

# 堤体基礎の地震動脆弱性が 津波氾濫解析に与える影響に関する検討

今井 健太郎<sup>1</sup>・中井 健太郎<sup>2</sup>・野田 利弘<sup>3</sup>  
新井 伸夫<sup>4</sup>・岩間 俊二<sup>5</sup>・馬場 俊孝<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

E-mail: imaik@jamstec.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail: nakai@nagoya-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 名古屋大学 減災連携研究センター (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

E-mail: noda@nagoya-u.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 名古屋大学 減災連携研究センター (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

E-mail: arai@nagoya-u.ac.jp

<sup>5</sup>非会員 (株) 防災技術コンサルタント (〒020-0757 岩手県滝沢市大釜風林3番41)

E-mail: s.iwama@bousai-c.com

<sup>6</sup>正会員 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

E-mail: baba.toshi@tokushima-u.ac.jp

本研究では、愛知県の巨大産業を支えるサプライチェーンを擁する地域のひとつである碧南市を対象として、南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の沈下量を数値解析によって評価した。この解析結果を津波氾濫解析に組み込むことで、堤体基礎の脆弱性が氾濫過程や浸水域に与える影響について検討を行った。堤体基礎の沈下や直立堤の崩壊を考慮することにより津波浸水域は大きく拡大することを定量的に示すことができた。このことは、沿岸構造物の耐震化の重要性を示していることはもちろんのこと、強震動による海岸・河岸構造物や堤体基礎部の脆弱性が津波ハザード評価に与える影響を無視できないことを示している。

**Key Words :** *strong motion, structure body, vulnerability, tsunami inundation*

## 1. はじめに

河口部を包含する沿岸域は、高度成長期となもって高度な土地利用が展開され、我が国の産業の振興・高度化や物流網の効率化に大きく貢献してきた。物流網拠点地域は海・陸路の接続に関する利便性から、沖積平野や埋め立て地のような沿岸低平地に展開され、それに伴って土地改変が行われる場合が多い。一方で、沿岸低平地は津波による被害はもちろん、液状化現象をはじめとした地震動による地盤沈下や地盤構造弱化などの脆弱化についても懸念されている。過去の南海トラフ巨大地震では強震動の影響により、四万十川(高知県中村)河岸堤防の天端高に3.5 mの沈下が生じる激甚被害が生じた<sup>1)</sup>。50年以内に90%以上の確率で発生が危惧されている南海トラフ巨大地震<sup>2)</sup>は、南海トラフ沿岸域では強震動と巨大津波の発生が想定されているため<sup>3)</sup>、これらによる被害想定を行う際には地震動による海岸・河岸構造物の脆

弱評価は重要な検討事項である。このような状況において、海岸構造物に対しては液状化解析ツール<sup>4)</sup>を利用した解析結果を踏まえて、重要施設においては耐震化の整備が進められている。一方、一部の港湾・漁港施設や中小河川などの護岸施設においては未だ耐震化の整備途上にあり、巨大地震に対する現実的な地震・津波ハザード評価とそれに対応した具体的な対策を講じるためには、地震動による海岸・河岸構造物の基礎部の脆弱性に関する評価とそれに基づいた氾濫解析が求められるが、これらを踏まえた検討例は少ないのが現状である。

このような状況を鑑み、本研究では矢作川河口域において高度な土地利用展開されてきた愛知県碧南市をモデル地区として、南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の沈下量を水～土骨格連成有限変形解析によって評価し、この解析結果を津波氾濫解析に組み込むことで、堤体基礎の脆弱性が浸水域に与える影響について検討を行うことを目的とする。

## 2. 解析対象地域

本研究の対象領域である愛知県碧南市は、三河湾北部沿岸に位置し、周囲を水域で囲まれている碧海台地と矢作川沖積地からなる平坦地であり、愛知県の巨大産業を支えるサプライチェーンを擁する地域のひとつである。図-1に愛知県碧南市の位置と津波数値解析領域、図-2に碧南市における地震応答解析の対象測線位置を示す。本検討では図-2中の測線T-1とT-2における河川堤防を含む領域を解析対象とした。ボーリング結果をもとに作成した地層断面図を図-3に示す。T-1において、沖積層は砂質土 (As1およびAs2) と粘性土 (Ac1およびAc2) の互層となっており、その下部に洪積層 (Dc) が存在する。地表付近の砂質土層のM値は10以下と小さく、大地震発生の際は液状化の危険性が高いことが伺える。また、砂質土層の下部に堆積する埋土層および粘性土層のM値は1~3程度であり、軟弱な状態にあった。粘性土層厚は右岸側で20 mと厚いのに対し、左岸側ではその層厚は薄くなるのも特徴である。

T-2では沖積砂層 (As) と洪積砂層 (Ds) の下部に洪積粘土層 (Dc) 、基部に硬質な洪積層 (D) が存在する。このように、右岸・左岸、河川沿いに2 km程度離れた位置で地層分布は大きく変化していることがわかる。

## 3. 堤体基礎部の地震動応答解析

内閣府<sup>2)</sup>による南海トラフ巨大地震の被害想定では、液状化による碧南市全域の地盤沈下量は0.1~0.3 mとされている。一方で、耐震化の整備途上にある堤体基礎の定量的な影響については不明である。

本研究では、碧南市中心部に流れる蜷川の堤体基礎を解析対象とし、地震動に対する応答解析を行った。堤体基礎部の地震動応答解析に使用した解析モデルは、水~土骨格連成有限変形解析コードGEOASIA<sup>3)</sup>であり、静的・動的変位を区別なく取り扱うことができる。また、同解析モデルには、土の骨格構造とその動きの差異を記述する弾塑性構成式SYSカムクレイモデル<sup>4)</sup>が搭載されており、砂から粘土、両者が混在した中間土までを同じ理論的枠組みの中で記述することが可能である。解析に用いる弾塑性性状は現地で実施されたボーリング調査結果と室内物理試験結果に基づき推定した。なお、本解析は河川堤防に対する耐震補強がされていない場合を示す。解析に用いた弾塑性性状の一覧を表-1に示す。

解析に用いた有限要素メッシュの弾塑性性状パラメータは、ボーリング調査結果に基づいて各地層区分に対応するように配置した。地表面は水平な地盤を初期状態とし、有限要素メッシュを追加・削除することで河川堤防

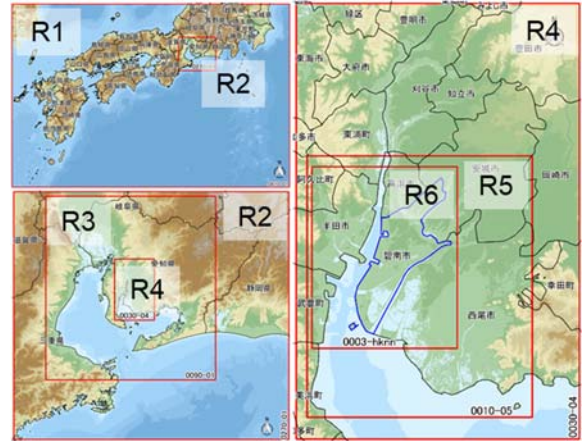


図-1 愛知県碧南市の位置と津波数値解析の対象領域。空間格子間隔はR1:810m, R2:270m, R3:90m, R4:30m, R5:10m, R6:103mである。



図-2 碧南市における地震応答解析の対象測線位置

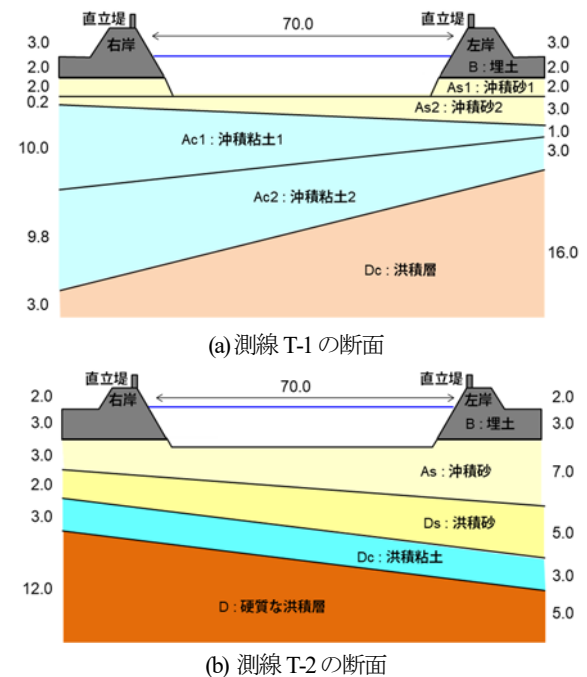


図-3 各測線における地層断面 (図中の単位は m)

構築および河道掘削を行った。水理境界については両側面および下端は非排水境界とし、地表面は大気圧境界、

表-1 解析に用いた弾塑性性状の一覧

設定パラメータ	測線T-1における地層						測線T-2における地層					
	B	As1	As2	Ac1	Ac2	Dc	B	As	Ds	Dc	D	
弾塑性	NCLの切片	1.66	1.65	1.66	2.15	2.83	1.99	1.66	1.66	1.67	1.86	1.66
	限界状態定数	1.58	1.58	1.58	1.52	1.45	1.54	1.58	1.58	1.58	1.55	1.58
	圧縮指数	0.047	0.046	0.048	0.15	0.3	0.12	0.047	0.047	0.05	0.091	0.047
	膨潤指数	0.0047	0.0046	0.0048	0.015	0.03	0.012	0.0047	0.0047	0.005	0.0091	0.0047
	ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
発展則	偏差塑性ストレッチングとそのノルムの割合	1.0	1.0	1.0	0.2	0.2	0.2	1.0	1.0	1.0	0.2	0.2
	構造劣化指数	1.34	1.35	1.33	0.57	0.17	0.74	1.34	1.34	1.3	0.94	1.34
	正規圧密土化指数	1.28	1.26	1.3	7.44	87.3	4.31	1.28	1.28	1.34	2.65	1.28
	回転硬化指数	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	回転硬化限界面	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
初期値	構造の程度	2.7	2.53	1.55	4.06	4.04	3.47	2.63	2.45	1.81	3.66	2.03
	過圧密比	23.7	26.9	70.6	2.83	2.87	4.07	27.78	28.5	51.8	3.59	41.33
	応力比	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545	0.545
	異方性の程度	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

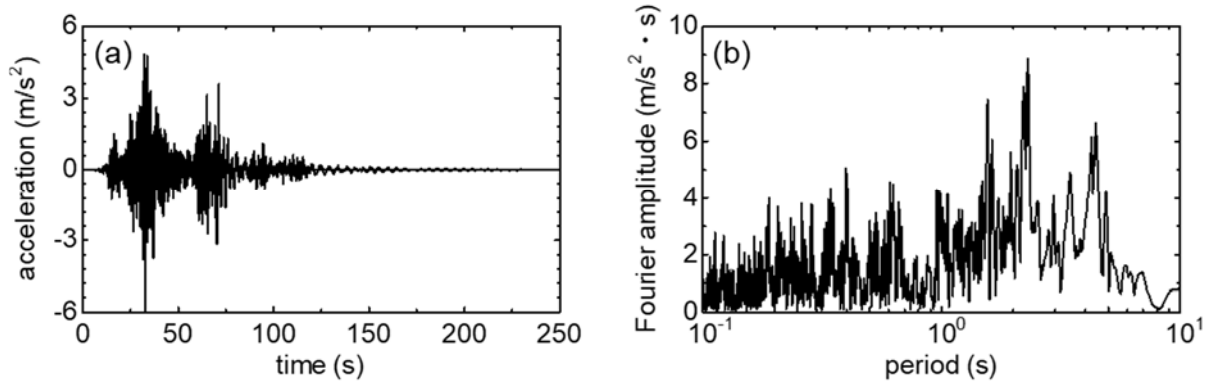


図-4 解析に用いた地震動。(a)はEW成分の加速度時刻歴、(b)は加速度の周波数特性を示す。

河床面は水深に応じた水圧境界とした。解析に用いた地震動の入力波形を図-4に示す。当該地点付近で想定される地震動<sup>9)</sup>のEW成分を地盤底面の全有限要素節点の水平方向に入力した。現地ではPS検層は行われていないが、道路橋示方書<sup>7)</sup>の推定式を用いて解析領域下端におけるせん断波速度 $V_s=340$  m/sと推定した。図-4(a)の加速度振幅は、この $V_s$ を用いて翠川<sup>8)</sup>およびSugito et al.<sup>9)</sup>の方法に従い、工学的基盤における加速度振幅となるように1.53倍に補正した。地盤下端節点は底面粘性境界を設け、地盤両側端要素に側方境界要素単純せん断変形境界を設けた。なお、B層は飽和土として扱っており、降雨が長期間続いている時のように地下水位面が地表付近にあるもっとも危険な状態を想定している。図-4(b)の加速度の周波数特性については補正は行っていない。

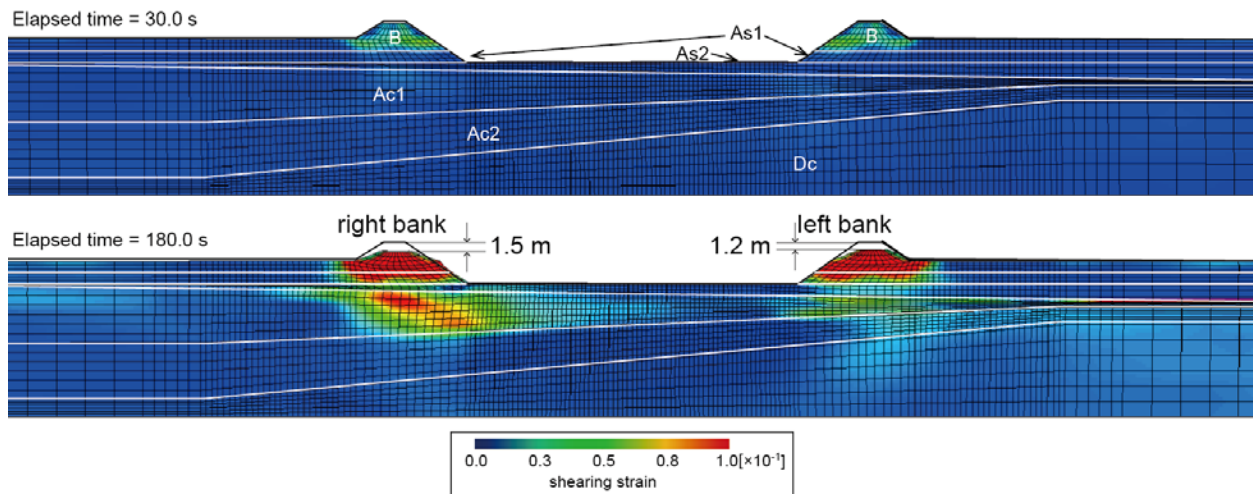
図-5に強震動解析による蜷川河岸堤体の剪断ひずみ分布と堤体高さの変形を示す。図-5(a)のT-1では地震発生直後(30秒後)からB層において有効応力の低下により円弧状の剪断歪みが発生し、その箇所を中心として地盤剛性が失われる。入力地震動の継続時間は120sと長いことから、Ac1層において有効応力の低下により剪断歪みの増加が確認できる。地震発生から180sでは、剪

断歪みはB層および表層のAc1層へと広がっていることがわかる。盛土直下の沖積粘性土Ac1層も地震動で乱され、大きな剪断歪みが発生する。従来では、地震による地盤被害のほとんどは砂質土の液状化が中心で粘性土層の被害はほとんど発生しないといわれているが、T-1のようにAc1層のような軟弱な粘性土層を有する場合、盛土直下のように局所的な上載荷重を受けている場所ではせん断変形が卓越して地盤が乱され、有効応力が著しく低下する結果、さらなる地盤沈下をもたらす。

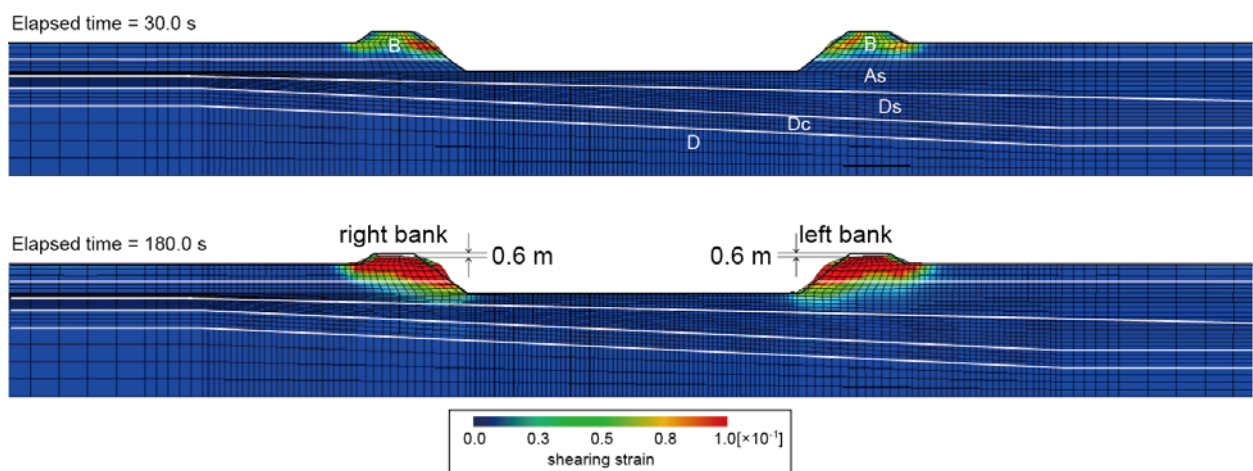
図-5(b)のT-2においては軟弱な粘性土(Ac)層がないため剪断歪みはB層が中心となっていることがわかる。

両岸の堤体高沈下量について、T-1においてはB層とAc1層で大きな沈下を生じている。左岸と右岸で比較すると、Ac1層が厚い右岸ではその沈下量も大きい。T-2においてはB層で大きな沈下を生じている。地震時に左岸で初期堤体高(3.0m)の約40%(1.2m)、右岸で約45%(1.5m)の沈下が生じ、T-2では両岸の初期堤体高(2.0m)の約30%の沈下が生じることがわかった。明治以降に日本で発生した地震動による河川堤防の沈下量と堤体初期高さの関係<sup>10)</sup>によると、地震による河川堤防の沈下量は最大で初期堤防高さの75%にまで達する。地震





(a) T-1



(b) T-2

図-5 強震動解析による蜷川河岸堤体の剪断歪み分布と堤体高さの変形。図中の黒実線は初期の堤体高を示す。

動の種類や規模、地盤の状態がそれぞれ異なるが定性的には本解析結果と整合する。

#### 4. 津波氾濫解析

津波氾濫解析には内閣府<sup>11)</sup>により整備されている地形データ (R1: 空間格子間隔  $\Delta x=810$  mからR5:  $\Delta x=10$  m) を利用した。R6 ( $\Delta x=10/3$  m) は国土地理院による5mメッシュのDEMを基本データとし、海岸・河川構造物の線形やその標高値に修正を加えた。参照したデータは国土地理院基盤地図情報 (道路線, 水涯線, 建築物外周線) およびGoogleマップ (航空写真) であり、堤防天端高は蜷川水系河川整備計画と高浜川水系河川整備計画 (新川), さらに現地調査を行って修正を行った。

3章で得られた地震動による堤体基礎の沈下量については、R6領域の蜷川沿岸堤体基礎標高に反映させた。ただし、解析を実施した検査断面はT-1およびT-2のみのため、蜷川沿いの堤体延長区間において地質構造図の構

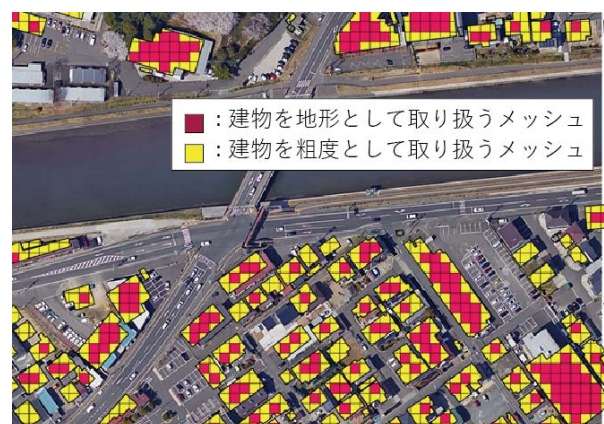


図-6 碧南市中心市街地における合成地形モデルの適用例

成がT-2とほぼ同様な伏見屋樋門付近のT-3まではT-2における沈下量を与え、T-2とT-1区間はより複雑な地層構造であったため、距離に応じた線形補間を行って沈下量を与えた。なお、伏見屋樋門より北側では河岸構造物は存在しないため、地震動による沈下量は考慮していない。

津波氾濫解析は非線形長波方程式に基づいた従来の数

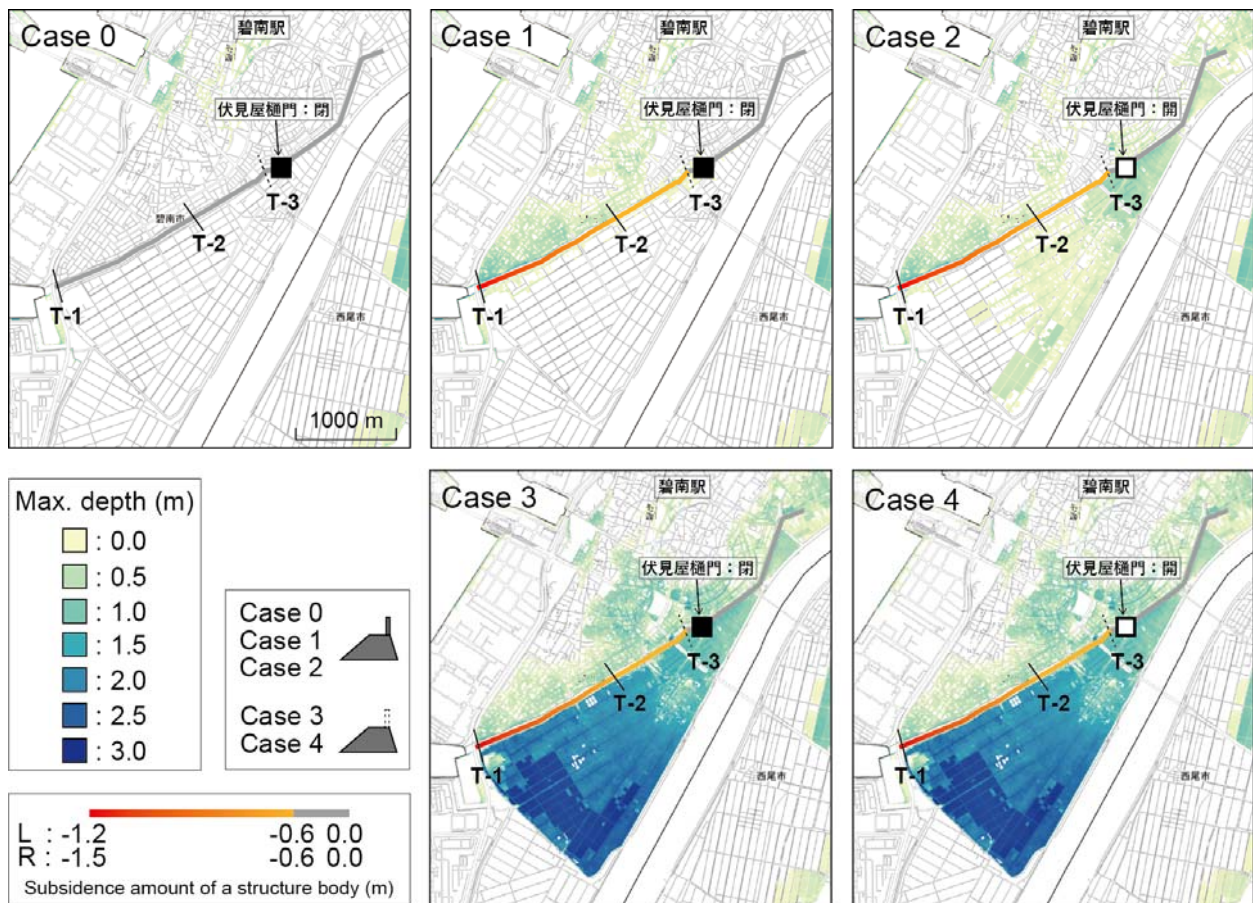


図-7 堤体基礎の沈下量に応じた各被害ケースに応じた地震発生から6時間後までの最大津波浸水深分布。

値モデル<sup>12)</sup>を用い、図-1に示す6領域において空間接続を行い、領域R6においては建物を地形と合成等価粗度で表現する合成地形モデル<sup>13)</sup>により建物の影響を考慮した(図-6)。津波の波源は内閣府<sup>14)</sup>の津波断層Case 9とし、このモデルによる地殻変動による沈降量を考慮し、潮位は朔望平均満潮位(T.P.+1.0m)とした。

構造物被害シナリオとして、波源断層による地殻変動は各ケース共通に考慮し、堤体基礎や直立堤の健全性が保たれ伏見屋樋門が閉まる場合をCase 0、堤体基礎の沈下量を考慮した場合をCase 1、Case 1で伏見屋樋門が閉まらない場合をCase 2とした。Case 3および4はCase 1とCase 2の条件のうち、直立堤が対象延長区間において完全に崩壊する場合とし、直立堤を取り除いた。

図-7に堤体基礎の沈下量に応じた各被害ケースに応じた地震発生から6時間後までの最大津波浸水深分布を示す。当該沿岸に到達する津波高は2 m程度であるため、Case 1においては、衣浦港では若干の浸水が認められるが、蜷川流域においては津波は直立堤を越流することがないため、市街地に津波は溢れないことがわかる。

Case 1においては伏見屋樋門より下流においては、蜷川における河岸堤体基礎天端の沈下により、右岸側で津波の浸水が生じる。これは、右岸側基礎堤体の方が沈下

量が大きいためである。Case 2は伏見屋樋門が開門している条件である。この樋門より上流では堤体基礎や直立堤が整備されていないため、この地点より上流から氾濫した津波は左岸南部の低平地に流れ込むことになる。

Case 3では直立堤崩壊により、さらなる浸水域の拡大が生じていることがわかる。蜷川右岸の市街地においては津波浸水深が1 mを越える地域もあるため、津波による家屋被害が懸念される<sup>15)</sup>。Case 3と4の比較から、直立堤が崩壊する場合、伏見屋樋門開閉の影響は僅かであることがわかる。これは、護岸機能の消失により蜷川沿岸から津波が越流することにより、伏見屋樋門周辺の津波流入量が減少したためと考えられる。

## 5. おわりに

愛知県碧南市をモデル地区として、想定南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の沈下量を水へ土骨格連成有限変形解析によって評価し、この解析結果を津波氾濫解析に組み込むことで、堤体基礎の脆弱性が浸水域に与える影響について検討を行った。

地震による地盤沈下の被害は砂質土層における液状化が主要因であるが、盛土直下のように局所的な上載荷重



を受けている粘性土層はせん断変形が卓越して地盤が乱され有効応力が著しく低下するため、さらなる地盤沈下をもたらすことを示した。

津波氾濫解析において、蜷川流域の堤体基礎が沈下するが河岸構造物は機能する場合は右岸堤体基礎の沈下量が大きいために蜷川北部に浸水が集中し、蜷川中流域の樋門の開閉の影響により蜷川南部にも浸水域が拡大する。このように、耐震化未整備区間では強震動の影響によって護岸などの沈下が生じ、これにより津波浸水域は大きく拡大することを定量的に示した。中小河川や一部の港湾施設を擁する地域においては、これら構造物の耐震化の重要性を示していることはもちろんのこと、強震動による海岸・河岸構造物や堤体基礎部の脆弱性が津波ハザード評価に与える影響を無視できないことを示している。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたり、国土地理院公開の地形データを使用しました。碧南市から蜷川流域における地盤ボーリングデータ、水門・樋門の詳細情報と当該市街地における詳細建物情報の提供を受けました。ここに記して謝意を表します。本研究はH25-32年度文部科学省「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構 金田義行）の一環として行われました。

#### 参考文献

- 1) 中央気象台：昭和21年12月21日南海道大地震調査外報，pp.22-75，1947.
- 2) 地震調査研究推進本部：活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧（2018年1月1日での算定）<https://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran.pdf>，参照5-24-2018.
- 3) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会，<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>，参照2018-5-24.
- 4) 一般社団法人FLIPコンソーシアム：[http://www.flip.or.jp/flip\\_program.html](http://www.flip.or.jp/flip_program.html)，参照2018-5-24.
- 5) Asaoka, A., T. Noda, E. Yamada, K. Kaneda and M. Nakano, An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42. No.5, pp.47-57, 2002.
- 6) Noda, T., A. Asaoka and M. Nakano, Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008.
- 7) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説I 共通編，2017.
- 8) 翠川三郎：関東平野を対象とした震度分布予測，構造工学論文集，Vol.33B，pp.43-48，1987.
- 9) Sugito, M., Y. Furumoto, and T. Sugiyama, Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, Proc. of the 12th WCEE, CD-ROM, Oakland, New Zealand, 2000.
- 10) 国土交通省：河川構造物の耐震性能照査指針・解説，[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/bosai/wf\\_environment/structure/index3.html](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bosai/wf_environment/structure/index3.html)，参照2018-5-24.
- 11) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会/地形データ，<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/1205>，参照2018-5-24.
- 12) 後藤智明，小川由信：Leap-Frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科資料，52p，1982.
- 13) 今井健太郎，今村文彦，岩間俊二：市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69-2，pp.311-315，2013.
- 14) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会/津波断層モデル(8)初期水位データ\_07系\_0810-99)，<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/120807>，参照2018-5-24.
- 15) 今井健太郎，大林涼子，甲斐芳郎，行谷佑一，高橋成実：直線海岸を有する沿岸地域における木造建物の津波被害関数の特徴，日本地震工学会第12回年次大会梗概集，P2-2，CD-ROM，2016.

(2018.3.15 受付)

## STUDY ON THE INFLUENCE OF VULNERABILITY DUE TO STRONG MOTION FOR A STRUCTURE BODY ON TSUNAMI INUNDATION ANALYSIS

Kentaro IMAI, Kentaro NAKAI, Toshihiro NODA, Nobuo ARAI  
Shunji IWAMA and Toshitaka BABA

In this study, the subsidence amount of a body structure caused by a strong motion at the Nankai Trough great earthquake was evaluated by GEOASIA numerical simulation. We investigated the influence on the tsunami inundation process and area incorporating the numerical results of the structural vulnerability appeared by the strong motion. The numerical results show that the tsunami inundation area was extended by subsidence of body structures and collapse of an upright dike. It proves the importance of not only earthquake resistance but also vulnerability evaluation of coastal and river-side structures due to a strong motion during the process of tsunami hazard evaluation.