



北海道港湾における 地震時の利用可否判断指標の設定手法

港湾空港部港湾建設課

○亀尾 実愛

水口 陽介

北日本港湾コンサルタント(株)

奈良 俊介

港湾やその近傍で地震が発生した場合、緊急物資の海上輸送や社会経済活動の維持のため、岸壁の利用可否判断を迅速に行うことが求められる。しかし、鋼構造岸壁の安定性は鋼部材の応力状態に大きく依存し、外観の目視点検では判断出来ない場合があることから、あらかじめ判断指標を定めておくことが重要である。本報は、鋼構造岸壁の変位量と部材の応力状態の関係から利用可否判断を行う手法について検討するものである。

キーワード：被災判断指標、FLIP、鋼構造岸壁

1. はじめに

四方を海に囲まれる北海道は、国内外との物流の9割以上を海上輸送に依存しており、港湾は社会経済を支えるインフラとしてとりわけ重要な役割を担っている。また、平成30年に発生した北海道胆振東部地震では、大規模停電により航空や鉄道が運休するなか、フェリー等の海上交通が道外との唯一の手段として運行され、港湾は緊急物資輸送や物流・人流の維持に重大な役割を果たした。

平成29年7月の港湾法改正により、非常災害時において港湾管理者からの要請がある場合、国が港湾管理者に変わって岸壁等の港湾施設の管理を行うことが可能となり、岸壁等の利用可否判断や利用調整を行うことが位置づけられた。地震発生後、岸壁の利用可否判断を迅速かつ的確に行うためには、判断指標や現地計測の方法をあらかじめ定めておく必要があり、日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震の切迫性が指摘されるなか、その必要性は一層大きくなっている。

地震による重力式岸壁の被災形態は、堤体が沈下や傾斜を伴いながら海側に変位し、それに伴い堤体背後に段差が生じるものであり、堤体そのものの破壊が問題とならなかった事例はこれまでの大規模地震時にも報告されておらず、ある程度目視による利用可否の判断が可能である。

一方、矢板式や栈橋式のように鋼部材を主体とする岸壁では、部材の損傷により構造上の安定が失われた事例があることから、部材の応力状態を必ず確認する必要がある。特に、過去の被災では地中部の鋼部材に損傷が生じていた事例があり(図-1)、目視調査や潜水調査だけでは利用可否の判断は困難である。

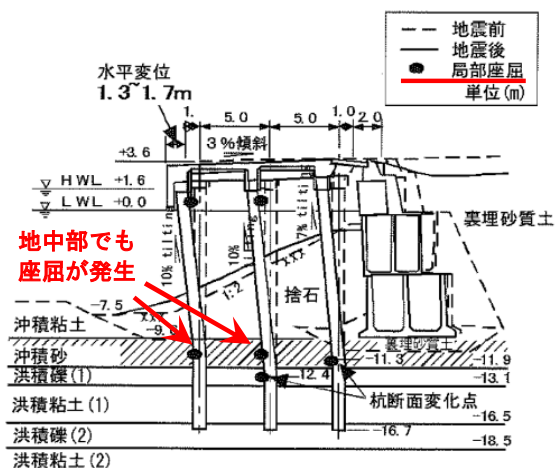


図-1 兵庫県南部地震における栈橋の被災事例¹⁾

本検討は、矢板式岸壁を対象に、事前に「岸壁の残留水平変位」と「鋼部材の応力状態」の関係を地震応答解析により施設ごとに求めておき、地震後、残留水平変位の実測値から鋼部材の応力状態を推定し、構造上の安定性を評価した上で、利用可否判断を行う手法の確立を目的としている。

2. 検討方法

(1)地震応答解析プログラム

地震動により発生する「岸壁の残留水平変位」と「鋼部材の応力状態」の解析にはFLIP (Finite Element Analysis Program for Liquefaction Process) を用いる。FLIPは、兵庫県南部地震の被災事例等の分析を通じて、数多くの港湾の施設の変形照査への適用性が確認されており、地震時の港湾構造物の変形挙動の再現性が高い有限要素法による数値計算モデルである。

(2)岸壁の残留水平変位の計測

一般に、係留施設の変位は、「地殻変動による変位」と「係留施設の変形による変位」の和である。

このうち、「地殻変動による変位」は鋼部材の応力評価には関係なく、鋼部材の応力状態に基づく安定性の評価を行う上では、「係留施設の変形による変位」のみを適切に計測することが重要である。

本検討で扱う「残留水平変位」とは、係留施設の変形による法線天端の変位量（法線水平変位量）を示すものとする。（図-2）

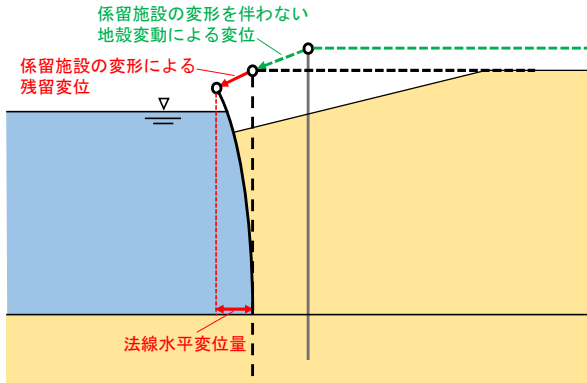


図-2 係留施設の変形による残留水平変位（法線水平変位量）

なお、地震による矢板式岸壁の被災形態は図-3 に示すような種々の形態が想定される²³⁾。このうち、過去の被災事例では、矢板頭部の海側への変位（変形モードA）及び矢板中腹部のはらみ出し（変形モードB）が多く確認されている。変形モードBにおいては、最終的な利用可否を判断する際に中腹部の水平変位にも留意する必要がある。一方、タイ材の破断（変形モードC）及び矢板根入れ部の変位（変形モードD）のような被災形態も想定されるが被災事例の報告は少ない。

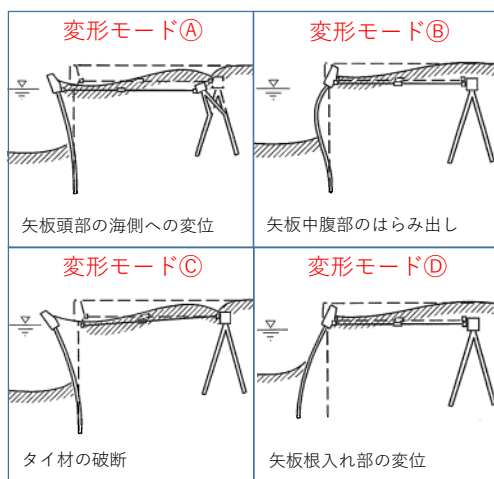


図-3 矢板式岸壁の被災形態（変形モード）

(3)鋼部材の応力状態の評価

構造上の安定に影響を及ぼす鋼部材の応力状態の評価については、地震中に発生する最大応答値が限界値に至

っていないければ、その鋼部材には残存耐力があると評価し「使用可」と判断する。ここで、地震に対する各鋼部材の限界状態は、耐震強化岸壁（標準、緊急物資輸送対応）に対する要求性能を参考とし、前面矢板及び控え工は限界曲率（前面矢板及び控え工の損傷）、タイ材は破断強度を指標とする。

また、地震後の施設の利用可否判断においては、地震によって変形した状態で船舶の係留が可能かを確認しておく必要がある。船舶係留時（牽引時、接岸時）の耐力評価は、施設の使用性を確保する観点から、変動状態（牽引時、接岸時）に対する通常の照査事項として、降伏に対して評価を行う。

地震時及び船舶係留時の鋼部材毎の評価項目を表-1に示す。それぞれの比が 1.0 を超えるかどうかで鋼部材の応力状態を評価する。

表-1 鋼部材の応力状態の評価

	鋼部材	評価項目
地震時	鋼材 (前面矢板、控え工)	最大曲率比 (= 発生最大曲率 / 限界曲率)
	タイ材	強度比 (= 発生最大張力 / 破断強度)
係留時 (牽引時) (接岸時)	鋼材 (前面矢板、控え工)	設計耐力比 (= 発生最大応力 / 降伏応力)
	タイ材	強度比 (= 発生最大張力 / 降伏強度)

(4)判断指標の設定方法

地震動の振幅や継続時間の異なる地震波形を使用して、施設毎に FLIP を用いた地震応答解析を複数ケース実施し、各ケースの残留水平変位量と鋼部材の応力状態（最大曲率比等）の関係をグラフにプロットする。これにより、図-4 に示すような関係図が作成できる。ここに、最大曲率比 1.0 のラインを超えない限界の残留水平変位量を閾値（判断指標）として設定する。なお、閾値は、本検討の解析精度や実際の現地での測量精度を鑑み 5 cm 刻みで設定する。（図-4 の場合、36 cm を切り下げて 35 cm とする）

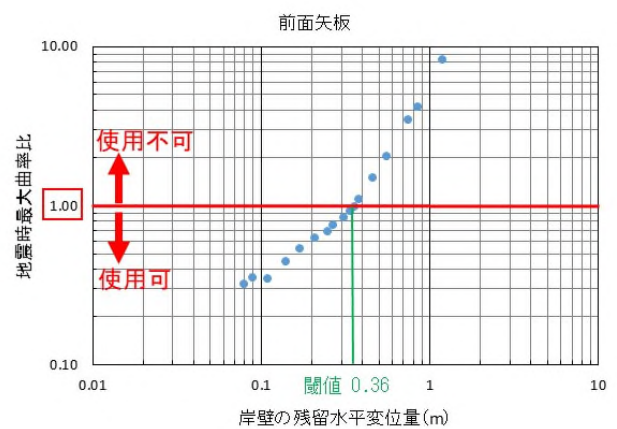


図-4 閾値（判断指標）の設定例

続いて、船舶係留時に対する判断指標の設定を行う。地震時の応答解析後の応力状態を引き継いで、FLIP に

より船舶係留時の牽引力（または接岸力）と上載荷重を作用させた時の残留水平変位量と鋼部材の応力状態（設計耐力比等）の関係を整理し、地震時と同様に閾値（判断指標）を設定する。

これらの結果から、例えば地震後の応力状態が満足していても船舶係留時の応力状態が 1.0 を超える場合には、条件付きでの利用を可とする。「条件付利用可」と判断された場合には、動態観測など、水平変位の進展がないか確認を行いながらの利用とする。

地震時及び船舶係留時の応力状態と利用可否の関係を表-2に示す。

表-2 鋼部材の応力状態と利用可否

利用可否	鋼部材の応力状態	
	地震時	船舶係留時（牽引時/接岸時）
利用可	鋼材の最大曲率比 ≤ 1.0 （又はタイ材の強度比 ≤ 1.0 ）	鋼材の設計耐力比 ≤ 1.0 （又はタイ材の強度比 ≤ 1.0 ）
条件付利用可		鋼材の設計耐力比 > 1.0 （又はタイ材の強度比 > 1.0 ）
利用不可	鋼材の最大曲率比 > 1.0 （又はタイ材の強度比 > 1.0 ）	

3. ケーススタディ

(1)対象施設

苫小牧港西港区勇払地区-9.0m 岸壁を対象として利用可否の判断指標の検討を行う。同岸壁は苫小牧-東京間を就航する RORO 船（フェリー型貨物船）が利用している岸壁であり、地震発生後、早期の利用可否判断が求められる岸壁の一つである。

同岸壁の構造は控え直杭式矢板構造（図-5）となっており、非耐震強化岸壁である。

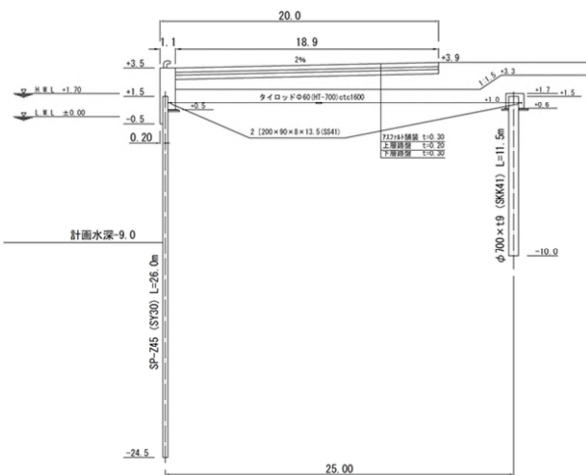


図-5 標準断面図（勇払地区-9.0m 岸壁）

(2)入力地震動

港湾における岸壁の設計では、港毎に設定されたレベル1地震動をもとに、設計対象施設の構造形式や周辺地盤を考慮した照査用震度を算定して地震時の照査を行う。また、耐震強化岸壁の場合は、港近傍の活断層による地

震をはじめ、設計対象施設に最大の被害をもたらさうる地震を選定してレベル2地震動を設定する。

一方、閾値の精度を高めるためには、鋼部材の応力状態（最大曲率比等）が 1.0 付近となる地震動が望まれ、本検討では、それを探るために実際に当該施設周辺で起こりうる多くの地震動を用いることとし、苫小牧港のレベル1地震動（再現期間 75 年の地震）をもとに、再現期間や加速度を調整した複数の地震動を用意した。加えて、苫小牧港の耐震強化岸壁の設計で使用したレベル2地震動（石狩低地東縁断層帯地震、M6.5 直下型地震）や平成 30 年の北海道胆振東部地震で観測された地震波形を用いることとした。

苫小牧港のレベル1地震動に対して加速度調整を行った入力地震動の例を図-6に示す。例えば、最大加速度 200Gal の入力地震動を作成する場合、レベル1地震動の最大加速度 147.88Gal に対する増幅率を用いて波形全体の振幅を一律に増幅させている。

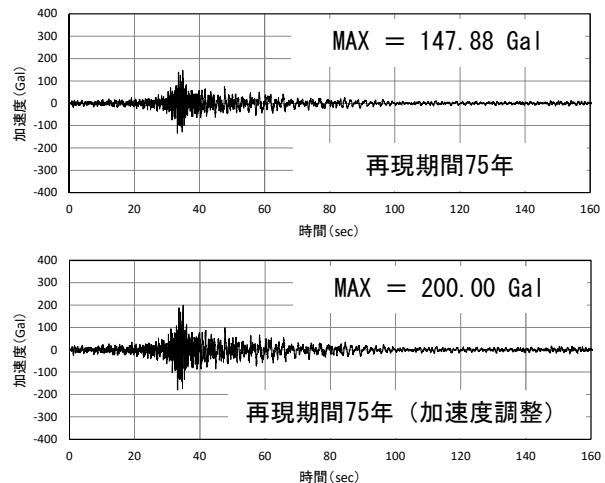


図-6 入力地震動の例（上：レベル1地震動（再現期間 75 年）の波形、下：再現期間 75 年の加速度調整後の波形）

(3)地震応答解析（FLIP）のモデル設定

図-7に本施設の地震応答解析モデル図を示す。モデルの左右両端は、岸壁法線を中心とし、海側陸側それぞれ 100m になるように設定し、解析モデルの底面は N 値 50 以上の工学的基盤層の上面とし、底面粘性境界を介して地震加速度波形を入力した。奥行き幅は単位幅（1.0m）当たりとし、控え杭とタイ材については設置間隔を単位幅に換算して部材諸元を設定した。

また、苫小牧港は掘り込み港湾であり、当該施設も掘り込み式で築造された矢板式岸壁であることから、初期自重解析においては岸壁前面の掘削による応力開放を考慮する必要があったため、以下に示す 2 段階の築堤解析により地震前の初期応力状態を評価した。まず、第 1 段階では掘削された土の自重相当の有効上載圧を海底面に分布荷重として作用させ、矢板の水平方向変位は拘束した状態で自重解析を実施することで岸壁建設前の地盤応

力状態を再現した。次の第2段階では第1段階で海底面に作用させた有効上載圧と矢板を固定したために生じた水平方向反力が解消する方向に力を作用させることで、掘削による応力の開放を再現した。これにより、矢板受働側の鋼材と土の間の摩擦が発揮されて、受働側土要素に適切な拘束圧が付与される。

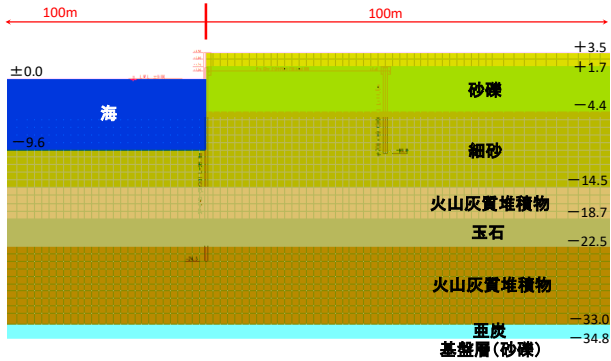


図-7 地震応答解析 (FLIP) モデル図

(4)地震応答解析 (FLIP) の結果

各地震動に対する応答解析結果の一部を表-3 に、図-8 にはケース 9 の残留変形図を示す。地震時の解析結果では、控え杭の最大曲率比がケース 9 (残留変位量 15 cm) とケース 10 (同 16 cm) で 1.0 を前後していることが判る。また、続いて実施した船舶係留時 (牽引時) の解析結果では、同じく控え杭において、設計耐力比がケース 5 (同 11 cm) とケース 6 (同 13 cm) で 1.0 を前後する。いずれも控え杭の応力がクリティカルとなっている。

本施設は、設計当時、控え杭の頭部変位量を抑制するよう設計されており、控え杭の剛性が高い。そのため、地震時の土圧等に対して主に控え杭で抵抗していること

から、前面矢板よりも高い応力が発生しているものと考えられる。また、表中の変形モードは、図-3 における変形形態を示しているが、控え杭の最大曲率比が 1.0 を超えない範囲では変形モード B となっている。これは、控え杭が抵抗することで、図-8 に示すように前面矢板の頭部よりも中腹部のはらみ出しが大きい変形モード B になるものと思われる。そのため、控え杭の限界曲率を超えるような地震動が作用すると、控え杭が作用を負担できなくなり、変形モード A に移行して、水平変位量も大きくなると考えられる。

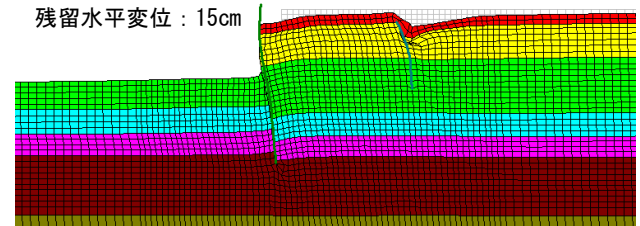


図-8 残留変形図 (ケース 9)

(5)判断指標の設定

地震時における控え杭の残留水平変位と最大曲率比の関係を図-9 に、船舶係留時 (牽引時) の残留水平変位と設計耐力比の関係を図-10 に示す。なお、それぞれ全検討ケースをプロットしているため、表-3 のケース数とは一致しない。それぞれの閾値は、地震時で最大曲率比 1.0 以下となる 15 cm、船舶係留時では牽引時の設計耐力比が 1.0 以下となる 11 cm とする。但し、前述のとおり、判断指標は 5 cm 刻みで設定するため、船舶係留時 (牽引時) については 11 cm を切り下げし 10 cm と設定する。

表-3 地震応答解析結果 (抜粋)

検討 ケース	地震動	最大基盤 加速度 (Gal)	天端残留 水平変位 (m)	変形 モード	地震時			船舶係留時(牽引時/接岸時)		
					前面矢板	控え杭	タイ材	前面矢板	控え杭	タイ材
					最大 曲率比	最大 曲率比	破断 強度比	牽引時 設計 耐力比	牽引時 設計 耐力比	牽引時 降伏 強度比
1	再現期間50年の確率波	124.52	0.06	B	0.203	0.347	0.256	0.221	0.481	0.478
2	再現期間75年の確率波	147.88	0.07	B	0.259	0.278	0.319	0.289	0.387	0.590
3	H30北海道胆振東部地震	318.43	0.11	B	0.342	0.477	0.349	0.392	0.624	0.417
4	再現期間100年の確率波(加速度調整)	163.92	0.12	B	0.309	0.585	0.346	0.334	0.821	0.577
5	再現期間100年の確率波(加速度調整)	158.96	0.11	B	0.299	0.622	0.333	0.325	0.882	0.571
6	再現期間75年の確率波(加速度調整)	164.15	0.13	B	0.295	0.735	0.339	0.302	1.131	0.544
7	再現期間75年の確率波(加速度調整)	169.00	0.14	B	0.316	0.735	0.334	0.310	1.047	0.547
8	H30北海道胆振東部地震(加速度調整)	319.50	0.15	B	0.365	0.811	0.320	0.342	1.084	0.383
9	再現期間75年の確率波(加速度調整)	167.80	0.15	B	0.331	0.916	0.334	0.305	1.256	0.541
10	再現期間100年の確率波(加速度調整)	165.00	0.16	B	0.324	1.237	0.328	0.300	1.363	0.516
11	石狩低地東縁断層帯地震A(加速度調整)	164.00	0.25	B	0.800	1.892	0.424			
12	再現期間100年の確率波(加速度調整)	164.00	0.18	A	0.303	2.347	0.293			
13	再現期間100年の確率波	165.58	0.23	A	0.325	3.754	0.355			

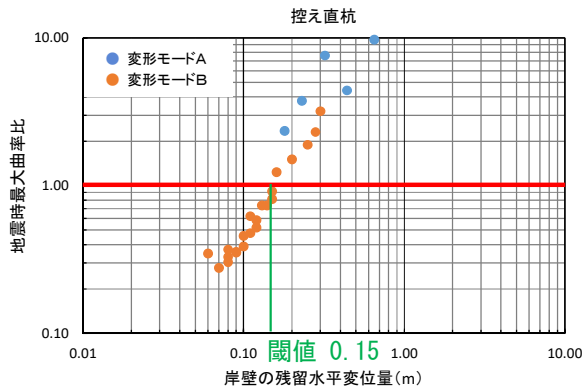


図-9 控え杭の残留水平変位と最大曲率比の関係

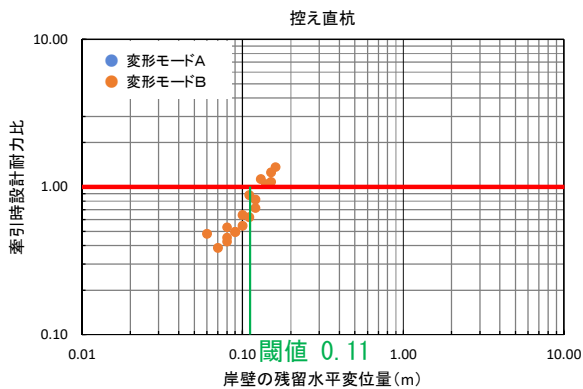


図-10 控え杭の残留水平変位と設計耐力比の関係

この結果から、残留水平変位量が 10 cm 以下の場合、地震時の発生応力が限界を超えず、船舶係留に対しても耐力を有するものとして「利用可」と判断する。また、残留水平変位量が 10 cm を超え 15 cm 以下である場合には、地震後の応力状態は問題ないと評価するが、船舶係留には注意が必要であることから、「条件付利用可」と判断し、動態観測などを行いながら岸壁を利用する。残留変位量が 15 cm を超える場合は構造上不安定であると評価し、「利用不可」と判断する。

4. 地震時の利用可否判断までの流れ

以上の検討は推定される鋼部材の応力状態から利用の可否を判断したものであり、例えば実際の現地では、岸壁 1 バースの全長が同じ量だけ変位を起こす事は考えにくく、バース中央部と端部の変位差が大きいため船舶の接岸が困難である場合や付属工の損傷なども考えられる。このため、港湾管理者、港湾利用者と国の三者で協議を行い、最終的な利用可否の判断を行うべきである。

地震発生後の最終的な利用可否判断までのフローを図-11 に示す。今回のケーススタディでは、 $Ds1=15.0\text{cm}$ 、 $Ds2=10\text{cm}$ となり、地震発生後、現地における残留水平変位 Dx を陸上計測し、フローに従い「利用可」、「条件付利用可」、「利用不可」の 3 段階の判断を行う。

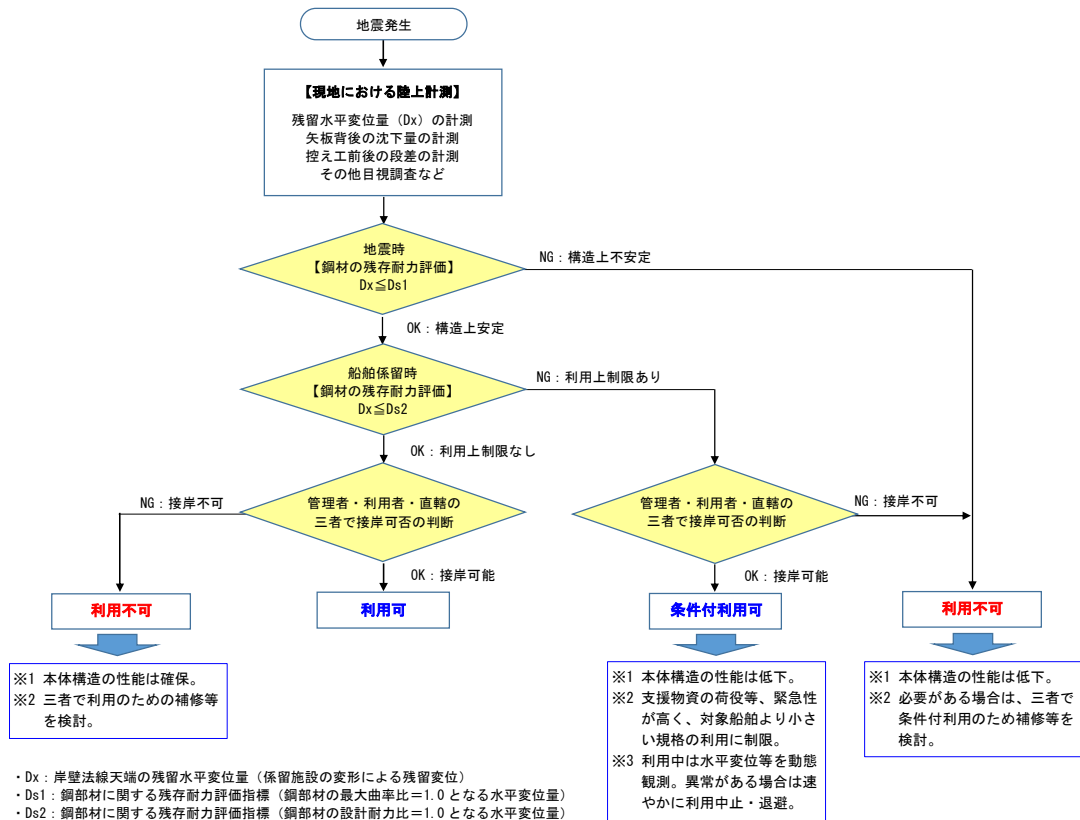


図-11 利用可否判断フロー

$D_x \leq D_{s2} \leq D_{s1}$ の場合は、施設としては本来の性能を確保していると考え、港湾管理者、利用者との協議を行い利用可とする。

$D_{s2} \leq D_x \leq D_{s1}$ の場合は、港湾管理者等との協議により「条件付利用可」とし、支援物資の荷役等、緊急性が高く、対象船舶より小さい規格に制限した上で、動態観測等で水平変位に進展がないかを確認しながら利用することとする。ただし、本来の性能は失っているため、早々に損傷部材の補修・復旧対策の検討が必要となる状態である。

5. まとめ

本報は、地震発生時における、鋼構造岸壁の利用可否判断指標を定めるため、変位量と部材の応力状態の関係から利用可否判断を行う手法について検討し、苫小牧港の岸壁をケーススタディとして「利用可」及び「条件付利用可」とする残留水平変位を設定できた。これにより、

地震発生後、地中部の調査等を実施しなくとも、迅速に岸壁の利用可否を判断することができると考えられる。

今回、控え直杭式矢板構造の検討結果を報告したが、控え組杭式矢板構造、栈橋式構造についても現在検討を行っている。また、前述のとおり、岸壁の残留水平変位量の計測にあたっては、地殻変動による変位を控除した変位量を把握する必要があり、現地計測の方法についても整理を行っていく。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻）、P. 1855
- 2) 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
- 3) 地震による岸壁の被災・復旧工法・耐震補強工法、港湾空港技術研究所資料、No. 1145, 2006