

効果的、効率的な耐震対策手法(工法)



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

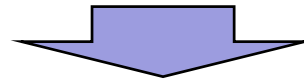
⑤緊急復旧堤防の安全性

③ : 本資料で説明している箇所

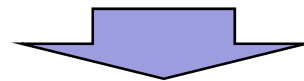
効果的、効率的な耐震対策手法(工法)とは・・・。

レベル2耐震対策の進捗

⇒ 耐震点検は**対象延長の半分程度しか進捗しておらず、**
その結果に基づく耐震対策は進んでいない。



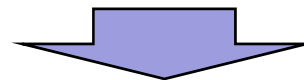
耐震対策を効率的に進めていくためには、レベル1地震動に対する対策の有効性や、浸透強化工法(ドレーン等)の沈下軽減効果等を評価する必要がある。



そのために・・・

今回の地震において、各種対策箇所における耐震効果を確認

- ・過去の地震において、復旧時に地盤改良等の対策を施した箇所
- ・レベル1耐震対策箇所
- ・浸透対策等(ドレーン、断面拡大等)の箇所



当面の手立てとして・・・

効果的、効率的な耐震対策手法(工法)のあり方について示す

1. 災害復旧箇所(地盤改良箇所)における耐震効果
2. レベル1 耐震対策箇所における耐震効果
3. 堤防浸透対策工実施箇所における耐震効果
4. 締固めが耐震に与える効果
5. 効果的、効率的な耐震対策工法のあり方(まとめ)

東北地方整備局管内の過去の地震による堤防被災箇所の整理

宮城県沖地震(1978)と宮城県北部を震源とした地震(2003)の被災箇所について抽出し、今回の地震(2011)の堤防被災と重複する箇所を一覧にまとめた。

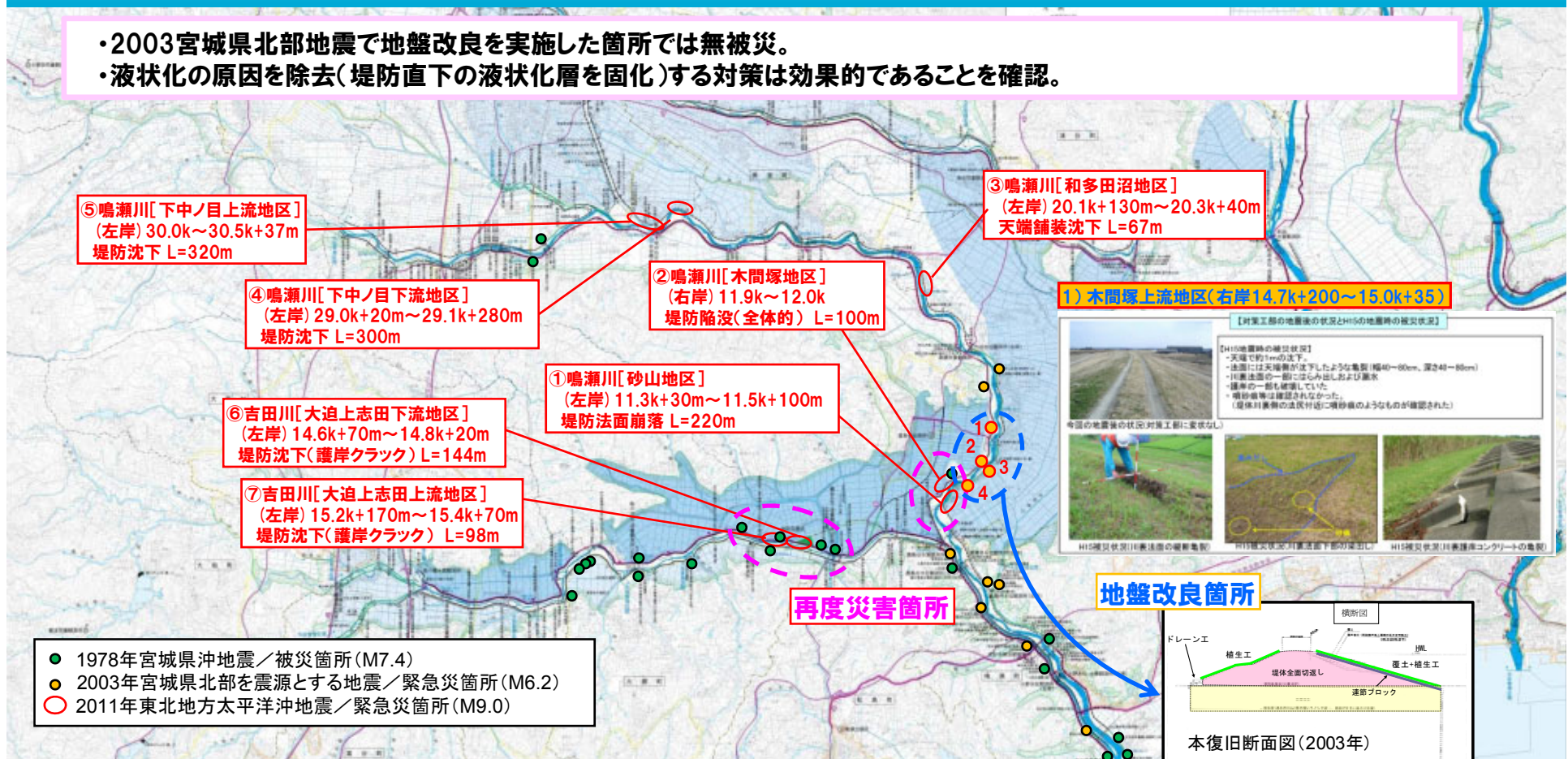
結果、原型復旧箇所については、被災の反復性が認められる一方で、地盤改良による災害復旧箇所は今回の地震で被災しなかった。

【参考資料2 参照】

1. 災害復旧箇所（地盤改良箇所）における耐震効果 —鳴瀬川の場合—

資料—2

- ・2003宮城県北部地震で地盤改良を実施した箇所では無被災。
- ・液状化の原因を除去（堤防直下の液状化層を固化）する対策は効果的であることを確認。



2) 木間塚下流地区(右岸12.9k+60~13.1k+94)



3) 二郷地区(左岸12.7k+270~13.3k+143)



4) 砂山地区(左岸12.1k+80~12.5k)



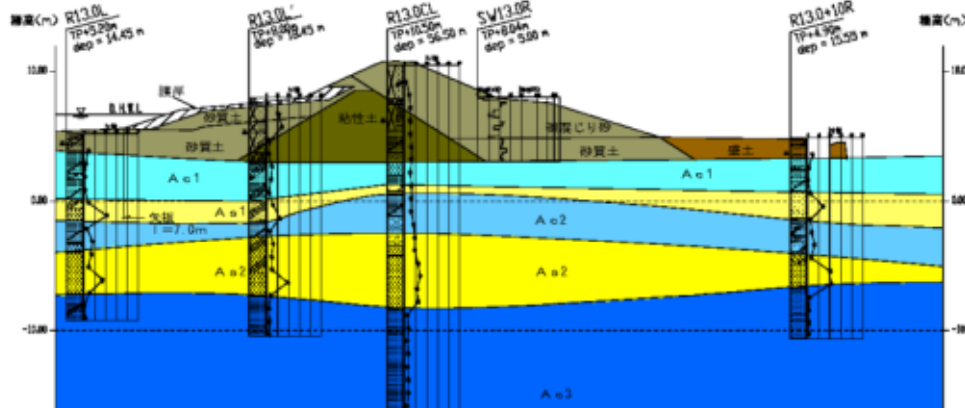
出典)「北上川等堤防復旧技術検討会」第1回、第2回検討会資料より

1. 災害復旧箇所（地盤改良箇所）における耐震効果 一鳴瀬川事例①一

資料—2

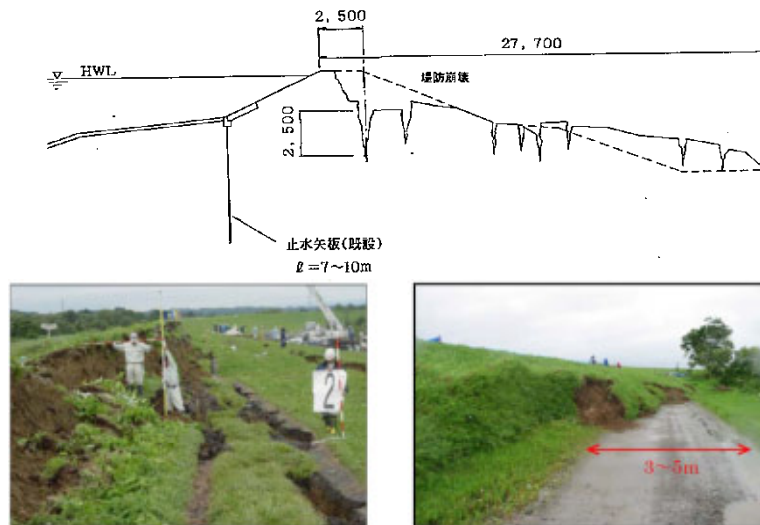
堤体基盤に浅層改良を施した箇所の事例(鳴瀬川右岸 12.9k+60m～13.1k+94m【木間塚下流地区】)

○地質横断面図



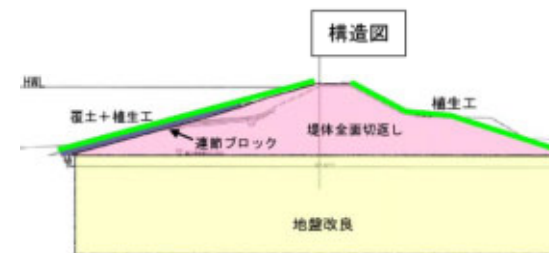
今回の震災では被害なし

○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)

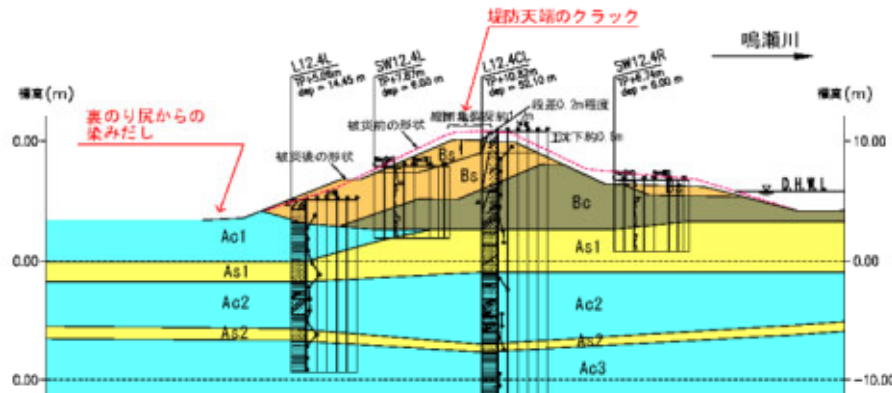
対策概要
基礎改良: 浅層地盤改良
堤体改良: 配合量30kg/m³
表法尻ドレーン(2段)

1. 災害復旧箇所（地盤改良箇所）における耐震効果 一鳴瀬川事例②一

資料—2

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】）

○地質横断面図



今回の震災では被害なし

○H15宮城県北部地震による被害状況

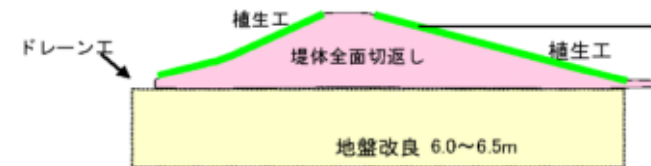


H15地震後の被災状況(天端縦断亀)



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)

対策概要
基礎改良: 浅層地盤改良
堤体改良: 配合量30kg/m³
裏法尻ドレーン(2段)

2. レベル1耐震対策箇所における耐震効果

資料—2

- ・関東、東北地方整備局管内における今回の地震によって被災した河川を対象に、レベル1耐震対策箇所と今回被災箇所との関係を以下に示す。
- ・レベル1耐震対策箇所は、今回の地震において殆ど被災がなく、被害がある箇所でもその被災規模が小さいことから、レベル1耐震対策による耐震効果が発揮されたものと評価出来る。

・関東地方整備局管内

レベル1耐震対策箇所					2011東北地方太平洋沖地震における被災箇所 (レベル1耐震対策箇所付近に限る)		
No	河川名	左右岸	箇所	対策工法	箇所	被災内容	被災規模
1	利根川	左岸	32.7k~33.8k	川表：鋼矢板+SCP工法+押さえ盛土	(左) 32.25km~32.7km	堤防陥没L=500m	中
					(左) 37km~80m~38.5km~100	天端・川表法面ひび割れ及び沈下L=950m	中
2	利根川	右岸	27.75k~51m~28.0k~1m 28.0k+96m~28.5k+195m	川裏：グラベルドレーン工 川裏：グラベルドレーン工	(右) 27k+145m~27.75k~46m	川表法面亀裂、堤防沈下	中
					(右) 28.5k+114m~28.5k+123m	堤防川表のり面および天端亀裂L=45m、W=0.6m、H=2.1m	小
3	小貝川	右岸	9.5k~9.8k 10.1k~10.4k	川表：鋼矢板 川表：鋼矢板	(右) 29k~32k	川裏小段道路縦断亀裂L=3000m	小
4	西浦	左岸	3.55k~4.25k 18.35k~19.38k	矢板+緩傾斜 緩傾斜	(右) 27k	低水護岸の張ブロック陥没 L=1.5m、W=1.5m、D=45cm	小
					(左) 2.25km	堤防天端 亀裂 L=100m	小
5	西浦	中岸	0.0k~0.63k 26.38k~27.88k	矢板+緩傾斜(緩傾斜) 矢板+緩傾斜	(左) 4.25km	堤防天端 陥没 D=30cm	小
					(左) 19.75km	堤防天端 陥没 D=20cm、L=10m	小
6	北利根川	左岸	2.5k~3.5k	排水機能付き矢板	(中) 0.5~0.7km	堤防天端法面亀裂	小
					(中) 25.9~34.0km	堤防天端 亀裂 6力所	小
7	江戸川	左岸	1.25k~2.95k	川表：盛土 川裏：グラベルマット、グラベルドレーン工	(左) 3.65km~3.93km	堤防天端法面亀裂	中
					(左) 1.0km	川裏工事用道路法面崩れ 高さ1.8m、幅6m	小
8	江戸川	右岸	1.75k~1.85k 2.25k~3.2k 2.25~3.2k	川表：盛土 川表：盛土 川裏：グラベルマット、グラベルドレーン工	(右) 1.2~1.4km	堤防第一法面クラック、最大段差35cm、D=80cm、W=17cm	小
					(右) 3.5~3.5km	川表護岸第一小段基礎コンクリート開き L=200m、幅20cm	小

2011.8.4時点情報(治水課調べ)より整理

2011.7.11時点情報(治水課調べ)より抽出・整理

※被害規模について
大・中・小について明確な定義はないが、
本資料では次のとおり定義している。
大：堤防全体に及ぶ損傷
中：HWLに達しない損傷、
部分的にHWL程度の損傷
小：比較的小規模な損傷

被害がある箇所
でもその被災規模は小さい

・東北地方整備局管内

レベル1耐震対策箇所					2011東北地方太平洋沖地震における被災箇所 (レベル1耐震対策箇所付近に限る)		
No	河川名	左右岸	箇所	対策工法	箇所	被災内容	被災規模
1	北上川	右岸	2.7k~3.1k(川表) 2.7k~3.3k(川裏)	押さえ盛土+CDM工法 鋼矢板Ⅳ型(自立式、排水機能付き)、L=19.5m	(右)河口~2.4k	法面崩壊、堤防決壊、堤体崩落等 L=2.4k区間	小
					(右)2.4k~3.6k	堤防一部流出 L=1.200m	一
2	鳴瀬川	右岸	0.7k~1.05k	SCP工法	(右)3.6k+100~3.8k	堤防決壊 L=900m	中
					(右)0.4~0.7	特殊堤防上部 W=2m破損 5~10m	小
3	最上川	右岸	2.4k~2.8k	鋼矢板Ⅱ型(自立式)、L=12.5m	(右)1.2k+150~1.4k(吉田川背割堤)	堤防決壊 L=50m W=10m H=4m 護岸崩壊 L=50m	中
4	名取川	右岸	0.7k~0.9k	押さえ盛土工法			

2011.8.4時点情報(治水課調べ)より整理

2011.7.11時点情報(治水課調べ)より抽出・整理

津波による被害

2. レベル1耐震対策箇所における耐震効果 一対策事例①一

資料—2

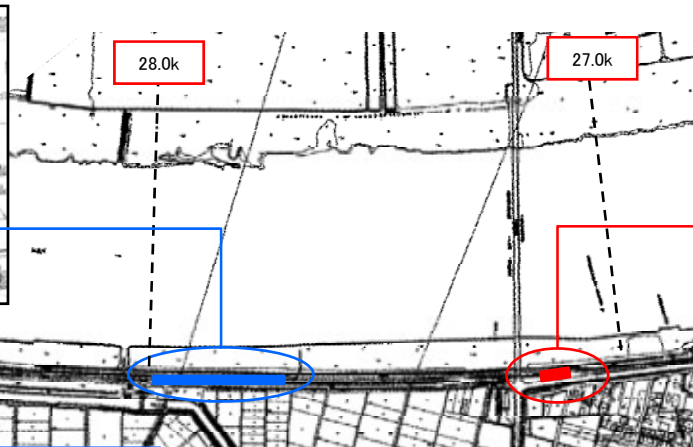
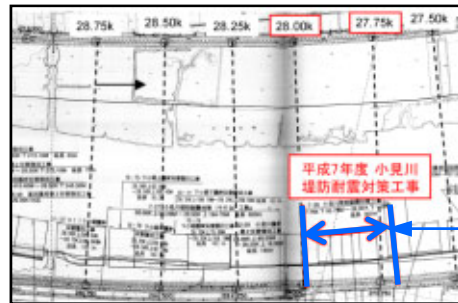
L1耐震対策(グラベルドレーン)を施工した箇所の事例(利根川右岸 27.0k~28.0k 付近)

・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。(右) 一方、直上流の27.75k~51m~28.0k-1m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。(左)。

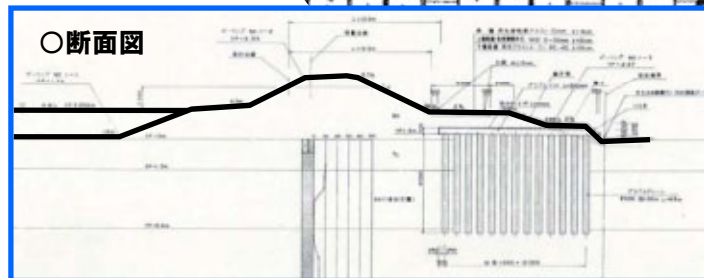
①無被災(L1耐震対策)箇所:利根川右岸27.75k~51m~28.0k-1m

②大規模被災箇所:利根川右岸27.0k+80m~27.0k+150m

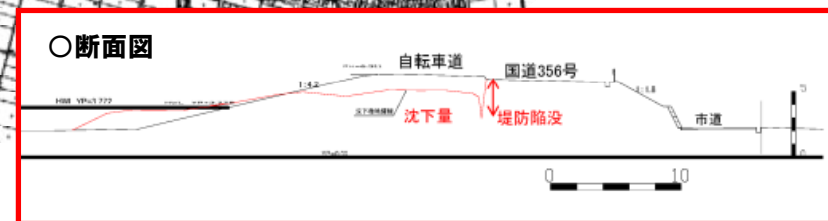
○平面図



○断面図



○断面図



○状況写真



被災なし

○状況写真



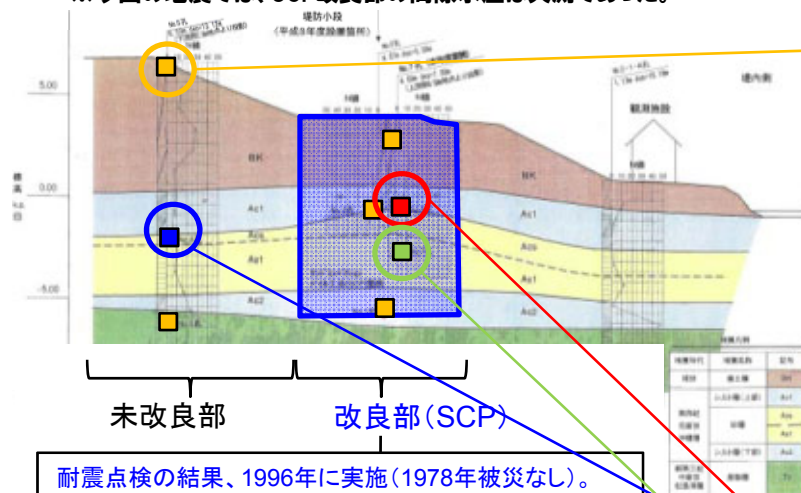
2. レベル1耐震対策箇所における耐震効果 一対策事例②一

資料—2

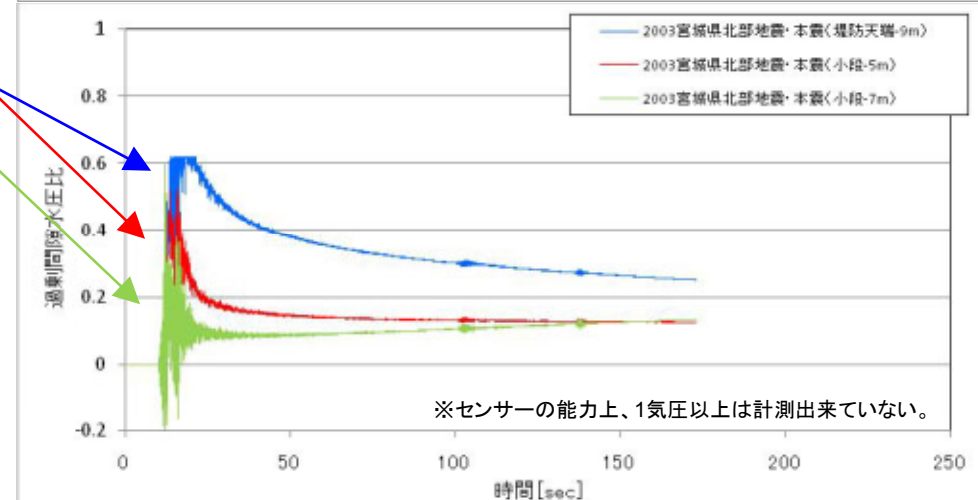
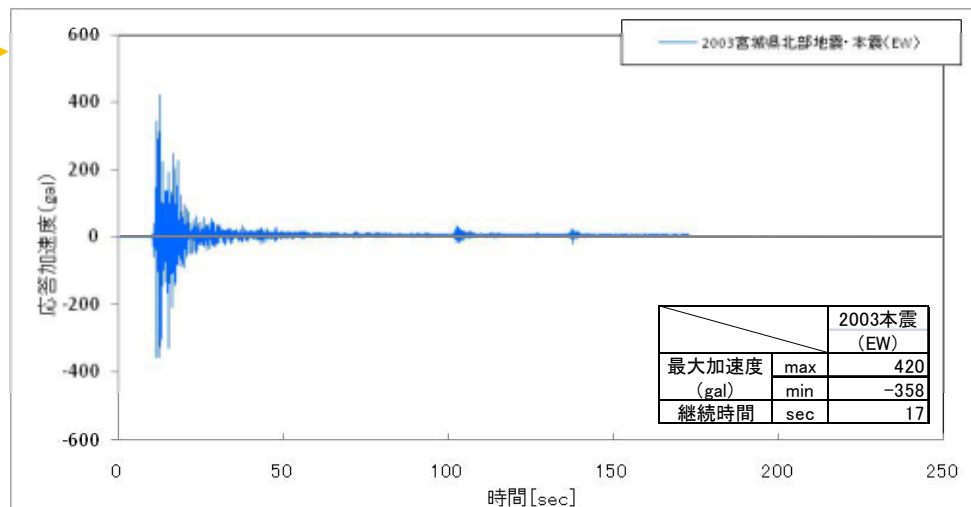
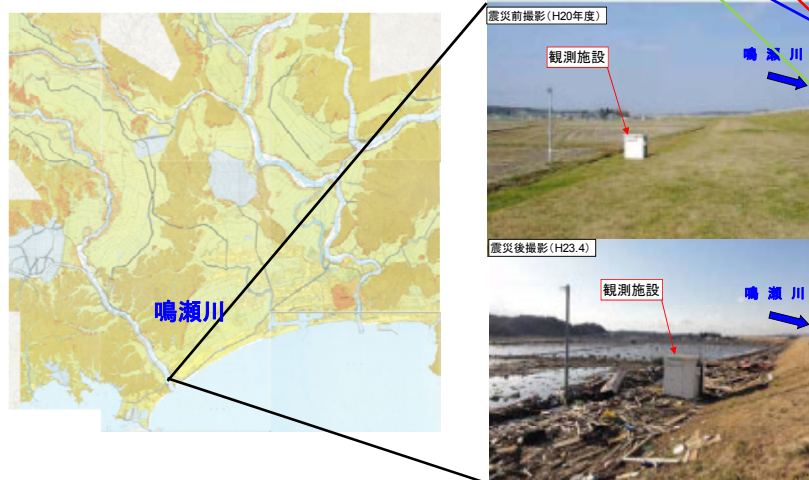
L1耐震対策(サンドコンパクションパイル)を施工した箇所の事例(鳴瀬川右岸 中下振動観測所)

- ・中下振動観測所では、SCP改良部とその隣りの未改良部に間隙水圧計が設置されている。
- ・2003年宮城県北部地震の観測記録では、SCP改良部の過剰間隙水圧比の増加が未改良部に比べ抑制されており、**SCP改良による耐震効果を**確認出来る。

※今回の地震では、SCP改良部の間隙水圧は欠測であった。



耐震点検の結果、1996年に実施(1978年被災なし)。
 パイルピッチ: 堤防方向2.2m、直交方向1.7m
 改良面積率: 10%



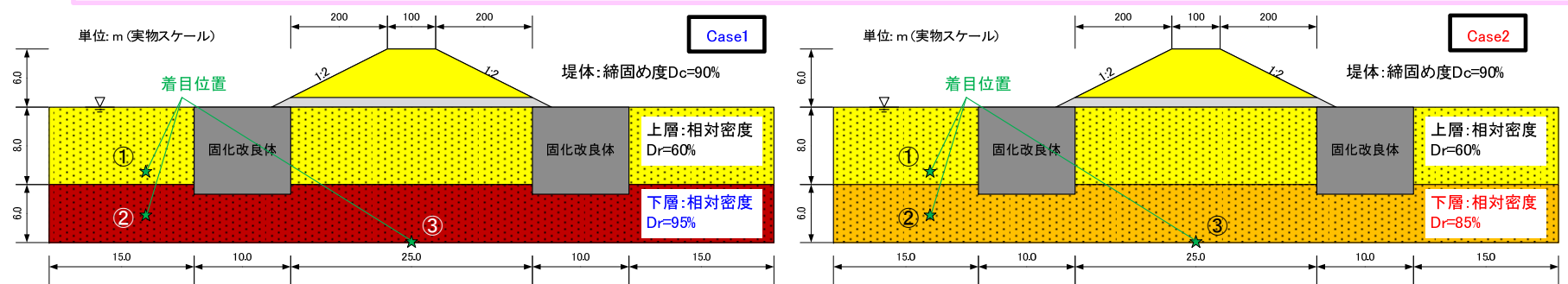
※継続時間は、加速度の絶対値が50gal以上の範囲で算出。

※過剰間隙水圧比は、初期間隙水圧との差分を有効上載圧で除した値。

2. レベル1耐震対策箇所における耐震効果 一動的遠心実験一

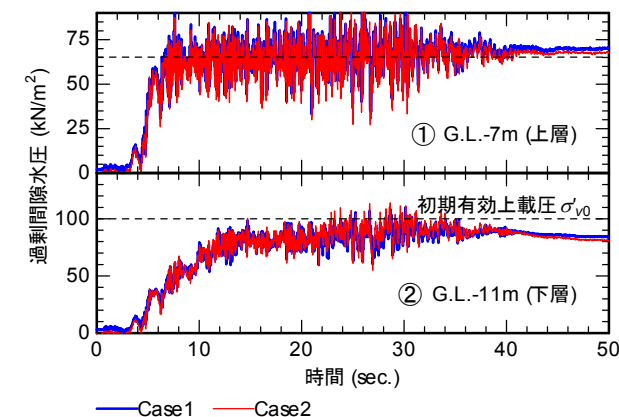
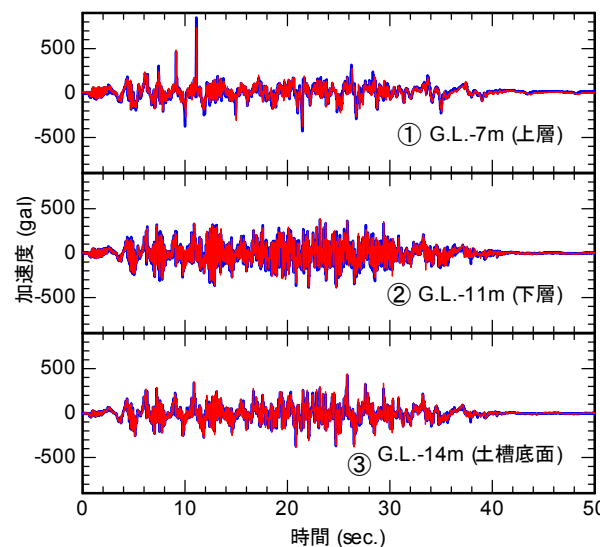
資料—2

- L1耐震対策された堤防のL2時の挙動を調べるための動的遠心実験。
- Case1: 対策工が良質な支持層($FL=1.96$)に根入れされた場合、Case2: 支持層に液状化が生じる可能性あり($FL=0.35$)。
- 加振後の堤防の変形量には、両ケースで堤防の変形量に顕著な差は認められない。
- 地震動を与えた結果、上層は過剰間隙水圧が急激に上昇し、加速度が減衰・長周期化(=液状化)。下層では過剰間隙水圧が上昇するものの、加速度波形には液状化の影響が見られない。
⇒ 上層が液状化により剛性・強度を喪失することで、下層に大きなせん断応力が作用しなくなり、結果として下層が液状化しない。 ⇒ 大地震時においてもL1耐震対策が効果を発揮する理由の一つと考えられる。



加振後の堤防変形量

	Case1	Case2
沈下量(m)	0.30	0.36
のり尻の平均水平変位(m)	0.47	0.54



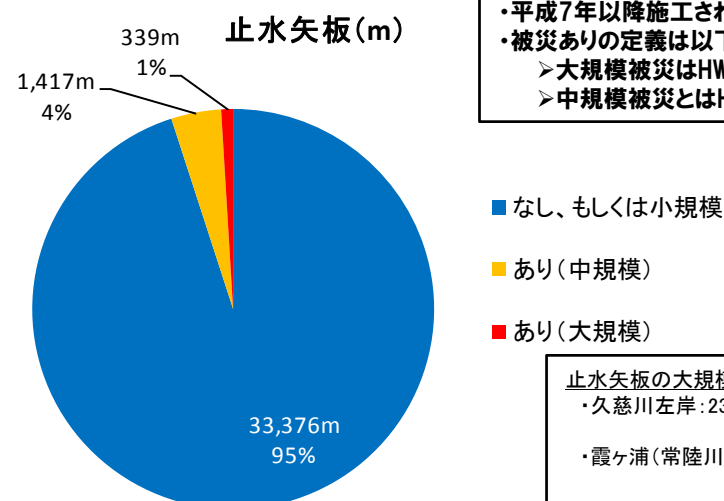
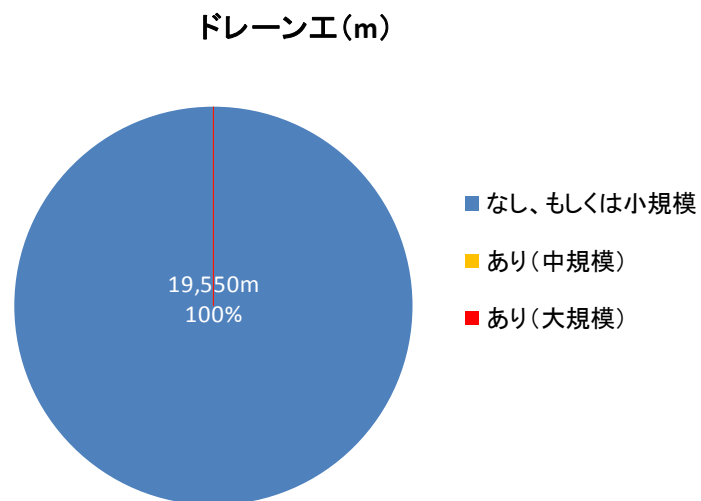
加振実験時の計測データ (L2 type-I)

- 3-① 浸透対策・侵食対策工実施箇所における被災状況の評価
- 3-② 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
- 3-③ 断面拡大における被災状況の評価と耐震対策としての効果

3-① 浸透対策実施箇所における被災状況の評価

資料—2

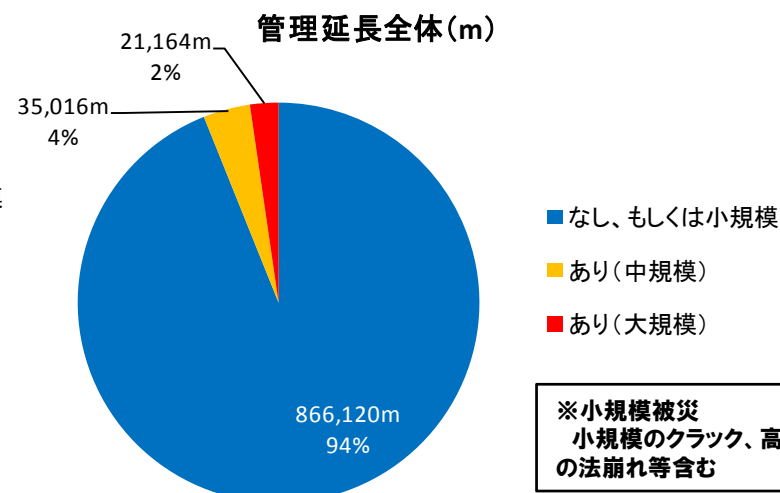
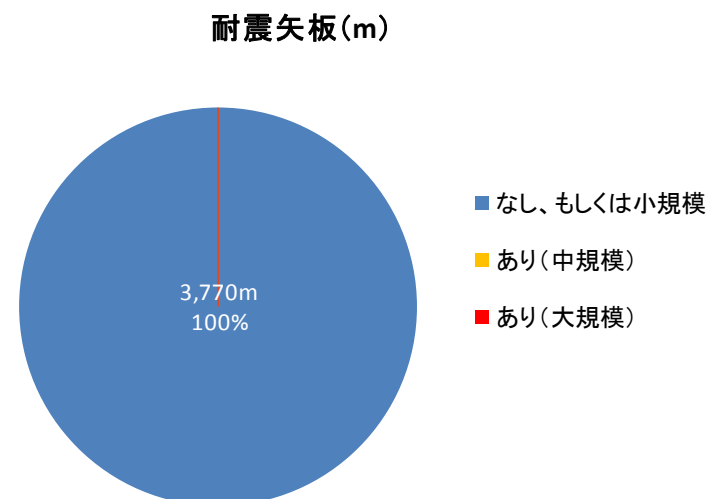
- ・関東地整管内河川(利根川下流、江戸川、小貝川、那珂川、久慈川、霞ヶ浦における整理)において、浸透強化対策(矢板、ドレーン工)、耐震対策(耐震矢板)施工区間における、無被災、大規模被災、及び中規模被災の延長について整理を行った。
- ・ドレーン工、耐震矢板では、大規模、中規模被災は認められず、今回の地震に対しては沈下軽減効果があったと考えられる。
- ・なお、止水矢板については、一部大規模被災が認められるものの、概ね沈下軽減効果が認められる。



- ・平成7年以降施工された浸透対策工対象。
- ・被災ありの定義は以下の通り。
 - 大規模被災はHWLよりも深い被災
 - 中規模被災とはHWLより浅い被災

止水矢板の大規模災害(339m)の内訳

- ・久慈川左岸: 239m
(鋼矢板Ⅱ型L=6.0m)
- ・霞ヶ浦(常陸川左岸): 100m
(鋼矢板Ⅱ型L=4.0m)

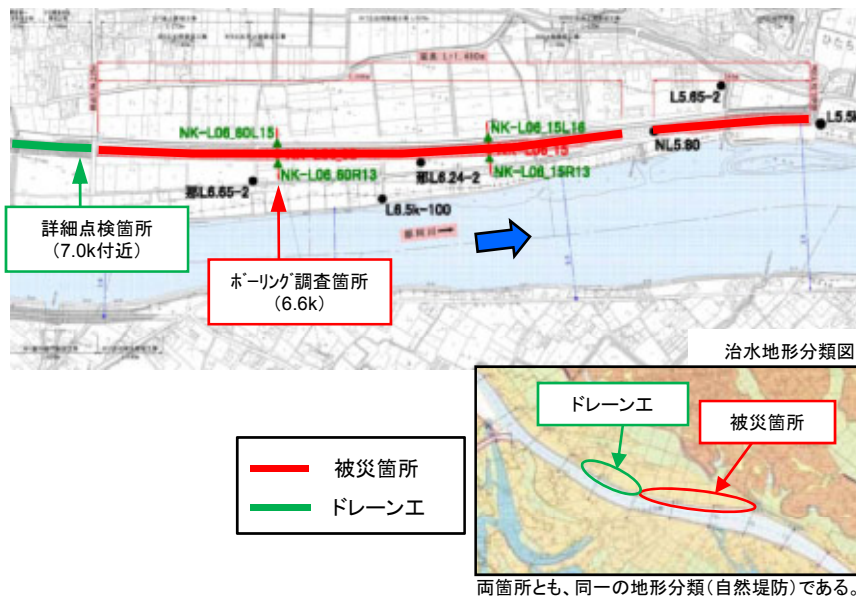


※小規模被災
小規模のクラック、高水敷の被災、低水護岸の法崩れ等含む

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）

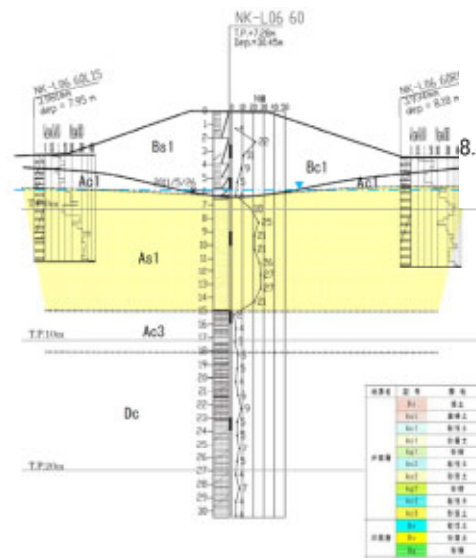
- ・今回の地震にて、ドレーン施工区間直下流の5.5k付近～7.0k付近で堤防の亀裂等の大規模被災が発生した。
- ・那珂川左岸7.0k～8.75kにはドレーンが施工されている。
- ・近接しており、堤体構造もほぼ同様であるが、ドレーン施工箇所は本地震による被災がなかった。

○被災箇所平面図



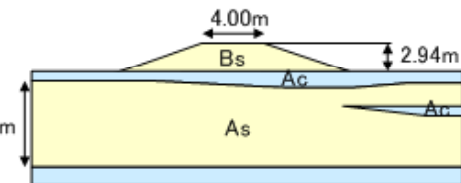
○被災箇所の横断構造(6.6k)

※関東地整において被災後(6月)に実施したボーリング調査結果より作成



○無被災箇所の横断構造(7.0k付近)

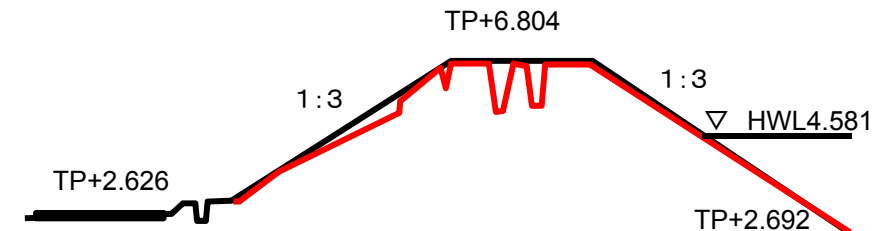
※出典：堤防詳細点検における調査結果より



○東北地方太平洋沖地震による被害状況



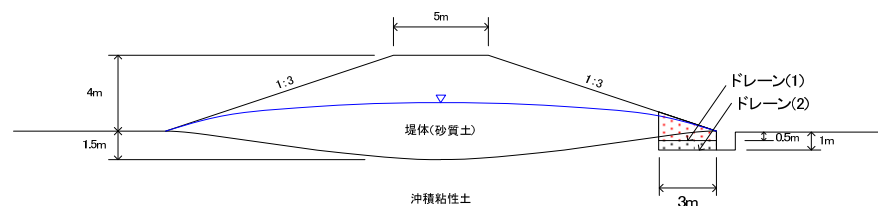
○被災断面：堤防法面亀裂（亀裂：幅100cm、深さ100cm）



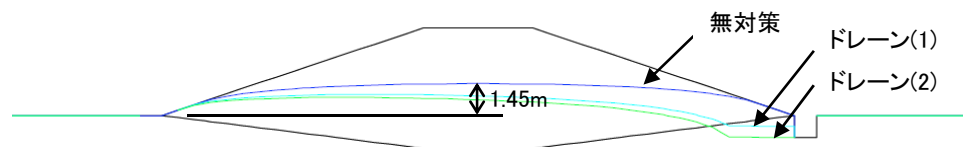
堤体内液状化に対するドレーンの効果に関する試算

- ・堤体内液状化による被災箇所での対策工として、法尻部ヘ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



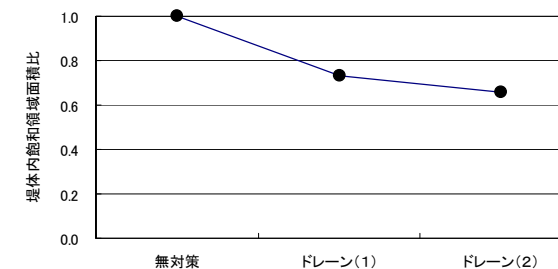
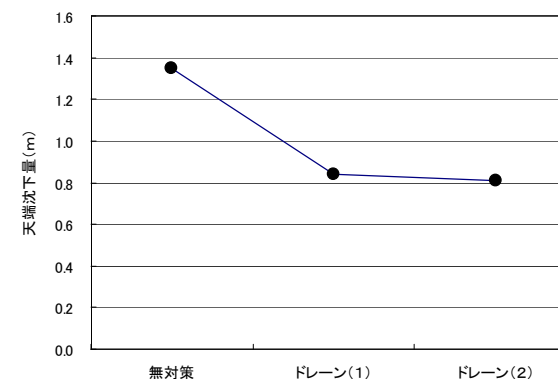
○ドレーンの水位低下効果に関する試算



土層区分	単位 体積重量 γ_t (kN/m^3)	平均N値 ^{※2} N	原位置有効 上載荷重 σ'_{v0} (kN/m^2)	変形係数 ^{※3} E (kN/m^2)	初期 ポアソン比 ^{※4} 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 $E=2800N(\text{kN/m}^2)$ 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 $G_0=E/[2(1+\nu)]$ 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 $21\{N \times 100 / (\sigma'_{v0} + 70)\}^{0.5}$ (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。

○今回の地震による同箇所の状況



ドレーンによる耐震対策効果(既往の遠心実験より)

・遠心実験によると、ドレーン対策を行うことにより沈下量が低減し、耐震性が向上することが確認されている。

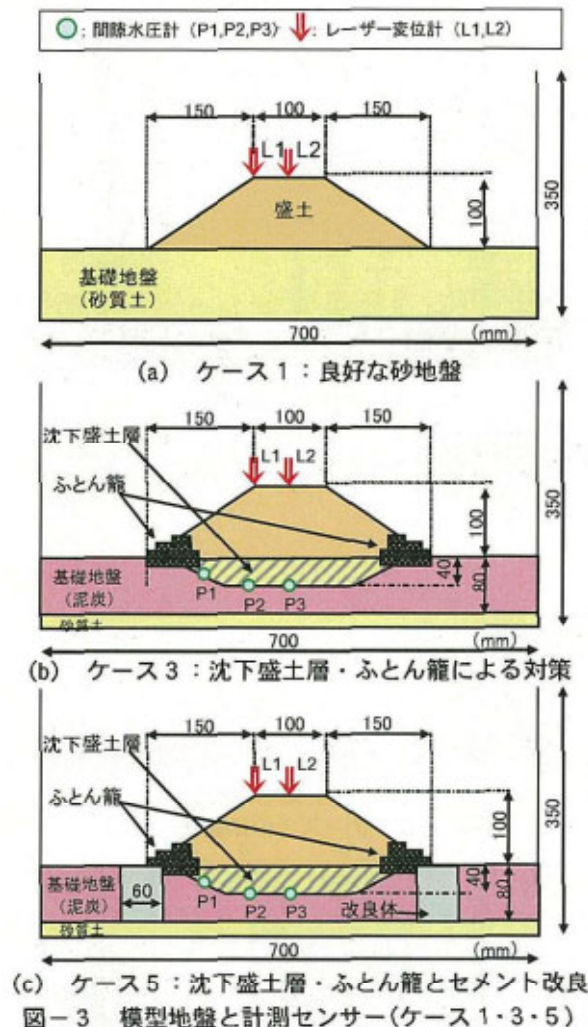


表-1 想定した実験ケース

ケース	想定した条件
1	良好な基礎地盤(砂地盤)上に盛土
2	沈下盛土層あり・無対策
3	沈下盛土層あり・ふとん籠による対策
4	沈下盛土層あり・ふとん籠とセメント改良(B/D=0.25)
5	沈下盛土層あり・ふとん籠とセメント改良(B/D=0.75)

表-2 実験条件

盛土の締固め度	盛土高	天端幅	沈下盛土層厚	加速度
85%	5m	5m	2m	500gal

(ただし、ケース1は良好な基礎地盤のため、沈下盛土層は無し)

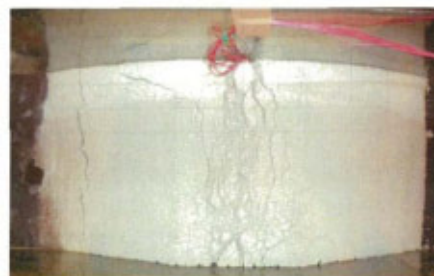
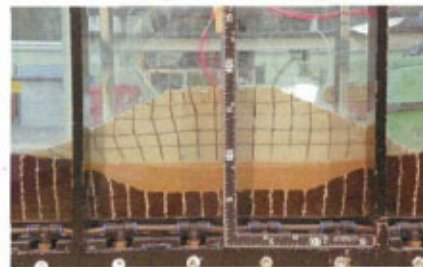


写真-3 ケース2の加振後の状況

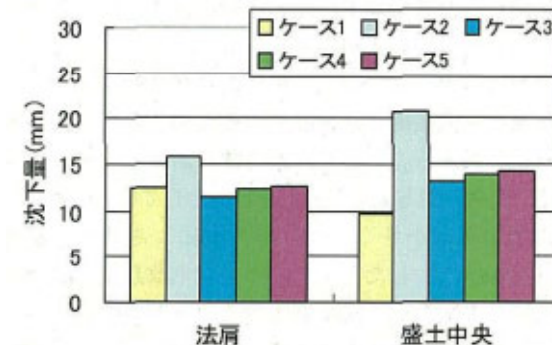


図-6 各ケースの沈下量

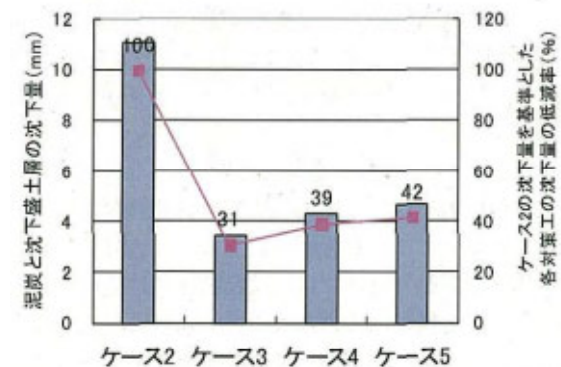


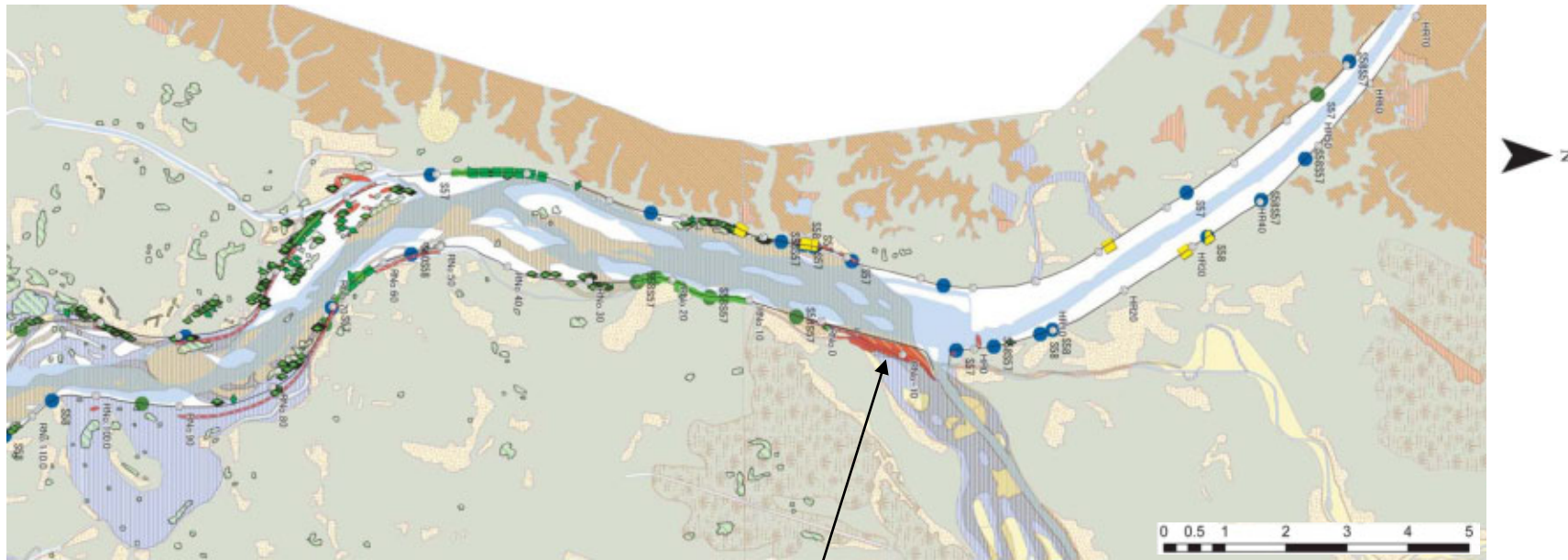
図-7 基礎地盤(泥炭)と沈下盛土層の沈下量
ケース2を基準(100)としたときの対策工の低減率

無対策に対して、対策(ケース3~5)した堤体は沈下率が30~40%程度まで低減している。なお、各対策工間で沈下抑制効果の顕著な違いは認められない。

3-③ 断面拡大における被災状況の評価と耐震対策としての効果

資料—2

・S39新潟地震で被災した区間において断面拡大を施した箇所については、その後の地震で被害がない。



真野代地区【再度災害なし】

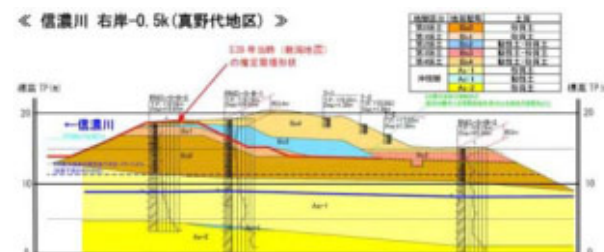
S39年被災により原型復旧。平成の初めに断面拡大。H16年、H19年被災なし。



真野代:写真①(堤防天端)



真野代:写真③(川裏のり尻)



- 【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堤防観測点機より
 - 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観測点所
 - H18若松加寿江資料より
 - H16震動化範囲
 - 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

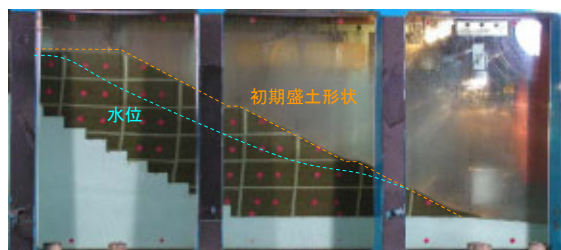
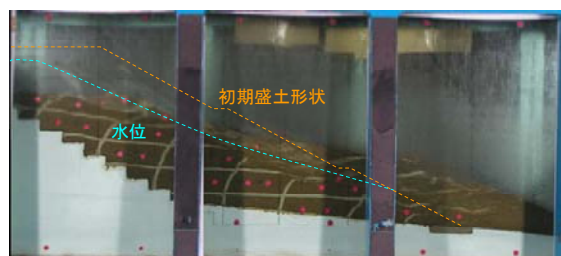
4. 締固めが耐震に与える効果

資料—2

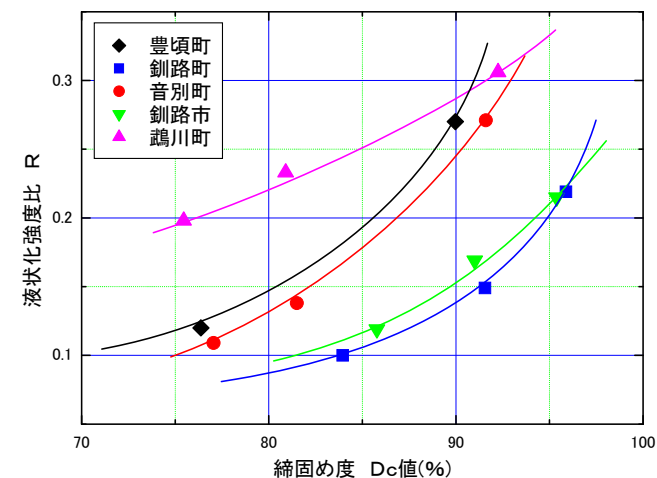
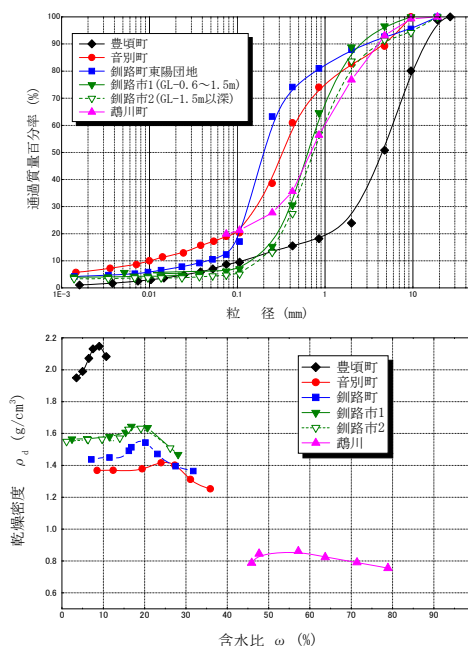
盛土の締固め効果(既往の遠心実験より)

- 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



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

- 地盤改良による災害復旧箇所や既存のレベル1対策工箇所では、今回の地震による顕著な被害が認められなかったことから、**レベル2地震動に対しても対策効果が発揮**されたと考えられる。
- 矢板やドレーン、断面拡大工法等の**浸透に対する強化対策箇所**でも、被害が限定的であったことが確認されていることから、**耐震対策としても効果が発揮**されたと考えられる。
- 従って、レベル2耐震対策を実施するにあたっては、**レベル1対策工及び浸透に対する強化対策工の耐震効果を十分考慮した上で、必要に応じて地盤改良等の耐震対策工法の選定を行う。**
- なお、地盤改良等の液状化対策工を実施する場合、**河川堤防が本来有する耐浸透機能に悪影響を及ぼさない工法を選定すべきである。**
- また、耐震性能設計の考え方を導入して、**低廉で効果的な液状化対策工の技術開発を引き続き実施**する必要がある。