

効果的、効率的な耐震対策手法(工法)と 耐震照査及び対策の促進

東日本大震災における堤防被災の特徴

1. 河川堤防の被災が多数、広範囲に発生
 (照査対象外の区間において多数の被災が発生)

緊急復旧に時間を要した

2. 大規模な被災の原因は液状化

1-1. これまでの地震と比較して、かなり長い継続時間を記録した地震動が多数の液状化被害を発生させた

1-2. 従来から想定されている基礎地盤の液状化によるものも多数発生

1-3. これまで照査・対策の対象としてこなかった堤体の部分液状化による被災も多数発生

従来からの耐震点検、耐震対策の課題

耐震点検、耐震対策には大きな費用を要する

- ・照査 53%実施済(対象1,570kmのうち830km照査済み、照査済み830kmのうち80kmが要対策区間)

- ・対策 L1対策としては約5割程度(延長約170km)実施、L2対策は未実施

今後の検討事項

① 今回の地震動の特徴

② 現状の耐震照査及び設計の改善

- 耐震性能の照査の基本(照査において考慮する外水位の問題)

- 耐震性能の照査方法の妥当性

- 堤体の部分液状化に対する照査方法(液状化判定及び照査における地下水位設定の妥当性)

③ 効果的、効率的な耐震対策手法(工法)

- 耐震対策実施個所における被災状況

- 堤防強化工法と耐震対策工法との関係

④ 耐震照査及び対策の促進

⑤ 被災堤防及び暫定復旧堤防の安全性

: 本資料で説明している箇所

1. 効果的、効率的な耐震対策手法(工法)

1-1. 地震被害箇所の反復性

1-2. 災害復旧箇所(地盤改良箇所)における耐震効果

1-3. レベル1耐震対策箇所における耐震効果

1-4. 堤防浸透対策工実施箇所における耐震効果

2. 耐震照査及び対策の促進

耐震性能照査の効率的手順の考え方(スクリーニング手法の妥当性の確認)

1-1. 地震被災箇所への回復性

1-2. 災害復旧箇所(地盤改良箇所)における耐震効果


1-3. レベル1 耐震対策箇所における耐震効果

1-4. 堤防浸透対策工実施箇所における耐震効果

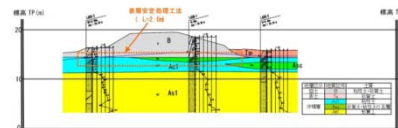
1-1. 地震被災箇所への反復性 —信濃川の場合—

・S39新潟地震で被災した区間において原型復旧箇所は、その後の地震で再度災害を生じている。

本与板地区
S39被災なし。H16年被災により、地盤改良を実施。H19年被災なし。 再度災害なし



4k+400m付近の堤体天端変状状況(下流側より望む)




再度災害なし

再度災害なし


H16年被災写真

H16年復旧図面

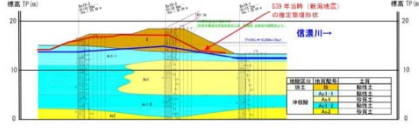
町軽井地区
S39年被災により原型復旧。H16年被災なし。H19年被災。(その後地盤改良を実施。) 再度災害あり



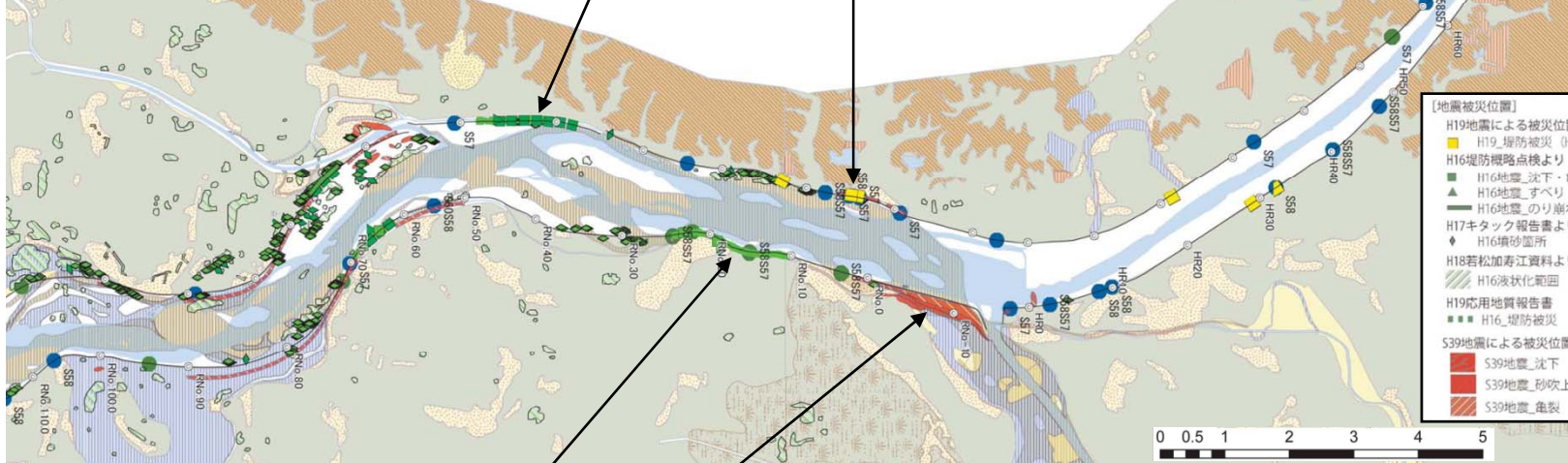
町軽井・写真①(堤防天端)



町軽井・写真②(堤防天端)




H19年復旧断面図



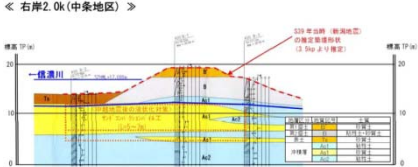
【地震被災位置】

- H19地震による被災位置
 - H19 堤防被災 (H19応用地質報告書)
 - H16堤防橋脚点検より
 - H16地震 沈下・亀裂・その他
 - H16地震 すべり
 - H16地震 のり崩れ・すべり
 - H17キタック報告書より
 - H16填砂箇所
 - H18若松加寿江資料より
 - H16液状化範囲
- H19応用地質報告書
 - H16 堤防被災
- S39地震による被災位置
 - S39地震 沈下
 - S39地震 砂吹上
 - S39地震 亀裂

中条地区
S39被災あり。H16年被災により、地盤改良を実施。H19年被災なし。 再度災害なし




H16年被災写真




H16年復旧図面

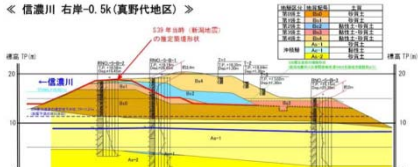
真野代地区
S39年被災により原型復旧。平成の初めに断面拡大。H16年、H19年被災なし。 再度災害なし



真野代:写真①(堤防天端)



真野代:写真③(川裏のり戻)



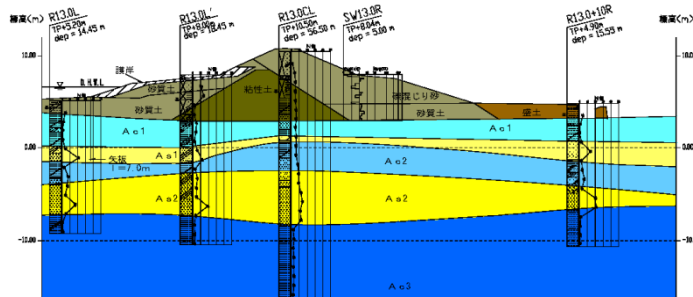
断面図

出典)「信濃川堤防詳細調査及び地質関係資料とりまとめ業務委託報告書」平成22年3月 財団法人国土技術研究センター
「管内液状化調査等業務委託報告書」平成20年3月 応用地質株式会社
背景図:「治水地形分類図」昭和51年発行 国土地理院 より

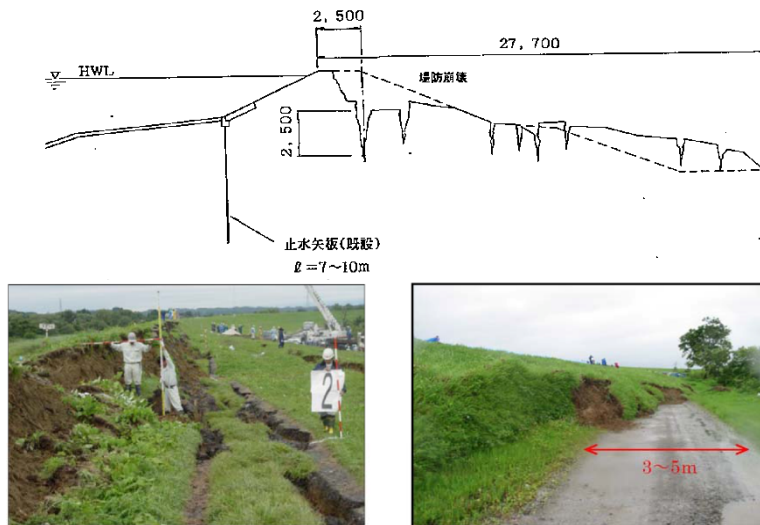
堤体基盤に浅層改良を施した箇所の事例（鳴瀬川右岸 12.9k+60m～13.1k+94m【木間塚地区】）

- ・鳴瀬川においては、H15の宮城県北部地震によって堤体に大規模な被災を発生し、再度災害防止のため、耐震対策として堤体直下の地盤改良を実施している。
- ・今回の地震による大規模被災は、地盤改良実施箇所では発生していない。

○地質横断面図



○H15宮城県北部地震による被害状況



H15地震後の被災状況(天端沈下・亀裂) H15地震後の被災状況(川裏法尻の水平変位)

○今回の地震による同箇所の状況

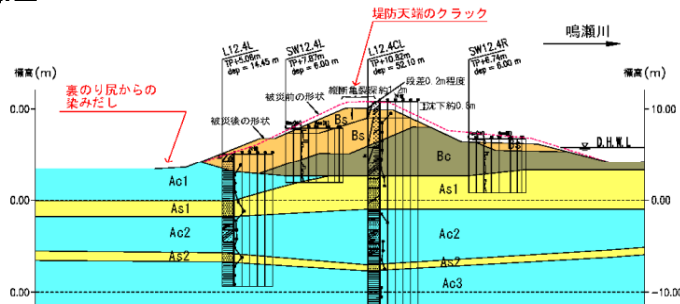


今回の地震後の状況(対策工部に変状なし)

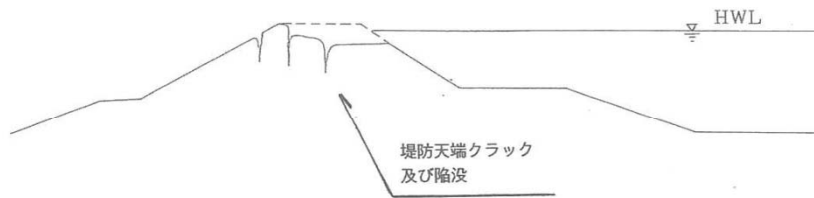
堤体基盤に浅層改良を施した箇所の事例(鳴瀬川左岸 12.1k+80m~12.5k【砂山地区】)

- ・鳴瀬川においては、H15の宮城県北部地震によって堤体に大規模な被災を発生し、再度災害防止のため、耐震対策として堤体直下の地盤改良を実施している。
- ・今回の地震による大規模被災は、地盤改良実施箇所では発生していない。

○地質横断面図



○H15宮城県北部地震による被害状況

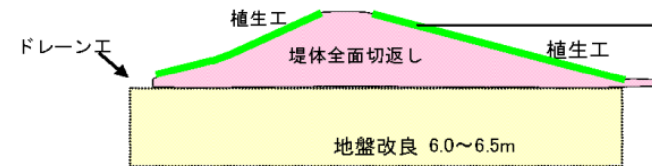


H15地震後の被災状況(天端縦断亀)



H15地震後の被災状況(川裏尻からの染出)

○今回の地震による同箇所の状況



今回の地震後の状況(対策工部に変状なし)

L1耐震対策(グラベルドレーン)を施した箇所の事例(利根川右岸 27.0k~28.0k 付近)

- ・利根川右岸27.0k+80m~27.0k+150mの被災形態は、堤防が天端から表のりに向け3m陥没。(左) 一方、直上流の27.75k~50m~28.0k-1012mは、耐震対策(レベル1)としてグラベルドレーン(直径500mm、深さ8.5m、1mピッチ)がのり尻付近に施工されており、今回地震による大規模な被災は発生していない。(右)。
- ・引き続き、既設の耐震対策工の堤防変形抑制効果の評価検討を行い、効果的・効率的な耐震対策に資する。

①大規模被災箇所:利根川右岸27.0k+80m~27.0k+150m

○平面図



○断面図

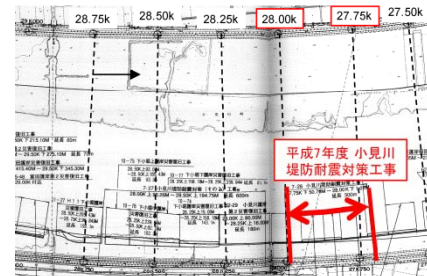


○状況写真

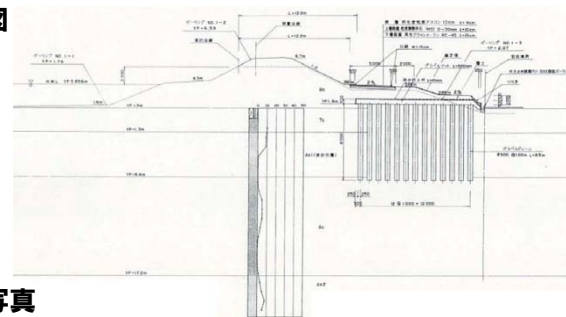


②L1耐震対策箇所:利根川右岸27.75k~50m~28.0k-1012m

○平面図



○断面図



○状況写真



被災なし

1-4-① 浸透対策・侵食対策工実施箇所における被災状況の評価

1-4-② ドレーンにおける被災状況の評価と耐震対策としての効果

1-4-③ 施工法の改良による耐震性強化対策

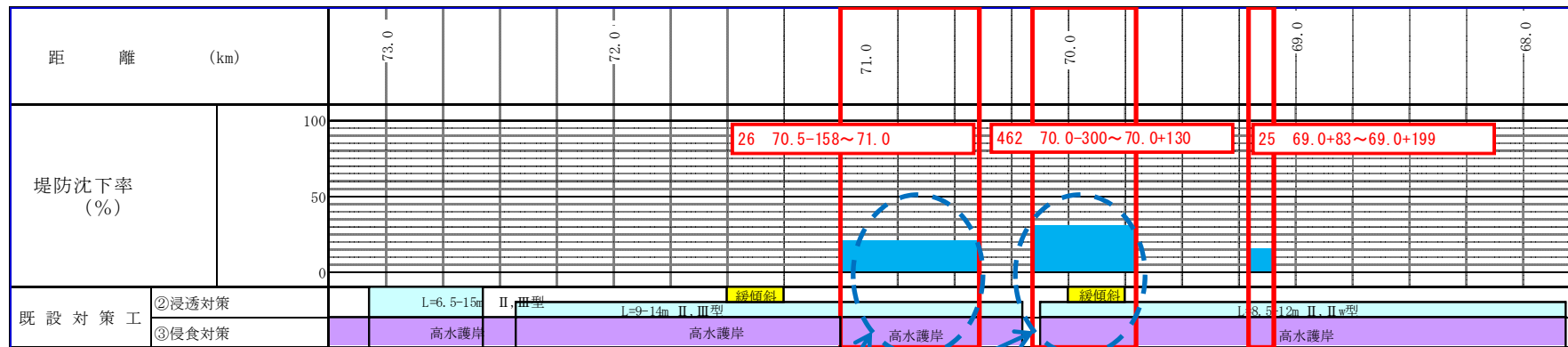
1-4-① 浸透対策・侵食対策工実施箇所における被災状況の評価

資料—6

- ・利根川下流(-1.0k~88.0k区間)において、旧河道や落堀等の要注意地形箇所を対象として、遮水矢板(浸透対策工法)、高水護岸(侵食対策)施工区間における、無被災、大規模被災、及び中規模被災の延長について集計を行った。
- ・各対策工とも、対策が施されていることで被災が軽減されるとは言い難いものの、遮水矢板では大規模被災がなく、無災害が若干多い傾向である。

	施工区間 (m)	上段:延長(m)、下段:施工区間に占める割合		
		無被災	大規模被災	中規模被災
矢板	4,325	3,195 73.9%	0 0.0%	1,130 26.1%
高水護岸	6,765	4,497 66.5%	660 9.8%	1,608 23.8%
堤防全体	51,184	34,106 66.6%	1,264 2.5%	15,814 30.9%

○利根川(68k~73k)における被災箇所と浸透・侵食対策工の比較図(赤枠は大規模被災箇所)

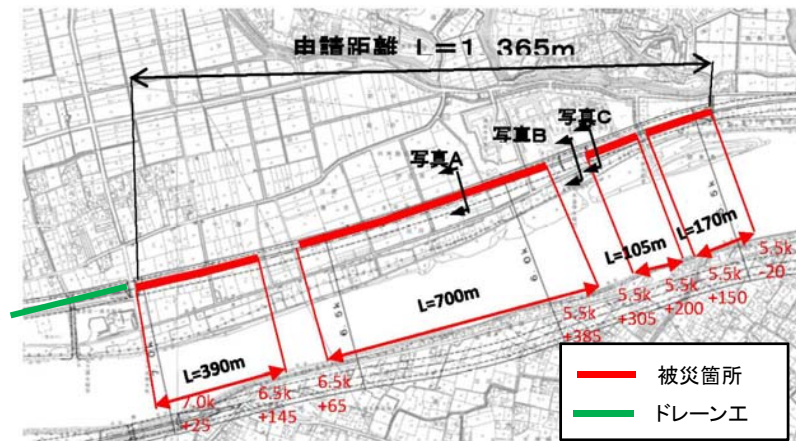


引き続き、浸透・侵食対策工施工箇所における、沈下率等について調査を行い、浸透対策工の実施による沈下低減効果について評価し、効果的・効率的な耐震対策手法に資する。

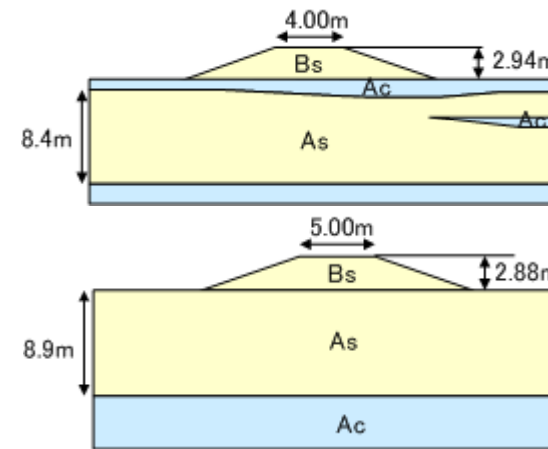
ドレーンの有無が被災に影響を及ぼしたと考えられる事例（那珂川左岸 5.5k+20m～7.0k+25m）

- ・今回の地震にて、ドレーン施工区間直下流の5.5k付近～7.0k付近で堤防の亀裂等の大規模被災が発生した。
- ・那珂川左岸7.0k～8.75kにはドレーンが施工されている。
- ・近接しており、堤体構造もほぼ同様であるが、ドレーン施工箇所は本地震による被災がなかった。
- ・引き続き、浸透対策工の堤防変形抑制効果の評価検討を行い、効果的・効率的な耐震対策に資する。

○被災箇所平面図



○被災箇所の横断構造(7.0k)(上)と、無被災箇所の横断構造(8.0k)(下)

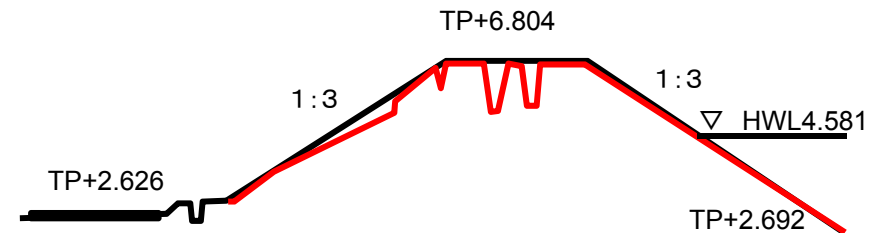


※出典：堤防詳細点検における調査結果より

○東北太平洋沖地震による被害状況



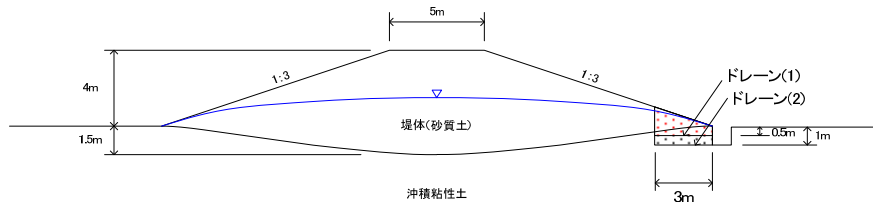
○被災断面：堤防法面亀裂（亀裂：幅100cm、深さ100cm）



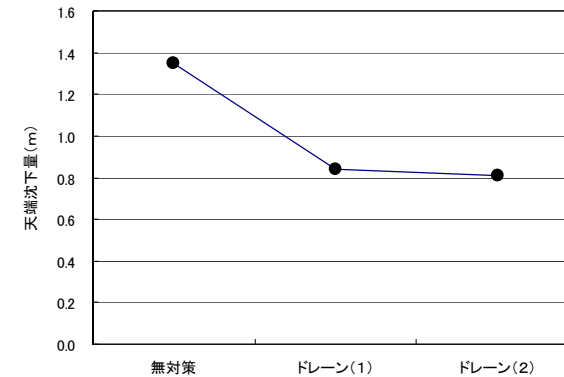
堤体内液状化に対するドレーンの効果に関する試算

- ・堤体内液状化による被災箇所での対策工として、法尻部ドレーンを設置した場合の沈下抑制効果について試算を行った結果を示す。
- ・降雨量を0.5mm/hrとして、無対策、ドレーン2種(敷高GL-0.5m、GL-1.0m)の3ケースについて浸透流計算(定常計算)を実施した結果を初期水位条件として与え、地震動をタイプI、300galを与え、ALIDによって沈下計算を実施。
- ・ドレーンを施工した場合、堤体内地下水位の低下による沈下抑制効果が確認された。
(無対策時沈下量1.4m → ドレーン施工時沈下量0.8m)

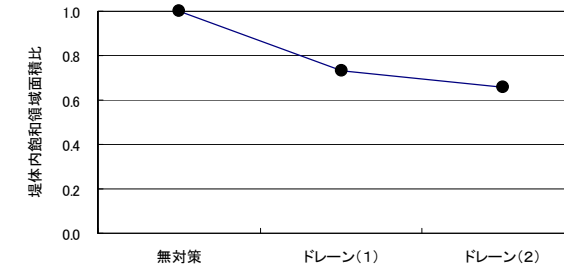
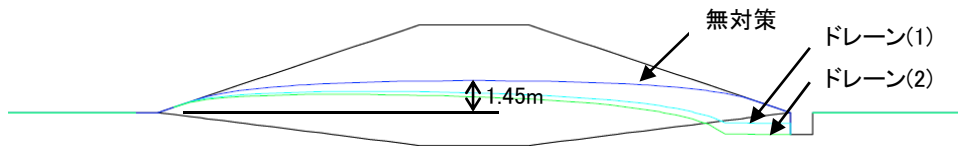
○解析モデル



○今回の地震による同箇所の状況



○ドレーンの水位低下効果に関する試算



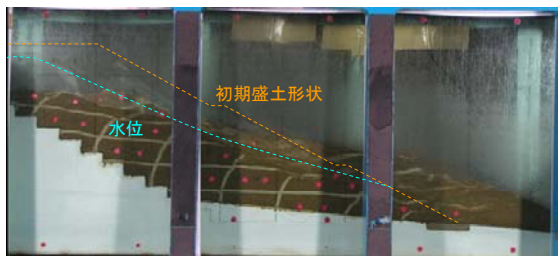
土層区分	単位 ^{※1} 体積重量 γ_c (kN/m^3)	平均N値 ^{※2} N	原位置有効 上載荷重 σ_v (kN/m^2)	変形係数 ^{※3} E (kN/m^2)	初期 ^{※4} ポアソン比 ν_0	地震前の ^{※5} せん断剛性 G_0 (kN/m^2)	地震後の ^{※6} せん断剛性 G_1 (kN/m^2)	相対密度 ^{※7} Dr (%)	液状化強度 ^{※8} R_{L20}
B	18.00	5.0	22.50	14000	0.333	5300	133	—	—
Bs(地下水以深)	18.00	5.0	57.00	14000	0.333	5300	133	42.0	0.18
Ac	16.00	2.0	76.50	5600	0.333	2100	2100	—	—
ドレーン	20.00	50.0	—	140000	0.333	52500	52500	—	—

※1 一般的な値とした。
 ※2 B層はN=5、粘性土はN=2と仮定した。
 ※3 $E=2800(\text{kN/m}^2)$ を基に設定した。
 ※4 地震前のポアソン比は、一律0.333とした。
 ※5 $G_0=E/(2(1+\nu_0))$ を基に設定した。
 ※6 液状化層より上部の非液状化層については、引張応力が発生しないような値を試行錯誤により設定した。堤体内水位がある場合には、無い場合と同程度の値(1/40)を採用した。液状化層は、 F_L 、 R_{L20} の関係から、プログラム内で液状化層の全ての要素に対して自動的に計算した。
 ※7 $21\{N \times 100 / (\sigma_v + 70)\}^{0.5}$ (Meyerhofの式)を用いて設定した。
 ※8 N値、 F_c および上載荷重から求めたRLの層毎の平均値とした。

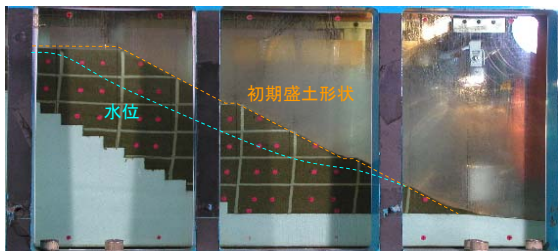
盛土の締固め効果(既往の遠心実験より)

・盛土をよく締め固めることにより、液状化強度が増加し、耐震性が格段に向上することが確認される。

盛土高15mの傾斜地盤上の盛土を対象に、50Gの遠心場で盛土内に水を浸透させた状態でレベル2（タイプII）地震動を入力

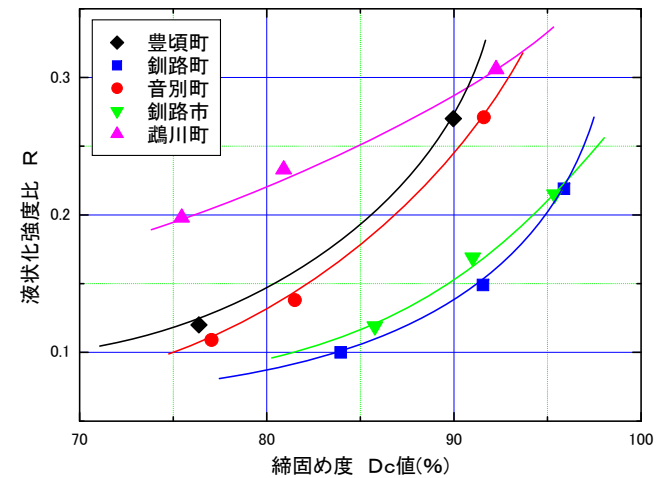
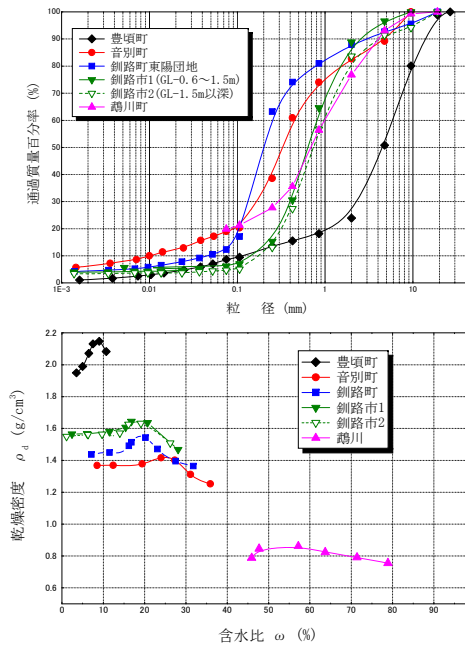


Dc=82%



Dc=90%

盛土をよく締め固めることで、耐震性は格段に向上する。



- ・締固め度の増加に伴い、液状化強度は増加する。
- ・「下水道施設の耐震対策指針と解説」（日本下水道協会）によると埋戻し土の液状化対策として、埋戻し土の締固め度を90%以上としている。
- ・今後は、種々の土質材料でこの関係を把握し、データの充実を図る必要がある。

※)土木研究所作成資料より引用

耐震照査及び対策の促進について（今回の堤防被災の特徴から）

① 今回の地震による堤防被災の特徴

- ・広域・多数にわたる堤防の被災。
- ・レベル1耐震対策箇所や再度災害防止対策を施した箇所での被害が少ない。

② 耐震照査及び対策の促進（耐震照査）

- ・耐震照査指針における変形解析は高額であり検討も時間が掛かる。ゆえに、広域・多数すべての堤防について高水準で耐震照査を行うことは、非常に不経済であり効率的でない。
- ・そこで、高水準で行うべき箇所を段階的に絞り込み（スクリーニング）、効率的かつ効果的な耐震照査の促進に繋がるものとする。
- ・段階的な絞り込み（スクリーニング）は、「レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル（案）・同解説 平成22年11月 河川局治水課」に準じて実施することを考えている。

③ 耐震照査及び対策の促進（耐震対策）

- ・耐震対策整備の優先度の考え方を提示することで、効果的に対策が促進できると考える（次回以降の検討会にて説明予定）。

耐震性能照査におけるスクリーニング手法の妥当性の確認

レベル2耐震点検マニュアルの位置付けおよび概要

1) 位置付け

盛土による堤防のレベル2地震動に対する耐震点検に適用。

2) 耐震点検の概要(手順)

一連の堤防の中から地震に対する危険箇所を的確に抽出し、さらにその中から代表となる断面を適切に選定することが重要である。

ゆえに、本マニュアルは、概略の情報に基づいて除々に危険箇所を絞り込み、作業段階が進むにつれてより詳細なデータを用いていくことで、効率的に点検を行うことができるよう、一次～三次点検に分けて実施することを標準としている。

1次点検: 既往の地震による堤防天端の最大沈下量が許容沈下量を上回らないことを照査する。

2次点検: ①地形条件及び基礎地盤の条件による判定、②土層構成による判定、③簡易式による判定にて耐震性能が満足することを照査する。

3次点検: 静的照査法により、堤防天端の沈下量が許容沈下量を上回らないことを照査する。

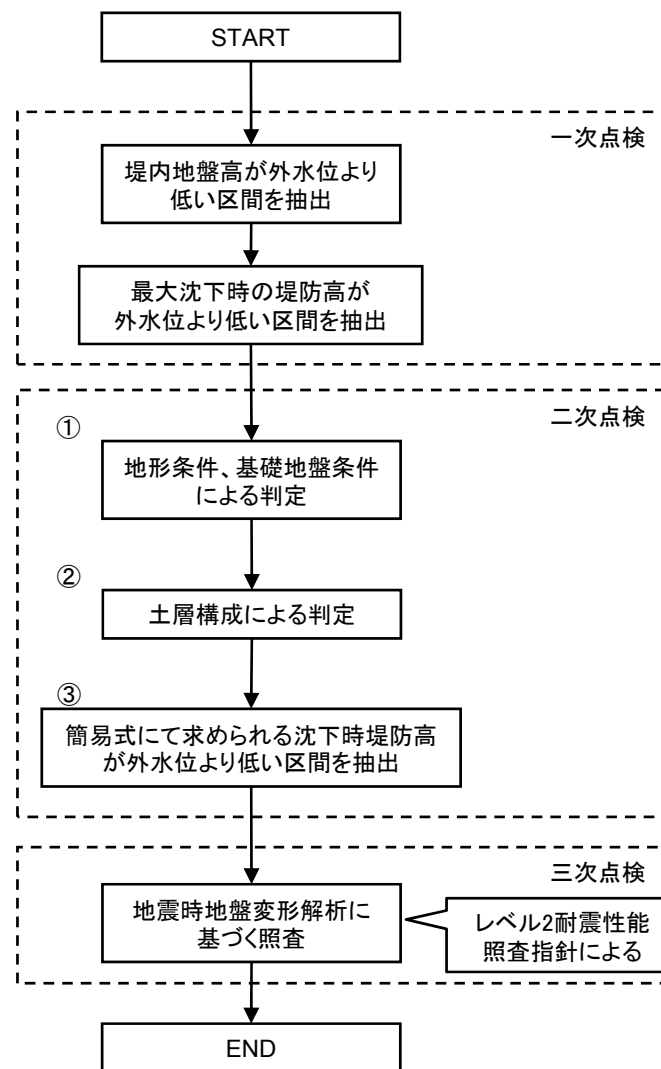
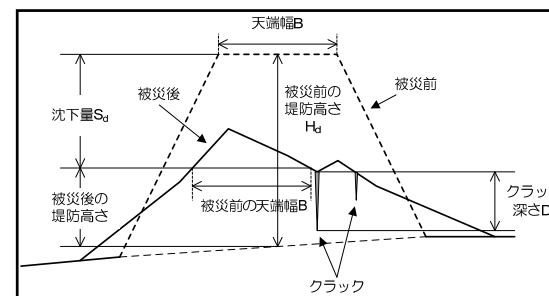
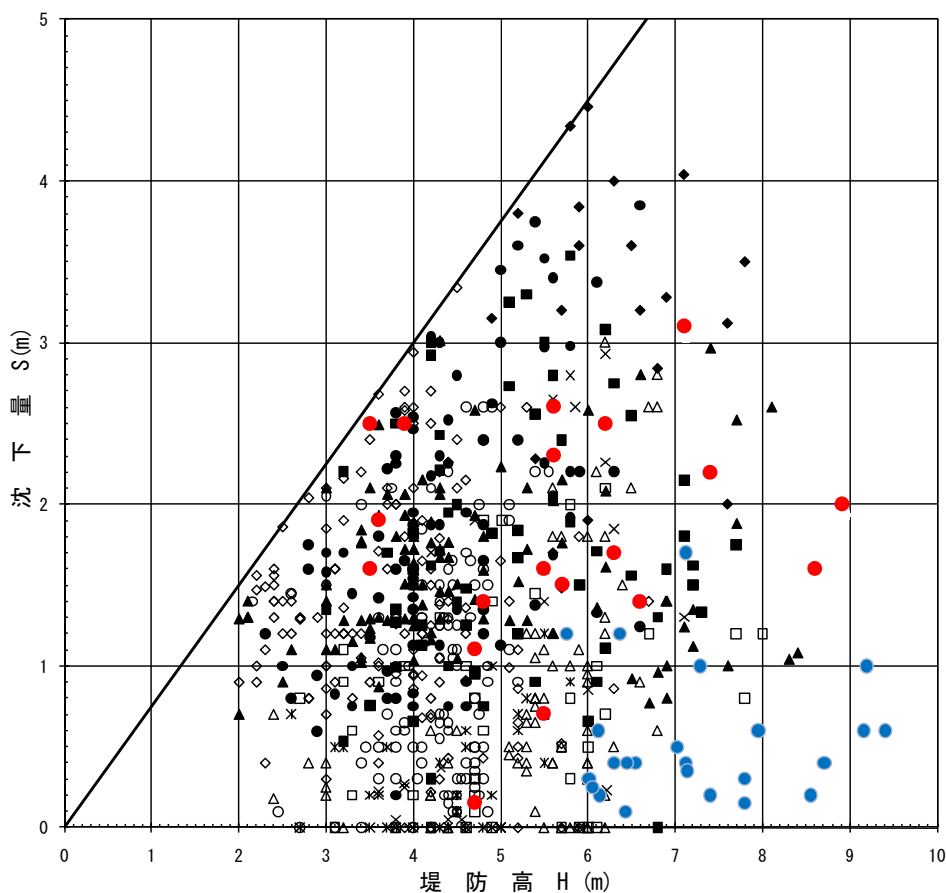


図1 堤防のレベル2耐震点検マニュアル 点検フロー

本地震による堤防被災箇所の堤防高と沈下量の比較について

- 本地震で被災した、関東地方整備局管内と東北地方整備局管内の緊急災申請箇所の堤防を対象として、堤防高と沈下量の比較を行った。
- その結果、既往の地震による堤防被災と同様、沈下量は堤防高の75%を上回っていないことが明らかとなった。
- 1次点検では、最大沈下量(堤防高の75%)が照査外水位以下となる場合、要対策区間として抽出を行うこととしているが、最大沈下量の判断基準が妥当であることが分かる。



- ◆ 濃尾地震（長良川、揖斐川等）
- 関東大地震（江戸川、富士川等）
- 福井地震（九頭竜川、大聖寺川等）
- ▲ 十勝沖地震（新釧路川、十勝川等）
- ◇ 新潟地震（阿賀野川、信濃川等）
- 宮城県沖地震（北上川、名取川等）
- × 日本海中部地震（岩木川、米代川等）
- △ 釧路沖地震（釧路川）
- 北海道南西沖地震（後志利別川）
- × 兵庫県南部地震（淀川）

● 東北地方整備局 緊急災申請箇所
 (地震による堤防被災 19箇所)
 平成23年4月12日時点の速報値

● 関東地方整備局 緊急災申請箇所
 (地震による堤防被災 31箇所)
 平成23年5月18日時点整理の値

今回の地震による緊急災箇所における検証

- ・本マニュアルの妥当性について、緊急復旧工事実施箇所のほか関東地整における大規模な被災が発生した25箇所を加えた計78箇所を対象とし、実際に、レベル2耐震点検マニュアルに準じたスクリーニングを実施。
(ただし、水門や津波被災箇所(計8箇所)や土質調査結果のないもの(計25箇所)を除く。)
- ・二次点検のみを対象として実施(二次点検内の3つのスクリーニングについて実施)。
- ・1次スクリーニング(地盤条件、基礎地盤条件による)では、45箇所中45箇所ですべて要対策箇所と判定。
- ・2次スクリーニング(土層構成による)では、43箇所中41箇所ですべて要対策箇所と判定。
- ・41箇所のうち沈下量が明らかになった12箇所について3次スクリーニング(簡易式による判定)を行ったところ、9箇所の堤体で沈下量を適切に判断できた(安全側に予測)。

	沈下可能性ありと判定された箇所		
	1次スクリーニング	2次スクリーニング	3次スクリーニング
関東地整	100%	100%	60%
東北地整	100%	89%	86%
小計	100%	95%	75%

※緊急復旧工事実施箇所等78箇所中、以下のデータは除いて集計している。

- ・津波被災箇所(北上川、阿武隈川(4箇所))
- ・水門被災箇所(北上川、利根川上流(4箇所))
- ・土質調査結果のないもの(25箇所)

・三次スクリーニング(簡易式による沈下量判定)

$$S = 1.41 \cdot H \cdot H_L^{1.56} \cdot 10^{-7.54 \cdot RL} + 0.0655 H_L^{0.930}$$

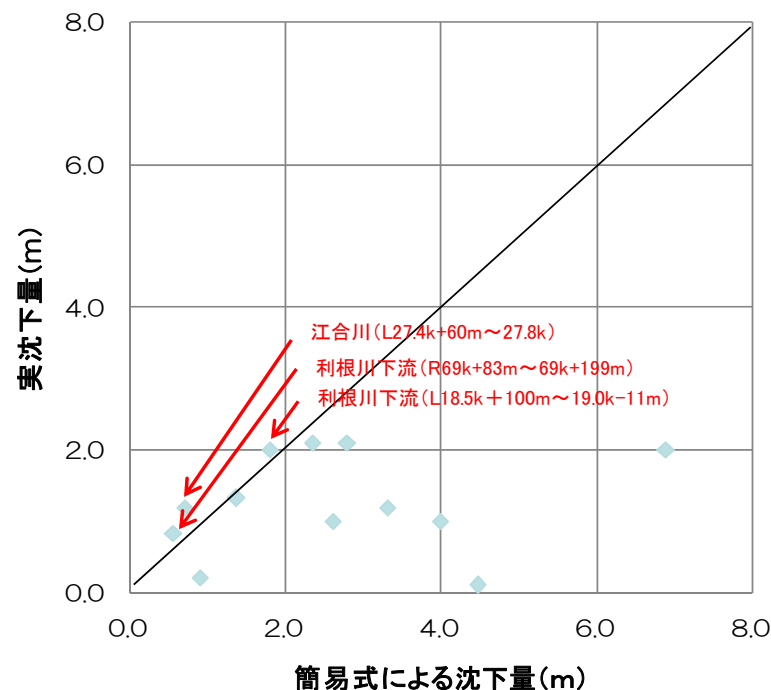
S:堤防の沈下量

H:堤防高

HL:表層の液状化層厚

RL:表層の液状化層の繰り返し三軸強度比

簡易式による沈下量と実沈下量の比較

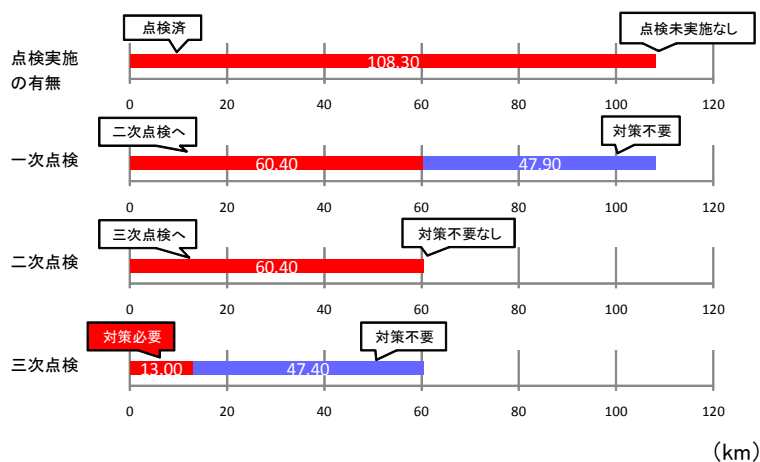


2. 耐震照査及び対策の促進

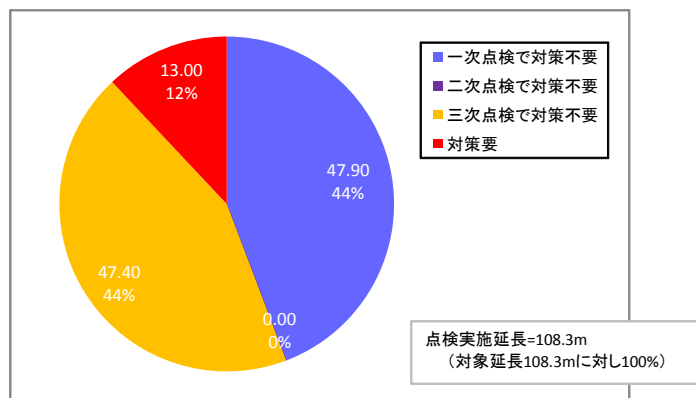
本マニュアルによるスクリーニングの傾向について(近畿、中部地方整備局を対象に実施)

- 一次点検で、近畿の場合約55%に、中部の場合約70%が要対策区間として絞り込まれている。
- 二次点検では、近畿、中部ともに、一次点検で絞り込まれた区間の全てが要対策区間と判断されている。
- 三次点検(解析)の結果、近畿の場合約21%、中部の場合約11%が要対策区間なった。

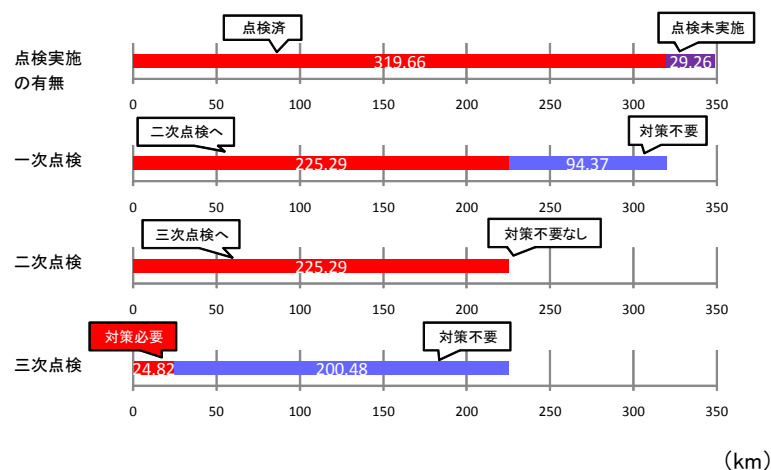
■近畿地方整備局の場合



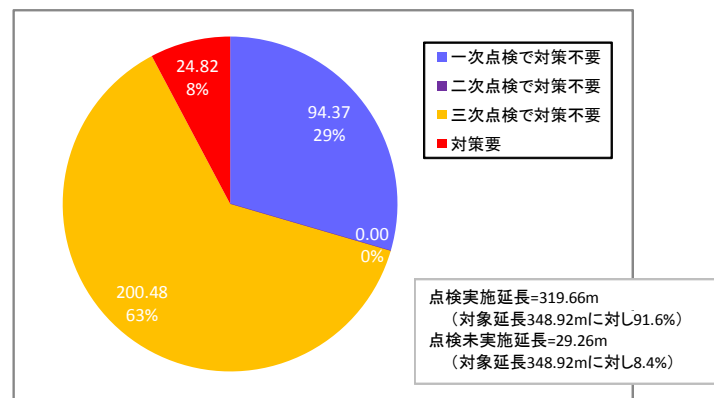
それぞれの項目の比率(「点検実施延長」を母数とした場合)



■中部地方整備局の場合



それぞれの項目の比率(「点検実施延長」を母数とした場合)



一次点検

①一次点検の対象

地震後に二次災害が生じるおそれのある区間: 堤内地盤高が照査外水位より低い区間。

②一次点検における耐震性能の照査

既往の地震による堤防天端の最大沈下量が許容沈下量を上回らないことを照査することにより、耐震性能を満足するとみなす。

【最大沈下量の算定】

最大沈下量 $S_{max} = 0.75H$

ここに、 H : 堤防高さ(m)

※既往の地震においては右図のように堤防高さの75%以上の沈下が生じた事例がない。ゆえに、最大沈下量を上式により簡便に算定する。

堤防高さは下図に基づき定義する。

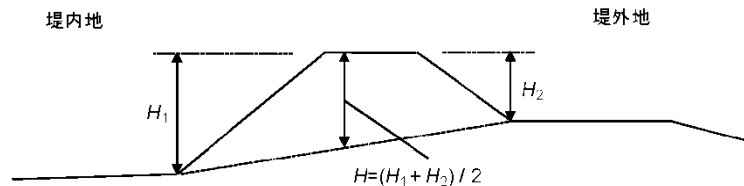


図-解 1.2.1 本マニュアル(案)における堤防高さの定義

【許容沈下量の算定】

堤防天端高と照査外水位の差として設定。

③二次点検の対象

一次点検の結果、耐震性能を満足しない可能性がある区間の堤防を二次点検の対象とする。

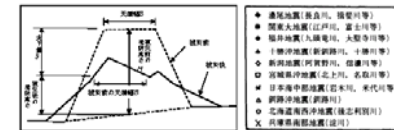
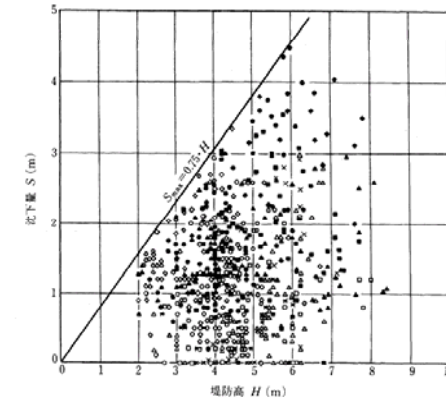


図-解 3.2.1 既往の地震における堤防高さと沈下量の関係
(改定 解説・河川管理施設等構造令、財団法人 国土開発技術研究センター編、
社団法人 日本河川協会、山海堂、2000)

二次点検 (その1)

①地形条件及び基礎地盤条件による判定

既往の地震被害事例に照らし、地震による堤防天端の沈下量が十分に小さいと判断される地形条件、基礎地盤条件に該当する細分区間の堤防は、耐震性能を満足するものとみなす。

●地震による堤防天端の沈下量が十分に小さいとみなせる区間の堤防

- ・地形区分による危険度ランクがC(扇状地、浅い谷)またはD(山地、丘陵地、台地、崖)に該当する細分区間
- ・基礎地盤上面から20m以浅のN値30未満の砂質土層または砂礫質土層が存在しない細分区間

②土層構成による判定

既往の地震被害事例に照らし、地震により生じる堤防天端の沈下量が十分に小さいと判断される土層構成に該当する場合、当該細分区間は、耐震性能を満足するものとみなす。

●治水地形による危険度ランク(A, B)毎に、土層分類Aの層厚の合計と土層分類Bの層厚の組合せで、堤防天端の沈下量を評価。

治水地形による危険度ランクA: 旧河道、落堀、旧落堀、高い盛土地、干拓地、砂丘

治水地形による危険度ランクB: 自然堤防、旧川微高地、氾濫平野、湿地、旧湿地

土層分類A: 基礎地盤上面から20m以浅に存在するN値30未満の砂質土層
または砂礫質土層

土層分類B: 土層分類Aの上方に位置し、土層分類に該当しない土層

- ・地形分類の危険度ランクが高いほど沈下量大きい。
- ・土層分類Aの層厚の合計が大きいほど沈下量大きい。
- ・土層分類Bの層厚が大きいほど沈下量小さい。

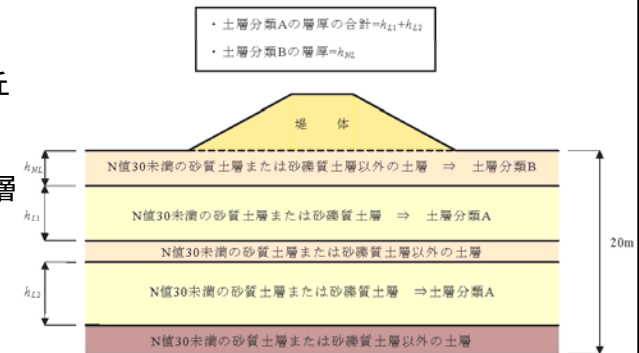


図-解 4.5.1 土層分類Aの層厚の合計、土層分類Bの層厚の定義

※上記①、②の判定に共通して、以下の条件がある。

ただし、堤体土のめり込みが生じている区間については、上記条件の有無によらず、地震による堤防天端の沈下量が十分に小さいと見なしてはならない。

これは、「堤体の部分液状化」を指したものである。

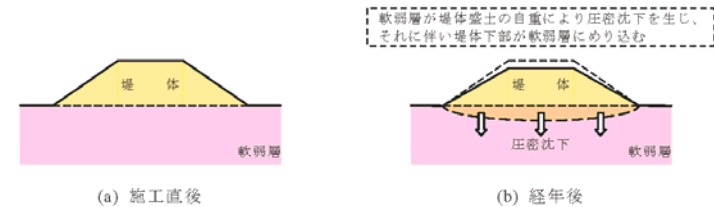


図-解 4.2.1 堤体土のめり込み

二次点検 (その2)

③簡易式による判定

代表断面位置において液状化判定を行い、堤防天端の沈下量を次に示す簡易式により算定し、これが許容沈下量を上回らない場合は、耐震性能を満足するものとみなす。

$$S = 1.41 \times H \times HL^{1.56 \times 10^{(-7.54 \cdot RL)} + 0.0655 \times HL^{0.930} \leq S_{max}$$

ここに、
S: 堤防天端の沈下量(m)
H: 堤防高さ(m)
HL: 表層の液状化層厚(m)

液状化層厚が複数あり第1液状化層と第2液状化層の間に5m程度の非液状化層がある場合に第1液状化層を表層の液状化層と定義する。

RL: 表層の液状化層の繰返し三軸強度比(算定されたRLの平均値)

Smax: 既往の地震による堤防天端の最大沈下量(m) Smax=0.75H
沈下量の上限值とする。

地震の種類によって異なる照査外水位が設定されている区間においては、地震の種類ごとに許容沈下量を算定し、レベル2-1地震動、レベル2-2地震動のそれぞれに対する沈下量と比較を行うことで照査する。

右図(a)のように、液状化層が2層にわたって存在する場合、液状化層①、②の両者を考慮した場合およびいずれか一方を考慮した場合の計3ケースについて堤防天端の沈下量Sを算定し、最も大きい沈下量を用いて照査をする。

右図(b)のように、堤体土のめり込みによって堤体下部に液状化層が生じる場合で、のり尻部のボーリングでは液状化層の存在を十分に捉えることができない場合、堤体直下のボーリング(No.2)からRL、HLを設定することが考えられる。

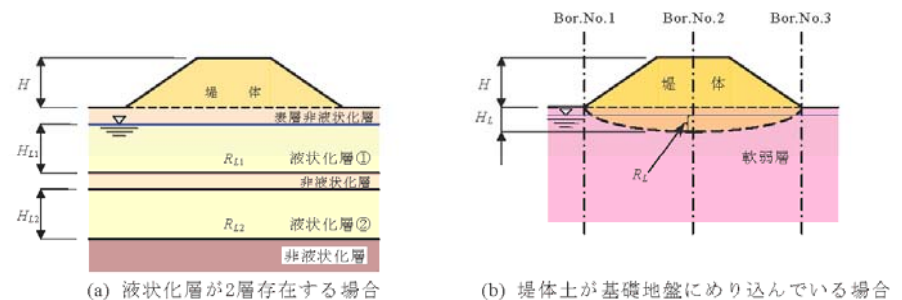


図-解 4.6.1 土層構成の違いによる計算ケースの設定の一例