

1. はじめに

わが国は世界有数の地震国であり，太平洋側のプレート境界では南海トラフ地震をはじめとする巨大地震の発生が懸念されている．また，地震の発生確率が比較的低いと考えられている日本海側でも，2005年福岡県西方沖の地震，2007年新潟県中越沖地震などの被害地震が続々と発生しており，港湾施設の地震対策は極めて重要である．

1995年兵庫県南部地震では神戸港のすべてのコンテナバースが利用できなくなり（図-1），我が国の経済活動にも大きな影響を及ぼした．今後発生が懸念される大規模地震においては，地震後の早い段階から，必要最小限の幹線貨物輸送機能の確保を図ることが必要である．一方，地震直後の神戸港が大きな損傷を受けながらも緊急物資や避難民の輸送に活用されたように（図-2），周囲を海に囲まれたわが国では，地震直後の人・物の輸送拠点としての機能が港湾に求められている．



図-1 兵庫県南部地震による神戸港のコンテナバースの被害



図-2 兵庫県南部地震直後の神戸港における緊急物資の荷揚げ

2. 港湾施設の地震被害の特徴

港湾施設の地震対策を考える上で、構造形式別の被害の特徴を把握しておくことが極めて重要である。

地震時に典型的に見られる重力式岸壁の被害形態は、**図-3**に示すとおり、基礎地盤の変形に伴い堤体が沈下・傾斜を伴いながら海側に移動するものである。このとき、背後地盤は volume が足りなくなるので沈下し、堤体と背後地盤との間に段差が生じる。堤体の水平変位が大きいほど背後の段差も大きい傾向がある。このような変形モードが極端な形をとって現れたのが、**図-4**に示す兵庫県南部地震による神戸港の被害事例である。この場合、背後には人の背丈を超える段差が生じている。大きな水平変位が生じれば、地震後の船舶の接岸に支障を来すことになり、また、背後に大きな段差が生じれば、トラックによるアプローチができなくなり、地震後の荷役に支障を来すことになる。従って、岸壁が地震後に使用できるためには、想定される地震動に対し、水平変位や段差の大きさを小さく押さえるように設計する必要がある。また、神戸港では、ガントリークレーンの海側の脚が堤体上に、陸側の脚が背後地盤上に設置されていたため、堤体の海側への移動に伴いガントリークレーンが股裂き状態となる被害が多く見られた。このような配置は構造上不利であることがはっきりしているので可能な限り避けるべきである。

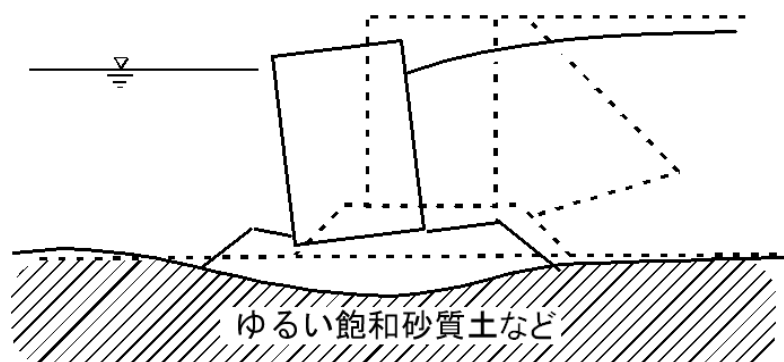


図-3 重力式岸壁の典型的な被害¹⁾



図-4 兵庫県南部地震における重力式岸壁の被害事例
(図-3と比較しやすくするため左右反転させている)

地震時に最も多く見られる矢板式岸壁の被害形態は、控え工の海側への移動とそれに伴う矢板本体の海側への移動である。この場合、図-5に示すように、控え工の直背後に段差が現れることが多い。一方、数は少ないが矢板本体が折損した事例も1983年日本海中部地震（秋田港、図-6）と1993年釧路沖地震（釧路港）で見られた。



図-5 2005年福岡県西方沖の地震における矢板式岸壁の被害事例
(控え工の位置に現れた段差)

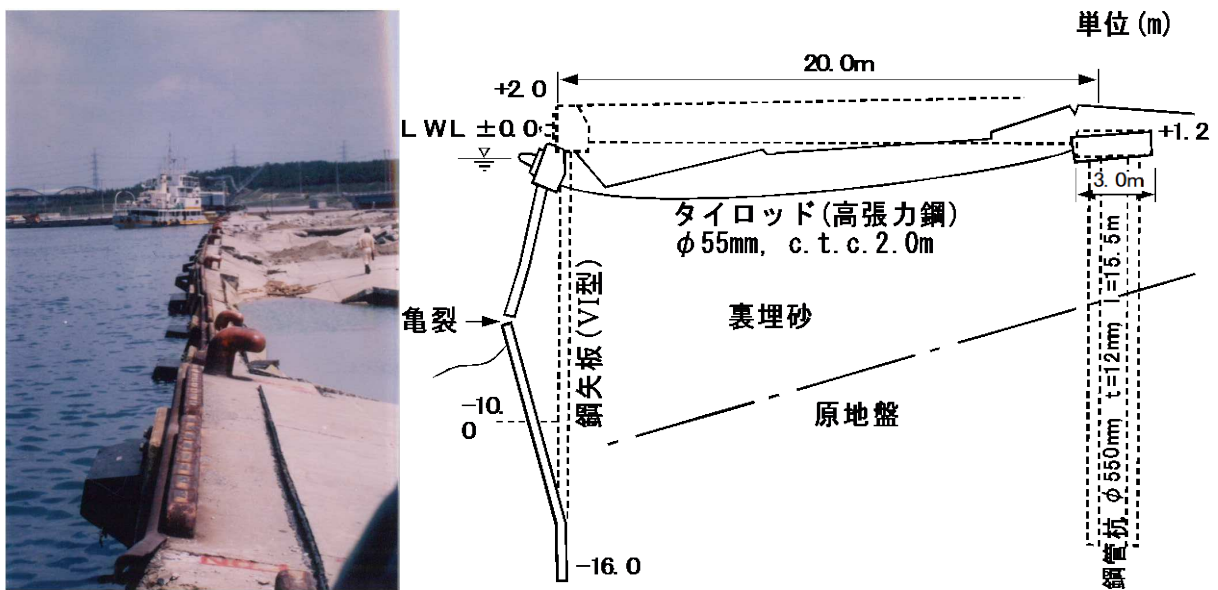


図-6 1983年日本海中部地震における矢板式岸壁の被害事例¹⁾
(矢板に亀裂が発生した事例)

地震時に典型的に見られる栈橋の被害形態は、土留めの海側への移動に伴い、渡版を介して上部工が土留めに押されるか、または、土留めの移動に伴い捨石が海側に変位することにより杭が押されるかのいずれかである。例えば兵庫県南部地震における神戸港高浜栈橋の被害（図-7）や2005年福岡県西方沖の地震における博多港須崎埠頭栈橋の被害はこのようなメカニズムで生じている。栈橋単独の振動による被害は少ない。なお、名古屋港等では渡版を介して上部工が押されることを避けるため変位吸収型の渡版を設けている事例がある。

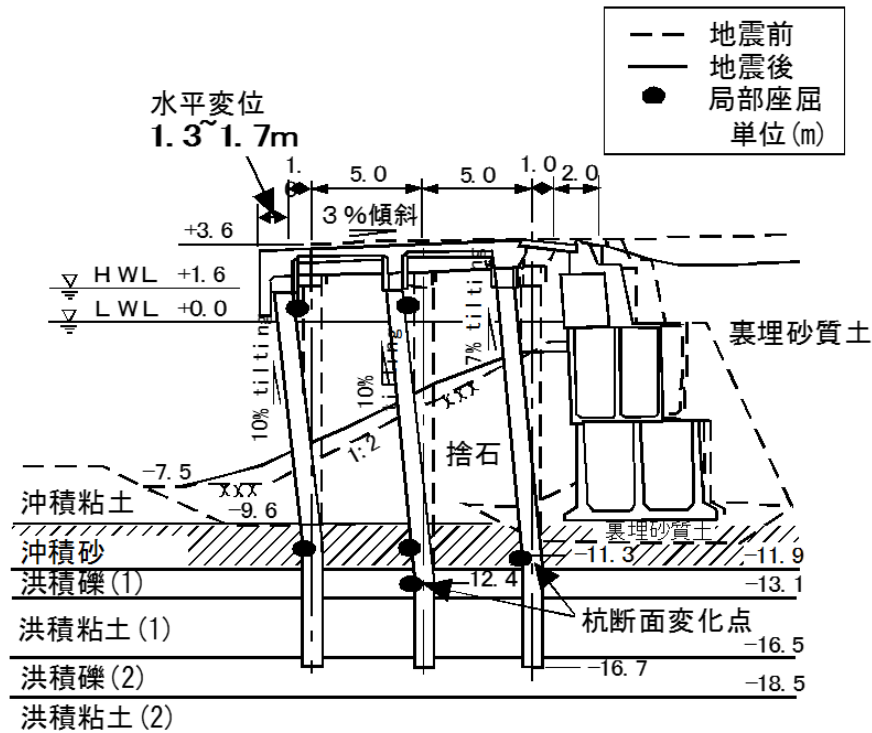


図-7 兵庫県南部地震における栈橋の被害事例¹⁾
 (地中部の杭にも局部座屈が生じている)

ここまで構造形式別の被害の特徴を見てきたが、いずれにせよ、港湾の施設の地震時の被害は地盤の変形が関わっていることが特徴である。基礎地盤や背後地盤における過剰間隙水圧の上昇（その著しい場合が液状化）は地盤の変形を助長し施設被害に結びつきやすいことは過去の多くの研究²⁾³⁾でわかっている。したがって、液状化の予測と対策を適切に行うことは、昔も今も、港湾における地震対策の最重要項目の一つである。また、対策の有無に関わらず、大規模地震ともなればある程度地盤は変形するとの前提の下に対策を行うことが重要である⁴⁾。

3. 港湾計画の中での地震対策

これまで、港湾における地震対策は、計画—設計—施工—維持管理という一連のプロセスのうち、主に設計段階の工夫によって行われてきている。例えば地盤改良を行うことにより係留施設の地震時の変形を適切な範囲に押さえるといった対策である。これらの対策は有効ではあるものの、コスト縮減という観点からは、設計段階でとりうる対策に限界があることも事実である。地震に強い港湾をより小さいコストで実現するためには、設計段階の工夫に加え、計画段階において種々の工夫を行うことも重要である。その一つは、港湾の中で地震時の揺れが小さいと想定される場所に優先的に施設を立地させることである⁵⁾⁶⁾。一般に地震時の地盤の揺れ（地震動）は震源断層の破壊過程の影響（震源特性）、震源から地震基盤に至る伝播経路の影響（伝播経路特性）、地震基盤から地表に至る堆積層の影響（サイト特性）の三者によって決まる。中でもサイト特性が揺れの大小に及ぼす影響は非常に大きい⁵⁾。サイト特性の違いは同一港湾内でも見られる。東日本大震災では同一港湾内におけるサイト特性の違いが施設の被害程度を左右している事例が見られた。福島県の小名浜港では余震観測等により港湾内のサイト増幅特性の面的な分布が良く調べられているが、サイト増幅特性の大きなゾーンで東日本大震災による地震動被害が深刻であった⁵⁾。以上のことから、港湾の地震対策においては、港湾内におけるサイト増幅特性の分布を詳細に調べ、サイト増幅特性の大きい場所に立地する施設に対して特に入念に対策を行うことが必要であるが、これをもう一步進めて考えると、港湾計画の

段階であらかじめサイト増幅特性が小さいと考えられる場所に優先的に施設を立地させれば、地震に強い港湾をより小さいコストで実現することに大きく寄与すると考えられる。一例として、既存施設を改良して耐震バースに格上げするといった場合に、サイト増幅特性が小さい、揺れにくい場所にある施設を選択して改良すれば、より小さいコストで改良できるものと考えられる。サイト特性を評価する上で最も信頼性の高い方法は地震観測を行うことであるが、港湾内のあらゆる地点で地震観測を実施することは困難である。そこで、より簡便な手法として常時微動観測の活用が考えられる。常時微動観測から得られる H/V スペクトルは地震観測から得られるサイト増幅特性と良く対応することがわかっており、常時微動観測を活用することで「対象地点は地震波が増幅されやすい場所か、されにくい場所か」「増幅されやすいとすれば、どのような周波数の地震波が増幅されやすいか」といった情報を得ることができる。例えば、港湾構造物に被害をもたらしやすい 0.3-1Hz 程度の周波数帯域に H/V スペクトルのピークがあれば、耐震性の観点から不利なゾーンであると判断できる。

4. 地震直後の対応の迅速化のために

液状化対策などの地震対策をしっかりと行っていたとしても、大規模地震ともなれば、施設の変状が一定程度生じることは避けられない。大規模地震後には、施設の利用可否判断を適切に行うこと、施設を利用可能とするための応急的措置を迅速に行うことが必要となる。

係留施設の利用可否判断に関して最も難しいのは、矢板式岸壁や栈橋のような鋼部材を主体とする施設の判断である。特に、過去の被害事例では地中部の鋼部材に損傷が生じている事例もあり、この場合、目視による調査や潜水調査による判定は困難である。そこで、矢板式岸壁・栈橋など鋼部材を主体とする係留施設の利用可否判断について図-8 に示す手順⁷⁾が考えられている。まず、①地震前後の測量結果より、係留施設の変形による天端の残留水平変位を把握する。②一方、事前にあらかじめ天端残留水平変位と部材の変形・応力状態の関係を施設毎に求めておき、これと①で得られた天端残留水平変位から部材の応力状態と施設の構造上の安定性を評価する。このうち①で用いることができるのが RTK-GNSS に基づく Berth Surveyor⁸⁾等の手法であり、②で用いることができるのが FLIP 等の地盤-構造物系の動的解析である。天端残留水平変位については、兵庫県南部地震直後の調査で一見ほとんど動いていないように見えた係留施設が後に航空写真測量で 50cm 程度動いていることが判明した事例などもあることから、目視に頼ることは禁物である⁷⁾。また、施設の変状とは無関係の地殻変動による変位を差し引く必要がある⁷⁾。以上、鋼部材を主体とする施設の判断が難しいことを述べてきたが、一方、重力式岸壁については、兵庫県南部地震の神戸港の事例のように著しく大きな外力が作用した場合においても、堤体そのものの破壊が問題となった事例は報告されていないことから、目視による判断もある程度可能であり、大規模地震直後においては重力式岸壁を積極的に活用していくことも一つの戦略として考えられる。

施設を利用可能とするための応急的措置として最も典型的なのは岸壁背後の段差の解消である。技術基準上は耐震バース（特定・緊急物資輸送対応）といえどもレベル 2 地震動に対して 30~100cm 程度の水平変位が生じることは許容されており⁹⁾、これと同じかやや小さい程度の段差が背後に生じることが考えられる。東北地方太平洋沖地震後の石巻港雲雀野埠頭の様子を図-9 に示す。地震後にはこのような応急的措置が必要となる。資材の準備や災害協定などにより応急的措置を迅速に実施できるようにしておくことが重要である。なお、こうした措置は緊急物資輸送機能の確保のためには有効であるものの、幹線貨物輸送機能の確保のためには、さらにガントリークレーン等の機能の確保も必要となる。この点に関して問題となるのは、図-1 に示すように、大規模地震において係留施設の法線沿いに不均一な変位が生じ、ガントリークレーンのレールが使用不能となる恐れがあるという点である。こうした状況は最新の耐震設計に基づいたとしても避けることが難しく、したがって、大規模地震後にはレールの引き直しが必要になることを想定しておく必要がある。幹線貨物輸送機能の確保は緊急物資輸送機能の確保に比べ一層ハードルが高いと言える。

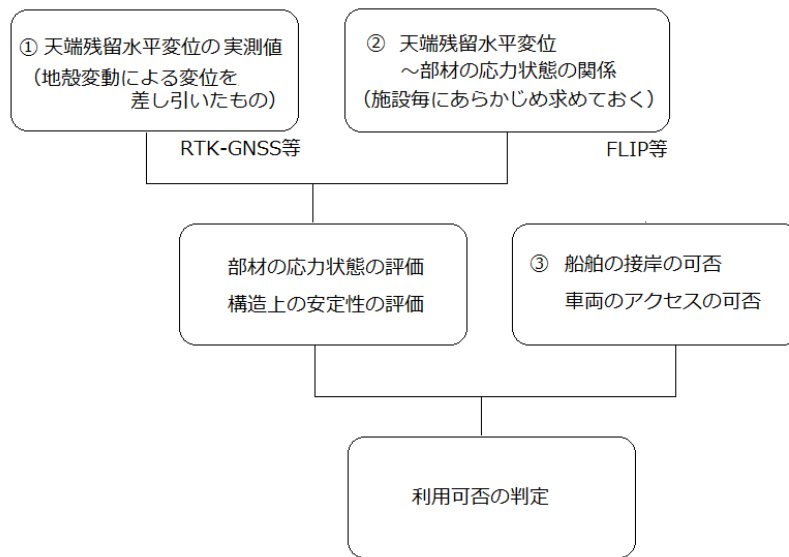


図-8 鋼部材を主体とする係留施設の利用可否判断の手順⁷⁾



図-9 東北地方太平洋沖地震後に石巻港雲雀野埠頭で行われた応急的措置

参考文献

- 1) 井合進，菅野高弘，野津厚，一井康二，佐藤陽子，小濱英司，深澤清尊：港湾構造物の耐震性能照査型設計体系について，港湾空港技術研究所資料，No.1018，2002.
- 2) 菅野高弘，三籙正明，及川研：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その8）ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験，港湾技研資料，No.813，pp.207-252，1995.
- 3) 一井康二，井合進，森田年一：兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析，港湾技術研究所報告，Vol.36，No.2，pp.41-86，1997.
- 4) 野津厚，伊豆太，佐々真志，小濱英司，大矢陽介，寺田竜士，小林孝彰，近藤明彦，長坂陽介，鈴木健之，坪川将丈，内藤了二，竹信正寛，福永勇介，鬼童孝：平成28年(2016年)熊本地震による港湾施設等被害報告，港湾空港技術研究所資料，No.1348，2018.

- 5) 野津厚:地震に強い港湾を低コストで実現するための港湾計画上の工夫について, 地盤工学会誌, Vol.64, No.7, pp.4-7, 2016.
- 6) 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 下巻, p.1788, 2018.
- 7) 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 下巻, pp.1854-1859, 2018.
- 8) 伊藤広高, 小濱英司:RTK-GNSSを用いた地震後の係留施設の変位量計測・安定性評価支援システムの開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1370, 2020.
- 9) 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 中巻, p.1050, 2018.