

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：82658

研究種目：若手研究B

研究期間：2010～2011

課題番号：22760362

研究課題名（和文）基礎地盤の液状化を考慮した液状化に伴う盛土の被害スクリーニング手法の開発

研究課題名（英文）Development of screening procedure for earthquake induced damage of embankment with considering effect of subsoil liquefaction

研究代表者

中島 進 (SUSUMU NAKAJIMA)

公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室 副主任研究員

研究者番号：20522478

研究成果の概要（和文）：地震による盛土の被害形態は、①基礎地盤の液状化による被害、②慣性力による盛土本体の被害に大別できる。本研究では、①の基礎地盤の液状化による被害を対象として、基礎地盤条件に着目した被害スクリーニング手法を提案することを目的とした。動的遠心模型実験ならびに過去の地震被害の分析により、微地形区分に応じて、単純に液状化層と表層の非液状化層の厚さをパラメータとすることで、基礎地盤の液状化による盛土の被害をスクリーニングできることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Earthquake induced damage of embankment could be divided into two patterns. One is the damage due to subsoil liquefaction and the other one is damage due to failure of embankment itself due to seismic inertia force. In this study, it is attempted to develop a screening procedure for former type of damages based on the results from dynamic centrifuge model tests and analyses of earthquake caused damage of embankment. It is found from the model test and analyses that the ratio of the thickness of liquefiable layer and not liquefiable layer could be effective indexes for the screening. As the end of this research, a screening procedure was proposed by using the ratio of the thickness of liquefiable layer to the not liquefiable layer, and settlement of embankment to the subsoil as the indexes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	900,000	0	900,000
総計	3,200,000	690,000	3,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 地盤工学

キーワード：地盤の挙動

## 1. 研究開始当初の背景

構造物の基礎地盤が地震時に液状化すると、液状化地盤の剛性、強度が喪失する為に上部構造物にはその種類に応じて、側方変形、沈下、段差、亀裂等の有害な残留変形が生じたり、1965年新潟地震の昭和大橋における落橋のように壊滅的な被害が生じることも

ある。本研究で対象とする盛土を例にとると、1995年の兵庫県南部地震では淀川河口付近の堤防が基礎地盤の液状化によって沈下（図-1）し、その後の降雨による高水時には河川水位が応急復旧した堤防天端付近まで上昇し、危うく越流が生じかける事態が生じた。このような被害を防ぐ為、特に1995年の兵

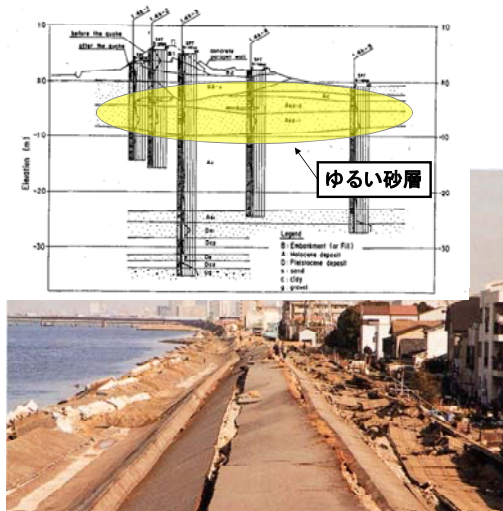


図-1 1995年兵庫県南部地震における淀川河川堤防の被害

兵庫県南部地震以降はほぼ全ての構造物に対して、地震時に液状化発生の有無を判定し、仮に液状化が生じると判定された土層が存在する場合には、その影響を考慮して設計を行う事になっている。

国内外を問わず液状化判定手法では過去の事例にもとづき、対象地盤における液状化発生の有無を判断している。一方で近年では、設計地震動の大きさが増大する傾向にあり、単純に液状化判定を行うと、地中深くでも液状化が生じる、或いは液状化層が多層にわたると判定される場合が少なくない。

新潟地震以降活発化した研究の成果により液状化した土の変形特性は、試験装置の高度化にも助けられて明らかになりつつある。しかし、例えば地中15m以深に存在する液状化層が上部構造物に及ぼす影響は、地表面付近に存在する液状化層と比較して限定的であり、液状化発生の有無だけではなく基礎地盤の土層構成に応じて液状化の影響をより詳細に評価する必要がある。

このような視点で液状化の危険度を評価する指標の一つとして、液状化安全率と液状化層厚から求める液状化危険度PLがあるが、表層に存在する非液状化層の影響等は考慮できず、実際の被害との相関関係も必ずしも明瞭ではない。また、盛土や堤防などは洗浄構造物であるため、効率的に耐震診断を行うためには、簡易な指標でスクリーニングを図ることも重要である。

以上を背景として、本研究では基礎地盤条件に着目した液状化による盛土被害のスクリーニング手法の開発を目的とした。

## 2. 研究の目的

地震による盛土の被害の原因は、基礎地盤

の液状化に起因する場合と、地震時の慣性力により盛土本体にすべり破壊などが生じる場合との二通りに大別できる。本研究では、前述の背景を踏まえて、前者の基礎地盤の液状化に起因する盛土の被害スクリーニング手法の開発を目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、過去の地震被害事例を収集し、基礎地盤条件と被害の程度との関係として整理することで、液状化による被害程度に感度の高いパラメータをスクリーニングの指標として抽出する。そして、抽出した指標を変化させた動的遠心模型実験を実施し、被害程度とスクリーニング指標との相関性を確認する。また、パラメータスタディとして解析的な検討を行うことで、スクリーニング指標の妥当性についても検証する。最終的には、数値解析を必要としない簡易な指標による盛土の被害スクリーニング手法を提案する。

## 4. 研究成果

### (1) 事例分析

過去の大地震を対象とした事例分析を行った。表-1に対象とした地震をまとめる。同表は、過去の大地震における堤防の被害事例を集約した文献<sup>1)</sup>をもとにしたものであり、地震による沈下量が計測してあり、かつ堤防縦断方向の基礎地盤情報(土層区分、層厚)が得られているデータを選定した。さらに、データを追加するために学協会誌<sup>(例えば<sup>2)</sup>)</sup>や、公的機関の地震被害報告書<sup>(例えば<sup>3)</sup>)</sup>も併せて参考とした。

過去の地震被害の分析<sup>4)</sup>より、液状化の発生地点と微地形区分が強い相関関係を示すことが明らかになっている。これを参考にして、本研究では微地形区分と液状化層厚、非液状化層厚との関係を用いて被害規模を区分することを試みた。

表-1 調査対象地震

地震名	対象河川	検討区間	
		左岸	距離標
北海道西方沖	後志利別川	右岸	0.2k~5.0k
		右岸	1.4k~5.4k
兵庫県南部地震	淀川	左岸	3.5k~5.6k
		右岸	0.0k~7.0k
宮城県北部地震	鳴瀬川	左岸	0.8k~7.0k
十勝沖地震	十勝川	左岸	7.0k~17.0k
新潟県中越地震	信濃川	左岸	0.0k~8.0k
		右岸	-1.0k~4.0k
新潟県中越沖地震	信濃川	左岸	

図-2は収集した事例の範囲内での治水地形分類図における微地形区分と堤防の沈下量との関係である。干拓地や高い盛土値および旧河道で大きな沈下が生じている。これらの地形では、堆積年代が新しく、砂やシルトなどの液状化しやすい砂が緩く堆積したために地震による被害が顕著になるものと推測

され、近年の大地震では特に河川堤防において被害が顕著である。また、氾濫平野および自然堤防において1 m以上の沈下量が記録されている箇所があるが、これは1978年の宮城県沖地震での被害事例で、地下水水位以下に沈下した堤体部の液状化による被害事例である。

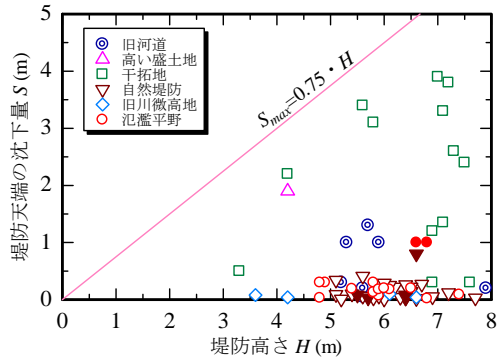


図-2 微地形区分と堤防の沈下量の関係

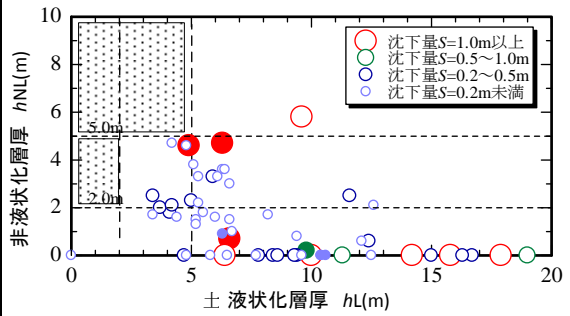
文献 4) では、微地形区分と液状化発生との関係をまとめている。本検討では、これらの事例を踏まえつつ地形区分と液状化による地震被害の可能性を表-2の通りにまとめた。ここでまとめた危険度ランクに基づき、液状化層厚  $h_L$  と表層の非液状化層厚  $h_{NL}$  および沈下量の関係をまとめた結果が図-3である。なお、同図は文献 1) のデータに文献 2)、3) の値を加筆したものである。

表-2 地形区分と液状化発生の可能性との関係

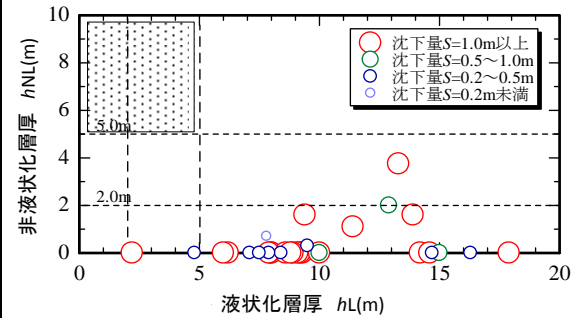
危険度ランク	治水地形分類による地形区分
A(極大)	旧河道、落掘、旧落掘、高い盛土地、干拓地、砂丘
B(大)	自然堤防、旧川微高地、氾濫平野、湿地、旧湿地
C(小)	扇状地、浅い谷
D(なし)	山地、丘陵地、大地、崖

表-3は図-3に基づいて  $h_L$ 、 $h_{NL}$ =2m、5mを区分とする土層構成の組合せの範囲における堤防の沈下量の最大値を示したものである。ここで、液状化層の定義としては、液状化判定を行わずに簡易に評価できること並びに安全側の設定となることを意図して、N値30未満の礫質土または砂質土とした。また、非液状化層厚は、粘性土またはN値30以上の礫質土または砂質土とした。なお、非液状化層厚の評価としては、最も地表面に近い液状化層より浅い非液状化層の厚さと定義し、液状化層厚は基礎地盤以深20mの範囲における液状化層の厚さの合計とした。

事例が無い範囲も存在するが、液状化層の定義に安全側の設定が介入することを考慮すると、表中の網掛けした範囲では、堤防の沈下がほとんど生じておらず、液状化層と非液状化層の厚さを指標として盛土・堤防の被



(a) 危険度ランク A



(b) 危険度ランク B

図-3 危険度ランク・液状化層厚・非液状化層厚と沈下量の分布図

表-3 危険度ランクと地層構成に応じた最大沈下量

(a) 危険度ランク A

		非液状化層厚		
		$h_{NL} < 2m$	$2m < h_{NL} < 5m$	$5m < h_{NL}$
液状化層厚 $h_L$	$h_L < 2m$	事例なし	事例なし	事例なし
	$2m < h_L < 5m$	1.3m	事例なし	0m
	$5m < h_L$	3.9m	1.2m	—

(b) 危険度ランク B

		非液状化層厚		
		$h_{NL} < 2m$	$2m < h_{NL} < 5m$	$5m < h_{NL}$
液状化層厚 $h_L$	$h_L < 2m$	0.03m	0m	0m
	$2m < h_L < 5m$	1.3m	事例なし	0m
	$5m < h_L$	3.9m	1.2m	—

害スクリーニングが可能であることが示唆される。

## (2) 動的遠心模型実験

(1)の分析により、盛土の沈下に及ぼす地形区分と液状化層厚、表層の非液状化層厚の影響が顕著であることが分かった。そこで、液状化層厚、表層非液状化層厚を変化させた動的遠心模型実験を行うことにより、これらの因子のスクリーニング手法としての適用性を検証した。以下ではその概要を述べる。なお、本研究で実施した動的遠心模型実験は、(独)土木研究所の大型遠心力載荷試験装置を用いて行った。

図-5に実験模型の概要を示す。実施した動的遠心模型実験では、300 mmの基礎地盤上に



高さ120mmの盛土模型を構築した。遠心力50Gのもとで加振実験を実施したため、高さ6mの盛土が15mの基礎地盤上に築堤された条件に相当する。盛土模型は江戸崎砂を最適含水比における締固め度90%に締め固めて構築した。基礎地盤は東北砂7号を用いて空中落下法により $D_r=60\%$ で作製した。基礎地盤の飽和は粘性を水の50倍に調整したメチルセルロース水溶液にて行った。実験では基礎地盤中の水位を変化させることで液状化層と表層非液状化層の厚さを変化させた。実験ケース数の関係から、CASE1から4においては、土槽中央部に隔壁を設置して2ケースの模型について、同時に加振を行った。また、CASE5ではCASE2と同様の地盤条件の実験を全断面にて実施した。加振はいずれのケースにおいても実物大換算値として振幅600galの正弦波20波(1Hz)を用いて加振を行った。表-4に実験条件および加振後の盛土のり肩における残留沈下量をまとめる。

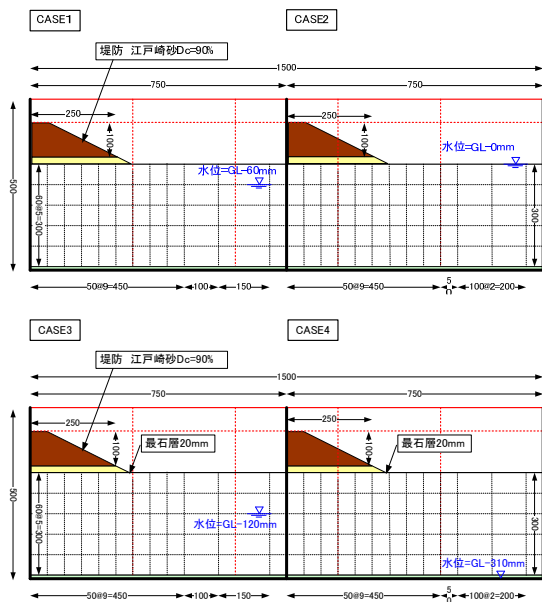


図-5 実験模型の概要 (単位: mm)

表-4 実験条件および残留沈下量

CASE名	液状化層厚 $h_L$ (m)	非液状化層厚 $h_{NL}$ (m)	残留沈下量(m)
1	12	3	3.4
2	15	0	4
3	9	6	2.8
4	0	15	2.3
5	15	0	0.9

図-6に加振後の模型形状を示す。土槽の幅が狭いため、一部変形を拘束している傾向は確認できるものの、非液状化層の存在により、Case2と比較すると、Case1では堤防の変形が減少している傾向が確認できる。定量的にも、表-4に残留沈下量を示すように、非液状化層 $h_{NL}$ が厚いほど、液状化層厚 $h_L$ が薄いほ

どに沈下量が小さくなっている傾向が確認できる。Case1からCase4では盛土模型と剛壁とが接しているために、いわゆる壁たたきの現象が生じているが、Case2を全断面で実施したCase5では、盛土の沈下量は0.9mであった。このように、本実験で計測したのり肩の沈下量については、剛壁・土槽の応答の影響が含まれるものの、非液状化層と液状化層厚の関係という観点に立つと、(1)の事例分析で得られた傾向と同様に、堤防の沈下量と液状化層厚と非液状化層厚との間に相関が確認できた。

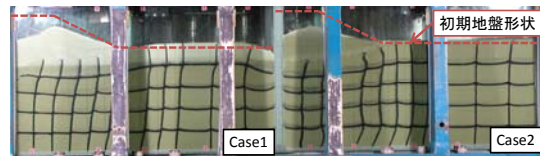


図-6 加振後の模型形状

### (3) 東北地方太平洋沖地震における被害

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(モーメントマグニチュード $M_w=9.0$ )においては、多数の盛土・堤防が被害を受けた。このうち、河川堤防については直轄管理区間において2115箇所、都道府県管理区間において1127箇所にて被害が確認されている<sup>5)</sup>。同地震においては軟弱な粘性土地盤上に構築された堤防について、粘土地盤にめり込むように沈下した堤体部が液状化して顕著な被害を及ぼしたことが報告されている(図-7)。本スクリーニング手法で検討してきた非液状化層の中には、図-7に示す粘性土も含まれる可能性がある。このため、(4)にて提案するスクリーニング手法においては、液状化層厚、非液状化層厚に加えて、堤体直下の地盤が軟弱な粘性土地盤であるかどうかを評価指標に加えることとした。

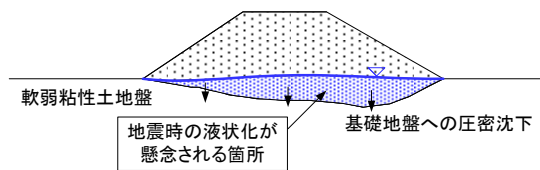


図-7 東北地方太平洋沖地震における堤防の被害形態の模式図

### (4) 提案するスクリーニング手法

事例分析、動的遠心模型実験の結果をもとに提案した被害スクリーニング手法は図-8の通りである。

まず、①盛土基礎地盤に軟弱な粘性土が存在するか否かを判定する。次に②微地形区分より盛土直下地盤の危険度ランクを評価し、最後に③液状化層厚と非液状化層厚の関係

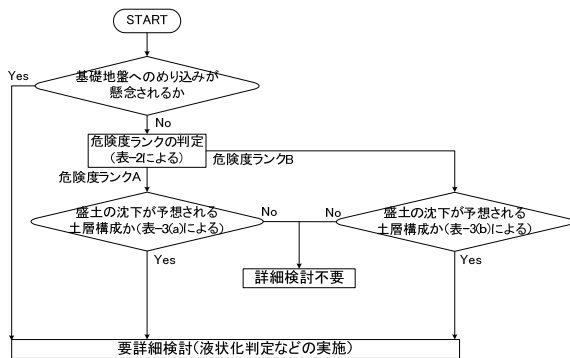


図-8 提案するスクリーニングのフロー図

から表-3 を用いて盛土に沈下の可能性があるかどうかを評価する。以上の検討により、詳細検討が不要と判断された箇所については、基礎地盤の液状化によって盛土に被害が発生する可能性は低いと判断し、液状化時の検討を省略できる。

#### (6) まとめ

動的遠心模型実験ならびに過去の地震被害の分析により、微地形区分に応じて、単純に液状化層と表層の非液状化層の厚さをパラメータとすることで、基礎地盤の液状化による盛土の被害をスクリーニングできることが分かった。さらに、東北地方太平洋沖地震における被害事例を反映して、基礎地盤への堤体のめり込みが懸念されるか否かも指標として加えたスクリーニング手法を提案した。

#### (6) 参考文献

- 1) 中田芳貴, 谷本俊輔, 中島進, 佐々木哲也, 服部敦, 福原直樹, 落合清治: 堤防の地震被害と基礎地盤条件の関係に関する分析、第 46 回地盤工学研究発表会平成 23 年度発表講演集,
- 2) 松尾修, 渡辺健治: 構造物の耐震性診断と対策 2. 地震による父構造物の被災形態, 地盤工学会誌, Vol. 59, No. 4, pp. 39-45
- 3) 土木研究所: 土木研究所報告 第 194 号 1993 年北海道南西沖地震災害調査報告, 1994
- 4) 国土庁防災局震災対策会議: 液状化地域ゾーニングマニュアル(平成 10 年度版), 1999
- 5) 土木研究所、国土技術政策総合研究所: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、土木研究所資料、第 4202 号、2011.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

中田芳貴, 谷本俊輔, 中島進, 佐々木哲也, 服

部敦, 福原直樹, 落合清治: 堤防の地震被害と基礎地盤条件の関係に関する分析、第 46 回地盤工学研究発表会平成 23 年度発表講演集

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中島 進 (SUSUMU NAKAJIMA)

公益鉄道総合技術研究所、構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

研究者番号: 20522478