

L2地震下で顕著になる河川堤防直下の 軟弱粘性土の揺すりこみ沈下挙動

名古屋大学大学院工学研究科 ○中井 健太郎
名古屋大学減災連携研究センター 野田 利弘



日本の都市機能は低平地、沖積平野に集中している。
これら地域の住民を洪水・氾濫・水害から守るのが、河川堤防である。



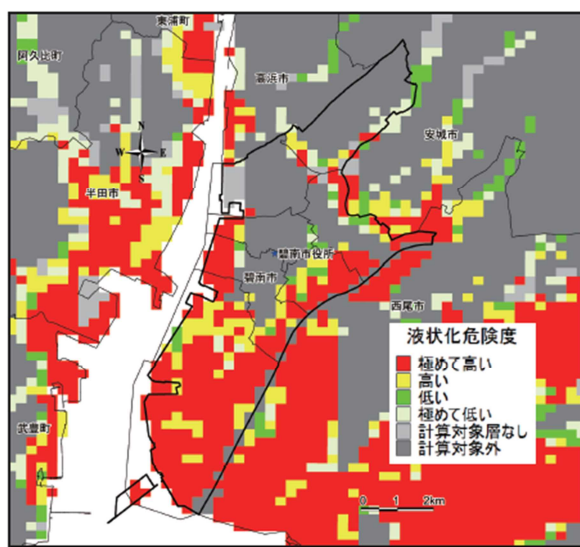
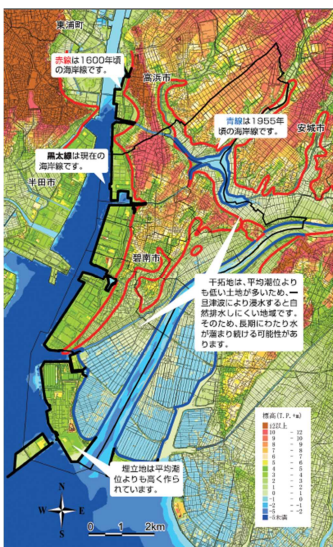
河川堤防が被災し、決壊すると、甚大な浸水被害につながってしまう

特に、南海トラフ巨大地震の発生が危惧される
太平洋岸地域においては、河川堤防の耐震性を評価することが重要

研究背景

調査対象は、碧南市の蜷川とした。

埋立地・干拓地が広域に拡がっており、液状化危険度が高い。



研究背景

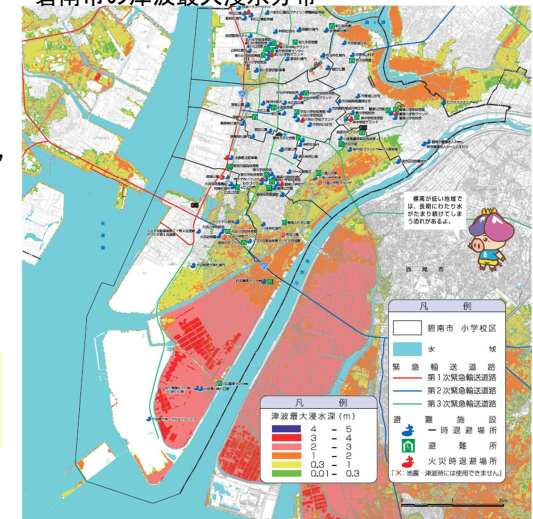
調査対象は、碧南市の蜷川とした。

一級河川に比べて、二級河川の耐震化率は不十分であることが懸念。

L2地震動(南海トラフ巨大地震)
が発生した際のハザードマップは、
堤防高さ一律75%喪失した場合を
想定して作成されている。

現状の耐震性能照査にも
大きな問題点が2つ考えられる。

碧南市の津波最大浸水分布



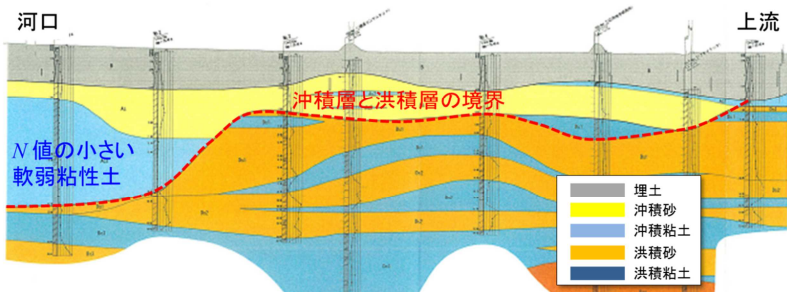
碧南市(2017):洪水・高潮ハザードマップ(日本語)、洪水浸水深分布図

1.粘性土地盤の被害が考慮されていない点

耐震性能照査を行う上で、基礎地盤および堤体の液状化による被害のみが対象となっている。

2.縦断面の地層不整形性が考慮されていない点

内閣府や各自治体が公表している被害予測は、離散的なボーリングデータに基づく鉛直一次元的評価に留まっており、地盤変形解析においても水平成層地盤を仮定することがほとんどである。



愛知県：平成28年度_緊急防災対策河川工事の内地質調査業務委託報告書

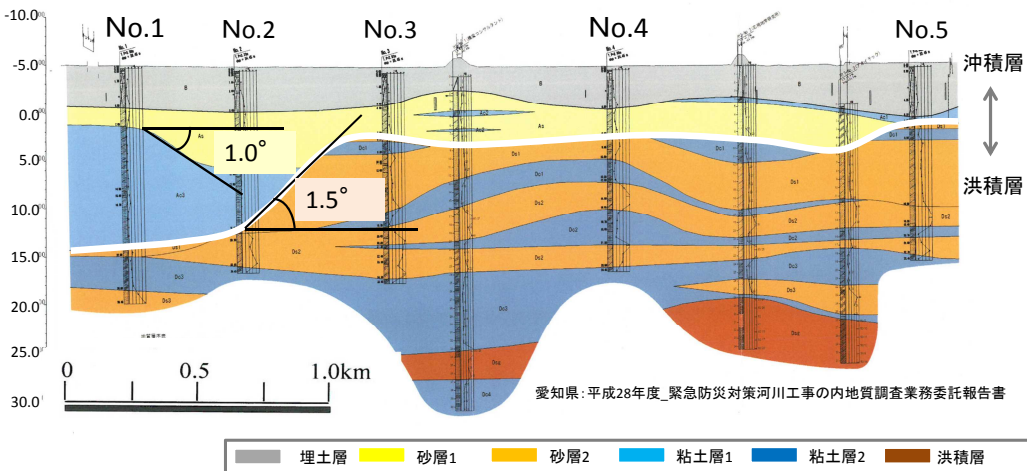
左岸は地震動対策が実施済み、右岸の地震動対策を実施中。

川表側への矢板打設



愛知県：平成28年度_緊急防災対策河川工事の内地質調査業務委託報告書

縦断方向断面図



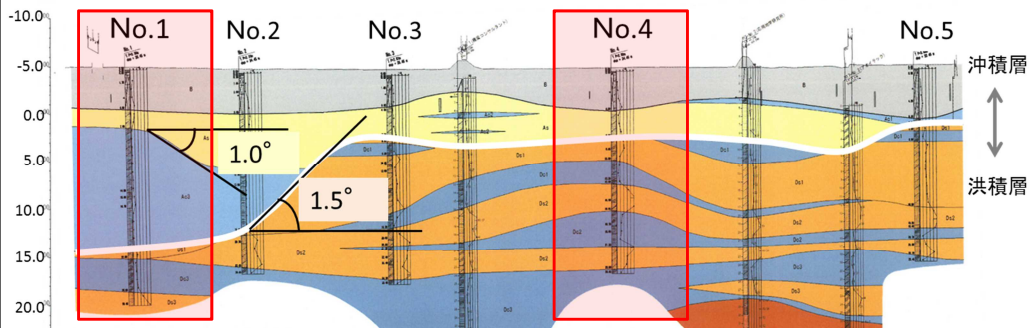
愛知県：平成28年度_緊急防災対策河川工事の内地質調査業務委託報告書

横断面解析

L1地震動に対する耐震性照査
L2地震動に対する耐震性照査
No.1とNo.4を対象とする。

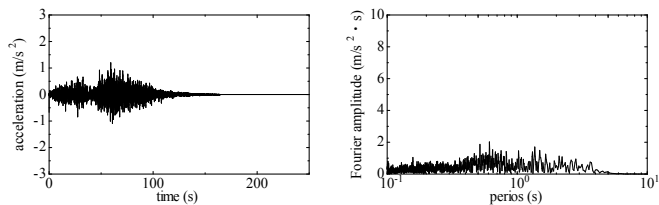
縦断面解析

地層不整形性による影響を検証。
一次元モデルと比較する。



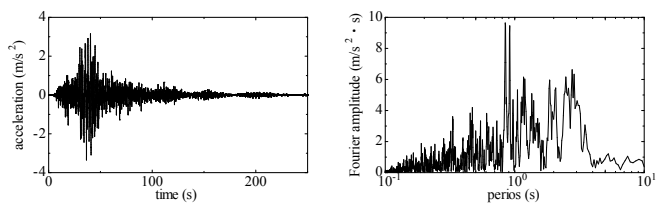
No.1(下流)は軟弱粘土層が多く占める
No.4(中流)は軟弱粘土層がなくなり、沖積層厚も薄い

1. 地方港湾の常滑港におけるL1地震動 ※国土交通省国土技術政策総合研究所作成



国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究所 <http://www.ysk.nitlm.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>

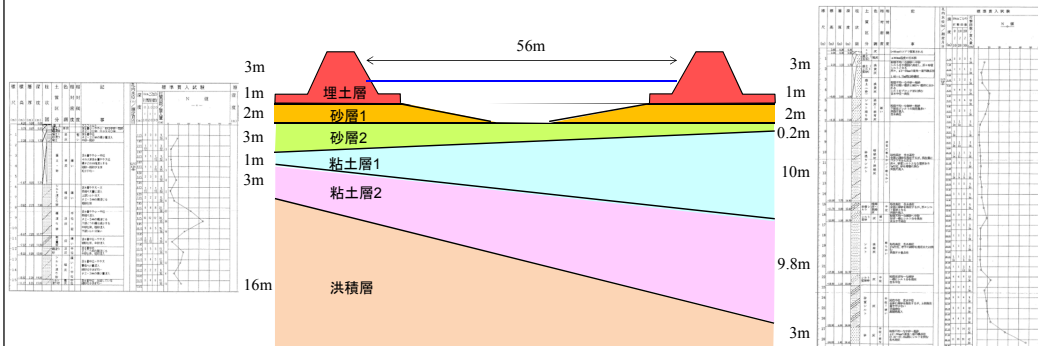
2. 解析対象地点周辺で想定される南海トラフ地震(L2地震動) ※内閣府公開データをもとに、長周期成分を含む想定地震動を作成



内閣府:南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告
福井優太, 倉田和己, 平井敬, 福和伸夫: 仮想現実技術と振動台を組み合わせた超高層建物の地震応答体験環境の構築, 日本建築学会2017年度大会学術講演梗概集 2017(構造II) pp.407-408, 2017.

左岸
H9-No.1

右岸
H28-No.1

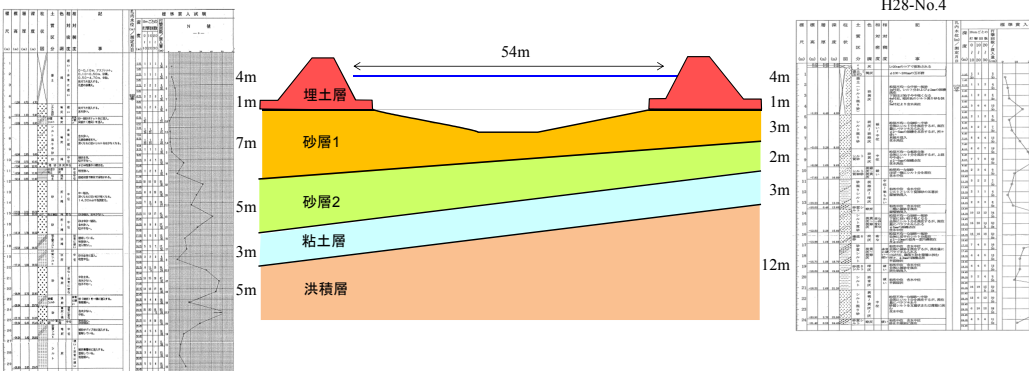


地層	平均N値	単位体積重量	液性限界	推定液性限界	細粒分含有率	粘土分含有率	層中央部での土被り圧	推定相対密度
B	6.0	19		25.4	8.5	5.0	22.5	62.7
S1	7.4	17		25.1	7.0	3.0	7.0	69.7
S2	27.5	17		25.7	13.0	7.0	19.6	123.2
C1	1.7	14	60.5	48.9	77.0	40.7	30.6	71.9
C2	3.2	14	109.5	97.6	98.3	71.0	54.4	72.3
D	13.0	19		49.6	92.8	41.3	109.9	84.3

※ B層以外は川の中央部(両側の平均値)で算出

左岸
H7-No.2

右岸
H28-No.4



地層	平均N値	単位体積重量	液性限界	推定液性限界	細粒分含有率	粘土分含有率	層中央部での土被り圧	推定相対密度
B	6.9	19		25.4	8.1	5.0	22.5	65.1
S1	7.0	17		25.7	14.7	7.0	17.5	72.9
S2	25.0	19		26.4	24.8	10.0	50.8	106.1
C	10.2	19	40.0	42.2	72.6	34.6	80.0	80.0
D	32.2	19		25.7	14.2	7.0	131.8	93.5

※ B層以外は川の中央部(両側の平均値)で算出

No.1 下流

	B	As1	As2	Ac1	Ac2	De
NCLの切片 N	1.66	1.65	1.66	2.15	2.83	1.99
弾塑性 限界状態定数 M	1.58	1.58	1.58	1.52	1.45	1.54
圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.047	0.046	0.048	0.15	0.30	0.12
膨潤指数 \bar{e}	0.0047	0.0046	0.0048	0.015	0.03	0.012
ポアソン比 ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$-D_p^*$ と $ D_p^* $ の割合 c_p	1.0	1.0	1.0	0.2	0.2	0.2
発達 構造劣化指数 $a(b=c=1.0)$	1.34	1.35	1.33	0.57	0.17	0.74
展則 正規圧密土化指数 m	1.28	1.26	1.30	7.44	87.3	4.31
戻則 回転硬化指数 br	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
戻則 回転硬化限界面 m_s	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
初期値 構造の程度 $1/R^*$	2.70	2.53	1.55	4.06	4.04	3.47
初期値 過圧密比 $1/R_0$	23.7	26.9	70.6	2.83	2.87	4.07
初期値 応力比 η_0	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545
初期値 異方性の程度 ϵ_0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

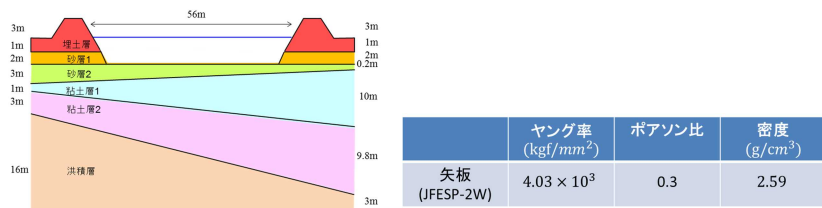
No.4 中流

	B	As	Ds	Dc	D
NCLの切片 N	1.66	1.66	1.67	1.86	1.66
弾塑性 限界状態定数 M	1.58	1.58	1.58	1.55	1.58
圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.047	0.047	0.050	0.091	0.047
膨潤指数 \bar{e}	0.0047	0.0047	0.0050	0.0091	0.0047
ポアソン比 ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$-D_p^*$ と $ D_p^* $ の割合 c_p	1.0	1.0	1.0	0.2	0.2
発達 構造劣化指数 $a(b=c=1.0)$	1.34	1.34	1.30	0.94	1.34
展則 正規圧密土化指数 m	1.28	1.28	1.34	2.65	1.28
戻則 回転硬化指数 br	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
戻則 回転硬化限界面 m_s	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
初期値 構造の程度 $1/R^*$	2.63	2.45	1.81	3.66	2.03
初期値 過圧密比 $1/R_0$	27.78	28.50	51.80	3.59	41.33
初期値 応力比 η_0	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545
初期値 異方性の程度 ϵ_0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

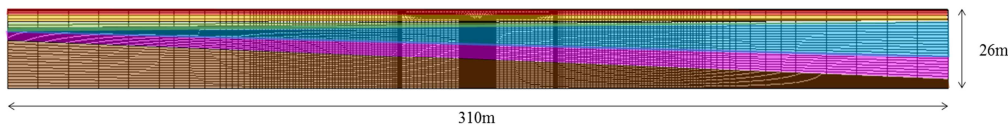
弾塑性・発達則パラメータおよび初期状態を、中島(2015)に倣って、ボーリング調査結果および物理特性から推定する。

中島秀: 原位試験結果に基づく弾塑性性状の推定方法とそれを用いた地震中～地震後有効応力解析, 名古屋大学卒業論文 2014.

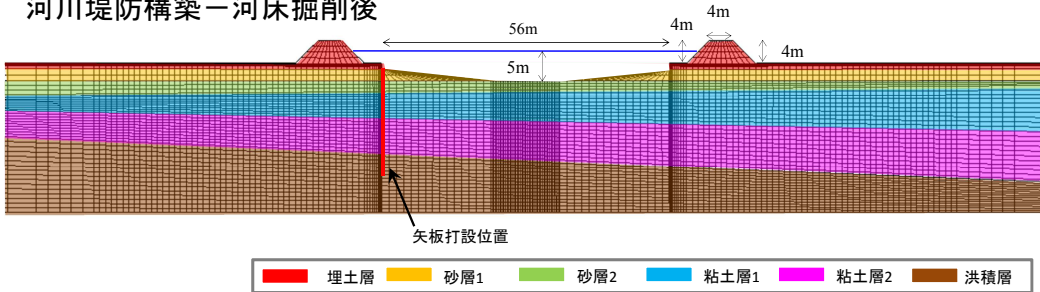
No.1(下流断面)の解析モデル



初期メッシュ



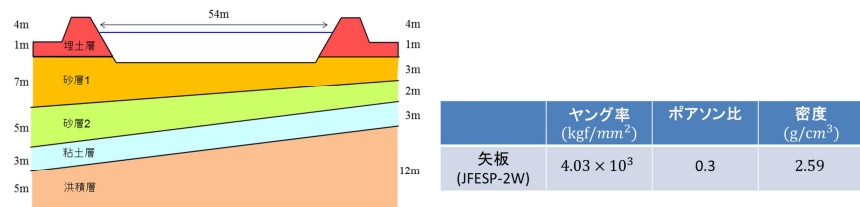
河川堤防構築—河床掘削後



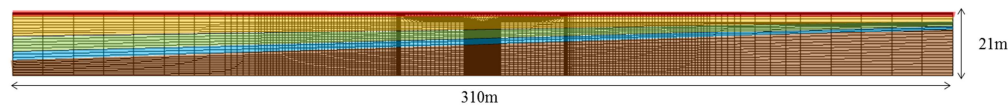
矢板打設位置



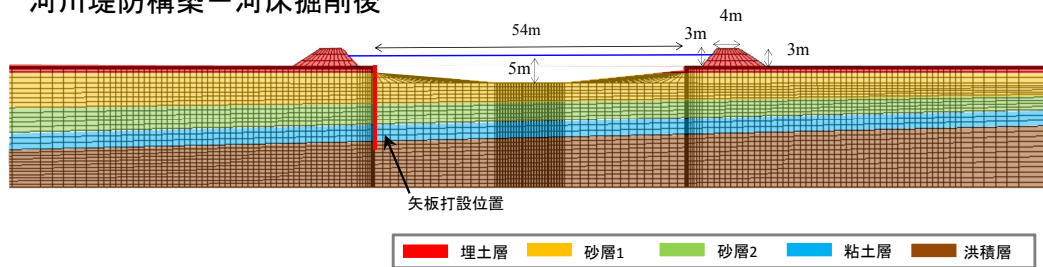
No.4(中流断面)の解析モデル



初期メッシュ



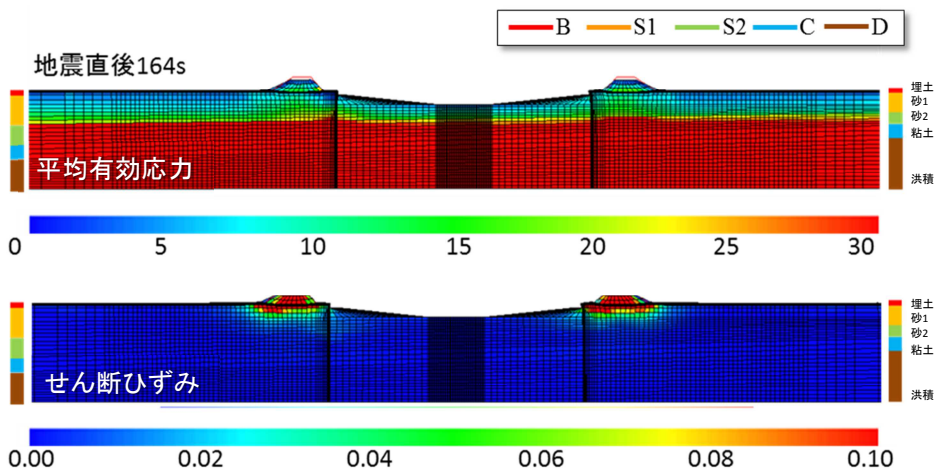
河川堤防構築—河床掘削後



矢板打設位置



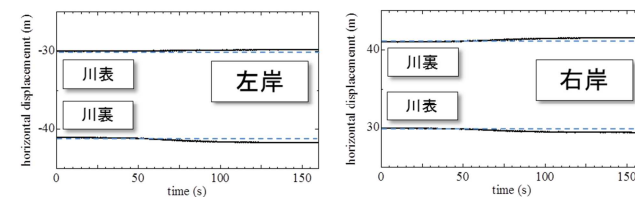
No.4(中流断面)の解析結果 ~L1地震動~



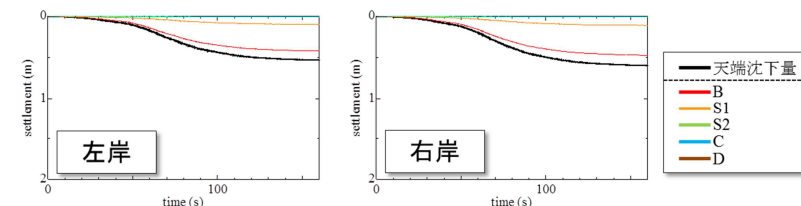
□ 砂1層の平均有効応力が低下し(液状化), 堤体および堤防直下の砂1層でせん断ひずみが発生.

□ 堤防周辺や地盤深部に変形は生じていない.

No.4(中流断面)の解析結果 ~L1地震動~



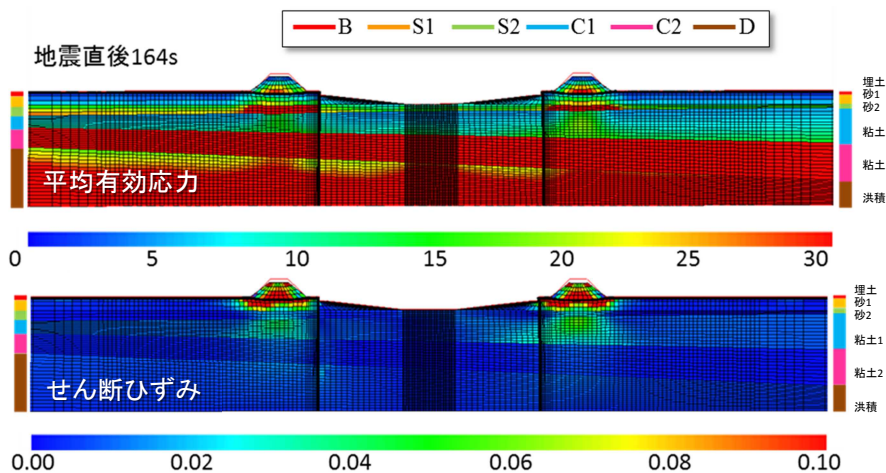
□ 右岸堤防(無対策), 左岸堤防(矢板あり)ともに, 堤体法尻のストレッチングがほとんど生じない.



□ 天端高さは左岸で0.5m(16%), 右岸で0.6m(20%)減少。(大部分が盛土)
 □ 解析では盛土部を飽和土としてモデル化している(豪雨直後のような状態)ため, 変形は大きめだと考えられる。しかしながら, 堤体の沈下量は小さく, L1地震動では河川堤防は健全性を保つ.

No.1(下流断面)の解析結果 ~L1地震動~

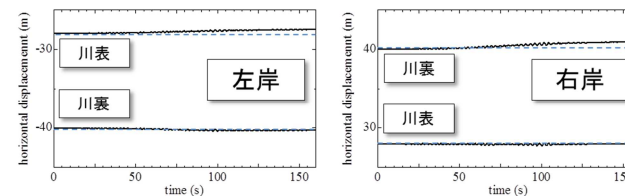
20



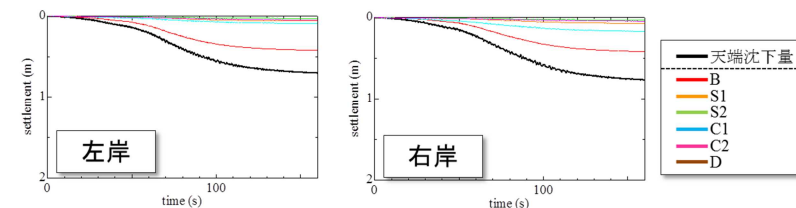
- 中流断面と同じく、砂1層の平均有効応力が低下し(液状化), 堤体および堤防直下の砂1層でせん断ひずみが発生.
- 軟弱な粘土1層でも、少しの平均有効応力低下とひずみの発生が見られるが、その程度は小さく、影響は小さい.

No.1(下流断面)の解析結果 ~L1地震動~

21



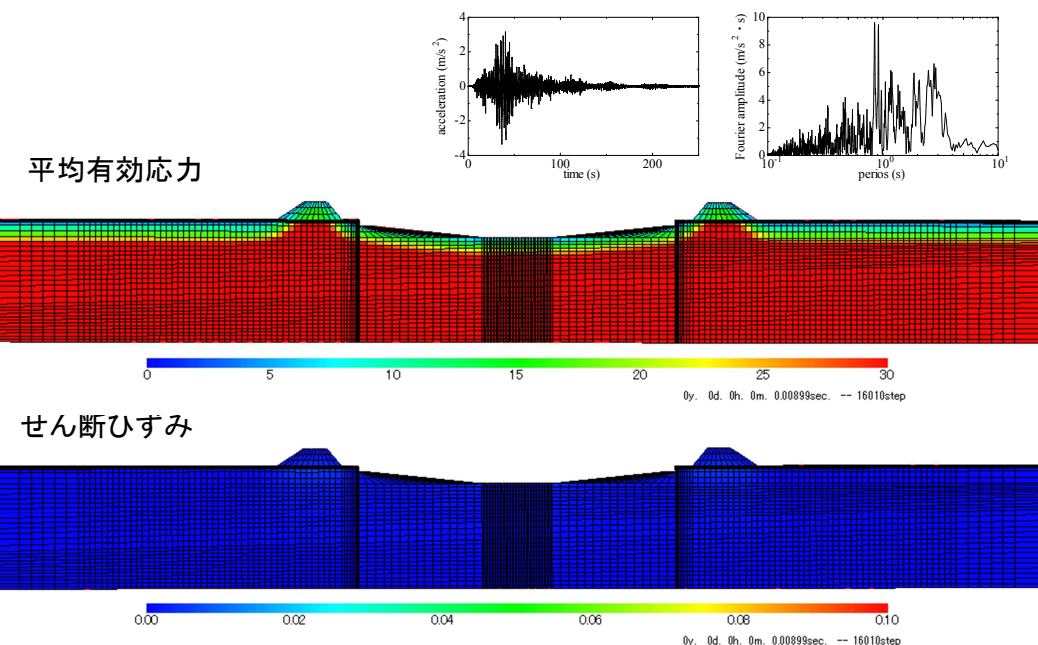
- 中流と同様に、両岸ともに、堤体法尻のストレッチングがほとんど生じない.



- 天端高さは右岸・左岸ともに0.75m(18%)減少.
- 沈下量は小さく(沈下のほとんどは堤体自身で発生), L1地震動では河川堤防は健全性を保つ.

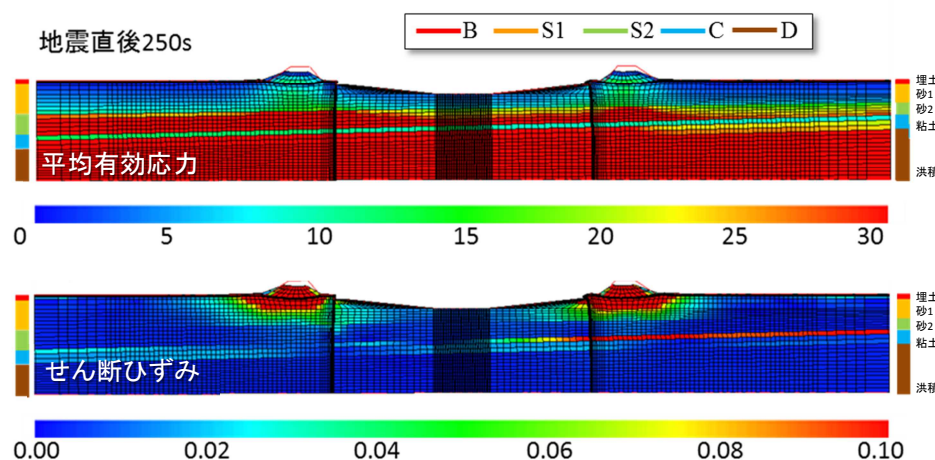
No.4(中流断面)の解析結果 ~L2地震動~

22



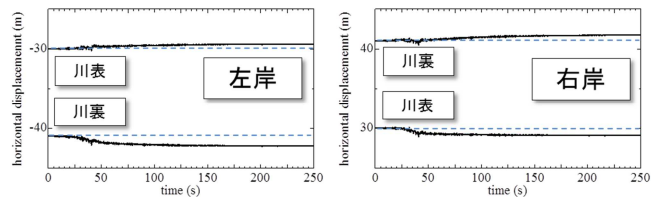
No.4(中流断面)の解析結果 ~L2地震動~

23

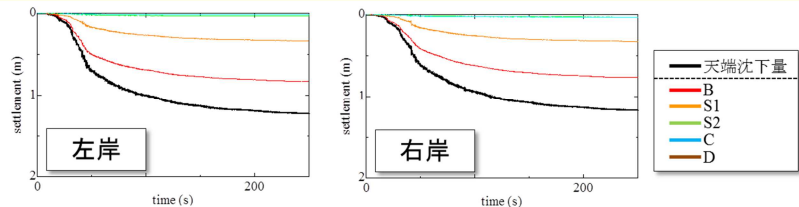


- L1地震動に比べ、埋土層および砂層1の平均有効応力低下, 堤防自身と堤防直下のせん断ひずみは増大
- 中流断面では、「埋土層および砂層1の液状化」が甚大化.

No.4(中流断面)の解析結果 ~L2地震動~

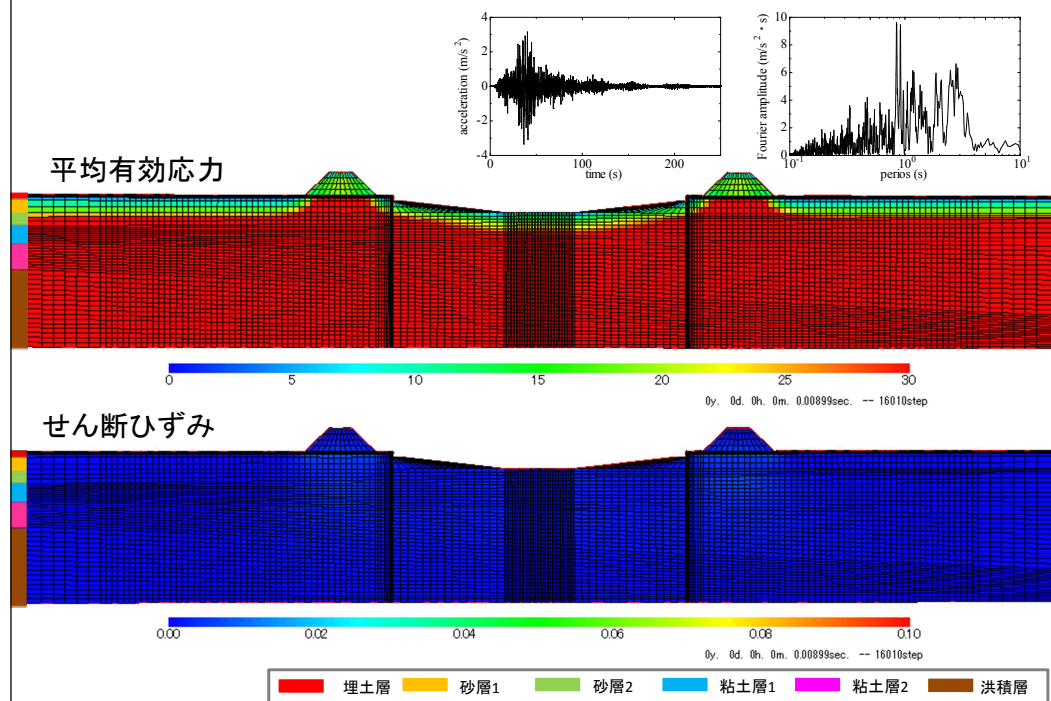


□ 両岸ともに、徐々に法尻幅が広がっていく。

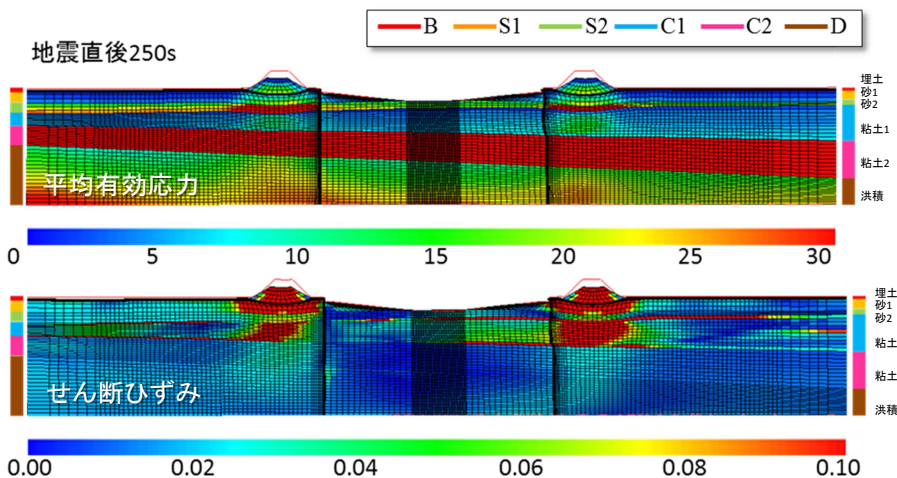


- 天端高さは左岸で1.2m(40%), 右岸で1.1m(36%)減少.
- 埋土に加えて, 砂1層の沈下が大きい.
→砂層で液状化して, 地震中に「揺すりこみ沈下」が発生したため,
- 沈下量は, L1地震動よりも大きくなるが, 内閣府等が浸水被害予測で用いる75%喪失にまでは至らない.

No.1(下流断面)の解析結果 ~L2地震動~

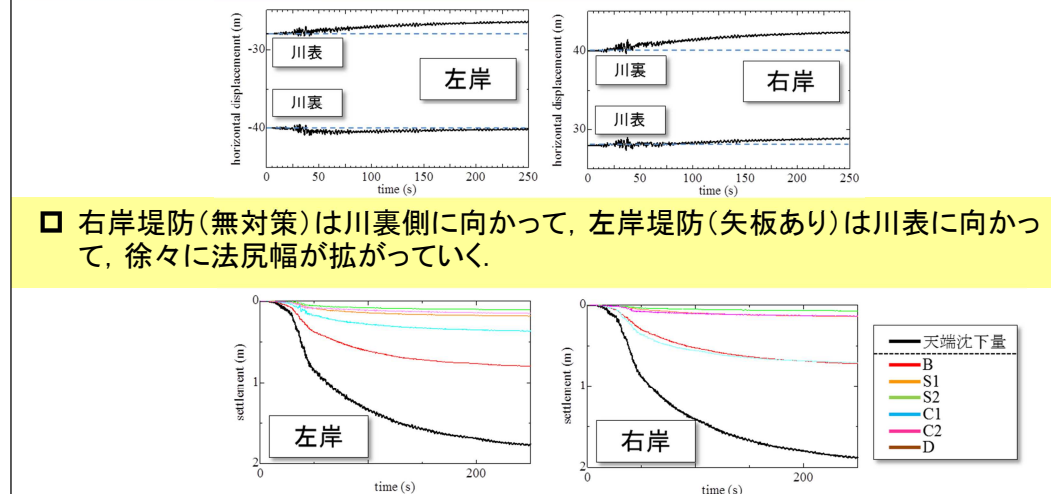


No.1(下流断面)の解析結果 ~L2地震動~



- 埋土層および砂1層だけでなく, 粘土1層においても平均有効応力が低下し, 堤防直下で大きなせん断ひずみが発生.
⇒粘性土であっても, 軟弱かつ偏荷重を受けている場所(堤防直下)では, 長時間強い揺れが継続すると, 地盤が乱されて被害が発生してしまう.

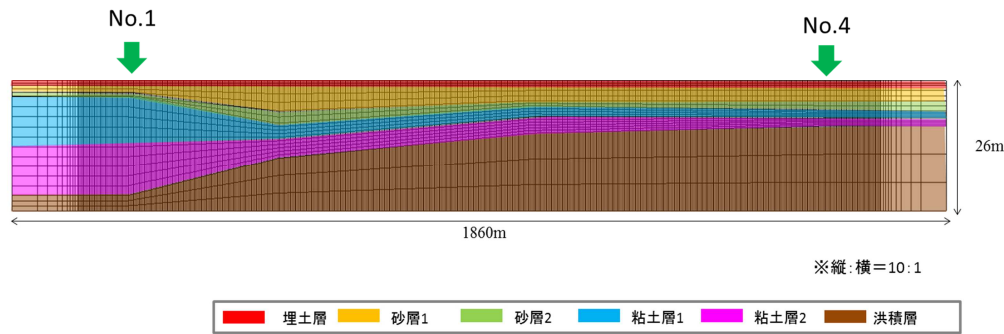
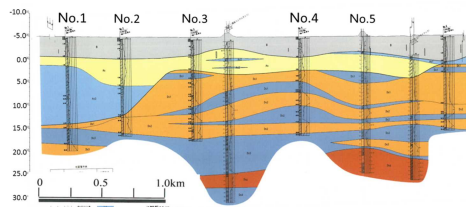
No.1(下流断面)の解析結果 ~L2地震動~



□ 右岸堤防(無対策)は川裏側に向かって, 左岸堤防(矢板あり)は川表に向かって, 徐々に法尻幅が広がっていく。

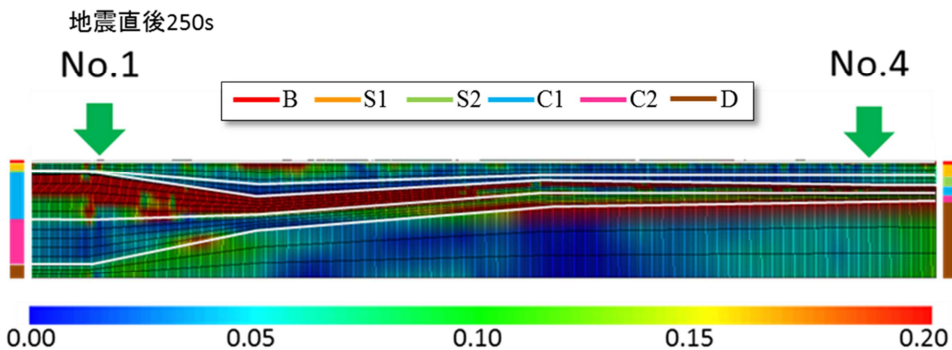
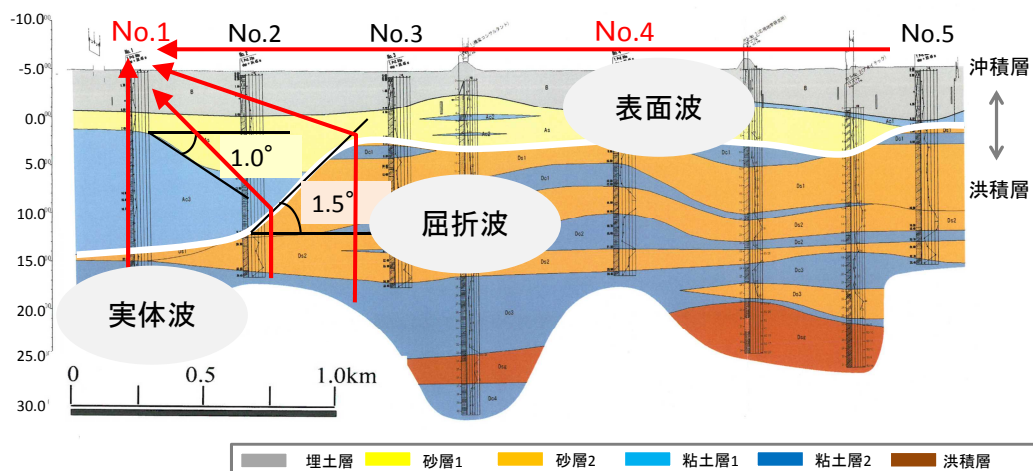
- 天端高さは左岸で1.7m(42%), 右岸で1.9m(47%)減少.
- 粘土層が乱されることによって, 大きな沈下を生じる.
- 沈下量は, L1地震動よりも大きくなるが, 内閣府等が浸水被害予測で用いる75%喪失にまでは至らない.

以下の解析モデルと、
下流(No.1), 中流(No.4)地点での
一次元応答解析による結果を比較し、
縦断面の地層不整形性の影響を
検証する。

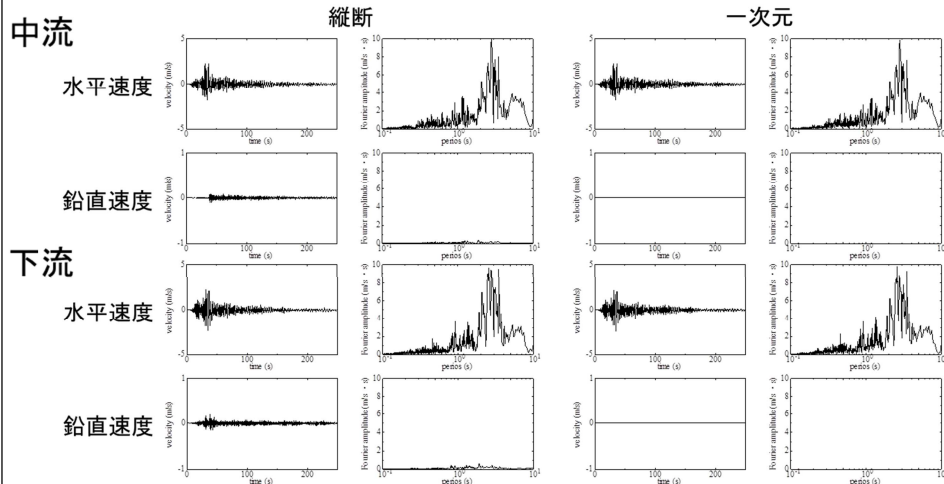


※基礎地盤のみで河川堤防はモデル化していない

横断面解析では考慮できない
表面波の生成や表面波と実体波の干渉の影響があるのかを検証。



- 軟弱な粘土層1での、せん断ひずみが大きい。
- 表層のせん断ひずみが、局所的に大きい地点も観察される。
⇒ 基盤や各地層境界の傾斜によって、地震動が複雑に屈折し、特定の場所で干渉・集中したためだと考えられる。



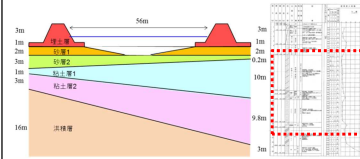
- 縦断面解析と一次元解析における水平速度に違いがない。
⇒ 不整形の影響がほとんど生じなかった

理由として考えられる2点

- ① 地層の傾斜角が最大で1.5°程度と小さい
- ② 洪積層が露頭せず、比較的深部に存在するため、表面波が生成しなかった

現地調査結果を踏まえて、碧南市蜷川の中流域および下流域の現況の河川堤防を、矢板を考慮する形でモデル化し、L1地震動およびL2地震動に対する地震時地盤変状予測を実施した。

- ✓ 本解析で想定したL1地震動の場合、表層の砂質土は液状化を示すものの、堤防の沈下量はNo.4(中流)地点、No.1(下流)地点ともに堤防高の20%弱と小さく、地震時に安定を保つ。
- ✓ L2地震動の場合は、堤防の沈下量は36%~50%程度とL1地震動に比べて大きくなる。
- ✓ 最大加速度が大きいことに加えて、継続時間が長く、長周期成分を多く含むため、偏荷重を受けている堤防直下の軟弱粘性土層が乱されて剛性を失い、大きな地盤変状が生じた。
- ✓ No.4(中流)地点、No.1(下流)地点ともに、L1地震動と比べてL2地震動の方が堤防沈下量は大きくなるが、内閣府が浸水被害予測で用いる堤防高75%喪失にまでは至らない可能性があることが確認された。



地層	平均N値	単位体積重量	液性限界	推定液性限界	細粒分含有率	粘土分含有率
B	6.0	19		25.4	8.5	5.0
S1	7.4	17		25.1	7.0	3.0
S2	27.5	17		25.7	13.0	7.0
C1	1.7	14	60.5	48.9	77.0	40.7
C2	3.2	14	109.5	97.6	98.3	71.0
D	13.0	19		49.6	92.8	41.3

比較的多くの粗粒分を含み(23%), シルトが卓越(粘土分とシルト分がほぼ半々)。

粘土分含有率が大きく、非常に高液性な(液性限界が大きい)土
☞ シルトと言うよりは粘土

