

採取試料に比べて、ボーリング地点での試料の方が細粒分をやや多めに含んでいるが、全体の80%～90%は粒径0.2mm以上の砂礫である。

(2) 解析モデル

解析モデルを図-3に示す。解析モデルの地層構成は、道路盛土、液状化層（仁淀川砂礫層）、非液状化層（洪積砂礫層相当）とした。解析モデルの境界条件は、底面境界は粘性境界、側方境界は等変位境界を用い、それぞれの地盤高に合わせた自由地盤をモデル端部に設け、個別に計算された自由地盤の応答水平変位をモデル端部に引き継いだ。また、図-1のボーリング柱状図でN値の比較的小さい砂礫層の層厚が地点により異なることから、液状化層厚と盛土天端の沈下量との相関を把握するため、液状化層厚を1.5m、5.0m、9.0m、12.0mとパラメトリックに変化させた解析を実施した。また、道路盛土の盛土高は4.0m、法面勾配は1:1.5とした。地下水位は、対象地点のボーリング孔内水位で最も高い水位となるGL-1.0mとした。

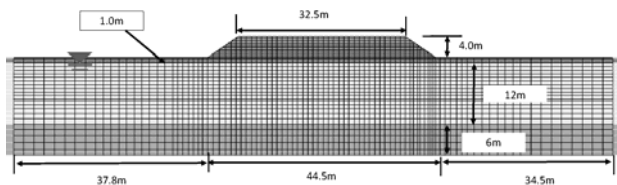


図-3 解析モデル

(3) 解析物性値

解析物性値を表-3に示す。

液状化層の液状化特性を把握するため、採取試料から供試体を作成し、繰返し非排水三軸試験を実施した。ここで、供試体の相対密度は、畑中ら¹⁵⁾の文献より得られている不攪乱試料の相対密度 D_r と採取位置のPS検層によるせん断波速度 V_s との相関から、現地で得られているせん断波速度 $V_s=250\text{m/s}$ の砂礫層に対する相対密度 D_r を60%とした。

また、この繰返し非排水三軸試験結果を元に要素シミュレーションを実施し、液状化層の液状化パラメータを設定した。図-4に液状化層の要素シミュレーション結果を示す。

表-3 解析物性値一覧

		弾性モデル		弾性モデル
		盛土	基礎地盤 (仁淀川砂礫層)	基礎地盤 (非液状化層)
単位体積重量	$\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	19.00	19.62	21.00
透水係数	$k(\text{m/s})$	1.0×10^{-5}	7.5×10^{-4}	4.5×10^{-4}
初期閉鎖比	e_0	0.86	1.00	1.00
せん断波速度	$V_s(\text{m/s})$	150	250	300
平均有効主応力	$\sigma'_m(\text{kN}/\text{m}^2)$	25.33	65.33	146.67
初期せん断弾性係数	$G_{max}(\text{kN}/\text{m}^2)$	43622	125128	192857
ポアソン比	ν	0.333	0.333	0.333
粘着力	$c'(\text{kN}/\text{m}^2)$	0.00	0.00	—
内摩擦角	$\phi(^{\circ})$	30.00	35.00	—
圧縮指数	λ	3.4×10^{-1}	2.5×10^{-2}	—
膨張指数	κ	3.4×10^{-2}	2.5×10^{-3}	—
繰返し圧縮比	OCR^*	1.000	1.000	—
初期せん断係数比	G/G_{max}	1722	1915	—
変形能力比	M_m	0.909	0.909	—
破壊能力比	M_f	0.980	1.158	—
硬化パラメータ	B_0	5273	4000	—
"	B_1	53	40	—
"	C^*	—	0.00	—
繰返しすべり(塑性)	γ^{p*}	—	0.0040	—
繰返しすべり(弾性)	γ^{E*}	—	0.040	—
ダイラジ係数	D_0	—	1.000	—
"	n	—	5.000	—

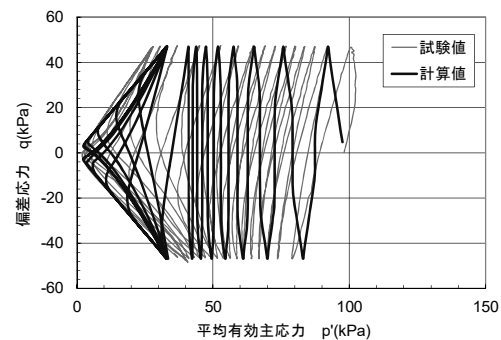
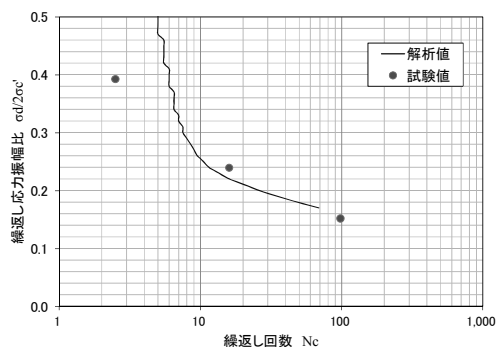


図-4 要素シミュレーション結果(上：液状化強度曲線，下：有効応力経路)

ーションの結果を、液状化強度曲線、有効応力経路について示す。液状化強度曲線は、両振幅軸ひずみDAが5%において試験値と解析値で良く整合し、繰返し載荷回数 $N_c=16$ において両者はほぼ一致した。

(4) 入力地震動

入力地震動は、平成24年版道路橋示方書よりレベル2地震動のうち、海溝型(タイプⅠ)地震動として平成23年東北地方太平洋沖地震開北橋周辺地盤上NS成分観測波、内陸型(タイプⅡ)地震動として平成7年兵庫県南部地震神戸海洋気象台地盤上EW成分波を用いた¹⁶⁾。入力地震動の時刻歴波形を図-5に示す。

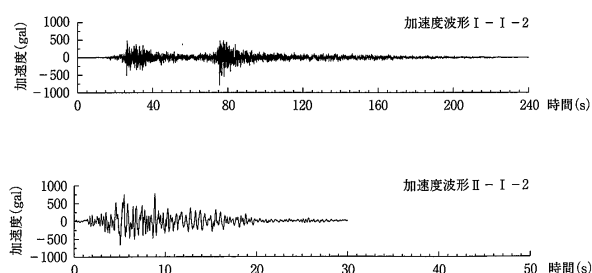


図-5 入力地震動 (上：タイプⅠ，下：タイプⅡ)

(5) 解析結果

最も変形量の発生した液状化層厚12.0mモデルについて、タイプⅠ地震動作用時における過剰間隙水圧比の地震動終了時のコンターを図-6、過剰間隙水圧消散後の残留変形図を図-7に示す。また、比較として同様の条件におけるタイプⅡ地震動作用時の過剰間隙水圧比のコンターを図-8、残留変形図を図-9に示す。

どちらの地震動においても、堤体直下および地表面の液状化層で過剰間隙水圧比が1.0に達しており、完全液状化の状態となっている。また、地震動終了後の残留変形は、盛土天端部で最も大きく沈下しており、両法面が法尻付近から側方にはらみ出し、地表面が盛り上がる変形が確認できた。盛土天端の沈下量はタイプⅠで4.03m、タイプⅡで0.62mとなっており、継続時間の長いタイプⅠ地震動の方が同じ液状化層の条件であっても残留沈下量は大きい結果となった。

5. 道路縦断方向に対する盛土天端沈下量の評価

4章における液状化解析結果を元に、沿岸堆積層の液状化に着目した道路縦断方向の盛土沈下量を、既存のボーリング情報から評価する。

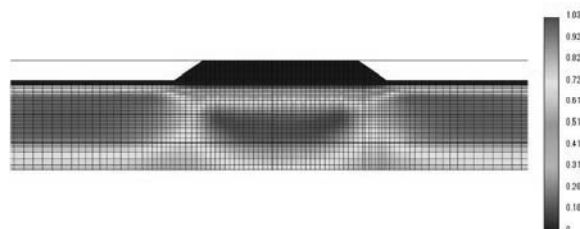


図-6 過剰間隙水圧比コンター (地震動終了後、タイプⅠ)

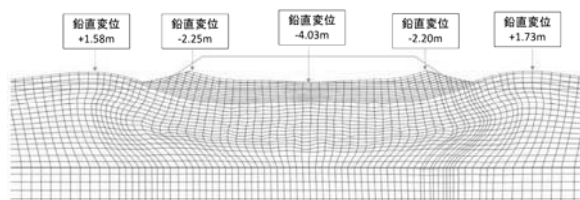


図-7 残留変形図 (過剰間隙水圧消散後、タイプⅠ)

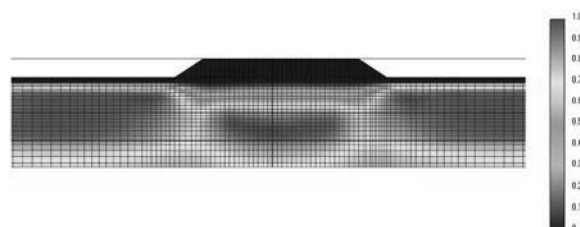


図-8 過剰間隙水圧比コンター (地震動終了後、タイプⅡ)

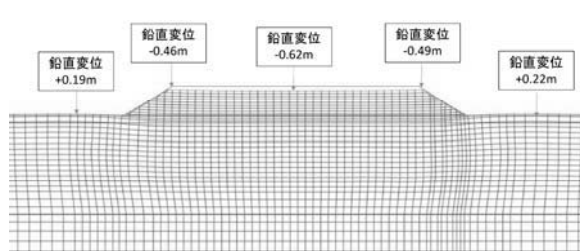


図-9 残留変形図 (過剰間隙水圧消散後、タイプⅡ)

(1) 解析結果の整理

液状化層の層厚と盛土天端の沈下量の相関図を図-10に示す。また、繰返し三軸強度比 R_{L20} を元に F_L 値を算出し、地表面からの深度 x (m)に対応する F_L 値から式-1より各解析ケースの P_L 値¹⁷⁾を算出し、盛土天端の沈下量との相関を把握した。 P_L 値は、各ボーリング地点での液状化程度、液状化層厚、液状化層の深度を一つ数値として評価するのに有効である。 P_L 値と盛土天端の沈下量の相関図を図-11に示す。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x)dx \quad (1)$$

ここで、 F_L 値算出時の条件として、設計水平震度はⅡ種地盤、B1地域(高知県)のケースを用いた。

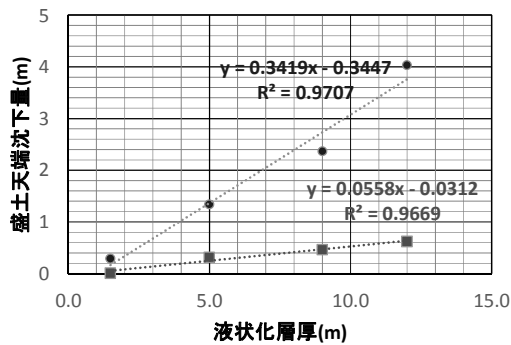


図-10 液状化層厚と盛土天端沈下量の相関図

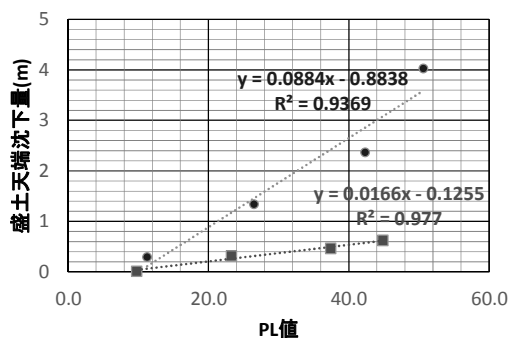


図-11 PL値と盛土天端沈下量の相関図

液状化による盛土天端の沈下量は、層厚やPL値に対して正の相関があり、概ね比例関係にあると言える。また、同一のPL値で比較すると、タイプI地震動における沈下量はタイプII地震動に比べて約4倍程度大きい結果となった。

(2) 仁淀川河口における道路縦断方向の沈下量

図-2で示した仁淀川河口部のボーリング地点上に道路が敷設されることを仮定して、柱状図のN値からボーリングごとのPL値を算出し、図-11を用いて盛土天端の沈下量を算定した。なお、各ボーリングの地層構成は、礫質土の液状化強度は本報における繰返し非排水三軸試験結果 ($R_{L20}=0.21$) を用い、砂質土の液状化強度は、細粒分含有率15%、湿潤単位体積重量 18kN/m^3 として平成24年道路橋示方書を元に液状化強度を推定した。

各ボーリングにおける推定盛土天端沈下量の変化を図-12に示す。盛土天端沈下量は最大で3.0m、最小で0.07mと同一地域でもバラつきがある。最大沈下量が発生しているのはボーリングNo.A228であり、柱状図を見ると他のボーリングに比べて地下水位が高く、N値20前後の砂礫層および砂質土層が最も厚く堆積していることからPL値も高い値となったことが要因であると考えられる。ただし、近接するボーリングとの相対沈下量でみると最大で約2.0m (A228 - A201間、タイプI地震動) であり、ボー

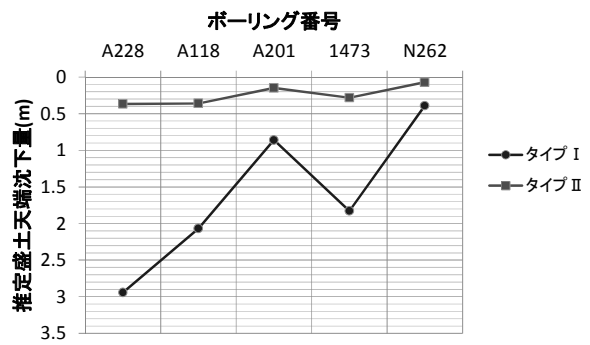


図-12 各ボーリング位置での推定盛土天端沈下量

リング単体での沈下量と比べておよそ2/3程度小さく、盛土天端の沈下量は縦断方向に段階的に変化していることが確認できる。

6. 盛土沈下量の評価手法の提案

以上の結果を踏まえて、本報で提案する道路盛土天端の沈下量の評価フローを図-13に示す。

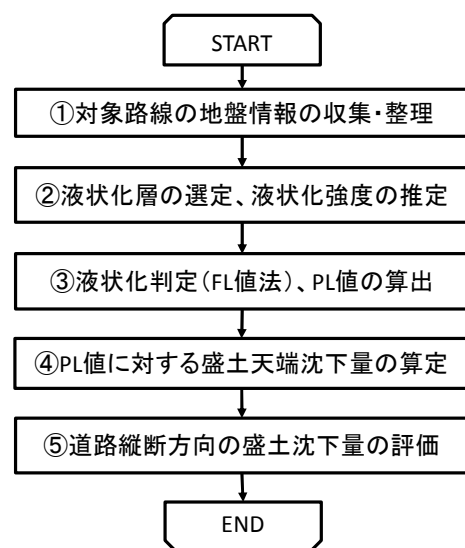


図-13 盛土沈下量の評価フロー

- ①対象路線の地盤情報（地質縦断図，ボーリング調査結果，土質試験結果等）を収集し，表層地盤の地層構成を把握する。
- ②表層地盤のうち，得られている土質条件から液状化の可能性がある層を選定し，液状化強度を推定する。液状化強度は，繰返し非排水三軸試験を実施する方法や，N値から推定する方法⁹⁾が挙げられる。
- ③FL値法に基づく液状化判定を実施し，対象区間のボーリングごとにPL値を算出する。
- ④別途実施された有効応力動的解析から得られてい

る P_1 値と盛土天端沈下量の相関関係から、各ボーリング位置における盛土天端沈下量を推定する。

- ⑤各ボーリング位置における盛土天端沈下量から、道路縦断方向における盛土天端の沈下量の変化を推定し、橋台やカルバート等の構造物位置における盛土との間に発生する液状化時の段差量を評価する一つの指標とする。

7. おわりに

本報では、液状化層厚をパラメトリックに変化させた有効応力動的解析結果をもとに、基礎地盤の液状化による縦断方向の盛土沈下量を簡便に評価する手法を提案した。

ただし、今回の評価手法に用いた相関図は、仁淀川河口にて採取した試料を元に作成したものである。他の沿岸域で本手法を適用するためには、地形やボーリング結果から現地表層地盤の堆積状況を把握し、別途液状化層を対象とした繰返し三軸試験および代表断面における有効応力動的解析を実施する必要がある。

今後は沿岸部で想定される堆積層を体系的に整理し、それぞれの堆積層を想定した盛土沈下量の評価式を設定することにより、対象地点での地形状況やボーリング調査結果のみから盛土天端の沈下量を推定できるように本報の手法を発展させていく。

謝辞：本報を執筆するにあたり、基礎地盤コンサルタンツ(株)の畑山諒人氏が実施した仁淀川砂礫の繰返し非排水三軸試験結果のデータを使用させていただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 中部圏地震防災基本戦略【第一次改訂】，南海トラフ地震対策中部圏戦略会議，2014.
- 2) 地震時における地盤災害の課題と対策 2011年東日本大震災の教訓と提言，地盤工学会，2011.
- 3) 道路土工 盛土工指針（平成22年度版），日本道路協会，2010.

- 4) 道路震災対策便覧（震災復旧編）平成18年改訂版，日本道路協会，2007.
- 5) 依藤光代，常田賢一：地震時の段差被害に対する補修と交通開放の管理・運用方法について，平成19年度近畿地方整備局研究発表会，防災・保全部門No.16，2007.
- 6) 道路政策の質の向上に資する技術研究成果報告レポート，新道路技術会議，No.17-4，2008.
- 7) 設計要領第一集 土工編，東日本高速道路(株)，西日本高速道路(株)，中日本高速道路(株)，2009.
- 8) 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手法，土木学会論文集，No.638/III-49，pp. 71-89，1999.
- 9) 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
- 10) 四国地盤情報データベース，四国地盤情報活用協議会，2014.
- 11) 仁淀川水系の流域及び河川の概要（案），国土交通省河川局，2009.
- 12) Ishihara, K.: Geotechnical aspect of the 1995 Kobe earthquake, 14th International conference on soil mechanics and foundation engineering, ICSMFE, Terzaghi Oration, 1997.
- 13) 原忠，畑山諒人，岡島義行，岡林福好：礫質土の液状化特性と液状化後の変形性及び耐流動性，土木学会第68回年次学術講演会，2013.
- 14) 原忠，畑山諒人：礫質土の液状化強度と液状化後の変形性，第48回地盤工学会研究発表会，2013.
- 15) Hatanaka, M., Uchida, A., and Suzuki, Y.: CORRELATION BETWEEN UNDRAINED CYCLIC SHEAR STRENGTH AND SHEAR WAVE VELOCITY FOR GRAVELLY SOILS, Soils and Foundations, Vol.37, No.4, pp.85-92, 1997
- 16) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，日本道路協会，2012.
- 17) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田進：地震時の地盤液状化の程度の予測について，土と基礎，Vol.28, No.4, pp. 23-29, 1980.