

# 液状化により被災した河川堤防の 地盤改良を併用した復旧

折敷 秀雄<sup>1</sup>・佐々木 康<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 国土交通省関東地方整備局 (〒330-9724 さいたま市北袋町1-21-2さいたま新都心合同庁舎2号館)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 広島大学工学部 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

本稿では、近年発生した3例の震災で基礎地盤が液状化した堤防復旧において実施した調査方法、被災メカニズムの推定、再度災害防止のための基礎地盤改良工事の設計・施工について述べ、この理解を助けるために堤防築造と設計に関する歴史的経緯や技術基準類の改定経緯にも言及した。

従来、地震により被災した堤防の復旧は原形復旧が原則であった。地盤改良を併用した復旧が行われたのは釧路沖地震による復旧が国内初であった。後に、これらの実績も参考としつつ、必要な区間を限って堤防の築造に耐震計算を導入することが河川砂防技術基準(案)に明記されることとなった。

**Key Words :** river-dyke, earthquake, liquefaction, restoration-works, earthquake-proof, foundation treatment

## 1. はじめに

わが国では河川の、特に下流部を中心として厚い軟弱な地層から形成されている地盤の上に比較的高い盛土をした河川堤防が築かれている。

一方、日本列島はしばしば大きな地震に見舞われている。大正12年(1923年)9月に発生した関東大地震以来、平成7年(1995年)1月に発生した兵庫県南部地震までの71年余の間に国内で発生したマグニチュード7程度以上の大きな地震は22回にもなっている。

こうしたことから、軟弱地盤上に築かれた河川堤防は大きな地震のたびに甚大な被害を受けてきたが、従来から地震により被災した堤防の災害復旧は原形復旧が原則とされてきた。

著者らは平成5年(1993年)から平成7年(1995年)にかけて発生した釧路沖地震、北海道南西沖地震、兵庫県南部地震の3例の地震の発生直後から、直轄河川災害復旧の技術総括担当官ならびに技術アドバイザーとして復旧計画の策定に係わってきた。

本報告で取り上げた地盤改良を含む復旧事例は災害復旧工事としては前例がなく、工法、工事内容決定と事業認可は並行に進められることから、工事期間中は現地調査、技術的検討、施工実務を担当する現地事務所と建設本省との密接な連携が不可欠で通常工事に比べて頻度高い連絡調整が必要であった。

3例の地震における被害程度の甚だしい箇所が多

くは、後に述べるように基礎地盤の液状化が主因と考えられた。このため再度災害の防止を目的とし、表-1に示す被害の激甚な区間ではサンドコンパクションパイル工法(S.C.P工法)、深層混合処理工法、動圧密工法などにより地盤改良することとした。

こうした地盤改良を併用した復旧は災害復旧事業としては国内初のことであった。

これまでもこれらの地震による堤防の被害状況や被害発生過程の解釈などについては断片的に報告してきた<sup>(1)(2)</sup>。本稿では先に挙げた三つの地震による堤防被害の復旧工事に地盤改良を含む改良復旧を導入した経緯について以下の視点からとりまとめ報告する。

- ① 堤防築造と設計に関する歴史的経緯
- ② 地震災害における堤防被害調査法
- ③ 被害メカニズムの推定と復旧工法の選択
- ④ 技術基準類の改訂

## 2. 堤防築造と設計に関する歴史的経緯

河川の堤防は堤体自体と基礎地盤とが一体となつて、洪水が河川から堤内地側(一般に耕地や人家が立地している側)に氾濫するのを防ぎ、洪水を安全に流下させるために設置される最も重要な治水施設である。また、図-1に示すようにわが国においては米国などに比較して河川堤防によって防御されてい

表-1 震災復旧として地盤改良を実施した堤防(直轄河川)

地震名	被災延長	うち地盤改良を施工した区間			
		河川名	箇所名	工法	延長
釧路沖地震	5 河川 33,905m	釧路川	遊水地左岸 3	S.C.P工法	160m
			遊水地左岸 4	S.C.P工法	240m
			遊水地左岸 5	S.C.P工法	400m
			遊水地右岸 4	S.C.P工法	800m
		十勝川	右岸統内築堤	S.C.P工法	540m
北海道南西沖地震	2 河川 8,915m	後志利別川	左岸兜野築堤	S.C.P工法	130m
			右岸豊岡築堤	動圧密工法	50m
兵庫県南部地震	3 河川 8,258m	淀川	左岸西島地区	深層混合処理工法	1,800m
		猪名川	右岸額田地区	深層混合処理工法	81m

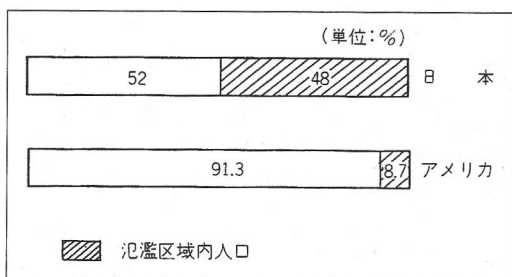


図-1 日本とアメリカの洪水氾濫区域内人口の比較 (建設省資料による)

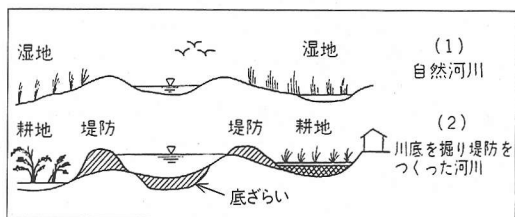


図-2 初期の堤防概念図

る人口の多さなどからも、その重要性はきわめて大きいものがある。

以下に、一般的なわが国の河川堤防がどのように整備されて来たか、また、その堤体や基礎地盤はどのような状態になっているのかについて概要を記述する。

### (1) 堤防築造の歴史

わが国における堤防の始まりは河川沿いの土地利用、とりわけ稲作との関係が深いと考えられている。古代の河川堤防は図-2に示すように川底をさらえ小規模な盛土をしたものから始まり、次第に大規模となっていった。

日本書紀の記録<sup>3)</sup>によると仁徳11年(323年)には寝屋川筋の古川沿川、現在の大阪府門真市に茨田の堤が築造されたとあり、これがわが国の書物に残る最古の河川堤防である。写真-1に示す現存する茨田



写真-1 茨田の堤(大阪府門間市)

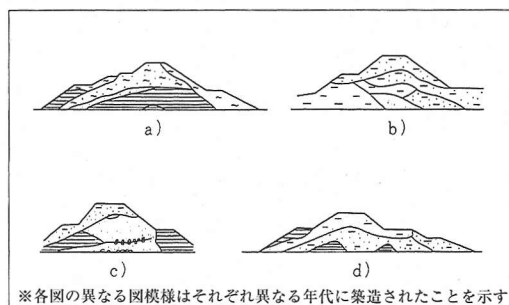


図-3 既設堤防の築造履歴を示す土質分布例 (建設省堤防開削調査資料より)

の堤は底幅7~8m、高さ2m程度であるが、使用されている土砂は明らかに他所で採取したものと思われる山土である。

時代が下り、治水・利水の整備が進むにつれて、それにふさわしい流域内の土地の高度な利用・活用がもたらされ、さらに高いレベルの河川整備が求められるようになる。このように河川沿いや洪水氾濫

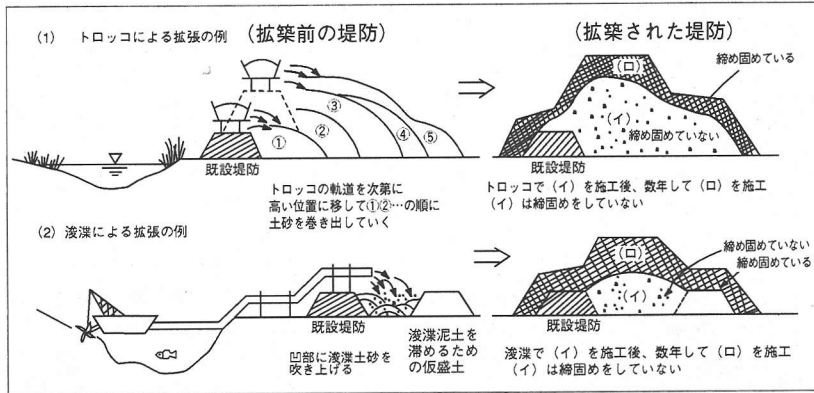
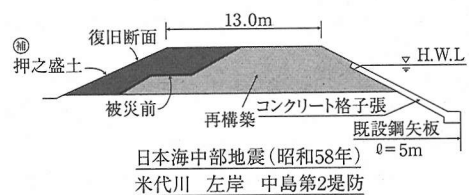
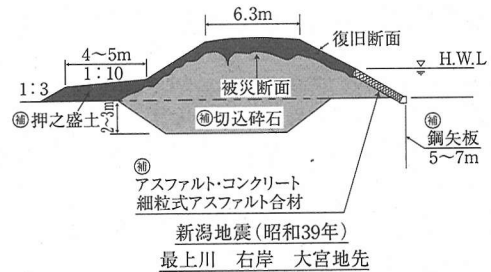
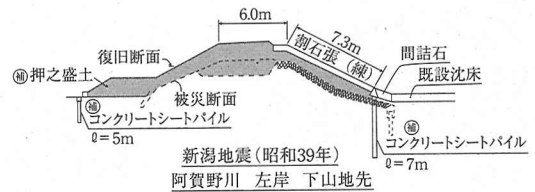


図-4 過去の堤防拡張の例

区域内の土地利用の高度化と治水・利水の施設整備は表裏一体の関係にあつて、相互に影響を及ぼしながら今日の堤防の姿が形成されたものである。従つて、当初から今日見るような流域の土地利用形態や巨大な堤防の姿などを想定して各時代の計画や工事が行われてきたものではない。

こうした経緯から、一般に時代とともに拡張されてきた堤防は、基礎地盤が適切でない場所にも築かれているし、図-3に示すように堤体材料も附近にある各種の土砂が使われ、その構成、詳細な施工方法などの資料が整理・保存されているものは限られているのが実態である。また、明治時代以降の築堤工事においても、利根川下流部の改修などで図-4に示したようなケースもあり、今日の現場におけるような堤体全体の盛土、締め固めに関する厳格な施工管理は必ずしも、すべての現場において行われてはいなかった。



■ 再構築した部分  
 ⑩ 堤防強化のための補助的工法

図-5 過去の震災復旧堤防例

## (2) 従来の堤防設計の考え方

わが国における平成10年3月末現在の大河川の完成堤防延長は、計画延長の50%強という低い水準にある。

また、多くの中小河川の整備水準はさらに低く、今日なお、毎年のように発生する洪水によって深刻な被害が危惧される状況にある。

一方、国内の河川整備のあり方については同種、同規模の河川の安全度を同一とすることを基本とし、毎年洪水による浸水の回避や低い水準にある河川の治水安全度を高めるための洪水対策を優先してきた。

上に述べたように、既設の堤防は長い歴史の間に拡張を繰り返して次第に大断面になってきたことに加えて、かなりの部分が軟弱地盤上に設けられており、地震に対して十分な強度は持っていない。その背景には、洪水と地震とが同時に発生する確率はそれほど小さくなく、土で作った堤防は壊れても修復し易いという考えがあり、洪水と地震の同時生起確率が皆無ではないことを承知の上で堤防の地震対策は後

位とされてきた。このことは昭和52年に改訂された河川・砂防技術基準(案)設計編第1章第2節<sup>4)</sup>において「…地震と洪水が同時に発生する可能性が少なく、また地震によって土堤が被害を受けても復旧が容易であることなどの理由により地震による外力については一般に検討しない。」と記されていることからわかる。

表-2 出水期の著名地震（河川堤防に甚大な被害が発生したもの）

地 震	発生年月日	洪水との関連
関東大地震	大正12. 9. 1	台風出水9月15日，利根川堤高の7割の出水
福井地震	昭和23. 6. 28	梅雨豪雨出水7月24, 25日，九頭竜川氾濫，福井市の大半浸水
新潟地震	〃 39. 6. 16	豪雨出水7月7日，新潟市街地浸水
宮城県沖地震	〃 53. 6. 12	梅雨大雨注意報6月に4回6日間，（吉田川）
北海道南西沖地震	平成5. 7. 12	台風接近，7月末，（後志利別川，尻別川）



写真-2 釧路川堤防の被災(遊水地左岸 KP9.8km)

仮に震災堤防の全体を取り除き，再構築しなければならぬような大災害においても図-5に示したような“切り返し”と称する局所的な修復工事が行われた。これらの災害復旧記録の中には噴砂など明らかな地盤の液状化の痕跡と見られる記述や写真があるにもかかわらず地盤改良などは行われなかった。ただし，以下のような簡易な工夫は施されていた<sup>5), 6), 7), 8)</sup>。

- ・ 関東大地震  
利根川右岸 千葉県東葛飾郡旭村芽吹堤防  
基礎に松丸太の杭を2列千鳥に配した施工
- ・ 福井地震  
低水路を堤防から離し，敷幅を広くする  
築堤適切土の利用と緩法勾配
- ・ 新潟地震，日本海中部地震

図-5に示した補助的工法の採用

以上のような経緯の下で第二次世界大戦後，毎年のように発生した大水害の災害復旧などを経て，昭和25年に災害防除を中心に治水と利水開発による国土復興を図ろうとして定められた「国土総合開発法」，昭和32年閣議決定の「新長期経済計画」と機を合わせた「新治水事業5箇年計画」が策定されて国土整備の大きな胎動が始まって行く中で，昭和31年に堤防設計の考え方を規定する河川・砂防技術基準(案)の策定に着手し，同33年に，これが策定された。同(案)は制定以降，数次の改訂を経て平成9年の改訂に至るまで，堤防設計に地震による外力を対象とすることは明記されなかった。



写真-3 十勝川堤防の被災(右岸 統内地先)

### (3) 地震災害発生後の洪水対応の実態

過去の地震のうち，出水期もしくは出水期直前に発生したものを整理すると表-2のとおりである。

これらの中で，福井地震においては地震発生の際そ1ヶ月後，九頭竜川の被災堤防の応急手当てがまだ十分にできないうちに梅雨末期の出水があり福井市の大半が死傷者を伴う大水害に見舞われた。

新潟地震では信濃川沿いの市街地が豪雨により被災堤防を越水して浸水した。

また，関東大地震でも利根川において，無被災堤防の計画高水位以上の土砂を切り取って沈下した区間に仮盛土をする等の不眠不休の応急手当をした僅か3日後に台風で堤防高の7割程度に迫る出水があった。宮城県沖地震，北海道南西沖地震においても緊急復旧工事期間中に梅雨前線や台風の接近により水防団の出動や待機など普段では実施されない低い水位から特別の体制がとられた。

さらに，地震の発生は出水期に遭遇していなかったものの兵庫県南部地震でも淀川下流部において緊急復旧工事完了までの間，弱体化した堤防からゼロメートル地帯への浸水を警戒して24時間体制で厳重な監視が行われた。

## 3. 三つの事例における震災堤防の被害調査

### (1) 被災概要<sup>9), 10), 11), 12), 13)</sup>

#### a) 釧路沖地震による堤防被害

平成5年(1993年)1月15日に発生した釧路沖地震(M7.8)は釧路地方ならびに十勝地方を中心に



写真-4 後志利別川堤防の被災(左岸 兜野地先)



写真-5 淀川左岸堤防の被災(朝日新聞社提供)



写真-6 猪名川堤防の被災(派川藻川右岸 0.4km)

北海道東部の各地に被害をもたらした。この地震の特徴の一つは積雪寒冷地における厳冬期の地震であったことであり、堤体の表土50~60cmは凍結状態であった。

直轄河川では釧路川ならびに十勝川の河川施設に甚大な被害を生じ、沈下や亀裂の生じた堤防延長は全体で約34kmにのぼった。釧路川における被災は写真-2に示す釧路遊水地に築かれた堤防に集中していた。十勝川においては、写真-3に示す右岸統内地先における被害が激甚で、延長700mにわたって堤防に大きな開口亀裂が走り、天端が最大4m程度陥没した。いずれの河川においても泥炭地盤上に砂質の材料を用いて築堤した、比較的堤高の大きな堤防に被害が目立った。

#### b) 北海道南西沖地震による堤防被害

平成5年(1993年)夏の出水期にあたる7月12日に発生した北海道南西沖地震(M7.8)は奥尻島における甚大な津波被害をもたらした地震であるが、北海道西部にある河川施設にも被害をもたらした。

直轄河川では尻別川と後志利別川の2河川で約9kmの堤防が被害を受けた。両河川とも河川改修により締切った旧河道部での被害が目立ち、写真-4に示す後志利別川の左岸兜野地先では旧河道部に位置

する堤防に亀裂を伴う大きな陥没を生じた。被災箇所周辺の法尻部付近には噴砂の明瞭な痕跡が残されていた。

#### c) 兵庫県南部地震による堤防被害

平成7年(1995年)1月17日に発生した兵庫県南部地震(M7.2)で被害を受けた直轄河川の堤防は約8kmに及んだ。

この災害で最も大きな被害を受けたのは写真-5に示す淀川左岸の西島地先の堤防であった。堤防は延長2kmにわたって被災し、最大3.5mの沈下が生じた。この区間では、かろうじて満潮時に堤内地側への越水による浸水被害は免れた。

猪名川においても写真-6に示す派川藻川の右岸額田地先においては堤防が噴砂を伴って最大1m程度の沈下を生じた。いずれの河川においても砂質地盤上の堤防が被災した。

## (2) 被災調査

### a) 緊急調査

釧路沖地震を例に地震発生後の調査概要を記述する。震後の調査は3次に分けて実施した。釧路沖地震は夜間(午後8時6分ごろ)に発生したため、被災状況把握のための調査は翌日から開始し、約1.5

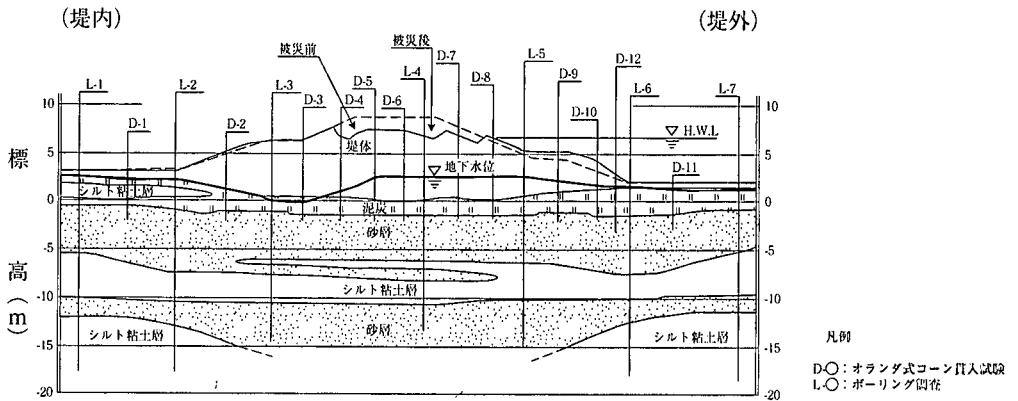


図-6 被災堤防の土質調査例  
(釧路川左岸 KP9.850地点)

日後の1月17日に完了している。2次調査は1次調査で明らかとなった被災箇所を中心に緊急復旧のための縦横断測量ならびに航空写真撮影を行った。釧路川の現場では1次調査は総点検延長73.2kmを5班合計12名の編成で、2次調査は9班合計27名の編成でそれぞれ実施した。さらに3次調査（1月20日から3月11日）によって被害の量的把握と被害原因解明のための調査を行った。著者らは、2次調査によって被災箇所の延長、被災程度の概況が一通り判明した1月20日の時点で現地へ赴き現地踏査を行うとともにその後の調査方針を決定した。

調査方針を決定する上で重視した被災地点の特徴に関する観察結果は以下のような諸点である。

- ① 被害甚大区間では比較的堤高が大きい。
- ② 被害甚大区間の堤体材料は砂質土である。
- ③ 被害甚大区間では基礎地盤の表層にある泥炭層厚が厚い。
- ④ 被害甚大区間では法尻又は小段で噴砂の痕跡が確認できるが、周辺地盤では確認できない。
- ⑤ 被害甚大区間の堤体の亀裂は開口幅、深さとも大きく、堤体の変形は極めて大きい。
- ⑥ 被害甚大区間に隣接する区間で、法尻部に布団籠のドレーンを敷設したところでは地盤条件、堤体形状とも被害区間と同様であるのに無被害であった。

厳冬期で積雪のあったこの事例では、噴砂の痕跡を確認するに当たって、携行したガスバーナーが地表の雪を溶かすために有用であった。筆者らの経験では、上記⑤にあるような甚大な被害は基礎地盤に液状化が発生した場合のみ観察されるものであり、上述④はこの事と符合するものの確認できた噴砂の位置や量は多くはない。

上記⑥は十勝川右岸の統内地先で観察されたものであり、この区間は特に地盤が軟弱なため、堤防築造時にすべり対策として布団籠が施工されていたものである。

被害後の堤体形状を昭和43年の1968年十勝沖地震による被災写真と比較してみるとよく類似しており、被害の大きかった区間の特徴についても被害報告に記載された特徴と上記①～③の3項目は共通することが分かった。この報告<sup>14)</sup>では泥炭地盤による地震動の増幅が被害の主因ではないかと指摘されているが、そのようにとらえると粘性土を築堤材料とする区間で被害が少ないことや、上記⑥の観察事実ならびに④の噴砂の痕跡は説明できない。

そこで、泥炭地盤では砂質土のような液状化は起きないこと、この地方の泥炭は地下水位が高く極めて圧縮性が大きいこと、堤高の大きい区間では泥炭の圧縮量も大きくなること、堤体内には浸透した雨水が滞留し周辺地盤より高い地下水位を呈することがあることなどを勘案し、別報で一部報告したように<sup>15)</sup>後述するような被災メカニズムを想定して、基礎地盤のみならず堤体内の標準貫入試験と地下水位計測を含む土質調査を図-6に例示したように実施した。これらの調査結果と後述する被災堤防の開削を含む調査により、緩んだ堤体自体の底部が液状化した新しいタイプの被災メカニズムを確認した。

なお、平成5年7月に発生した北海道南西沖地震ならびに平成7年に発生した兵庫県南部地震後の被害調査においても釧路沖地震と同様3次に分けて順次調査を行った。これらの地震においても筆者らは技術総括担当官ならびに技術アドバイザーとして現地踏査に赴き、その後の復旧方針策定とそのための調査計画の指導を行った。

北海道南西沖地震による後志利別川と尻別川の、被災堤防の緊急調査に当たり釧路沖地震の調査経験者を指揮者に加えることにより、経験に基づく工夫が現地事務所間で伝承され迅速かつ、円滑な調査を実施することができた。緊急調査の結果明らかとなった北海道南西沖地震による後志利別川と尻別川の被害箇所の特徴は、旧河道部に位置する区間で甚だしい被害が多く発生したこと、河口に近い（震災



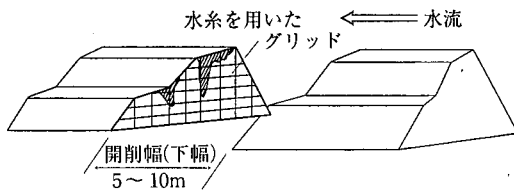


図-7 堤防開削の概念図

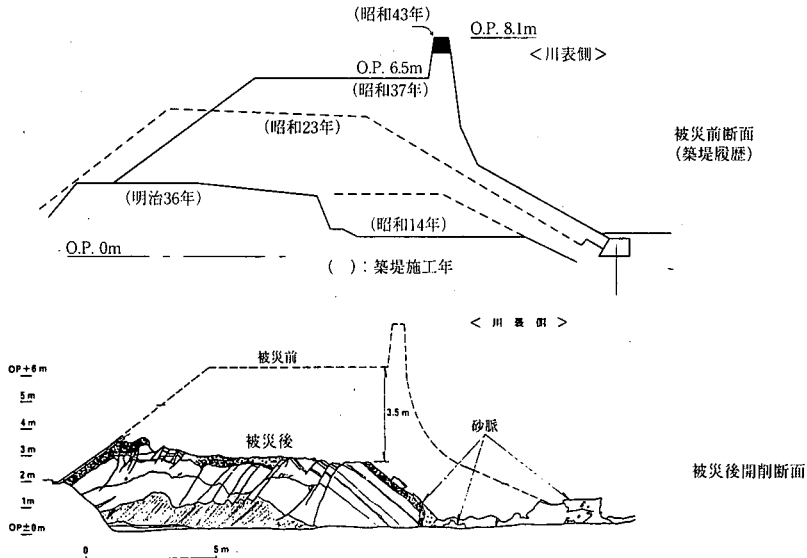


図-8 築堤履歴と被災堤防開削断面(淀川左岸 1.4km)

距離の短い) 区間に比較的大きな被害が見られたことなどを挙げるができる。

また、兵庫県南部地震による淀川と猪名川の被災堤防の内、甚大な被害を受けた箇所の堤防基礎地盤は、必ずしも旧川締め切部や旧河道部ではなく、厚く堆積した緩い砂層の分布する河口に近い区間に集中していた。

3例の地震により被災した河川堤防においては、被災原因の推定や本復旧工事の方針決定に必要な地質調査データがほとんどない状態で、いずれの災害においても被害発生直後から実施した緊急調査と、後述する被災堤防の開削調査などを含む地質調査・解析に多くの労力と時間を要した。これらの災害経験から緊急調査の中で記述した③や⑥の客観的判断材料とするためにも、さらに今後の災害に対する備えの面からも普段から堤体および、その基礎地盤に関する地質データの蓄積と地盤縦断図の作成を進めておくことが震災堤防復旧における迅速な対策の実施に極めて重要であることを指摘できる。

#### b) 開削調査

3例の地震によって被災した堤防復旧工事区間において、被災のメカニズムを推定して設計と工事施工上の緒元を決定するために堤防開削調査を実施し

た。地震で被災した堤防について大規模な現地開削調査は従来行われたことがなかったが、この3例の震災ではいずれも被害甚大な区間の一部において開削調査をした。

開削は、いずれも本復旧工事に先立って施工する仮締め切り堤防完成後に実施した。開削は図-7に示すように堤防敷の基盤において機械作業が可能な程度の幅として最低5~10mを確保し、上下流の天端から3分から5分程度の法勾配をもたせて切り下げた。粗掘削はバックホウにより行い、最終の仕上げ切り取りはスコップや鍬による手作業で丁寧に実施した。

こうして開削した断面に水系を用いてグリッドを組み、縦、横、高さの位置を正確に設定して以下の項目についての調査を実施した。

- ・過去の築堤材料の土質分類
  - ・築堤土砂の締固め度、緩みの程度
  - ・亀裂の開口、規模、位置、角度
  - ・液状化により生じた砂脈の嵌入・噴砂の規模、位置確認
  - ・築堤による基礎地盤(原地盤)の圧密沈下状況(堤体の地表面以下への食い込み)
  - ・地下水位
- 代表的な事例として淀川左岸西島地先における築

堤履歴と被災堤防開削状況を図-8に示す。西島地先では地下水位以下の部分についてはコーン貫入試験を併用してもとの堤体と地盤の境界を探ることも試みた。

開削調査の結果、釧路沖地震では堤防直下の泥炭層を通るすべり面は確認されないこと、北海道南西沖地震および兵庫県南部地震では、地盤液状化に伴い亀裂によっていくつかのブロックに分断され変形した堤体は、回転や変位をしているもののそれぞれのブロックは元の形状をほぼ保っておりその下位の液状化層の中に埋没していることなどが判明した。

### c) 施工条件調査

先述のように、被災堤防のうち釧路川では釧路遊水地の数カ所で、十勝川では右岸統内地先ほかで、後志利別川では左岸兜野地先ほかで、淀川では左岸西島地先で、猪名川では派川藻川の右岸額田地先で、いずれも堤体底部付近又は周辺地盤に明らかに液状化による噴砂跡が認められ、原形をとどめないほどに大規模な深い亀裂と陥没による被害が発生していた。

これらの区間の復旧は長さ13~20mもの長尺鋼矢板を用いた大規模な仮締切堤防を構築した後、被災堤防の全体を1度撤去し、再構築せざるを得ない状況であった。

また、上記のいずれの区間も堤内地への氾濫の影響が大きい場所に位置していたことと併せ、それぞれ次のような特徴を有していた。

- ① 釧路沖地震の事例では、国際条約の登録湿地内にあり、騒音振動を極力抑制し、湿地内の地下水流への影響を軽減する仮設工法とする必要がある。
- ② 北海道南西沖地震の事例では、排水機場や沼地に近接するため工事の振動を極力軽減する必要がある。
- ③ 兵庫県南部地震の事例では、大都市市街部で工場・住宅地に近接するため工事の振動騒音を極力軽減する必要がある。
- ④ 同じく兵庫県南部地震の事例では、第二次世界大戦中の爆撃による不発弾が残っている恐れがあり、河道内への矢板打設に先立ちその存在調査を必要とする。

このため、万一再度災害の発生があった場合には大量長尺の資・機材をその都度緊急搬入することや大規模工事を繰り返し実施することは困難であると判断された。

### (3) 被災メカニズムの推定

地震後の調査結果に基づき推定した三つの事例における堤防の被災メカニズムは以下の二つのタイプに集約できる。

#### a) 泥炭地盤上の堤防の被災メカニズム

釧路川の釧路遊水地左岸の3箇所、同右岸1箇所および十勝川右岸統内地先における堤防の被災地に

おける土質調査の結果、次のような特徴が明らかとなった。

#### 素因としての地盤条件

- ① 両河川の堤防が築堤されている原地盤の最上位には厚い泥炭層が存在する(釧路川で3~5m、十勝川で5~6m)。
- ② この泥炭層の上に、何段階にも分けて長年月をかけて築堤が行われた(被災前の堤防高は釧路川で5m前後、十勝川で6m前後)。
- ③ 泥炭層の含水比は釧路川で300~1000%、十勝川で100~500%。
- ④ 地下水位は原地盤の表面近くにあり、堤体内の水位も中央部付近では周辺地盤高より2~3m程度高い。
- ⑤ 堤体荷重により堤防下の泥炭層が圧縮され堤体との境界は凹状に変形し、堤防の底部には浸透した雨水と地下水により水が満たされレンズ状の飽和域ができる。

#### 液状化発生の可能性

土質調査結果に基づき推定した堤体内の飽和域、液状化強度、ならびに釧路地方気象台における観測記録を基に推定した地震動を用いて数値解析を行って、釧路沖地震の地震動によりレンズ状の部分は液状化することを別報に報告した<sup>10)</sup>。また、この別報では、後述する改良復旧を行っていない場合には1994年に発生した北海道東方沖地震によっても液状化し、釧路沖地震と同程度の変形が生じ得ることも明らかにした。

従って、レンズ上の部分が液状化し堤防が破壊され、堤体の変形が生じたものと結論することが出来、さらにその変形過程は以下の経過をたどったものと推定すれば、観察した事象を矛盾なく説明できる。

#### 堤体変形のメカニズム

- ⑥ 地震動により堤体底部のレンズ状の部分が液状化する。
- ⑦ 液状化層上面の境界ではせん断応力が解放されるため、堤体内応力が再配分され堤体に亀裂が発生する一方、クサビ状に分断された堤体は沈下する。
- ⑧ 上載土塊の沈下と液状化層の側方流動により表法部分が前方に押し出される。
- ⑨ この時、厳冬期で堤体の表土は厚さ50~60cmが凍結(凍土)していたため、側方に流動する法尻と周辺地盤とが衝突したような変形状態となった。

上記⑦に関して、地震後に観察される堤防の変形には、液状化した地盤の変形と堤体自身の変形とが含まれるが、堤体の変形には液状化の発生に伴う応力境界条件が変化することを考慮する必要のあることを指摘し、堤体内に発生し得る亀裂の位置を簡易に推定する方法を別途報告している<sup>11)</sup>。

これまでは、強い地震による堤防の被災は次に述



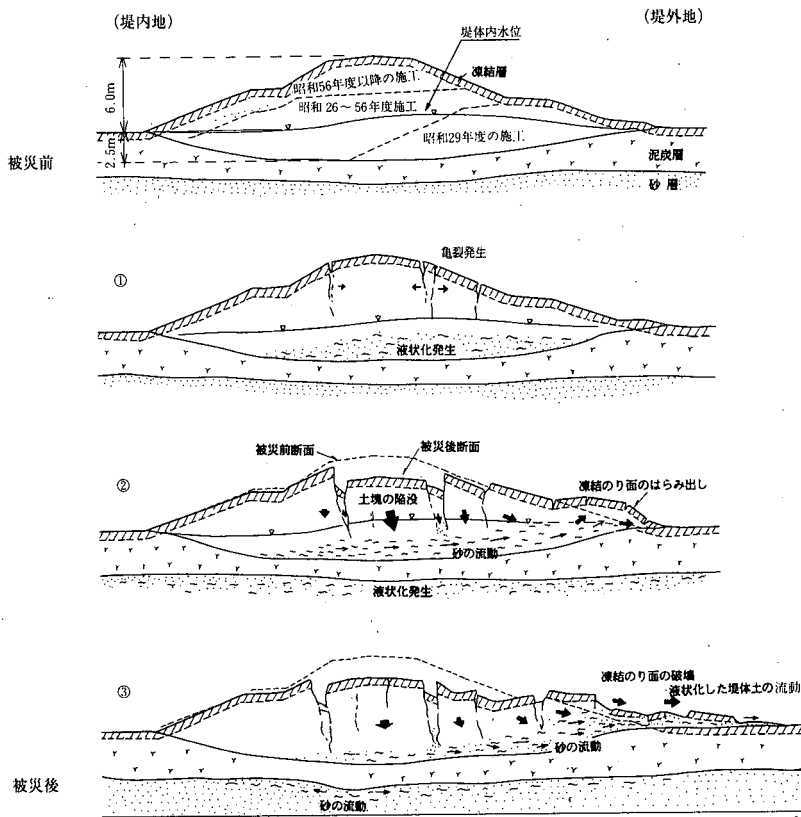


図-9 被災メカニズムの推定  
(釧路川左岸 KP9.850)

べる堤防下の基礎地盤に堆積している緩い砂層の液状化に起因するものしか認識されていなかった。しかし、著者らは今回の調査によって、新たなタイプとして、緩んだ堤体下部の液状化に起因する大規模な被災が生じたことを明らかにした。

この2河川における被災区間では原地盤の表層には厚い泥炭層があり、その下層にやや緩い砂層が存在していて、地震動により下層の砂層内でも間隙水圧の上昇があったことが周辺の地下水観測記録から明らかであるが、開削調査の結果、泥炭層上面にはすべり面を示すような不整形な凹凸は観測されず、泥炭層より下位の砂層の液状化は今回の被害には影響が無かったと結論することが出来る。

堤体の大きな変形を引き起こした主要原因は、凹状に沈下した泥炭層に食い込んだ堤体自体の液状化であった。

釧路沖地震で被災した釧路川の釧路遊水地左岸 KP9.850付近を例にとり、上述の被災メカニズムを図-9に示す<sup>18)</sup>。

#### b) 砂質地盤上の堤防の被災メカニズム

後志利別川左岸兜野地先、猪名川派川藻川右岸額田地先および淀川左岸西島地先では、既存資料なら

びに地震後の土質調査の結果次のような特徴が明らかとなった。

#### 素因としての地盤条件と液状化の可能性

既存のボーリングデータならびに地震後の調査結果によれば、堤防の直下には水平に堆積した緩い砂質土層が存在する。観察記録に基づき推定した地震動と標準貫入試験結果を用いた液状化判定によればそれぞれの被災箇所の砂層は液状化する可能性が大きく<sup>18), 13)</sup>、実際に被災区間周辺で顕著な噴砂の痕跡が残されていることから、液状化が発生したことは明らかである。

従って、堤防の大きな変形は砂質土層の液状化が主因と判定でき、これらの区間で生じた堤防の変形過程を説明する被災メカニズムは以下のようであったと推定した。

#### 堤体変形のメカニズム

- ① 地震動によって堤防直下の緩い沖積砂層が液状化する。
- ② 地盤が液状化することにより堤防と液状化層境界付近の初期せん断応力が解放され、堤体内の応力再配分により亀裂が発生し、堤体分断が起こる。

表-3 基礎地盤処理工法の比較検討表(釧路川)

工 法	液状化防止 対策としての 有効性	対象地盤への適用性		施工の 確実性 と実績	経済性	釧路湿原 の地下水 への影響	当該工事 への 適用性
		砂質地盤	泥炭地盤				
置換工法	○	○	○	○	×	△	△
締固め工法	S. C. P 工 法	○	○	○	○	○	○
	振 動 締 固 め 工 法	○	○	×	△	○	×
固 結 工 法	石 灰 工 法	×	×	○	△	○	×
	深 層 混 合 処 理 工 法	○	○	○	○	×	△
脱 水 工 法	サ ン ド ド レ ー ン 工 法	×	×	○	○	×	×

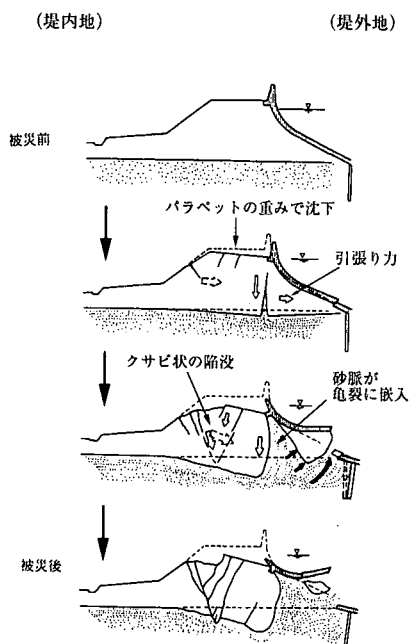


図-10 被災メカニズムの推定(淀川左岸 1.0km)

- ③ 過剰間隙水圧により砂脈が亀裂に嵌入する。
- ④ 液状化した地盤は堤防の沈下に伴い側方に移動する。

これらの代表的事例として兵庫県南部地震で被災した淀川左岸西島地先において推定した被災メカニズムを図-10に示す。なお、西島地先の堤防は高水敷がなく堤防が水と直接接していたが、高水敷の有無などの境界条件がどの程度堤防の変形量に影響するかは今後の課題である。

#### 4. 復旧工法の選択と施工

被害調査の結果それぞれの事例における堤防の被災メカニズムが明らかとなったが、被害甚大区間については原形復旧を原則とする従来型の復旧では再度同程度の地震が発生した場合には同じような被害

が発生する惧れが大きいこと、再度災害が発生した場合にはその復旧を再度行うことの難しい現場条件であることを考慮し、調査結果を反映しつつ改良復旧を行うこととした。

##### (1) 基礎地盤の耐震対策の設計

再度災害を防止するためには、液状化を防止することが必要と判断し、被害調査結果を活用しつつ堤防直下の基礎地盤を改良する設計を行った。

##### a) 基礎地盤改良工法の選定

対象工事区間に適する改良工法には次のようなものが挙げられる。

- ・地盤材料の置き換え工法(切り込み砕石, 安定材料)
- ・締固め工法(重錘落下工法, S.C.P工法)
- ・固結工法(石灰パイル工法, セメント系深層混合処理工法)
- ・圧密促進工法(サンドドレーン工法, ベーパードレーン工法)

これらの工法の中から、先に延べた施工条件調査の結果に基づき、以下の点に配慮し改良工法を選定した。

- ① 液状化防止対策としての有効性
- ② 施工対象地盤への適用性(砂質地盤, 泥炭地盤)
- ③ 施工の確実性と実績
- ④ 経済性
- ⑤ 施工現場ヤードの広狭
- ⑥ 現場周辺環境(自然環境, 人家近接密集地, 騒音, 振動, 側方変位など)

実際の検討事例として釧路沖地震で被災した釧路川遊水地において、堤防地盤改良としては初であり、表-3に示すように比較検討した。当該地先を含む釧路川および十勝川の被害激甚区間の一部にはS.C.P工法による地盤改良工法を選定した。

北海道南西沖地震により被災した後志利別川左岸の兜野地先では同様にS.C.P工法による地盤改良を行い、右岸の豊田地先においては施工ヤードも広く、堤内側の制約も特になくことから経済性を考慮して重錘落下による締固め工法を選定した。また、淀川や猪名川では周辺の近接住宅街などへの騒音、震動、側方への変位などを考慮して深層混合処理工法を選

表-4 S.C.P工法の置換率を変えたときの円弧すべり計算による安全率（釧路川）

	無処理	置換率 10%	置換率 15%
堤内側	1.04	1.42	1.57
堤外側	0.88	1.15	1.24
安定性評価 (Fs>1.2)	×	△	○
液状化評価 (F1>1, 180gal)	×	○	○

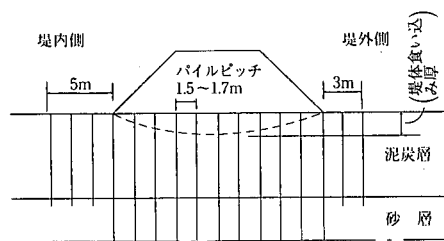


図-11 地盤改良模式図(横断面)

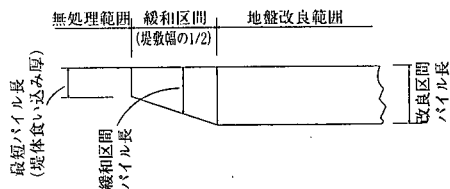


図-12 地盤改良範囲(縦断面)

表-5 工区別地盤改良仕様(釧路川)

区間	被災区間名	改良延長 (m)	区 間	区間長 (m)	パイルピッチ (m)	改良長 (堤体直下) (m)
左岸 第二工区	左岸その3	160	8 K960~9 K000	40	1.7	7.4
			9 K000~9 K120	120	1.5	7.4
	左岸その4	240	9 K260~9 K300	40	1.5	5.5
			9 K300~9 K400	100	1.5	7.5
左岸 第三工区	左岸その5	400	9 K400~9 K500	100	1.5	11.5
			9 K600~9 K700	100	1.5	8.7
			9 K700~9 K800	100	1.5	7.7
			9 K800~9 K900	100	1.5	10.2
右岸 第二工区	右岸その4	800	9 K900~10K000	100	1.5	8.2
			11K300~12K000	700	1.5	6.2
			12K000~12K100	100	1.7	6.2

定した。

b) 地盤改良工事の仕様

地盤改良の事例として釧路川における工事仕様の概要を以下に記述する。

・改良対象の土層

堤体の築造によって原地盤の泥炭層が沈下して堤体本体が泥炭層の沈下した部分に食い込んで緩んでいる部分と、その下にある泥炭層の全層および、さらにその下層の軟弱な沖積砂層。

・改良仕様設定に用いた目標安全率

- 常時1.2以上 (円弧すべり計算による)
- 地震時1.0以上 (円弧すべり計算による)
- 高水時1.0以上 (円弧すべり計算による)

液状化抵抗率1.0以上 (道路橋示方書の方法による)

改良程度を設定するため置換率を変化させたときの改良効果を表-4に示した。この結果、当該堤防の基礎地盤においては直径700mmの圧入砂柱を施工した場合の置換率を15%確保することとしてS.C.P

のパイル間隔を1.5mとした。

パイル長は以下のように設定した。

(堤体直下)

- ・泥炭層下の砂層厚が3m未満の場合  
.....砂層の全層まで
- ・泥炭層下の砂層厚が3m以上の場合  
.....砂層上部のN値が15以下の範囲

(法先地盤)

- ・安定計算による想定すべり円の下方  
.....1mまで

(堤体横断方向の改良範囲)

- ・堤内側.....法尻から5m
- ・堤外側.....法尻から3m

図-11に示すように、堤内側と堤外側で改良範囲が異なるのは堤体断面形状の違いによる。

また、堤防縦断方向の改良区間の起終点端には擦り付けのための緩和区間を設けることとし、施工時の作業性を考慮して図-12に示すように設定した。

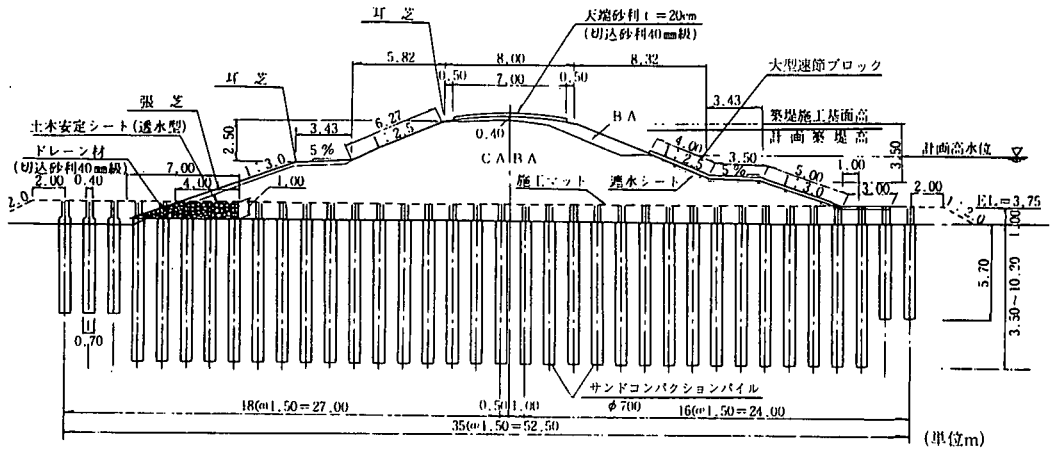


図-13 基盤地盤処理復旧標準図(釧路川左岸 SP9,600~SP10,000)

表-6 施工マットの試験施工結果

ケース番号	①	②	③	④	⑤
既設堤体のN値	* (7)	* (11)	—	3	4
めり込み堤体のN値	9.5	6	—	3.5	10
めり込み堤体の増加N値	6.5	6.5	—	1.5	5
現場密度 (施工マット)	1.54	1.56	1.75	—	—
S.C.P.の締固め効果	所要の値を確保できる	①とあまり変わらない	①とあまり変わらない	①とあまり変わらない	①②に比べてやや効果あり
タンパーの効果		①とあまり変わらない			
ブルドーザーの転圧効果			施工マットに対する効果あり		
施工上の問題点		タンパーのめり込み沈下発生	工程がやや長くなる	施工計画以上、工程上問題がある	①とあまり変わらない
総合評価	○	△	○	△	△

※( )は施工マットのデータ

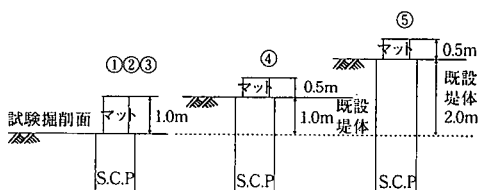


図-14 施工マット試験施工模式図

- ・緩和区間長は堤防敷幅の1/2(この場合は25m)
  - ・緩和区間ではパイル長を段階的に減じて、最短では元の堤体食い込み厚と同長
  - ・緩和区間の平面的な改良範囲は堤体直下のみ
- 最終的に設定した地盤改良仕様を表-5に、横断図を図-13に示す。

## (2) 地盤改良工事の施工

### a) 試験施工の実施

S.C.P.工法による改良を行う場合に、地表近くでは上載荷重が小さいために改良効果が得にくいことを考慮して施工マットの厚さを大き目にとることとし、その効果確認のために本施工に先立って釧路遊水地左岸9k120付近ならびに十勝川流内地先において図-14、表-6に示すような試験施工を実施した。試験施工の結果、S.C.P.の杭間、杭芯で測定したN値は目標とする液状化抵抗率を達成できることを確認

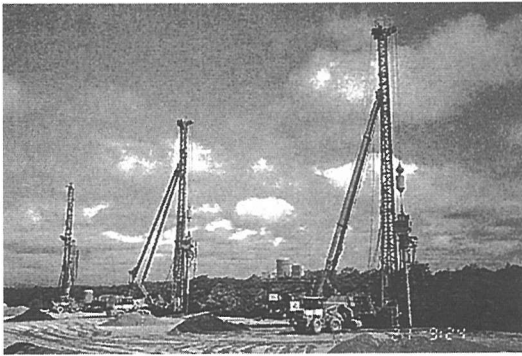


写真-7 釧路川における地盤改良施工状況  
(遊水地左岸 KP9.8km)



写真-8 淀川における地盤改良施工状況 (左岸西島地先)

した。施工マットはS.C.P施工後には堤体の一部となるため、堤体と同様の締固めが必要である。こうしたことから当該工事においては工程、施工ヤード等を考慮して施工マットの仕様として表-6の③を採用した。

#### b) 工事施工と周辺への影響の緩和対策

三つの事例における改良復旧の本施工に先立ち、それぞれ周辺環境の実態を調査し、この結果に基づいて使用機械、作業時間帯などを定めた。

釧路川ではラムサール条約の登録湿地である釧路湿原の鶴の営巣などへの影響軽減のために写真-7に示す地盤改良機械は低騒音・低震動型のものを使用した。

淀川の西島地先では写真-8に示すように工事の最盛期には60台の地盤改良機械を投入したが、その大部分を周辺環境に配慮して低騒音・低震動型の機械とし、施工中においても近接する住宅地などへの影響を避けるため周辺地盤の変位を監視しつつ施工した。

#### c) 補助工法

先述したように、十勝川右岸の統内地先における被害甚大区間に隣接し法尻部に布団籠のドレーンを敷設した区間があり、ここでは地盤条件、堤体形状とも被害甚大区間と同様であるのに被害を被らなかった。この理由は、泥炭地盤上の堤防底部にでき

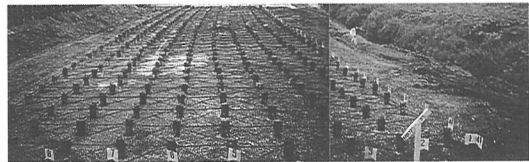


写真-9 パイルネット施工状況 (十勝川支川下頃辺川左岸)

表-7 河川堤防の再度災害発生状況  
(北海道東方沖地震 釧路川)

釧路沖地震災害復旧で実施した工事の種類		北海道東方沖地震での堤防被災発生箇所数
1	部分的再構築	3
	部分的再構築+裏腹付	1
	全断面再構築	2
2	地盤改良+全断面再構築 (耐震対策工法で復旧)	0
3	釧路沖地震では無被災の堤防	21

るレンズ状の飽和層に対して布団籠がドレーンとしての機能を発揮し、これが今回の地震時に被害防止上効果を発揮したものと判断された。

そこで、地盤改良を併用しない復旧区間についても切り返し工法の施工時に可能な限り裏法尻部に補助工法としてドレーンを施工することとした。これらのドレーンは地盤改良の有無に関わらず、前掲図-13に示したように堤内側法尻部に設置した。

なお、十勝川支川の横断面の比較的小さい被災区間では泥炭地盤上の急速な盛土工事における支持力確保策として、パイルネット工法を、また後志利別川ではジオテキスタイル工法を試験的に採用した。パイルネット工法の施工例を写真-9に示す。

## 5. 技術基準等の改訂

釧路川においては上述したように地震災害復旧史上初の耐震構造の堤防が完成した。奇しくも、その災害復旧工事完成のわずか10ヶ月後に再度発生した地震 (北海道東方沖地震 平成6年 (1994年) 10月4日発生) によって被害を受けたのは表-7に示した種別1の釧路沖地震で耐震対策をしなかった区間と、釧路沖地震では被害のなかった別の区間の堤防であった。同表の種別2の堤防は無被害であった。この災害事例から、震災堤防を耐震構造として復旧したことにより再度災害が防止され、中・長期的に見たトータルコストの縮減、さらには釧路湿原の環境保全などに大きな効果があったことが確認された。

著者らはここに報告した三つの事例における震災堤防の復旧工事計画を策定する中で以下のような新しい試みを重ねた。

- ・被災堤防周辺の噴砂状況や堤防開削調査による被災メカニズムの解明

- ・液状化による基礎地盤の弱体化の状況確認と地盤改良の必要性、その範囲の整理
- ・過去の地震による堤防被災直後の洪水発生と対応の実態整理
- ・被災現場条件と再度災害発生を想定した場合の工事再施工の困難性の整理

また、3例目の災害となった兵庫県南部地震の災害復旧は、工事が大規模であるのに加えて、被災地が大都市の中心部にあって堤防背後には人口・資産の集積が高度に進んだ市街地が広がっていた。さらにこの地震は従来の我が国で考えられていた工学的な設計地震動を越える大きさであったため、多くの構造物や施設の設計地震動を考え直す契機となった地震でもあった。

本稿で記述した釧路沖地震の事例で紹介した改良復旧の効果が顕著に示された実証的な事例、技術検討の積み重ねに加えて、社会的な影響の大きかった兵庫県南部地震の教訓を背景にして関係計画の策定や技術基準類の改訂が進められた。以下、策定や改訂等の時期は多少前後するが上位計画から主要なものを書述する。

平成10年(1998年)に閣議決定された「第5次全総」では、少頻度・大外力に対する河川構造物(堤防を含む)の耐震性確保策の推進が正文の中に盛りこまれた<sup>19)</sup>。これは兵庫県南部地震の教訓を踏まえ巨大災害に対して被害を完全に防止することはできないものの、これを最小に食い止める「減災」の思想と重要地域やゼロメートル地帯の2次災害の防止の観点から必要な堤防には耐震設計を施していこうとするものである。

同じく平成10年に閣議決定された「第9次治水事業7箇年計画」においても、本文中に「…ゼロメートル地帯における堤防の耐震性の向上…(中略)…などを重点として事業を推進する。」と明記された。この計画では計画期間中に延長、約800kmの堤防の耐震強化を実施していくこととされている。

さらに、具体的な堤防設計の考え方を規定する河川・砂防技術基準(案)<sup>20)</sup>についても平成9年(1997年)に第1章第2節において河川堤防の設計について「…地震対策が必要な場合には液状化等に対して所要の安全性を確保できる構造とするものとする。」と必要に応じて耐震設計とする旨が明記された。

同(案)においては、著者らの研究と実施工において整理されてきた事項として対策工法の選定の基本についても、経済性の考慮のほかに液状化被災のメカニズム、周辺環境への影響などを考慮して行うことなどが明記された。

また、直轄河川災害復旧の基準については、直轄河川災害復旧事業の手引き<sup>21)</sup>の中に3例の震災堤防復旧において実施した地盤改良を併用した復旧工事の概要、標準断面図、写真等を記載し、こうした工

事が直轄河川における震災堤防復旧事業として採択対象となる基準事例として明示された。

## 6. むすび

国内初の地盤改良を併用した震災堤防の復旧工事の計画策定経過と、堤防の技術基準類の改訂経過について報告した。ここに報告した三つの震災事例から以下のような教訓が得られた。

- ① 地震後の調査においては、既存の地盤調査結果が、被災原因の究明と復旧方針を定める上で重要な役割を果たした。普段から堤防基礎地盤の縦断面図を整備し、新たな調査結果が得られるたびにこれを加筆修正する事が必要である。
- ② 地震後の調査方針を策定するに当たっては、観察された事実を基に被災メカニズムを想定し、効率的な調査を行うことが必要である。
- ③ 釧路沖地震の事例で紹介したように、液状化対策を施した区間では同程度の地震動に対し再度災害の発生を防止できたことから、地震対策の効果と重要性を実証できた。

技術基準類の改訂もなされたが、地震の規模と地盤条件や堤防の形状・大きさ・築堤材料に対する変形量を簡易に推定できる合理的な方法の確立や、仮設費を軽減でき迅速に機能回復をするための堤防復旧技術などさらに研究開発を進めなければならない問題も多く残されている。この報告がこれらの問題解決の参考になれば幸いである。

謝辞：本稿に記した災害復旧事業については平野道夫、高橋繁樹、田村圭司、渡辺徹三、葛西俊彦、加藤信行の各氏に多くの技術提案や実施における協力ならびに資料提供をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 折敷秀雄：1993年釧路沖地震災害復旧工事，土木施工，vol.34 No.10, pp.41-54, 1993.
- 2) 佐々木康：河川堤防の被害事例，地盤工学会，地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム論文集，pp.293-298, 1998.
- 3) 家永三郎ほか：日本書紀，岩波文庫，pp.240-243, 1998.
- 4) 建設省河川局監修，河川・砂防技術基準(案)設計編，pp.1-3, 1977.
- 5) 建設省関東地方建設局：利根川百年史，pp.753-754, 1987.
- 6) 北陸震災調査特別委員会 青木楠男 外：昭和23年(1948年)福井地震震害調査報告，pp.1950.
- 7) 北陸地方建設局，新潟地震河川災害調査報告書，p.153, 1965.
- 8) 建設省東北地方建設局：日本海中部地震災害報告書，p.216, 1986.

- 9) 北海道開発局：北海道地震災害実態調査研究会報告書，pp. 1-21ほか，1995.
- 10) 北海道開発局釧路開発建設部：平成5年（1993年）釧路沖地震堤防災害復旧工事誌，pp. 27-28，1994.
- 11) 北海道開発局帯広開発建設部：平成5年（1993年）釧路沖地震十勝川築堤災害復旧記録誌，平成6年12月，p. 164，1994.
- 12) 北海道開発局函館開発建設部：平成5年（1993年）北海道南西沖地震 河川災害の記録，pp. 5-10，1996.
- 13) Sasaki, Y. and Shimada, K.: Yodogawa dike damage by the Hyogoken-nanbu earthquake, Seismic Behavior of Ground and Geotechnical Structures, Proc. Discussion Session, 14th ICSMFE, pp. 307-316, 1997.
- 14) 河野文弘，佐々木晴美：河川堤防の被害，北海道開発局土木試験所報告，第49号，pp. 9-24，1968.
- 15) Sasaki, Y., Oshiki, H. and Nishikawa, J.: Embankment failure caused by the Kushiro-oki earthquake of January 15, 1993. Performance of Ground and Soil Structures During Earthquakes, JGS, pp. 61-68, 1994.
- 16) Finn, W.D.L., Sasaki, Y. and Wu, G.: Simulation of response of the Kushiro river dike to the 1993 Kushiro-oki earthquake and 1994 Hokkaido Tohoku earthquakes, Proc. 14th ICSMFE, vol. 1, pp. 99-102, 1997.
- 17) Sasaki, Y., Moriwaki, T. and Ohbayashi, J.: Deformation process of an embankment resting on a liquefiable soil layer. Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, Proc. IS-NAGOYA '97, pp. 553-558, 1997.
- 18) Kaneko, M., Sasaki, Y., Nagase, M. and Mamiya, K.: River dike failure in Japan by earthquakes in 1995, Proc. 3rd Int. Conf. On Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, vol. 1, pp. 495-498, 1995.
- 19) 折敷秀雄：「新・全総と治水事業の長期展望」(株)全日本建設技術協会 月刊建設，特集21世紀の国土のランドデザイン，pp. 15-16，1998.
- 20) 建設省河川局監修，河川・砂防技術基準(案)設計編，pp. 11-18，1997.
- 21) 建設省河川局治水課監修，直轄河川災害復旧の手引き，pp. 314-335，1995.
- 22) 「治水長期計画の歴史」(株)日本河川協会，雑誌河川 No. 623, pp. 57-63, 1998.

(1999. 12. 8受付)

## RESTORATION WORKS OF SEISMICALLY DAMAGED RIVER DIKES USING REMEDIAL TREATMENT OF LIQUEFIABLE LAYER

Hideo OSHIKI and Yasushi SASAKI

This paper describes about post earthquake investigation to clarify the failure mechanisms on three cases of river dike failure caused by recently occurred Kushiro-oki, Hokkaido Nansei-oki, and Hyogoken-nanbu earthquakes. The change of policy on rehabilitation works of seismically damaged dikes was also presented through the description on the modification of technical standards on river dike construction.

Restoration works of civil engineering structures damaged by earthquakes have long been conducted in a manner to rebuild as they were before the earthquakes. No remedial measure was admitted for restoration works due to financial constraint. However after the case of restoration works of damaged dikes by the Kushiro-oki earthquake, it became to conduct remedial treatment of foundation ground if necessary.