

中部ミニフォーラム
優秀論文 2018

レベル2地震動における 海岸堤防の耐震検討事例

㈱ダイヤコンサルタント ○蔵座 拓磨 / 北郷 鉄也 / 本田 伸太郎

1.はじめに

近年、発生が危惧されている南海トラフ地震では、地震力や液状化等で海岸堤防が崩壊・沈下を引き起こすこと、また、その直後に来襲する津波から背後地を守ることが課題となっている。

当海岸は、三河湾に位置する海岸である。漁業利用が盛んで堤防背後には集落および農地が広がっている。既設の海岸堤防は、昭和23年の13号台風に伴う災害復旧事業により整備された施設であり、建設から50年以上経過した現在、老朽化が著しく進行しており、地震時の被害が懸念されている。

本報告は、対策工の検討時に二次元動的変形解析（FLIP）を使用し、より経済的かつ効果的な対策工の検討を行ったものであり、その事例について報告する。

2.地盤特性

(1)地質概要

対象箇所の地盤構成は、概ね上位より盛土層、第四紀・完新世の沖積礫質土層、第四紀・更新世の洪積層（砂質土層、粘性土層、礫質土層）が分布している。

(2)液状化判定

液状化抵抗率FLを用いた液状化判定の結果は、堤体の盛土層（B層）および沖積礫質土層（Ag層）の概ねN値20以下の箇所で部分的に液状化する。液状化層厚は5m以下であり、比較的薄い結果となった。

3.現況（無対策）解析

検討断面において、現況（無対策）断面の解析を行った。解析は地震時において、レベル1地震動に対する安定性の照査を行うとともに、より効果的な対策工法の選定を行うために、レベル2地震動に対する変形の照査を行った。

(1)照査方法

照査は、レベル1地震動時の円弧すべり解析における安全率が、所定の安全率（ $F_s \geq 1.0$ ）を満足するか確認した。

また、レベル2地震動のプレート境界型地震動（L2-1）および内陸直下型地震動（L2-2）に対し、二次元動的変形解析（FLIP）により沈下後の残留堤防高さが照査外水位L2-1：設計津波水位TP+3.40m、L2-2：HWL+10年確率波高TP+2.14mを下回らないか（所定の機能を満足するか）確認した。

(2)解析結果

レベル1地震動に対しては、堤内、堤外側ともに安全率が1.0を下回る結果となった。

また、レベル2地震動に対しては、プレート境界型地震（L2-1）では沈下量が大きく、所定の機能を満足しなかった（図-1）。一方、内陸直下型地震動（L2-2）では、所定の機能を満足する沈下量となった（図-2）。

以上の結果から、対策工の検討が必要と判断した。

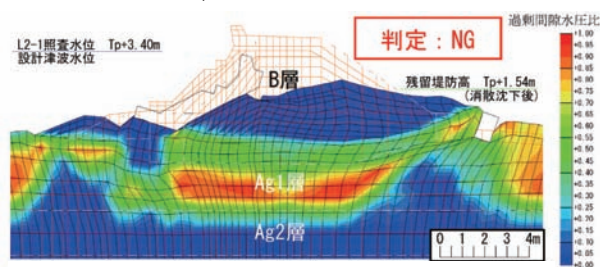


図-1 プレート境界型地震動における変形図（現況）

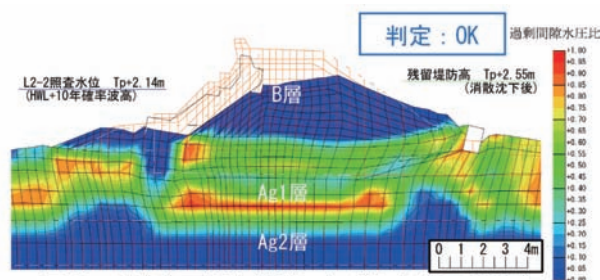


図-2 内陸直下型地震動における変形図（現況）

4.レベル1地震動における耐震対策工法

対策工法は、レベル1地震動の円弧すべりに対する安定が確保できる工法とした。適用可能な工法の比較検

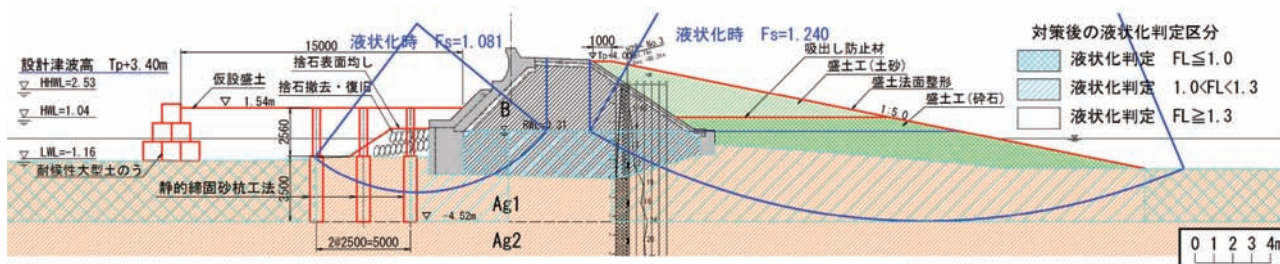


図-3 静的締固め砂杭+押え盛土（法勾配1:5）案

討の結果、経済性、施工性に優れる「静的締固め砂杭+押え盛土工法」(図-3)を選定した。

「静的締固め砂杭+押え盛土工法」は、堤外側に静的締固め砂杭を打設し、堤内側に押え盛土を施工し、液状化時に既設堤防の円弧すべりを抑制する工法である。

盛土形状は、安全率が1.0以上となるように天端幅1.0m、法勾配1:5.0とした。HWL以下の盛土材は、液状化しない材料である碎石とした。

5. レベル2地震動に対する照査

(1) 照査方法

レベル1地震動に対して選定した「静的締固め砂杭+押え盛土工法」について、レベル2地震動に対し、二次元動的変形解析(FLIP)により残留堤防高を求め、3.現況解析に示した方法と同様に照査を行った。

(2) 照査結果

レベル2地震動の照査結果は、現況(無対策)の解析結果と比較すると、堤内、堤外への変形量が抑制されている。

しかし、プレート境界型地震動(L2-1)では沈下量が大きく、所定の機能を満足しなかった(図-4)。一方、内陸直下型地震動(L2-2)では、所定の機能を満足した(図-5)。

以上の結果から、追加対策の検討を行った。

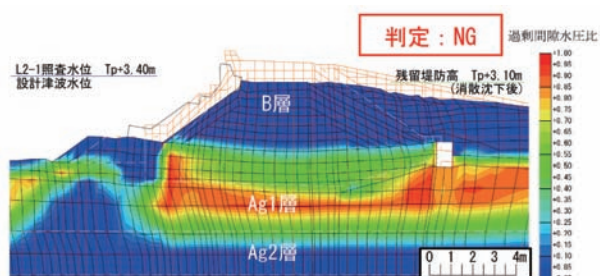


図-4 プレート境界型地震動における変形図(対策後)

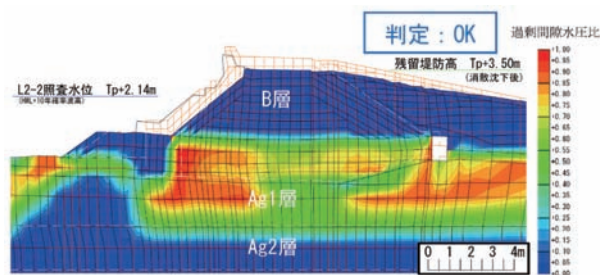


図-5 内陸直下型地震動における変形図(対策後)

6. 追加対策

(1) 追加対策の流れ

どの部分に追加対策を行えば効果があるかを確認するため、表-1、図-6に示すように、各対策の対策範囲を変化させ、堤体の沈下がどの程度抑制されるかを確認した。

表-1 追加対策検討内容一覧

ステップ	追加対策検討箇所	L1決定断面	追加対策
①	押え盛土天端幅の変更	1.0m	→ 3.0m → 5.0m
②	静的締固め砂杭幅の変更	5.0m	→ 7.5m
③	捨石形状の拡大	天端幅2.0m 天端高TP+0.5m	→ 天端幅3.8m → 天端高TP+1.5m
④	堤防の嵩上げ	0.00m	→ 0.30m → 0.35m

最終的な対策工法は、ステップごとに二次元動的変形解析(FLIP)のケーススタディを行い、所定の機能を満足する組合せの中から最も経済的な工法を選定した。

なお、堤体直下への改良は、効果が大きい費用が増大するため採用しないこととした。

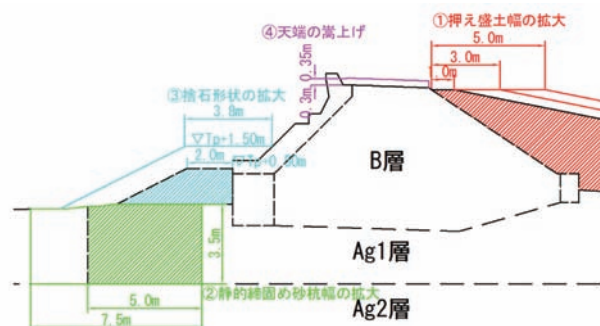


図-6 追加対策工の考え方

(2) 最終的な対策工法の仕様

押え盛土の追加対策は、天端幅3.0mで効果が增大したが、それ以上幅を広げても明瞭な効果は見られなかった。

一方、静的締固め砂杭の効果は、幅を大きくしても沈下減少効果が少なかった。

また、捨石形状の拡大は、沈下減少効果は大きかったが、堤外側の砂浜が縮小してしまうこと、工費が大きいことを考慮し、現状より形状を大きくしないようにした。

最終的な対策工法は、表-2に示すように、ケース8「静的締固め砂杭(幅5.0m)+押え盛土(幅3.0m)+天端嵩上げ(0.35m)」が最も経済的に所定の機能を満足する対策工法となった。ケース8の変形図を図-7に示す。

表-2 追加対策検討結果

ステップ	ケース	押え盛土 天端幅(m)	静的締固め 砂杭幅(m)	捨石形状 天端幅(m)	嵩上げ高 天端高TP(m)	沈下後残留 堤防高 TP(m)	判定	備考
①	1	1.0	5.0	2.0	0.0	3.10 < 3.40	NG	L1決定断面
	2	3.0	5.0	2.0	0.0	3.17 < 3.40	NG	
	3	5.0	5.0	2.0	0.0	3.21 < 3.40	NG	
②	4	3.0	5.0	2.0	0.0	3.17 < 3.40	NG	
	5	3.0	7.5	2.0	0.0	3.18 < 3.40	NG	
③	6	3.0	5.0	3.8	1.5	3.30 < 3.40	NG	
	7	3.0	7.5	3.8	1.5	3.30 < 3.40	NG	
④	8	3.0	5.0	2.0	0.35	3.41 > 3.40	OK	採用
	9	3.0	7.5	2.0	0.30	3.41 > 3.40	OK	

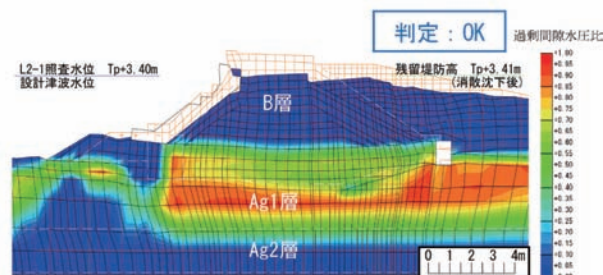


図-7 プレート境界型地震動における変形図(最終断面)

7. おわりに

レベル2地震動における対策の検討において、二次元動的変形解析(FLIP)を使用することにより、地盤条件を踏まえた最適な改良範囲や盛土幅を決定することができた。

動的変形解析のケーススタディを実施することにより、地震時の変形特性を把握することができ、どの場所に対策を行うのが効果的であるか確認できるため、最適な対策および範囲を選定することが可能であると考えられる。

サンプリングチューブ内の 試験位置による一軸圧縮試験結果に関する一考察

中部土質試験協同組合 ○松村 竜樹 / 坪田 邦治

1.はじめに

近年、室内試験方法の進展により、試料の乱れが強度・変形特性に与える影響について指摘されるようになってきた。試料のサンプリングにおいても、より乱れの少ない試料採取が求められている。一軸圧縮試験は、比較的簡単で安価であり粘性土の強度評価をするために多く用いられているが、試料の乱れが試験結果に与える影響を受けやすく、同じサンプリングチューブ内の試料であっても試験値がばらつくことも少なくない。

港湾関係の調査では、1本のサンプリングチューブ内で一軸圧縮試験を4供試体実施するように求められることが多い。そこで、常時試験を実施している立場から、サンプリングチューブ内での試験位置による一軸圧縮試験結果のばらつきに着目して整理した。その結果、チューブ先端(最深部)から30～50cmの部分が最大強度となる興味深い結果が得られたので報告する。

2.比較検討した地盤の特徴

検討に適用した地盤材料は、伊勢湾内の沖積粘性土(四日市港層)と洪積粘性土(古伊勢湾層=熱田層下部)である。四日市港層は沖積下部を占め、砂混じりシルトないし粘土を主体とし、その最上部・最下部はシルト・粘土混じりの砂から構成されている。本層には、内湾性の貝殻が含まれ、その厚さは陸域から海域に向かうに伴って厚くなり、陸域では0～15m、海域では最高25mに達する¹⁾。調査地で確認した N 値は2～5である。古伊勢湾層は、内湾性の貝化石を含むシルト及び粘土を主体とし、まれに粘土・シルト混じりの砂ないし砂礫を挟む。丘陵近くになると砂～砂礫が伴うようになる¹⁾。調査地で確認した N 値は6～20である。調査地域の代表的な地盤と

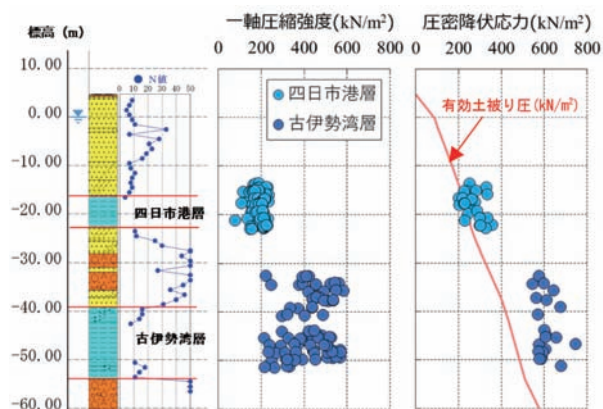


図-1 検討地域の代表的な地盤と粘性土層における q_u 、 p_c の深度分布(q_u は供試体毎の値を記載)

各粘性土層における q_u と p_c の深度分布を図-1に示す。

四日市港層では日本統一分類名(記号)で、粘土(高液性限界:CH)、砂まじり粘土(高液性限界:CH-S)、シルト(高液性限界:MH)、砂まじりシルト(高液性限界:MH-S)のいずれも $F_c \geq 84.8\%$ の粘性土、25サンプリング試料とした。古伊勢湾層では同上の粘性土に、砂まじり粘土(低液性限界:CL-S)を加えて検討に供した。いずれも $F_c \geq 92.7\%$ の粘性土21サンプリング試料とした。

また、四日市港層の自然含水比 $w_n = 54 \sim 70\%$ 、古伊勢湾層では $w_n = 55 \sim 69\%$ であり伊勢湾内では代表的な沖積粘性土層、洪積粘性土層と考えられる。

この地域の一軸圧縮強度(q_u)～圧密降伏応力(p_c)の相関を図-2に示す。全国の港湾地域の海成粘土は、 $c/p = 1/3$ で代表され、 $p_c \approx 1.5q_u$ となるとされている²⁾が、当地域の四日市港層はほぼこの関係に代表され、古伊勢湾層も概ねこの関係にあるといえる。図-1、図-2より、ここで検討した四日市港層は正規圧密粘性土と考えている。

3.サンプリングチューブ内での一軸圧縮試験位置

今回対象としたのは、採取長が80cm程度のサンプリングチューブ(採取長が70cm以下のものは対象外とした)で、沖積粘性土層はシンウォールサンプリング、洪積粘性土層はデニソンサンプリングによるものである。採取試料の両端は中心部付近に比べて乱れが大きいといわれているため、力学試験に用いる試料は刃先から10～60cmの部分とするのが一般的であり³⁾(図-3参照)、港

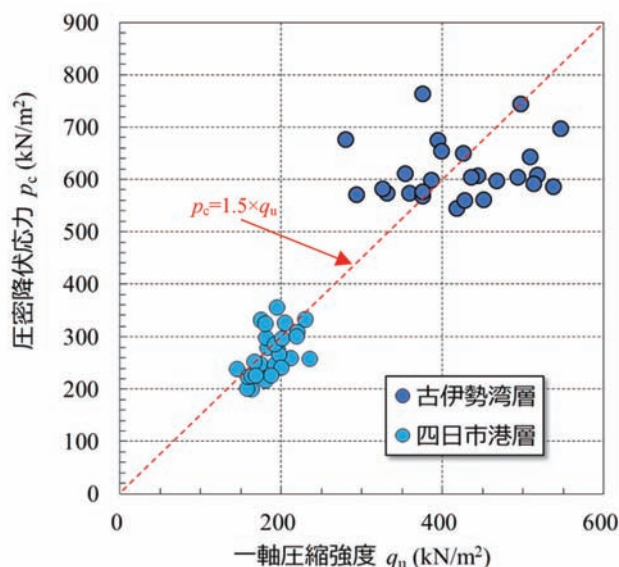


図-2 検討地域の $p_c \sim q_u$ 相関

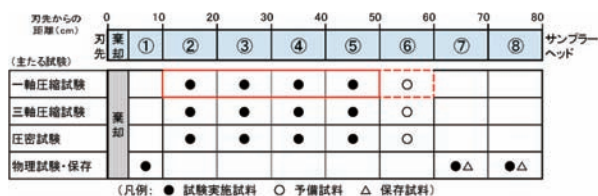


図-3 試料採取の位置と室内試験③

湾関連業務においても試験位置についての仕様は同様であることが多い。今回の一軸圧縮試験は主に刃先から10～20cm、20～30cm、30～40cm、40～50cmの部分で4供試体を実施している。貝殻等の混入物や著しい乱れにより供試体の成形ができない場合は、50～60cmの部分のを代わりに採用している。

4. サンプリングチューブ内の一軸圧縮試験結果分布

前節で述べた同一サンプリングチューブ内における試験位置の異なる4供試体の試験値を比較した。一軸圧縮試験によって得られた各供試体の一軸圧縮強度(q_u)、破壊ひずみ(ε_f)、湿潤密度(ρ_t)を平均値で正規化した値と試験位置の関係図を図-4(四日市港層)、図-5(古伊勢湾層)に示す。

土の性質上、洪積層である古伊勢湾層の方はばらつきが大きくみられるが、どちらの層も概ね同様な傾向が出現していると判断できる。一軸圧縮強度に着目すると、四日市港層、古伊勢湾層ともにチューブ先端から30～40cm、40～50cmの試料が高い値を示した。サンプリングチューブ内で、一軸圧縮強度の平均値最小と平均値最大を比較すると、四日市港層では10%程度、古伊勢湾層では15%程度の差があることが判った。

一方、破壊ひずみでは両層ともにチューブ先端から30～40cmの試料が最小値を示した。ただ、古伊勢湾層は、ばらつきが大きい傾向を判断するのは難しく、破壊ひずみが小さく出現しやすいクラックによる影響と、大きく出現しやすい乱れの試料が混在した結果と考えられる。

また、湿潤密度はどの位置もほぼ同じ値であったが、深部にしたがい若干大きくなる傾向にあるといえる。

5. 考察

一般に試料の乱れが大きくなると、一軸圧縮強度が低く、破壊ひずみが高くなるといわれている。このことから今回の検討結果において、最も乱れの少ない試料はチューブ先端から30～40cmの部分、次いで40～50cmの部分であると推察される。通常、一軸圧縮試験は2供試体で実施することが多いため、この部分を選定することを提案したい。4供試体の場合は、より過小評価される部分を増やしてしまうため、4供試体の内1供試体を簡易三軸CU試験を実施するなど、地盤のせん断強さを総合的に評価することが望ましいと考える。

なお、留意点として、今回検討に用いたデータ数は全体で46と少なく、ばらつきの範囲が大きいと考えられる。また、地域特性、サンプリング方法の種類、サンプリングを行うオペレーターの力量の差、粒度特性などが異なれば傾向も変わってくる可能性がある。

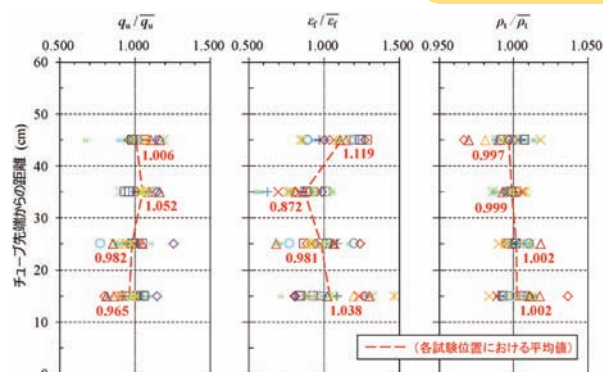


図-4 四日市港層のサンプリングチューブ内の正規化された一軸圧縮強度、破壊ひずみ、湿潤密度分布（各サンプリングチューブ内の試験結果平均値で正規化）

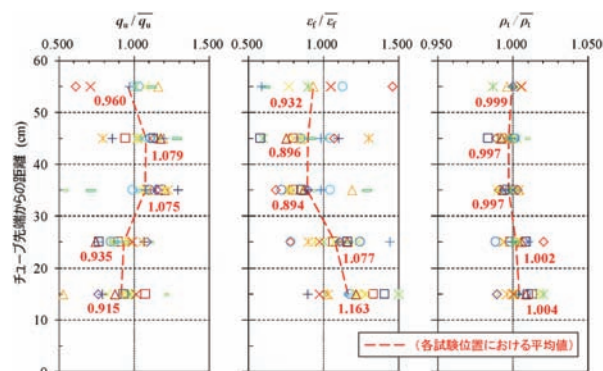


図-5 古伊勢湾層のサンプリングチューブ内の正規化された一軸圧縮強度、破壊ひずみ、湿潤密度分布（各サンプリングチューブ内の試験結果平均値で正規化）

これらのことから今後の課題点として、様々な地域でのサンプリング試料で検討するなど数多くのデータを用いることで、今回の考察に関して精度を高めるとともに、サンプリング時に試料をチューブから押し出す際の試料への影響の分析などが必要と考えている。

引用・参考文献

- 1) 吉田史郎：四日市地域の地質，pp.59～62，地質調査所，1984.2.
- 2) 渡辺崇博，鈴木一正，菅原紀明，柘木 博：現場技術者のための軟弱地盤対策工事ポケットブック，pp.74～75，山海堂，1986.6.
- 3) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，p.208，2013.3.