

4. 相馬港の被害

相馬港の全体図を図-4.1 に示す。同図に示すように、南から順に1号埠頭、2号埠頭、3号埠頭、4号埠頭、5号埠頭がある。同図において白文字はバース名である。また、黒文字は施設番号であり、「C」で始まるものは岸壁、「B」で始まるものは護岸である（以下の記述では施設番号を用いる）。また、岸壁・護岸については構造形式毎に異なる色で着色がなされている。1号埠頭、2号埠頭は矢板式岸壁が多く、3号埠頭、5号埠頭はケーソン式岸壁が多いことがわかる。4号埠頭から5号埠頭の南側にかけは民間バースが立地している。これらについては本資料の対象外である。岸壁・護岸の一覧を表-4.1 に示す。表には、2021年2月と2022年3月の地震に先立って発生した2011年東北地方太平洋沖地震後の新設等の対応についても記載している。以下の各節では、南から北に向かって、各施設の被害状況を説明する。以下に述べるように、特に2022年3月の地震では、岸壁では水平変位や傾斜、空洞化、ふ頭用地では沈下、クラック及び液状化が発生した。護岸では吸い出しが発生している箇所もあった。

なお、以下の各節では、各施設の天端残留水平変位の測量結果が示されているが、測量方法は耐震強化岸壁(C-1-13)を除き共通であり、2021年2月の地震後と2022年3月の地震後に各々の地点において絶対座標を計測し、その差をとった上で、法線直交成分を求めている。2021年2月の地震後の測量はGNSS基準点測量(スタティック観測)、2022年3月の地震後の測量はネットワーク型RTK-GNSS測量(VRS方式)となっている。この間に発生した大地震は2022年3月の地震だけであるため、2022年3月の地震による変位を計測したものと解釈できる。なお、地震時の係留施設の天端残留水平変位には一般には地殻変動による変位と施設自体の被災に伴う変位の両者が含まれており、地震前後の絶対座標の差をとるだけでは施設の被災に伴う変位を明らかにすることができず、地殻変動による変位を差し引く必要がある。例えば2016年熊本地震による熊本港の岸壁の天端残留水平変位は地殻変動による変位を差し引くことで算定されている¹⁹⁾。しかしながら、2022年3月の地震は、深部で生じたことなどから、地殻変動による変位は相馬港周辺では1cm程度であり²⁰⁾、地殻変動による変位を差し引く必要性は結果的には小さいと言える。

4.1 第1船だまり

(1) 物揚場(C-6-1)(-3.0m)

物揚場(C-6-1)の平面図を図-4.2に、縦断面図を図-4.3

に示す。本施設の大部分はL型ブロック式であり、両端のごく一部が方塊ブロック式である。図-4.3の縦断面図において、縦長の長方形で表される37個のブロックがL型ブロックであり、両端の9個のブロックが方塊ブロックである。本施設は1979～1980年度に整備された。設計震度は0.10である。2011年東北地方太平洋沖地震後の対応としては、L型ブロックは原位置において新設、方塊ブロックは原位置において新設(一部再設置)されている。図-4.4にL型ブロック区間の標準断面図を示す。

2021年2月の地震による物揚場の水平変位は調べられていないが、物揚場背後で最大21cm程度の沈下が生じ、コンクリート舗装の打換えが行われている。

図-4.5に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。L型ブロックが海側に移動するとともに海側に傾斜している。この変形には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.6に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。同図に示すように、施設中央よりもやや北側で最大1.793mの天端残留水平変位が生じている。両端部では天端残留水平変位は小さめとなっている。図-4.7に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。高さ0.4～3.0mの範囲で壁の位置が水平方向に0.18m異なることから、堤体の傾斜角は4.0°程度であると考えられる。この傾斜角には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。

(2) 物揚場(C-6-2)(-3.0m)

物揚場(C-6-2)の平面図を図-4.8に示す。本施設は、隅角部より南側が自立矢板式であり、隅角部より北側が控え版式矢板式である。図-4.9に控え版式矢板式の区間の標準断面図を示す。本施設は1968～1969年度に整備された。設計震度は0.10である。本施設では2011年東北地方太平洋沖地震と2021年2月の地震のいずれにおいても物揚場本体の復旧を必要とするほどの被害は生じていない。

図-4.10に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。矢板壁が海側に傾斜している。この変形には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.11に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。自立矢板式の区間では最大0.248m、控え版式矢板式の区間では最大0.371mの天端残留水平変位が生じている。隅角部では天端残留水平変位の値は0.015mと小さくなっている。これは、凹型の隅角部であるため変位が制限されるためと考

えられる。図-4.12に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。高さ0.4～2.9mの範囲で壁の位置が水平方向に0.09m異なることから、矢板壁の傾斜角は 2.1° 程度であると考えられる。この傾斜角には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.13に当該施設付近での土質調査結果を示す。N値20程度の砂が主体で、GL-14m付近で土丹層となっている。

4.2 1号埠頭

(1) 岸壁 (C-1-1) (-5.5m)

岸壁 (C-1-1) の平面図を図-4.14に示す。本施設は、隅角部より南側が控え版式矢板式であり、隅角部より北側が控え直杭式矢板式である。本施設は1969～1973年度に整備された。設計震度は0.13である。2011年東北地方太平洋沖地震後の対応としては前出し新設が行われている（控え杭も新設、控え版はそのまま）。図-4.15に控え直杭式矢板式の区間の標準断面図を示す。2011年東北地方太平洋沖地震以前の矢板壁が残置されていることがわかる。本施設では、2021年2月の地震では、復旧を要するような被害は生じていない。

図-4.16に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。矢板壁が海側に移動している。この変形には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.17に天端残留水平変位の測量結果を示す（この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる）。最大0.282mの天端残留水平変位が生じている。図-4.18に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。高さ0.4～5.0mの範囲で壁の位置が水平方向に0.05m異なることから、矢板壁の傾斜角は 0.6° 程度であると考えられる。この傾斜角には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。

(2) 岸壁 (C-1-2) (-5.5m)

岸壁 (C-1-2) の平面図を図-4.19に示す。本施設は控え直杭式矢板式である。本施設は1969～1973年度に整備された。設計震度は0.13である。2011年東北地方太平洋沖地震後の対応としては前出し新設が行われている（控え杭も新設）。図-4.20に標準断面図を示す。2011年東北地方太平洋沖地震以前の矢板壁が残置されていることがわかる。

図-4.21に2021年2月の地震後の岸壁背後の変状を示す。2021年2月の地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、概ね控え工の位置（岸壁法線から19m）に岸壁法線と平行に最大で幅4cmのクラックが生じているこ

とから、岸壁本体にも軽微な水平変位が生じていたと考えられる。

図-4.22に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。矢板壁が海側に傾斜している。この変形には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.17に天端残留水平変位の測量結果を示す（この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる）。天端残留水平変位は北に向かうほど大きくなり、最大0.537mの天端残留水平変位が生じている。図-4.23に2022年3月の地震後の岸壁背後の変状を示す。概ね控え工の位置（岸壁法線から19m）に岸壁法線と平行に最大で幅21cmのクラックが生じている。また、隣接するC-1-3に向かい、クラックの位置がより背後に移行する様子が見て取れるが、これは、C-1-2よりもC-1-3の方が控え工がより背後に存在するためと考えられる。隣接するC-1-3では岸壁法線から22mの位置に控え工がある。写真-4.1～写真-4.3に控え工付近のクラックを示す。図-4.24および図-4.25に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。図-4.24では高さ1.0～7.0mの範囲で壁の位置が水平方向に0.19m異なることから、矢板壁の傾斜角は 1.8° 程度であると考えられる。図-4.25では高さ0.4～7.5mの範囲で壁の位置が水平方向に0.26m異なることから、矢板壁の傾斜角は 2.1° 程度であると考えられる。これらの傾斜角には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。

(3) 岸壁 (C-1-3) (-7.5m)

岸壁 (C-1-3) の平面図を図-4.26に示す。本施設は控え直杭式矢板式である。本施設は1973～1974年度に整備された。設計震度は0.13である。2011年東北地方太平洋沖地震後の対応としては前出し新設が行われている（控え杭も新設）。図-4.27に標準断面図を示す。2011年東北地方太平洋沖地震以前の矢板壁が残置されていることがわかる。本施設では、2021年2月の地震では、復旧を要するような被害は生じていない。

図-4.28に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。矢板壁が海側に傾斜している。この変形には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.29に天端残留水平変位の測量結果を示す（この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる）。最大0.573mの天端残留水平変位が生じている。図-4.30に2022年3月の地震後の岸壁背後の変状を示す。概ね控え工の位置（岸壁法線から22m）に岸壁法線と平行に最大で幅32cmのクラックが生じている。図-4.31に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。断面

①では高さ 0.4～7.8m の範囲で壁の位置が水平方向に 0.24m 異なることから、矢板壁の傾斜角は 1.9° 程度であると考えられる。断面②では高さ 0.4～8.7m の範囲で壁の位置が水平方向に 0.26m 異なることから、矢板壁の傾斜角は 1.8° 程度であると考えられる。これらの傾斜角には 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。

なお、岸壁 (C-1-3) では、2022 年 3 月の地震後に、控え工試掘調査およびタイロッド試掘調査が行われている (図-4.32)。控え工試掘調査は測点番号 No.7 で行われた。タイロッド試掘調査は測点番号 No.7 から C-1-4 方向に 27.5m 移動した地点で行われた。このうち控え工試掘調査では、岸壁法線と控え工中心との距離が、設計値 22.5000m に対し実測値 22.470m となっており、タイロッドの伸びは認められず、控え工が海側に移動した分だけ矢板壁が海側に移動していることが明らかにされた。また、幅 1.2m の控え工の両端で高さの差が 0.095m となっており、控え工の回転角が 4.5° であることが明らかにされた。

(4) 岸壁 (C-1-4) (-7.5m)

岸壁 (C-1-4) の平面図を図-4.33 に示す。本施設は控え組杭式矢板式であり、背後にはグラベルドレーンが施工されている。図-4.34 に標準断面図を示す。本施設は 1980～1982 年度に整備された。設計震度は 0.16 である。本施設の一部は 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に津波の引き波による大きな被害を受けた (写真-4.4)。被害を受けた箇所は図-4.33 の測点番号で No.6+5.75～No.8+9.45 の範囲であり (測点番号は現在のものと異なる)、この区間は 2011 年東北地方太平洋沖地震後に原位置にて矢板を新設するとともにタイ材を設置している。また、隅角部を回った北側の取付部でも矢板を新設するとともにタイ材を設置している。その他の区間については、上部工の打換えやエプロンの打換えは行われているものの、矢板や控えの新設は行われていない。従って、2011 年東北地方太平洋沖地震後に前出し新設が行われた C-1-3 との間で法線にずれが生じることになったため、C-1-4 の南端部では上部工の拡幅が行われている。2011 年東北地方太平洋沖地震後の区間毎の対応について詳しくは表-4.1 に記載している。

図-4.35 に 2021 年 2 月の地震後の岸壁背後の変状を示す。2021 年 2 月の地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、概ね控え工の位置 (岸壁法線から 12m) に岸壁法線と平行に最大で幅 4cm のクラックが生じていることから、岸壁本体にも軽微な水平変位が生じていたと考えられる。

図-4.36 に 2022 年 3 月の地震後の被災変形図を示す。

矢板壁が海側に傾斜している。この変形には 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.37 に天端残留水平変位の測量結果を示す (この測量結果は先に述べたように 2022 年 3 月の地震による変位を示すと考えられる)。最大 0.460m の天端残留水平変位が生じている。図-4.38 に 2022 年 3 月の地震後の岸壁背後の変状を示す。概ね控え工の位置 (岸壁法線から 12m) に岸壁法線と平行に最大で幅 10cm のクラックが生じている。写真-4.5 に控え工の位置に生じたクラックを示す。その他、C-1-4 の被害の特徴として、矢板壁の直背後に法線方向にクラックが生じていることが挙げられる (写真-4.6～写真-4.7)。これは、控えが組み杭であり海側に移動しにくいいため、矢板壁と控え工の距離が拡大したとも考えられるが、C-1-4 では控え工試掘調査は行われていないため、タイロッドへの影響は不明である。図-4.39～図-4.41 に 2022 年 3 月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。断面①では高さ 1.0～5.0m の範囲で壁の位置が水平方向に 0.15m 異なることから、矢板壁の傾斜角は 2.1° 程度であると考えられる。断面②では高さ 0.4～4.0m の範囲で壁の位置が水平方向に 0.14m 異なることから、矢板壁の傾斜角は 2.2° 程度であると考えられる。断面③では高さ 0.4～6.0m の範囲で壁の位置が水平方向に 0.18m 異なることから、矢板壁の傾斜角は 1.8° 程度であると考えられる。ただし、いずれの断面でも上部では矢板壁の傾斜角が小さくなる特徴がある。これは、控えが組み杭であり海側に移動しにくいためである可能性がある。なお、これらの傾斜角には 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.42 に当該施設付近での土質調査結果を示す。浅部から埋土、砂、シルトが堆積しており、GL-18m 付近で軟岩となっている。

(5) 岸壁 (C-1-5) (-5.5m)

岸壁 (C-1-5) の平面図を図-4.43 に示す。本施設は直立消波ブロック式である。本施設は 1979～1981 年度に整備された。設計震度は 0.10 である。2011 年東北地方太平洋沖地震後の対応としては、原位置において撤去再設置されている。図-4.44 に標準断面図を示す。

2021 年 2 月の地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、岸壁背後で最大 29cm 程度の段差が生じ、コンクリート舗装の打換えが行われている。写真-4.8～写真-4.9 に 2021 年 2 月の地震による岸壁背後の段差の発生状況を示す。

図-4.45 に 2022 年 3 月の地震後の被災変形図を示す。直立消波ブロックが海側に移動している。この変形には

2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.46に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。同図に示すように最大0.839mの天端残留水平変位が生じている。写真-4.8～写真-4.9と同じ場所での2022年3月の地震による岸壁背後の段差の発生状況を写真-4.10に示す(同じ船が接岸している)。2022年3月の地震による段差の方が大きく、段差は最大50cmであった。なお、2022年3月の地震後に行われた潜水調査ではブロック間にずれはないことが確認されている。

(6) 岸壁 (C-1-6) (-5.5m)

岸壁(C-1-6)の平面図を図-4.47に示す。本施設は直立消波ブロック式である。本施設は1979～1981年度に整備された。設計震度は0.10である。2011年東北地方太平洋沖地震後の対応としては、原位置において撤去再設置されている。図-4.48に標準断面図を示す。

2021年2月の地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、岸壁背後で最大22cm程度の段差が生じ、コンクリート舗装の打換えが行われている。

図-4.49に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。直立消波ブロックが海側に移動するとともに海側に傾斜している。この変形には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.50に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。同図に示すように最大1.051mの天端残留水平変位が生じている。2022年3月の地震による岸壁背後の段差の発生状況を写真-4.11に示す。2022年3月の地震による段差の方が大きく、段差は最大59cmであった。なお、2022年3月の地震後に行われた潜水調査ではブロック間にずれはないことが確認されている。

4.3 2号埠頭

(1) 岸壁 (C-1-7) (-5.5m)

岸壁(C-1-7)の平面図を図-4.51に示す。本施設は直立消波ブロック式である。本施設は1978年度に整備された。設計震度は0.10である。2011年東北地方太平洋沖地震後の対応としては、原位置において撤去再設置されている。図-4.52に標準断面図を示す。

2021年2月の地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、岸壁背後で最大25cm程度の段差が生じ、コンクリート舗装の打換えが行われている。写真-4.12に2021年2月の地震による岸壁背後の段差の発生状況を示す。

図-4.53に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。

直立消波ブロックが海側に移動するとともに海側に傾斜している。この変形には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.54に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。同図に示すように最大1.270mの天端残留水平変位が生じている。2022年3月の地震による岸壁背後の段差の発生状況を写真-4.13に示す。2022年3月の地震による段差の方が大きく、段差は最大99cmであった。

(2) 岸壁 (C-1-9) (-7.5m)

岸壁(C-1-9)の平面図を図-4.55に示す。本施設は控え直杭式矢板式であり、背後にはグラベルドレーンが施工されている。本施設は1977～1979年度に整備された。設計震度は0.10である。本施設の一部は2011年東北地方太平洋沖地震の際に津波の引き波による大きな被害を受けた(写真-4.14～写真-4.15)。2011年東北地方太平洋沖地震後の対応としては、全区間にわたり前出し新設が行われている(控え杭も新設)。図-4.56に標準断面図を示す。2011年東北地方太平洋沖地震以前の矢板壁が残置されていることがわかる。

図-4.57に2021年2月の地震後の岸壁背後の変状を示す。1号埠頭の矢板式岸壁と異なり、控え工の位置(岸壁法線から24.5m)に岸壁法線と平行にクラックが生じるような傾向は見られない。岸壁背後の変状は岸壁法線から18m程度の範囲(赤に着色された部分)に集中している。写真-4.16に岸壁背後の沈下の状況を示す。

図-4.58に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。矢板壁が海側に移動している。この変形には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.59に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。最大0.532mの天端残留水平変位が生じている。図-4.60に2022年3月の地震後の岸壁背後の変状を示す。2021年2月の地震と異なり、岸壁背後に岸壁法線と平行に最大で幅13cmのクラックが生じているが、その位置は控え工の位置(岸壁法線から24.5m)よりもさらに10mほど背後となっている。写真-4.17には写真-4.16(2021年2月の地震後)と比較する形で岸壁背後の沈下の状況を示す。図-4.61に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。1号埠頭の矢板式岸壁と異なり、下部は海側に傾斜、上部は陸側に傾斜している。高さ0.4～4.0mの範囲で壁の位置が水平方向に0.30m異なることから、矢板壁下部の傾斜角は4.8°程度であると考えられる。この傾斜角には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性が

ある。図-4.62 に当該施設付近の推定地質縦断面図を示す。場所による違いもあるが、浅部から埋土、砂、粘性土が堆積しており、DL-18m～DL-32m 付近で軟岩となっている。

(3) 先端護岸 (B-5-2)

先端護岸 (B-5-2) の平面図を図-4.63 に示す。本施設は直立消波ブロック式である。本施設は1978年度に整備された。設計震度は0.10である。2011年東北地方太平洋沖地震後の対応としては、原位置において撤去再設置されている。図-4.64 に標準断面図を示す。本施設では、2021年2月の地震では、復旧を要するような被害は生じていない。

図-4.65 に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。直立消波ブロックが海側に移動している。この変形には2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.66 に天端残留水平変位の測量結果を示す（この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる）。同図に示すように最大0.706mの天端残留水平変位が生じている。2022年3月の地震後に行われた潜水調査では、上から1段目と2段目の間に3cmのずれ、上から2段目と3段目の間に4cmのずれが確認されている。

(4) 岸壁 (C-1-10) (-12.0m)

岸壁 (C-1-10) の平面図を図-4.67 に示す。本施設は控え組杭式鋼管矢板式である。図-4.68 に標準断面図を示す。本施設は1990～1993年度に整備された。2011年東北地方太平洋沖地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、図-4.67 に示すように概ね控え工の位置（岸壁法線から14m）に岸壁法線と平行にクラックが生じていることから、岸壁本体にもある程度の水平変位が生じていたと考えられる。

図-4.69 に2021年2月の地震後の岸壁背後の変状を示す。2021年2月の地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、概ね控え工の位置（岸壁法線から14m）に岸壁法線と平行に最大で幅1cmのクラックが生じていることから、岸壁本体にも軽微な水平変位が生じていたと考えられる。詳しく見るとクラックの位置は控え工の直上よりやや海側となっており（海側から3枚目のコンクリート版の中央、図-4.70、写真-4.18）、単純に控え工を残してその両側が沈下したのではないように見える。

図-4.71 に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。鋼管矢板が海側に傾斜している。この変形には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.72 に天端残留水平変位の測量

結果を示す（この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる）。最大0.243mの天端残留水平変位が生じている。図-4.73 に2022年3月の地震後の岸壁背後の変状を示す。概ね控え工の位置（岸壁法線から14m）に岸壁法線と平行に最大で幅4cmのクラックが生じている。ただし、2021年2月の地震と同様、詳しく見るとクラックの位置は控え工の直上よりやや海側となっており（海側から3枚目のコンクリート版の中央、写真-4.19）、単純に控え工を残してその両側が沈下したのではないように見える。図-4.74～図-4.75 に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。断面①では高さ0.4～8.4mの範囲で壁の位置が水平方向に0.17m異なることから、鋼管矢板の傾斜角は1.2°程度であると考えられる。断面②では高さ0.4～8.7mの範囲で壁の位置が水平方向に0.13m異なることから、鋼管矢板の傾斜角は0.9°程度であると考えられる。これらの傾斜角には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。

4.4 第2船だまり

(1) 護岸 (C-6-5)

護岸 (C-6-5) の平面図を図-4.76 に示す。本施設は自立鋼管矢板式である。図-4.77 に標準断面図を示す。本施設は1986～1991年度に整備された。設計震度は0.10である。本施設では2011年東北地方太平洋沖地震と2021年2月の地震のいずれにおいても護岸本体の復旧を必要とするほどの被害は生じていない（水平変位は調べられていない）。

図-4.78 に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。鋼管矢板が海側に移動している。この変形には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.79 に天端残留水平変位の測量結果を示す（この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる）。最大0.105mの天端残留水平変位が生じている。図-4.80 に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。高さ1.0～2.7mの範囲で壁の位置が水平方向に0.02m異なることから、鋼管矢板の傾斜角は0.7°程度であると考えられる。この傾斜角には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。

(2) 物揚場 (C-6-4) (-4.0m)

物揚場 (C-6-4) の平面図を図-4.81 に示す。本施設はケーソン式である。図-4.82 に標準断面図を示す。本施設は1986～1991年度に整備された。設計震度は0.10である。

本施設では2011年東北地方太平洋沖地震と2021年2月の地震のいずれにおいても物揚場本体の復旧を必要とするほどの被害は生じていない(水平変位は調べられていない)。

図-4.83に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。ケーソンが海側に移動するとともに海側に傾斜している。この変形には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.84に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。最大0.463mの天端残留水平変位が生じている。隅角部では天端残留水平変位が小さくなっている。写真-4.20～写真-4.21に2022年3月の地震後の岸壁背後の変状を示す。ケーソンの海側への移動に伴い背後のコンクリート版に沈下が生じている。図-4.85に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。高さ0.4～3.0mの範囲で壁の位置が水平方向に0.11m異なることから、ケーソンの傾斜角は2.6°程度であると考えられる。この傾斜角には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。

(3) 物揚場 (C-6-3) (-4.0m)

物揚場(C-6-3)の平面図を図-4.86に示す。本施設はケーソン式である。図-4.87に標準断面図を示す。本施設は1986～1991年度に整備された。設計震度は0.10である。本施設では2011年東北地方太平洋沖地震と2021年2月の地震のいずれにおいても物揚場本体の復旧を必要とするほどの被害は生じていない(水平変位は調べられていない)。

図-4.88に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。ケーソンが海側に移動するとともに海側に傾斜している。この変形には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.89に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。最大0.454mの天端残留水平変位が生じている。隅角部では天端残留水平変位が小さくなっている。写真-4.22に2022年3月の地震後の岸壁背後の変状を示す。ケーソンと背後地盤の境界付近に法線方向にクラックが入っている。写真-4.23は取付護岸(B-5-16)との境界部を示したものであるが、波除堤の影響で変位が抑制されていることがわかる。図-4.90に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。高さ0.4～3.6mの範囲で壁の位置が水平方向に0.11m異なることから、ケーソンの傾斜角は2.0°程度であると考えられる。この傾斜角に

は2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。

4.5 3号埠頭

(1) 取付護岸 (B-5-16)

取付護岸(B-5-16)の平面図を図-4.91に示す。本施設は方塊ブロック式である。図-4.92に標準断面図を示す。本施設は2007～2013年度に整備された。設計震度は0.10である。本施設は2011年東北地方太平洋沖地震の際には整備中であつたが、背後地盤の埋め立ては完了していた(写真-4.24および写真-4.25)。本施設では2011年東北地方太平洋沖地震と2021年2月の地震のいずれにおいても護岸本体の復旧を必要とするほどの被害は生じていない(水平変位は調べられていない)。

図-4.93に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。方塊ブロックが海側に傾斜している。この変形には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.94に天端残留水平変位の測量結果を示す(この測量結果は先に述べたように2022年3月の地震による変位を示すと考えられる)。最大0.913mの天端残留水平変位が生じている。写真-4.23は第2船だまり物揚場(C-6-3)から3号埠頭取付護岸(B-5-16)を見たものであるが、波除堤付近ではB-5-16の変位が拘束されて小さくなっていることがわかる。図-4.95に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。上から1段目、2段目とも高さ2mの方塊ブロックの上下端の水平位置が0.22m異なることから、方塊ブロックの傾斜角は6.2°程度であると考えられる。この傾斜角には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。

(2) 岸壁 (C-1-13) (-12.0m) (耐震強化岸壁)

岸壁(C-1-13)の平面図および正面図を図-4.96に示す。岸壁(C-1-13)の野積場施設平面図を図-4.97に示す。本施設はケーソン式であり、耐震強化岸壁(標準部、先端部)と取付部(耐震設計部、標準部)からなる。耐震強化岸壁は法線延長240mで、計16函のケーソンが用いられ、そのうち最東端の1函が先端部となる。図-4.98～図-4.100に2011年東北地方太平洋沖地震前の設計時のそれぞれの標準断面図を示す。施設の設計震度は、耐震強化岸壁(標準部、先端部)と取付部(耐震設計部)において0.25、取付部(標準部)において0.1が用いられている。ケーソン諸元は耐震強化岸壁(標準部、先端部)、取付部(耐震設計部、標準部)で異なる。中詰材料も異なり、耐震岸壁(標準部)および取付部(耐震部)において銅ガラミ(単位体

積重量 2.2tf/m^3), 耐震岸壁(先端部)および取付部(標準部)において中詰砂(単位体積重量 1.8tf/m^3)が用いられている。裏込割石の背後には液状化しない材料として岩ズリが埋め立てられている。用いられた岩ズリを写真-4.26に、その特性を表-4.2~表-4.4、図-4.101に示す。

相馬港3号埠頭は2011年東北地方太平洋沖地震の際には整備中であったが、ケーソンおよび上部工は設置されていた。背後地盤の埋め立ても完了していたが、エプロン部およびヤード部(野積場、荷さばき地)の舗装はされていない状態であった(写真-4.24および写真-4.25)。

2011年東北地方太平洋沖地震において、3号埠頭岸壁(C-1-13)ではやや変状が見られた。地震後の岸壁の状況を写真-4.27に示す。また、ケーソンの変位一覧、ナローマルチ調査による岸壁前面状況、被災断面図を図-4.102、図-4.103、図-4.104に示す。図-4.102より、水平変位(はらみ出し量)は最大で40cm程度であった。ケーソンの海陸方向の傾斜は全て港内側(陸側)に生じているとされているが、傾斜角は最大でも 0.9° であり、傾斜はほとんど生じていない。ケーソン沈下量はどの函においても60cm程度であったとされている。図-4.103より、岸壁前面泊地には水深-8m程度の浅い部分が見られるが、これは津波によるふ頭用地からの土砂流出ではなく、整備途中のためと推察されている。マウンドの洗掘等も見られていない。

東北地方太平洋沖地震後の耐震強化岸壁(標準部)および取付部(耐震設計部)と、耐震強化岸壁(先端部)との復旧断面を図-4.105、図-4.106に示す。地震後の断面に対して、岩ズリの追加、土圧低減のための軽量混合処理土(SGM)の施工、ケーソン上のカウンターウェイトの追加がなされている。これらは、地震によるケーソン沈下によって浮力が増大して、滑動等に対する抵抗力が減少して安全率も小さくなることに対応するためのものである。耐震強化岸壁(先端部)においては、ケーソン端趾圧に対する支持力確保のためのマウンドの追加も行われている。これらの施工が行われたのち、岸壁の供用は2014年に開始された。これらのうち、地震後における岩ズリおよび軽量混合処理土の施工状況を写真-4.28~写真-4.32に示す。

写真-4.33に2021年2月の地震前の3号埠頭の状況を示す。2021年2月の地震においては、エプロン部のクラック等のわずかな変状は見られたが、岸壁の大きな変位は見られなかった。地震後の様子を写真-4.34~写真-4.36に示す。変状の概要を図-4.108に示す。岸壁のエプロン背後(断面図上は岩ズリ上)において細粒分を含む泥水溜まり(数mm深さ)が生じていたが、岸壁機能への影響は見られなかった。泥水溜まりは砂分は含まれてい

なかった。ケーソン陸側肩部上でエプロンにクラックは見られたが、段差は見られなかった。なお、当該岸壁は2021年の地震発生当時、貨物船「ATAYALACE」(9991総トン)が着岸中であり、翌日2月14日は日曜日は定休日、15日は暴風のため一旦離岸し、16日から積み荷の木質ペレットの荷役を実施していた。

2022年3月の地震における岸壁(C-1-13)の目視調査による陸上部変状図および陸上目視調査状況を図-4.109~図-4.112、写真-4.37~写真-4.38に示す。また、ドローンにて上空より撮影された画像にケーソン番号を加えたものを写真-4.39~写真-4.48に示す。目視調査は、「港湾の施設の点検診断ガイドライン」による一般定期点検診断のうち、目視調査(1)の点検項目に準じて点検診断及び評価が行われた。施設全体の目視可能な部材(上部工、エプロン)について、損傷状況等点検及び調査を行い、変状図として整理した。ひび割れについては、2021年2月の地震においても確認されていることから、特に大きいものについて確認し、変状図にまとめられている。

目視調査(陸上目視)により、調査範囲全域にわたって変状が確認された。ケーソン目地のズレ(隣接ケーソン間のズレ、出入り)はNo.1~No.2のケーソン間およびNo.8~No.9のケーソン間で大きく、それぞれ、180mm、120mmであった。ケーソン目地の段差(隣接ケーソン間の段差)はNo.17~No.18のケーソン間で大きく、60mmであった。ケーソン背後のエプロン(コンクリート舗装部)では全域にわたって沈下・陥没・ひび割れがみられ、沈下深さはNo.7~No.11のケーソン背後で-1150mmと大きかった。エプロン背後のアスファルト舗装部では、全域にわたって舗装打継目部で80~400mm程度の開きがみられ、ケーソンNo.13の背後アスファルト舗装部で400mmと大きかった。

地上レーザー計測による三次元点群測量の範囲・評定点、および結果を図-4.113、図-4.114に示す。三次元点群測量は三次元レーザースキャナー(写真-4.49)を用い、図-4.113の赤線の範囲内で実施された。背後地の鉄屑置場及び土壌集積区域は地表面で無いため三次元点群編集で除去されている。地上レーザー計測データに水平位置、標高及び方向を与えるための基準となる評定点を設置するため、岸壁と背後地にVRS-RTK法より11点の評定点設置が行われている。標高については、地上レーザー計測区域内での整合を図るため設置した評定点T1を既知点とする4級水準測量により決定された。点群データの高さは相馬港工事基準面(DL $\pm$ 0.00, TP-0.86m)を基準としている。高さの決定においては相馬検潮所附属水準点 附27(TP=+5.557, H29.2.28改定成果)が使用された。当該水

準点は2011年東北地方太平洋沖地震直後にはTP+5.425であったが、H29.2.28改定成果でTP+5.557となり、+0.132mの隆起が認められた。このため、港湾台帳の高さと本図面は約13cm差がある。

三次元点群測量結果としての等高線および段彩図(図-4.114)より、岸壁法線より15m程度から背後の部分において大きな沈下が生じていることが確認できる。ケーソン上のエプロン部の標高が3m程度であるのに対して、沈下部では標高が最深で2.2m程度となっている。この調査は地震後における応急復旧後に実施されており、沈下したエプロンおよび野積場(荷さばき地)の三カ所(ケーソンNo.1-2間の背後、No.6-7間の背後、No.12の背後)に碎石および敷鉄板等で応急復旧で造成した通路も示されている。応急復旧通路の詳細については後述する。

三次元点群測量結果に基づき、各測線での横断面を整理し、標準断面図での標高との差として沈下量を算出し、平面図上にプロットしたものを図-4.115に示す。横断面の整理においては、後述する各測線での法線直交方向の水平変位量(図-4.122)も考慮されている。各測線の沈下量は、令和4年3月測量時の法線両端の測点No.0を結んだ基線(岸壁法線より平均で1m程度背後)との交点を0mとし、5m間隔で30m背後の野積場(荷さばき地)までプロットされている。図より、エプロン部分の沈下は最大で7.3cmであり(ケーソンNo.3(測線No.2)、基線から5m地点)、大きな沈下は生じていない。エプロン背後の野積場の沈下は、基線から20m地点(エプロン部と野積場の境界付近)で顕著であり、沈下量最大値はケーソンNo.10(測線No.7)で105.2cmであった。なお、ケーソンNo.9(測線No.6)においてケーソン直背後に大きい沈下が生じていないのは、その箇所に応急復旧通路が作られた後に計測が行われたためである。また、ケーソンNo.1(測線No.0)の直背後には接続する護岸のケーソンがあるため(図-4.107)、あまり沈下が生じていない。

岸壁法線から基線までと、基線から15mまでの5m毎の範囲でのエプロン表面の法線方向の傾斜について整理したものを図-4.116～図-4.119に示す。これらの図より、エプロン表面の法線方向の傾斜は、当初設計における勾配(1%, 0.57°)と比べて大きな違いは見られない。各測線におけるエプロン部勾配の平均値を表-4.5、図-4.120に示す。設計における勾配1%に対して各測線での勾配の平均値は0.9～1.65%となっており、全体的にやや勾配は大きいものの、設計勾配とほぼ同等の値であった。

2022年3月の地震の際の岸壁の水平変位を図-4.121、図-4.122に示す。なお、図中の計測点No.9及びNo.11は、測量紙ではなくチョークによるマーキングの中心を観測

しているため、参考値とされている。図-4.121では、各計測点における地震前(2021年2月の地震後の令和3年2月に計測点設置)と地震後(令和4年3月24日)の座標値も併せて示されており、これらの差より水平変位量が求められている。これらの座標値は、トータルステーションで基準となる点(基準点)からの相対的な水平位置関係を取得し、別途GNSS観測(VRS-RTK法)により基準点の座標を取得し、それらを合わせることで求められている。GNSS観測で取得された基準点の座標は2022年3月の地震の前後で変化しており、基準点配置箇所の地盤・構造変状の影響とともに、地震による広域な地殻変動の変位量も含まれることが考えられる。しかしながら、2022年3月の地震における相馬港付近の地殻変動はほぼ東方向に1cm程度とされており²⁾、地殻変動の影響は小さい。よって、地震後の基準点座標値の変化はその配置箇所の地盤・構造変状の影響だけで生じており、それを用いて算定された計測点変位量においても、計測点配置箇所での地盤・構造変状の影響ではない広域地殻変動の変位量はほぼ含まれないと考えられる。

図-4.122では、水平変位を法線直交方向と並行方向に分解したものが示されている。岸壁法線変位は法線直交方向(南方向)に大きく、法線並行方向(東方向)にも少し生じていた。水平変位の最大値は岸壁法線延長の中央付近の計測点No.7(ケーソンNo.10)で生じており、法線直交方向に0.79mであった。

各ケーソンごとの上部工および前面水中部潜水土調査の結果を表-4.6～表-4.23に示す。また、図-4.124、図-4.125にケーソン毎の傾斜、堆積、損傷等の調査結果を並べてまとめた水中変状図を示す。写真-4.50、写真-4.51は、調査状況および水中部確認・計測の例を示す。水中部の目視観察は維持管理点検診断ガイドラインを参考とし、特にケーソンの目地開きや裏埋材の流出の形跡があるかどうかには注意し調査されている。傾斜計による上部工及びケーソン前壁面の傾斜角計測や、海底面状況及び基礎捨石部の砂堆積状況の確認も行われている。調査の結果、海底面においては、土砂堆積が無くマウンド捨石が目視確認できた箇所は一部であり、ほとんどの箇所です砂が堆積していた。ケーソン目地部に取り付けられている吸出し防止版においては、複数箇所で見付金具の欠損等が確認された(起点部、ケーソンNo.1下部、No.5～No.6間下部、No.9～No.10間下部、No.10～No.11間下部)。一方で目地部流出防止版固定金具欠損箇所においても裏込土流出の形跡は確認されていない。よって、土砂堆積は、2022年3月の地震とは別の漂砂等の要因で生じたことが考えられる。ケーソンの傾斜は前壁面における目地付近の上

部と下部の4カ所で測定され(図-4.123), 上部工も目地付近の前面(側面)と天端面の4カ所で測定されている。

図-4.126, 図-4.127 はそれぞれケーソン前壁面の上部, 下部の角度と鉛直(90°)の差からケーソン傾斜角を算出してまとめたものであり, 全てのケーソンの全ての箇所では前壁面の角度が 90° であったことから, 傾斜角は全て 0° となっており, 傾斜は生じていない。ケーソン壁の変状に関しては, ケーソン No.15 の前壁面の一部では剥離等の損傷が確認されているが, 地震の影響で生じたものであるかどうかは定かではない。

ケーソン前面の砂泥の堆積状況及びマウンド形状に関して, 水中部形状調査での水深の計測と併せて, 潜水調査時に砂泥部にピンポールをマウンド捨石に当たるまで差し込み, その差込み深さを確認した(図-4.128)。差込み確認は, 岸壁前面から4mまでの範囲では1m間隔, 5mまでの範囲では20cm間隔で行った。また, 確認箇所は岸壁延長の端部のケーソン No.2(測線 No.1 付近)および No.15(測線 No.11 付近)と, 中央部のケーソン No.10(測線 No.7 付近)とされた。結果は図-4.129 のようであり, 堆積した砂泥表面のケーソン底面からの高さは最大で1.94mであり, 岸壁前面から1m程度の範囲では0.9m以上であることが確認された。また, ピンポール差込み深さについては, 岸壁前面より4.4m地点で差込み深さが深くなる変化点を確認されており, ケーソン前面からマウンド法肩までの距離がその程度であると認識できる。また, 図より, 法尻は岸壁前面から5mよりもさらに前となっている。標準断面図におけるケーソン前面からマウンド法肩までの距離は4m, 法尻までの距離約4.5mであり(図-4.105), それらよりもマウンドが前面に拡大している。ケーソン No.10 や No.15 の個所ではケーソンの直前面でのピンポール差込み深さは浅くなっており, マウンド捨石の表面がケーソン下端面よりも高くなっており, ケーソンがマウンドにめり込んだ状態になっていることが考えられる。このようなケーソンがマウンドに沈み込むような挙動の影響によりマウンドが水平方向に海側に拡大したことも考えられるが, 少なくとも, 基礎マウンドが基礎マウンドに対して相対的に海側に移動するような挙動にはなっていないことから, マウンドに対するケーソンの滑動は生じていないことが考えられる。前述のように, 当該岸壁は2011年東北地方太平洋沖地震の際にも変形が生じており, マウンドも変形していた可能性が考えられる。東北地方太平洋沖地震後にケーソンの末直しやマウンドの補修等は行われていないため, 今回確認されたマウンドの変状には東北地方太平洋沖地震の際に生じたものも含まれている可能性があるが, その際に今回のような調査は行わ

れていないため, その影響を分離して確認することは難しい。

2022年3月の地震前後における断面の変形について, 標準断面図と令和4年3月の測量結果及び水中部形状調査の結果を重ねた比較横断面図を図-4.130~図-4.134に示す。図中では, 岸壁法線の水平変位量や沈下量等も示されている。これらの図より, ケーソンの海側への変位にともない, ケーソンの直背後の部分で大きい沈下が生じていることが認識できる。なお, 測線 No.6 においてケーソン直背後に大きい沈下が表示されていないのは, その箇所に応急復旧通路が作られた後に計測が行われたためである。また, ケーソン前面マウンド部においては, 地震後におけるケーソン前面からマウンド法肩部までの距離が示されており, ケーソン前面からマウンド法肩部までの距離が当初設計断面の4mよりも短く, ケーソンがマウンドに対して滑動しているかのような図になっている。しかし, この値は当初断面におけるケーソン前面からマウンド法肩部までの距離4mとケーソン天端法線での水平変位量(図-4.122)の差から求めたものであり, 前述の図-4.129のように, 実際にはケーソンとマウンドの水平方向の位置関係は変化していないことは確認されており, ケーソンのマウンドに対する滑動は生じていないと考えられている。

岸壁の前面泊地についてマルチビーム測深器(EMシリーズ, 港湾業務艇ひより搭載)を用いた深浅測量が行われた(図-4.135)。収録ソフトSISを用いて測深データ(allデータ, 2022年3月21日測量)を取得し, 水路測量解析ソフト:HYPACKを用いて解析が行われた。水中音速度データはソナーの表面音速度を参照した値が使用され, 潮位データは, 国土地理院所管:相馬験潮場のデータが使用された(基準面:D.L=T.P-0.86m)。全体深浅図を図-4.136, 岸壁前面域を拡大した変状図を図-4.137~図-4.139, 点群データ例を図-4.140に示す。ケーソン No.1~No.18のほぼすべての岸壁前面で比高約2mの土砂の堆積が確認された。また, ケーソンの目地毎に窪地(深さ最大約0.7m)が見られた。岸壁前面から南へ2~3mまでの水深は, 計画水深-12mより浅い箇所が確認された。

岸壁エプロン部およびその背後のふ頭用地において, 特にアスファルト舗装下の軽量混合処理土(SGM)と岩ブリ部の境界の空洞の有無に着目して, 空洞化調査が行われている。使用機材および調査状況を写真-4.52, 写真-4.53に示す。調査測線及び空洞箇所を図-4.141に示す。地中レーダ反射映像断面を図-4.142に示し, ファイバースコープ観察結果を図-4.143~図-4.145に示す。調査データは, レーダアンテナを調査測線に設置し, 測線に沿っ

て走査させることで、装置本体にデータが記録される。レーダ装置本体のディスプレイ上で記録波形をモニタリングし、空洞の有無が確認される。データにはエンコーダを用いてマーカーを記録し、得られたデータを基に反射波の振幅、位相、反射パターンの特徴から空洞の有無が推定されている。記録波形から空洞と思われる箇所（3箇所）については、ハンマードリルを使用して表面から直径3cm程の穴を空洞層まで穿孔し、ファイバースコープにて状況が確認されている。

ケーソン No.1 および No.16 背後のアスファルト舗装部（野積場）で空洞が見られ（図-4.144、図-4.145）、周囲は大きく沈下していたが、空洞が生じていた箇所では沈下量が小さかった。ケーソン No.10 のエプロン下部では50mm程の空洞がみられた（図-4.143）。これら空洞は地表面から数十cmの深さにあり、舗装の下で発生していた。SGMと岩ズリの境界の地表面からの深さは2.2mであり（図-4.105、図-4.106）、その深さでの空洞は見られなかった。なお、ケーソン背後の沈下の要因としては、ケーソンの海側への移動に加え、岩ズリの体積収縮が考えられる。

2022年3月の地震後において実施された地盤調査に関して、ボーリング孔位置を図-4.146に示す。調査地点 No.1 では工学的基盤層まで標準貫入試験及びPS検層が実施された。また、所定層にてサンプリングを行い、物理試験（土粒子の密度、含水比、粒度、湿潤密度、液性・塑性限界試験）が行われた。さらに、力学試験（三軸CD試験、繰返し非排水三軸（液状化試験）、変形特性を求めるための繰返し三軸試験）が行われた。調査地点 No.3 については、沖積第1砂質土（As1）層まで標準貫入試験が行われた。

図-4.147、図-4.148、図-4.149に、No.1、No.3、No.2のボーリング柱状図を示す。No.2は調査地点 No.1 と同位置で三軸試験用試料サンプリング用のボーリング孔である。採取試料を図-4.150に示す。

既往資料から平成8～9年におけるボーリングの位置を読み取り（図-4.151）、それら土層図に調査地点 No.1 の土質柱状図（図-4.147）を重ね合わせた土質断面図を図-4.152～図-4.155に示す。調査地点 No.1 における原地盤の土層構成は上から砂層、シルト層、シルト岩層の順となっており、N値分布を含めて、特にC-C断面（図-4.153）、E-E断面（図-4.155）において既往調査の結果とおおむね整合している。

PS検層は、深度0～38mの全区間をダウンホール法により測定が行われた。ダウンホール法の測定方法の概念図および機器仕様一覧表を図-4.156、表-4.24に示す。波形記録図と走時曲線の関係、振源距離補正の概念を図-

4.157に示す。波形記録を深度順に並べた波形記録図を作成し、P波およびS波の初動の到達時間を読み取り、起振点とボーリング孔口の距離を考慮して走時曲線図を作成する。走時曲線の勾配と折れ曲がり点から弾性波速度、速度の境界深度が求められる。PS検層結果を図-4.158に示す。

土質試験は乱れの少ない試料のサンプリングで採取した試料及び、標準貫入試験によって採取した乱した試料を用い、以下に示す項目について下記の「日本工業規格JIS」及び「地盤工学会基準JGS」に基づき実施された。

- ・土粒子の密度試験方法（JIS A1202:2009）
- ・土の含水比試験方法（JIS A1203:2009）
- ・土の粒度試験方法（JIS A1204:2009）
- ・土の液性限界・塑性限界試験（JIS A1205:2009）
- ・土の湿潤密度試験方法（JIS A1225:2009）
- ・土の三軸圧縮試験 土の圧密排水(CD)（JGS 0524:2009）
- ・土の繰返し非排水三軸試験（JGS0541：2009）
（土の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験）
- ・地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験（JGD0542：2009）
（変形特性を求めるための繰返し試験）

土質試験結果一覧を図-4.159に示す。三軸圧縮試験(CD)結果を図-4.160～図-4.163に示す。繰返し非排水三軸試験結果を表-4.25および図-4.164～図-4.167に示す。変形特性を求めるための繰返し三軸試験結果を表-4.26および図-4.168～図-4.171に示す。

(3) 先端護岸 (B-5-14)

先端護岸 (B-5-14) の平面図を図-4.172に示す。本施設はケーソン式である。図-4.173に標準断面図を示す。本施設は1996～2014年度に整備された。設計震度は0.10である。本施設は2011年東北地方太平洋沖地震の際には整備中であったが、背後地盤の埋め立ては完了していた（写真-4.24および写真-4.25）。2011年東北地方太平洋沖地震後は津波による洗掘を受けた箇所（写真-4.25）でケーソンの再設置が行われた。

2021年2月の地震では、護岸本体の復旧を要するような被害は生じていない。しかし、写真-4.54に示すように、背後地盤には著しい液状化が生じた。

図-4.174に2022年3月の地震後の被災変形図を示す。ケーソンが海側に傾斜している。この変形には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.175に天端残留水平変位の測

量結果を示す（この測量結果は先に述べたように 2022 年 3 月の地震による変位を示すと考えられる）。最大 0.682m の天端残留水平変位が生じている。また背後地盤では再び著しい液状化が生じた。写真-4.55 は写真-4.54 と同じ位置で撮影したものであるが、2021 年 2 月の地震で噴砂が生じたのと同じ箇所再度噴砂が生じている。図-4.176 に 2022 年 3 月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。この結果には 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。

(4) 岸壁 (C-1-11) (-10.0m)

岸壁 (C-1-11) の平面図を図-4.177 に示す。本施設はケーソン式である。図-4.178 に標準断面図を示す。本施設は 1996～2014 年度に整備された。設計震度は 0.15 である。本施設は 2011 年東北地方太平洋沖地震の際には整備中であったが、ケーソンの設置は完了していた（写真-4.24 および写真-4.25）。2011 年東北地方太平洋沖地震後は津波による洗掘を受けた箇所（写真-4.25）でケーソンの再設置が行われた。

図-4.179 に 2021 年 2 月の地震後の岸壁背後の変状を示す。2021 年 2 月の地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、ケーソンと背後地盤の境界付近に最大 21cm の段差（写真-4.56）が生じていることから、岸壁本体にもある程度の水平変位が生じていたと考えられる。なお、段差の生じた位置は概ねケーソンと背後地盤の境界（海側から 2 枚目のコンクリート版と 3 枚目のコンクリート版の境界）付近であるが、詳しく見ると前後にずれている（図-4.179、写真-4.56）。

図-4.180 に 2022 年 3 月の地震後の被災変形図を示す。ケーソンが海側に移動するとともに海側に傾斜している。この変形には 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.181 に天端残留水平変位の測量結果を示す（この測量結果は先に述べたように 2022 年 3 月の地震による変位を示すと考えられる）。最大 0.678m の天端残留水平変位が生じている。図-4.182 に 2022 年 3 月の地震後の岸壁背後の変状を示す。ケーソンと背後地盤の境界付近に最大 80cm の段差（写真-4.57）が生じている。なお、段差の生じた位置は、2021 年 2 月の地震と異なり、ほぼケーソンと背後地盤の境界（海側から 2 枚目のコンクリート版と 3 枚目のコンクリート版の境界）に一致している（図-4.182）。本施設は 2022 年 3 月の地震の時点では復旧中でありコンクリート版の無い状態で地震を受けたため、ケーソンと背後地盤の境界に生じた段差がそのまま地表に表れたのに対し、2021 年 2 月の地震のようにコンクリート版のある

状態で地震を受けると、コンクリート版同士の拘束効果で段差の位置がずれるとも解釈できる。図-4.183 に 2022 年 3 月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。この結果には 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。

4.6 5号埠頭

(1) 岸壁 (C-1-12) (-5.5m)

岸壁 (C-1-12) の平面図を図-4.184 に示す。本施設はケーソン式である。図-4.185 に標準断面図を示す。本施設は 1984～2008 年度に整備された。設計震度は 0.10 である。2011 年東北地方太平洋沖地震では、岸壁本体の復旧を必要とするほどの被害は生じていない（水平変位は調べられていない）。

図-4.184 に 2021 年 2 月の地震後の岸壁背後の変状を示す。2021 年 2 月の地震による岸壁の水平変位は調べられていないが、ケーソンと背後地盤の境界付近に最大 22cm の段差が生じていることから、岸壁本体にもある程度の水平変位が生じていたと考えられる。

図-4.186 に 2022 年 3 月の地震後の被災変形図を示す。ケーソンが海側に移動するとともに海側に傾斜している。この変形には 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.187 に天端残留水平変位の測量結果を示す（この測量結果は先に述べたように 2022 年 3 月の地震による変位を示すと考えられる）。最大 0.426m の天端残留水平変位が生じている。図-4.188 に 2022 年 3 月の地震後の岸壁背後の変状を示す。ケーソンと背後地盤の境界付近に最大 65cm の段差（写真-4.58～写真-4.59）が生じている。図-4.189 に 2022 年 3 月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。この結果には 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。

(2) 北護岸 (B-5-6)

北護岸 (B-5-6) の平面図を図-4.190 に示す。本施設はケーソン式である。図-4.191 に標準断面図を示す。本施設は 1984～1986 年度に整備された。設計震度は 0.10 である。本施設では 2011 年東北地方太平洋沖地震と 2021 年 2 月の地震のいずれにおいても護岸本体の復旧を必要とするほどの被害は生じていない（水平変位は調べられていない）。

図-4.192 に 2022 年 3 月の地震後の被災変形図を示す。ケーソンが海側に移動するとともに海側に傾斜している。この変形には 2011 年東北地方太平洋沖地震および 2021 年 2 月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.190

に2022年3月の地震後の岸壁背後の変状を示す。東端部付近の、地震前には陥没が見つかっていなかった箇所で、地震後に大規模な陥没が見つかった(写真-4.60~写真-4.61)。図-4.193に2022年3月の地震後に行われた潜水調査の結果を示す。この結果には2011年東北地方太平洋沖地震および2021年2月の地震の影響が含まれる可能性がある。図-4.194に当該施設付近での土質調査結果を示す(海上ボーリング)。シルトが堆積しており、DL-17.5m付近で頁岩となっている。

4.7 ドローンによる被災調査

2022年3月の地震後の調査では、ドローンを活用した調査が実施された。以下にその概要を示す。

(1) 直轄施設

岸壁および背後地の変状を把握する目的に、図-4.195に示す7ブロックについてUAVに搭載されたデジタルカメラによる動画撮影を行い、動画から静止画が作成された。撮影日は地震発生翌日の2022年3月17日である。

静止画をブロック毎に、写真-4.62から写真-4.69に示す。写真-4.62に示す高度52mから撮られた画像のように、第3号岸壁(ブロック6)の背後地の舗装で視られたクラックの発生範囲を確認することができる。

(2) 県管理施設

県管理施設については、野積場の変状を把握することを目的に、UAVによる撮影が行われ、オルソ画像が製作された。図-4.196~図-4.209に示す画像には、クラック等の変状にピンク色のマーカーが記され、変状の発生範囲や噴砂の範囲を把握することができる。