

東日本大震災特集

# 東日本大震災 災害復旧現場レポート

～あれから2年 聞こえてきた復興への<sup>あし おと</sup>躑音～

港湾岸壁	石巻漁港 災害復旧工事	P.2
河川堤防	利根川 災害復旧工事	P.6
市街地再生	石巻市 都市再生計画を聞く	P.9

観測史上最大の地震と想定外の大津波で、数多くの社会インフラが破壊、消失、寸断された東日本大震災。前号（明日を築く80号）では東北沿岸を中心とした各種構造物の被災の様態と復旧に向けた取り組みをレポートした。震災発生からすでに2年が経過し、被災各地ではインフラ復旧に向けたプロジェクトの数々が本格稼働している。今号ではそうした災害復旧プロジェクトの現況をレポートしながら、インフラ再生と今後より安全で堅牢な社会構築のために果たされる鋼管杭・鋼矢板の適用事例を紹介する。



本港-7m岸壁で打設終了後控え工を行う鋼矢板の状況

港湾岸壁

## 国内有数の漁業基地復権のため 鋼管杭・鋼矢板を駆使した施工の数々

### ～石巻漁港 災害復旧工事～

#### 被害甚大な漁港施設に鋼材を用いた本格復旧が開始される

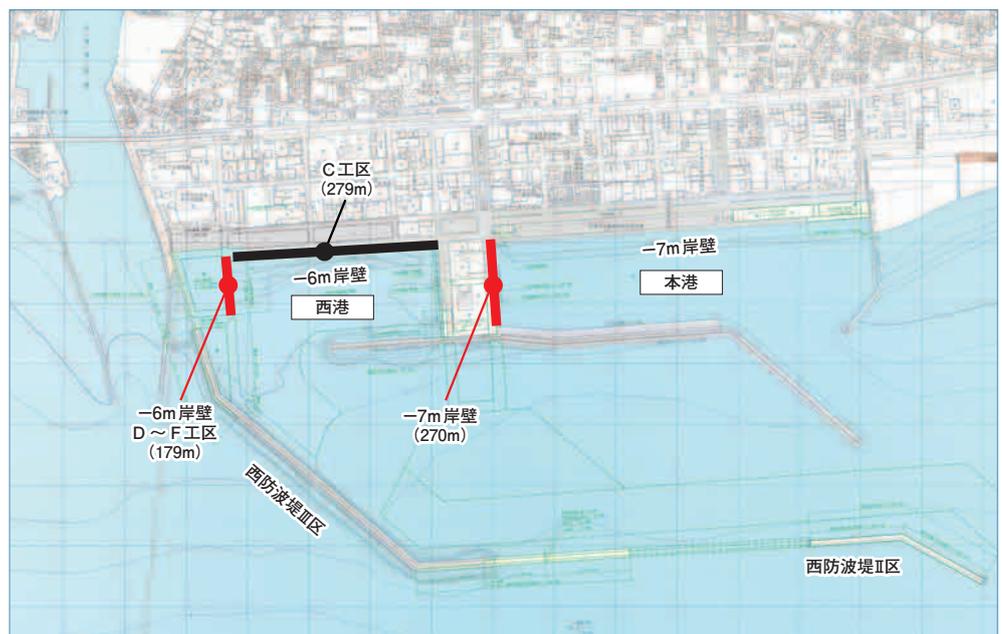
特定第3種漁港として三陸沿岸随一の施設規模と水揚量を誇る石巻漁港が、東日本大震災で受けた被害は甚大なものであった。震度6強の揺れに伴う地殻変動と地盤の液状化で、防波堤先端部で最大3m、漁港区域全域で平均1m30cm程度の地盤沈下を起こした。

また、波高7～8m規模の津波による被害も深刻なもので、東波除堤の流出に象徴されるように係留用の栈橋や岸壁等の諸施設が破壊、または沈下による浸水被害をこうむるようになった。

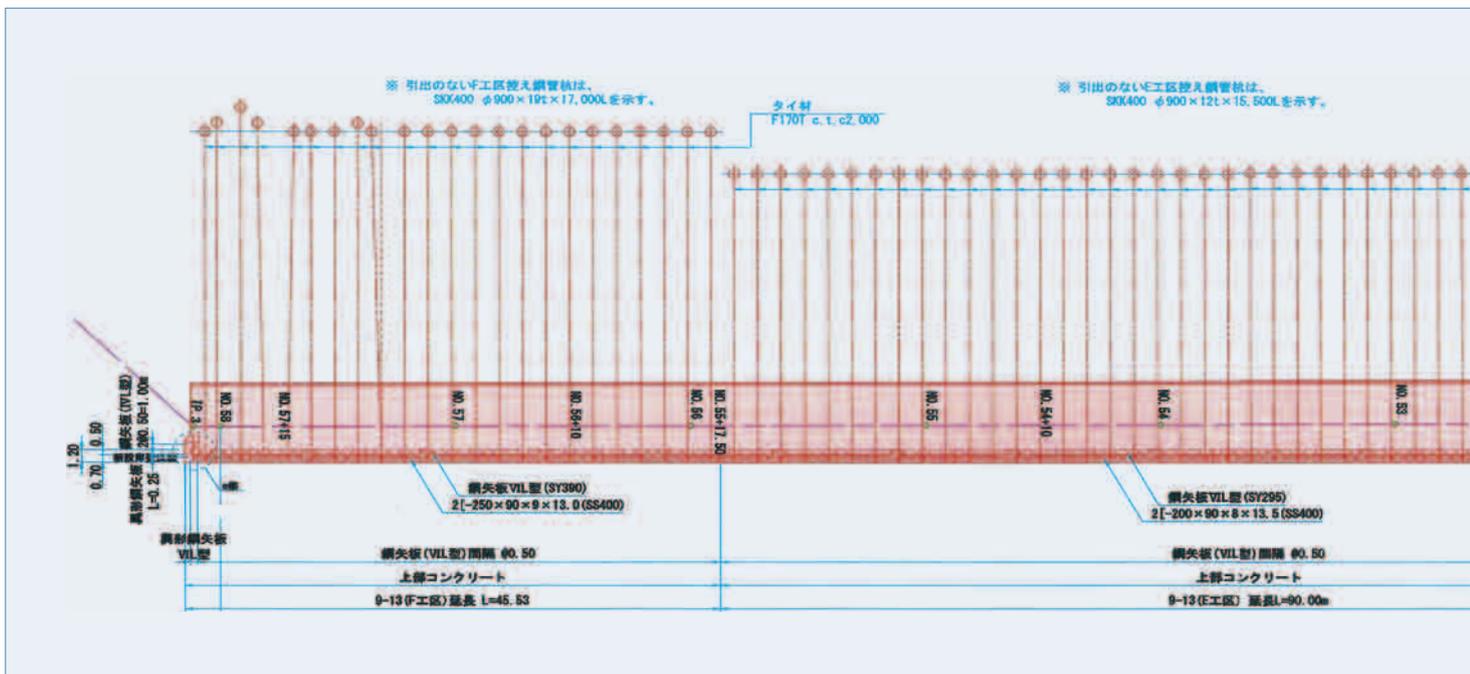
石巻漁港の震災による被

災状況と応急復旧、および復興計画の概要は前号80号でも詳報したが、平成24年度に入り復旧事業も本格化。昨年

後半より、鋼管杭および鋼矢板を用いた施工が行われている。



石巻漁港 施設概要図



—6m岸壁 平面配置図

### 前面鋼矢板、控え鋼管杭とも原形復旧に基づき新設される

石巻漁港本港の西側に位置し、設計水深-6mの係留岸壁を約700m規模で備える西港では、震災被害により全域で約1.15mの沈下を記録し、護岸前面の鋼矢板頭部変位は矢板法線の出入りが最大46cmで海側にはらみ出すという状態になった。

本施設の災害復旧の方針としては、原形復旧の原則に基づきながら沈下部の嵩上げを目的とした設計がなされ、

法線ズレを起こした鋼矢板については、既設の矢板よりも若干前出しでの新設が行われた。また、既設エプロン部で陥没したH形鋼に関しても、鋼管杭での新設が決定。平成23年10月より鋼矢板打設を含めた本体工事が着工されている。

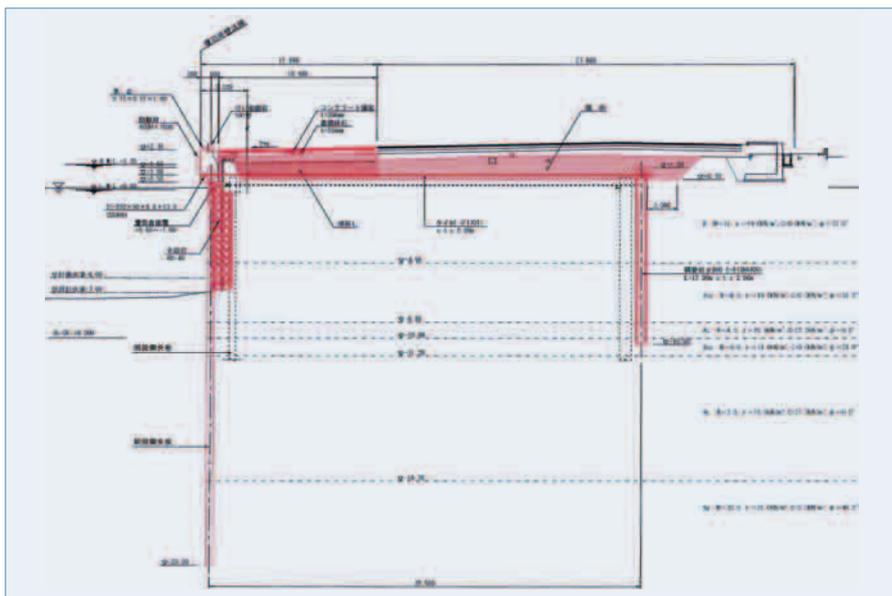
西港-6m岸壁の復旧延長は総計458mとなるが、今回着工がされたのは西側部分にあたるD～F工区179m。旧護岸に対する前出し法線1.7mで鋼矢板を打設。エプロン部にはφ600・L12～17mの鋼管杭を打設し、前面鋼

矢板との間を約13mのタイロッドで結束して控え工とする方法が採用されている。

### 気象条件に配慮しながら迅速な施工が可能な鋼矢板工法

新設護岸の前面に打設される鋼矢板は上部1.6mに重防食被覆が施され西港全体(C～F工区)で約930枚が使用されている。

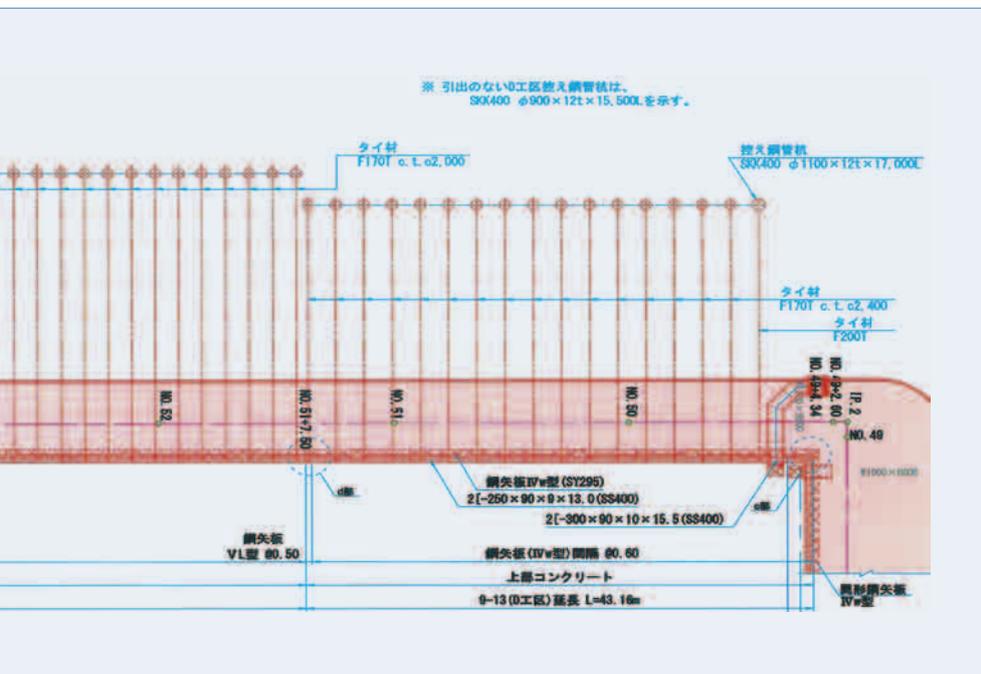
1m以上の沈下を記録している被災護岸での施工となることから、潮位変



—6m岸壁 復旧標準断面図



港湾ならではの波浪状況に留意しながら打設が行われた



況に戻りつつある漁港機能に与える影響を最小限に抑えつつ、水際の港湾工事ならではの難しい気象条件をもにらみながら復旧に向けた施工が続けられている。

### 本港-7m岸壁では 鋼矢板・鋼管杭施工を完了

一方、石巻漁港の本港となる-7m岸壁では、昨年3月から12月の期間で鋼管杭による控え工までの施工を完了している。工法、および設計は-6m岸壁と同様に原形復旧によるもので、本港西側約270mの施工延長の岸壁に、重防食被覆（上部1.45m）と電気防食が施された鋼矢板が464枚と鋼管杭φ900・L15.5～17.0m（SKK400）が114本使用されている。本工区では潮位変動の兼ね合いから、特に昨年12月を中心に夜間施工が行われるなど、施工管理の難しい現場であった。軽量盛土による埋め戻しと上部コンクリート工を含めた完工は、本年5月末を予定している。

動の度合いによっては施工を見合わせざるをえない時間帯もあり、冬の季節風に影響される波浪と風速の度合いによっては、浸水量が高くなるので作業効率とともに安全性確保に細心の注意を払う必要がある施工現場であった。

現在、D～F工区での鋼矢板打設は約25%が終了し、今後エプロン部の鋼管杭と並行しながら打設が進められていく予定である。その後、現地盤の掘削、タイロッド施工、埋め戻し、上部コンクリート工を経て、原形復旧が完了するのが本年7月めど。残る西港北

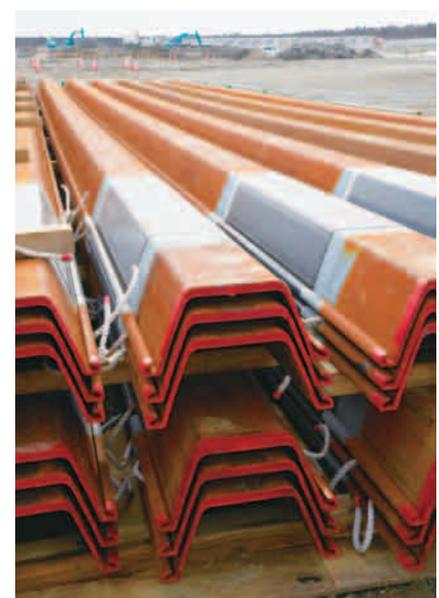
側のC工区279mは、その後に本体工事が着手されて平成25年度中の完工が計画されている。

操業する漁業関連船舶の水揚げや係留の機能など、徐々に震災前の稼働状

工事名	工区	復旧延長	鋼矢板数量
石巻漁港-6m岸壁 災害復旧(その2) 工事	C工区	279.0m	588枚
	D工区	43.8m	73枚
	E工区	90.0m	180枚
	F工区	45.4m	90枚
	合計	458.2m	931枚
石巻漁港-7m岸壁 災害復旧工事		270.8m	464枚



-6m岸壁 バイプロハンマによる鋼矢板打設状況



重防食被覆が施された鋼矢板



－7m岸壁・鋼管杭打設状況



－7m岸壁 タイロッドを用いた控え工の状況

## 国内有数の水産機能回復に向け 鋼管杭・鋼矢板が果たす役割

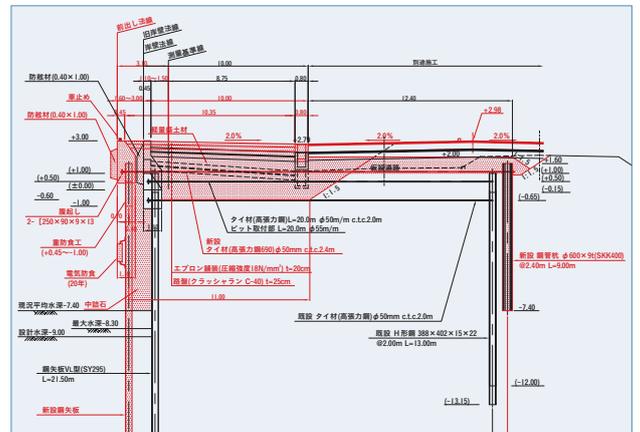
漁業基地としては国内有数の規模を誇る石巻漁港の完全復旧に向けた諸工事は、水産関係の操業に配慮しながら、今後、順次進められていくが、今回レポートした両岸壁を端緒として、いまようやく緒に就いたばかりである。

漁港内を眺めれば、津波の波力によって蛇行・変形したままの波除堤がそのまま残されているほか、後背地には道路や漁業関連施設用地にこれからも修復の必要がある箇所も多く、石巻漁港全体の復旧にはまだ数年かかる見通しである。

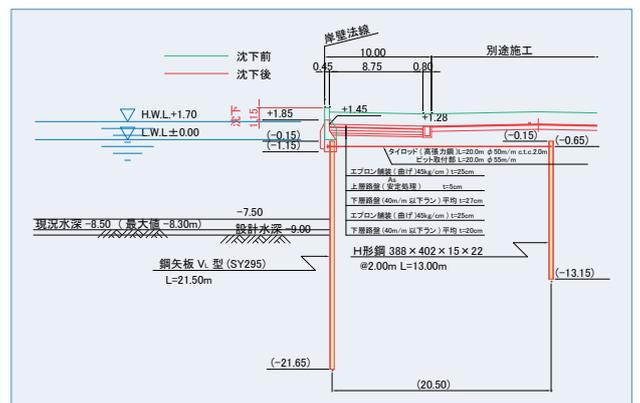
大きく沈下し、満潮時には半ば水没する本港西防波堤側の－7m 棧橋では、今後、大規模なジャケット工法を

用いた原形復旧も予定されている。

震災発生から2年が経過し、徐々に漁業従事者が操業を再開。水産加工施設も復旧しながらかつての賑わいを取り戻そうという石巻漁港だが、従来の機能とともに、今後再び想定される自然災害へも万全の備えを早期に回復する必要がある。こうした、重要漁港の復権のために鋼管杭・鋼矢板をはじめとした鋼材が果たしていく役割は、今後とも大きな比重を占めていくことであろう。



－7m岸壁 標準断面図



－7m岸壁 被災断面図



被災時のままの亀裂



津波により蛇行・変形したままの波除堤



最大2mの沈下を記録した三和地区の川裏小段道路

河川堤防

## 大規模堤防にも効果が示された 鋼矢板による液状化対策工

### ～利根川右岸(請方・中谷・三和地区) 災害復旧工事～

#### 首都圏の震災被害を 更に拡大した液状化現象

東日本大震災は東北地方のみにとどまらず、首都圏を含めた東日本各地に



災害復旧工事位置図

大きな被害をもたらした。

特に、千葉県では成田市と印西市で県内最大となる震度6弱を記録したほか、多くの市町村で震度5弱以上の大きな揺れに見舞われた。

この結果、建物被害だけでも9,000棟以上が全半壊するなど、首都圏最大の被災地となった。

本震による建築物への被害のほか旭市を中心とした甚大な津波被害など、三陸沿岸の各地域同様の複合災害の様相を呈した千葉県内だったが、特徴的な現象としてあげられるのが液状化

による被害である。浦安市を中心に約8,000世帯が影響を受け、都市ライフラインにも長期間影響を与えた液状化現象は、報道でも大きく取り上げられ記憶に新しい。この、液状化による被害は



沈下量30cmを記録した天端部は出水期前の4月には緊急復旧処置がされ本格復旧に備えた



施工地区平面図

都市部のみで深刻化したわけではなく、各種インフラにも大きな影響をもたらした。その一つが、今回、災害復旧をレポートする河川堤防への影響である。

## 液状化とそれに伴う側方流動で大きな変状をみせた河川堤防

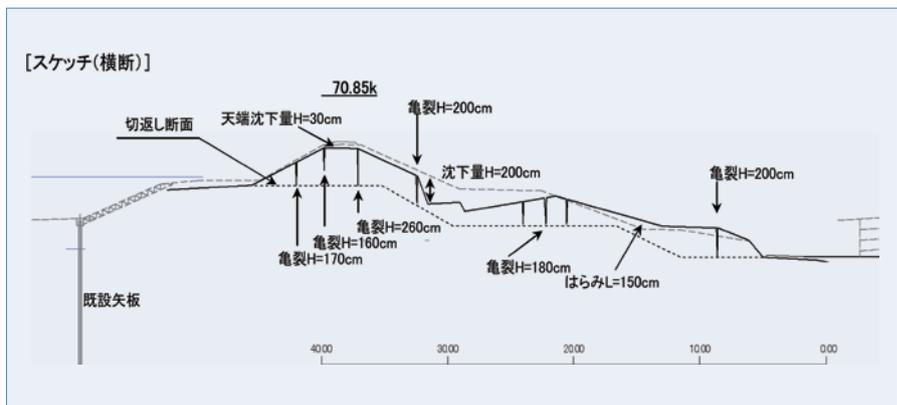
千葉県の利根川本流域でも震災により、河川の堤防や護岸など多くの箇所に被害が発生した。その数は、利根川下流河川事務所管内だけでも、右岸の千葉県側と左岸の茨城県側で合計77箇所（堤防52・護岸25）にものぼった。

利根川右岸（千葉県側）河口から約70km地点付近の印旛郡栄町請方・中谷・三和地区でも河川堤防が約1.1kmにわたって天端の沈下や亀裂、堤防法線の崩壊やはらみ出しという被害を出した。堤防の変状をもたらした主要因は、堤体内の地下水と地盤条件に起因する液状化である。その被害状況を、三和地区を例にみていこう。

まず、堤防天端は全体的に約1.7mという大きな沈下量を記録し、川裏法面においては縦断的に亀裂や沈下が発生。クラック深さ、沈下量とも最大2mに達するほどの変状であった。

こうした被害状況にいたるメカニズムは、次のように推定された。

- 1 堤体は、軟弱な粘土層の基礎地盤に砂質土を主体に盛土されたものであり、その間に浸透している地下水位以下は非常に液状化しやすいと想定される。
- 2 地震動により堤体内部が液状化。堤体と基礎地盤が沈下することで、川表および川裏双方の法尻部の沖積砂層でも液状化が発生。
- 3 法尻部の液状化から側方流動が発生し、川裏法面を中心に亀裂や段差、はらみ出し等の変形を生じさせた。

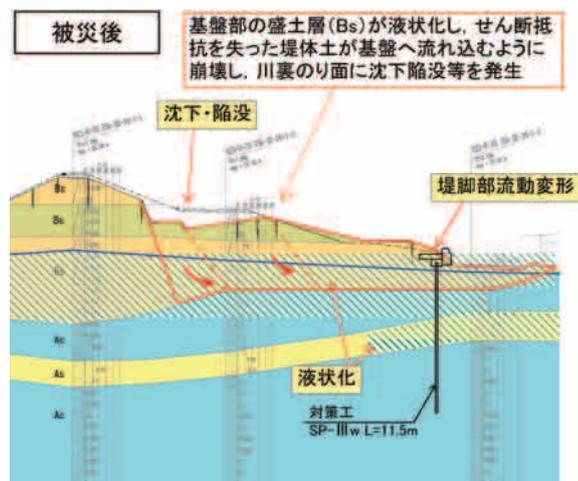


三和堤防被災状況

ここで注目しておきたいのは、このエリアの堤防の変状被害は天端部のほかには川裏法面に集中している点である。川表側に大きな被害が発生しなかった理由は、昭和60年前後に漏水対策や災害復旧を目的とした工事が行われ、川表にはⅡ型とⅢ型を中心とした鋼矢板と護岸が施工されていたためと思われる。

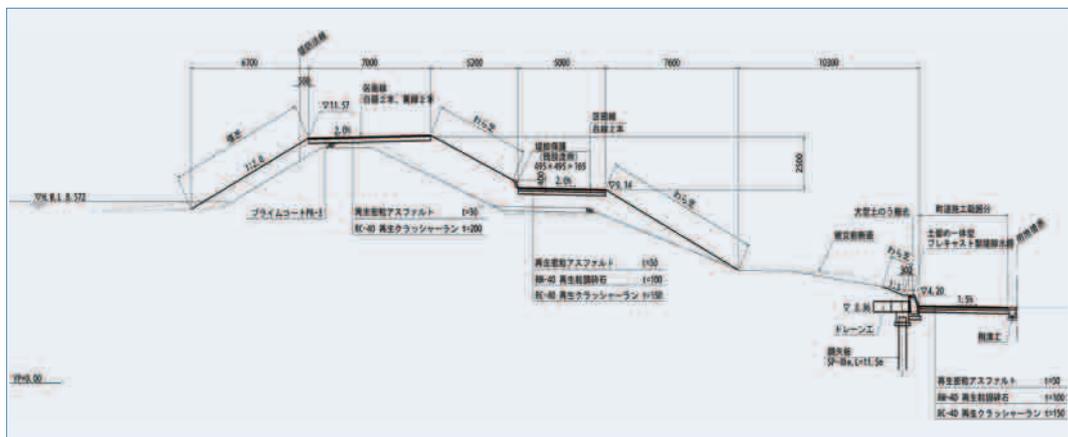
震災後の被害査定でも既設の鋼矢板には顕著な変位は認められず、応急復旧後の本復旧では、この既設鋼矢板を

活かした設計が検討された。



液状化による被災メカニズム

工事名	工事延長	矢板延長	矢板型式	矢板長さ	枚数
H23 請方堤防災害復旧工事	630.1m	51.0m	Ⅲw	10.0m	85枚
H23 中谷堤防災害復旧工事	562.0m	433.2m	Ⅲw	11.0m	377枚
			Ⅳw	12.5m	345枚
H23 三和堤防災害復旧工事	633.0m	633.0m	Ⅲw	11.5m	1055枚



三和地区堤防災害復旧工事標準断面



鋼矢板の圧入状況



床掘の上、油圧圧入機を用いて打設された



## 経済的で迅速な施工が可能 環境特性にも優れた鋼矢板工法

堤防の復旧にあたっては、災害原形復旧の原則にのっとりながら液状化対策工法として鋼矢板工法が採用された。地盤改良工法との比較検討では、周辺環境への影響、施工性、経済性の点で有利と判断された。その主な比較メリットを以下にあげてみる。

### 【堤体への影響】

鋼矢板、およびドレーン施工に伴う床掘・埋戻しはあるが、地盤改良と比較すると切り返した堤体への影響は非常に少ない。

### 【周辺環境への影響】

施工に伴う天端道路への影響がない。また、鋼矢板圧入の騒音・振動も油圧圧入機の採用で無振動施工が可能である。また施工に伴い発生する土量も少ない。

### 【施工性】

省スペースでの施工が可能で鋼矢板圧入も迅速。非出水期で十分な対応が可能。

### 【経済性】

大量の発生土、用地確保、長期間の工期を必要とする地盤改良と比較して安価である。

以上のような、経済性、迅速性、環境特性で優位性を発揮しながら、既設の鋼矢板とあわせて堤体の川裏法尻部を締切ること、液状化とそれに伴う側方流動に十分に耐えうる工法として鋼矢板を用いた復旧工事が実施された。

鋼矢板の打設は平成24年2月より着工され、工区全域は3m道路を介して住宅地に隣接することから無振動の油圧圧入引抜工で施工が行われた。狭隘地での省スペースかつ静粛性の高い工法メリットを活かしながら、打設は4月には完了。本復旧工事は非出水期内の同年5月に終了し、堤防天端部の舗装工なども含めたすべての復旧工事は7月に終了している。

## 大規模河川堤防へ今後ますます 有用性が証明された鋼矢板

本工区で特徴的だったのは、すでに川表側に鋼矢板による護岸が設置されており、今回の震災でも十分な効果が証明されたことであろう。川裏側も同じ特性をもった鋼矢板で締切ること、対策後の堤体は構造体としても力学的なバランスがとれたものになったのではないだろうか。

大規模な河川堤防の分野においても、川表側の漏水対策護岸としての役割に加え、堤体をより強固に維持するための有効な工法の一つとして、災害復旧対策だけでなく今後ますます鋼矢板の活用が進むことが期待されている。

【図表・画像/提供 利根川下流河川事務所】



3m幅の境界道路を接して宅地隣接する施工環境



約46.5ヘクタールの敷地が整備中の「新蛇田地区被災市街地復興土地区画」

市街地再生

## 新市街の造成もスタート 真の防災都市として再編はじまる石巻市

市内全家屋の70%以上にあたる5万3742棟（平成25年2月末日現在）が全半壊または一部損壊するという被害に見舞われた石巻市。前号では平成23年12月に策定された震災復興基本計画に基づいた、新たな市街地開発や沿岸・半島部の高台移転などのプランを紹介した。震災より2年が経過し、石巻市の復旧・復興はどのように進んでいるのか。市街地地域の再生を中心に、その現状をレポートする。

### 瓦礫撤去も進み、“暮らし取り戻す”新市街地の造成にも着手

災害廃棄物の処理状況については、地権者合意などが未解決で解体を残した家屋等を除けば、ほとんどが1次仮置場まで運搬済みとなっている。いわゆる、震災瓦礫の撤去率はほぼ100%となっており、復旧への初動は完了している状況である。

そうした中、焦眉の課題として取り組みが進められているのが、復興公営住宅の建設整備である。

現在、石巻市では約7,000戸の応急仮設住宅と民間の賃貸住宅約5,200戸を借上げた“見なし仮設住宅”とをあわせて、約3万人の被災者が仮住まいという形で暮している。復興公営住宅とは、そうした中で自力での住宅再建が困難な被災者に向けた恒久的に提供される賃貸住宅で市営住宅と同等のものである。

石巻市では平成28年度末までに累計で約4,000戸の復興公営住宅を整備することになっており、このうち今年

度末までに169戸の供用を開始する計画である。

### 民間事業者も活用し、4ヶ年で4,000戸の整備を目指す

入居資格については、先の自力での再建困難に加え、河川堤防や高盛土道路など津波防御施設の建設に伴い移転をしなければいけない被災者が優先対象となっている。

事業進捗状況については、約1,510戸が用地確保も含めて設計着手済みで、うち約150戸が用地交渉から施工までの早期供給を可能にするため、民間賃貸住宅借上げ型の復興公営住宅となっており、この4月から順次入居を

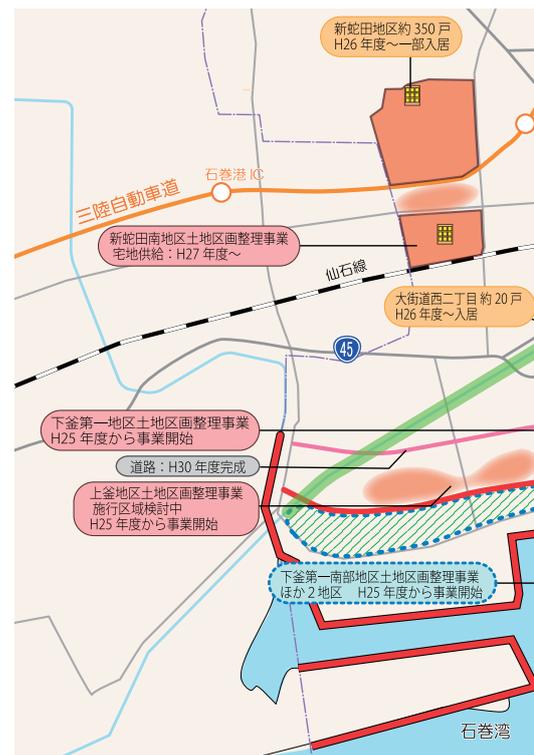
#### ■高盛土道路



防潮堤のほか高盛土道路で備え、その間を非可住地とすることで、津波の減勢を図り、市民の安全を確保する

開始する。

石巻市が事業主体となる案件も、新蛇田地区では土地区画整理事業地内に約350戸という規模の大きな復興公営



石巻市街地の復興計画概況

住宅の整備を予定しており、平成26年12月から一部入居が開始される予定となっている。

平成26年度には約1,800戸、27年度には約1,300戸を上積みする計画で、市民の生活再編を目指した新しい市街地づくりの事業化を加速させる構えである。

## 困難の多い半島部の高台移転は緒に就いたばかり

一方、沿岸・半島部についても防災集団移転促進事業にのっとり、石巻、牡鹿、雄勝、北上の4地域9地区で住宅団地の高台造成が、この3月から起工されている。

用地確保や山林をいかに効率的に造成するかという課題とともに、住民の

### ■ 新蛇田地区土地区画整理事業



被災者の生活再建の場として、宅地だけでなく公園・道路も整備され、新たな住宅市街地となる新蛇田地区

合意形成や各地区とも移転後の将来プランの見極めなど、困難も多い沿岸・半島部の高台移転だが、石巻市では全47地区約2,800戸を対象に事業化し、平成26年度以降、順次、宅地供給をしていく計画を立てている。

## 防災都市の要として機能待たれる高盛土道路の完成

このように、市民の居住区を再編しながら復旧・復興を目指す石巻市だが、その象徴となるのが平成27年度内に完成を目指している、海岸エリアを横断する高盛土道路ではないだろうか。

3・11の津波の被害を教訓に、第一防御ラインとして海岸の防潮堤を、

### ■ 新渡波地区・新渡波西地区土地区画整理事業



新渡波地区でも約100戸の復興公営住宅の用地取得が完了しており、平成27年度からの供用が予定されている

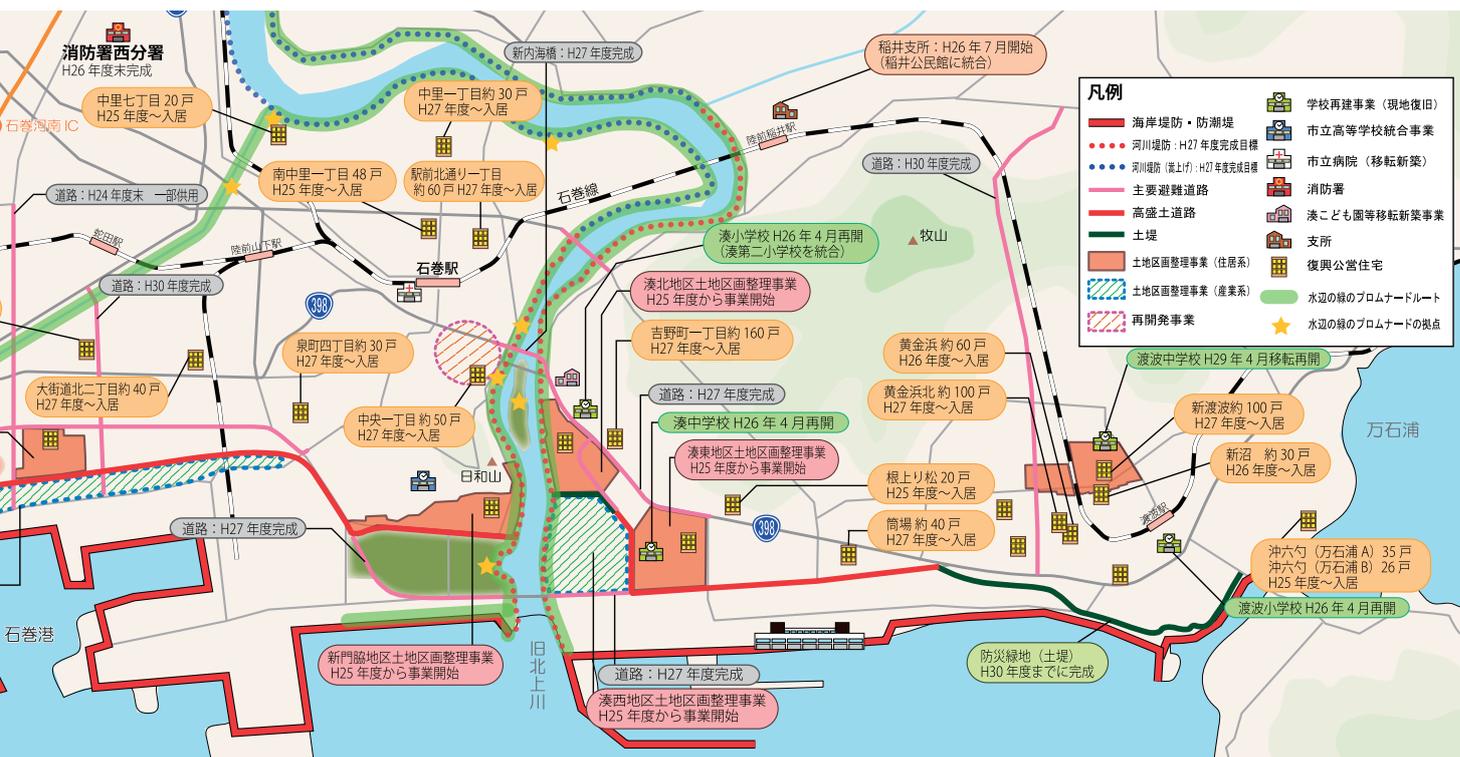
第二防御ラインとして高盛土道路を新設。その間は、産業系の諸施設や緑地整備などで原則非可住地とする都市計画の要となる高盛土道路が完成して市民の目と日々の利用に供されたときこそ、石巻が真の防災都市として機能しはじめ、復興から発展へと転化する瞬間だと思われる。

あの忌まわしい災害の発生から2年。さまざまな混乱と苦難を乗り越えて、本格化してきた石巻の復興事業の数々。もちろん、いずれの取り組みもはじまったばかりであり、真の復興を成し遂げるまで、われわれ産業界としてもさまざまな人的、技術的な応援を惜しむことなく提供していけるよう注視し続けなければいけないだろう。

### ■ 震災遺構保存検討



いまま震災時の記憶を生々しく残す門脇小学校や旧北上川の中瀬地区を震災遺構として保存すべきという声もある



(出典：市報いしのまき2013年2月15日号)



日和山より旧北上川中瀬を望む

東日本大震災特集

# 東日本大震災 2次報告

## 1 各分野における検討の概要

### (1) 道路・鉄道分野

1次調査では、津波により上部工・下部工が流出した橋梁を除き、基礎本体部に大きな変状は確認されなかった。しかし、今回の地震では、国内観測史上最大のマグニチュード9.0を観測したことから、本地震動における基礎の健全性について検証を行った。検討対象は、実構造物での実験事例（載荷試験等）が極めて少ない鋼管矢板基礎とした。

### (2) 建築分野

1次調査では鋼管杭基礎建物の被災は確認されなかった

当協会では、「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」発生後、道路・鉄道技術委員会、建築基礎技術委員会、港湾技術委員会、鋼矢板技術委員会に震災対策チームを設置し、各分野の鋼構造物（鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板）について目視による1次調査を実施、その結果を平成23年10月「東日本大震災1次調査報告書」として報告した。「東日本大震災2次報告書」では、1次調査報告書において「今後の課題」とした検討事項や鋼構造物の被災原因の究明等を中心に、その検討結果をとりまとめた。

ものの、津波による杭基礎建物の被災事例がみられたため、

①1次調査した石巻市内の鋼管杭基礎建物に作用した津波荷重の推定

②宮城県牡鹿郡女川町での杭基礎建物の転倒原因の推定を行った。

### (3) 港湾分野

広範囲にわたり、重力式防波堤や防潮堤に壊滅的な被害が確認されたにもかかわらず、岸壁や護岸構造物の被害は限定的であった。しかしながら、鋼構造物において、これまでにないような被災事例も確認されたことから、

①耐震強化岸壁「S港T埠頭2号岸壁」ではらみだし

②控え組杭式鋼矢板岸壁の一部区間においてタイワイ

ヤー破断と鋼矢板爪の離脱が見られた「相馬港1号埠頭岸壁」の一部倒壊

③カーテンウォール式波除堤において鋼管杭の破断が発生した「石巻漁港波除堤の鋼管杭」の破断の3事例を取り上げ、被災原因の究明に取り組んだ。

#### (4) 鋼矢板分野

河川堤防や道路盛土等での液状化等による沈下・法面崩壊、海岸堤防の津波による崩壊等の被害があったものの、

「河川堤防」においては鋼矢板による耐震補強の効果が見られた。また、津波により重力式構造物に被害が生じているにもかかわらず、「二重鋼矢板仮締切り堤」は構造形式としてほぼ健全な状態を維持し、津波に対する根入れ構造物の適応性の高さも確認されたことから、

①鋼矢板による河川堤防の補強効果について解析的検討  
②「二重鋼矢板仮締切り構造」の津波に対する有用性の検証を実施した。

## 2 道路・鉄道基礎の被災・無被災検討報告

### 2.1 全体概要

#### (1) 被害状況の概要

道路・鉄道分野における橋梁基礎の被害は、随時、応急復旧が進み、早期に高速道路・国道・新幹線等がほぼ通行可能となったことから、甚大な被害は確認されていない。

また、津波により上部工・下部工が流失した橋梁があったものの、地震動のみによる基礎本体の損傷は軽微であったものと推測される。

#### (2) 1次調査報告書の概要

今回の調査では、公開調査結果やヒアリング結果を基に鋼管杭基礎・鋼管矢板基礎の被災調査箇所を選定を行い、鋼管矢板基礎14件、鋼管ソイルセメント基礎6件、回転杭3件、計23件の現地調査を行った。

基礎本体の損傷には下記のような傾向があった。

- a) 盛土構造自体の崩壊
- b) 背面盛土部の崩壊による段差
- c) 支承部破壊に伴う上部工の移動による段差
- d) 橋脚のせん断破壊
- e) 路面のひび割れ

今回の鋼管杭基礎、鋼管矢板基礎の調査においても支承部の変形(写真2.1)、や橋台部での堤防法面のひび割れ(写真2.2)、桁端部でのずれ(写真2.3)は若干確認されているが、基礎本体部に大きな変状は見られておらずほぼ健全で

あったと考えられる。

### 2.2 鋼管矢板基礎某案件における無被災検討

#### (1) 検討目的

1次調査報告書において津波による被害以外では鋼管杭系基礎に関して概ね無被災が確認できたことを報告したが、各公的機関の震災報告においても同様の傾向であった。

しかしながら、今回の東日本大震災はわが国観測史上最大のマグニチュード9.0を観測した地震動によるものであり、このような地震動を受けた地域の基礎がほぼ無被災であったということに着目し基礎の健全性に関して追加解析を実施し検証を行った。

調査対象としては、継手構造を有するという特徴を持ち、杭基礎に比べ載荷試験例が極めて少ない(水平載荷試験9例)鋼管矢板基礎とした。また対象橋梁は1次調査報告書で調査した鋼管矢板基礎案件のうち、基礎近傍の強震記録波形から震度が大きく、かつ上部構造の仕様や原設計の設計結果が分かるような設計計算書が入手可能なものとした。

#### (2) 検討方法

本橋梁付近の強震記録波形(K-net)から加速度応答スペクトルに変換し算出した作用力にて設計し、現設計と比較する。但し、本橋梁のL2の設計は、実際より数倍の地震動の設計水平震度を用いている。このことから本橋梁は、地震による損傷もなく、早期に供用されていることもあり、



写真2.1 支承部の変形



写真2.2 堤防法面のひび割れ



写真2.3 桁端部のずれ

L1にて比較することとした。

1) 対象橋梁

- ・宮城県橋梁（平成14年道路橋示方書準拠）
- ・鋼管矢板基礎  $\phi 1000 \times t14$  (SKY400)  
L = 35.0m n = 28本 (円形)
- ・固有周期 T 橋軸方向：T = 0.76 (s)  
直角方向：T = 0.75 (s)
- ・設計震度 kh = 0.30 (L1地震時)
- ・耐震設計上の地盤種別：Ⅲ種地盤

なお、検討にあたっては、液状化低減係数および継手のせん断特性（せん断剛性およびせん断耐力）はL1に統一した。

2) 計算モデル

以下の3つのモデルにて計算を実施し、原計算のL1地震時の結果と比較を行う。

- ①弾性床上の有限長ばり
- ②継手のせん断ずれを考慮した仮想井筒ばり  
（地盤抵抗要素：線形）
- ③継手のせん断ずれを考慮した仮想井筒ばり  
（地盤抵抗要素：バイリニア型）

(3) 設計震度算出

K-netよりダウンロードした強震記録波形の生データを加速度応答スペクトルに変換し、その結果と本橋脚の固有周期より、応答加速度は、308.498 (gal) と算定された。

その結果、検討に用いる設計震度は、下記のように算定された。

$$kh = a \max / g = 308.498 / 980 = 0.31479$$

ここに、

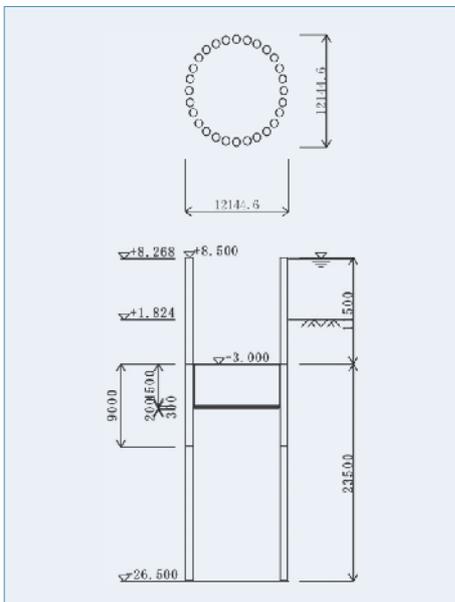


図2.1 検討モデル

kh : 設計震度

$a \max$  : 基礎の固有周期に対する応答加速度 (gal)

g : 重力加速度 (980cm/s<sup>2</sup>)

したがって、kh = 0.31 とする。

(4) 荷重条件

1) 原設計と強震記録波形より求められた荷重の比較

設計震度が、原設計の値と強震記録波形より求められる値とほとんど同じであったことより、柱下端における荷重は、ほとんど変わらなかった。

2) 強震記録波形を考慮した荷重

強震記録波形の最大加速度302.653gal（震度0.31）が鉛直方向の慣性力として作用した場合を考慮するため、以下に鉛直荷重を整理する。なお、水平力と曲げモーメントは、(表2.1)の作用力とする。

(5) 計算結果

原設計の震度および強震記録波形にて算出した修正震度における計算結果一覧表を表2.3に整理する。

変位については、L1許容値の20%程度、応力度についてはL1許容値の50%程度（本体部応力度）、支持力については、設計モデルの違いもあるが、L1許容値の40%～70%、引抜きについては、②、③モデル（仮想井筒ばりモデル）で発生しているが、全本数（28本）の10%～30%（許容値は押し込み極限+引抜き=60%）であり構造に影響を及ぼすレ

表2.1 荷重の比較（柱下端）

【橋軸方向】			
	現設計 (kh=0.30)	震度修正 (kh=0.31)	比率
V (kN)	24857.08	24857.08	1.000
H (kN)	7774.33	8022.9	1.032
M (kN・m)	133889.75	138314.88	1.033

【橋軸直角方向】			
	現設計 (kh=0.30)	震度修正 (kh=0.31)	比率
V (kN)	24857.08	24857.08	1.000
H (kN)	7671.33	7989.9	1.042
M (kN・m)	151280.27	15822.41	1.046

表2.2 鉛直荷重の整理

項目	鉛直力
	V (kN)
はり重量	0
柱重量	10457.08
上部工反力	14400.00
動水圧（地震時）	—
中空内水（橋軸）	0
合計	24857.08

鉛直方向慣性力(+) 24857.08×1.31=32562.77 24857.08×0.69=17151.39

表2.3 計算結果一覧

【橋軸方向（地震時浮力考慮、液状化考慮）】

検討ケース			現設計 (kh=0.30)	震度修正 (kh=0.31)			
設計モデル			有限長梁	有限長梁	仮想井筒梁 (L1)	仮想井筒梁 (L2)	
応力度	変位	δ mm	9.0 ≤ 50.0	9.3 ≤ 50.0	10.9 ≤ 50.0	12.3 ≤ 50.0	
	本体	σ1 N/mm <sup>2</sup>	95.6 ≤ 210.0	97.9 ≤ 210.0	97.7 ≤ 210.0	74.4 ≤ 235.0	
	仮縮切り時	σ2 N/mm <sup>2</sup>	112.9 ≤ 210.0	112.9 ≤ 210.0	112.9 ≤ 210.0	112.9 ≤ 210.0	
	合成応力度	σ N/mm <sup>2</sup>	198.5 ≤ 210.0	200.7 ≤ 210.0	200.8 ≤ 210.0	187.3 ≤ 235.0	
支持力	最大鉛直反力	R kN	1288 ≤ 3540	1294 ≤ 3540	2320 ≤ 3540	1016 ≤ 1979	
	最少鉛直反力	P kN	935 ≥ -1104	929 ≥ -1104	-96 ≥ -1104	-228 ≤ 0	

【橋軸直角方向（地震時浮力考慮、液状化考慮）】

検討ケース			現設計 (kh=0.30)	震度修正 (kh=0.31)			
設計モデル			有限長梁	有限長梁	仮想井筒梁 (L1)	仮想井筒梁 (L2)	
応力度	変位	δ mm	9.6 ≤ 50.0	10.1 ≤ 50.0	12.2 ≤ 50.0	13.8 ≤ 50.0	
	本体	σ1 N/mm <sup>2</sup>	103.0 ≤ 210.0	106.5 ≤ 210.0	109.5 ≤ 210.0	80.7 ≤ 235.0	
	仮縮切り時	σ2 N/mm <sup>2</sup>	112.9 ≤ 210.0	112.9 ≤ 210.0	112.9 ≤ 210.0	112.9 ≤ 210.0	
	合成応力度	σ N/mm <sup>2</sup>	205.6 ≤ 210.0	209.1 ≤ 210.0	212.6 ≤ 210.0	193.6 ≤ 235.0	
支持力	最大鉛直反力	R kN	1294 ≤ 3540	1304 ≤ 3540	2531 ≤ 3540	1132 ≤ 1979	
	最少鉛直反力	P kN	929 ≥ -1104	919 ≥ -1104	-307 ≥ -1104	-315 ≤ 0	

表2.4 計算結果一覧

【橋軸方向】

設計モデル	①モデル 有限長梁			②モデル 仮想井筒梁 (L1)			③モデル 仮想井筒梁 (L2)			
	E-W kh=0.31	U-D (+) kh=0.31	U-D (-) kh=0.31	E-W kh=0.31	U-D (+) kh=0.31	U-D (-) kh=0.31	E-W kh=0.31	U-D (+) kh=0.31	U-D (-) kh=0.31	
鉛直反力	支持力	37%	44%	29%	66%	73%	58%	51%	58%	45%
	引抜力	-	-	-	9%	-	30%	32%	25%	39%

【橋軸直角方向】

設計モデル	①モデル 有限長梁			②モデル 仮想井筒梁 (L1)			③モデル 仮想井筒梁 (L2)			
	E-W kh=0.31	U-D (+) kh=0.31	U-D (-) kh=0.31	E-W kh=0.31	U-D (+) kh=0.31	U-D (-) kh=0.31	E-W kh=0.31	U-D (+) kh=0.31	U-D (-) kh=0.31	
鉛直反力	支持力	37%	45%	29%	71%	79%	64%	57%	65%	43%
	引抜力	-	-	-	28%	3%	53%	32%	25%	39%

ベルではなかった。ちなみに、原設計の基礎平面形状は、橋脚形状の大きさから決定し、鋼管断面については、打撃工法の偏打の影響を考慮し決定しているため、許容値に対して余裕があったと考える。但し、仮縮め切時の残留応力を考慮した合成応力度の余裕はなく、原設計の基礎の決定要因は仮縮め切時の合成応力度であった。

強震記録波形による鉛直荷重を考慮した場合における鉛直反力の許容値に対する割合を表2.4に示す。

いずれのケースについても許容値内にあることが確認された。

## 2.3 まとめ

これらの結果により、今回の震災では橋脚の固有周期との関係からほぼL1地震動を若干超える震度を受けたが、本対象基礎のような仮縮め切り兼用構造であれば原設計では仮縮め切りの合成応力度で仕様が決定することも多いため、変位、応力度、支持力において許容値に対して余裕を持つ結果であった。また、設計では対象外となっている鉛直方向成分も考慮すると支持力においては若干厳しくなったが、それでも許容値以内であったため本対象基礎が無被災であったと考えられる。

## 3 建築基礎の被災・無被災検討報告

### 3.1 全体概要

#### (1) 被害状況の概要

今回の地震では、震源地に近い地域において非常に大きな地動加速度が観測されたが、地震動による被害は比較的少なかった。一方、東日本の太平洋沿岸部各地で観測された大津波は、多くの地域で甚大な被害をもたらした。特に宮城県牡鹿郡女川町においては、杭基礎構造のRC造・S造建物が転倒・移動するという被災事例も発生した。また、液状化による被害も茨城県・千葉県・埼玉県を中心に多数発生し、特に千葉県浦安市では市域の約85%で液状化が発生した。

#### (2) 1次調査報告書の概要

津波被害が多数発生した宮城県石巻市内において鋼管

杭基礎建物およびその周辺地域について被災調査を実施した。1次調査報告書では、鋼管杭基礎の3建物について構造躯体には被害がなかったこと(被害は外壁のみ)を報告した。

#### (3) 女川町における杭基礎建物の転倒事例

女川町において転倒した杭基礎構造の建物は4件(図3.1、表3.1参照)である。【江島共済会館】・【旅館ビル】・【水産加工物倉庫】は津波の流入方向に転倒していたのに対し、【女川交番】は津波の流入方向に対して直角方向に転倒していた。【旅館ビル】については、建物転倒後に約70m山側に流された模様である。

### 3.2 杭基礎建物における被災・無被災検討

1次調査では、津波による鋼管杭基礎建物の被災は確認されなかったものの、女川町では杭基礎建物の転倒被害が発生した。これを踏まえ、建物に作用した津波荷重の比較等から、女川町における転倒原因の推定を行った。

表3.1 女川町における転倒建物（杭基礎構造）の被災状況

被災建物	女川交番	江島共済会館	旅館ビル	水産加工物倉庫
構造・規模	RC造2F 長辺×短辺×高さ＝10m×4.8m×10m 塔状比：短辺＝2.08 長辺＝1.00	S造3F（一部4F） 長辺×短辺×高さ＝16m×8.4m×12m 塔状比：短辺＝1.43 長辺＝0.75	RC造4F 長辺×短辺×高さ＝5.6m×5.6m×14.5m 塔状比：短辺＝2.59 長辺＝2.59	RC造2F 長辺×短辺×高さ＝20m×8.8m×10m 塔状比：短辺＝1.14 長辺＝0.50
被災状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>その場で北向きに転倒</li> <li>基礎杭にはφ300のPHC杭が使用されていた模様</li> <li>全ての杭は杭頭部付近で破断</li> <li>引抜かれた部分がフーチングに接続したまま露出</li> <li>屋根及び壁面に衝突痕あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建物の短辺方向から津波を受けた模様</li> <li>付近で撮影された津波映像から、大津波の第1波（押し波）が建物の3階部分に達するまでは転倒しなかった模様</li> <li>基礎杭にはφ250のPHC杭が使用されていた模様</li> <li>露出したフーチング底面には杭頭接合鉄筋（かご筋）、中詰めコンクリート、引抜かれた杭1本が残存</li> <li>引抜かれた杭の長さは6.0m（現場溶接部にて破断?）</li> <li>この1本の杭を除き、杭は建物の元の位置に残置されている模様</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>元の位置より70m以上西側（押し波方向）に流された模様</li> <li>基礎杭にはφ300のPHC杭が使用されていた模様</li> <li>大半の杭が建物の元の位置で破断</li> <li>1本の杭のみが建物が流された位置まで引きずられ折損</li> <li>元の位置には4本の杭が2m程度引抜けた状態で残存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>短辺方向に津波（押し波）を受け転倒した模様</li> <li>フーチング底面には杭と接続された痕跡が若干残っていたものの、                         <ul style="list-style-type: none"> <li>①基礎杭の接合部分に鉄筋かごの痕跡等が確認できないこと</li> <li>②基礎杭がフーチングに埋込まれた痕跡がないこと</li> <li>③フーチングせいが非常に小さいことから、フーチングと杭は接合されていないと思われる</li> </ul> </li> </ul>
状況写真		 注1) より転載	 注1) より転載	 注2) より転載



図3.1 女川町における転倒建物の位置と転倒方向

表3.2 石巻市と女川町における津波浸水高の比較

石巻市		女川町	
地区	浸水高	地区	浸水高
石巻工業港	4～5m	女川漁港	14.8m
中瀬地区	5.9m	竹浦地区	8.0～11.0m
旧北上川右岸沿い（門脇～中央地区）	3.3～5.0m	女川浜地区（町役場）	14.0m
門脇地区	6.7m	鷺神浜地区（町立病院）	17.6m
中浦地区	5.6m		

表3.3 石巻市内の調査建物に作用した津波荷重の算出結果

建物名	津波		建物				波圧による転倒モーメント (kN・m)		
	波高h (m)	速度u (m)	幅B (m)	奥行D (m)	高さH (m)	開口率α (%)	階高	推定方法A	推定方法B
サイロ	3.5	10.0	45	15	25	5	2	82852	40258
飼料工場			150	20	25	30	2	203496	98880

(1) 津波の浸水高

表3.2に石巻市と女川町における津波浸水高の比較結果を示す。女川町に到達した津波の最大波高は石巻市に到達した津波の2倍以上であったと推察される。

(2) 建物に作用した津波荷重

石巻市内の調査建物に作用した津波荷重の算出結果を表3.3に、女川町内の転倒建物に作用した津波荷重の算出結果を表3.4に、両地域の建物に作用した津波荷重の比較を表3.5に示す。石巻市の調査建物に対して女川町の転倒建物では、作用水平力で3～12倍強、転倒モーメントで4～24倍強の荷重が作用した結果となる。

(3) 転倒原因の推定結果

津波浸水痕の調査結果から、女川町に到達した津波の最大波高は15m以上であったと推定される。このため女川町では、沿岸部の4階建て以下の建物は全て水没したものと判断される（転倒建物は、全て4階建て以下）。

1) 女川交番

本建物が転倒した主な原因は、建物の水没により基礎杭の曲げ耐力・せん断耐力が低下したところに、流出建物（女川共同ビル）が衝突、基礎杭がせん断破壊（破断）したことによるものと推察される（写真3.1参照）。また、基礎杭の破断後に流出建物（女川共同ビル）が更に陸側に移動したことも転倒の一因と考えられる。

表3.4 女川町内の転倒建物に作用した津波荷重の算出結果

建物名	津波		建物					波圧による 転倒モーメント (kN・m)	
	波高h (m)	速度u (m)	幅B (m)	奥行D (m)	高さH (m)	開口率α (%)	階高	推定 方法A	推定 方法B
女川交番	15.0	10.0	4.8	10.0	10.0	30	2	42218	25830
江島共済 会館			16.0	8.4	12.0	40	3~4	257069	106272
旅館ビル			5.6	5.6	14.5	10	4	188177	81461
水産加工 物倉庫			20.0	8.8	10.0	20	2	308256	123000

ただし、波圧による転倒モーメントは次式により算出した。  
推定方法A：津波避難ビル等に係るガイドライン（内閣府、2005年6月）

$$Mr = \frac{1}{2} \cdot \frac{100-\alpha}{100} \rho g B H^2 (3h - \frac{2}{3} H)$$

推定方法B：津波からの避難のための構造物の設計ガイドライン  
（アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁、2008年6月）

$$Mr = \gamma \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{100-\alpha}{100} C_0 \rho u^2 B H \frac{H}{2}$$

ここに、ρ：海水の単位体積質量 (t/m³) ρ=1.025t/m³ C₀：抗力係数 C₀=2.0  
γ：波の先端が構造物に衝突するときの衝撃力による割増し係数γ=1.5

2) 江島共済会館

建物の水没により基礎杭および杭頭接合部の曲げ耐力・せん断耐力が低下したところに建物の短辺方向から過大な波圧力を受けたこと、1本の基礎杭を除いてフーチングと基礎杭を接合する鉄筋かごが杭体内の中詰め部より抜け出したことが建物転倒の主な原因と推定される。

3) 旅館ビル

本建物の主な転倒原因は、【江島共済会館】の場合とほぼ同様である。若干異なる点は、フーチングと基礎杭は鉄筋等で接合されていなかったこと、頭部がフーチング内に埋め込まれていた幾つかの基礎杭がせん断破壊（破断）したことである。

4) 水産加工物倉庫

本建物では、建物と基礎杭が接合されていなかったう

表3.5 石巻市の調査建物と女川町の転倒建物に作用した津波荷重の比較

地区	建物名	作用水平力/ 建物幅 (kN/m)		転倒モーメント/ 建物幅 (kN・m/m)	
		推定方法A	推定方法B	推定方法A	推定方法B
石巻市	原料サイロ	526	511	1841	895
	飼料工場	388	377	1357	659
女川町	女川交番	2815	1076	8795	5381
	江島共済会館	2823	1107	16067	6642
	旅館ビル	4952	2006	33603	14547
	水産加工物倉庫	3217	1230	15413	6150



写真3.1 大津波の第1波がかなり引いたところの状況:女川町役場屋上から撮影<sup>注3)</sup>

えに、建物水没により押さえ力が低下したところに短辺方向から過大な波圧力を受けたことが建物転倒の主な原因と推定される。

3.3 まとめ

女川町に到達した津波の最大波高は15m以上であったと推察されるが、転倒建物には非常に大きな波圧力が作用し、基礎構造にも過大な引抜き力が作用したことがわかった。基礎構造に過大な引抜き力が作用しても、必ずしも破壊に至るとはいえないものの、今後の沿岸地域における建物設計では、基礎杭や杭頭接合部を含めた津波による建物転倒に対しても何らかの検討が必要であろう。

4 港湾構造物の被災・無被災検討報告

4.1 全体概要

(1) 被害状況の概要

東北地方太平洋沖地震及び地震後の津波により、防波堤や防潮堤は、岩手県釜石市沖の防波堤の被災に代表されるように、東北地方の多くの箇所倒壊等の大きな被害を受けた。

一方、岸壁や護岸構造物の被害は限定的であった。青森県から宮城県にかけては、港湾構造物の被災に影響を与える周波数成分(0.3～1.0Hz)が非常に少ない地震動であったため、岸壁の大規模な被害は発生しなかった。しかし、

福島県から茨城県にかけては、港湾構造物の被災に影響を与える周波数成分(0.3～1.0Hz)が比較的多かったため、地盤の液状化及び津波による岸壁の被害が見られた。

(2) 一次調査報告書の概要

JASPPの一次調査(現地調査)の結果、港湾鋼構造物の被災は限定的であることがわかったが、一方で、これまでに経験したことがないような被災状況も観察された。その被災例を以下に示す。

1) S港T埠頭2号岸壁のはらみだし

S港は、T埠頭の2号岸壁(-14m水深、控え組杭の鋼管矢板式)で最大0.65m程度海側にはらみだしが発生した

(図4.1参照)。

2) 相馬港1号埠頭岸壁の一部倒壊

相馬港1号埠頭の控え組杭の鋼矢板式岸壁の一部区間で、タイワイヤーが破断したため海側に変位が生じ、鋼矢板爪の離脱が発生した(写真4.1参照)。

3) 石巻漁港波除堤の鋼管杭の破断

石巻漁港のカーテンウォール式波除堤において、鋼管杭の破断が発生した(写真4.2参照)。

(3) 2次報告書での検討方針

JASPPでは、上記に示す3例について被災原因究明を目的として以下の視点で詳細検討を行った。

1) S港T埠頭2号岸壁のはらみだし

2号岸壁の被災原因を明らかにするため国土交通省で実施された調査結果の考察と、「FLIP」を用いた地震応答解析にて詳細検討を行った。

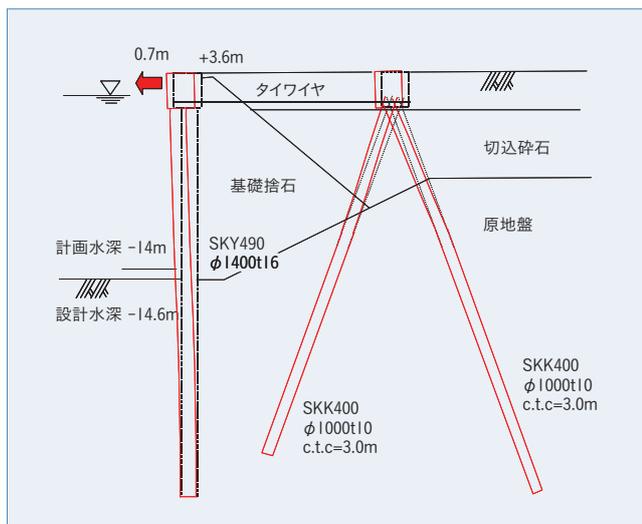


図4.1 T埠頭2号岸壁の被災概要



写真4.1 相馬港1号埠頭の被災状況

2) 相馬港1号埠頭岸壁の一部倒壊

地震時の安定性について設計的アプローチで詳細検討を行った。

3) 石巻漁港波除堤の鋼管杭の破断

設計荷重を上回る大きな津波外力が作用したことによる被災と考えられ、鋼管の破断原因解明のためブッシュオーバー解析による検討を行った。

4.2 検討結果

4.2.1 S港T埠頭2号岸壁での検討結果

(1) 鋼管矢板・控え杭の変形状況

国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所では、鋼管矢板、控え組杭、タイワイヤーの被災状況について詳しく調査している。以下に調査概要と考察を記す。

a 鋼管矢板

鋼管矢板の変形状況を把握するため、鋼管矢板内部をハンマーグラブにて土砂を撤去後に超音波測定器を垂下して1mピッチで変形状況の計測を行っている。2号岸壁Ⅱ区で鋼管矢板が最大変形した近傍の2点の計測結果を図4.2に示す(計測された数値をもとに作図した)。また、前後3点の変形量から算出した曲率(3点を通る円の半径を算出)を併せて示す。これらの結果から、大きく変形している可能性のある地点に○印を示している。杭頭付近と、標高-10m、-17m、-23m付近で変形している可能性が読みとれる。最大曲率は0.02であり、全塑性モーメントに対応する曲率を越えていることがわかる。

b 控え組杭

鋼管矢板が最大変形した近傍の控え組杭の変形状態について掘削調査が行われた。押し込み杭に関して、設計時よりも2~3°海側に傾斜していることが確認された。



写真4.2 石巻漁港波除堤の被災状況

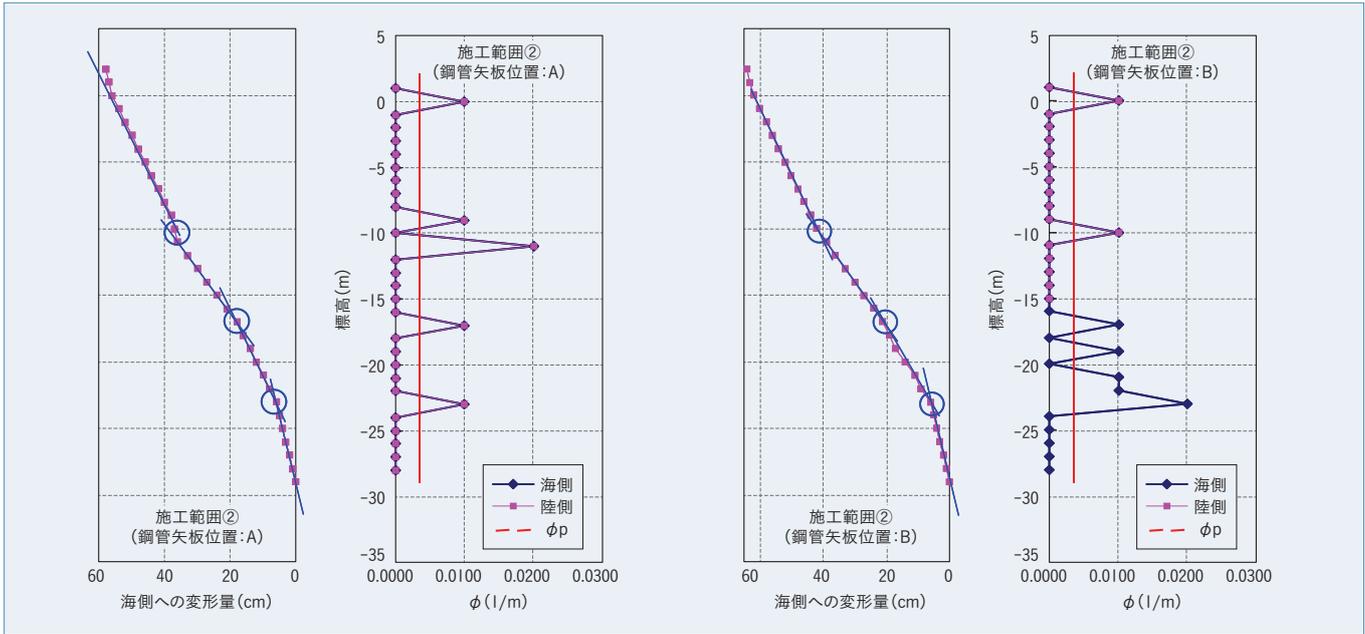


図4.2 超音波測定器による鋼管矢板の変形状況と曲率分布

### c タイワイヤー

現地での荷重試験により損傷は無いことが確認されている。

### (2) 2号岸壁の被災状況の再現計算

有効応力解析プログラムFLIPを用いて、2号岸壁Ⅱ区の被災状況の再現計算を試みた。

#### a 地震動について

入力地震動は2011年東北地方太平洋沖地震による地震動の事後推定結果として(独)港湾空港技術研究所から公開されたデータ(工学的基盤の2E波)を用いた。

#### b 地盤条件

解析地盤定数は、設計時の土質調査と、地震後の土質調査(PS検層を含む)結果を用いて設定した。液状化に関するパラメータは、建築基礎設計指針に基づき設定した液状化抵抗を再現できるように要素シミュレーションで決定した。

#### c 解析条件

地盤の初期応力状態を再現するため実際の施工過程を考慮した多段階築堤解析を行った。また、鋼材の強度は、被災再現解析であるため平均的な値を用いることにした。また、控え組杭の杭軸方向挙動の扱いを変えた2ケースを解析対象とした。

#### d 解析結果

2号埠頭Ⅱ区に対する解析結果として、残留変形図と最大せん断ひずみ分布を図4.3に示す。

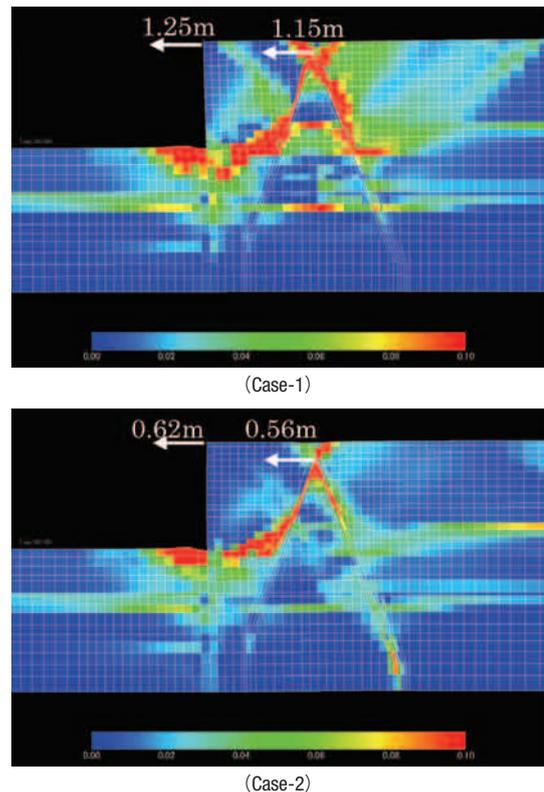


図4.3 残留変形図(最大せん断ひずみ分布)

「FLIP」による地震応答解析では、控え杭の周面摩擦を考慮(引き抜きを可能)とした解析(Case1)では岸壁天端の残留水平変形量が1.25mで実被害よりも過大な結果となった。周面摩擦を無視(引き抜き不可)とした解析(Case2)では、残留水平変形量が0.62mとなり実被害と調和的な結果となった。両ケースとも被災していることは再現できているが、鋼管矢板の変形状態をさらに合わせるためには、1) 受働側の地盤強度がもう

少し発揮される設定、2) 控え杭の軸方向挙動の設定が重要と考えられる。

さらに、控え杭の位置を、曲げを考慮した設計法で必要となる位置まで移動させた解析をおこなったところ、杭に作用する横抵抗が増加して、残留水平変形量が8割程度まで抑制されることがわかった。これは、押し込み杭の位置が鋼管矢板背後の地盤のせん断ひずみが多く発生する地点よりも陸側に移ったため、杭の横抵抗が増加したことが影響しているものと考えられる。

#### 4.2.2 相馬港1号埠頭での検討結果

##### a 解析条件と照査項目

岸壁に開口が生じていたC-14岸壁を対象に、地震動や津波の影響を調べるため以下のケースで設計検討を実施した。

Case0：原設計（設計震度  $kh = 0.1$ 、地震時動水圧は考慮せず）

Case1：原設計震度 ( $kh = 0.1$ ) + 地震時動水圧

Case2：Case1における設計震度を3.11地震動 ( $kh = 0.26$ ) とする

Case3：潮位が低下し海底面が現れる場合、地震動なし

Case4：引き潮時を想定（水陸満水）、地震動なし

各ケースの荷重イメージを図4.4～図4.6に示す。照査項目は次の通り。

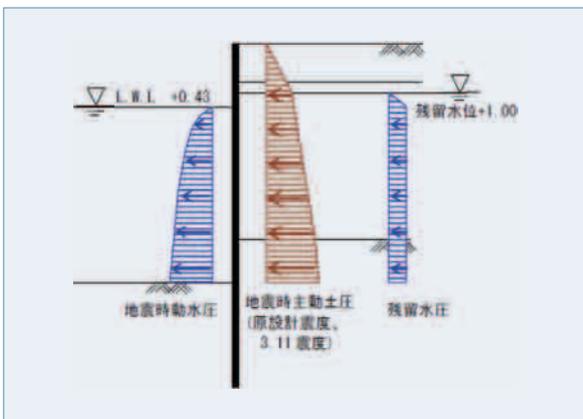


図4.4 Case1及びCase2の荷重分布

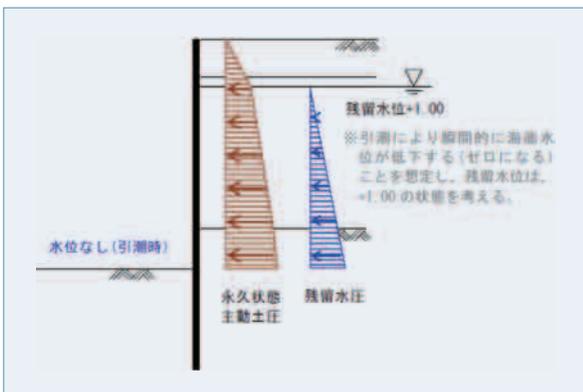


図4.5 Case3の荷重分布

##### ○照査項目

- ①鋼矢板護岸：曲げモーメントに対する応力度照査及び、フリーアースサポート法による根入れ長の照査
- ②タイプル（控え索）：引張力に対する照査
- ③控え杭（組杭）：押し込み力、引抜き力、部材の軸圧縮（引張）応力度照査

##### b 検討結果

###### ○鋼矢板の応力度

供用年数30年として既往の設計計算書に基づき腐食を見込む断面性能で照査した結果、設定した各ケースとも安全であった。

###### ○鋼矢板の根入れ長

Case2の場合に根入れ不足との判定となった。

###### ○タイプルの引張力

設定した各ケースとも安全であった。

###### ○控え組杭の支持力（押し込み、引抜き）

設定した各ケースとも安全であった。

###### ○控え組杭の応力度

設定した各ケースとも安全であった。

この検討結果から、3.11地震に対して鋼矢板の根入れが不足することがわかったが、局所的な被災状況を考慮すると、動的応答解析による分析や津波の作用力の実験的・解析的検討も必要と思われる。

#### 4.2.3 石巻漁港波除堤の鋼管杭の検討結果

##### a 検討の手順

まず、気象庁発表による周辺での推定津波波高  $H = 6.6\text{m}$  を碎波として作用させた時の発生断面力を検討し、次に、鋼管杭の  $M \sim \phi$  モデルを設定したプッシュオーバー解析により東西の波除堤の耐力評価を実施した。

##### b 津波波高6.6m作用時の断面力

波力の設定は、漁港・漁場の施設の設計の手引きに従

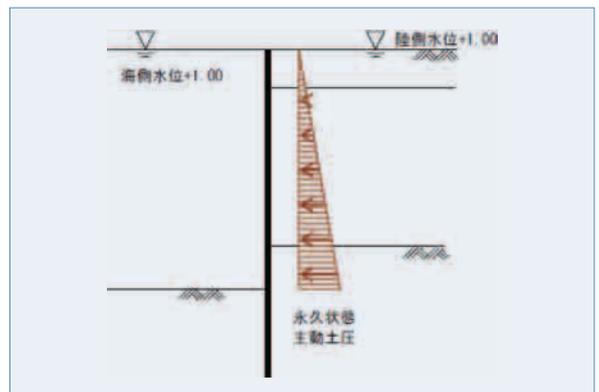


図4.6 Case4の荷重分布

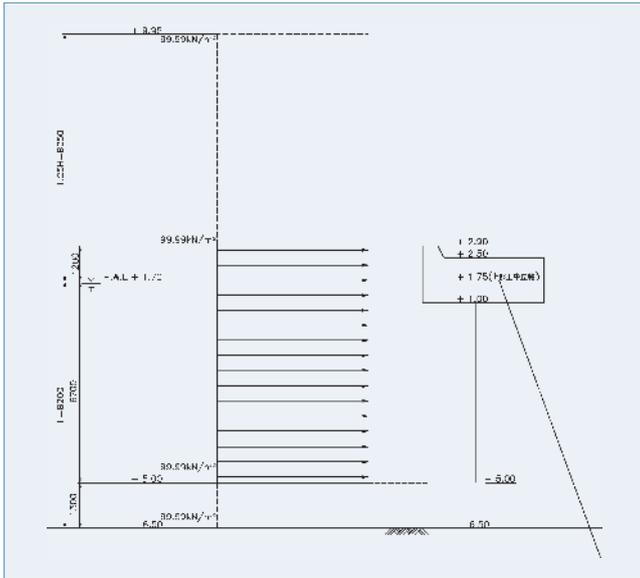


図4.7 砕波の波圧分布

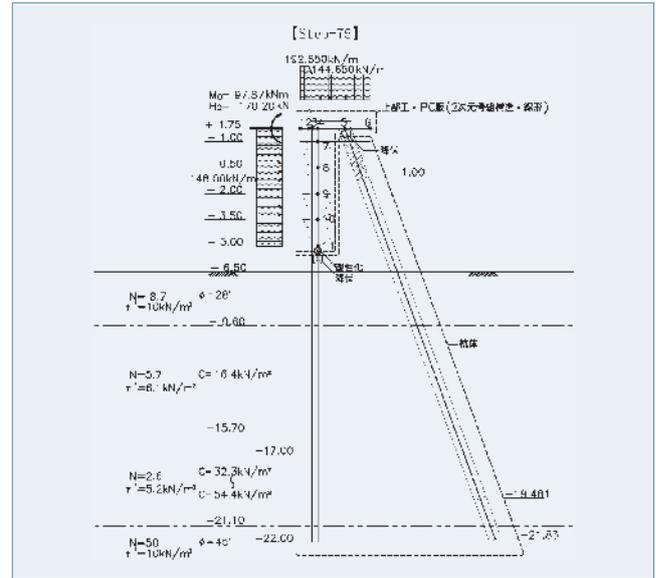


図4.9 波圧分布 (PC版考慮)

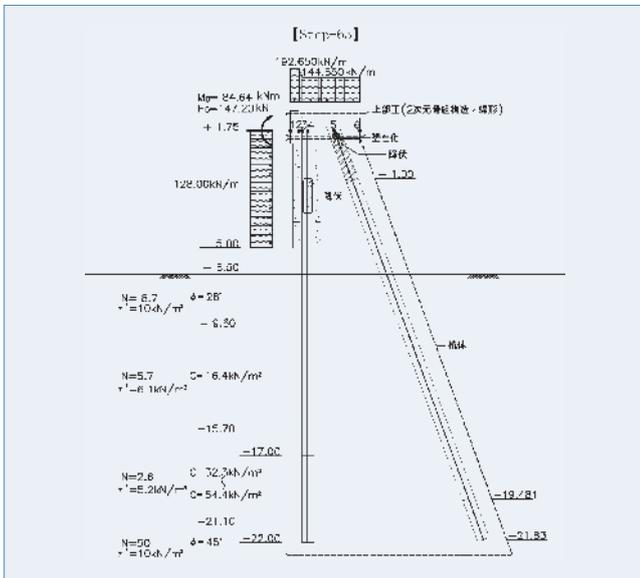


図4.8 波圧分布 (PC版無視)

表4.1 鋼材のM～φモデルに基づく全水平力計算

	東波除堤	西波除堤
押し波 PC版考慮	ΣH=1169kN 上部工水平変位 89mm	ΣH=1138kN 上部工水平変位 157mm
押し波 PC版考慮	ΣH=1169kN 上部工水平変位 89mm	ΣH=1138kN 上部工水平変位 157mm

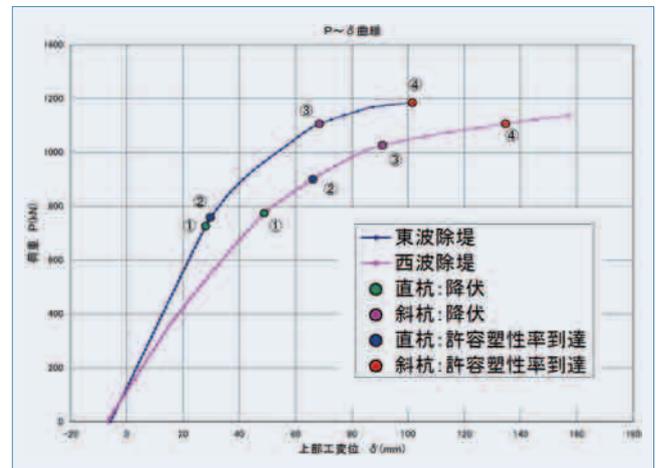


図4.10 P～δ曲線 (東波除堤、西波除堤) PC版考慮

い、図4.7に示す波圧分布を考慮。建設後7年間の腐食を考慮した断面応力度は許容応力の4～5倍となった。

**c** 鋼材のM～φ関係に基づくプッシュオーバー解析結果  
部材の塑性化を許容し、かつ、靱性を損なわない範囲の荷重(波高)を検討するため、道路橋示方書V耐震設計編鋼製橋脚の方法に準じて鋼材のM～φモデルを設定し、塑性化点の鋼材が許容曲率に至る際の全水平力を算出した。なお、波力は破碎の波圧(等分布荷重)を対象とした。  
杭材の一部が許容ひずみに到達したときの波圧分布と鋼材の塑性化位置を図4.8及び図4.9に示す。また、波圧の合計値を表4.1に示す。  
さらに、東西のそれぞれの荷重と変位の関係を図4.10

に示す。図4.10より、鋼管杭が許容塑性率に到達する変位は西波除堤の方が3割程度大きく、変形性能に優れる(ねばり強い)ことがわかった。

### 4.3 まとめ

S港T埠頭(鋼管矢板式岸壁)、相馬港1号埠頭(鋼矢板式岸壁)、石巻漁港波除堤(鋼管杭によるカーテンウォール)について被災原因の検討をおこなった結果、現行の設計基準では発生した現象の再現が難しい面があることが明らかとなり、今後、設計法の改善へ向けた取り組みが必要であると考えられる。一方で、港湾分野の鋼管杭の塑性化を

考慮した設計（地震応答解析やプッシュオーバー解析）では全塑性モーメントを折れ曲がり点とするバイリニアモデルを用いることが多いが、全塑性後の限界値（許容塑性率

や限界ひずみ）まで考慮することで、「ねばり強さ」を発揮できるポテンシャルを有していることも分かった。今後、径厚比に応じた適切な限界値の設定も課題と考えられる。

## 5 鋼矢板構造物の被災・無被災検討報告

### 5.1 全体概要

#### (1) 被災状況の概要

東北地方太平洋沖地震では、河川堤防や道路盛土等の盛土構造において、液状化等によって沈下や法面崩壊等の被災を受ける事例が、青森県から千葉県までの広範囲にわたって多数発生した。また、海岸堤防の盛土構造が、津波によって崩壊する等の大きな被害も多くみられた。

#### (2) 1次調査報告書の概要

鋼矢板技術委員会では、「河川堤防」に着目して現地調査を行い、近傍の無対策箇所では沈下や法面崩壊等の被災を受けている箇所があるのに対して、鋼矢板による耐震補強が施されていた箇所が無被災であったことを確認した。

また、津波を受ける海岸域において、岩手県で水門建設のために設置されていた二重鋼矢板仮締切り堤の現地調査を実施し、津波により一部の中詰め土が流出していたもの

の、鋼矢板には損傷が無いことを確認した。

### 5.2 検討結果

#### (1) 河川堤防における液状化被災再現解析

鋼矢板による河川堤防の補強効果の検証を目的に、東北地方太平洋沖地震における利根川堤防の被災箇所の再現解析を2次元液状化流動解析プログラム「ALID」を用いて行った。さらにその適用性を検証すると共に、鋼矢板による対策を行った場合の対策効果を同解析により評価した。

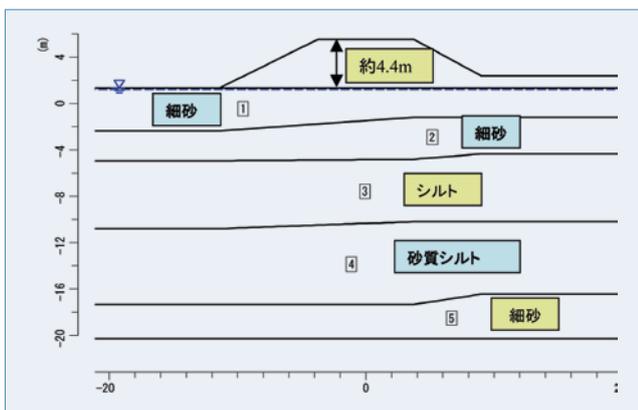


図5.1 解析対象断面（モデル化）

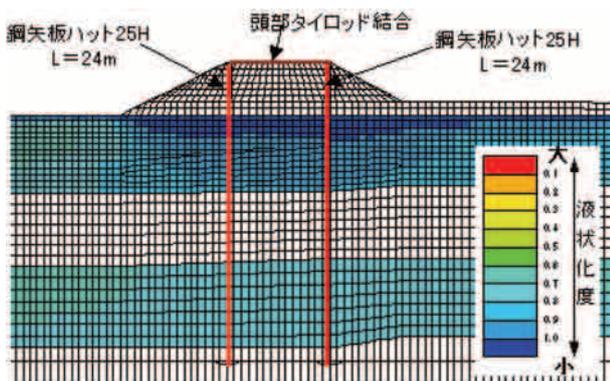


図5.2 ALIDによる解析結果の例（FL値分布）

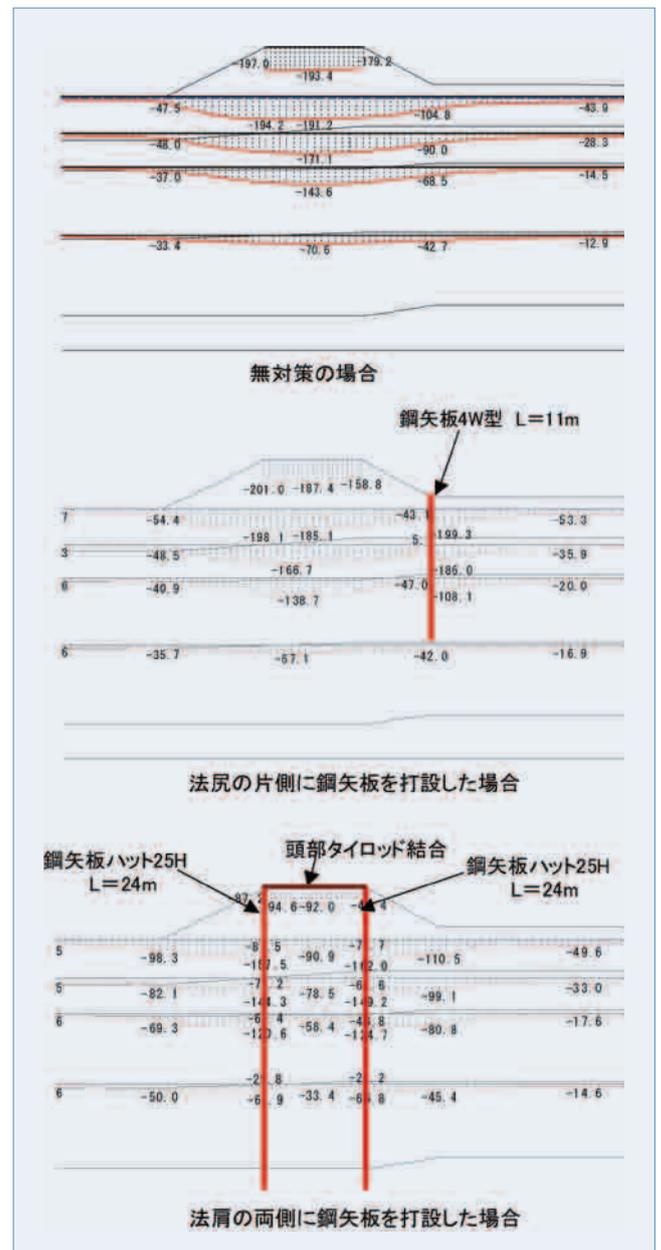


図5.3 沈下量分布図

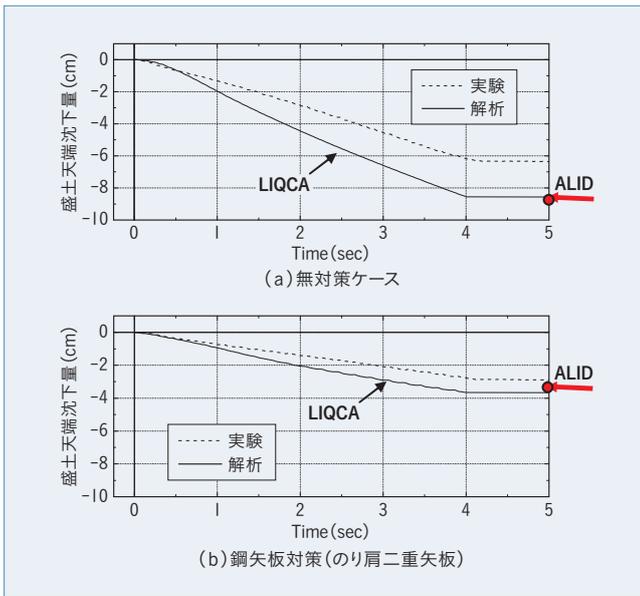


図5.4 模型振動実験の天端沈下量の比較

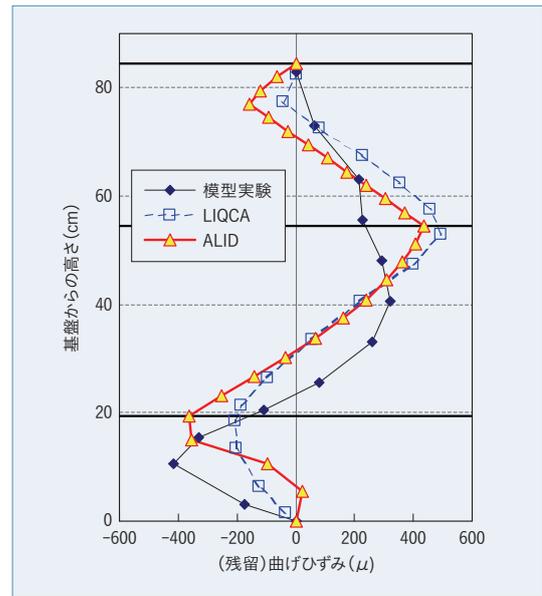


図5.5 鋼矢板の残留曲げひずみの比較

図5.1に解析モデルを、図5.2にFL値分布を示す。

無対策ケースにおける本解析結果では、天端沈下量が約1.8～1.9mであり、実際の被災調査結果とある程度合致した結果が得られた。

鋼矢板対策の効果について、根入れ長が短く、堤防法尻の片側だけに鋼矢板を配したケースでは、沈下を抑制する効果は確認されなかった。一方、非液化化層まで根入れし、かつ両側に鋼矢板を配したケースでは、無対策と比べて、沈下量が半分程度に抑えられる結果となった(図5.3)。

「ALID」は静的な地盤変形解析手法であるため、地震動の時刻歴を結果に反映することは困難である。その影響を評価するため、「ALID」により模型振動実験をシミュレーションした結果、無対策、鋼矢板対策ともに地盤変形は良く近似した。また、鋼矢板に作用する曲げひずみ(残留値)も、解析がやや上回るものの、同程度の水準であった(図5.4、図5.5)。

ただし、鋼矢板に発生する曲げひずみは、残留成分>振動成分であるが、振動成分も無視しえないレベルであり、「ALID」では動的挙動は考慮できないため、別途考慮(部分的に設計荷重を適用など)が必要である。

解析精度向上および鋼矢板対策の最適化にむけ、解析条件(傾斜考慮、根入れ長)や設定パラメータに関する追加検討と、利根川堤防の鋼矢板対策区間(被災なし)を対象とした解析の実施を予定している。

## (2) 二重鋼矢板仮締切り堤における津波被災再現解析

津波の襲来を受けたにも関わらず、健全な状態を維持していた下荒川水門工事の鋼矢板二重仮締め切り堤(写真5.1)を対象として、鋼矢板二重締切り構造の津波に対する効果を明らかにし、その有用性の検証を目的に、津波波力

を考慮した場合の再現解析を実施した。

被災前検討断面は、入手できた条件をもとに、「鋼矢板二重式仮締切 設計マニュアル」(財団法人 国土技術研究センター)に準じて設計上許容される限界の根入れ長を逆算し、図5.6に示す断面とした。また、被災後断面は、洗掘状況の調査結果をもとに図5.7のように推定した。また津波高さは、独立行政法人港湾空港技術研究所と東京大学郡司准教授の調査結果報告を参考に、釜石周辺の港の津波高さを9.0mと仮定した。なお津波波力は、静水圧の3倍、1.5倍、1倍の3ケースで計算した。

構造計算は、「鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル」(財団法人 国土技術研究センター)に基づき、せん断変形・壁体の転倒・壁体の滑動に対する照査を行い(以下、簡便法)、大堀らの方法(「二重矢板式構造物の力学特性に関する研究」(港湾技術研究所報告 Vol.23 No.1, p.103～151 大堀ら)で、二重鋼矢板の天端変形量及び鋼矢板に作用する応力度を評価し変形に対する性能照査を行った。

簡便法による検討では、せん断変形の照査において、鋼



写真5.1 下荒川水門工事二重鋼矢板壁の被災状況

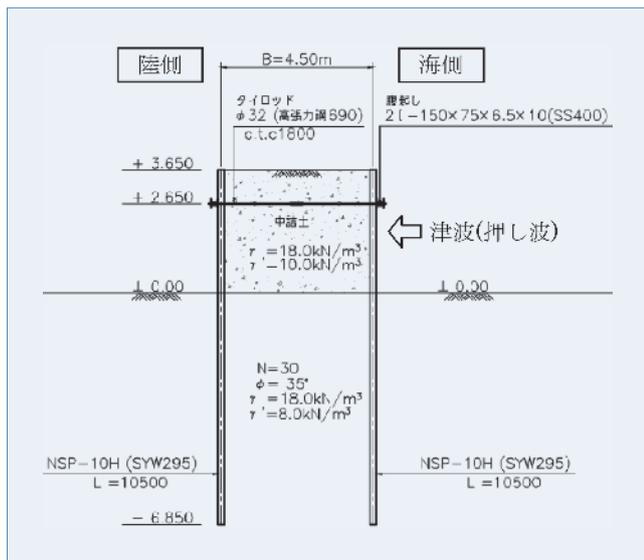


図5.6 被災前の検討断面

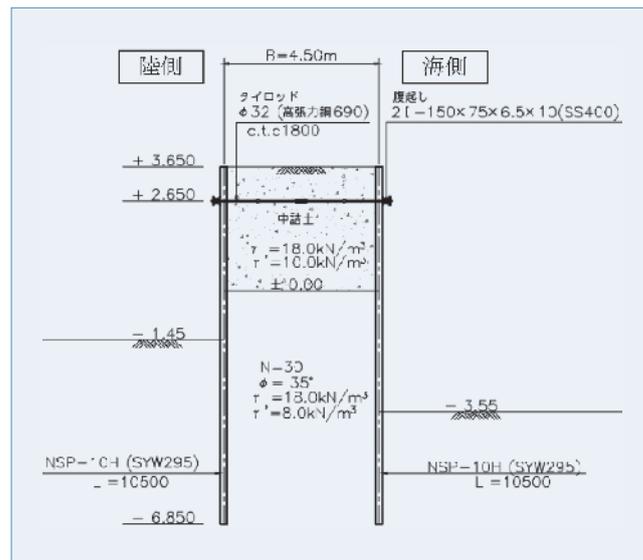


図5.7 被災後の推定断面

矢板のせん断抵抗を考慮しないと、せん断抵抗モーメントがせん断変形モーメントより小さくなり、波力によらず安全率1を下回る結果となった。一方、鋼矢板のせん断抵抗を考慮した場合には、津波波力を静水圧の1.5倍以下とすることで、安全率1を上回る結果が得られた。また転倒滑動に対する検討でも、津波波力を静水圧の1.5倍以下とすることで、安全率1を上回る結果が得られた。

また大堀らの方法による検討では、津波波力を静水圧の3倍として作用させた場合には、鋼矢板の天端変位量、応力度ともに許容値を超える結果となった。一方静水圧の1.5倍とした場合には、海側の鋼矢板において、天端の変位量が許容変位の概ね90%、鋼矢板の応力度が降伏応力度の概ね90%で許容値以下であった。

これらの結果から、津波波力は静水圧の3倍は作用しておらず、大きくとも静水圧の1.5倍程度の波力とすることで被災状況の再現が可能である。

### 5.3 まとめ

堤防の耐震性照査で一般的に用いられる「ALID」を用いて、鋼矢板による補強効果を精度良く再現できることが確認できた。一方で、地震時に鋼矢板に生ずる振動成分による応力は、原理的に「ALID」では考慮できず、無視できないレベルであるため、今後検討を加えて、その考慮の方法を提案できるようにしたいと考えている。

二重鋼矢板仮締切り堤における津波被災再現解析は、仮締切り堤だけではなく、鋼矢板芯壁堤の耐震・耐津波性にも関わる。特に、海岸堤防や河口部の堤防の補強で鋼矢板芯壁堤を適用する場合には、耐震性だけでなく、津波に対する設計法も明らかにしておくことが必要になると思われる。津波の波力や既存設計法の適用範囲も含め、今後も鋼矢板技術委員会で検討を進めていきたい。

## 6 おわりに

当協会では、道路・鉄道、建築基礎、港湾、鋼矢板の4つの分野について、震災直後に実施した独自調査で把握した被災状況をふまえ、その一部を対象に詳細検討を行った。震災2次報告書は、その成果をまとめたものである。

検討の位置づけやアプローチ、濃淡には、分野や取り上げた事例毎に差異があるものの、各検討は下記いずれかの判断基準・目的によっている。

- ・地震動や液状化、津波により特徴的な被害を受けた構造形式がある場合は、構造形式単位で代表的な構造物を取り上げ、その被災原因を究明し、有効な対策方法を提案する。

・顕著な被害が見られなかった構造形式については、被災した類似構造物との比較や最新の設計手法との対比等により、鋼構造物の持つ特性や限界点の解明を試みる。いずれも未曾有の外力を受けた各構造物の実挙動を可能な限りトレースすることにより、鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板が本来有する特性を積極的に再評価し、今後の耐震・防災技術の向上につなげることを意図したものである。以下に各分野での検討内容と得られた成果を総括する。

#### (1) 道路・鉄道分野

無被災であった鋼管矢板基礎の代表例を取り上げ、近傍の強震記録から算出した修正設計震度を用いて代表的な3種のモデルにより構造計算を行い、健全度を検証した。各

モデルとも、鋼管矢板本体の変位、応力度、支持力はいずれも限界値に達しておらず無被災を裏付ける結果を得た。これらの結果をふまえ、今回の震災では代表例においては橋脚の固有周期との関係からレベル1地震動を若干超える震度を受けたが、総合的に健全であると結論づけた。

## (2) 建築分野

国内外2文献の設計法に基づき津波荷重を推定するとともに、これを用いて転倒した他杭種の建物について原因推定を行った。その結果、検討対象とした建物については脆弱な杭頭接合部が被災の起点となったと結論づけた一方で、杭本体の設計についても、鋼管杭を含め、津波を考慮する場合には見直しの余地があることを示唆した。

## (3) 港湾分野

過去に類を見ない被害が発生した構造形式の異なる3つの構造物を対象に被災原因の検討を行った。その結果、現行の設計基準では発生した現象を必ずしも説明しきれない部分もあるとの認識に至り、設計法の改善に向けた課題提起を行っている。

## (4) 鋼矢板分野

今回の震災で確認された河川堤防における鋼矢板による液状化対策の有効性、津波に対する二重鋼矢板仮締切り堤の有用性について、再現解析によりそのメカニズムの解明を試みた。その結果、河川堤防の液状化対策については、一般的に用いられている「ALID」により鋼矢板による対策効果を評価できる可能性を示した。二重鋼矢板仮締切り堤についても、津波波力の設定方法、鋼矢板のせん断抵抗に配慮することで津波に対する安定性の照査が可能になることを示した。

最後に、検討にご協力頂いた関係者の方々に重ねて御礼を申し上げます。

### [参考文献]

- 注1) Yahoo! JAPAN: 東日本大震災 写真保存プロジェクト
- 注2) TETSU (中山 哲): 多摩ウォッチ, 2011年5月6・津波被害・宮城県女川町
- 注3) tube\_log (木村博之): スタンスを変えたら何かが見えてくる。tubegraphics キムラの日常的浮遊。3.11 故郷・宮城県女川町を地震と大津波が襲った (東日本大震災)