

学位論文全文に代わる要約 Extended Summary in Lieu of Dissertation

氏名： 栗林 健太郎
Name

学位論文題目： 液状化と津波の複合災害を受ける道路盛土の耐震性能評価法に関する研究
Title of Dissertation

学位論文要約： Dissertation Summary

2011年東北地方太平洋沖地震では、平野部の広い範囲で強い揺れと津波による被害を受けた。一方、沿岸部の道路では、海岸線と平行に敷設された道路盛土が津波高さ 5m を超える津波の遡上を抑制し、周辺地域の浸水被害を軽減しただけでなく、高台の少ない地域の避難場所としても機能した。このような背景から、切迫性の高い南海トラフ巨大地震に対して、道路や防潮堤などの盛土構造物の津波抑制効果が注目されるようになった。沿岸部に敷設する盛土構造物は、地震による揺れと地震後の津波が複合的に作用する可能性が高い。特に沿岸部には河川堆積物による沖積層が広く分布しており、基礎地盤の液状化による影響が懸念される。地盤の液状化や津波外力が作用する場合の盛土構造物の崩壊メカニズムは、既往の研究により明らかにされつつあり、設計手法や対策工法は実務でも取り入れられている。しかし、実際には各事象が連続的に生じる可能性が高く、複合的に生じる災害を受ける盛土構造物の被災メカニズムや耐震性能評価手法を体系的に整理した研究例はほとんどない。本研究は、地盤の液状化と津波の複合災害を受ける盛土構造物に着目し、現地調査や数値解析などから被災メカニズムを整理し、特に沿岸部の道路盛土設計における耐震性能評価の考え方や留意点を纏めたものである。

はじめに、液状化地盤上に敷設する盛土構造物の例として、2016年熊本地震において液状化被害を受けた道路盛土に対して現地調査および数値解析から被災に至るメカニズムと被害の傾向を分析した。さらに、液状化地盤上に敷設する盛土の天端沈下量に影響を及ぼす主たる要因を特定するため、盛土の諸条件および基礎地盤条件をパラメーターとした数値解析を実施した。その結果、道路機能を阻害する様な段差は橋台背面付近で生じるが、それ以外の区間では盛土自体の沈下量は大きいものの相対的な沈下量は小さく、道路機能には影響を与えないことが確認された。数値結果から、同一連続した地盤条件では盛土天端の沈下量は盛土高や天端幅、基礎地盤の P_L 値との間に相関性が見られることが分かった。

次に、液状化と津波の複合災害を受けた盛土構造物について、2011年東北地方太平洋沖地震で被災したコンクリート被覆盛土と補強土壁を例に、現地調査や水槽模型実験結果から被災メカニズムを分析した。その結果、沿岸部に敷設された盛土構造物は、表面に被覆が施されている場合であっても、液状化による盛土の沈下及び天端高さを超える津波外力を同時に受けることにより、形状が保てないほど大きく損傷する可能性が高いことを明らかにした。一方、補強土壁は、壁面に津波が作用し堤体内へ水が浸透したとしても、裏込め材が流出しない条件では補強土壁としての安定性が損なわれないことが明らかにされた。

一連の検討結果から、沿岸部に敷設する道路盛土について、液状化と津波の複合災害を見据えた新たな耐震性能評価手法を提案した。道路盛土に求められる排水機能を確保した状態では、地震時の基礎地盤や堤体の変形により津波来襲時における盛土材の流出を防止する対策をすることにより、液状化と津波の複合災害対策に効果的であることを示した。道路盛土ではレベル 2 地震動に対して道路の復旧性に着目した性能が必要であるが、沿岸部では地震後に来襲する津波に対する避難道としての機能が求められるケースが想定される。本研究成果に基づき、道路縦断方向の沈下量の推定手法を従来の設計手順に取り込むことにより、今後敷設される沿岸部の盛土構造物に対して耐津波性能を兼ね備えた合理的で安全性の高い耐震設計が期待される。

1. 液状化被害を受ける盛土構造物の被害要因と傾向の分析

液状化地盤上に敷設される盛土構造物は、基礎地盤の液状化により盛土が外側にはらみ出しながら沈下する変形が生じることが確認されている。その結果、道路盛土では橋台背面やボックスカルバート、河川堤防では樋管等、盛土を横断する構造物との取り合い部に大きな段差が生じ、車両の通行を妨げる被害が既往の地震でも多く見られている。道路盛土のレベル2地震動に対する耐震性能照査では、2次元有限要素法を用いた有効応力解析により算出された盛土の沈下量に対する照査が広く行われている。しかし、解析やそれに伴う地盤調査に時間と手間を要することから、実際の設計では盛土変形量が大きいと予想される代表断面に対して照査を実施するに留まっている。特に構造物との取り合い部は、選定された代表断面に限らず対象路線内に複数存在する 경우가多く、代表断面の解析結果より得られる盛土天端の沈下量とは異なる可能性が高い。

このような背景から、道路啓開上の重要性も考慮して構造物の設置個所も含めた道路縦断方向に対する盛土沈下量の評価手法が求められている。

ここでは、まず既往の地震被害事例として、2016年熊本地震によって被災した熊本県益城郡益城町周辺の道路盛土被害に着目し、現地での簡易計測により橋台背面に発生した段差量および盛土縦断方向の連続した沈下量の整理を行った。更に、液状化被害を受けた代表的な橋台背面盛土1か所に対して地質調査及び数値解析を実施した。現地調査および数値解析の結果、道路盛土の沈下量は盛土の規模、特に盛土高と正の相関があることが確認された(図-1)。この結果は、従来から実施されている代表断面で得られる盛土沈下量の推定値を基礎地盤条件や盛土条件を用いて補間することにより、盛土縦断方向の沈下量を簡便に推定できる可能性があることを示唆している。

一連の成果を踏まえ、液状化地盤上に敷設する盛土の天端沈下量に影響を及ぼす主たる要因を特定するため、盛土の諸条件(盛土高、天端幅、盛土勾配、締固め度)および基礎地盤条件(液状化層厚、土質)に着目したパラメトリック解析を実施した。その結果、盛土の沈下量に対して影響を及ぼす因子としては、一般的な道路盛土において想定される範囲では天端幅に対する盛土高の比(図-2)、基礎地盤の液状化抵抗値(P_L 値)(図-3)が特に大きいことが分かった。

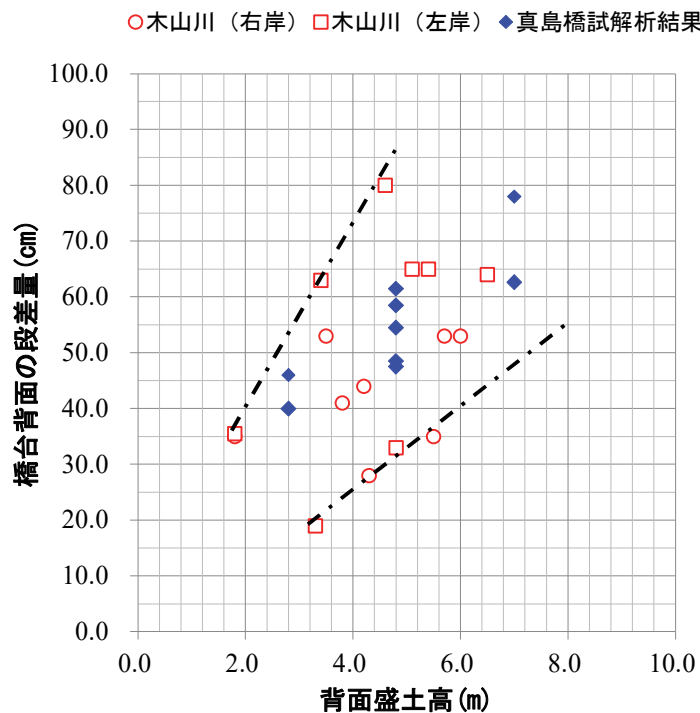


図-1 木山川周辺の橋台背面盛土における盛土高と盛土天端沈下量の相関

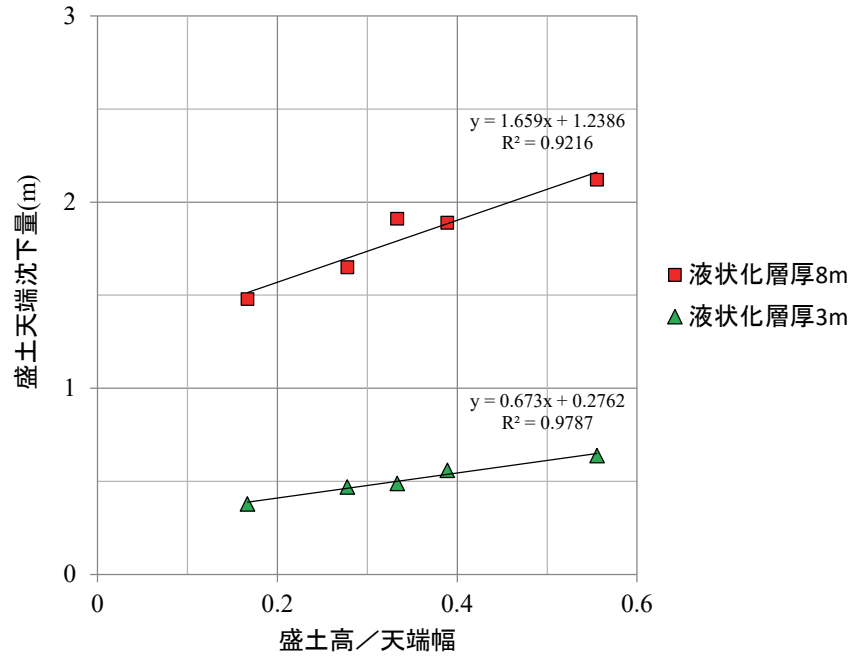


図-2 盛土高/天端幅と盛土天端沈下量の相関

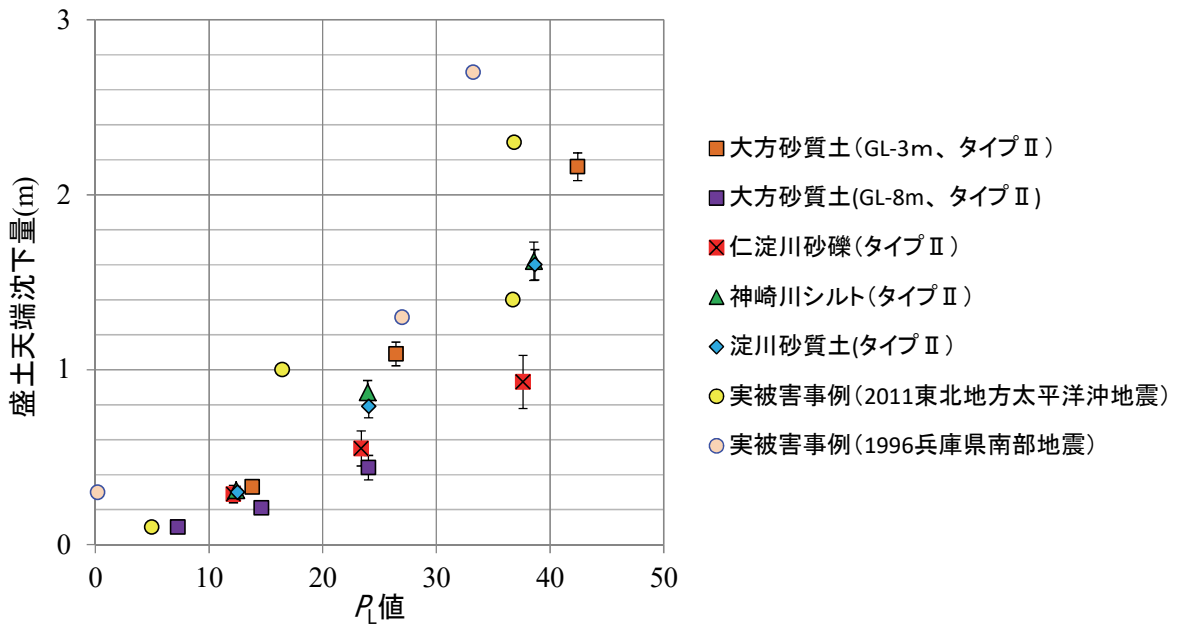


図-3 R値と盛土天端沈下量の相関

2. 液状化と津波の複合災害を受ける盛土構造物の被災メカニズム分析

沿岸部に敷設される盛土構造物は、大規模地震時において地震と津波の両方の作用を受ける可能性が高い。特に、沿岸部は河川堆積物や海岸堆積物から形成される沖積砂質土層が厚く堆積していることが多く、特に地震後の液状化を受けた後に津波を受ける複合災害が最も懸念される。盛土構造物に対して、地震や津波単体の作用に対しては、既往の研究によってその被災メカニズムが概ね明らかになってきており、耐震設計や対策工法にも取り入れられている。しかし、液状化と津波の複合災害に着目した事例は未だ少ない。

ここでは、液状化と津波の複合災害を考慮した盛土構造物に要求される性能について考察を行うために、2011年東北地方太平洋沖地震において実際に被害を受けた2つの事例について、現地調査や室内模型実験、数値解析を用いてその被災メカニズムを分析した。

(1) コンクリート被覆盛土の複合災害に対する被災メカニズム

まず対象とした盛土構造物は、コンクリート三面被覆が施された河川堤防である。従来、盛土構造物の津波時の越流侵食対策として盛土の法面および天端を被覆する方法は効果的であるとされていた。しかし、岩手県大船渡市の吉浜堤防(図-4)では、被覆コンクリートが剥がれて堤体が一部完全に破堤しており、この被害事例を対象に現地調査及び数値解析からコンクリート三面被覆盛土における液状化と津波の複合災害を受けた際の被災メカニズムを考察した。現地調査および地震直後から津波来襲時までの時間軸に着目した数値解析(図-5)の結果、地震直後から堤防下部の液状化により堤防が沈下・変形し、被覆コンクリートと堤体との間に空洞が生じたこと(図-6)、損傷した堤体に津波の波圧が作用したことで破堤に至ることを液状化と津波外力の両面から論理的に証明した。



図-4 吉浜堤防の被災状況

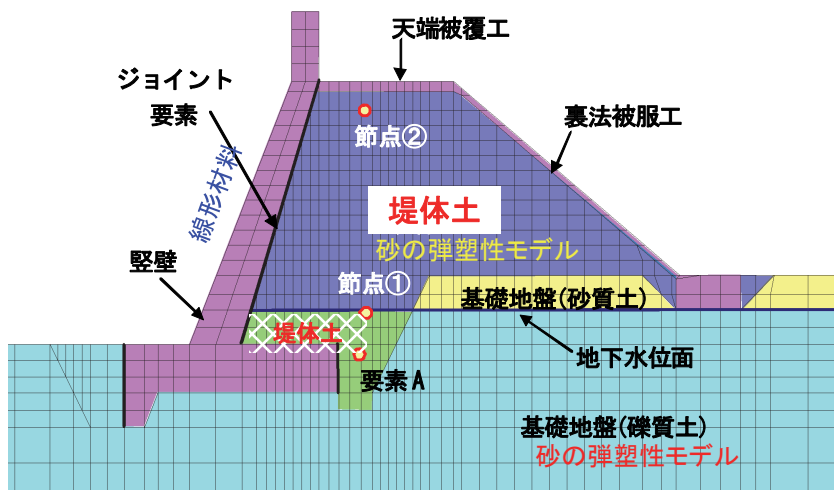


図-5 数値解析モデル(吉浜堤防)

(様式5) (Style5)

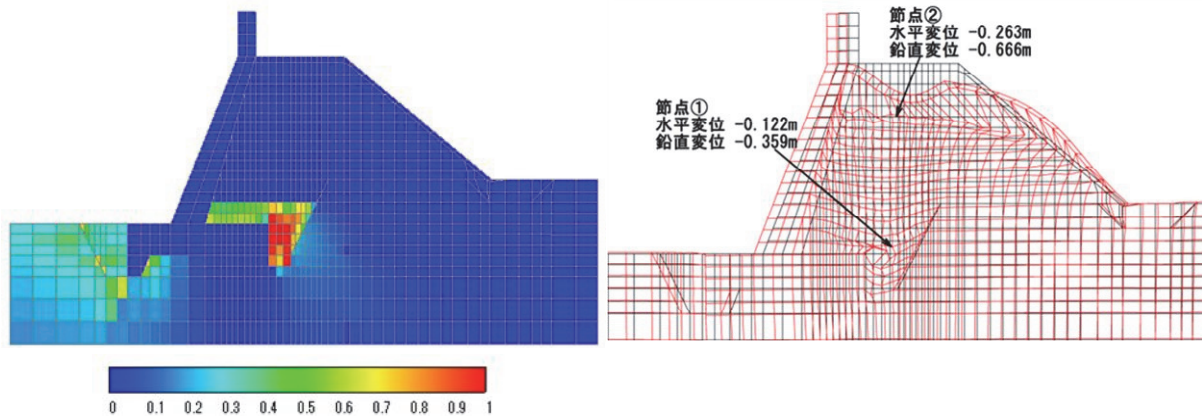


図-6 本震後の過剰間隙水圧比分布図(左)と残留変形図(右)

(2)補強土壁の津波作用に対する被災メカニズム

沿岸部は既存の市街地が密集した地域に新たに道路を敷設することが多く、狭隘な敷地に対して高台にアクセスするような道路盛土を構築しなければならないケースがしばしば生じる。補強土壁は、壁面を直立させて高盛土を構築することが可能であることから、敷地に制約がある箇所非常に有効となる。また、2011年東北地方太平洋沖地震において、沿岸部に敷設された補強土壁であっても、津波作用に対して全く被害が見られなかった事例が多数確認されている。そこで、補強土壁を模擬した室内模型実験(図-7、図-8)を実施し、補強土壁が津波作用によって損傷に至るメカニズムを考察した。模型実験は、壁面パネルが健全なケース、壁面パネルに隙間が生じたケース、壁面パネルに隙間が生じているが裏込め材の流出を防いだケースの3ケースに対して実施した(表-1)。模型実験の結果より、補強土壁は壁面パネルに隙間が生じ、裏込め材の流出に伴いながら補強土壁は崩壊に至ることを示した。また、壁面パネルに隙間が生じていたとしても、裏込め材が流出しない様な対策を施すことにより、健全時と同様補強土壁は安定した状態を保つことも明らかとなった。(図-9)。

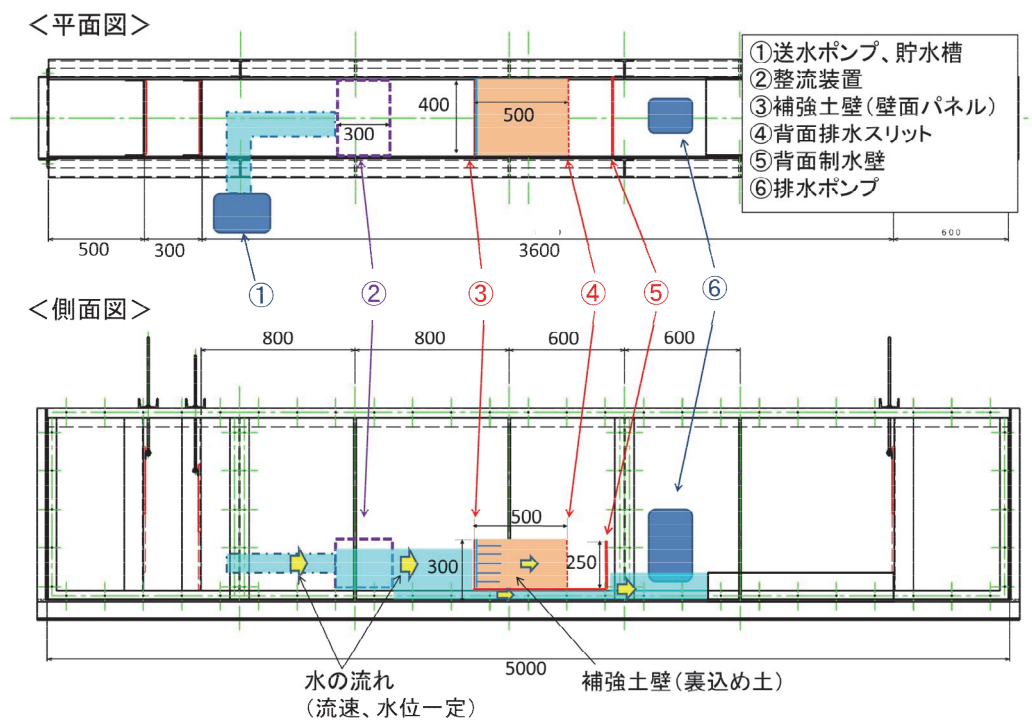


図-7 水槽模型実験装置概略図

(様式5) (Style5)

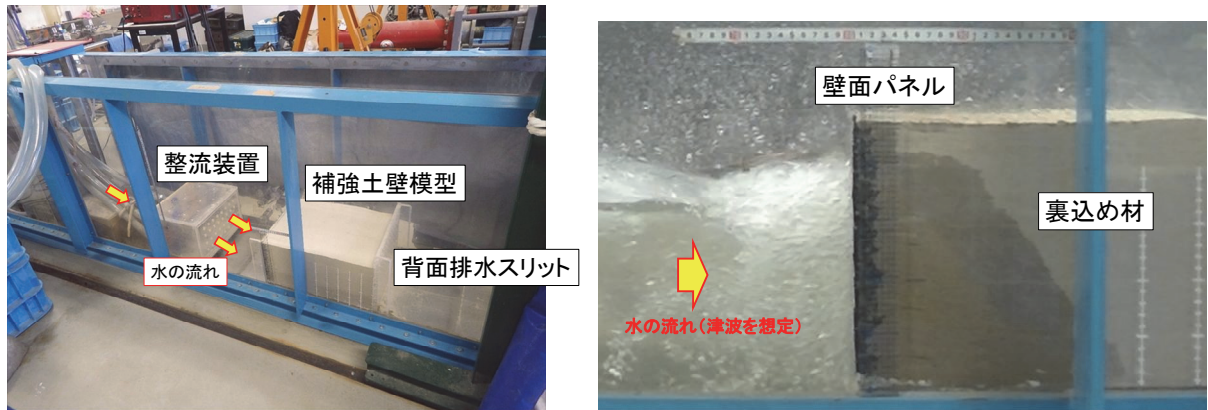
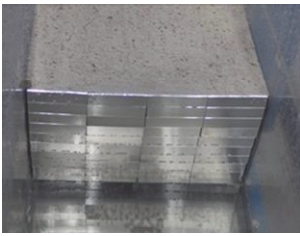




図-8 水槽模型実験装置外観および実験状況

表-1 実験ケース

実験ケース	パネルの隙間	裏込め土	壁面パネルの外観
1 健全な状態を再現	無し	砂質土(相対密度 $D_r=90\%$) 砕石	
2 壁面パネルが損傷し隙間が生じた条件	○	砂質土(相対密度 $D_r=90\%$) 砕石	
3 裏込め土の流出防止対策を施した条件	○	砂質土(相対密度 $D_r=90\%$) 砕石(流出防止)	

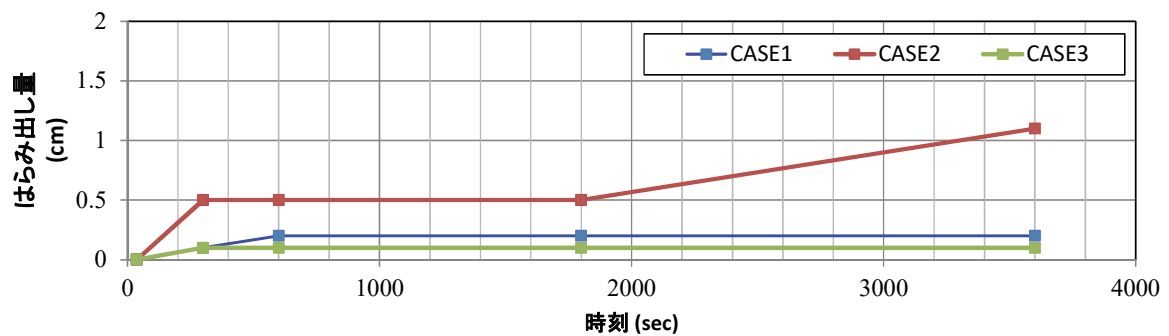


図-9 津波作用時間と壁面はらみ出し量の関係

3. 液状化と津波の複合災害に対する道路盛土の耐震性能評価手法の提案

既往の被害事例を対象とした一連の分析結果を踏まえ、沿岸部に敷設する道路盛土に着目して、液状化と津波の複合災害に対応した耐震性能評価法を提案した(図-10)。耐震性能は南海トラフ地震などの強い揺れと津波の来襲が想定される道路盛土について、地震後の津波避難と即時復旧に資する健全性を担保することを想定しており、従来のレベル2地震動に対して要求される復旧性の確保だけでなく、地震直後に道路通行機能の確保を目標としている。本手法の特徴は下記のとおりである。

まず、地震時の照査手法として、従来の代表断面を対象とした盛土横断方向に対する変形照査に加え、盛土縦断方向の沈下量を評価することとしており、被災リスクの高い横断構造物との接合部の段差量を合理的に求めることができる。基礎地盤の堆積状況が同一で盛土の被災モードが同一であると考えられる区間であれば、本手法を適用することにより、盛土横断方向の数値解析から求める従来法を補完し、盛土形状やボーリング調査結果から縦断方向の沈下量のある程度の精度で事前に推定できる(図-11)。

さらに、液状化地盤上に敷設する道路盛土の複合災害に対して、道路盛土に求められる機能を維持しながら、津波外力に対する物理的な損傷を防ぐ対応策をまとめた。従来の盛土構造物に見られる様な盛土表面への被覆により堤体への浸透を完全に遮断する必要はないこと、地盤の液状化や地震時の揺れを受けた場合であっても、堤体への浸透は許容するが盛土材の流出を防ぐような対策が効果的であることを述べた。

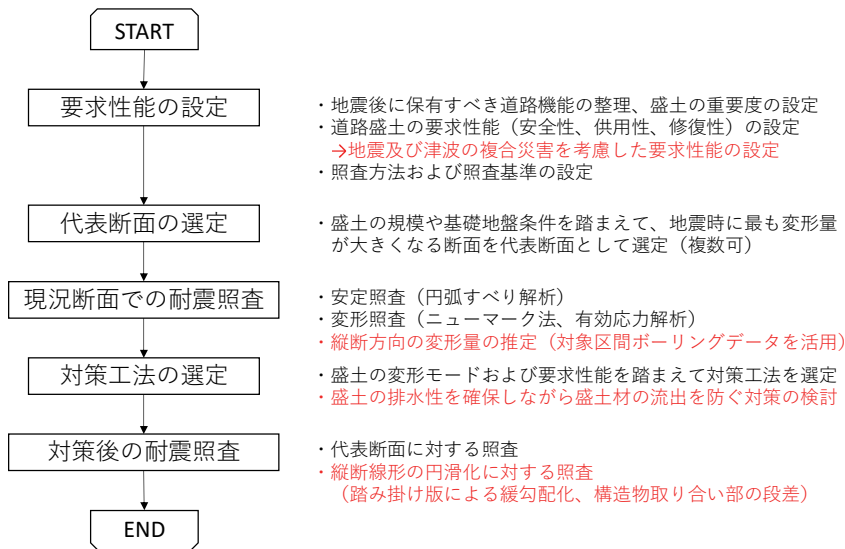


図-10 地震及び津波の複合災害に備えた盛土の耐震性能評価法のフロー

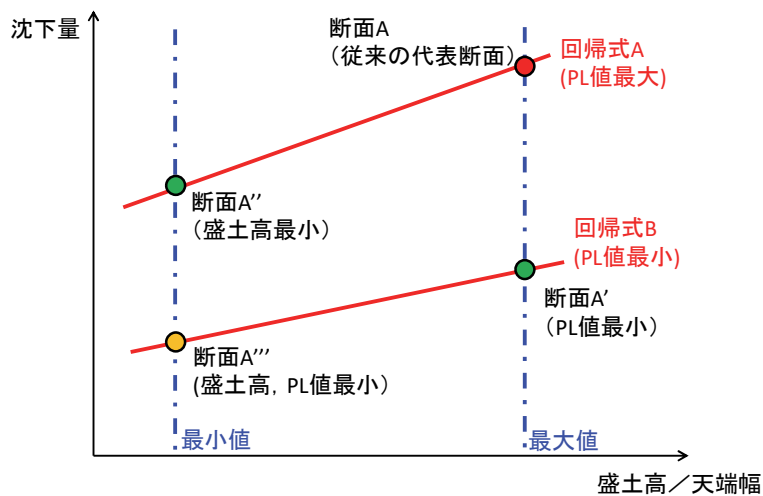


図-11 液状化地盤上の任意地点に対する盛土沈下量推定に用いる回帰式の概略