

第3章 津波による被害

3.1 海岸保全施設

3.1.1 海岸堤防



小友地区の被害状況

陸前高田市の南西部につながる広田半島はもとも陸繋島で、海で隔てられた地域を埋め立てて陸続きとした。小友はまさにそのような地域で、その中央部を地元では「水合い」と称している。今回は南東側の大野湾からの津波と北西側の広田湾の両方から入った津波が陸地で合流して3キロ離れた湾同士がつながり、一時的に半島を分断した。津波によってほとんど家屋が倒壊・流失し、3kmにわたってガレキが続く。陸前高田市小友町三日市・小友浦周辺は、地盤沈下の被害も著しく、海水の引かない場所が多い。

(2011年4月、陸前高田市小友地区)

小友地区の海岸堤防の被害状況①



広田湾から侵入した高さ10mを越える津波によって、海岸堤防は中央部が完全に決壊して流失している。地震直後は堤防から陸地まで至るところがガレキで埋め尽くされており、航空写真でも堤防を確認することができないほどである。堤防周辺には隣接する地区から流れ着いたガレキも集積している。海岸堤防はアスファルト被覆の三面張り構造で、内部は山土(シルト混じり砂)を用いている。

(2011年4月、陸前高田市小友地区)

小友地区の海岸堤防の被害状況②



左右岸に残った海岸堤防の断面構造は、写真から明らかなように、緩勾配の法面を持つ盛土形式である。表面はアスファルトで被覆されているが、法先部が大きく侵食されている。長時間の津波越流と繰り返される引き波によって海側と陸側ともに侵食を受けたものと思われる。

(2011年4月、陸前高田市小友地区)

津波によってなぎ倒される林、集落



津波は海岸堤防（高さ7.15m）を完全に越流し、後背地の林をなぎ倒し、広範囲の農地を侵食している。津波は海岸から3～4kmまで遡上し、一部は東部道路の盛土で止まっている。揚排水機場や用排水路、付帯するゲートが大きな損傷を受けた。特に海岸に設けられた排水機場は機械施設とともに建屋まで完全に崩壊しているところも少なくなく、津波の波力の大きさが窺える。海岸域の地盤沈下は、最大1mに及んでいる。

（東日本大震災、サンデー毎日増刊、手塚耕一郎撮影）

（2011年3月11日、宮城県亶理山元海岸）

海岸堤防の被害と地盤侵食



大きく変状した消波ブロック、完全に破壊された堤防（もたれ式擁壁）、越流によって侵食した地盤（幅30m、深さ4mに及ぶ）。

津波の大きな波力と長時間の越流によって、堤防は完全に消失するまで破壊するとともに、その越流水によって背後の地盤は大きく、深く侵食している。

（2011年8月27日、宮城県亶理山元海岸）

再建された海岸堤防



海岸から仮設堤防、消波ブロック、再建された堤防と続いている。堤防の法面勾配は、表裏ともに2割として、割栗石と土を用いた盛土を構築し、その表面に国土交通省が提示するコンクリートブロック(2.0ton)を敷並べている。基礎地盤の液状化診断と堤体の耐震設計がなされている。後背地には旧堤体のコンクリート部材が散乱し、侵食した地盤や倒壊した林が残っている。

（2013年6月、宮城県亶理山元海岸）



津波による堤防の崩壊と後背地の侵食

海岸に設置されている消波ブロックも大きく変状し、一部は砂に埋もれ、一部は海岸堤防を乗り越えて後背地まで流されている。河川を遡上した津波は、河川堤防を乗り越えてさらに広範囲に被害をもたらしている。地盤沈下の影響も大きく、海水が侵入した後背地の湛水が続いている。

（2011年3月、宮城県亘理山元海岸）

粘り強い堤防の開発



津波の越流と地震に対して、高い安全性を有する堤防構造を開発し、その施工性能試験を宮城県亘理山元吉浜海岸で実施している。堤体はジオグリッドによる補強土構造として、レベル2地震に対しても十分な安全性を確保し、越流に対しては現場打ちコンクリート(厚さ0.5m)が侵食防止となる。急勾配の法面勾配の方が、施工性もよく堤体とコンクリートの密着性も十分確保されていることを確認している。津波と地震に強い、ハイブリッド機能を有する構造形式の堤防が、将来の大規模地震に備える技術として重要である。

(2012年10月、宮城県亘理山元海岸)

ハイブリッド堤体の実証試験



地震に強い盛土として、ジオグリッドを堤体に敷き込んだ「補強土工法」がある。この技術の原形は古く古墳時代まで遡るとされているが、最新の材料と技術で再構成された補強土工法は、兵庫県南部地震でも威力を発揮した実績がある。また、越流に強い堤防構造として「越流許容型ため池」がある。これらの相異なる機能を包含し、法面のコンクリートをグリッドと裏込材(栗石)に深く浸透固化するように工夫している。写真のように5分勾配の急傾斜法面でも十分な一体化が図られている。

(2012年10月、宮城県亘理山元海岸)

再建された海岸堤防の法面ブロック



緩勾配盛土として復旧された海岸堤防の表面には国土交通省が提示するコンクリートブロック(2.0ton)が敷並べられている。法面の碎石(0.5m厚さ)の上に平坦に敷並べられ、ブロック同士は裏面側で嵌合構造によって接続、表法面側ではブロック中央に穴を空けて割り栗石を詰め込んだ形式となっている。

(2013年6月、宮城県亘理山元海岸)

津波が通過した船越浦の浜地区①



山田町東側の船越半島は、北西側に山田湾（写真手前）、南側に船越湾、東側～南東側を太平洋に囲まれている。浦の浜（写真手前）から田ノ浜へ南北に延びる船越の低地帯では、船越湾を北上する押し波が低地帯を通り抜け、浦の浜付近で山田湾を南下する押し波と激突し、黒い波と青い波の高い水柱を上げた、との伝聞がある。

（2011年3月、岩手県山田町船越浦の浜）

津波が通過した船越浦の浜地区②



山田湾から南下した津波が海岸の防風林をなぎ倒し、海岸堤防を完全に破壊している。国道45号線沿いや段丘崖に設けられている住居は倒壊を免れているが、田の浜や浦の浜の海岸近くの集落は津波によって完全に倒壊・流失している。田の浜での津波の痕跡は、海面から16mとの記録も残されている。

（2011年3月、岩手県山田町船越浦の浜）

浦の浜の堤防の被害



山田湾に面する堤防（L型のコンクリート壁タイプ、杭基礎）が海側に倒れている。堤防の海側には、防風林が設けられているが堤防と同じように海側に倒れている木が多い。堤防の基礎は3～4mの杭となっているが、コンクリート壁体に接続したまま転倒しており、引き波や田の浜からの津波波力だけでなく、地盤の液状化の影響も懸念される。



（2011年4月、岩手県山田町船越浦の浜）

海岸堤防の被害



岩手県北部の野田湾に面した野田海岸は直線に近い海岸線である。

海岸堤防は、防潮林と野田海岸・野田農地海岸の2線堤で防護されている。陸閘は門扉が流出し、海岸沿いの防潮林は津波によりほとんど消失している。北側の野田農地海岸はT.P.+12.0mで施工中のため陸閘は未施工であった。このため、野田農地海岸の一部の低いところを津波が堤防を越流し、裏法が一部崩壊して背後の農地や宅地が浸水している。防潮林は新設区間(T.P.+12.0m)を除きほぼ全損している。

三陸鉄道北リアス線は陸中野田駅から南側の線路が流出した。

(2011年4月23日、岩手県陸中野田海岸)

海岸堤防の被害(十府ヶ浦の堤防)



南側の野田海岸はT.P.+7.8mである。後背地は集落などである。堤防の海側には防潮林があり、直径0.3mの松も根元から1m辺りで引きちぎられるように切り取られ、松林は陸地に向かって倒れている。その堤防背後には三陸鉄道北リアス線の盛土がある。

津波の高さは16.4mと記録されており、海岸に近い集落は倒壊・流失している。

野田海岸のこれまでの最大津波が東日本大震災津波の16.4m、既往第二位津波は明治三陸地震津波の14.0mであることから、堤防の復旧高さを14mと設定している。

(2011年4月23日、岩手県陸中野田海岸)

国道45号線の被災



白井海岸付近の国道45号線の海側には防潮林と海岸堤防がある。写真右には破損した堤防と倒壊している林が確認できる。道路盛土法面はコンクリートで被覆されており目立った損傷はないが、陸側の地盤は大きく侵食を受けている。

(2013年4月23日、岩手県陸中野田海岸)

後背地の被害



野田海岸の後背地の低位部、宇部川河口から約1.0kmまでのほぼ全域が浸水し、多数の家屋が流出（約50ha）している。写真の野田海岸の後背地は、海岸堤防がT.P.+7.8mの区間で、16.4mの津波を受けている。

（2011年4月28日、岩手県陸中野田海岸）

国道45号線と防潮林



防潮林はほとんど全てが、津波によってなぎ倒され、道路を閉塞するように集積している。

（2011年、岩手県陸中野田海岸）

野田海岸白井付近の三陸鉄道北リアス線の復興



白井海岸付近の三陸鉄道北リアス線が2012年に一部復旧されているが、海岸堤防の復旧はまだ進まず、写真右のように堤防の裏法面は侵食を受けたままである。農地の復旧も手つかずである。

（2013年、岩手県陸中野田海岸）

船越・田の浜地区の漁港被害



津波の遡上によって壊滅的な被害を受けた。山田町の復興計画では

- ・船越漁港は現位置で復旧する。
- ・船越公園周辺は観光レクリエーションゾーンとして位置づけ、鯨と海の科学館、海水浴場、キャンプ場などを再生するほか、津波伝承館等の整備を検討する。
- ・船越地区では、津波被害を受けた集落は国道45号沿いに移転する。
- ・田の浜地区では、津波被害を受けた集落は高台道路の整備と一体的に高台へ移転し、船越小学校もより安全な高台へ移転する。等の方針を打ち出している。

(2011年8月30日、岩手県山田町船越)

船越・田の浜地区の海岸堤防の被害①



コンクリート重力式の海岸堤防は押し波で陸側に転倒している。前方の船越漁協は倒壊を免れているものの全壊している。海岸堤防背後にある山田町立船越小学校は、標高13mに位置しているが、全壊している。生徒・職員は津波を確認して裏山に避難し全員無事であった。

(2011年8月30日、岩手県山田町船越)

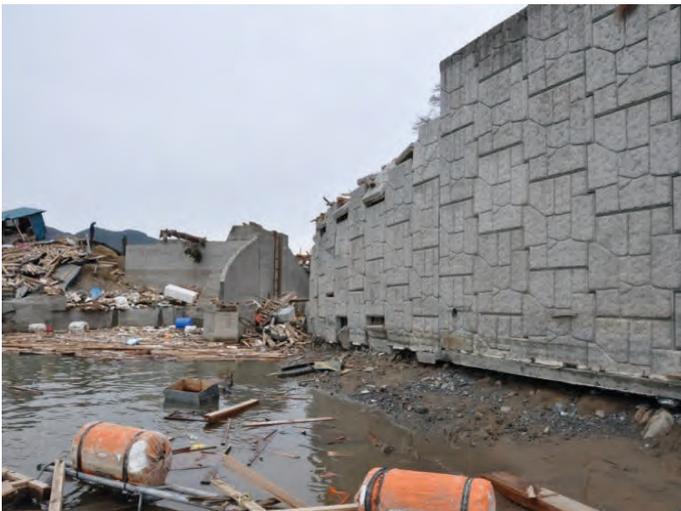
船越・田の浜地区の海岸堤防の被害②



田の浜の海岸堤防はコンクリート重力式でT.P.+8.35mの高さである。押し波によって躯体がバラバラになり陸側に転倒している。衝撃的な津波波力を受けてブロック間の目地が開き、継続する波力と越流によって転倒したと思われる。コンクリートブロック間には、せん断補強の考え方はなく、ダウエルバーなどの補強材は配置されていない。

(2011年8月30日、岩手県山田町船越)

補強盛土の被災状況(テールアルメ工法)①



小友の海岸堤防は左岸の外洋側に道路盛土として利用されている補強土壁(テールアルメ工法)と接続している。テールアルメ工法は壁体表面にコンクリートパネルを配置して、これを4本の金属製ストラップで盛土に定着する構造である。壁体の下端部の地盤が侵食されて、広い範囲に隙間が生じている。壁体は前面に押し出されているように変形しているが、上部の道路は通行可能であった。

(2011年4月、陸前高田市小友地区)

補強盛土の被災状況(テールアルメ工法)②



小友の海岸堤防と道路が交差する堤防左岸バット部の補強盛土(テールアルメ工法)は、コンクリートパネルが完全に抜け落ちている。パネル背面の盛土材が侵食を受けて流失したことが原因と思われる。

(2011年4月、陸前高田市小友地区)

復旧途中の小友の海岸堤防



小友地区は元々地盤標高が低いことに加えて、大きく地盤沈下しているため、2013年の夏でも、至る所で湛水状態で満潮時には海水の侵入が続いている。

外洋を締め切る海岸堤防は、仮設のものができあがっているが、被災前の堤防位置から100mほど陸地に移動した位置に建設されている。

(2011年10月12日、陸前高田市小友地区)

海岸堤防の被害



宮城県亶理町に設置された海岸堤防(T.P.+6.2 m)の被害状況である。海岸堤防は、津波の越流によって背面の押さえ盛土が流亡し、表法コンクリートの支えが失われている。堤防が全流失したり、部分的に残った部分もあった。堤防は以後にはコンクリート片が散乱している。

(2011年3月18日、宮城県亶理郡亶理町)

海岸堤防後背地の被害①



宮城県亶理町に設置された海岸堤防(T.P.+6.2 m)の被害状況である。堤防背後は砂地盤であったため、堤防を越流した津波によって背後地盤が大きくなぐられ、落堀という洗堀跡が形成されている。

(2011年3月18日、宮城県亶理郡亶理町)

堤防直下にみられる落堀

海岸堤防後背地の被害②



宮城県亶理町に設置された海岸堤防(T.P.+6.2 m)の被害状況である。後ろ浜には、堤防前浜に設置された消波ブロックや破堤した海岸堤防のコンクリート片が散乱している。

(2011年3月18日、宮城県亶理郡亶理町)

破損した堤防の残骸

越波津波による道路橋の破断



岩手県普代水門(T.P.+15.0m)では、大きな越流が発生した痕跡が確認されているが、水門自体に大きな損傷は生じず、後背地への被害が大幅に軽減された。なお、写真中の管理用道路橋に越波した津波が衝突し、破断している様子が見て取れる。このことから、落下波圧によって大きな衝突力が作用していたことがわかる。

(2011年8月25日、岩手県普代水門)

越流津波によって破堤した海岸堤防



海岸堤防を越流した津波によって背後地盤が洗掘し、それによって堤防が不安定化した。その結果、大部分が破堤に至った。写真は、陸側から堤防背面を撮影した様子である。洗掘によって生じた落堀と呼ばれる溝が形成されていることが見て取れる。落堀は長い所で幅20m以上、深さ4m程度に及ぶ。

(2011年4月6日、宮城県亘理海岸)

裏法コンクリートが流出した海岸堤防



表法や裏法尻の基礎工には変状が見られないが、堤防天端および裏法コンクリートのみが流出していることが確認された。このことから津波越流時に作用する揚力等の働きによって盛土材の吸い出しや裏法コンクリートが引き剥がされた可能性があることがわかる。今後の対策として、被覆コンクリートが引き剥がれにくい対策などの新しい工夫を導入する必要性が見出される。

(2011年4月27日、岩手県宮古湾)

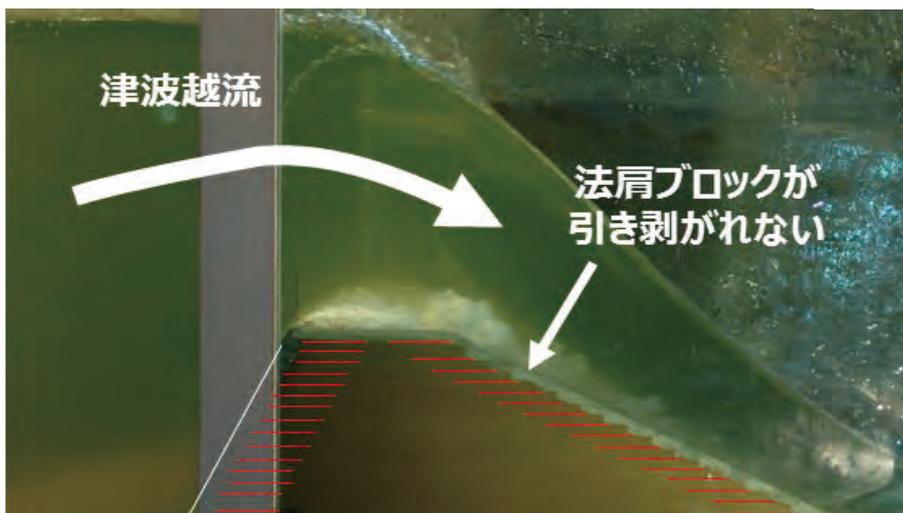
被災メカニズムの検証実験



東日本大震災で破堤した海岸堤防の原因解明のため、大規模水路模型を用いた水理実験を実施した。従来の三面張りコンクリート式堤防は、越流した際に生じる揚力によって被覆コンクリートが引き剥がされることが分かる。

(2011年12月、農村工学研究所大型風洞実験棟内)

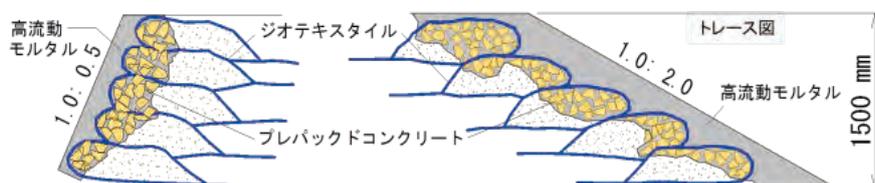
三面一体化堤防の検証実験



新しく開発した三面一体化堤防の水理実験の様子を示している。被覆ブロックをジオテキスタイルによって盛土に固定し、さらに鉄筋コンクリートでブロック同士を連結した。本実験により、耐津波性を大幅に向上できることが分かる。

(2013年5月、農村工学研究所大型風洞実験棟内)

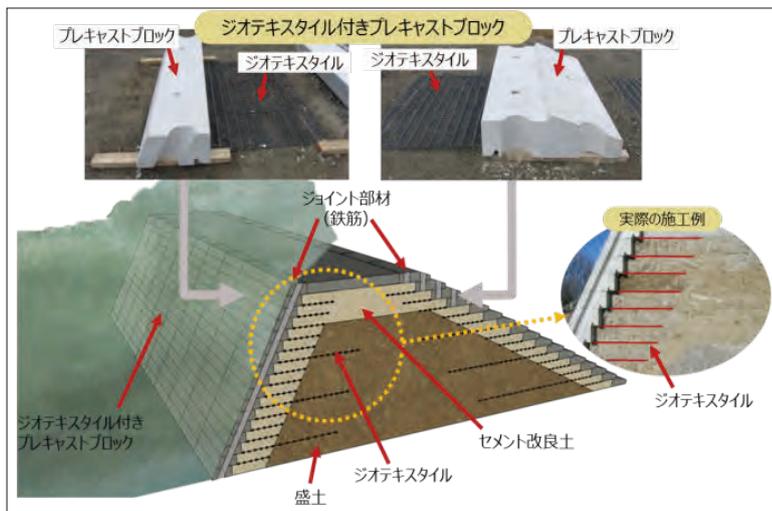
津波・地震に粘り強い三面一体化堤防



ジオテキスタイルで補強した法面に現場打ちコンクリートを付着させた三面一体化堤防の施工確認試験の結果を示している。断面図からコンクリートと盛土が一体化している様子が確認できる。(株)竹中土木と共同で実施した。

(2014年1月14日、亘理町の堤防復旧工区内)

津波・地震に粘り強い三面一体化堤防の構造



ジオテキスタイルが連結したプレキャストコンクリートブロックを用いた三面一体化堤防の断面構造。表法・天端・裏法の三面を一体化させることで高い耐震性と耐津波性が期待できる。

(2014年6月5日、プレスリリース)

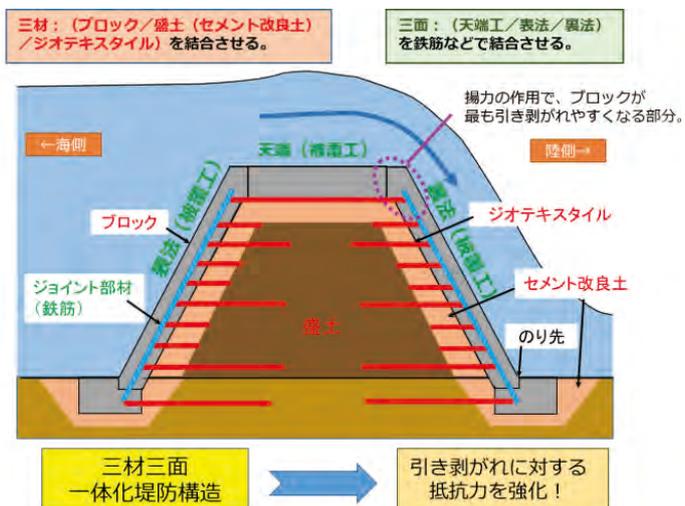
津波・地震に粘り強い三面一体化堤防の施工例



ジオテキスタイルが連結したプレキャストコンクリートブロックを用いた三面一体化堤防の施工例。(株)竹中土木と共同で新工法の性能を実証し、施工性を大幅に改善することに成功した。

(2014年1月14日、農村工学研究所内)

津波・地震に粘り強い三面一体化堤防の開発



従来堤防の構造的課題であった①継続的に作用する波力による被覆ブロックの押し出し、②越流津波時に発生する揚力に対する引き剥がれ、③背後地盤の洗掘に伴う堤防の不安定化による破堤を回避するため、表法・天端・裏法の三面を一体化させた堤防構造を開発した。

(2014年6月5日、プレスリリース)

3. 1. 2 用排水機場

被災状況調査



名取土地改良区において、農業水利施設の被害実態に関する聞き取り調査を実施した。震災直後の問題として、地盤沈下と津波により地区内にたまった水が、排水機場の損傷により排除できないことが緊急の課題であった。

(2011年3月18日、宮城県名取市)

排水機場の被害①



藤曾根排水機場の直上流の排水路には、ガレキが散乱している。

(2011年3月18日、宮城県岩沼市)

排水機場の被害②



相の釜排水機場では、津波により損傷を受けた。地区内の排水のため、仮設ポンプによる懸命な排水作業が継続されていた。

(2011年3月18日、宮城県岩沼市)

排水機場の復旧



寺野排水機場では、建屋は倒壊を免れたが、ポンプ設備が損傷を受けた。地区内の排水を行うため、ポンプ設備の懸命な復旧作業が行われていた。

(2011年3月18日、宮城県名取市)

排水機場



新牛橋排水機場は、完成直後に被災した。建屋の倒壊は免れたが、ポンプ設備が損傷をうけた。

(2011年3月18日、宮城県山元町)

排水路の被害③



津波により遡上した水が排水路から流出する際、ガレキが集まり、水路を閉塞させてしまっていた。このため、地区内の排水がうまく機能しなくなっている。

(2011年3月18日、宮城県山元町)

揚水機場の送水管の被害



西代第二揚水機場の送水管が土台からはずれている。

(2011年5月18日、茨城県稲敷市西代)

地震により管が土台からはずれ、ずれている。

排水路の不陸



液状化により、排水路の浮上・沈下による不陸が発生している。水路脇には水路内から排出したと思われる砂が確認できる。

(2011年5月18日、茨城県稲敷市西代)

排水路への土砂流入



液状化により水田から発生した砂が、排水路に流入し、水路をせき止めた。

(2011年5月18日、千葉県神崎町)

3. 1. 3 頭首工・堰



固定堰の折損

松館堰は、堰長162 m、堰幅5 mの固定堰。地震時に堰堤中央部に亀裂が生じ、その後破損し沈下した。地震前の洗掘による河床低下により、堰堤直下において空洞が生じ、堰堤の支持に支障をきたしていたところへ、地震動が作用することにより破損したと推測される。

気象庁震度観測値 震度4(平川市)

(2011年9月9日、青森県平川市)

外壁パネルの脱落



板倉頭首工は、堰長43 m、土砂吐1門、洪水吐1門の可動堰。堰柱、門柱、ゲート、戸当たりには大きな変状は認められなかったが、操作室の外壁パネル(軽量気泡コンクリート製)が脱落している。

推計震度6強

(2011年7月5日、宮城県栗原市)

管理橋の段差①



桑折江頭首工は、堰長 87 m、洪水吐 2 門の可動堰。堰柱、門柱、ゲート、戸当り、操作室に変状は認められなかったが、管理橋と堤防との接続部において、堤防の沈下による段差が生じている。

推計震度6弱

(2011年7月6日、宮城県大崎市)

管理橋の段差②



鳴瀬川下流頭首工は、堰長 120 m、洪水吐 3 門の可動堰。堰柱、門柱、ゲート、戸当り、操作室に変状は認められなかったが、管理橋と堤防との接合部において、堤防の沈下による段差が約 20 cm 生じていた。また、管理橋のコンクリートの剥落、管理橋付近の堤防法面の階段の折損が見られる。

推計震度6弱

(2011年7月6日、宮城県遠田郡美里町)

擁壁の変位



幕柳堰は、堰長 12 m、角落としと洪水吐 1 門の可動堰。護岸擁壁が水路内に押し出され、継目に段差と隙間が生じていた。堰上下流の土の護岸法面には滑りの発生も見られる。

推計震度5強

(2011年7月6日、宮城県黒川郡大和町)

ゴム袋体端部の損傷



矢野目堰は、堰長 17m、洪水吐としてゴムゲート 1 門の可動堰。河口から4.3 km上流に位置する。津波の遡上による外力を受け、抑え治具で固定されたゴム袋体の端部が破れ、ゴム袋体への空気充填が不可能となり、堰の機能を消失している。

推計震度6弱

(2011年7月7日、宮城県岩沼市)

2012年3月30日には補修済であった

柱を周回するひび割れ



稲荷山堰は、堰長129 mの固定堰。左岸河川敷に設置されている操作室を支える鉄筋コンクリート製脚柱の地表から約0.6m付近に柱を周回するひび割れと一部コンクリートの剥落が生じていた。地震動による曲げひび割れと推測される。

推計震度6弱

(2011年7月7日、宮城県柴田郡柴田町)

この位置にひび割れが発生。

固定堰エプロンの破損



明神堰は、堰長70 mの固定堰。コンクリートエプロンの下流部が折損していた。地震前の洗掘による河床低下により、エプロン下部に空洞が生じ、支持力を失っていたところへ地震動が作用して破損したと推測される。

(2012年3月29日、宮城県仙台市)

堰の復旧工事



中妻堰は、堰長29 m、鋼製起伏ゲート2門の可動堰。津波で被災した鋼製起伏堰の復旧工事が実施されていた。堰は、河口から約2 km上流に位置し、津波の遡上による外力を受け被災した。扉体の軸承部の破断、扉体の曲版部のボルト破断、扉体の下端水密部の破断など破損箇所は多岐にわたり報告されている。

(2012年3月12日、福島県いわき市)

堰の復旧工事



下宿堰は、堰長49 m、鋼製起伏ゲート2門の可動堰。堰上下流の左右岸において、地震動により崩壊した護岸の復旧工事が実施されている。

(2012年3月13日、福島県泉崎村)

護岸ブロックの破損



下窯堰は、堰長5 mの固定堰。取水口周辺の護岸ブロックが破損している。

(2011年10月25日、福島県国見町)

護岸の崩壊①



月山新堰は、堰長24 mの鋼製起伏ゲート1門の可動堰。右岸側の堰上下流の護岸が崩れ、取水口両側のコンクリート壁も傾倒し破損した。このため、鋼製ゲートの起立に支障をきたし、取水機能を消失している。

(2012年3月13日、福島県白河市)

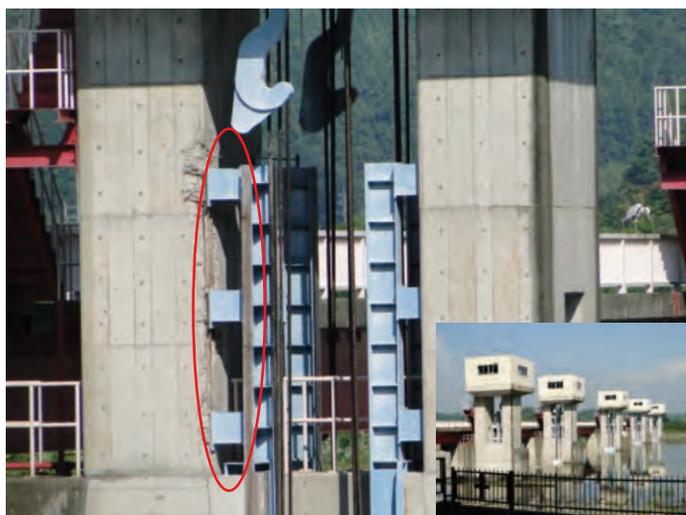
護岸の崩壊②



羽太大堰は、堰長15mの固定堰。堰上下流の右岸側において約27m、左岸側において約36 mの護岸が崩壊している。

(2012年3月14日、福島県西郷村)

門柱コンクリートの剥落



辰ノ口堰は、堰長234m、鋼製ローラーゲートの洪水吐3門と土砂吐1門の可動堰。戸当りと門柱の接続部において、地震動によるコンクリートの剥落が生じていた。また、戸当り自体の接続部におけるずれも報告されている。

(2011年7月1日、茨城県常陸大宮市)