

第2回検討会の主な意見に対する説明資料 (現状の耐震照査及び設計の改善)

A. 照査外水位の設定条件(緊急復旧に要した時間)について

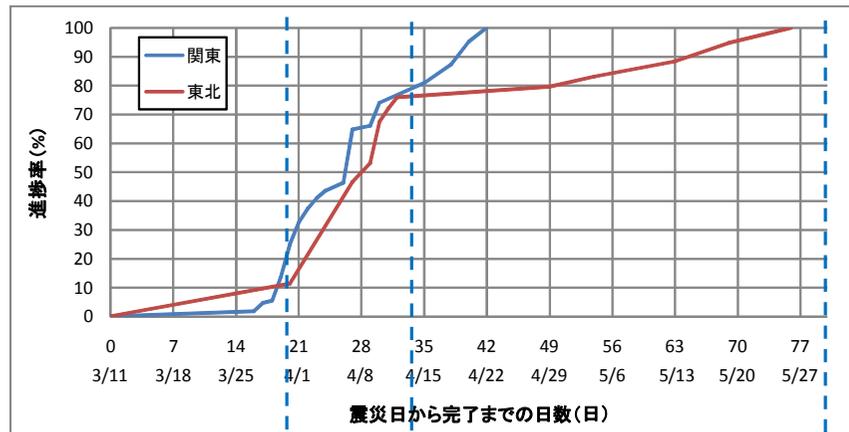
B. 被災箇所における現照査手法の検証

1. 地質調査結果に基づく被災要因の分析
2. 変形解析手法とその条件設定について
3. 代表被災箇所における検証
4. まとめ

A. 照査外水位の設定条件（緊急復旧に要した期間）について

- ・耐震性能照査において考慮する「照査外水位」は、緊急復旧までに発生する水位の内、高い値を設定している。
 (①波浪の影響を考慮しない場合(14日間に発生する確率が1/10の流量に対応する水位)、②波浪の影響を考慮する場合(14日間に発生する確率が1/10の有義波高をもとに求められた打ち上げ高を朔望平均満潮位に加算)、③津波の遡上を考慮した場合、の3種類より高い値を設定)
- ・過去の大規模地震では、概ね14日間で緊急復旧が完了しているが、今回の地震では、14日間以上要した被災箇所が大半である。(津波被害箇所、水門等構造物被災箇所、鋼矢板二重締切による復旧箇所は除く。)
- ・今回の地震では、**燃料不足や道路寸断等**があったことが、工事着手が遅れた主な理由として挙げられる。
- ・また、被災地全体をみた**総合的な復旧オペレーション**を実行する上で、**道路被害や津波被害箇所の復旧、行方不明者の捜索などが優先された。**
- ・以上より、照査外水位は、**当面、現行の14日間に発生する確率1/10の水位によって運用するが、今次の被災において、想定していた14日間で緊急復旧が完了しなかったことを踏まえて、大規模・広域・複合災害となり、緊急復旧に時間を要する事態等を想定した対策を考えておく必要がある。**

○震災から緊急復旧完了までに要した日数と進捗率との関係(6/12 18:00現在 治水課調べ)



地震発生から20日程度 工事着手から14日程度

緊急復旧の着手が遅れる。
 ・燃料、資機材の不足
 ・道路等の寸断による物資輸送途絶
 ・被災地全体をみた総合的な復旧オペレーション実行上、他に優先度の高いものがあった
 などが主要因として挙げられている。
 (関東、東北地方整備局へのアンケート調査結果による)

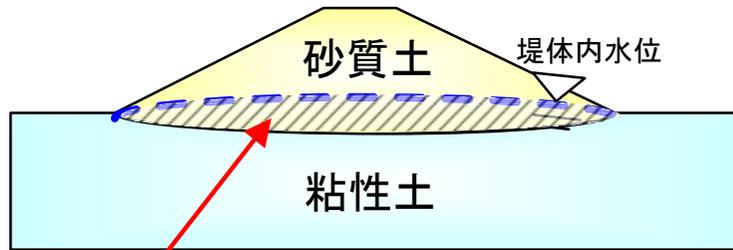
概ね8割は、完了させている。

梅雨期(6月～)
 梅雨前に緊急復旧は完了している。

1. 地質調査結果に基づく被災要因の分析

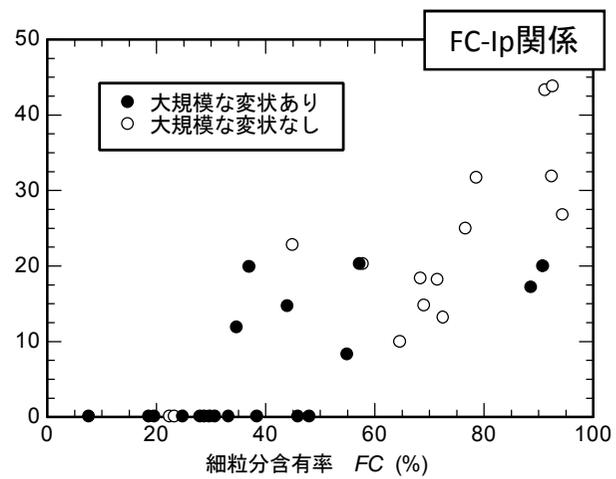
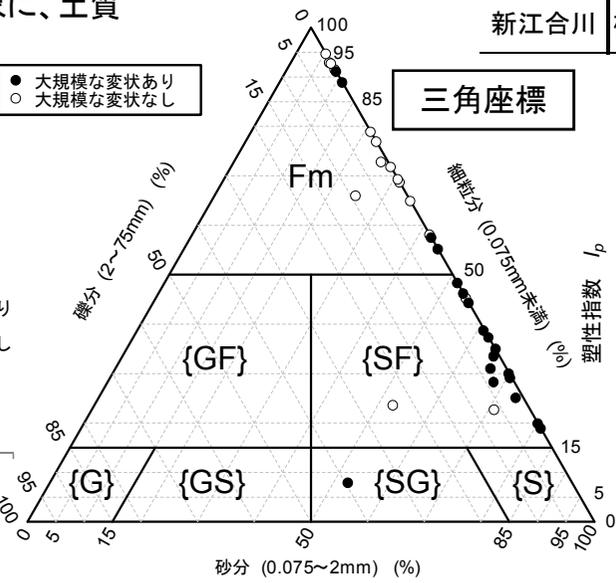
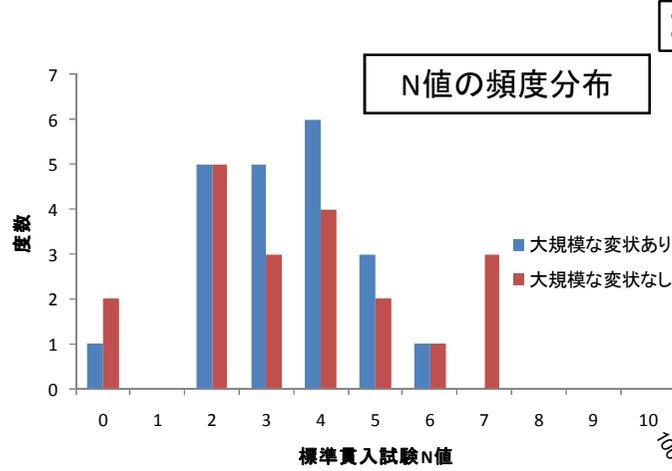
1.1 土質条件の分析

- 東北地整管内で堤体の部分液状化により被災した箇所と近傍の無被害箇所における堤防の土質、水位の条件の違いを比較し、被災要因について検討を行った。
- 被害・無被害断面でN値の大きさに顕著な差はなし。変状の有無によらずN値は小さい。
- 無被害断面に比べ、被害断面の飽和域の土質としては細粒分が50%以下のものが大半である。
- ただし、細粒分が多いものでも、塑性指数 I_p が0~20の範囲にあるものは、大規模な変状を生じているものがある。



地下水位以深の堤体材料に着目
地下水位以深にある盛土部分を対象に、土質の違いを大規模変状の有無で比較。

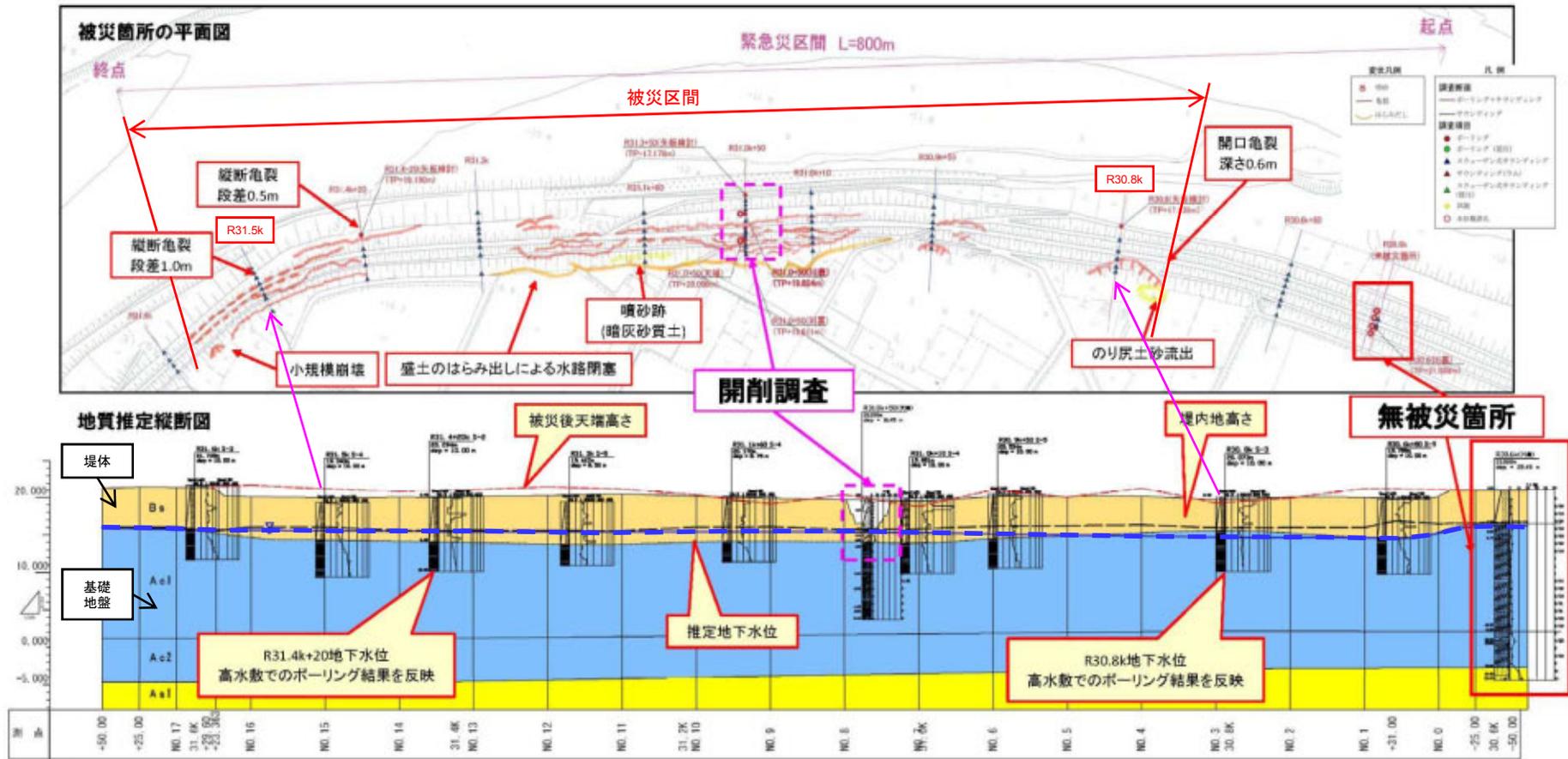
検討対象とした地区 (計19地区)	
河川名	地先名
阿武隈川	野田, 坂津田, 枝野, 小斉
鳴瀬川	砂山, 木間塚, 和多田沼, 下中ノ目下流, 下中ノ目上流
吉田川	大迫上志田下流, 大迫上志田上流
江合川	上谷地, 中島乙, 平針下流, 平針上流, 淵尻下流, 淵尻上流, 福沼
新江合川	榆木



1.2 飽和域の縦断分布

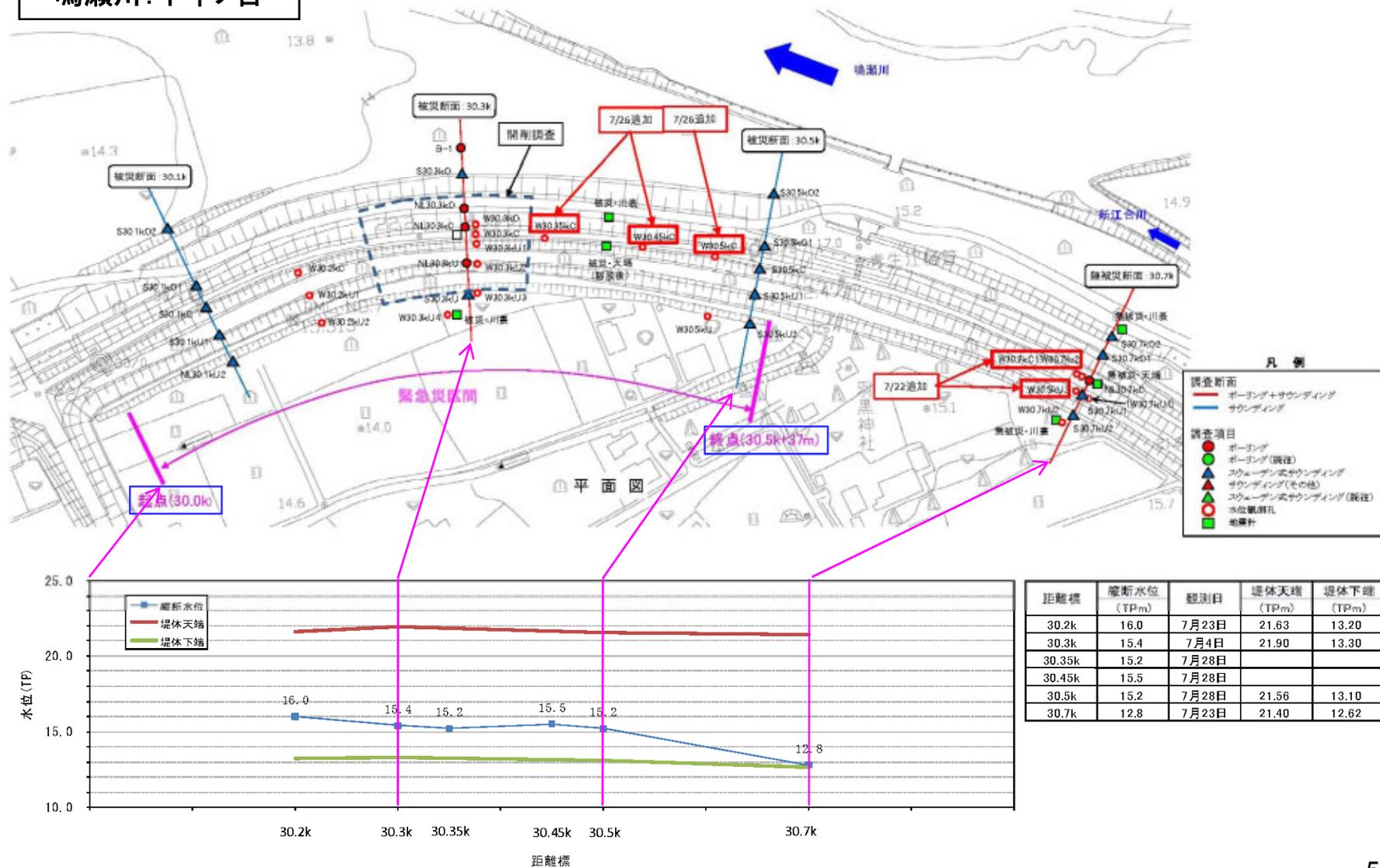
- 阿武隈川(枝野)、鳴瀬川(下中ノ目)において、基礎地盤粘性土、堤体内水位の縦断分布を詳細に計測。
- 阿武隈川(枝野)では、被災区間の堤体下部に地下水位がみられる。
- 鳴瀬川(下中ノ目)では、被災区間の堤体内水位が無被災区間に比べて高いことが分かった。
⇒ 堤体下部の飽和域の大きさ(めり込み沈下量、堤体内水位)を適切に評価することが重要

阿武隈川: 枝野



1.2 飽和域の縦断分布

鳴瀬川：下中ノ目



2. 変形解析手法とその条件設定について

資料—1

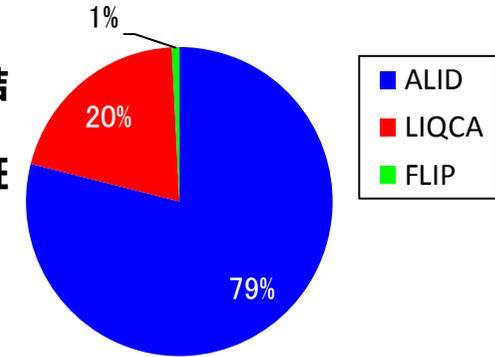
【目的】 今回の地震を踏まえ、静的照査法を用いて従来の耐震性能照査を検証する。

2.1 変形の検証に用いた解析手法の選定

レベル2指針※に基づく耐震性能照査が全て終了している2地整（中部地方整備局、近畿地方整備局）を対象に、採用している変形解析手法の内訳について整理した結果、「有限要素法を用いた自重変形解析法（ALID）」による解析が8割を占めた。そこで、本検証では「有限要素法を用いた自重変形解析法（ALID）」を用いて検証する。

※レベル2指針＝河川構造物の耐震性能照査指針（案）平成19年3月 河川局治水課

※ALIDは、静的解析であり、地震動の継続時間等を考慮することが出来ないものの、河川堤防の耐震性能照査で多数の実績があることから、本検証で用いることとした。



耐震性能照査に用いられた各解析手法の内訳
（中部＋近畿地方整備局の場合）

手法	初期条件	外力	モデル化	計算原理			その他(実務的特徴)						
				盛土の沈下の主な原因			解析・パラメータ設定の難易度	解析費用(解析のみ)	経済性(土質調査・試験まで含む)	実務設計における実績			
				盛土自重による基礎地盤の変形	盛土の作用による慣性力による変形	基礎地盤の圧密沈下							
有限要素法	動的	LIQCA	○	加速度波形を入力	時刻応答解析のため、完全に考慮可能	○	○	○	一般的に難しい	高い	高い	まだ多くない 増えつつある	
		FLIP	○	加速度波形を入力	時刻応答解析のため、完全に考慮可能	○	○	×	一般的に難しい	高い	高い	港湾関係等で 実績多い	
	静的	有限要素法を用いた自重変形解析法(ALID)	○	水平震度(最大加速度)を入力	考慮出来ない	FLから求める	FLとFCIに応じ簡易に設定	○	×	×	やや難しい	中位	中位
最小エネルギー原理	流体力学に基づく永久変形解析法(SOLIFLUK)	○	地震動の大きさを考慮できない	継続時間のみの考慮可能	FLから求める	液状化層の土を強度のない粘性流体と仮定	○	×	×	比較的容易	安い	安い	まだ多くない 増えつつある

出典) 「河川構造物の耐震性能照査指針(案) 一問一答」平成19年11月版 河川局治水課
「河川堤防の地震時変形量の解析方法」平成14年2月 財団法人 国土技術研究センター からの引用に一部加筆・修正

2.2 解析条件の設定

①地下水水位の設定

出水期（多雨期）の平均地下水位程度を水平に設定する。（「河川構造物の耐震性能照査指針（案）一問一答」より）
特に、今回の地震で顕著だった堤体の部分液状化については、地下水の設定が大きな影響を及ぼすと考えられる。これまでは主として基礎地盤の液状化を対象とした照査を実施しており、堤体内の地下水を計測出来ていないケースがある。

[今回] →堤体内の地下水位を観測孔より計測して設定（東北）。実施していないものは既往ボーリング等に示される地下水位を採用。

②外力の設定

レベル2指針に示される水平震度にて設定。
静的照査手法であるため、地震動の時刻歴（継続時間）を考慮することが出来ない。

③非液状化層の剛性低下比の設定

安田らが提案する剛性低下率（ $G_1/G_n=1/40$ ）が方法の一つとして挙げられている。

また、非液状化層に引張応力が生じないように繰返し計算にて求める方法も一例として示されている。

（「河川構造物の耐震性能照査指針（案）一問一答」より）

[今回] →後者の「非液状化層に引張応力が生じないように繰返し計算にて求める方法」にて設定。

④液状化層の剛性低下比の設定

右図に従い、 F_L 値に伴う剛性低下比を自動計算にて設定。

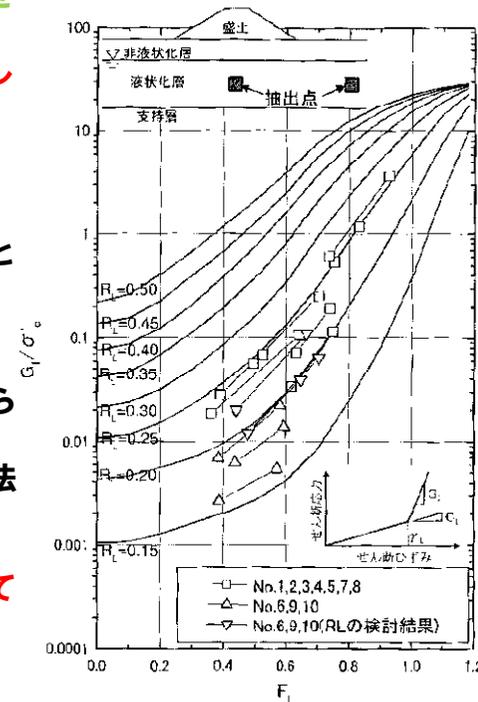


図 1.16 F_L が 0.8 より小さい範囲のせん断剛性比と F_L 、 R_L の関係（豊田ら¹⁶⁾）

「ALID/Winマニュアル
平成19年12月
ALID研究会」より）

※①については、今回の地震では堤体の部分液状化が被災原因の一つと考えられることから、**地下水位の設定条件が沈下量に与える影響**について解析を実施した。

※②については、被災堤防の直近の地震計によると、レベル2で想定している加速度よりも大きいため、**加速度の設定条件が沈下量に与える影響**について解析を実施した。

2. 変形解析手法とその条件設定について

2.3 解析条件設定の確認にあたって用いる断面

・強振動記録があり、土質データが揃っている、江合川右岸26.6k+115m~26.8k+120m（福沼）を例に実施した。

○被災箇所の位置図、状況写真等

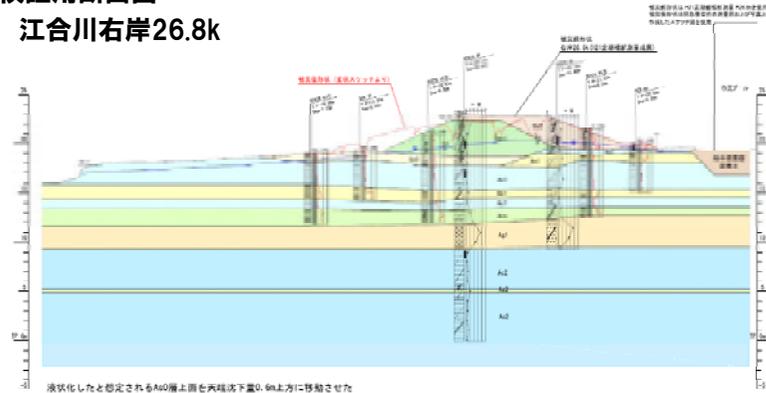


写真①天端には深度2.0m以上のクラック
(裏法は形状を保っている)

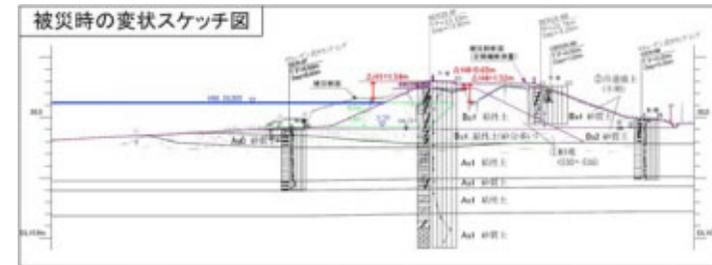


○検証用断面図

江合川右岸26.8k



○被災時の変状スケッチ図



○検討断面の土質構成

江合川右岸26.8k

土層区分	単位 ^{※1} 体積重さ γ _v (kN/m ³)	平均N値 ^{※2} N	原位置有効 ^{※3} 上載荷重 σ _v (kN/m ²)	変形係数 ^{※4} E (kN/m ²)	初期 ^{※5} ポアソン比 ν ₀	地震前の ^{※6} 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 ₂₀₀
Bsc1	15.60	3.0	—	8400	0.333	3200	32	—	—
Bsc1(地下水位以下)	15.60	2.0	62.46	5600	0.333	2100	要素ごとに自動計算	26	0.11
Bs2	15.60	6.0	—	16800	0.333	6300	63	—	—
Bs2(地下水位以下)	15.60	6.0	36.11	16800	0.333	6300	要素ごとに自動計算	50	0.22
As1(1)	19.40	9.0	52.71	25200	0.333	9500	要素ごとに自動計算	57	0.31
As1	15.40	3.0	—	8400	0.333	3200	3200	—	—
As0	19.40	3.0	70.26	8400	0.333	3200	要素ごとに自動計算	31	0.17
As1(2)	19.40	5.0	88.06	14000	0.333	5300	要素ごとに自動計算	37	0.20
Aca	19.40	9.0	111.66	25200	0.333	9500	要素ごとに自動計算	47	0.30
Ag1	20.00	31.0	131.54	8400	0.333	3200	要素ごとに自動計算	82	0.49
Ae2	15.40	4.0	—	11200	0.333	4200	4200	—	—
Ae2	19.60	10.0	162.79	28000	0.333	10500	要素ごとに自動計算	44	0.20

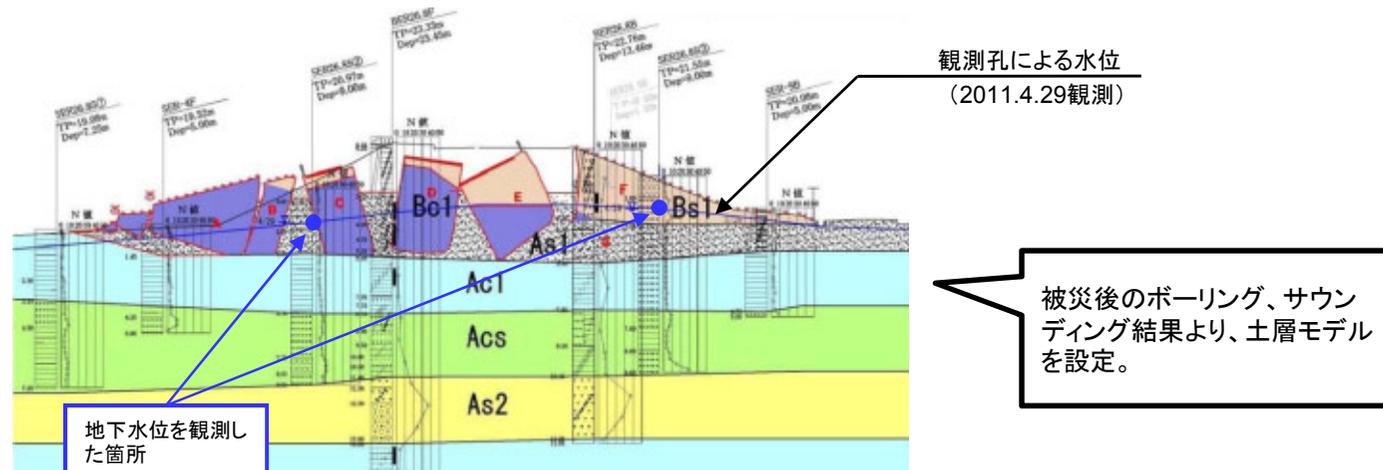
※1 既存調査結果を基に設定した。
 ※2 既存調査結果を基に設定した。
 ※3 $E = 9800(N/\text{mm}^2)$ を基に設定した。
 ※4 地震前のポアソン比は、一律0.333とした。
 ※5 $G_0 = E/(2(1+\nu_0))$ を基に設定した。
 ※6 液状化層より上部の非液状化層については、引張応力が発生しないような値を試行錯誤により設定した。
 液状化層は、 F_v 、 R_{200} の関係から、プログラム内で液状化層の全ての要素に対して自動的に計算した。
 ※7 $21(N \times 100 / (\sigma'_v + 70))^{1.4}$ (Meyerhof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。

- ・地下水位は被災後の調査ボーリングで確認された水位をもとに設定した。
- ・液状化層は、地下水位以下の堤体土(Bsc1, Bs2)及び沖積砂質土層(As0層, As1層)とした。

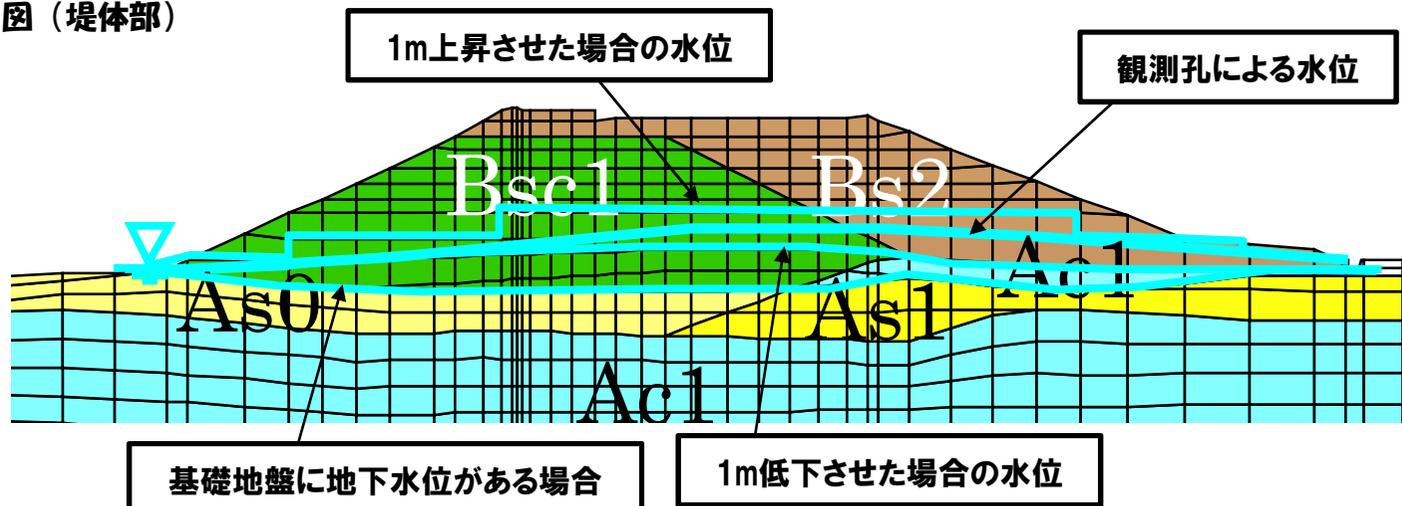
2.3. ① 地下水位の設定条件に関する確認

- ・観測孔による計測水位(4/29観測)に対し、水位を1m低下させた場合と1m上昇させた場合と、基礎地盤に地下水位がある場合(基礎地盤のAs層のみ液状化)の4ケースについて比較した。
- ・外力は全ケース586galとした。

○江合川右岸26.6k+120m~26.8k+120m (福沼地区)



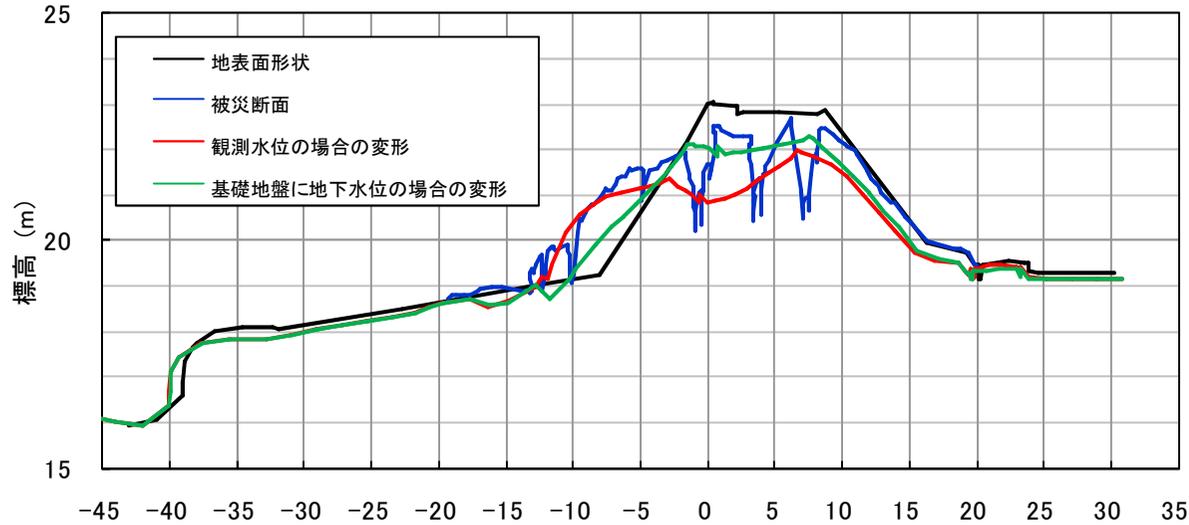
○モデル図 (堤体部)



2. 変形解析手法とその条件設定について

- 水位観測結果(堤体内に地下水位を設定)を用いて変形解析を行った場合、天端における実沈下量が概ね再現されるが、堤内地盤高相当の地下水位を設定して解析を行った場合、沈下量は小さい。

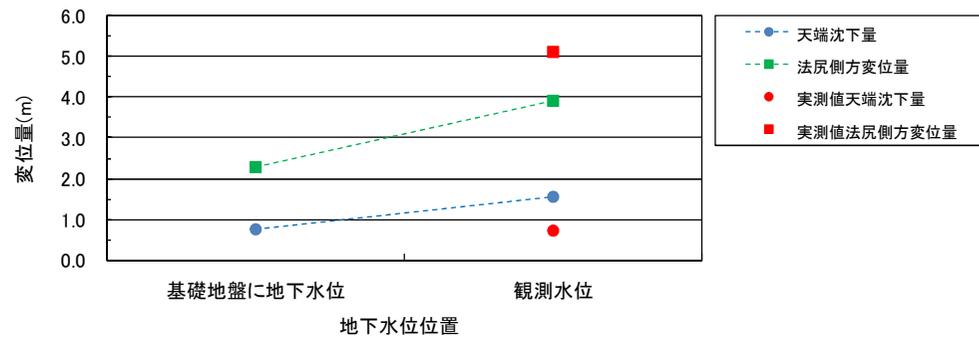
•堤防断面図(変形形状比較)



•変位量の比較

		天端沈下量 (m)	法尻側方変位量 (m)
実測値		0.71	5.12
計算値	観測水位	1.54	3.92
	基礎地盤に地下水位	0.76	2.28

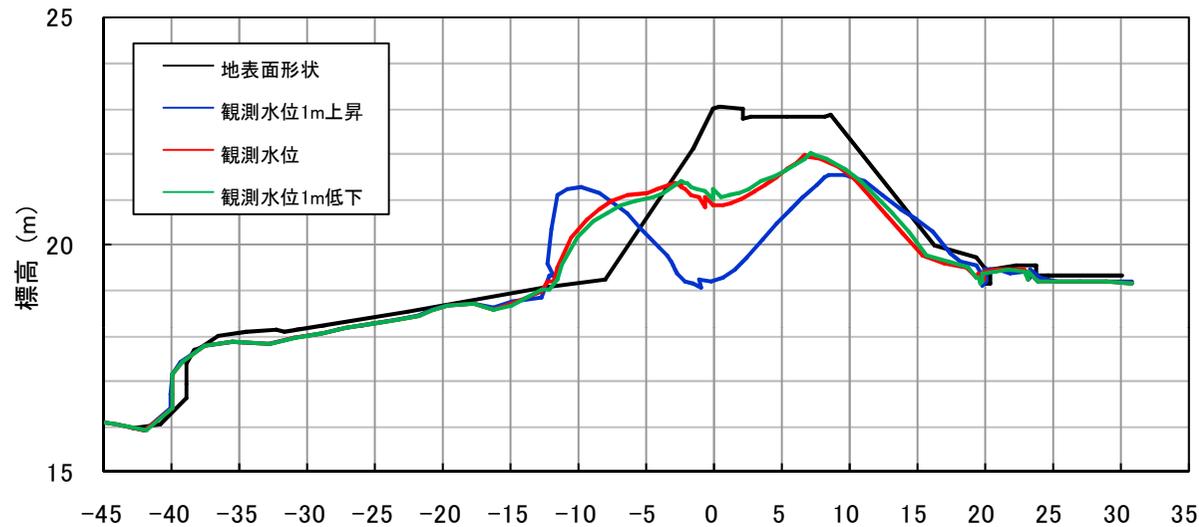
※実測値は、スケッチ図からの読み取りによる。
(沈下量は沈下土量を堤防幅で除した値。水平変位量はスケールアップで求めた。)



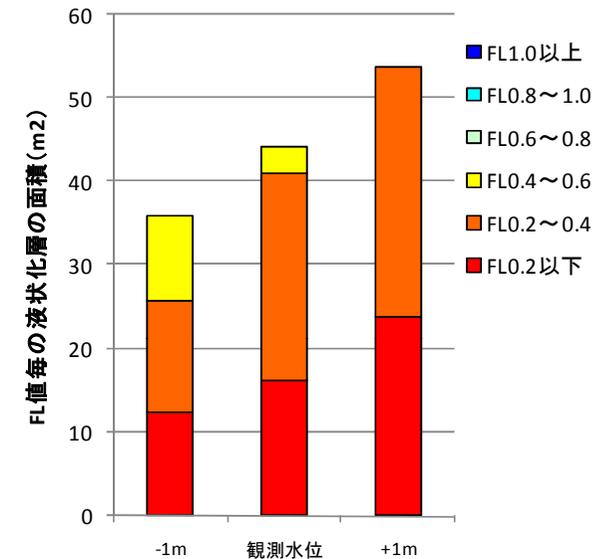
2. 変形解析手法とその条件設定について

- 堤体内の地下水位を高め(この場合観測水位+1m)に設定した場合、天端沈下量の変化は大きく出る。
- これは、地下水位を高くすることにより、堤体直下の液状化層の面積が増え、加えてFL値の小さい範囲の面積割合が増えるためと考えられる。
- これらの結果から、変形解析を行うにあたっては、**地下水位の設定を適切に行い、堤体の部分液状化を解析に反映させることが必要**である。

• 堤防断面図(変形形状比較)



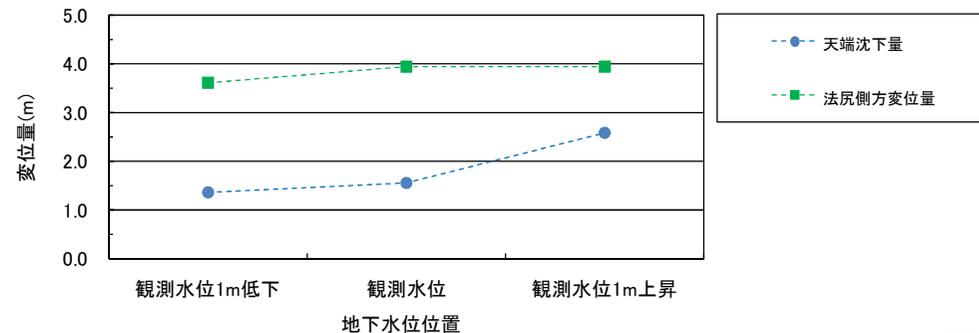
• FL値毎の液状化層の面積比較



※堤体直下の液状化層に限る
 ※川表法尻～川裏法尻までの範囲とする

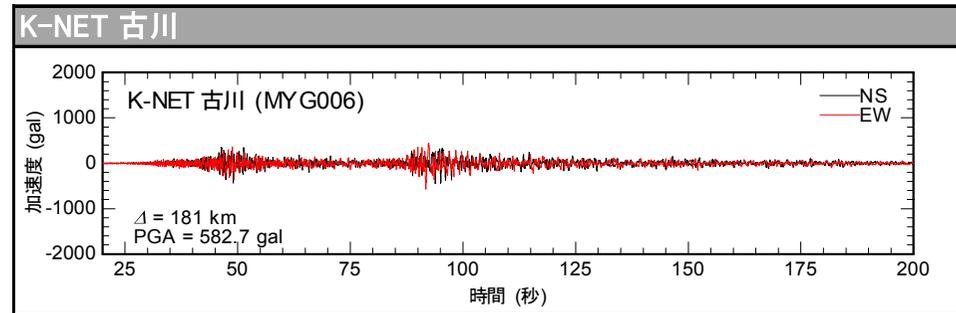
• 変位量の比較

		天端沈下量 (m)	法尻側方変位量 (m)
計算値	観測水位1m上昇	2.57	3.93
	観測水位	1.54	3.92
	観測水位1m低下	1.35	3.60



2. 2. ② 地震外力の設定条件に関する確認

- 近傍のK-Net観測所(古川)で観測された最大加速度586galと、400gal(L2指針の設計震度0.4に相当)、およびその中間にあたる500galの3種類の外力にて沈下計算を実施。
- 地下水位の位置は、観測孔による計測結果を用いた。

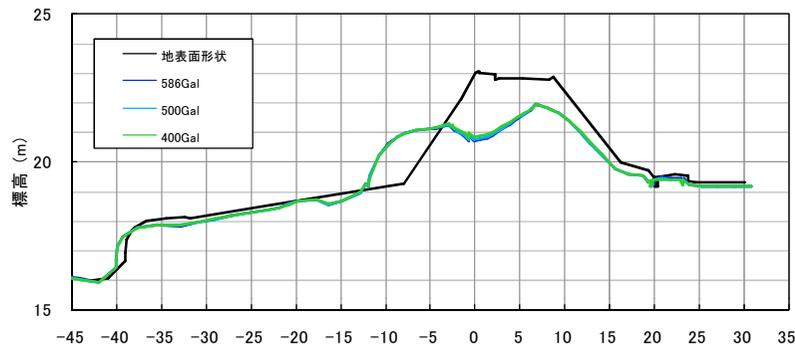


※最大加速度の値は、水平2成分の合成値。

2. 変形解析手法とその条件設定について

- 586gal、500gal、400galの計算結果を比較すると、**加速度の違いによる沈下量の差異はほとんどない。**
- 加速度が大きくなるにつれFL値が小さい範囲の面積割合が増えるが、**FL0.6以下でみると面積の増加はほとんどない。**
- したがって、レベル2で想定している加速度は、これを越える大規模地震動での堤防変形も概ね評価できる。

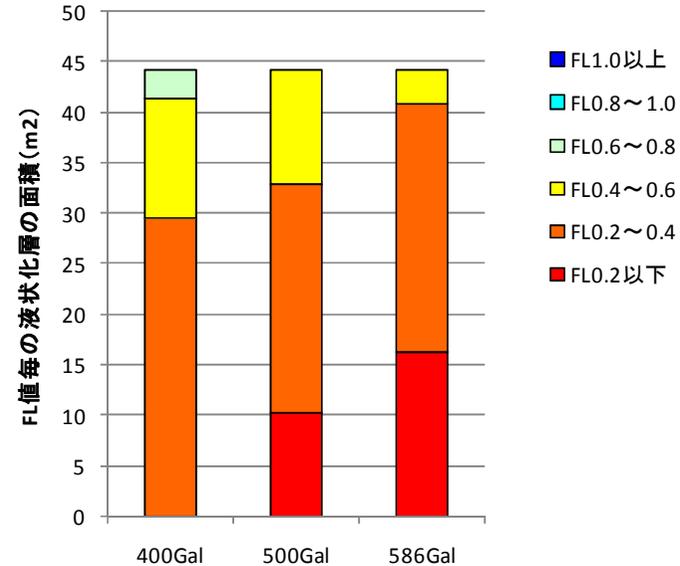
変形形状および変位量の比較



		天端沈下量(m)	川表法尻側方変位量(m)
計算値	400gal	1.46	3.89
	500gal	1.51	3.91
	586gal	1.54	3.92

※実測値は、スケッチ図からの読み取りによる。
 (沈下量は沈下土量を堤防幅で除した値。
 水平変位量はスケールアップで求めた。)

FL値毎の液状化層の面積比較



地下水位以下の液状化層厚

FL	400Gal	500Gal	586Gal
1.0以上	0.00	0.00	0.00
0.8~1.0	0.00	0.00	0.00
0.6~0.8	0.00	0.00	0.00
0.4~0.6	0.00	0.00	0.00
0.2~0.4	1.95	1.10	0.90
0.2以下	0.00	0.85	1.05
合計	1.95	1.95	1.95

※堤体直下の液状化層に限る
 ※川表法尻位置での厚さ

※堤体直下の液状化層に限る
 ※川表法尻～川裏法尻までの範囲とする

強振動記録が得られている箇所、大中規模の被災箇所、液状化による被災パターンの観点より、以下のケースを選定し、ALIDを用いて検証を行った。

- ケース1) 江合川 右岸26.6k+115m～26.8m+120m (福沼) [大規模被災・パターン I + II]
- ケース2) 利根川下流 右岸27k+80m～27k+150m (小見川) [中規模被災・パターン I]
- ケース3) 吉田川 右岸16.0k～16.2k付近 (山崎振動観測所) [中規模被災・パターン I]
- ケース4) 江合川 右岸14.0k+43m～14.6k+43m (中島乙) [大規模被災・パターン II]
- ケース5) 利根川下流 右岸39.0k+64m～39.5k+79m(佐原イ) [大規模被災・パターン I]

パターン	液状化の種類
I	基礎地盤の液状化
II	堤体の部分液状化
I + II	上記の複合型

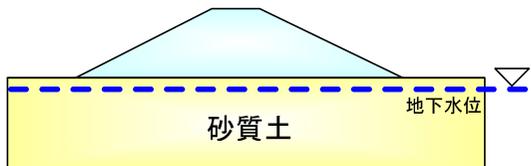
3. 代表被災箇所における検証

解析結果

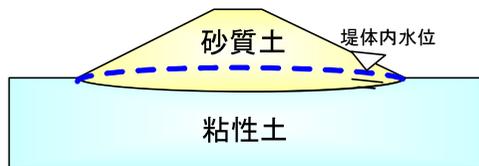
検討ケース	検討ケースとなる被災箇所		モデル断面の距離標	液状化パターン			解析に用いる外力	モデル化の情報	解析結果		
				I	II	I + II				天端沈下量 (m)	法尻水平変位量 (m)
1	東北	江合川右岸 26.6k+120m～26.8k+120m (福沼地区)	26.8k			○	586gal 400gal (500gal)	被災後の詳細調査に基づき設定	実測値	0.71	5.12(川表)
									計算値	1.54	3.92(川表)
2	関東	利根川下流右岸 27k+80m～27k+150m (小見川)	26.5k	○			188gal	地震前の調査結果に基づき設定 地下水位は法尻付近にあると仮定	実測値	1.20	4.32(川表)
									計算値	1.00	1.95(川表)
3	東北	吉田川右岸 山崎観測所位置	16.0k	○			440gal	観測所設置時のボーリング結果をもとに設定 地下水位は、上記柱状図を参考に、堤体直下のAc1層上面にあると仮定	実測値	0.80	2.60(川表)
									計算値	1.98	2.03(川表)
4	東北	江合川右岸 14.0k+43m～14.6k+43m (中島乙地区)	14.4k+50m		○		500gal	被災後の詳細調査に基づき設定	実測値	1.33	1.25(川表)
									計算値	0.76	0.00(川表)
5	関東	利根川下流右岸 39.0k+64m～39.5k+79m (佐原イ地先)	39.5k+5m	○			310gal	被災後の詳細調査に基づき設定	実測値	0.92	1.49(川表)
									計算値	2.11	3.87(川表)

注)現在までの情報に基づく条件設定、モデル化による解析結果であり、今後、結果が見直される可能性がある。

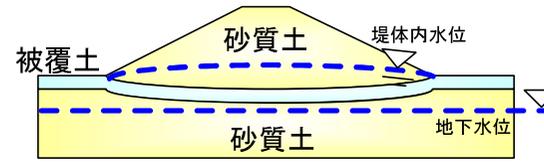
液状化パターンⅠ 基礎地盤液状化



液状化パターンⅡ 堤体の部分液状化

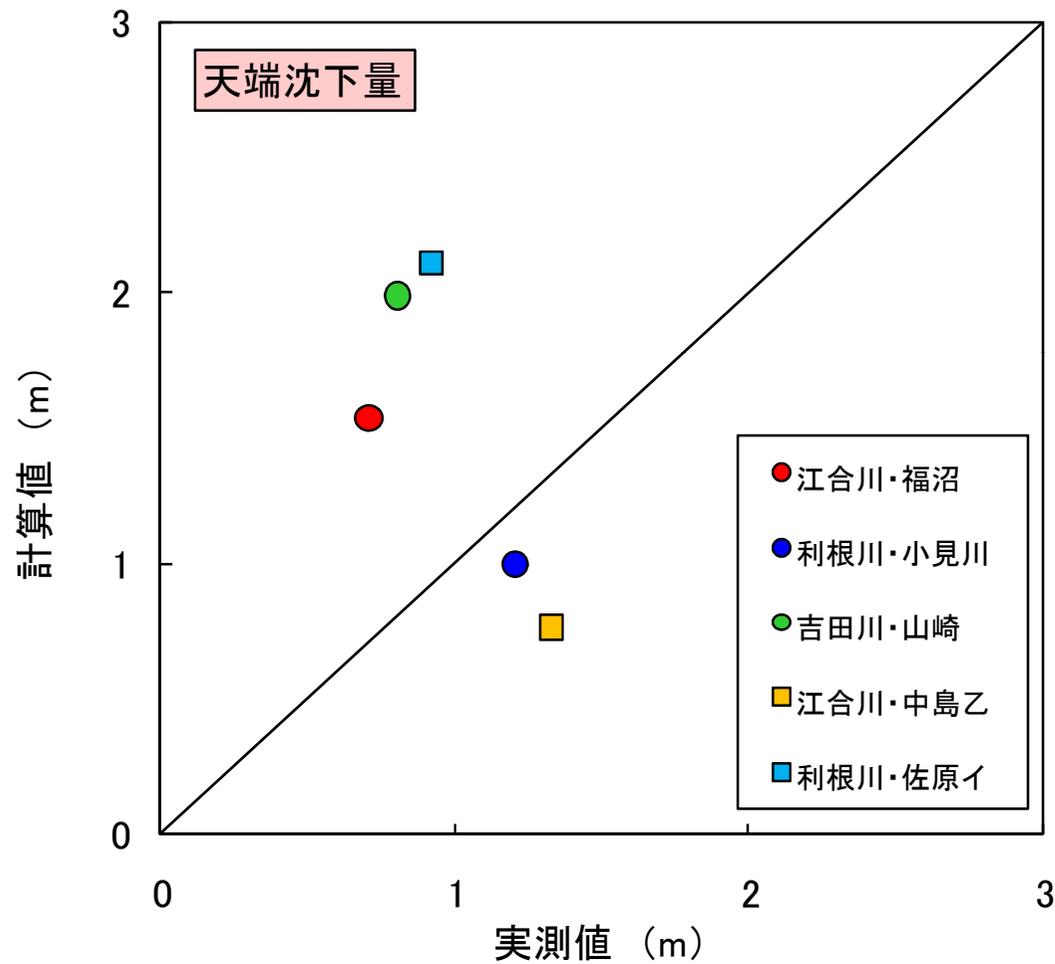


液状化パターンⅠ+Ⅱ 左記の複合



検証まとめ

・今次の地震の大規模な被災箇所より5箇所を選定して、照査指針(案)に規定された変形解析手法である「有限要素法を用いた自重変形解析法(ALID)」によって堤防の変形を再現したところ、**堤防天端沈下量については著しく実測値と異なる結果ではなかった。**



- ・今次の地震による堤防被災の調査では、現在の耐震性能照査で想定している被災と異なる被災現象は確認されていないことから、当面の耐震性能照査の緊急性を鑑みると、「**河川構造物の耐震性能照査指針(案)**」に規定された河川堤防の照査の考え方を直ちに改める必要はないと考える。
- ・ただし、照査の実施に当たっては、今次の地震で顕著であった堤体内部の液状化による被災現象を評価するため、**堤体内の水位(縦横断方向に確認が必要)**を含めて**地下水位を適切に把握**した上で行う必要がある。
- ・耐震性能照査の効率化を図るために、**次の事項については引き続き検討**を行い、学会等の研究動向も踏まえつつ、耐震性能照査法等の改善に順次取り組んでいく必要がある。
 - ① 地震動の継続時間が堤防変形に及ぼす影響や液状化判定の見直し
 - ② 堤体の部分液状化による堤防変形のメカニズム