十勝川下流大津地区防災施設における耐震性能照査

The verification of seismic performance for disaster prevention facilities at lower part of Tokachi River

共通事業本部 \bigcirc 地質部 西村 右敏¹⁾ 水工事業本部 水工第1部 松井 真 $-^{2}$





概要(Abstract)

大津地区防災施設は、洪水時の効果的な水防活動を支援することを目

的として建設する「水防拠点」であり、平成22年の完成を目指して現在施工中である。

計画地域を含む十勝地方は、平成15年9月に十勝沖地震による被災を受けるなど地震の常襲地帯であり、 地震防災対策の推進がなされてきている。

本報告では、平成19年3月に策定された「河川構造物の耐震性能照査指針(案)」に示された新しい耐震照査 の考え方を踏まえて実施した防災施設の耐震設計について、地盤対策工によって効果的に耐震性能の向上を 図った事例を紹介する。

1. はじめに

河川防災ステーションや水防拠点などの防災施 設は、水防活動(自治体が主体となって実施)や、河 川管理施設の被災時復旧活動を、設備・資材・情報 面から支える重要な河川管理施設である(図-1.1)。 本報告では、十勝川下流部大津地区防災施設 (図-1.2)の設計にあたり適用したレベル2地震動に 対する耐震照査、および地盤対策工に関する考え 方について述べる。



図-1.2 大津地区防災施設(水防拠点)パース

2. 河川構造物の耐震設計に関する取組み

2.1 レベル2地震動耐震性能照査の適用

従来から河川管理施設では、共用中に1~2回 程度発生すると考えられる「レベル1地震動相当」 の揺れに対する耐震設計・点検・補強などが継続 して実施されてきたが、特に盛土構造を基本とし た河川堤防の設計では、仮に地震によって被災 しても、復旧は比較的容易と考え、基本的に「レ ベル2地震動」は考慮していなかった。

しかし近年、地震・津波・ハリケーン(台風)など の自然災害が国内外で多発する状況にあり、「安 全・安心な社会の確立に向けた質の高いインフラ の整備」が強く求められてきている。

そして平成19年3月に「河川構造物の耐震性 能照査指針(案)」が発刊されたのを契機に、河川 構造物においても、原則としてレベル2地震動に 対する耐震性能照査の実施が進められてきてい る。



図-2.1 最大震度重ね合わせ図²⁾

2.2 大津地区(十勝沿岸)における津波対策

太平洋側に面する十勝沿岸では、これまでも多 くの震災を受けており(表-2.1)、近年では平成15 年の十勝沖地震に伴って発生した津波により、犠 牲者(死者1名)が出ている。

A 1.1		
生起年月日	地震名称	規模
T4/3/15	十勝沖	M7.0
S27/3/4	「1952 年十勝沖地震」	M8.2
S37/4/23	十勝沖(広尾沖)	M7.0(7.1)
S43/5/16	「1968 年十勝沖地震」	M7.9
S44/8/12	「1969 年北海道東方沖地震」	M7.8
S57/3/21	「浦河沖地震」	M7.1
H5/1/15	「1993 年釧路沖地震」	M7.5
H6/10/4	「1994 年北海道東方沖地震」	M8.2
H15/9/26	「2003年十勝沖地震」	M8.0
H16/11/29	釧路沖	M7.1
H20/9/11	十勝沖	M7.0

表-2.1 十勝沿岸を震源とする代表的な地震

中川郡豊頃町は、「日本海溝・千島海溝周辺 海溝型地震にかかる地震防災対策の推進に関す る特別措置法(H16.4)」における「防災対策推進 地域」に指定され(図-2.1, 2.2)、具体的な津波防 災対策として、「迅速・的確な津波避難体制の整 備」が推進事項として示されている。²⁾



図-2.2 地震防災対策推進地域²⁾ (日本海溝・千島海溝周辺海溝型)



写真-2.1 パラモーター空中撮影(本業務で実施)による広域調査状況

2.3 目標とする耐震性能の設定

本施設の設計にあたっては、防災施設の耐震 性能として、次の事項を満足することを照査事項 とした。

① 施設全体

地震時の地盤変形後の堤防天端高さが、津波 遡上高(もしくは HWL のうち高い値)より下回らな いこと

※「耐震性能照査要領(案)」堤防編に示されている考え方に準拠

② 作業ヤード

地震後に生じる地盤変形が、直後の防災(災 害復旧)活動に支障を生じないレベルの平坦性を 確保すること

 ①については、防災施設全域を対象とした。
 ②については、「高規格堤防盛土設計マニュア₁₅ ル」で示されている耐震性能の考え方を参考 に、被災を受けても簡易に復旧が可能である¹⁰ よう、沈下量が 50cm 程度以下となることを目₅ 標とした。なお対策工の範囲は図-2.4 に示す 範囲に限定し、施工コストを縮減した。







図-2.4 レベル2地震動に対応する範囲

3. 河川堤防の耐震性能の照査方法

従来の堤防の耐震設計及び耐震点検では、円 弧すべり法により地震時安全率を算出し、地震時 安全率と堤防の沈下量との経験的な関係から、 堤防の沈下量を評価していた。^{3),4)}

近年、地震による液状化に伴う土構造物の変形を直接算定する種々の方法が提案され、実務

にも供されるようになってきた。

このような背景を踏まえて、「河川構造物の耐 震性能照査指針(案)・同解説(平成19年3月)」 では、静的照査法を用いて耐震性能の照査を行 う方法が示された。^{5),6)}

本検討で照査に用いた解析手法は、解析精度が比較的よく、対策工の評価が考慮可能であるこ

とから、有限要素法による自重変形解析手法 (ALID/WIN Ver.4.0 2次元 FEM 液状化流動解 析:(株)地盤ソフト工房)を使用した。

3.1 耐震性能の解析手法

耐震性能照査には、種々の解析手法が存在す るが、土構造物に対して用いられる主な解析手法 は表-3.1のように大別される。

これらの変形予測手法の特徴比較を表-3.2 に、 解析に必要な土質定数を表-3.3 に示す。表-3.2 中の特徴は、優位な点を青色で、不利な点を赤 色で示している。

従来用いられてきた「円弧すべり法」による耐震 点検評価手法は、基礎地盤の液状化によるせん 断強さの低下や地震時慣性力の作用を取り込ん でいるが、得られる結果は安全率であり、堤防の 被害程度を直接に予想するものではない。

これを補完するために、過去の被災事例検証 に基づく安全率と堤防の沈下量との関係から、安 全率を沈下量に読み換える方法がとられている。 簡便で、実務的にも取り扱いやすいが、予測精度 は必ずしも十分ではないことが指摘されている⁷。

これに対して、液状化を主因とする土構造物の 地震後の残留変形量を評価できる解析手法は、 種々のものが提案、研究されており、地震による 変形量を直接得ることができることから、耐震性能 が定量的かつ合理的に評価できるものである。

この内、静的手法は、動的手法に比べて簡便 であり、調査・試験および解析コストの面で優位で ある。「河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同 解説」⁶⁾において規定された静的に算定する方法 としては、「有限要素法による静的自重変形解析 手法」と「流体力学に基づく永久変形解析手法」 が示されている。

各解析手法の詳細については、文献 7)を参照 されたい。

3.2 照査の流れ

大津地区防災施設における耐震設計検討フロ ーを図-3.1 に示すとともに、目標耐震性能を表 -3.4 に示す。

解析検討は、大きく次のように区分される。

・地盤調査・解析による解析断面のモデル化

・堤体の耐震性能照査(安全性照査)

・対策工の検討(強化設計)

・対策後の耐震性能照査(強化後の安全性照査)



図-3.1 大津地区防災施設における耐震設計検討フロー

手 法		解析概念	:	プログラム(手法)名
		全応力解析		
友明 更 表 注 (FFM)	動的解析	方 채 다 ㅋ 舰 또	連成解析	LICA
11版委系法(F C WI)		有劝心刀醉机	非連成解析	FLIP
	静的解析(自重変形	解析)		ALID
最小エネルギー理論	(流体力学に基づく	永久変形解析法)	東畑モデル	
極限平衡法	(経験的な関係をも	とに安全率から沈下量を	推定)	円弧すべり法 (Δu)

表-3.1 解析手法の分類と特徴(代表的な手法) ^{文献7) p.3-5 を参考に作成}

動的解析:動的応答解析法により地震時の変形を時刻歴に従って追跡していく方法

静的解析:時刻歴を用いずに解析上の仮定を設けて地盤の物性を設定する簡便に取り扱う方法(液状化抵抗率FLから地盤剛性低下率を算定し、自重解析により変形量を算出) 全応力解析:動的応答解析後に、過剰間隙水圧の発生による有効応力の減少で地盤を軟化し、自重解析等を用いて残留変形を算出

有効応力解析:動的応答解析と過剰間隙水圧による有効応力の減少を時間領域で逐次同時に行い残留変形を算出

連成解析:釣り合い式と連続式を連成させて2相系の支配方程式を解く 非連成解析:釣り合い式と連続式を時間領域で交互に解く

				変形予測手法	ŧ	
	項目	FEM動的解析 (LIQCA)	F E M動的解析 (FILP)	FEM静的解析 (ALID)	流体力学に基づく 解析	円弧すべり解析 (Δu 法)
	バラメータ設定の難易度	一般に難しい	一般に難しい	箭便	簡便であるが、 一部設定に課題あり	非常に簡便
	モデル化の難易度	 地盤構成・対策工が 複雑な場合に モデル化がやや煩雑 	 地盤構成・対策工が 複雑な場合に モデル化がやや煩雑 	 地盤構成・対策工が 複雑な場合に モデル化がやや煩雑 	 F EMよりも単純だが、 対策工を含む場合には 工夫が必要 	非常に容易
	計算時間	ある程度要する	ある程度要する	早 い	早 い	非常に早い
47	応答値(変形量等)の時刻歴算定	可能	可能	不可	近似的に可能	不 可
解析手は	地震波の特性	完全に考慮可能	完全に考慮可能	液状化層の 判定の際にのみ	液状化層の 判定の際にのみ	液状化層の 判定の際にのみ
法	残留変形量の算定	可能	可能	可能	可能	経験式により算定
	解析の適用範囲	広い	広い	比較的広い 複雑な断面・構造の場 モデル化の割切りが必		複雑な対策工の場合、 モデル化の割切りが必要
	予測の精度	比較的良い	比較的良い	比較的良い	<mark>比較的良い</mark> 変形をやや過大評価	 一般に精度落ちる 安全側の変形量を 示す傾向
	ブログラムの普及度	普及しつつある	比較的普及 港湾関係の指針	普及している といえる	普及しつつある	非常に普及している
	盛土自重による基礎地盤の側方流動	可能	可能	可能	可 能	不 可
	互層状の複数の液状化層への対応	直接モデル化可能	直接モデル化可能	直接モデル化可能	近似的に可能	直接モデル化可能
	液状化層の過剰間隊水圧発生	直接考慮可能	直接考慮可能	剛性低下率で考慮	完全液状化と仮定	FLの関数として考慮
地盤	液状化に伴う土の強度低下	直接考慮可能	直接考慮可能	不 可	残留強度を0 として考慮	有効応力の減少 として考慮
の評価	液状化に伴う土の剛性低下	直接考慮可能	直接考慮可能	剛性低下率で考慮	剛性を0 として考慮	不 可
	過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下	直接考慮可能	圧密解析等により 別途算定が必要	圧密解析等により 別途算定が必要	圧密解析等により 別途算定が必要	不可
	非液状化層の剛性低下等	直接考慮可能	直接考慮可能	剛性低下率で考慮	経験的に設定	不 可
	盛土の強度を考慮可能	考慮可能	考慮可能	剛性低下率で考慮	不可	考慮可能

表-3.2 変形予測手法の特徴比較^{7)-部抜粋}

表-3.3 変形予測手法に必要な定数 (○:必要項目)")-部抜粋

分 類				変形 予測 手法					
		類	項目	FEM 動的解析 (LIQCA)	FEM 動的解析 (FILP)	FEM 静的解析 (ALID)	流体力学 に基づく 解析	円弧すべり 解析 (Δu法)	
			湿潤密度 pt(t/m ³)	0	0	0	0	0	
		林田 王田	細粒分含有率 Fc(%)			0	Δ	Δ	
		初生	10%粒径D10, 平均粒径D50(mm)			Δ	Δ	Δ	
	±		塑性指数 Ip(%)			Δ	Δ	Δ	
	質	圧 密	初期間隙比 e0	0					
_	調査	++ / 斯	内部摩擦角 φ(度) (破壊応力比Mf)	0	0			0	
		12 AV 801	変相角¢p(度) (変相応力比 Mm)	0	0				
	試		せん断弾性係数 G(kN/m ²)			0			
貝	験か		弾性係数 E(kN/m ²)				0		
正	6		初期せん断弾性係数 Gma (kN/m²)	0	0				
数	求	変 形	体積弾性係数 Kma(kN/m ²)		0				
	ま		ポアソン比 <i>ν</i>		0	0			
	る定		せん断波速度 Vs(m/s)		0				
	数		履歴減衰の上限値 hmax		0				
		压绞,膨调	圧縮指数 λ	0					
		江州。北欧州	膨潤指数 ĸ	0					
		透水	透水係数 k(cm/s)	0					

△は、液状化層の判定を実施する場合に必要となる。

表-3.4 大津地区防災施設における目標耐震性能

地震タイプ	耐 震 性 能					
	築 堤	水防施設				
レベル1	対象地点の天端高が外水位(津波遡上)高を下回らない。	地震によって防災施設としての健全性を損なわない性能				
レベル 2-1	現況築堤天端高 EL=7.94~8.05m 外水位(津波)高日 =5.58~5.66m	地震による損傷が水防作業ヤードとして致命的とならない性能				
レベル 2-2	∴許容沈下量<2.36m	作業ヤードを確保(崩壊的な破壊に至らない)				

4. 地盤調査

4.1 平成15年十勝沖地震における被災履歴⁸⁾ 平成15年十勝沖地震では、十勝川下流域に おいて、堤防の縦断亀裂・のり面すべり・沈下等 の被害が発生している。

この内、十勝川河口から 3.5km 付近右岸の大 津築堤では、延長 650m にわたってすべり崩落に よる被災(写真-4.1)と、さらに上流側の延長 350m で縦断亀裂が発生している。この時、築堤法尻で は、液状化による噴砂跡が確認されている。

大津築堤は、旧河道に位置しており、旧堤に対 して堤外側へ拡幅・嵩上げが行われて現在の築 堤断面が構築されてきた履歴を有しており、この 旧堤が液状化したことが被災原因であると動的変 形解析によって予想さていた。

4.2 築堤および高水敷の工事履歴

図-4.1は、十勝川下流域の浚渫及び掘削工事の履歴を示したものである。

大津築堤の川表側のり尻付近は浚渫排泥池跡 が多数あり、基礎地盤を構成する土質は、浚渫さ れた礫質土であるものと推定された。

また、築堤を構成する土質は、周辺から採取利 用した砂質土が主体であると想定された。

4.3 土質試験

土質試験項目は、粘性土地盤の圧密沈下対 象層では圧密沈下解析に用いる定数設定のため の圧密試験を実施した。

液状化対象層に対しては、液状化変形予測手 法の内、静的 FEM 解析と円弧すべり解析の2種 類の解析検討が可能な定数設定のための試験を 実施した。

4.4 砂質土層の液状化判定

沖積層の砂質土層で以下の3つの条件すべて に該当する場合には、液状化の判定を行わなけ ればならない^{5),9)}。

- 1) 地下水位が現時盤面から 10m 以内にあり、かつ、 現時盤面から 20m以内の深さに存在する飽和土層
- 2) 細粒分含有率 Fc が 35%以下の土層、又は、Fc が 35%を超えても塑性指数 lp が 15 以下の土層
- 3) 平均粒径 D50 が 10mm 以下で、かつ、10%粒径 D10 が 1mm 以下である土層



写真-4.1 平成15年十勝沖地震における大津築堤の被 災状況(河口から3.5km付近)池田河川事務所資料



図-4.1 十勝川下流域 浚渫及び掘削工事空撮平面図 (昭和 63 年~平成 18 年)池田河川事務所資料



土質試験結果からは、液状化の可能性がある 土層として B, Asc1, Asc2 が該当した。

代表的な土質の粒径加積曲線を図-4.3 に示 す。同曲線は、現況築堤材料(B)、砂とシルトの互 層(Asc1)で主体をなす層、Asc1層でシルトの卓越 した薄層(Asc1^{**})、シルト層(Ac2)の採取試料によ るものである。

Asc1 は、液状化層として最も厚く、地震後の変 形・沈下量が最も卓越すると推定されるが、現況 築堤下では、特に不均一であることが確認されて いる。このような不均一土層における細粒分含有 率 Fc の設定は、解析上重要であると考えられる (細粒分を小さく設定すると変形が過大評価される 可能性があるため)。

また、既設盛土 B1 が砂であるとともに、盛土内 に地下水位が存在することから、地下水位以深の 盛土についても液状化対象層とした。

設定土質定数の一覧表を表-4.1に示す。

5. 耐震性能の照査

耐震性能照査は、施設荷重(水防倉庫)を考慮 した自重変形解析とともに、従来の円弧すべり法 (レベル1地震動)を実施している。

検討に用いた地震タイプを表-5.1に示す。

+勝川河口に位置する大津地区は、耐震上の 地盤種別はⅢ種に分類され、地震タイプはプレー ト境界型大規模地震(レベル2-1)が想定されてい る。

5.1 円弧すべり(∆u法)による検討

ここでは、従来の円弧すべりによる(レベル 1) 推定沈下量を参考に示す。

過去の地震による堤防の沈下量の上限値と円 弧すべりによる安全率の関係から設定された堤防 の高さに対する沈下量の比を表-5.2 に示す。間 隙水圧(Δu)を考慮した安全率は、表-5.3 に示さ れるように 0.6 を下回っており、これより推定される 沈下量は、堤防高×0.75 を上限値(表-5.2)として 示される。

従来法による沈下量は、堤防高を8mとすると、 6m程度を上限に生じることとなる。



表-5.1 地震タイプと水平震度

抽雪タイプ	林雪新社	·	水平震度(標準値)			
地長ライノ	地展動強	1900区刀	I種	Ⅱ種	Ⅲ種	
レベル1	河川構造物の共用期 発生する確率が高い	0. 16	0. 20	0. 24		
レベル 2-1	対象地点において 現在から将来にわ たって考えられる 最大級の強さをも つ地震動	プレート境界型 大規模地震	0. 30	0. 35	0. 40	
レベル 2-2		内陸直下型地震	0. 80	0. 70	0. 60	

表-5.2 堤防天端の沈下量(上限値)と 地震時安全率の関係^{3),4)}

地震時安全				
慣性力を考慮 F _{sd} (k _b)	過剰間隙水圧を考慮 F _{sd} (du)	沈下量(上限値)		
1.0-	0			
0.8 <f< td=""><td colspan="4">$0.8 < F_{sd} \le 1.0$</td></f<>	$0.8 < F_{sd} \le 1.0$			
$F_{sd}(k_h) \leq 0.8$	0. 6< F _{sd} (∆u) ≦0. 8	(堤防高)×0.50		
·	$F_{sd}(\Delta u) \leq 0.6$	(堤防高)×0.75		

表-4.1 解析に用いた土質定数一覧表

			単位体積	細粒分			常時				地震時.	地震後	
土 層	含水比 wn(%)	設計 N 値 N(回)	重量 γ t(kN/m³)	含有率 Fc(%)	粘着力 c(kN/m²)	せん断 抵抗角 <i>(</i> °)	せん断 弾性係数 G(kN/m2)	ポアソン 比 ν	透水係数 kx,ky (m/d)	液状化 強度比 RL	液状化 安全率 FL ^{**1}	低下剛性 G1	相対密度 Dr(%)
B1	23	6	19.0	22	60	32	6316	0.33	0.864	0.19	0.78 0.47 0.40	安田・ 稲垣式 ^{※2} G/40 ^{※3}	38
B2	-	-	18.5	22	35	22	6316	0.33	0.864	-	-	G/40	-
Ac-o	80	6	15.0	-	60	0	6316	0.33	0.00864	-	-	G/10	-
Asc1	39	7	17.0	43	0	32	7368	0.33	0.864	0.22	0.78 0.47 0.44	安田・ 稲垣式	37
Ac2	64	3	16.0	-	80	0	3158	0.33	0.00864	-	-	G/10	-
Asc2	43	6	17.0	43	0	30	6316	0.33	0.864	0.19	0.66 0.40 0.34	安田・ 稲垣式	31
Ac3	-	4	16.0	-	80	0	4211	0.33	0.00864	-	-	-	-
Asc3	-	13	18.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

※1 上からレベル 1、レベル 2-1 およびレベル 2-2 に対応する値 ※2 地下水位以深に適用 ※3 地下水位以浅に適用 As とAc1 はモデル化で除外した

表-5.3 安全率と堤防天端沈下量

	安全	地震にとる	
条件	施設盛土	施設盛土 +施設荷重	地震による 推定沈下量
常時	2. 37	2.06	_
地震時 (k h=0. 24)	1.16	1. 05	0
地震時 (Δu法)	0. 57	0. 59	≒6.Om

5.2 静的有限要素法(自重変形解析)による検討

図-5.1 は、解析モデル(土層構成と要素)ととも に、変形解析結果例として変形メッシュ図を示し たものである。

天端沈下量は、レベル 2-1 で 1.9m 程度、レベル 2-2 で 1.7m 程度の解析結果を得た。

当該地盤条件および堤体規模では、従来法で は極めて沈下量を過大に評価するものと考えられ、 自重変形解析による照査は地震動による変形を より適切に評価しうる手法と考えられる。

なお耐震性能照査(外水位に対して)は、ここ で算出した地震時沈下量と圧密沈下計算による 常時圧密沈下量を合算して、築堤天端高が津波 遡上高を上回っていることを確認している。

また、この天端高は、計画高水位(HWL)よりも 上に位置することから、レベル 2 の後でも高水に 対して必要最低限の堤防機能を保持するもので ある。

一方、地震後における最低限の防災活動を可能とする作業ヤードの確保に対しては、天端で 1.7~1.9mの沈下が生じた場合には、既往地震の 被災履歴⁸⁾からもヤード機能の確保は困難である

振動締固め工法 静的締固め工法	所要の液状化抵抗率を 満足するように設定	 ・サンドコンパクションパイル工法 ・コンパクショングラウチング工法
ドレーン工法	所要の過剰間隙水圧比を 満足するように設定	グラベルドレーン工法 プラスチックドレーン工法
押え盛土工法 置換工法	過剰間隙水圧比考慮した 円弧すべり計算で設定	・押え盛土工法 ・置換工法
固結工法	円弧すべりによる照査と 改良体の外的および内的安定で照査	深層混合処理工法 中層混合処理工法
鋼材を用いた工法	円弧すべりによる照査と 構造体の外的および内的安定で照査	自立(鋼管)矢板工法

と判断される。

このため、作業ヤードとしての施設機能のため の対策について検討を実施した。

6.対策工法の検討

防災施設盛土の耐震性能は、レベル1地震動 に対しては有害な塑性変形が残らないことを、レ ベル2地震動に対しては地震による損傷をできる だけ小さく抑え早急に復旧できることを目標として いる。

レベル2地震後においても防災作業ヤードとし て必要な面積の平場が確保できることを目的とし、 築堤横断方向で許容される沈下量は、ヤードの 平坦性の確保を考えて50~30cm程度(相対沈下 量が20cm以下)を目安とした。

6.1 液状化対策工の選定

代表的な液状化対策工には、表-6.1 に示す工 法が挙げられる¹⁰⁾。

これらの対策工において、当該地盤状況およ び対策規模等を考慮して、レベル 2 地震動に対 する適用性や問題点を次に挙げる。



図-5.1 土層構成モデルと変位メッシュ図

- ①締固め工法:サンドコンバクションパイル(SCP)工法は、 液状化対象層に細粒分が多く含まれるため(Fc≒43%)、 十分な効果が期待できない可能性がある。(適用性の 高い地盤は、一般に細粒分含有率が Fc≦20%程度とさ れている。^{10),11)})
- ②ドレーン工法:グラベルドレーン工法は、地震時に間隙 水を排水するために、排水に伴う沈下が発生する。また、 当該地区の液状化対象層には細粒分を含むことと、排 水距離が長いため、間隙水圧の速やかな消散が困難 である。
- ③押え盛土・置換工法:押え盛土および置換工法は、堤 体規模が大きく、液状化対象層厚が厚いため適用困難 と考えられる。
- ④固結工法:深層混合処理工法は、柱列改良における改良体間の土質の評価方法が確立されていないため、この点を解消するためには、改良率を上げる必要がある。
 - 改良率が 78.5~100%の全面改良は、改良体全体が 外力に抵抗するため、全体的にも内部的にも安定性が 高い。
 - 格子状改良は、格子内の土の体積変化が抑制され るため、液状化を抑止する原理上の利点がある。また、 格子状改良の改良率は50~60%程度となる。
- ⑤鋼材を用いた工法:自立矢板工法は、盛土規模・形状 が大きく、液状化層厚が厚いため、抑止効果が期待で きない可能性がある。

以上から、大津地区水防施設盛土に対しては、 固結工法(深層混合処理工法)が確実な改良効 果を得るものと考えられた。

なお、平成 15 年地震の復旧に際して採用され た SCP の液状化対策としての適用性についは、 当該対象土質の細粒分含有率 Fc が高いため、 パイル打設に伴う地盤のN値(密度)増大効果が 低減される試算結果から、現行の設計手法では 不適と判断された。

6.2 対策工規模の設定

対策工検討に際しての諸条件を示すとともに、 試算によって改良規模の設定を行う。

改良地盤は、以下のように設定した。

改良率:ap=50%

改良体の設計基準強度:quck=500kN/m²

複合地盤強さ:c=125kN/m²

変形係数:E₅₀=180×125=22,500kN/m²

試算は、レベル 2-1 地震動で図-6.1(a), (b)に 示すケースで行った。 図-6.1(a)は、直下型改良で改良幅を次の 3 パ ターンに設定した。

改良幅 20m:現況築堤ののり先付近までの改良(現況 築堤を開削しない)

改良幅 40m:現況築堤天端を確保する開削を伴う改良(現況築堤を 20m 程度開削する)。

改良幅 120m: 現況築堤全ての開削を伴う改良。

図-6.1(b)は、両脇型で改良幅20mの現況築堤 開削を伴わないケースである。



図-6.1(a) 直下型改良試算ケース(改良幅を延長)



試算結果の一例として図-6.2 に変位メッシュ図 を示すとともに、以下に各ケースを要約する。

改良幅 L=20m では、水防施設盛土のり面での 変形を抑えることができるが、現況築堤自体が液 状化するため、施設全体に大きな変形を伴う傾向 にある。

L=40m では、現況築堤の開削部が非液状化土 質の盛土材料で置き換えられる効果も見込まれる が、水防施設盛土のり肩から 20m程度の平坦部 が確保できる。

L=110m では、現況築堤から水防施設盛土全 体が平坦で、かつ沈下量も L=40m に比べ著しく 小さい結果が得られた。ただし、盛土直下全てを 改良することは変形抑止に対して最も効果的であ るが、現況築堤を全て開削撤去しなければならず、 このため川表側に締切工を必要とするとともに、 開削、改良、盛土工において、多大な時間とコストを要する。

なお、両脇型改良の解析値は、直下型改良の L=20m 改良と比較しても沈下量がほとんど低減し ない結果を得た。

これは、当該築堤の断面が大きいことと、現況 築堤自体が液状化によって堤外側方へはらみだ す変形を生じることによるものである。

以上から、直下型改良の L=40m が合理的な選 択であると考えられる。 (a) 直下型改良(改良幅 40m)



図-6.2 改良型の異なる試算における変位メッシュ例

7. 対策工による耐震性の照査

ここでは、試算結果に基づき設定した、水防施 設盛土のり尻から改良幅 40m の固結工法におけ る耐震性能照査結果について示す。

7.1 大津築堤における対策工の効果

図-7.1 は、検討断面の概略図を示したもので ある。対策工の施工手順は、既設築堤開削後に、 液状化対策工(固結工法)を行い、既設築堤開削 部と防災施設盛土部の盛土を良質材(非液状化 材)で行うこととした。

図-7.2 は、レベル 2-1(および参考にレベル 1) における変位メッシュ図を示したものである。

大津築堤は、築堤規模が大きいことから、直下 の液状化層厚の影響を大きく受けるとともに、地 震動による盛土自体の塑性軟化に伴う変位の総 量が大きくなるものと考えられる。

液状化対策なし(同図(a), (b))では、液状化に よって築堤に著しい沈下が発生している。

特にレベル 2-1 では、液状化に伴う側方流動 が顕著に現れており、堤内側では崩壊的なすべり 破壊が生じるものと想定される。

液状化対策あり(同図(c), (d))では、(配置は図 -7.1 を参照)、レベル 2-1 において、堤外側は無 対策と同様に側方流動が生じ、現況築堤天端に 沈下が生じているが、対策工直上の法面の安定 性は保たれている。

7.2 水防作業ヤードにおける耐震性能

図-7.3 は、レベル 2-1 地震動における盛土の 変形状況を対策工の有無でプロットしたものであ る。 無対策の場合は、天端に 1.5~2.0m の沈下が 生じ、法先の移動も顕著に現れており、堤内側へ の崩壊的な破壊を生じるものと想定される。

これに対して液状化対策を実施した場合は、天端の沈下が 0.3~0.6mであり、無対策と比較し 1/4~1/5の沈下量に低減され、約 20m 幅の平坦 性が確保可能と考えられる。

なお、解析では盛土材料を安全側の評価をし ているが、実際の工事における盛土の材料管理 および施工管理は、非常に重要な要素であると 考える。

以上から、レベル 2 地震動における水防施設 盛土は、無対策では崩壊に至るが、液状化対策 によって作業ヤードの確保が可能となる結果を得 た。

最後に解析結果出力の例として図-7.4 を示 す。

(a)変位メッシュ図は、モデルと同スケールにお ける要素変形を示し、(b)変位ベクトル図は、接点 変位の大きさと向きを示している。

(c)主応力図は、液状化変形に伴い発生する最 大応力とそれに直交する最小応力の向きと大きさ を示したもので、(d)要素安全率コンター図は、改 良地盤強さと改良地盤が受ける作用応力の比を コンターで示したものである。

改良体自体の安定(内的安定)の照査は、液状 化対策工設計・施工マニュアル(案)¹⁰⁾に準じて 行っているが、静的有限要素法では、液状化に 伴う地盤内応力・変形挙動とともに、対策工に作 用する応力を定量的に把握することが可能である ことから、今後はこれらを利用した内的安定照査・ 検討方法の確立が望まれる。



図-7.2 液状化対策の有無における解析結果(変位メッシュ図)





図-7.4 液状化対策工法の解析出力例

8. おわりに

本報告は、北海道開発局 帯広開発建設部 池田河川事務所発注の大津地区防災施設設計 業務に関する調査・検討結果をとりまとめたもので ある。

大津地区防災施設工事は、平成20,21年の2 ヵ年施工で実施が予定されており、洪水・地震・津 波災害の抑止・緊急避難・復旧支援施設として 「地域防災力」の向上に寄与することが期待され ている。

業務の遂行にあたってご指導と、報告書の作 成を快く承諾を頂いた、池田河川事務所関係各 位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 洪水時における円滑な水防活動を支援するための水 防拠点の設計:河合敦・松井真一, NoteKaihatsuKOEI Vol.13 2005.12.
- 2) 日本海溝·千島海溝周辺海溝型地震対策大綱:中央 防災会議(内閣府),平成18年2月.

- 河川堤防設計指針:国土交通省河川局治水課,平成 14年7月.
- 4) 河川堤防の構造検討の手引き:財団法人国土技術研 究センター,平成14年7月.
- 5) 河川構造物の耐震性能照査指針(案)同解説-I.共 通編-:国土交通省河川局治水課,平成19年3月.
- 6) 河川構造物の耐震性能照査指針(案)同解説-Ⅱ.堤 防編-:国土交通省河川局治水課,平成19年3月.
- 7) 河川堤防の地震時変形量の解析手法:財団法人国 土技術研究センター, JICE 資料第 102001 号, 平成 14 年 2 月.
- 平成15年(2003)十勝沖地震河川災害復旧記録誌, 北海道開発局帯広開発建設部,平成19年11月.
- 9) 道路橋示方書·同解説V耐震設計編:社団法人日本 道路協会, 平成14年3月.
- 10) 液状化対策工法設計・施工マニュアル(案):建設省, 共同研究報告書第186号,平成11年6月.
- 11) 現場技術者のための土と基礎シリーズ 20 液状化対 策の調査・設計から施工まで:社団法人地盤工学会, 平成9年6月.