

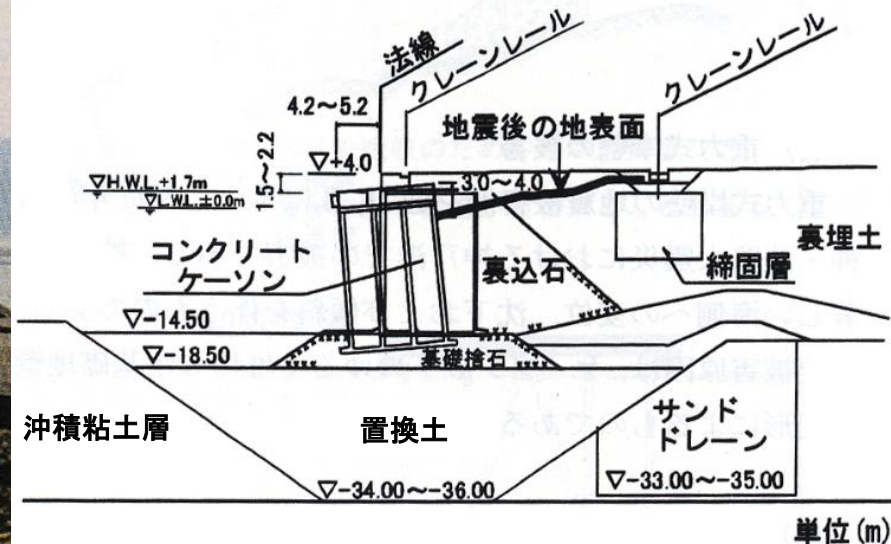
今後の地震に備えて(利用可否判断など)

(国研)海上・港湾・航空技術研究所
港湾空港技術研究所 地震防災研究領域
小濱英司

- 係留施設の地震被害の特徴
 - 重力式岸壁
 - 矢板式岸壁、栈橋
- 今後の港湾施設(係留施設)の大地震発生後の対応
 - 地震発生後の被害評価、利用可否判断の流れ
 - 現地確認前、強震動情報による評価
 - 港湾単位での評価、係留施設単位での評価
 - PSI値、FLIP解析
 - 現地立入可能後(現地調査実施後)の評価
 - 変位計測による評価

重力式(ケーソン式)岸壁の地震被害

- ケーソンが滑動、背後地盤が沈下
- 過去の地震被害においてケーソンの構造の損傷は報告されていない

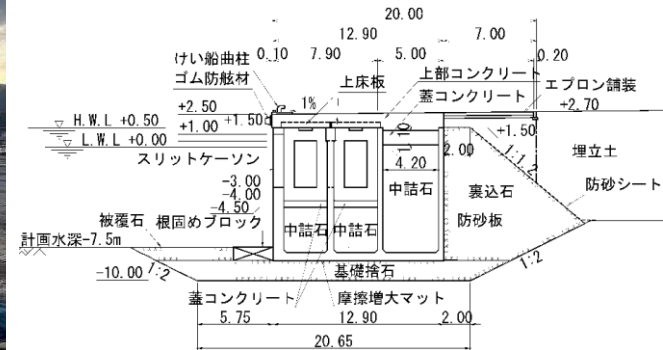
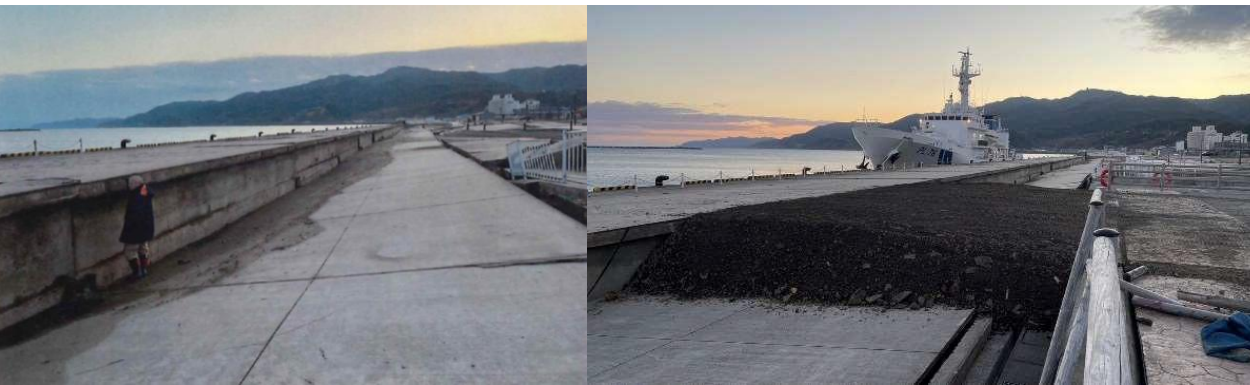


1995年兵庫県南部地震 神戸港ポートアイランド

重力式(ケーソン式)岸壁の応急復旧

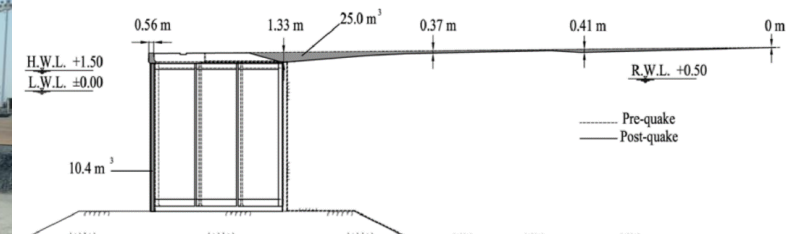
ケーソン上にアクセスするためのケーソン背後の沈下部に碎石、鋼板を敷く応急復旧が可能

2024年能登半島地震 輪島港マリンタウン岸壁(-7.5mスリットケーソン式)



竹信ら: 令和6年能登半島地震の発災直後における係留施設の利用可否判断事例とその課題, 土木学会論文集, 2024, 80巻, 18号.

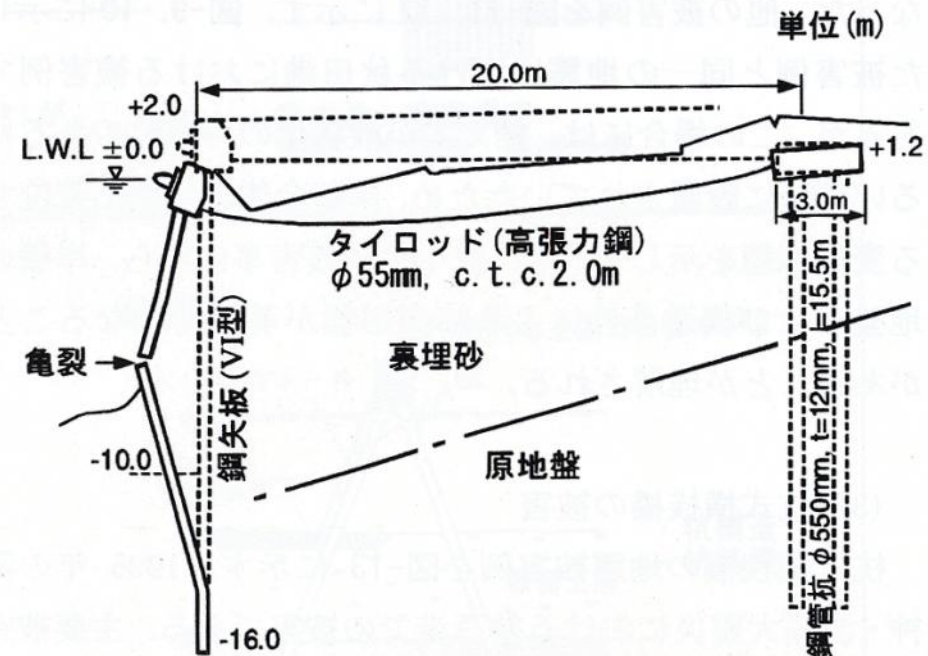
2011年東北地方太平洋沖地震 茨城港常陸那珂港区(-14mケーソン式)



矢板式岸壁の被害

秋田港大浜埠頭

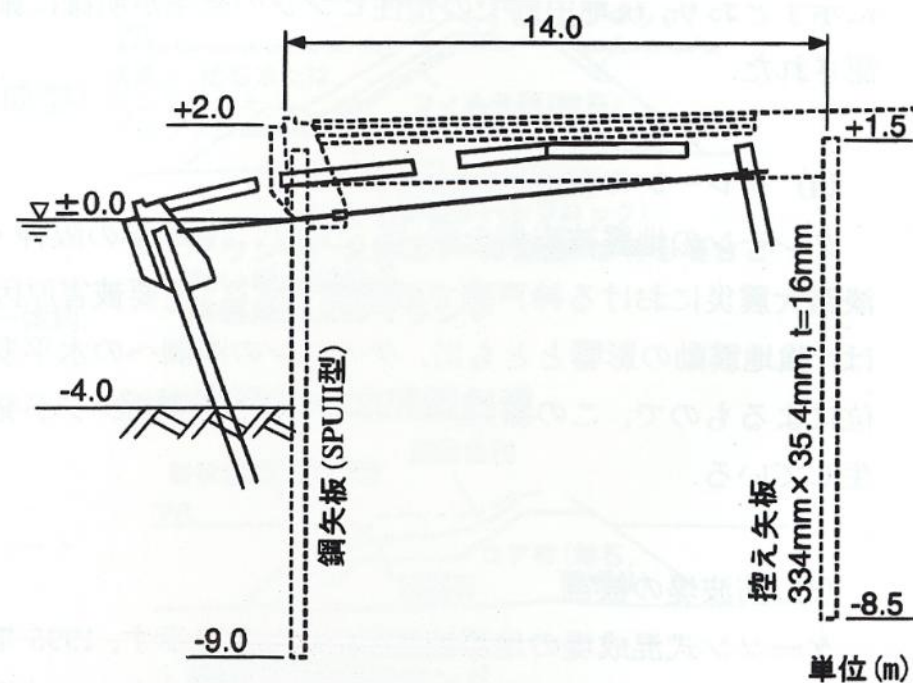
1983年日本海中部地震



矢板に亀裂発生
構造的に不安定

矢板式岸壁の被害

秋田港下浜埠頭、1983年日本海中部地震



神戸港高浜埠頭、1995年兵庫県南部地震

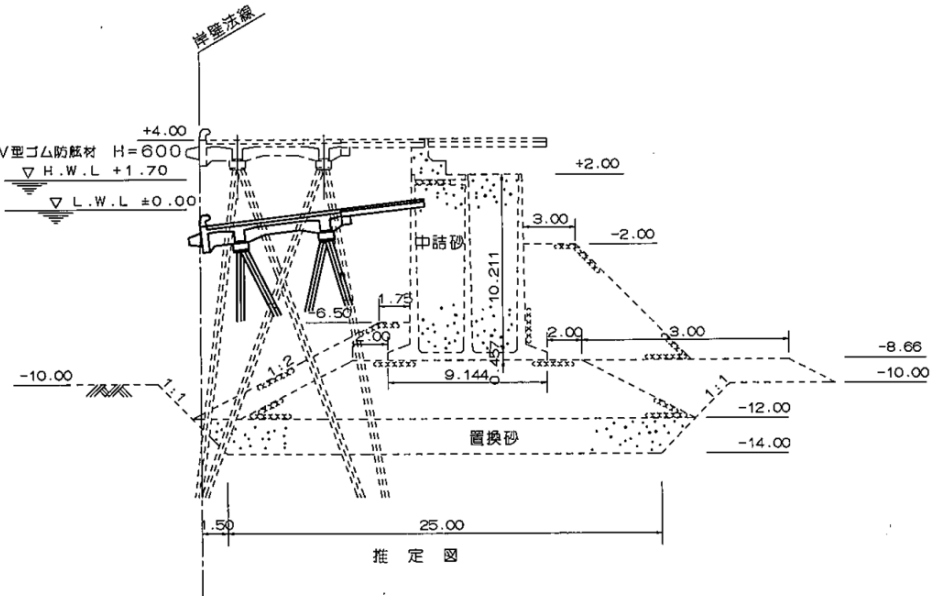
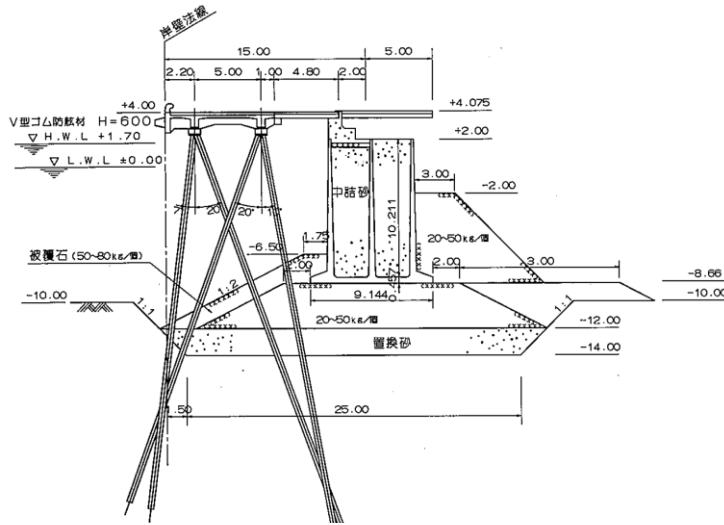


18

神戸港摩耶埠頭第1突堤第5岸壁

1995年兵庫県南部地震

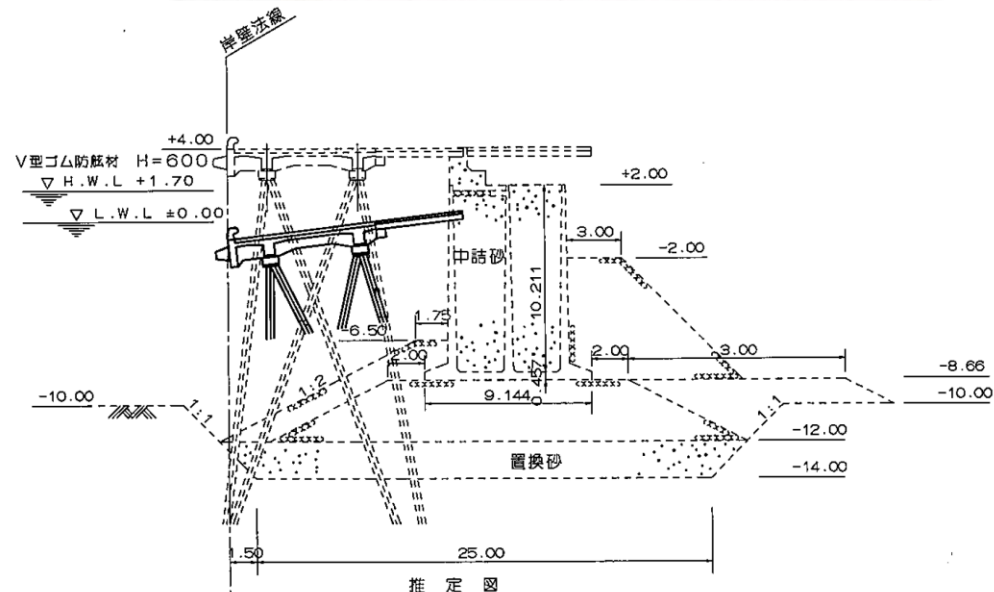
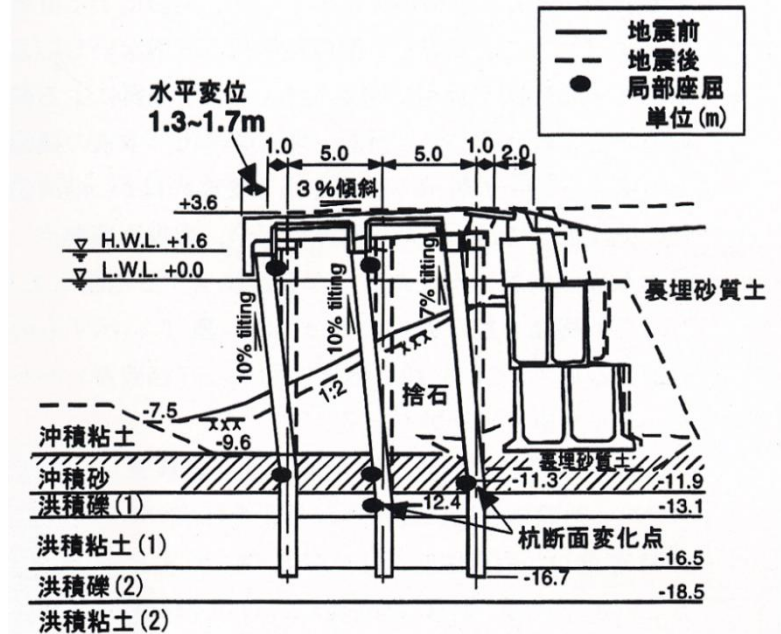
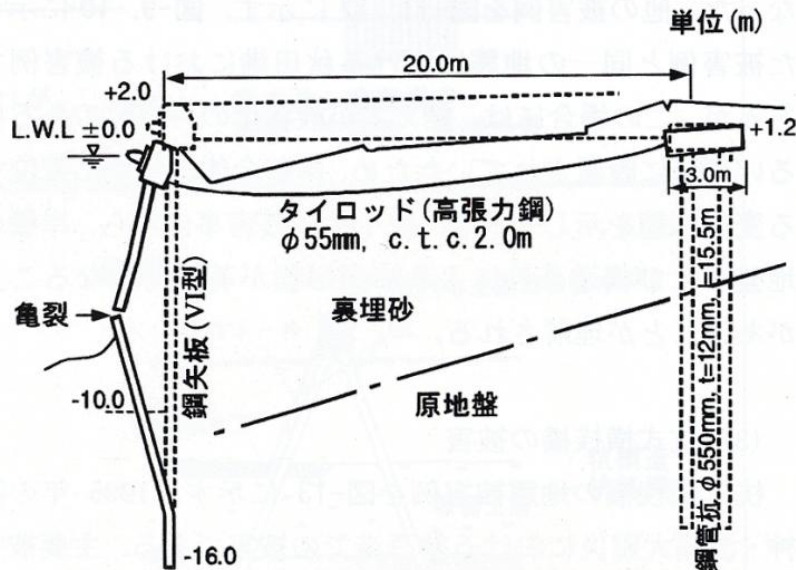
栈橋が倒壊、水没



矢板式岸壁、栈橋における構造部材の損傷

矢板式岸壁、栈橋では直接
目視出来ない箇所で構造部
材が損傷し、安定性が損なわ
れている可能性がある

⇒供用可否判断においては、
目視出来ない部材の損傷
も評価する必要がある



今後想定される地震発生後の被害評価、利用可否判断の流れ

※一部導入済

- 地震直後の地震動情報だけによる即時概略評価(港湾単位)
- その後の構造情報も考慮した評価(現地立入り前・後)(施設単位)

地震発生

津波警報発令

津波警報解除

数分～数時間

～数日

PSI値による
概略評価

(各港湾での被害発生
可能性の概略評価)

PSI値－損傷関
係による評価

中部地整 強震計観測情報を
用いたシステム

FLIP解析実施による評価

現地調査、変位－損傷関係による評価

(各係留施設の被災可能性の評価)

今後想定される地震発生後の被害評価、利用可否判断の流れ

※一部導入済

- 地震直後の地震動情報だけによる即時概略評価(港湾単位)
- その後の構造情報も考慮した評価(現地立入り前・後)(施設単位)

地震発生

津波警報発令

津波警報解除

数分～数時間

～数日

PSI値による
概略評価

(各港湾での被害発生
可能性の概略評価)

現地
立入
前

PSI値－損傷関
係による評価

中部地整 強震計観測情報を
用いたシステム

FLIP解析実施による評価

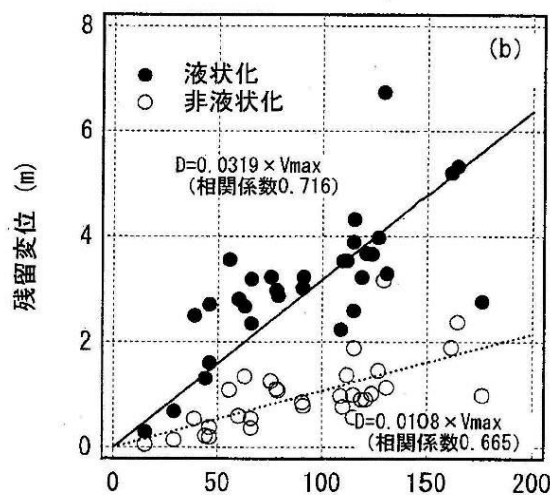
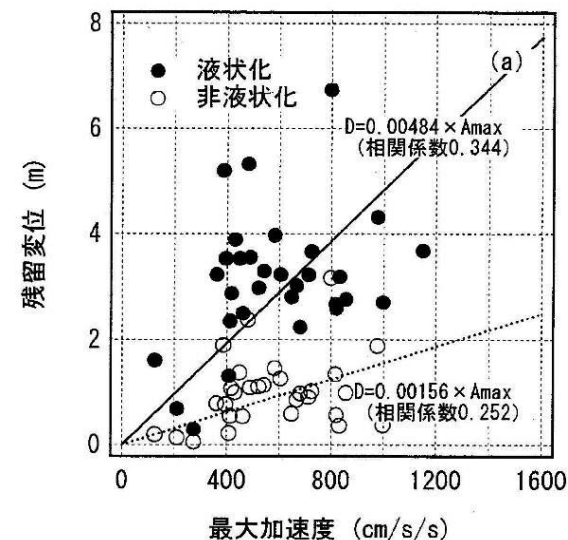
現地立入り後

現地調査、変位－損傷関係による評価

(各係留施設の被災可能性の評価)

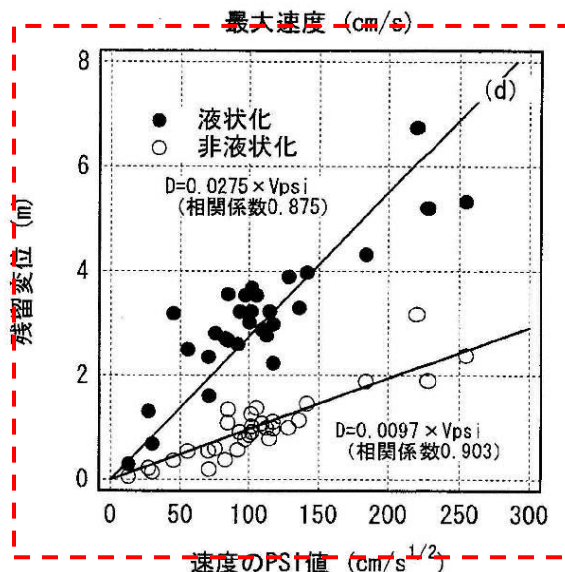
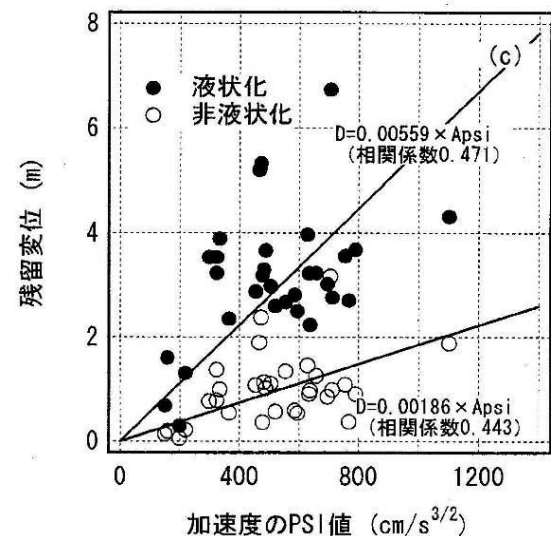
速度PSI値

- 港湾構造物の変形量と相関が高い地震動指標



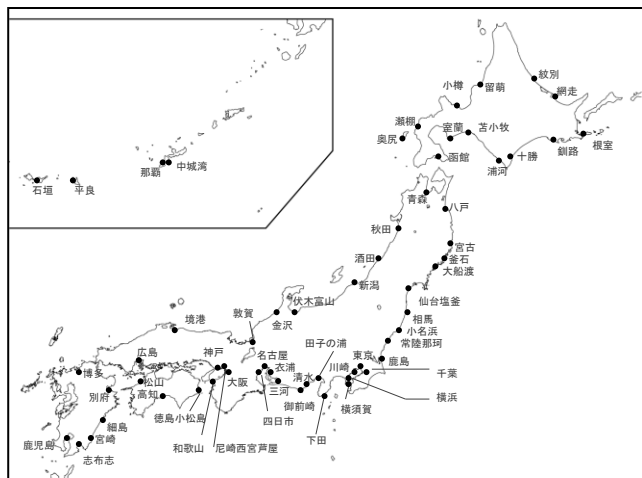
$$\text{速度のPSI値} = \int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt$$

野津厚・井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18~19, 2001.



港湾施設の地震被害即時推定への速度PSI値の活用

■港湾地域強震観測網



地震波形の速度(cm/s)を二乗し、
時間で積分した値の平方根※

$$PSI := \sqrt{\int_0^{\infty} (v(t))^2 dt}$$



※野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18-19, 2001.

■携帯へのPSI値の自動配信※※



港湾施設の甚大な被害ありそうか？
(初動で重要！)

※※若井淳, 野津厚, 菅野高弘, 長坂陽介: 港湾地域地震観測におけるデータ伝送方法の改良—地震動情報即時伝達システムの開発—, 港湾空港技術研究所資料No. 1310, 2015.

1995年兵庫県南部地震【神戸港】 (PSI値=99, 計測震度= 5.8(震度5強))



× 港湾全体が
甚大な被災を受けた



2021年福島県沖地震【相馬港】 (PSI値=32, 計測震度= 5.4(震度5弱))

通常岸壁(-10m)



× 岸壁変位(20cm程度)
⇒エプロン破損⇒供用停止

耐震強化岸壁(-12m)



○ ほぼ無被災
⇒地震直後から供用可能

PSI値を利用した港湾単位での係留施設を対象とした 被害有無・被害程度の判定表※

地表面の速度 PSI値(cm/s ^{0.5})	係留施設の 被害有無・被害程度	過去の代表的な被害事例
50 以上	<u>甚大な被害が発生している可能性が高い。</u>	<ul style="list-style-type: none"> ●1995年兵庫県南部地震 【神戸港（PSI=99）】 ●1983年日本海中部地震 【秋田港（PSI=61）】
25 以上 ～50 未満	<u>相当程度の被害が発生している可能性が高い。</u> ただし、被害が軽微である場合もある。	<ul style="list-style-type: none"> ●2016年熊本地震 【別府港（PSI値=46）】 ●2021年福島県沖地震 【相馬港（PSI値=32）】
10 以上 ～25 未満	<u>軽微な被害又は無被災である可能性が高い。</u>	<ul style="list-style-type: none"> ●2011年東日本大震災 【釜石港（PSI値=24）】 ●1993年釧路沖地震 【十勝港（PSI値=21）】
10 未満	<u>無被災である可能性が極めて高い。</u>	

※宮田正史，菅原法城，野津 厚，長坂陽介，小濱英司，大矢陽介，福永勇介，竹信正寛：港湾地域強震観測から得られる速度PSI値を用いた港湾単位での被害有無の概略判定手法，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，80(18)，24-18144，2024.

令和6年能登半島地震による強震観測地点での速度PSI値(cm/s^{0.5})

(データ提供: 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域)

<色塗地点: 港湾地域強震観測網、その他: 防災科学技術研究所、による観測地点>



強震観測実施港湾では地震発生直後に
PSI値がメール配信される
(能登半島地震では防災科研観測点も含め当日深夜にこの情報を取得)
(地震動グループにてPSI値算出)
⇒各港湾での被害発生有無を想定し、現地調査(Tec-Force)の手配等を調整

今後想定される地震発生後の被害評価、利用可否判断の流れ

※一部導入済

- 地震直後の地震動情報だけによる即時概略評価(港湾単位)
- その後の構造情報も考慮した評価(現地立入り前・後)(施設単位)

地震発生

津波警報発令

津波警報解除

数分～数時間

～数日

PSI値による
概略評価

(各港湾での被害発生
可能性の概略評価)

現地
立入
前

PSI値－損傷関
係による評価

中部地整 強震計観測情報を
用いたシステム

FLIP解析実施による評価

現地立入り後

現地調査、変位－損傷関係による評価

(各係留施設の被災可能性の評価)

PSI値－損傷関係による評価

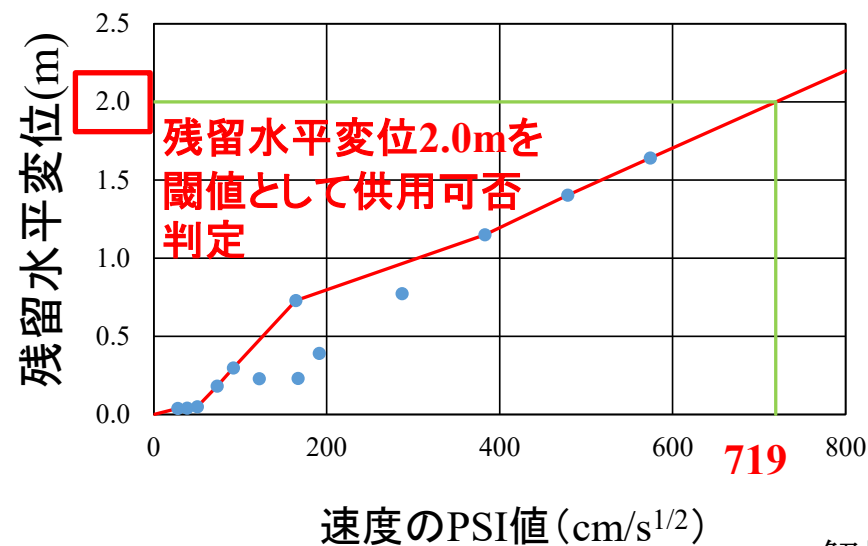
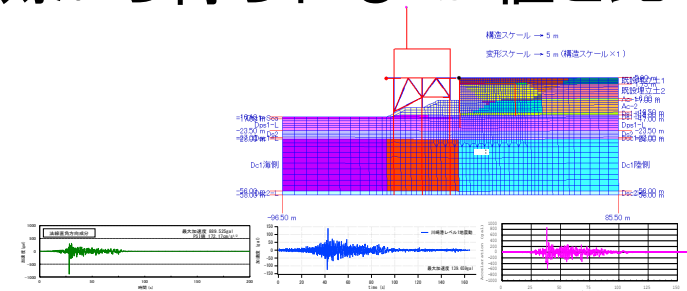
中部地整名古屋港湾空港技術調査事務所

強震計観測情報を用いた係留施設供用可否判定システム

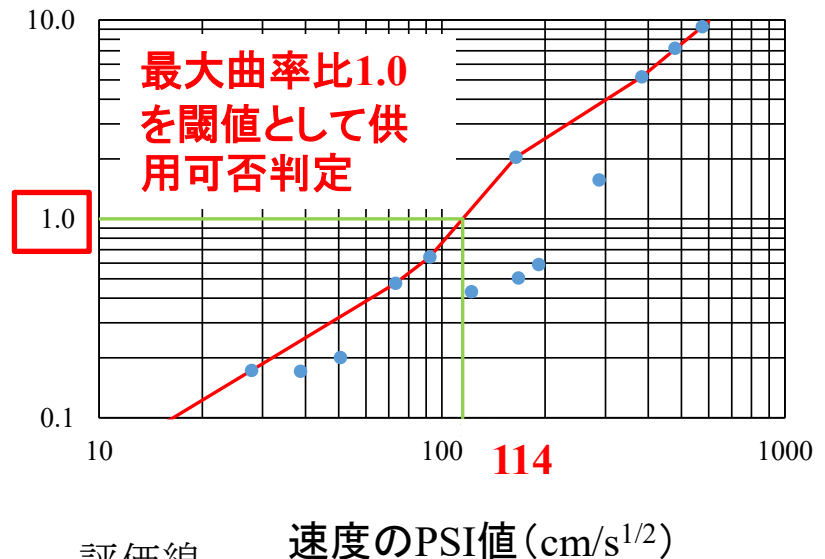
- 各個別の施設に対して様々な大きさの地震動(50年～500年の再現確率地震、L2地震等)を入力する複数のFLIP解析を実施
- 速度PSI値と残留水平変位、鋼部材の最大曲率比等の関係から利用不可となる速度PSI値を求め、強震観測から得られるPSI値と比較して供用可否を評価

※最大曲率比 = 最大発生曲率 / 限界曲率

$$\text{速度のPSI値} = \int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt$$



最大曲率比(地震中最大)

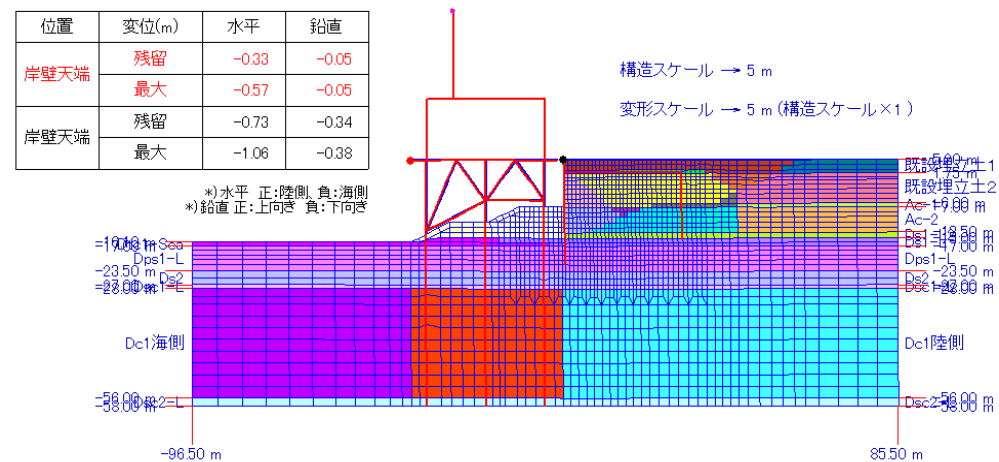


● 解析結果 — 評価線

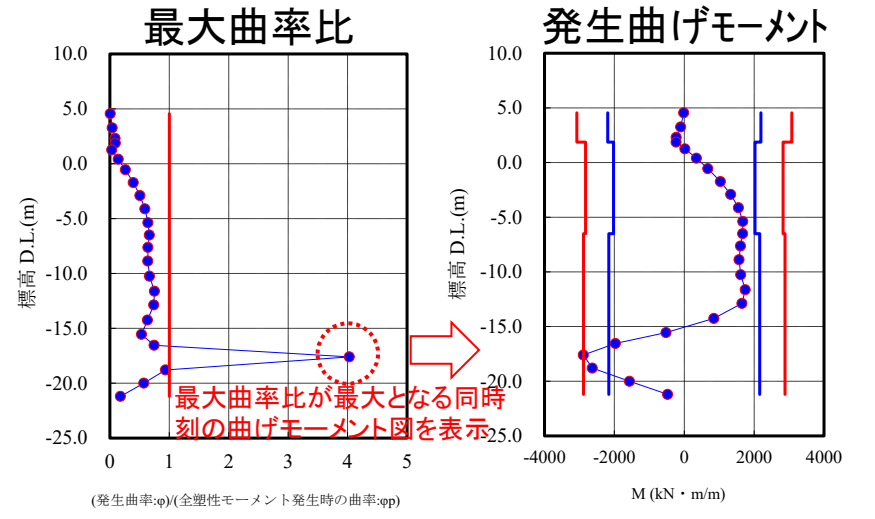
FLIP解析実施による評価

中部地整名古屋港湾空港技術調査事務所
強震計観測情報を用いた係留施設供用可否判定システム

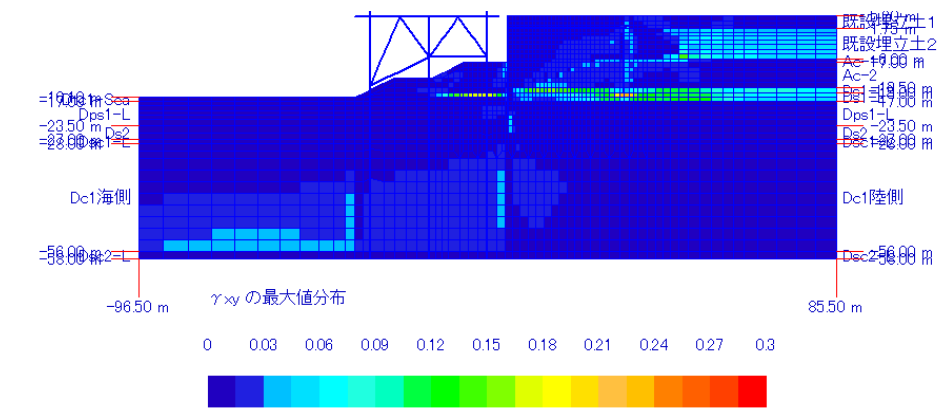
- 地震後に観測地震動を用いて施設個別にFLIP解析を自動実施し、詳細判定する



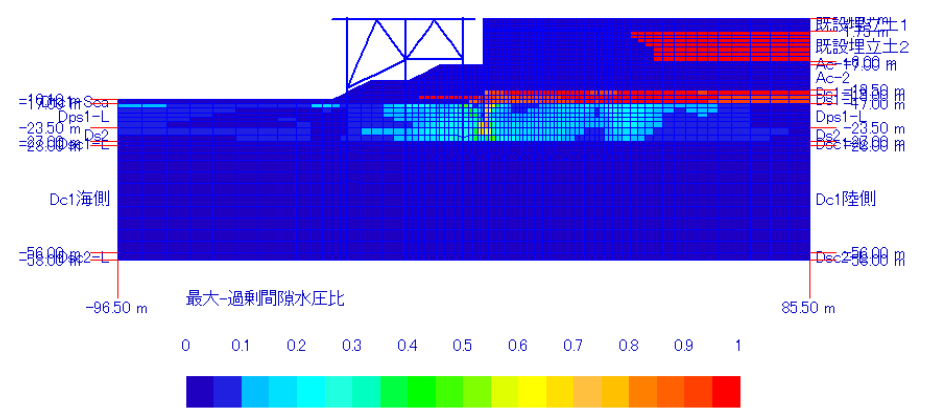
残留変形図



鋼材(土留矢板や栈橋杭等)の照査例



γ_{xy} の最大値分布

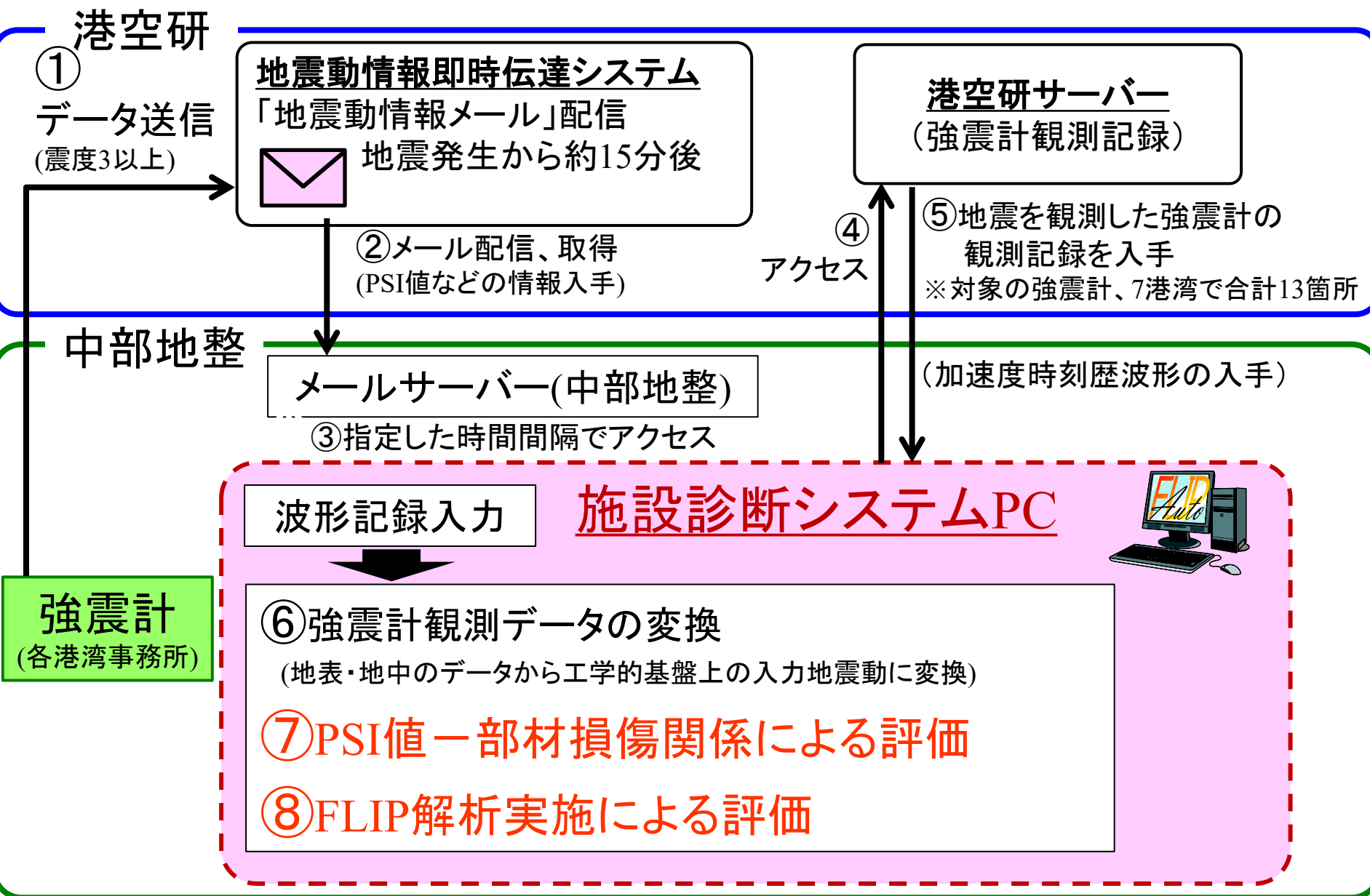


過剰間隙水圧比の最大値分布

強震計観測情報を用いた係留施設供用可否判定システム

システム構成の概要

中部地整名古屋港湾空港技術調査事務所



地震動情報即時伝達システム(港空研)の配信メール

地震後に港空研から強震動情報がメール配信される

※本メールは港湾地域強震観測網から(独)港湾空港技術研究所経由で自動配信されています。

2016年4月1日 11時40分頃、強震計が揺れを検知しました。
地震によるものかどうか確認中です。

興津-UB

PSI値 : $0.5 \text{ cm/s}^{0.5}$
計測震度相当値 : 1.2
最大加速度 : 1 Gal

三河-U

PSI値 : $0.8 \text{ cm/s}^{0.5}$
計測震度相当値 : 1.8
最大加速度 : 3 Gal

名古屋飛島-UB

PSI値 : $2.6 \text{ cm/s}^{0.5}$
計測震度相当値 : 1.8
最大加速度 : 2 Gal

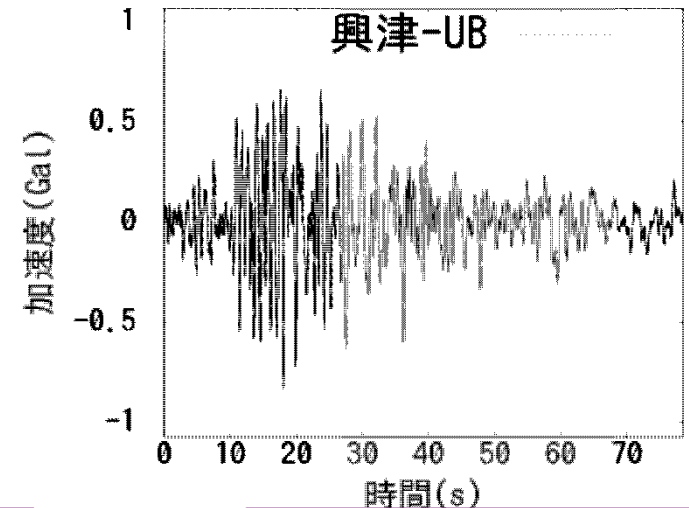
衣浦-UB

PSI値 : $2.2 \text{ cm/s}^{0.5}$
計測震度相当値 : 2.0
最大加速度 : 3 Gal

地震動が観測された
強震計ごとに“速度の
PSI値”、“計測震度相
当値”、“最大加速度”
が表示。

波形

波形 (SOUTH)



注: PSI値は速度波形の二乗積分値の平方根として定義される量で、港湾構造物の被害程度と良い相関を示します。

参考までに1995年兵庫県南部地震の際、神戸港工事事務所では $\text{PSI}=99 \text{ cm/s}^{0.5}$ 、1983年日本海中部地震の際、秋田港工事事務所では $\text{PSI}=61 \text{ cm/s}^{0.5}$ です。

注: 計測震度相当値を公表される際には「計測震度相当値」という名称で公表して下さい。

注: 最大加速度は港湾施設の被害の大小と結びつかない場合が多いので御注意下さい。

詳細は以下のページを参照して下さい。

興津-UB http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79232

三河-U http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79238

名古屋飛島-UB http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79223

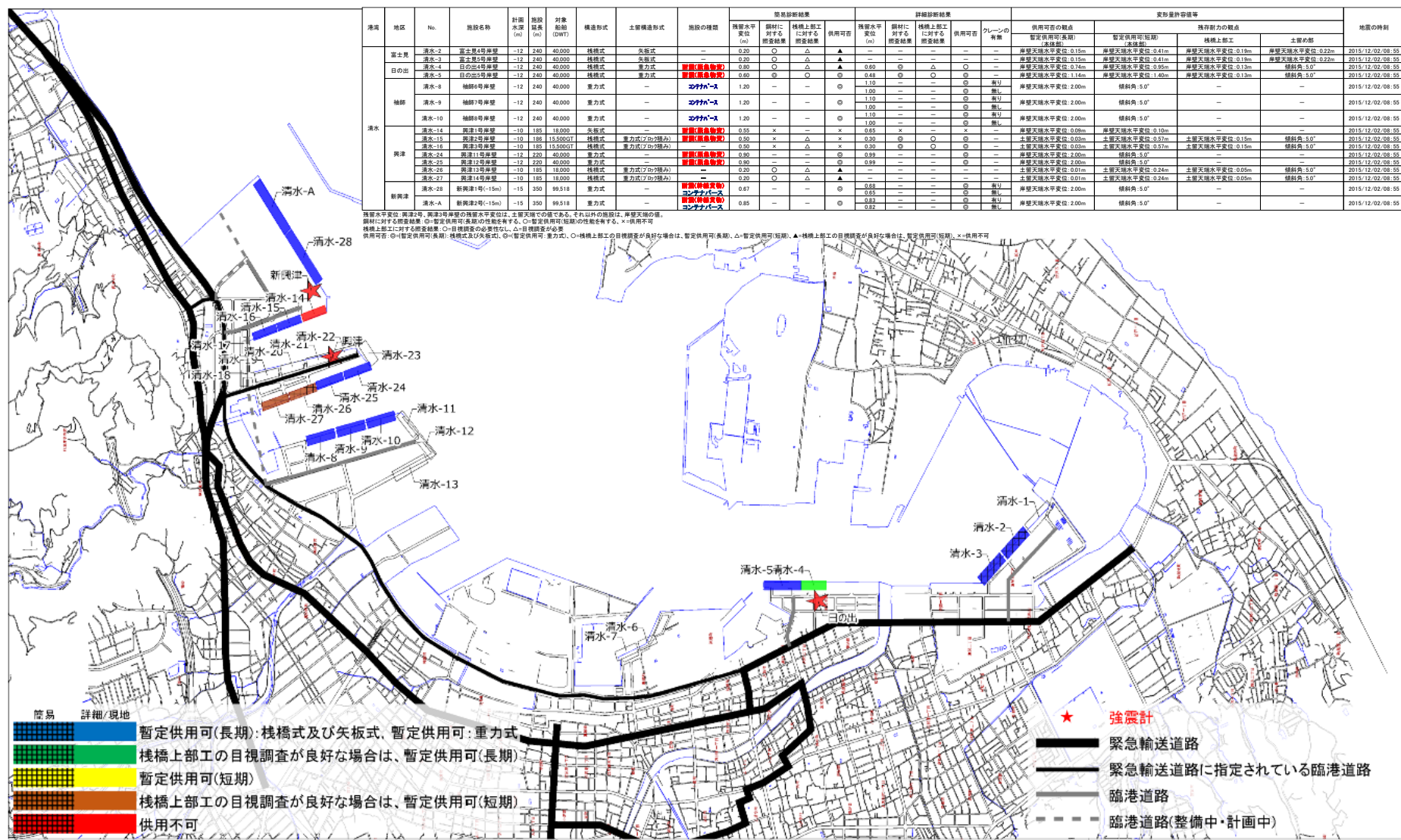
名古屋飛島-U http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79224

衣浦-UB http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79221

地震の波形情報
の在処を表示

中部地整名古屋港灣空港技術調査事務所

- PSI値－損傷関係、FLIP自動実施による評価結果をマップ上で表示
- 津波警報等で現地調査が出来ない間に活用



今後想定される地震発生後の被害評価、利用可否判断の流れ

※一部導入済

- 地震直後の地震動情報だけによる即時概略評価(港湾単位)
- その後の構造情報も考慮した評価(現地立入り前・後)(施設単位)

地震発生

津波警報発令

津波警報解除

数分～数時間

～数日

PSI値による
概略評価

(各港湾での被害発生
可能性の概略評価)

PSI値－損傷関
係による評価

中部地整 強震計観測情報を
用いたシステム

FLIP解析実施による評価

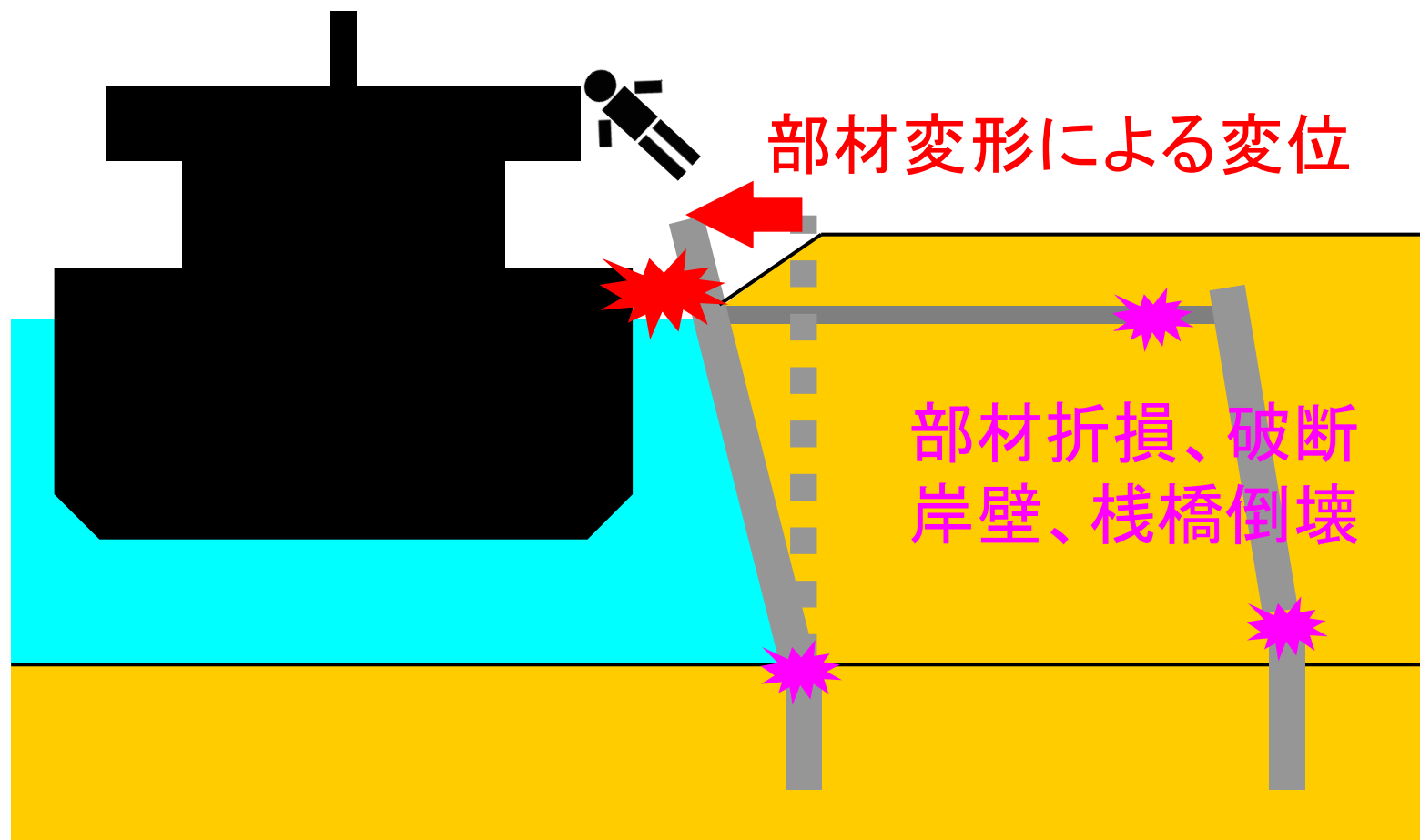
現地調査、変位－損傷関係による評価

(各係留施設の被災可能性の評価)

現地確認による安定性、利用可否の評価(矢板式岸壁、栈橋)

- 安定性に係わる部材損傷(変形、応力)を確認したいが、土中、水中の部材が多く、直接目視確認できない

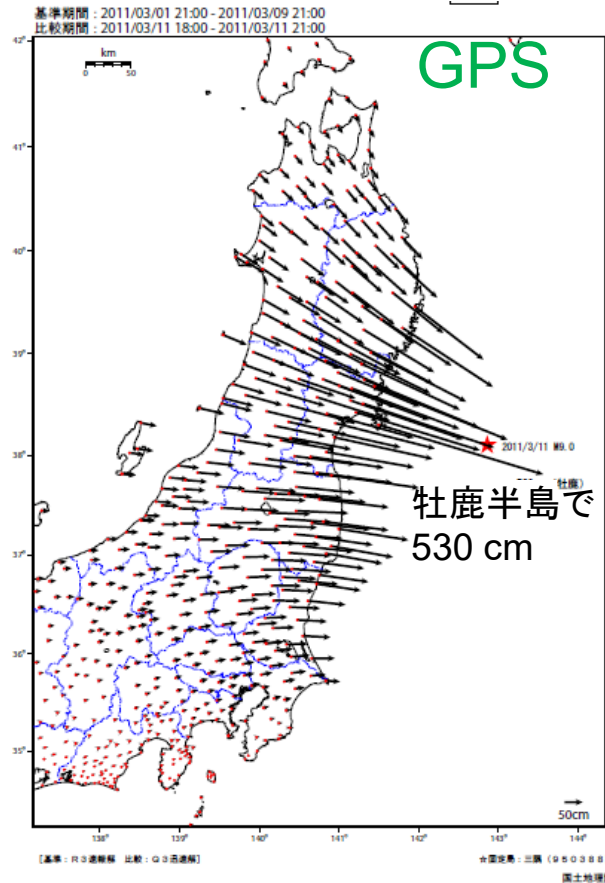
⇒部材変形による変位量を測ることにより、土中、水中の部材変形を評価(想像)して、基本構造安定性(供用可否)を判断



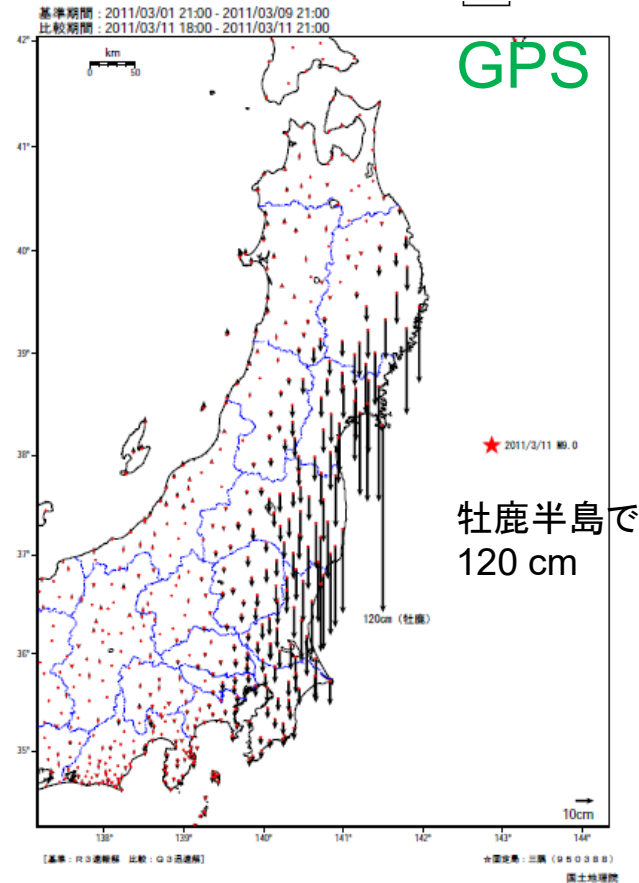
変位測定において、地殻変動の影響も考慮する必要

2011年東北地方太平洋沖地震での地殻変動

水平変位



鉛直変位



(国土地理院)

地殻変動により非常に大きな水平変位と鉛直変位が発生した。国土地理院のGPS連続観測によると牡鹿半島は約120cm沈下した。海上保安庁によると、震源付近の海底は約24m東南東に移動した。海底の移動は約50mという報告もある(海洋研究開発機構)。

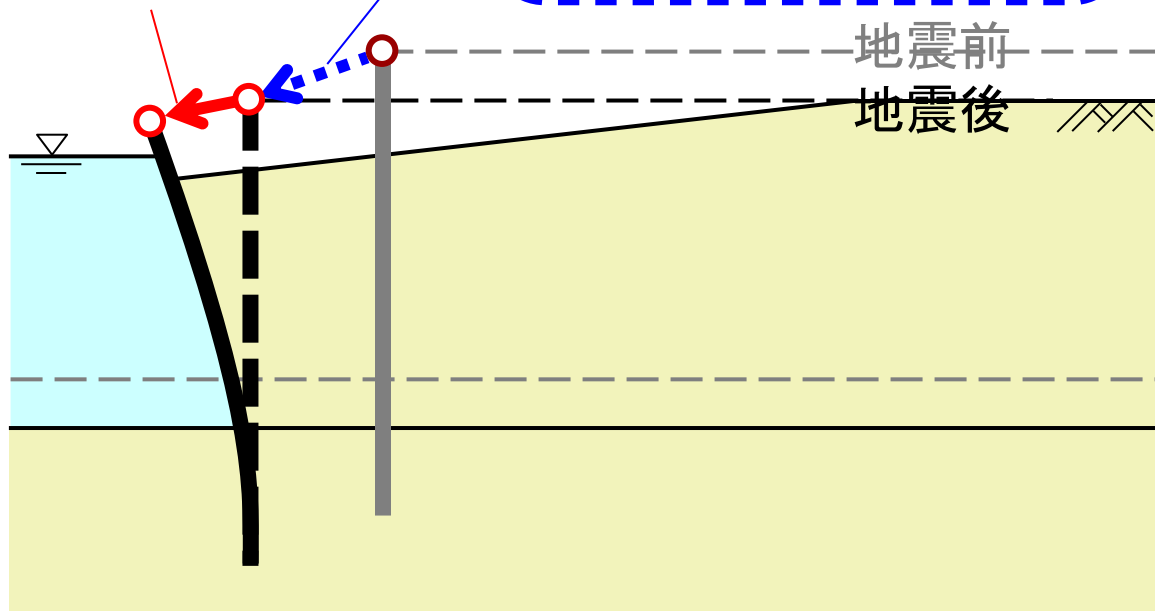
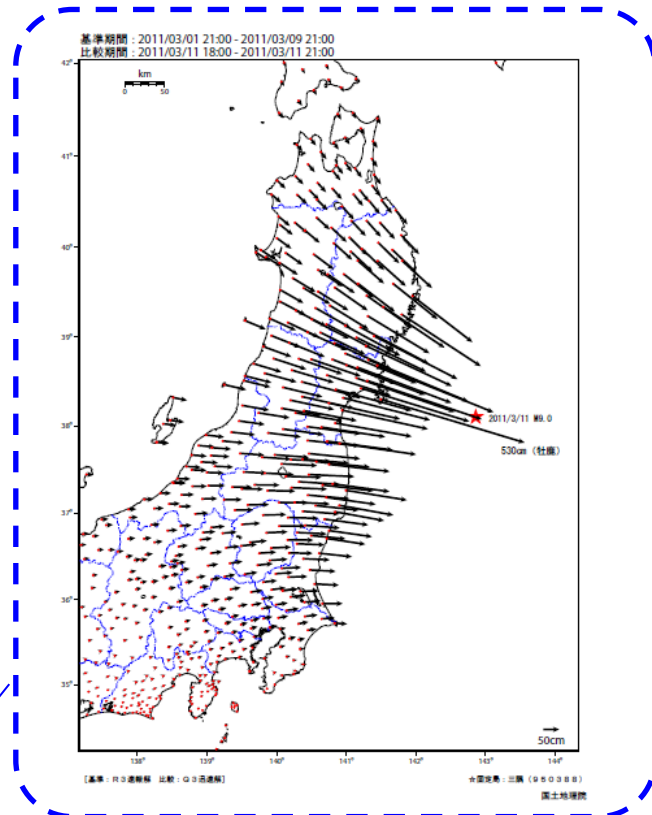
施設の変形による変位と 地殻変動による変位

- 大地震時で大きな地殻変動が生じた場合には、絶対座標の単純な差分(変位)には、施設の変形による変位のほかに、地殻変動による変位が含まれる

⇒地殻変動による変位が含まれないようにする必要

係留施設の
変形を伴わ
ない地殻変
動による全
体移動

係留施設の変形による
変位
(観測したい変位)



能登半島地震における国土地理院基準点成果の公表停止

多くの地域で地震後に国土地理院基準点の成果の公表が停止された
⇒測量実施が不可能に

令和6年能登半島地震に伴う基準点成果の公表停止について

お知らせ

「令和6年能登半島地震」により大きな地殻変動が確認された地域では位置の基準（国家座標）である基準点（電子基準点、三角点、水準点）の経緯度や標高の値が大きく変化しており、地震発生前の測量成果を使用して測量を行った場合、正確な測量成果を得ることができない可能性があります。このため、国土地理院では該当する基準点の測量成果の公表を停止しております。

当該地域及びその周辺で公共測量を現在実施中又は今後実施予定の場合、[北陸地方測量部又は関東地方測量部](#)にご相談ください。

また、測量成果の公表を停止した基準点の今後の措置等は、随時本ページに掲載していきます。

- 測量成果の公表停止（2024年1月5日）

測量成果の公表停止（2024年1月5日）

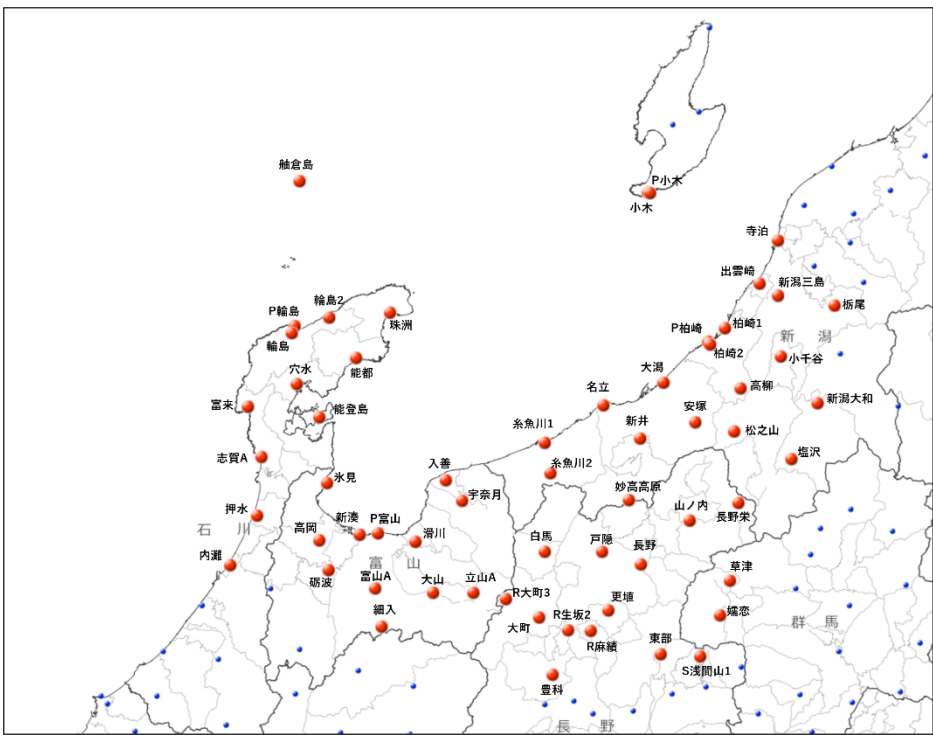
電子基準点

当該地域及びその周辺に位置する電子基準点の測量成果の公表を停止しました。

測量成果の公表を停止した点は、以下の60点です。

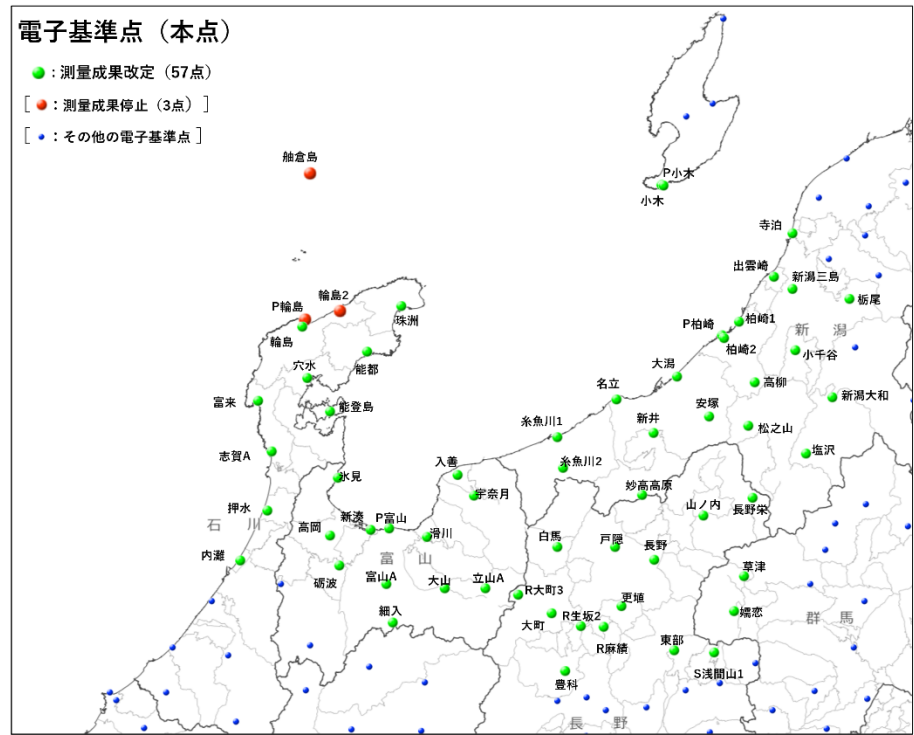
[詳しいリストについてはこちら](#)をご覧ください。

地震後の電子基準点の測量成果の公表停止(60点)



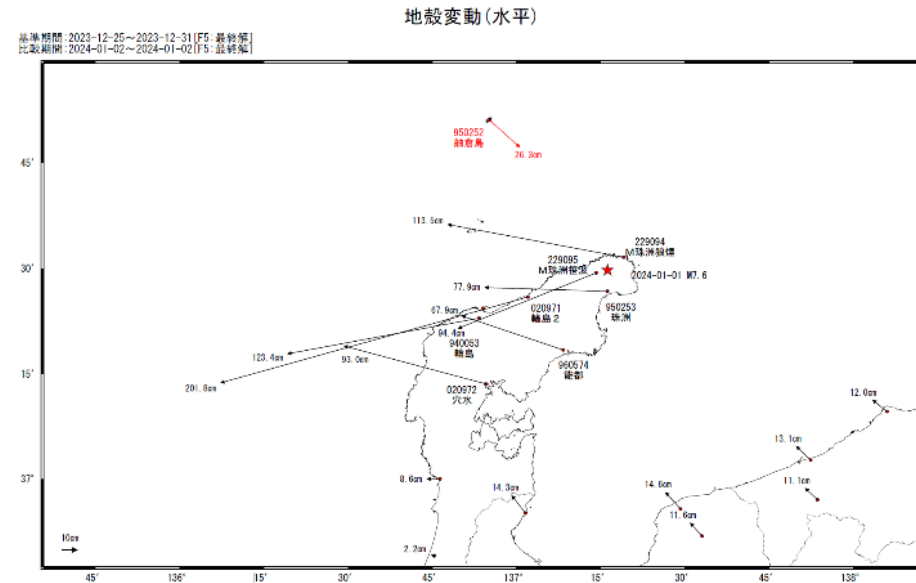
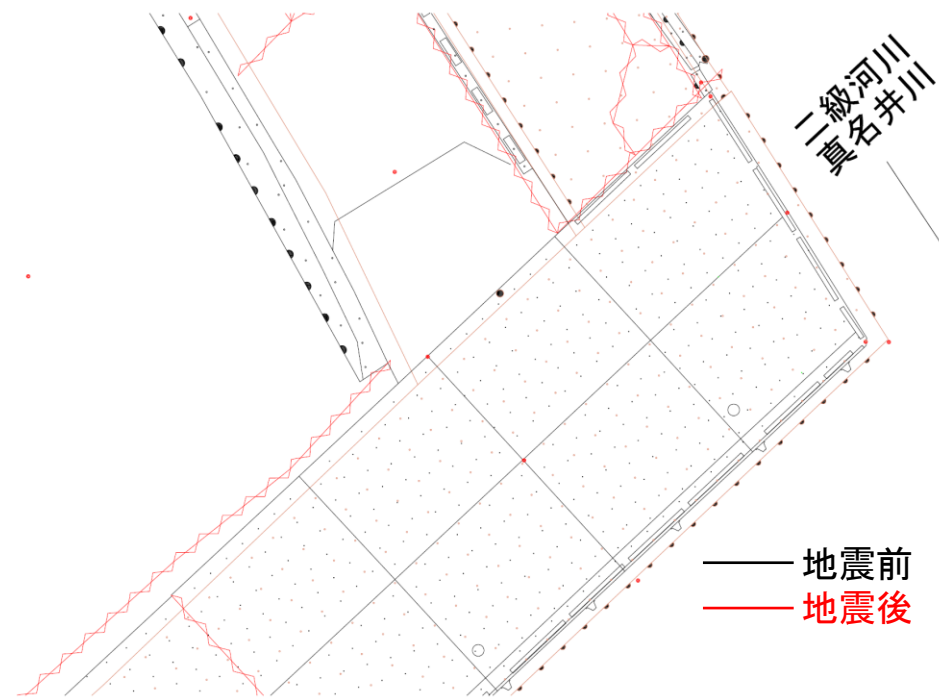
電子基準点(本点)57点の測量成果の改定・公表(2024年2月7日)

2024年2月7日



多くの電子基準点(57点)再開に1か月程度
一か月後でもまだ再開されていない電子基準点(3点)もある
⇒多くの地域で1か月程度GNSSでの正確な測量できなかった。

穴水港 地殻変動の測量への影響



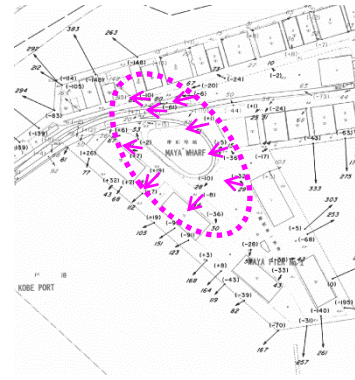
地震前後に測量した平面図を重ねると、地震後の岸壁法線が陸側に移動したような図となったが、岸壁が土圧に押されて海側に変形する通常地震時挙動とは異なり、不自然。

地震後の図は停止されていた電子基準点の測量成果(座標, 標高)が改定・公表された(2月7日)後に測量されており、地震により穴水で生じたおよそ西側への90 cm程度の地殻変動量が含まれているため、陸側に移動したような図となった。

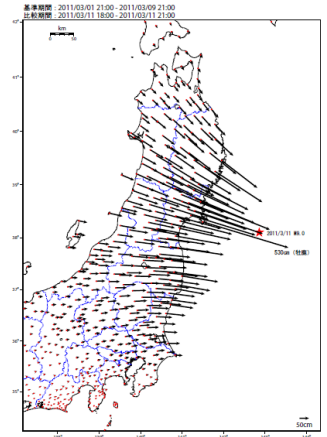
⇒ 構造物の変形による変位量を求めるには、その構造物の位置での地殻変動量を差し引くことが必要

施設安全性(施設の変形)に関する変位の測定方法

- 地殻変動分による変位を取り除くため、基準点を決め、そこからの地震前後の相対位置を比較して変位とする
- 基準点は地殻変動でのみ移動する点とする。地殻変動以外の護岸移動や液状化等のローカルな変状によって移動する箇所に置かない。



護岸移動、液状化等による変位



係留施設の変形を伴わない地殻変動による全体移動

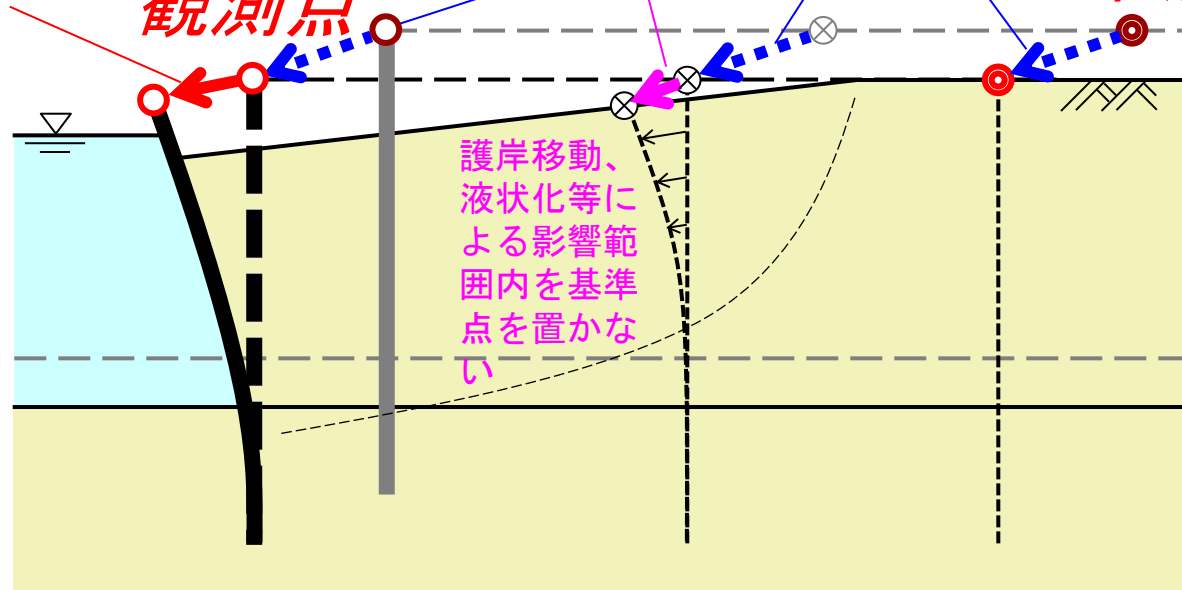
係留施設の変形による変位
(観測したい変位)

観測点

基準点

地震前
地震後

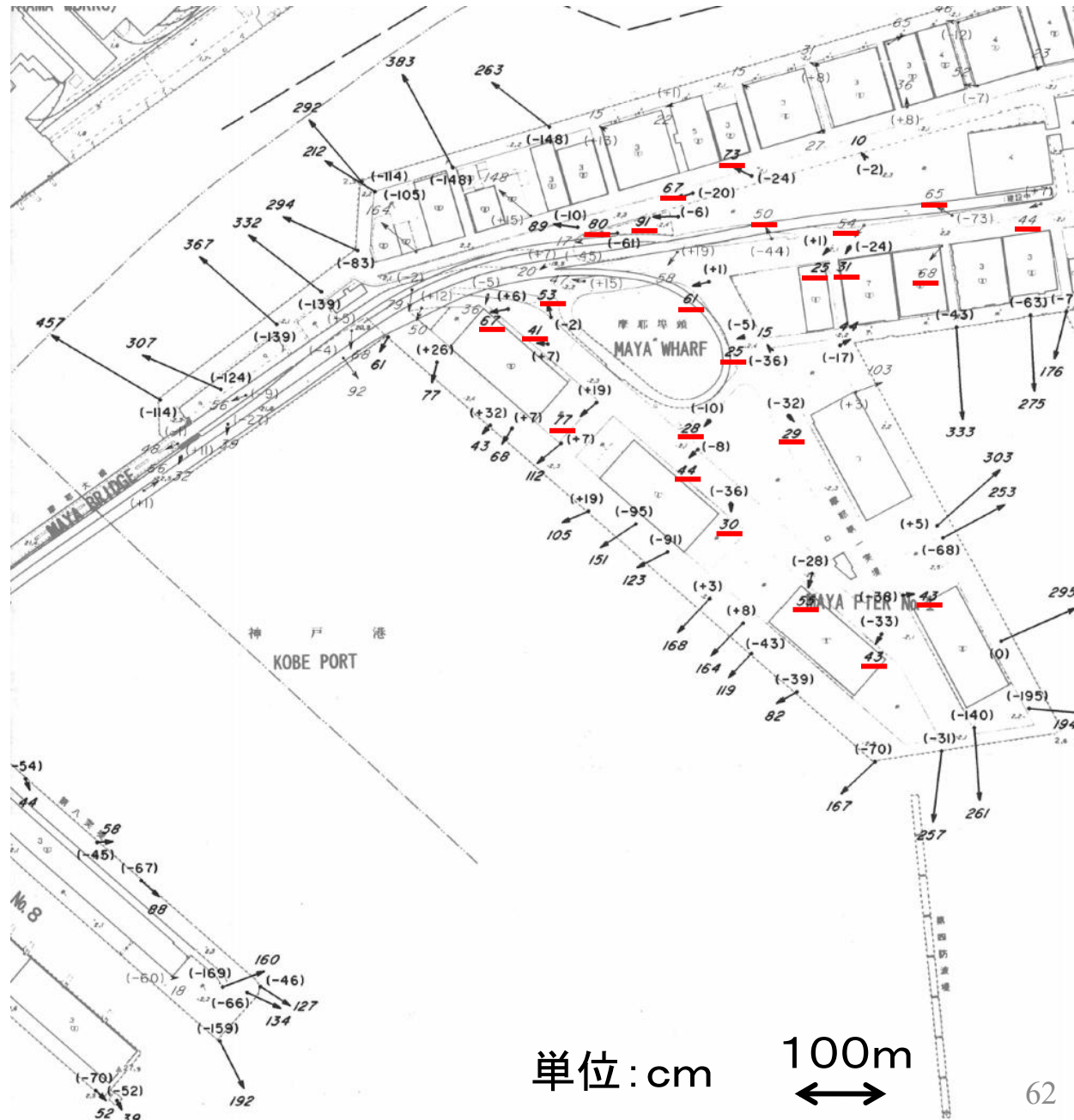
護岸移動、液状化等による影響範囲内を基準点を置かない



基準点は、液状化、側方流動等で動かない場所とする

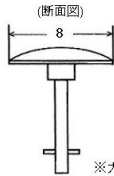
- 埠頭内(埋立地内)では、護岸移動や液状化によって、かなり陸側の位置でも地盤の移動が生じており、基準点設置に適さないところも多い
 - 法線から100m程度陸側でも、数十~100cm程度の移動がある
- ⇒構造物変位測定のための基準となる点を、地盤の局所的な変位(護岸移動、液状化等)の影響を受けない場所に設置する必要

濱田政則, 磯山龍二, 若松加寿江:1995年兵庫県南部地震液状化, 地盤変位及び地盤条件, 1995
神戸港摩耶埠頭



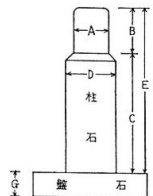
大規模な液状化、側方流動が生じるような場所では、基準点も簡単に動いてしまう

金属標（一〜四等三角点）



単位はセンチメートル

三角点(金属標)の大きさ(寸法)



図中のアルファベットの値は下表に対応する



種類	A	B	C	D	E	F	G
一等三角点標石	18	21	61	21	82	41	12
二等・三等三角点標石	15	18	61	18	79	36	11
四等三角点標石	12	15	48	15	63	30	9

単位はセンチメートル

等級ごとの標石の寸法

<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sankaku-QA.html>



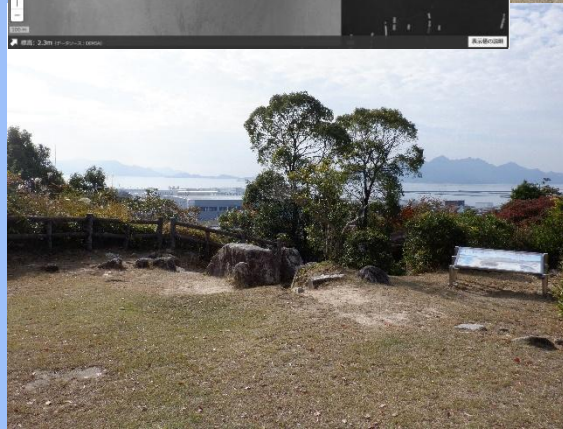
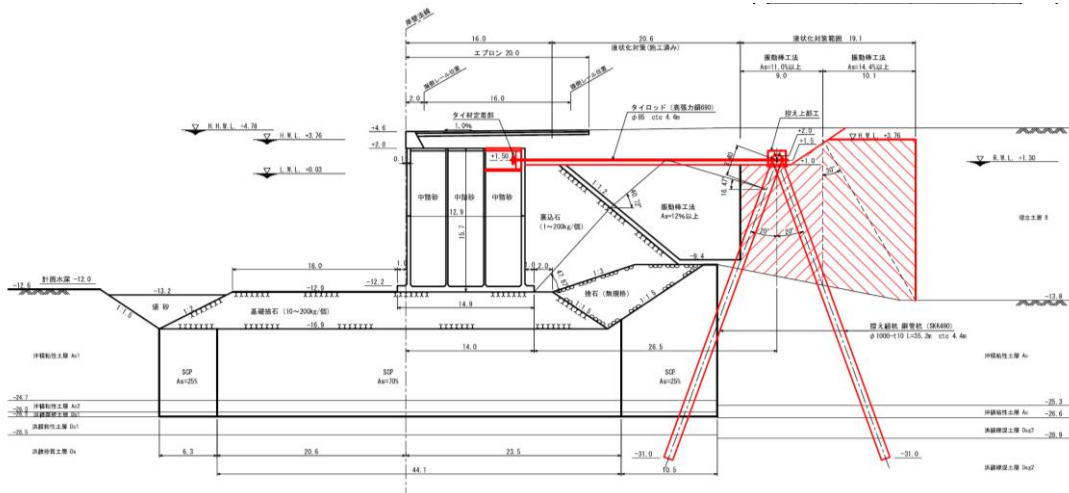
自然地盤での大規模な側方流動
(能登半島沖地震、内灘町)

<https://youtu.be/IXJLX0JdjbU?feature=shared&t=118>

⇒液状化、側方流動が生じないような場所、動かない場所に基準点を置く

基準点の例 (広島港 五日市地区)

- 海老山三等三角点
- 山地形、液状化しない



基準点設置例 (横浜港)

- 耐震性のある建物
屋上に設置



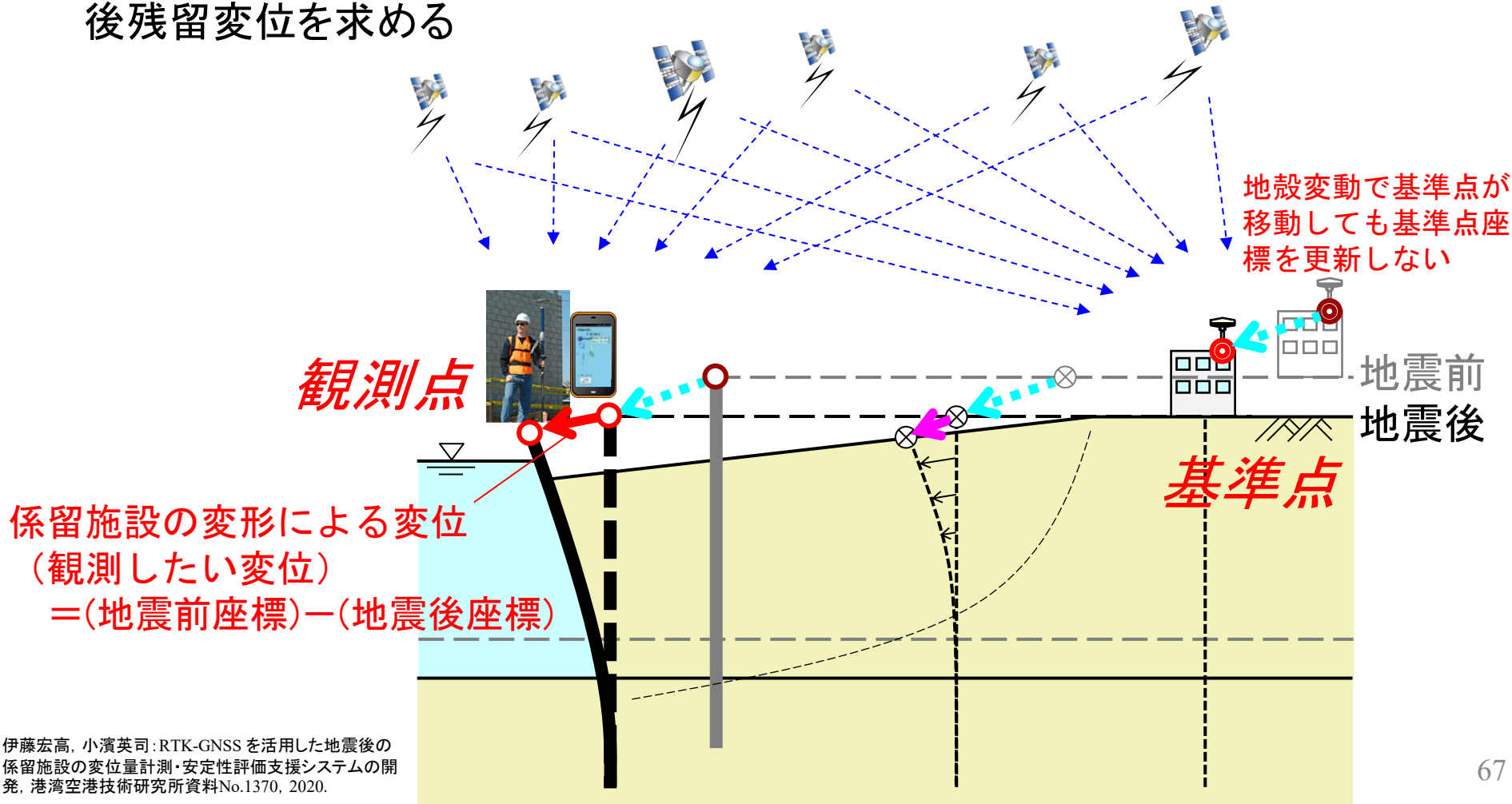
横浜技調

並木寮



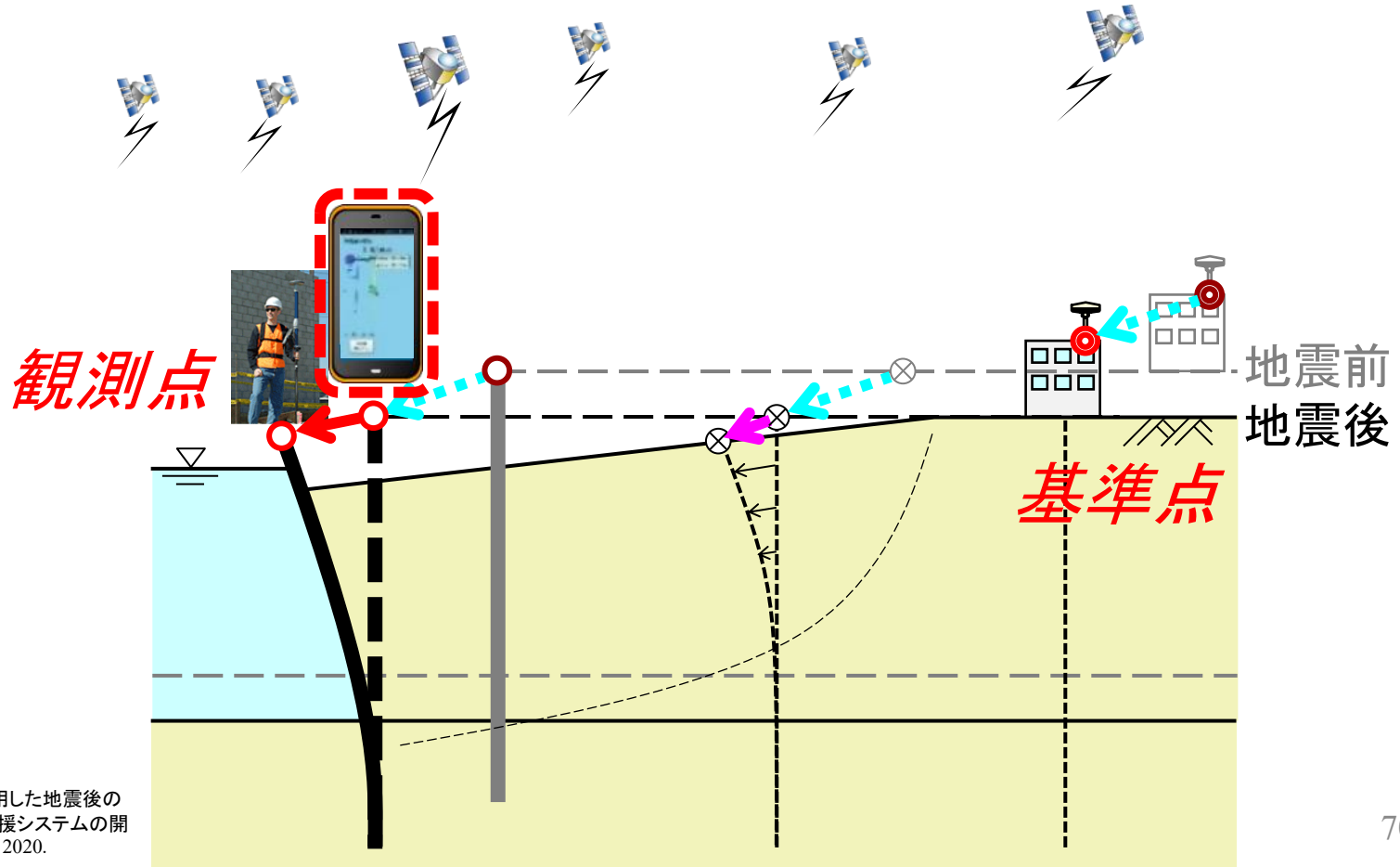
RTK-GNSSを用いて係留施設の変形による変位を計測

- 基準点と観測点にGNSS受信機を置いて同時観測し、基準点座標を参照して観測点座標を精度よく計測する方法
- 地震前の基準点座標を用いて観測点座標を測定し(地殻変動で基準点が移動しても基準点座標を更新しない)、地震前後の観測点座標の差分から地震後残留変位を求める

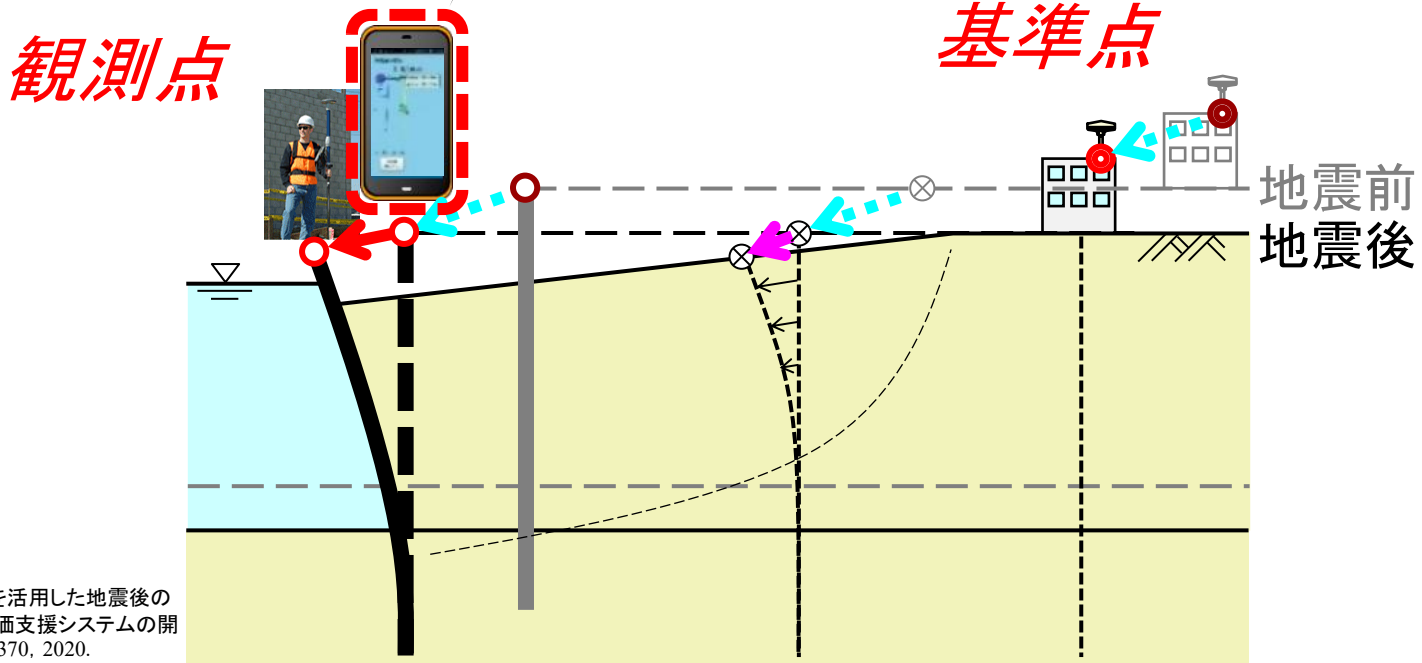


「利用可否判断支援装置 Berth Surveyor」

- スマートフォン、Androidアプリにより簡単にGNSS受信機を操作，1人でも計測可能
- 地震前の座標情報を記憶、地震後測定時にその場でアプリ上に変位量を表示
- 変形量一部材損傷関係を用いて，供用可否判定結果の表示



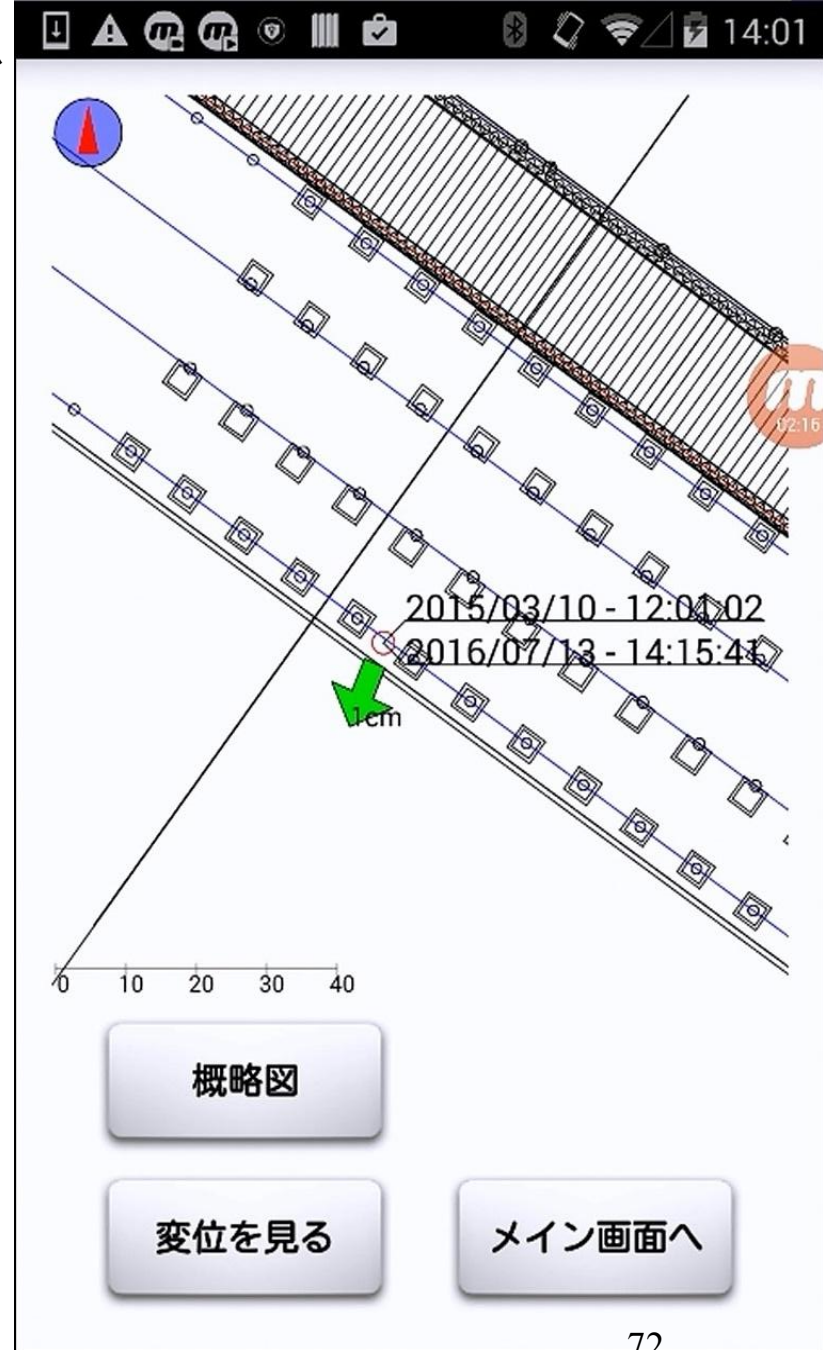
「利用可否判断支援装置 Berth Surveyor」



伊藤宏高, 小濱英司: RTK-GNSS を活用し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.

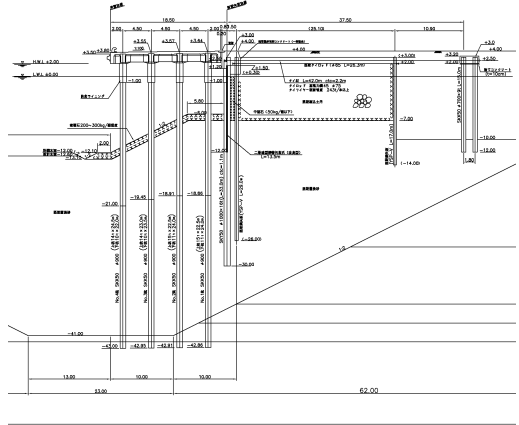
係留施設地震時変形量調査・安定性評価支援システム 「利用可否判断支援装置 Berth Surveyor」

- GNSS機器を簡単操作
- 過去の測定座標を保持し、地震後の測定座標との差分により、その場で地震時変位量を確認可能
- CAD平面図上に測定結果を表示

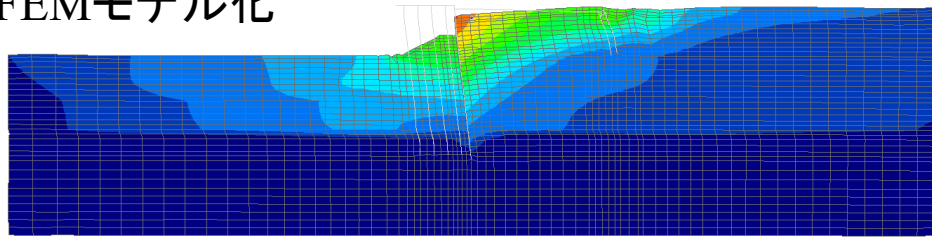


法線変位量と部材損傷状態の関係

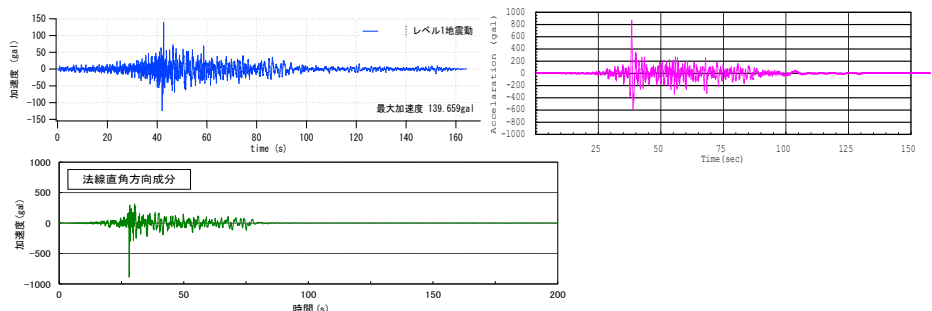
個別の施設ごとに地震動の大きさを変えた複数の地震応答解析(FLIP)を実施し、変形率(法線変位量/水深)と損傷状態を杭や矢板など部材ごとに整理



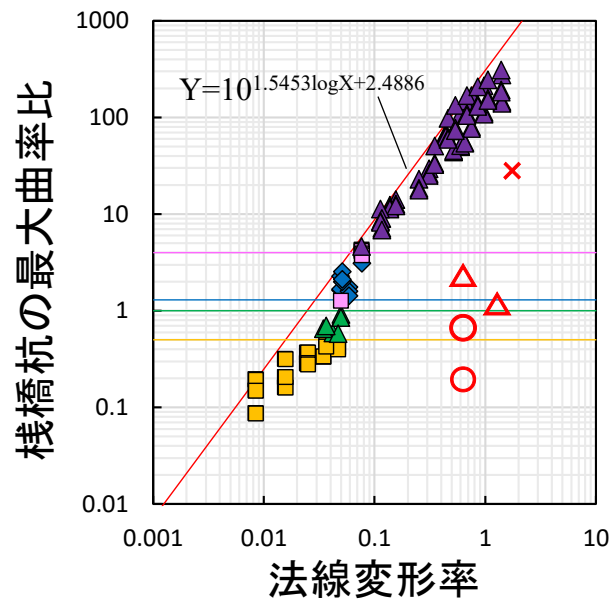
FEMモデル化



振幅調整をして、様々な大きさの地震動を入力

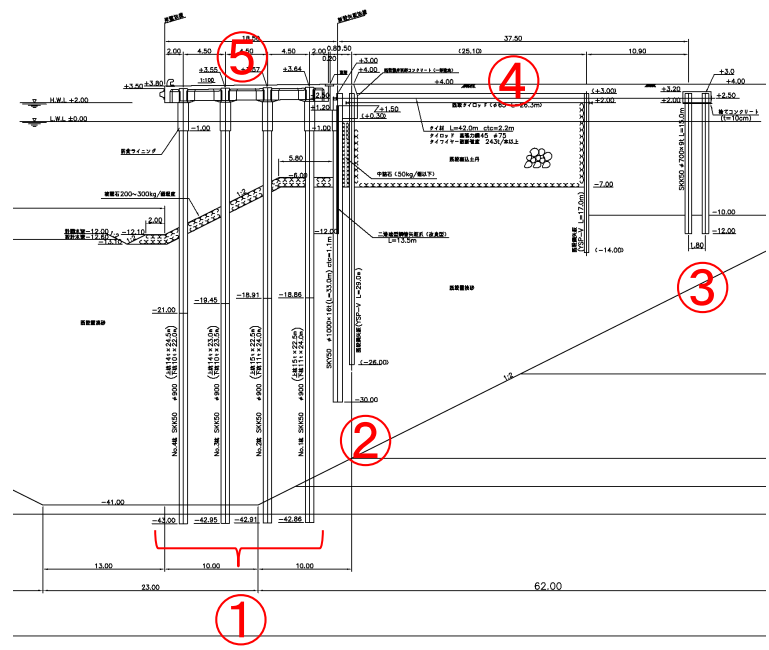
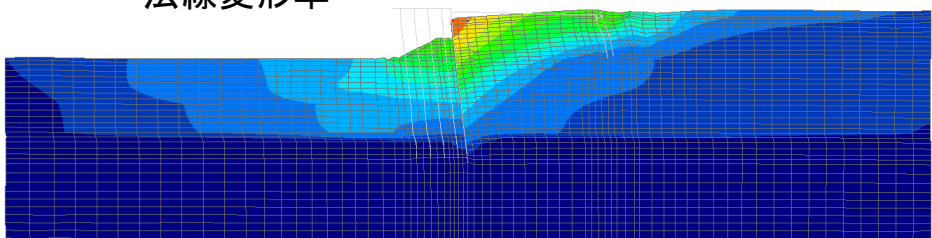
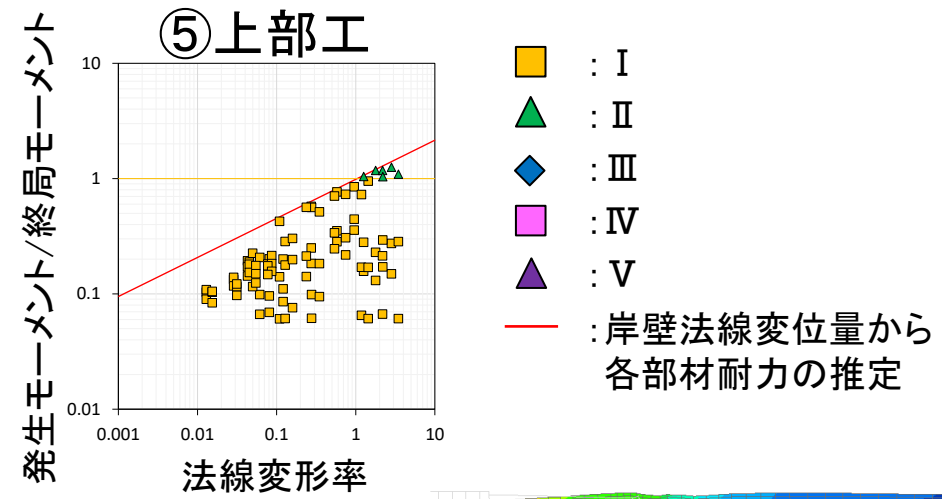
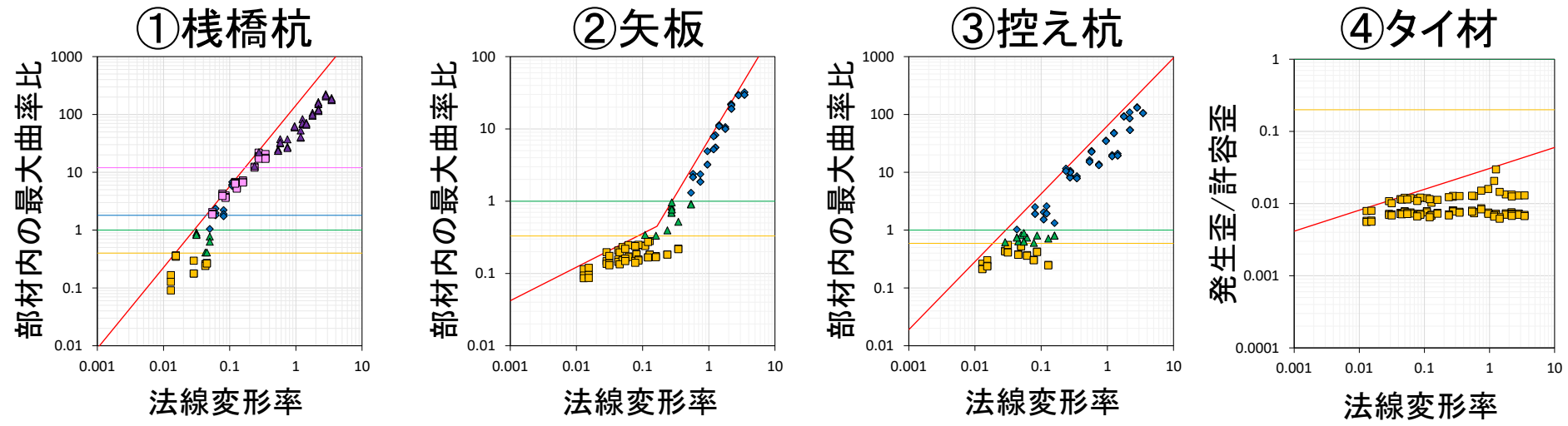


変位量と各部材損傷の関係を整理



- 例えば、栈橋杭の場合、
- : 全ての杭で降伏応力度未滿、○
 - ▲ : 全ての杭で限界曲率未滿、○
 - ◆ : ある杭で限界曲率が発生、△
 - ◼ : ある杭で2箇所以上の限界曲率が発生、△
 - ▲ : 全ての杭で2箇所以上の限界曲率が発生、×
 - : 岸壁法線変位量から各部材耐力の推定

法線変位量と部材損傷状態の関係の整理



部材損傷判定結果の詳細をBerth Surveyorアプリ上で表示

- 変位一部材損傷関係グラフ上への測定値のプロット
- 損傷判定閾値との位置関係の確認

余裕で○？、ぎりぎり○？、ぜんぜん×？

測定点「SP00」に発生した変位量は以下の通りです。

開始点： 2019/03/04 13:29:47

終了点： 2019/03/04 13:34:23

200.1cm変位発生！

200.1cm直交変位発生！

詳細
変位

×

△

×

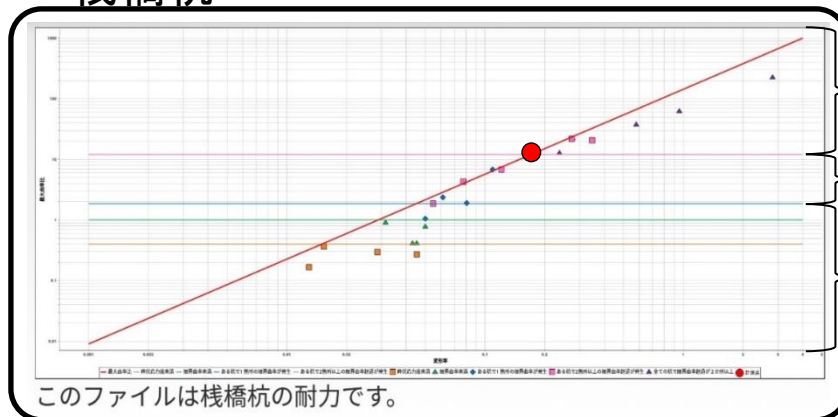
○

○

栈橋杭 矢板 控え杭 タイ材 上部工

『○』『×』をタップ

● 栈橋杭

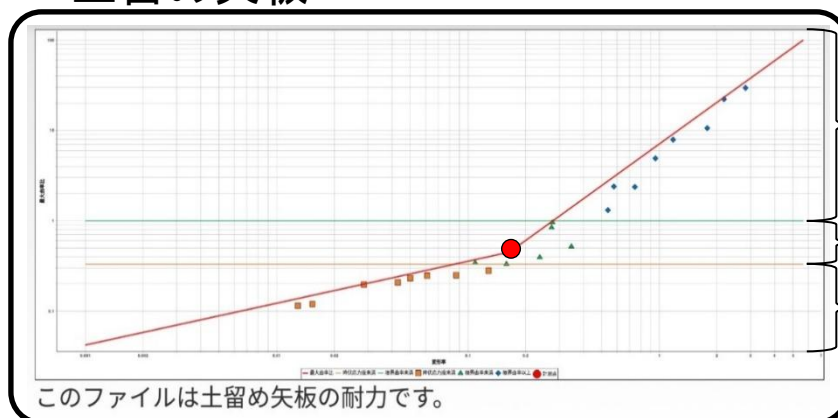


×

△

○

● 土留め矢板



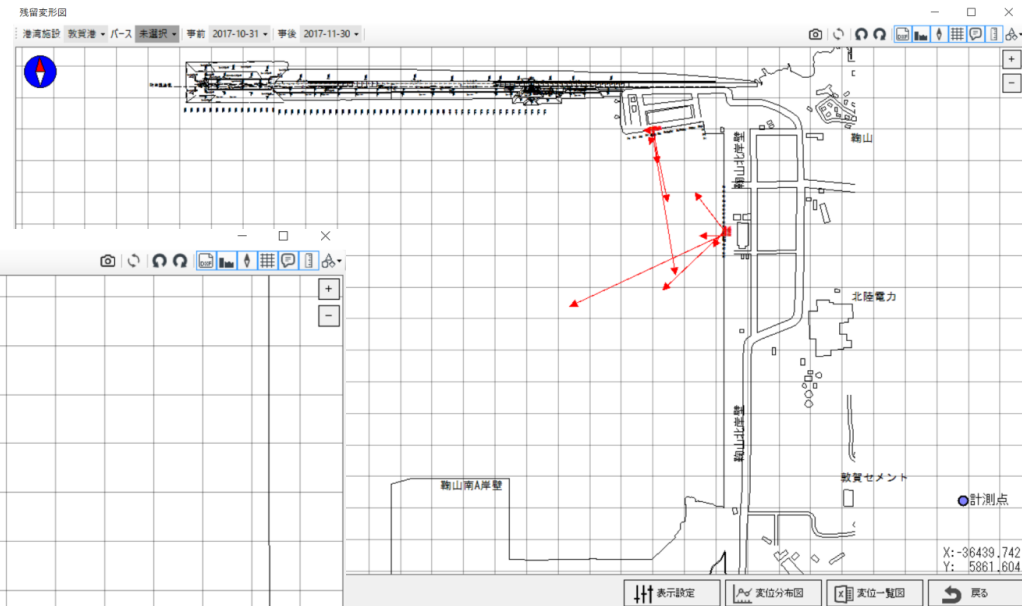
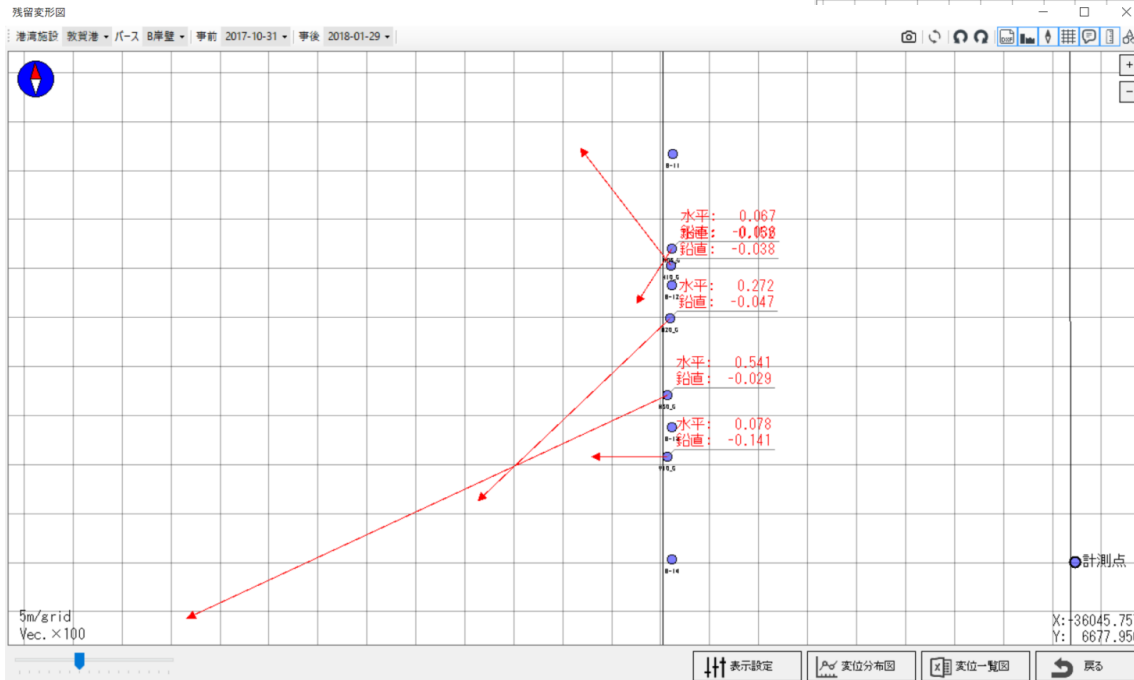
×

△

○

PCソフトウェア (Berth Surveyor for Desktop)

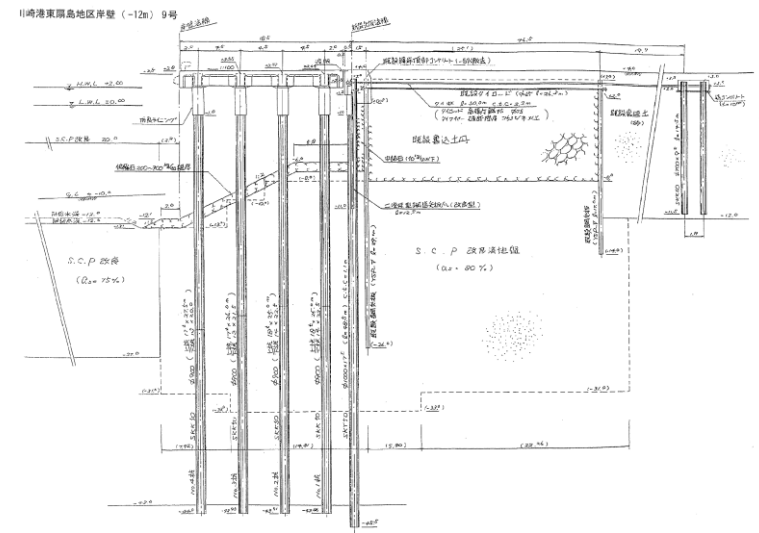
- スマホアプリの設定、計測点等の編集・管理
- 岸壁全延長や港全体の変形量分布を把握するための残留変形図描画等の機能



適用事例

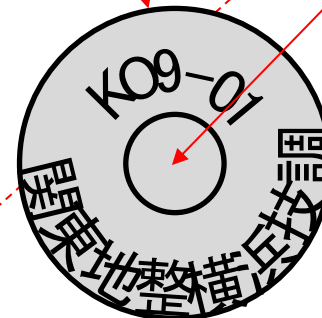
○川崎港東扇島地区(-12m)9号岸壁

- 全長240mの栈橋式係船岸
- 1スパンの両端に金属鈎を設置



アルミ製

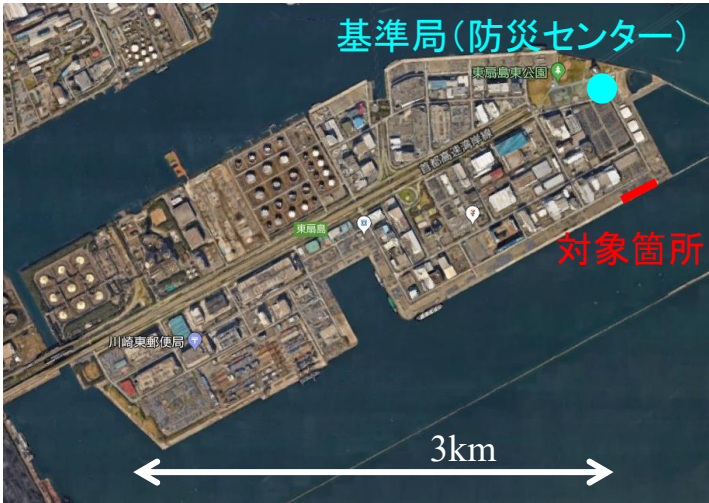
ステンレス製



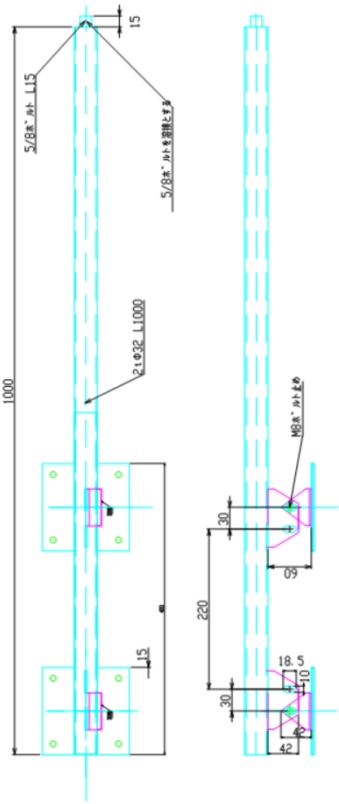
設置した金属鈎

基準局の設置

関東地方整備局首都圏臨海防災センター屋上に基準局設置



GNSS、アンテナ設置用ポール
(常時残存)



一部建物の陰で無線強度が低いところもあったが、東扇島のほぼ全域で基準局一観測局の無線通信は可能であった

まとめ

- 係留施設の地震被害の特徴
 - 重力式岸壁
 - 矢板式岸壁、栈橋
- 今後の港湾施設(係留施設)の大地震発生後の対応
 - 地震発生後の被害評価、利用可否判断の流れ
 - 現地確認前、強震動情報による評価
 - PSI値による即時概略評価(港湾単位)
 - PSI値－構造部材損傷関係による評価、FLIP解析実施による評価(係留施設単位)
 - 現地立入可能後(現地調査実施後)の評価
 - 地中・水中部材損傷確認の難しさ、変位計測の難しさ
 - 変位－損傷関係による評価