

南海トラフ地震に対する防潮堤等の沈下対策について ～西宮市朝風町における取り組み～

田中 彦行¹

¹兵庫県 県土整備部 土木局 港湾課 (〒650-8567神戸市中央区下山手通5-10-1) .

近い将来発生が懸念される南海トラフ地震では、地震動による地盤の液状化を受け、防潮堤などが沈下し、防護機能が十分に果たされなくなることで、津波による甚大な浸水被害が想定されている。兵庫県では津波による浸水被害を軽減するべく、「津波防災インフラ整備計画」を平成27年6月に策定し、本計画に則り防潮堤等の沈下対策を実施している。本論文では、西宮市朝風町における沈下対策を事例に、沈下対策必要箇所の抽出から実施設計における対策工法決定までの取組みについて述べ、対策範囲の精度向上に関する提案についても述べるものとする。

キーワード 調査, 計画, 防災, 沈下対策

1. はじめに

近い将来発生が懸念される南海トラフ地震では、地震動による地盤の液状化を受け、防潮堤等が沈下し、防護機能が十分に果たされなくなることで、津波による甚大な浸水被害が想定されている(図-1)。

兵庫県では津波による浸水被害を軽減するため、「津波防災インフラ整備計画」を基に防潮堤等の沈下対策を実施している。本論文では「津波防災インフラ整備計画」の「重点整備地区」である西宮・今津地区の西宮市朝風町における沈下対策を事例に、沈下対策必要箇所の抽出から実施設計における対策工法決定までの取組みについて述べ、対策範囲決定の精度向上に関する提案についても述べるものとする。

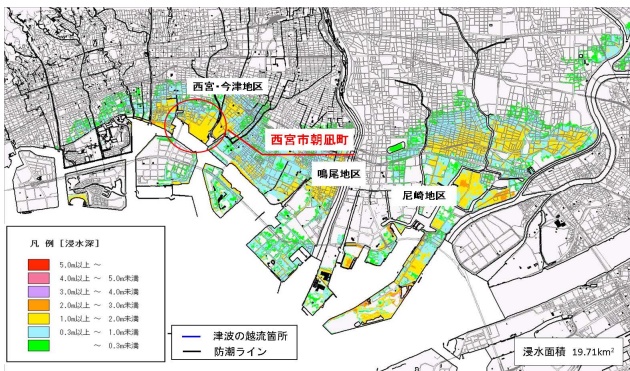


図-1. 尼崎西宮芦屋港 津波浸水想定図

2. 西宮市朝風町における取り組み

(1) 沈下対策必要箇所の抽出

沈下対策が必要な箇所を抽出するにあたり、学識者等で構成する兵庫県海岸保全施設耐震対策整備計画検討委員会(以下、「委員会」という)の助言を得ながら、簡易耐震診断システム(チャート式)及び動的液状化解析(FLIP解析)の2つの方法で検討を行った。

チャート式は、沿岸構造物を様々な条件でシミュレーションした変形量の算定結果をデータベース化しており、入力条件をデータベースに照合するだけで地震による変形量を簡易的に算定し、地震に対し危険性の高い施設を抽出することができる。

FLIP解析は、個々の防潮堤の形状・寸法や粒径、密度等詳細な土質条件を基に、2次元の変形状態を解析する手法である。また、チャート式より精度の高い沈下量が得られ、地盤や構造物の詳細な挙動、特に液状化現象を伴う場合の残留変位、残留応力を精度良く予測することができる。

チャート式及びFLIP解析を用い、沈下対策必要箇所の抽出を次の①～③の順により行った。

①近隣の既往ボーリングデータのN値等からチャート式により沈下量を算定する。沈下量が概ね1m以上あり、津波越流により背後に浸水被害が生じる施設を対象に抽出を行い、FLIP解析を行う。

②FLIP解析を用いて、近隣の既往ボーリングデータのN値から推計した液状化係数及び土質構成から、液状化による2次元の変形状態を解析する。委員会の助言を受け、FLIP解析により液状化の沈下量が概ね1m以上、水平変位が概ね1.5m以上、堤体傾斜角が概ね8°以上、部材断面力が全塑性である施設を抽出し、要対策箇所を決定する。

③要対策箇所について、現地のボーリング調査及び土質試験により設定した液状化係数及び土質構成によりFLIP解析を行い、精度の高い沈下量、水平変位等を算出し、必要な防潮堤高さや耐震の安全性に対する照査を行う。

耐震照査基準としては南海トラフ巨大地震に対する国の基準等が整備されていないため、委員会の助言や他府県の事例等を参考にし、以下のとおり兵庫県独自で照査基準値を決定している。

- i) 設計津波水位より低くならないこと
- ii) 水平変位が 150cm 以下
- iii) 堤体傾斜角が 8° 以下
- iv) 主要部材及び控え工に発生するモーメントが全塑性モーメント以下

西宮市朝風町では、②の FLIP 解析により要対策箇所の施設延長が 760m であることが判明し、その区間を対象に現地ボーリング調査を実施し、③の FLIP 解析による照査を行ったところ、約 608mの区間で沈下対策が必要であることがわかった。(図-2)

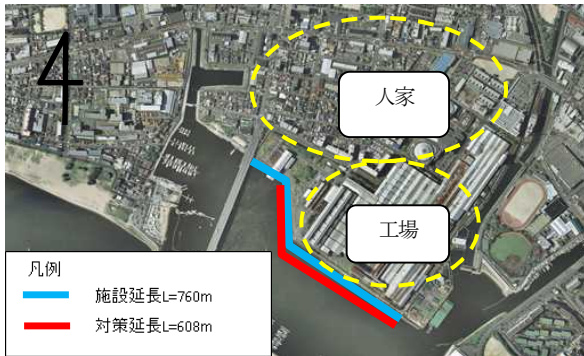


図-2. 西宮市朝風町平面図

(2) FLIP解析の結果

西宮市朝風町では新たに現地で 5 箇所のボーリング調査 (図-3) を行い、土質試験による液状化係数を設定し、FLIP 解析を行った。砂質土である As 層でせん断ひずみ (図-4) や過剰間隙水圧比 (図-5) が高い値を示していることから、液状化によるせん断変形が起こっていることがわかる。液状化に伴う地盤のせん断変形により、防潮堤は堤体直下及びその周辺地盤でひずみが発生し、鉛直変位が約 1.4m、水平変位が約 2.1m と大きく変形することが判明した (図-6)。このことから、地盤の変形対策としては委員会の助言等を踏まえ、液状化対

策を主とする地盤改良工法を中心に検討を行った。

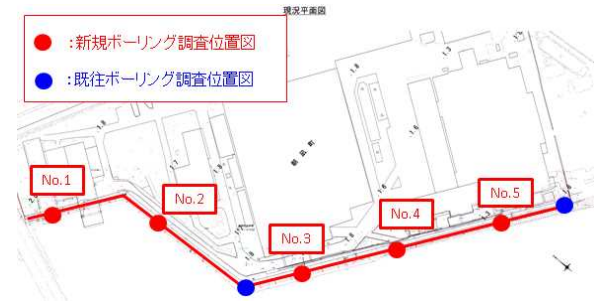


図-3. 地質調査平面図

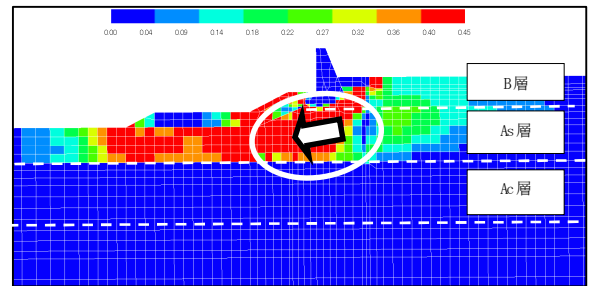


図-4. 残留ひずみ分布図 (最終時刻)

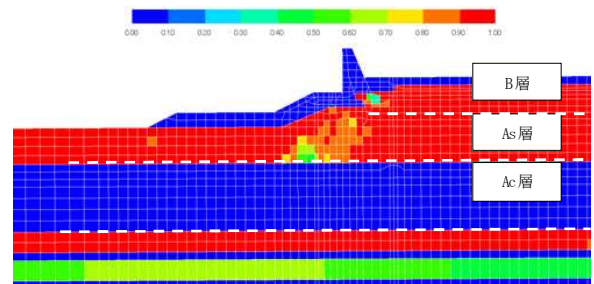


図-5. 過剰間隙水圧比分布図 (最大値)

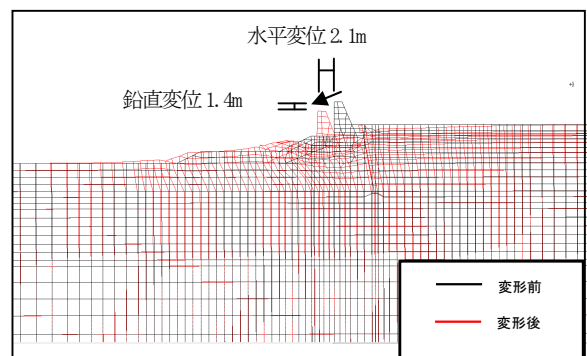


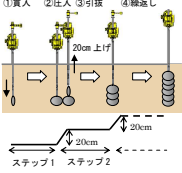
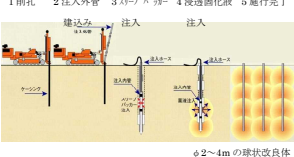
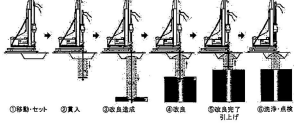
図-6. 残留変形図

(3) 対策工法の選定

工法選定としては堤体直下の施工が可能であり、人家や工場などの周辺施設への影響が少ない工法を抽出し、比較検討を行った。

対策工法は砂圧入式静的締固め工法、薬液注入

表-1. 液状化対策工法 3案比較表

代表工法名称	砂圧入式静的締固め工法	浸透固化処理工法（薬液注入工法）	高圧噴射攪拌工法	
工法概要	<p>砂を専用プラントにて流動化剤と混練し、ポンプ圧送可能な状態にして使用する。所定の深度まで貫入されたロッドを通じて地中に圧入され、周囲の地盤を締固める工法である。</p> 	<p>浸透性の良い恒久薬液を注入することで、間隙水をゲル状物質で置き換え、粒子間粘着力を与え、せん断強度を増すことで液状化を防止する工法である。</p> 	<p>超高压硬化剤を地中に噴射し、地盤を切削すると同時に、地盤に円柱状の改良体を造成する工法である。</p> 	
環境	振動	ほとんど無い	ほとんど無い	ほとんど無い
	騒音	小さい	小さい	小さい
	変位	盛り上がりが生じる場合がある	ほとんど無い	施工時に既設構造物の傾きが生じる場合がある。
特徴	長所	<ul style="list-style-type: none"> 小型ボーリングマシンが設置できる程度の作業空間で施工可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 小型ボーリングマシンが設置できる程度の作業空間で施工可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 砂質土を改良する場合、一軸圧縮強さで 300kN/m² 以上となり、かなりの高強度を発現する。
	短所	<ul style="list-style-type: none"> 密度増大の締固め工法であるため、施工後に周辺地盤及び堤体直下地盤の変形を伴う。(盛り上がりが生じる場合がある) 	<ul style="list-style-type: none"> 砂礫または礫混り砂質地盤では、薬液が逸走するため注入材料の選定等に注意を要する。 	<ul style="list-style-type: none"> 「多重管式高圧噴射工法」は、施工時に排泥が地上に上がってくる為、海上施工の場合、大規模な産廃処理が必要となる。対策として、海側に矢板での締切り等が必要となり、対策費用が増大する。
評価	×	○	○	

工法、高圧噴射攪拌工法の3案を抽出し、以下のとおり比較検討を行った。(表-1)

①砂圧入式静的締固め工法

砂を専用プラントにて流動化剤と混練し、ポンプ圧送可能な状態にして使用する。所定の深度まで貫入されたロッドを通じて地中に圧入され、周囲の地盤を締固める工法である。

長所：小型ボーリングマシンが設置できる程度の作業空間で施工可能。対象地盤の上部に硬い地盤が存在しても施工可能。

短所：密度増大の締固め工法であるため、施工時に堤体直下地盤及び周辺地盤の変形を伴う。事前に使用材料砂と流動化剤を混練りして、配合試験を実施する必要がある。

②浸透固化処理工法（薬液注入工法）

浸透性の良い恒久薬液を注入することで、間隙水をゲル状物質で置き換え、粒子間粘着力を与え、せん断強度を増すことで液状化を防止する工法である。

長所：低圧で浸透注入するので、地盤の隆起などの影響が非常に小さい。小型ボーリングマシンが設置できる程度の作業空間で施工可能。対象地盤の上部に硬い地盤が存在しても施工可能。

短所：砂礫または礫混り砂質地盤では、薬液が逸走するため注入材料の選定などに

注意を要する。

③高圧噴射攪拌工法

超高压硬化剤を地中に噴射し、地盤を切削すると同時に、地盤に円柱状の改良体を造成する工法である。

長所：砂質土を改良する場合、一軸圧縮強さで 300kN/m² 以上となり、かなりの高強度を発現する。

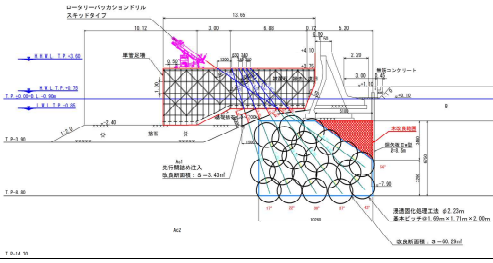
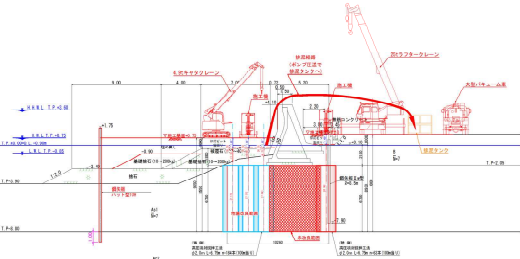
短所：施工時に排泥が地上に上がってくるため、海側から施工する場合、大規模な産廃処理が必要となる。対策として、海側に矢板での締切り等が必要となり、対策費用が増大する。

圧縮空気を噴流しながらの工法であるため、堤防直下の地盤が緩みやすくなり、空気の逃げ道が少ない堤防直下では、空洞が生じる可能性がある。空洞化により、施工時に堤防の傾きが生じる可能性がある。

比較検討の結果、砂圧入式静的締固め工法では工場等への影響が大きい為、当該現場では不適合である。よって、工場等への影響が少ない浸透固化処理工法及び高圧噴射攪拌工法の2案で最終比較を行った。

2案による比較の結果、概算工事費を比較すると高圧噴射攪拌工よりも浸透固化処理工法のほうが

表-2. 浸透固化処理工法及び高圧噴射攪拌工法 比較表

代表 工法名称	浸透固化処理工法	高圧噴射攪拌工法
工法概要図		
概算工事費 (直接工事費) (100m 当 たり)	<ul style="list-style-type: none"> 仮設足場設置 44,500 千円 薬液注入工法 190,000 千円 合計 234,500 (千円)	<ul style="list-style-type: none"> 鋼矢板打設 2,500 千円 高圧噴射攪拌工法 320,300 千円 合計 322,800 (千円)
評価	○ (採用)	×

安価であったため、朝風町では沈下対策工法として浸透固化処理工法を採用した。(表-2)。浸透固化処理工法で使用する薬液は、水ガラスからアルカリ成分を除去した溶液型恒久薬液(溶液型活性シリカグラウト)である。特徴としては改良体の劣化要因となるアルカリ成分を含まないため、固結後の溶出成分がほとんど無く、長期的に安定したゲル構造を持ち、耐久性に優れる。また、環境に対しては、pHの変化がほとんどなく、マウスやあさりを使用した毒性試験においても安全性が確認されており、影響は少ない。

地盤はロータリーパッカションドリルを使用し削孔する。堤体直下での施工に対応するため、仮設足場を堤外地に設け、斜め削孔を行う(表-2)。

また、浸透固化処理工法による対策後の断面についてFLIP解析を行った。照査基準は対策前と同じ基準とし、FLIP解析後、変位量などが基準値を満足しているか照査を行う。FLIP解析の結果、せん断ひずみは対策前と比べ堤体直下の変形数値が低くなっていることがわかる。(図-7)

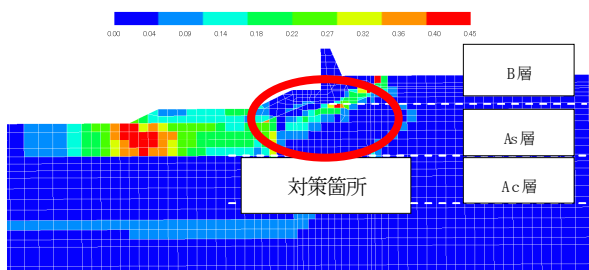


図-7. 残留ひずみ分布図 (最終時刻)

過剰間隙水圧比分布図についても、対策前と比べ、対策範囲内で液状化が起こっていないことが確認できる。(図-8)

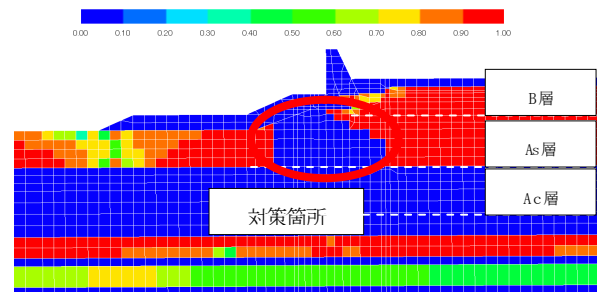


図-8. 残留ひずみ分布図 (最終時刻)

変形図では鉛直変位が0.4m、水平変位が0.5mと大幅に変形量を抑えることが確認でき、防潮堤としての機能を満足できる結果となった。(図-9)

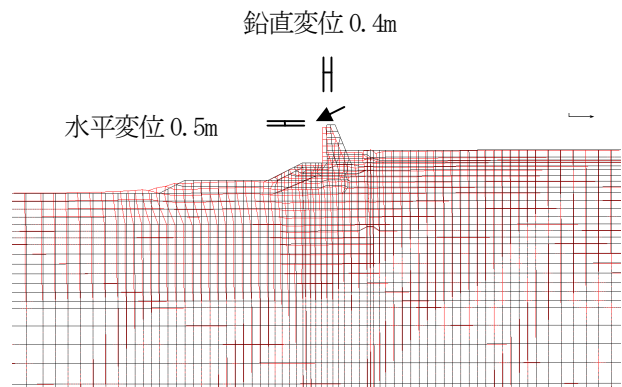


図-9. 残留変形図

液状化対策が必要な現場ではFLIP解析においてせん断ひずみや過剰間隙水圧比などにより変形メカニズムを分析し、背後地状況を勘案しながら液状化層の地盤改良工法及び改良範囲を設定することが有効である。また、対策後の断面に対し、FLIP解析による照査を実施することで、対策の有効性を確認することができる。

3 対策範囲決定の精度向上に関する提案

(1) ボーリング調査の弱点

実施設計において沈下対策の要否を検討する際、現地でボーリング調査を実施し、精度の高い変形量を算出している。しかし、ボーリング調査では「点」での地質情報であるため、連続的な地層の把握ができない場合がある。(図-10)そのため、2箇所でのボーリング調査地点間では、液状化層の層厚変化が把握しにくく、安全側で厚めに対策範囲を設定することから過大設計となるリスクが高いと考えられる。

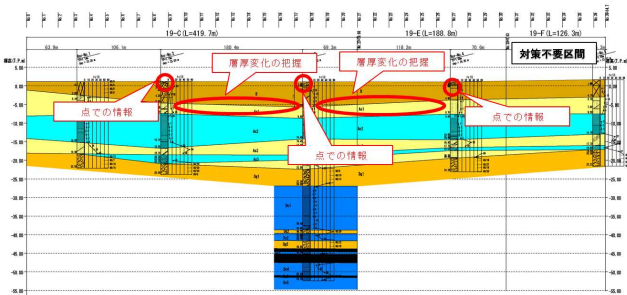


図-10. 地質縦断面図

(2) 弾性波探査調査による地質情報の補完

連続的な地層を把握するには弾性波探査調査を実施するのが有効であると考えられる。弾性波探査は地表から人工的に弾性波（P波またはS波）を発生させ、地下の速度の異なる地層境界で屈折して戻ってきた屈折波を、地表に設置した測定装置で観測し、地下の速度構造を求める探査法である。弾性波探査から得られた情報を2箇所でのボーリング調査地点を結ぶ線状の補完的な地質資料として用いることで、縦断的に連続的な地層を把握できる。ボーリング調査結果及び弾性波探査調査結果を総合的に判断し、液状化層の層厚変化を把握することで、より精度の高い対策範囲を設定でき、過大設計のリスク軽減及びコスト縮減に繋がると考えられる。

4. おわりに

本論文では西宮市朝風町を事例に、沈下対策箇所の抽出から工法選定までの考え方について紹介してきた。また、弾性波探査調査による対策範囲決定の精度向上に関する提案も行った。兵庫県では耐震照査基準を設けるなど、独自基準をもって津波対策を進めているが、今後、弾性波探査調査を活用することで、より精度の高い津波対策が期待できるのではないかと考えている。