

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1370**      March 2020

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

伊藤 広高  
小濱 英司

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 係留施設の安定性評価項目と変位量との関係の検討 .....	4
2.1 係留施設の構造形式毎の安定性評価項目 .....	4
2.2 残留水平変位量と各部材の損傷の関係 .....	5
3. 係留施設地震時変形量調査・安定性評価支援システムの開発 .....	7
3.1 RTK-GNSS を用いた残留水平変位量の計測手法 .....	7
3.2 システムに用いる機材 .....	9
3.3 操作端末アプリケーション .....	10
3.4 基準点の選定方法 .....	12
3.5 計測点の設置方法 .....	12
3.6 現地実装及び測定検証 .....	13
4. まとめ .....	17
謝辞 .....	18
参考文献 .....	18

# Development on Displacement Measurement and Stability Evaluation Support System of Mooring Facilities after Earthquake by RTK-GNSS

Hiroataka ITO\*  
Eiji KOHAMA\*\*

## Synopsis

It is necessary to make a quick judgement on availability of the mooring facilities to use them for transportation of emergency supplies and personnel for rescue activities by ships after an earthquake. However, it is difficult to accurately understand how they have been damaged and the performance have been degraded by the earthquake motion. In such a case, it is conceivable to judge from the residual horizontal displacement of the top of the mooring facility, but it is not easy to accurately measure the residual horizontal displacement in a situation where a wide area or local ground movement occurs during an earthquake. Even if the displacement is confirmed, it is difficult to judge whether it can be used if the relationship between the residual displacement and the instability of the facility is unknown. Accordingly, in this research, we examined a method to quickly and accurately measure the residual horizontal displacement and the stability evaluation method using the residual horizontal displacement for mooring facilities after an earthquake.

As a quick and accurate method to measure the residual horizontal displacement of mooring facilities, we examined the method to exclude crustal movement by setting the position of RTK-GNSS base station out of the area affected by local ground movement due to revetment deformation and liquefaction. We also developed a smartphone application that can operate GNSS receiver and display the measurement results. As the stability evaluation method, a series of earthquake response analyses was conducted with the large and small size earthquake motions, and the relationship between the residual horizontal displacement and the damage state of structural members. In addition, the application is provided with the information on the relation between the displacement and damage of members, so that the residual horizontal displacement can be measured and the stability can be evaluated at the same time. On-site examination was also performed to confirm the measurement accuracy and function operation of the developed application.

**Key Words:** RTK-GNSS, mooring facilities, residual horizontal displacement, stability evaluation support, application

---

\* Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Eng. Department

\*\* Head, Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Eng. Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail:itou-h852a@p.mpat.go.jp

# 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

伊藤 広高\*・小濱 英司\*\*

## 要 旨

係留施設は地震後に船舶による緊急物資や救援活動のための人員等の輸送に使用するために、係留施設の使用可否判断を迅速に行う必要がある。しかし、地震動によって係留施設がどのように損傷してどの程度性能が低下しているのかを正確に把握することは難しい。このような場合、係留施設の天端の残留水平変位量から判断することが考えられるが、地震時の広域または局所的な地盤移動が生じる状況において残留水平変位量を正確に測定することは容易ではない。また、残留水平変位量だけが確認されたとしても、残留水平変位量と施設の不安定化の関係が不明であれば、使用可否判断をすることは困難である。そこで、本研究では、地震後の係留施設について迅速かつ正確な残留水平変位量の測定手法及び残留水平変位量を用いた使用可否判断のための係留施設の安定性評価手法について検討を行った。

迅速かつ正確な残留水平変位量の測定手法については、RTK-GNSS の基準点の位置を護岸変形および液状化等による地盤の局所的移動の影響範囲外にすることにより地殻変動分を除いた係留施設の残留水平変位量を測定する手法を検討し、GNSS 受信機の操作や残留水平変位量の測定結果の表示が可能なスマートフォン用アプリケーションの開発を行った。係留施設の安定性評価手法については、大小複数の地震動による地震応答解析を行い、残留水平変位量と部材の損傷の関係を部材毎に整理した。また、アプリケーションに変位一部材損傷関係の情報を持たせ、残留水平変位量の計測と同時に安定性評価ができるようにした。開発したアプリケーションによる計測精度や機能の作動確認のため、現場での実証も行った。

キーワード：RTK-GNSS, 係留施設, 残留水平変位, 安定性評価支援, アプリケーション

---

\* 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ 研究官

\*\* 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ長

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail:itou-h852a@p.mpat.go.jp

## 1. はじめに

大地震発生後、港湾係留施設は船舶による緊急物資や自衛隊等の救援活動のための人員等の輸送の拠点として使用される。よって、係留施設の使用可否判断は迅速に行われる必要があるが、地震動作用によって施設が損傷して安全性が損なわれている可能性もあるため、慎重に判断されなければならない。平成29年7月の港湾法の改正においては、非常災害時に港湾管理者が国に施設確認等を含む管理業務を要請することが可能となっており、地震作用を受けた係留施設の使用可否判断の方法についてあらかじめ準備しておくことの重要性は高まっている。

しかし、地震動によって係留施設がどのように損傷しどの程度性能が低下しているのかを正確に把握することは難しい。構造物の損傷程度を正確に把握するには、地震中の加速度や変位、ひずみ等を高精度かつ多数で計測することが望ましいが、それには多額の費用がかかるため困難な場合が多い。このような場合、係留施設の天端の残留水平変位量から判断することが考えられるが、地震時の広域または局所的な地盤移動が生じる状況において変位量を正確に測定することも容易ではない。また、変位量だけが確認されたとしても、変位量と施設の不安定化の関係が不明であれば、使用可否判断をすることは困難である。そこで、本研究では、RTK-GNSSを用いて地震後の係留施設変位量を正確に測定する手法の検討を行い、また、変位量と施設安定性の関係について検討し、これらを組み合わせて係留施設の使用可否判断のための安定性評価手法を検討する。RTK-GNSS機器の操作や変位量及び安定性評価結果を表示できるスマートフォンアプリケーションを開発し、その計測制度や機能の作動確認のための現場での検証についても実施する。

## 2. 係留施設の安定性評価項目と変位量との関係の検討

本研究ではまず、地震後における係留施設の変位量と損傷および安定性の関係について検討する。過去の被災事例を基に、安定性評価において着目する項目について整理する。矢板式護岸を有する横棧橋を例として有限要素解析を実施し、整理された項目に基づいて、水平変位量と安定性評価の関係について検討する。

### 2.1 係留施設の構造形式毎の安定性評価項目

係留施設の使用可否判断のための安定性評価を行うためには、施設の被災状況を適切に判断する必要がある、

安定性評価に求められる情報とその精度は構造形式によって異なる。係留施設の安定性評価における着眼点を表-1に示す。

#### (1) 重力式係船岸

重力式係船岸では、過去の地震において堤体が沈下・傾斜を伴いながら海側に変位し、それに伴い堤体の背後に段差が生じる被害が発生した(図-1参照)が、堤体自体の破壊が問題になった事例は報告されていない。そのため、重力式係船岸の安定性評価においては、地盤の滑り破壊を起こすほどの壁体の大きな変位が無い場合には、船舶の接岸や車両によるアクセスの観点から判断を行えば十分である<sup>2)</sup>。

#### (2) 矢板式・棧橋式係船岸

矢板式・棧橋式係船岸では、過去の地震において鋼部材の損傷による構造上の安定性が失われた事例がある(図-2参照)。したがって、これらの係留施設の場合は、船舶の接岸や車両によるアクセスの観点からの判断だけでは不十分であり、各部材の損傷状態を必ず確認する必要がある<sup>5)</sup>。本報告においては、矢板式・棧橋式係船岸の

表-1 係留施設の使用可否判断における着眼点<sup>1)</sup>

項目	着眼点
係留施設から見て	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造上の安定が確保されているか</li> <li>・船舶が接岸できるか</li> <li>・荷役ができるか</li> <li>・車両のアクセスができるか</li> </ul>
航路・泊地から見て	<ul style="list-style-type: none"> <li>・所要の水深が確保されているか</li> <li>・水域施設に多量の浮遊物がないか</li> <li>・海面から障害物が飛び出していないか</li> </ul>
防波堤から見て	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外洋からの波を防ぐことができているか</li> </ul>

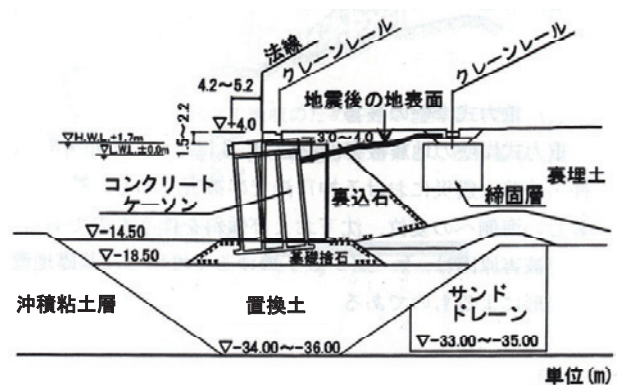


図-1 重力式係船岸の被災事例<sup>3)</sup>

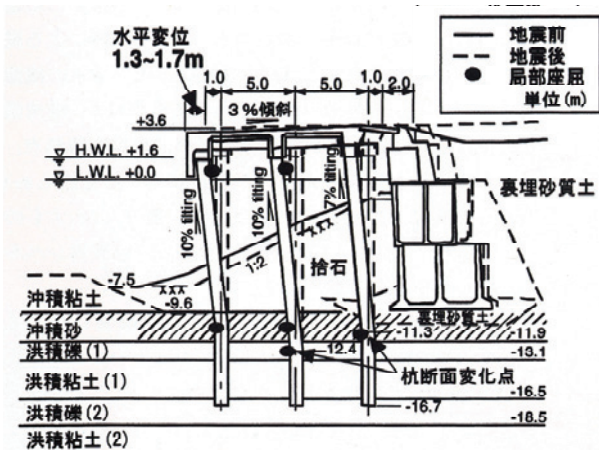


図-2 棧橋式係船岸の被災事例<sup>4)</sup>

表-2 各部材の安定性評価の判定基準

部材	安定性評価	損傷レベル	判定基準
棧橋杭	○	1	全ての杭で降伏応力度未滿
		2	全ての杭で限界曲率未滿
		3	ある杭で1箇所の限界曲率が發生
	△	4	ある杭で2箇所以上の限界曲率が發生
	×	5	全ての杭で2箇所以上の限界曲率が發生
矢板 (土留め矢板含む)	○	1	降伏応力度未滿
	△	2	限界曲率未滿
	×	3	限界曲率以上
控え杭	○	1	限界曲率未滿
	×	3	限界曲率以上
タイ材	○	1	許容發生伸び率未滿
	×	2	許容發生伸び率以上
棧橋上部工	○	1	破断耐力未滿
	×	2	破断耐力以上

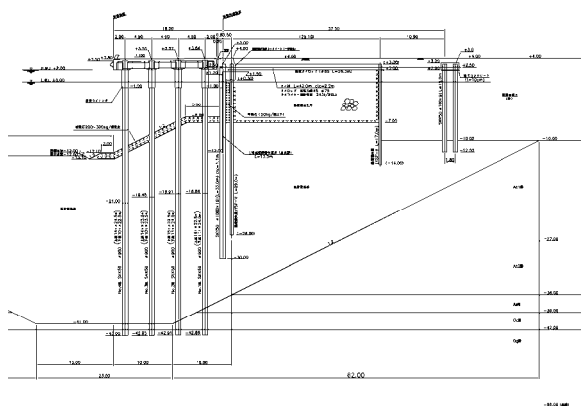


図-3 標準断面図

安定性評価の判断基準は港湾の施設の基準の耐震強化岸壁の照査項目に基づいて設定するものとし<sup>6, 7)</sup>、表-2のように整理した。ここで判定は、耐震強化岸壁のうち「特定」及び「標準」のどちらの照査基準も満たさないものを「×」, 「特定」の照査基準は満たさないが「標準」の照査基準は満たすものを「△」, 「特定」及び「標準」のどちらの照査基準も満たすものを「○」とした。ただし、棧橋においては、現在の基準ではある杭で限界曲率が発生しても1箇所までであれば耐震強化岸壁の照査基準を満たしており、ここでは安定性評価として「○」としているが、限界曲率が発生した杭がさらなる荷重に耐えられるかどうかについてはまだ不明な点も多く、研究が続けられているところである。また、地震動作用後の船舶による接岸力や牽引力等を考慮してさらに詳細に区分して評価する考え方もあり<sup>8)</sup>、今後の研究の進展を注視していく必要である。

## 2.2 残留水平変位量と各部材の損傷の関係

各部材の損傷状態の推定には、地震応答解析において大小複数の地震動を入力し、天端の残留水平変位量と損傷状態の関係を構造部材毎に整理して用いることが考えられる<sup>7)</sup>。地震後の係留施設の安定性を判断することが目的であるため、地震応答解析については地震中のみでなく地震後の船舶による牽引力または接岸力等を作用させた場合についても検討する。

本研究において例として検討する対象施設を図-3に示す。施設は控え直杭式による土留め矢板の棧橋式係留施設である。図-3より安定性評価基準を設定する部材は、棧橋杭・土留め矢板・控え杭・タイ材・棧橋上部工の5種類である。

地震応答解析には二次元有効応力解析 FLIP<sup>9)</sup>を用いた。使用した解析モデル図を図-4、使用したパラメータを表-3に示す。

入力地震動には、対象施設の設計で使用されたレベル1地震動とレベル2地震動(図-5参照)の振幅の大きさを変えて用いた。

緊急物資を輸送する船舶はRORO船を想定しており、地震後に作用させる牽引力及び接岸力、上載荷重を表-4に示す。牽引力及び接岸力は地震終了後から100秒後に設定値になるように徐々に大きくしていき、設定値になった状態で100秒解析を行った。上載荷重については地震終了後より設定値を作用させた。

残留水平変位は、図-6に示す棧橋高さ(上部工中心から仮想地表面の平均標高までの距離)で除した法線変形率で評価した。また、残留水平変位は地震発生後に船舶



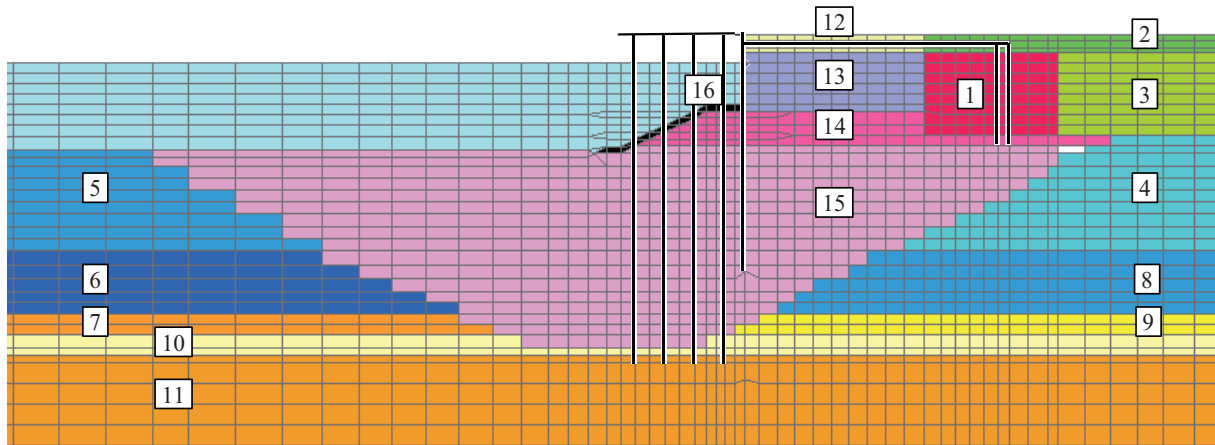


図-4 解析モデル図

表-3 モデルのパラメータ

土質 図-4中の番号		Bs	Bs	Bs	Ac1	Ac1	Ac2	As	Ac1
		1	2	3	4	5	6	7	8
基準拘束圧	$\sigma'_{ma}$ [kPa]	98.00	98.00	98.00	153.90	32.40	83.40	98.00	153.90
基準せん断剛性	Gma [kPa]	104043	58230	104043	49938	10514	57465	66111	49938
せん断剛性の拘束圧依存度	mG [-]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
基準体積剛製	Kma [kPa]	271328	151800	271328	130230	27420	149861	172406	130230
体積剛性の拘束圧依存度	mK [-]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ポアソン比	$\nu$ [-]	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
単位体積重量(湿潤)	yt [g/cm <sup>3</sup> ]	1.9	1.9	1.9	1.63	1.63	1.58	1.91	1.63
間隙率	n [-]	0.41	0.45	0.41	0.58	0.58	0.62	0.38	0.58
間隙水の体積剛性	Kf [MPa]	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000
履歴減衰の最大値	hmax [-]	0.24	0.24	0.24	0.20	0.20	0.20	0.24	0.20
粘着力	c [kPa]	0	0	0	40.2	40.2	47	0	40.2
内部摩擦角	$\phi_f$ [°]	40.4	38.59	40.4	30	0	0	38.1	30
変相角	$\phi_p$ [°]	0	0	28	0	0	0	(28)	0
その他液パラ1	S1 [-]	0	0	0.01	0	0	0	(0.005)	0
その他液パラ2	w1 [-]	0	0	13.32	0	0	0	(6.58)	0
その他液パラ3	p1 [-]	0	0	0.5	0	0	0	(0.5)	0
その他液パラ4	p2 [-]	0	0	0.8	0	0	0	(0.923)	0
その他液パラ5	c1 [-]	0	0	5.2	0	0	0	(3.12)	0

土質 図-4中の番号		Ac2	As	Dc	Dg	Bg	Bg	置換砂	被覆石
		9	10	11	12	13	14	15	16
基準拘束圧	$\sigma'_{ma}$ [kPa]	210.70	98.00	124.50	177.70	17.21	98.00	98.00	98.00
基準せん断剛性	Gma [kPa]	145243	66111	48840	201610	80790	99886	108123	180000
せん断剛性の拘束圧依存度	mG [-]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
基準体積剛製	Kma [kPa]	378770	172406	127400	512200	210700	260487	281968	468000
体積剛性の拘束圧依存度	mK [-]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ポアソン比	$\nu$ [-]	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
単位体積重量(湿潤)	yt [g/cm <sup>3</sup> ]	1.58	1.91	1.63	1.84	1.79	1.79	1.89	2.00
間隙率	n [-]	0.62	0.38	0.55	0.45	0.45	0.41	0.41	0.45
間隙水の体積剛性	Kf [MPa]	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	22000
履歴減衰の最大値	hmax [-]	0.20	0.24	0.20	0.24	0.24	0.24	0.23	0.24
粘着力	c [kPa]	83.5	0	102.7	0	0	0	0	20
内部摩擦角	$\phi_f$ [°]	30	38.7	0	42.26	40.07	40.2	40.5	35
変相角	$\phi_p$ [°]	0	(28)	0	0	0	0	0	0
その他液パラ1	S1 [-]	0	(0.005)	0	0	0	0	0	0
その他液パラ2	w1 [-]	0	(6.58)	0	0	0	0	0	0
その他液パラ3	p1 [-]	0	(0.5)	0	0	0	0	0	0
その他液パラ4	p2 [-]	0	(0.923)	0	0	0	0	0	0
その他液パラ5	c1 [-]	0	(3.12)	0	0	0	0	0	0

※( )は、液状化層として考慮する場合は( )の値を採用し、考慮しない場合は0を採用する





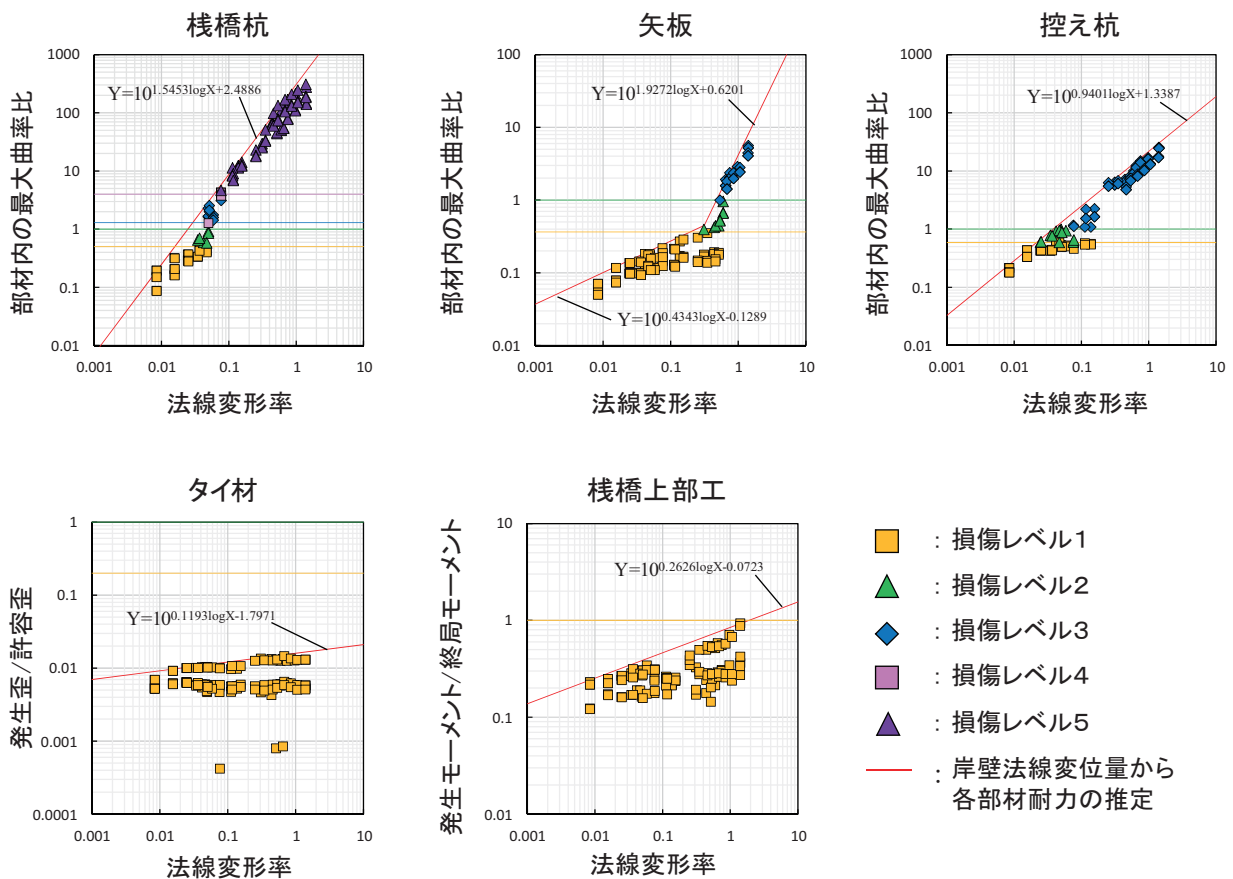


図-7 法線変形率と各部材の各部材の損傷状態の整理

計測局 GNSS で得られた位相データとリアルタイムで解析することで計測点の位置を測定する測量方法である

(図-9 参照). 本質的に, 計測点の座標は GNSS 基準点からの相対的な位置関係をもとに測定されるが, 基準局の真の座標と単独測位で測定された座標の差を補正情報として計測局に送る DGNSS に対し, RTK-GNSS では基準局と計測局での位相データを用いることで, 計測点 1 箇所当り数十秒で誤差 1~2cm 程度のより高精度な計測が可能である.

本検討では, 係留施設の法線付近に RTK-GNSS で測定する計測点を設置し, 地震前後において座標を測定して, その差分により地震による変位量を求めることとする.

また, RTK-GNSS においては基準点の座標が必要となるが, 大規模地震時においては, 広域の地殻変動や, 地盤液状化や護岸構造の移動等による地盤の局所的移動 (例えば, 図-10) により, 事前に設置した基準点の座標が変化することが考えられる. 本検討ではこのような場合を考慮して, 図-11 に示されるように, 基準点を液状化や護岸移動等の局所的地盤変動の影響の無い箇所に配置し, また, 地殻変動量を考慮せずに基準点座標を地震前の値

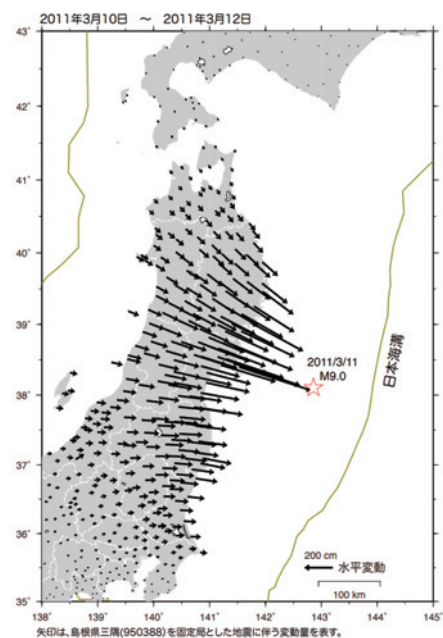


図-8 2011年東北地方太平洋沖地震における地震時の地殻変動<sup>10)</sup>

と同じとして、計測点の地震前後の座標を測定して変位量を求めることとした<sup>12)</sup>。この方法によると、地殻変動が生じた場合の基準点の正しい座標は設定されておらず、計測点の絶対座標も正しく測定することはできない。しかし、本検討において測定したいものは係留施設の変形に伴う移動量であり、地殻変動による移動量が含まれる絶対位置は必要ではない。よって、本質的に基準点座標からの相対的位置関係をもとに測定するRTK-GNSSにおいて、地殻変動による移動量が基準点と計測点で同じであれば、基準点座標が正しくないことによる誤差は考えられるものの、基準点座標の変化を設定しないことにより計測点座標からも地殻変動分が除かれる。よって、地震前の計測点座標との差から、地殻変動分を除いた係留施設の変形に伴う変位量のみが取得できると考えられる。また、基準点を液状化や護岸移動等の局所的地盤変動の影響範囲外に置くことで、それらの影響も含まれない測定ができると考えられる。

### 3.2 システムに用いる機材

ここでは、上述の手法に基づき開発した係留施設地震時変形量調査・安定性評価支援システムの機材等の概要を示す。基準局側はGNSS・無線アンテナ・無線送信機・無線送信機のためのバッテリー、計測局側はGNSS・無線受信機・GNSS操作端末(スマートフォン)・水準器・ポールで構成されている(写真-1, 2)。地震発生後の停電にも対応するためバッテリーを使用している。また、基準局側のJQVVは使用の度に座標が変わらないように設置場所を固定するためにJQVVを設置する支柱のみを現場に存置し、それ以外のは使用時に設置することとしたことを想定している。

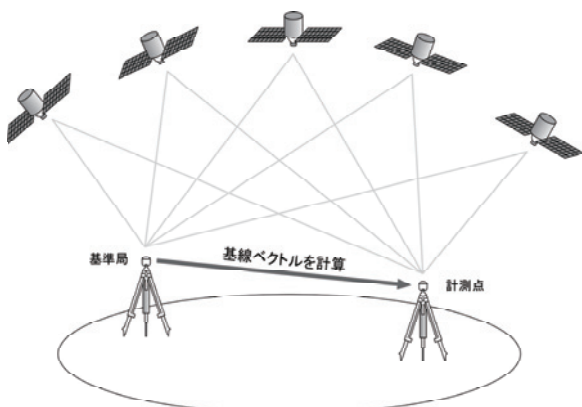


図-9 RTK-GNSSの概要

地震発生後、まずはGNSSや無線装置を設置しバッテリーに接続して基準局を稼働させる。次に、計測点に移動し、計測点上にポールを立てて水準器にて垂直であることを確認してから計測を行う。

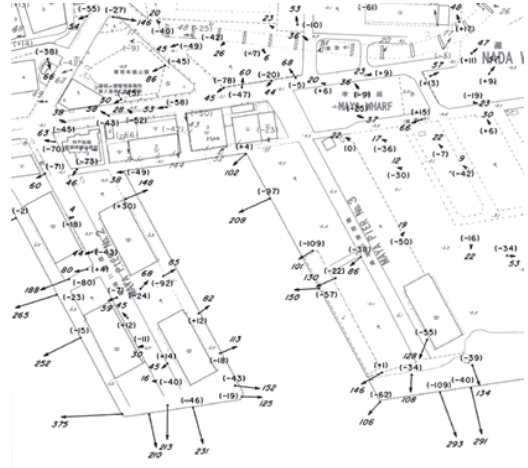


図-10 1995年兵庫県南部地震における摩耶埠頭の変位分布<sup>11)</sup>

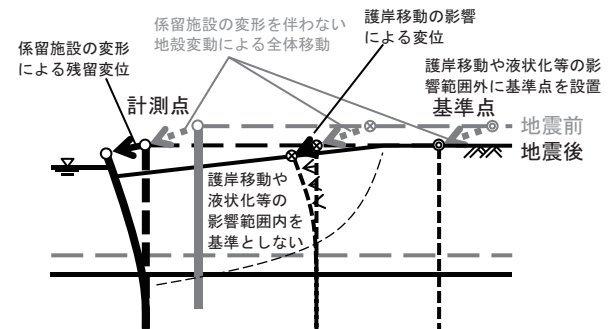


図-11 RTK-GNSSによる係留施設の残留水平変位計測の概要



写真-1 基準局の機器構成



写真-2 計測点の機器構成

### 3.3 操作端末アプリケーション

通常、GNSS 機器の操作は専用端末で行われ、座標値が測定されるため、地震時の変位量を求めるには測定された座標値データを地震前のデータと合わせて別途 PC で処理する必要がある。しかし、GNSS 専用端末の操作には慣れが必要で、またその後のデータ処理作業もあり、地震直後の施設の安定性評価における利便性は高くない。そこで本検討では、実用性を考慮して RTK-GNSS 機器をスマートフォン端末により操作することとし、測量結果から地震時の残留水平変位量を算定し、さらに施設損傷を概略判断できるアプリケーション「係留施設地震時変形量調査・安定性評価支援システム Berth Surveyor」(以下、Berth Surveyor という) (図-12 参照) 及び Berth Surveyor の設定等を行う PC 用ソフトウェアの Berth Surveyor for Desktop を開発した。これにより、RTK-GNSS に関する知識がなくても一人で簡単に受信機を操作でき、アプリケーション内に保存した過去の座標値を測定した現在の座

標値から差し引くことで、現場においても地震時残留変位量を確認することができる。また、前章のような変位量一部材損傷関係の情報を持たせることで、施設の安定性評価も行えるものとした。

Berth Surveyor は、以下の機能を有している。

#### ①計測機能

Berth Surveyor の背景色は、RTK-GNSS の計測精度の状態を示す (図-13 参照)。計測精度が高い状態 (FIX 解) である場合に背景色が青となり、この状態を確認してから計測を行う。計測した座標値は Berth Surveyor に計測日時とともに保存される。変位量の算定においては、基準となる地震前の座標を測定しておく必要があり、その座標値との差から変位量が算出される。この測定された変位は後述する「バース」で設定された岸壁法線の情報を用いて法線直交方向の水平変位量に換算され、別途算定して Berth Surveyor に登録された変位量一部材損傷の関係から、各部材の損傷状態の判定も可能である (図-14 参照)。

#### ②計測点の登録・設定機能

初めて計測を行う際に計測点の新規登録を行う必要があり、計測点を登録する「港湾施設」及び「バース」を選択し、計測点名を記入して計測を行うことで新規登録される。

#### ③変位確認機能

Berth Surveyor に保存されている過去の計測結果を確認する。

#### ④計測点への誘導機能

CAD 図上に現在位置と選択した計測点、計測点までの距離・方向を表示して誘導する (図-15 参照)。

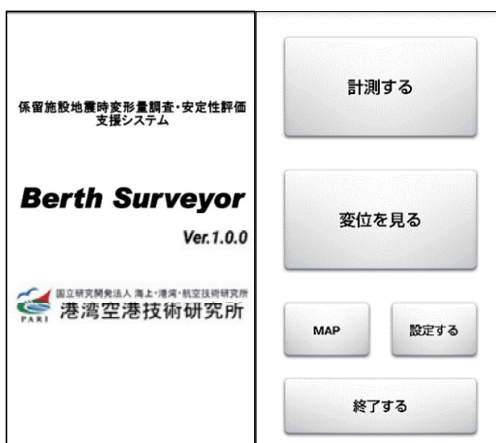


図-12 Berth Surveyor

(左：トップ画面，右：メニュー画面)



図-13 GNSS の受信状況の表示

(背景色，青：計測可 (FIX 解)，黄：計測精度低下 (FLOAT 解)，赤：計測不可)





図-14 計測結果の表示例

(左図中央部の○, △, ×が各部材の損傷判定結果)



図-15 誘導の表示例

また、Berth Surveyor for Desktop は、以下の機能を有している。

①管理機能

データは、「プロジェクト」「港湾施設」「バース」「計測点」で構成されている。「プロジェクト」はデータ管理の最上階層に位置していて港湾単位で作成される。「港湾施設」では、測地系・座標系の選択、背景 CAD 図の登録を行う。「バース」では、法線の設定、法線直角方向の正負の選択、法線直交水平変位一部材損傷状態の関係のパラメータファイル (図-16 参照) の登録を行う。

②計測点編集機能

計測点の計測された日時と座標値の確認、座標値の修正や削除、RTK-GNSS 以外の計測結果の登録を行う。

③残留変形図描画機能

指定した期間内の最新データと最古データを使用して、その差分による各計測点の水平変位ベクトル図や (図-17 参照)、選択した計測点の法線直角方向の水平変位量の出力 (図-18 参照) が可能である。その他、選択した計測点の法線直交水平変位一部材損傷関係上に計測された変位量をプロットし、各部材の損傷状態の推定結果の出力 (図-19 参照) が可能で、各部材の判定結果が損傷閾値に対してどの程度であったかを確認できる。この機能は GNSS 操作端末の Berth Surveyor にも搭載されている。

④端末転送機能

GNSS 操作端末 (Berth Surveyor) と PC を USB 接続して、PC で設定した情報や計測点データ等を GNSS 操作端末に送信したり、計測したデータを PC に送信したりする機能である。データの送信はプロジェクト単位で一括送信される。

[A]:構造物高さ(m)		
高さ	11.8	
[B]:判定境界値		
名称	判定	最大曲率比
降伏応力度未満	○	0.5
限界曲率未満	○	1
ある杭で1箇所の限界曲率が発生	○	1.3
ある杭で2箇所以上の限界曲率が発生	△	4
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	×	
[C]:変形率-部材変形・耐力比		
No.	変形率	最大曲率比
1	1.00E-03	0.00712
2	0.01	0.25
3	1	308
4	4	2620
[D]: 変形率-部材変形・耐力比関係元データ		
名称	変形率	最大曲率比
降伏応力度未満	0.009474576	0.19634
降伏応力度未満	0.017474576	0.32006
降伏応力度未満	0.027635593	0.37125
降伏応力度未満	0.041254237	0.47537
限界曲率未満	0.038864407	0.65494
限界曲率未満	0.047415254	0.59173
限界曲率未満	0.052661017	0.58139
ある杭で1箇所の限界曲率が発生	0.055322034	2.2895
ある杭で1箇所の限界曲率が発生	0.066177966	1.7647
ある杭で1箇所の限界曲率が発生	0.057516949	2.541
ある杭で2箇所以上の限界曲率が発生	0.056025424	1.2727
ある杭で2箇所以上の限界曲率が発生	0.086525424	3.9441
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	0.085677966	4.6603
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	0.126864407	11.348
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	0.283898305	23.049
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	0.393050847	50.962
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	0.519830508	98.475
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	0.605847458	133.7
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	0.843728814	169.87
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	1.193220339	246.49
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	1.594067797	276.97
全ての杭で限界曲率が2箇所以上	0.961864407	207.94
[E]:ファイルの説明		
コメント		
このファイルは棧橋杭の耐力です。		

図-16 パラメータファイル例

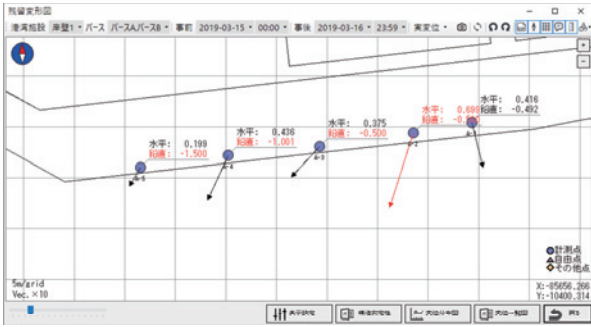


図-17 変位ベクトル図の出力例

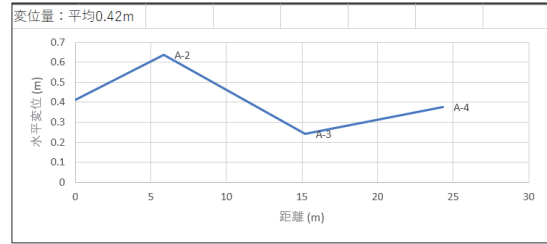


図-18 法線直角方向変位量図の出力例

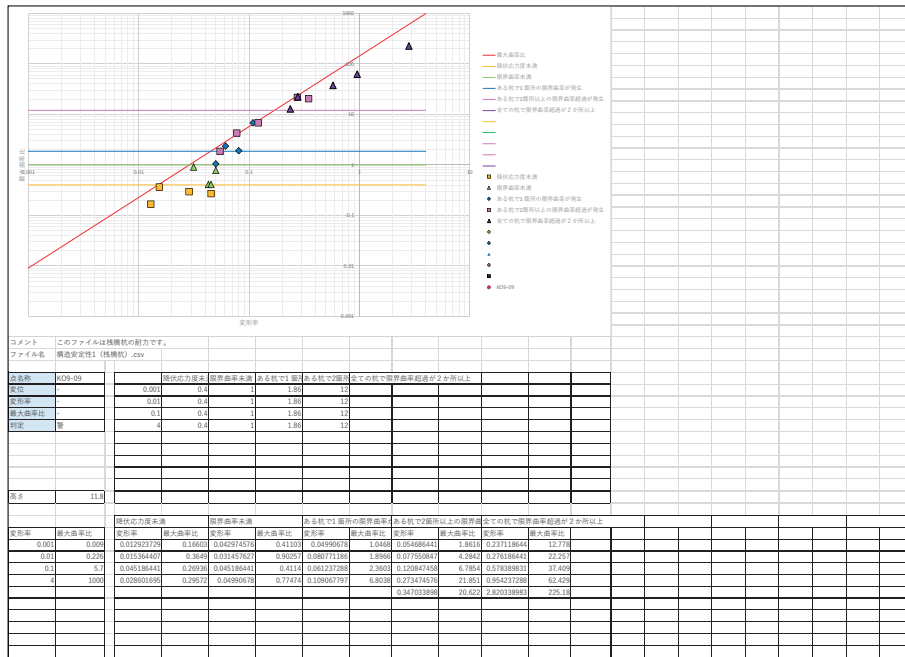


図-19 各部材の損傷状態の推定結果の出力例

### 3.4 基準点の選定方法

前述の図-10のように地震時には護岸の変位や液状化等によって地盤が変位することがあるため、基準点はそのような局所的な地盤変位の影響範囲外に設置する必要がある(図-11参照)。また、計測局との無線通信を確保するために基準局は係留施設への見通しが効く高い位置に設置することが望ましいが、その設置した建物が地震時に変形するとその変位量を含んだ値となるため、耐震性の低い建物に基準局を設置すべきではない。したがって、地震時の護岸の変形による局所的な地盤移動の影響を受けない程度に護岸から陸側に離れ、地震動や液状化等により変形しない強固な基礎及び建物で、港が一望できてGNSSや無線の通信精度を確保するために上空に障害物がない屋上に設置するのが望ましい。基準点の設置例を図-20及び図-21に示す。基準点の設置例(その1)は対象の係留施設から約700m離れたRC造3階建の屋上

に設置したものであり、基準点の設置例(その2)は対象の係留施設から約3km離れたRC増3階建の屋上に設置したものである。

### 3.5 計測点の設置方法

計測点の設置箇所は、係留施設の構造形式によって異なる。栈橋式係船岸の場合は、上部工がブロックごとに変形するため、上部工のブロックの両端に計測点の設置を基本とするが、上部工のブロックが長い場合(30m以上)には中央にも設置を行う。計測点の設置例として全長240m(10ブロック)の栈橋式係船岸を図-22に示す。矢板式係船岸の場合は、上部工が矢板によって連結されているため地震時には連続して変形するので、15~20m間隔で計測点の設置を行う。計測点の設置例として全長240mの矢板式係船岸を図-23に示す。



図-20 基準点の設置例（その1）



図-21 基準点の設置例（その2）

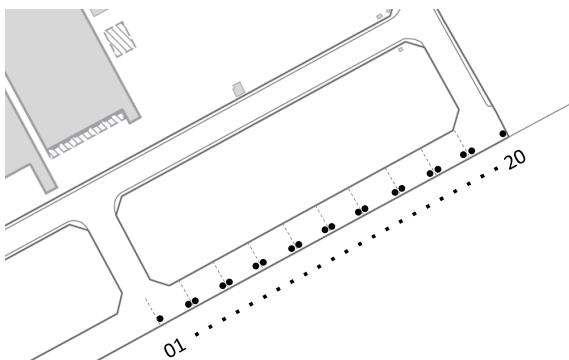


図-22 計測点の設置例（栈橋式係船岸）

### 3.6 現地実装及び測定検証

現地に基準点や計測点を設置し、Berth Surveyor に実装した機能の検証を行った。

対象の係留施設は、2.2 で法線変形率と各部材の損傷状態の整理を行った控え直杭式による土留め矢板の栈橋式係船岸とした。基準点の座標を得るために、支柱設置後に国土地理院認定機種である Leica GX1220+GNSS を使い、スタティック測量より観測を約 2 時間行い、近隣の国土地理院電子基準点より基線解析を行って座標を算出した。測量結果を表-5 に示す。計測点には、計測点名を刻印した金属鉾を設置した。

地震発生後の仮想変位計測を行い、計測された変位量

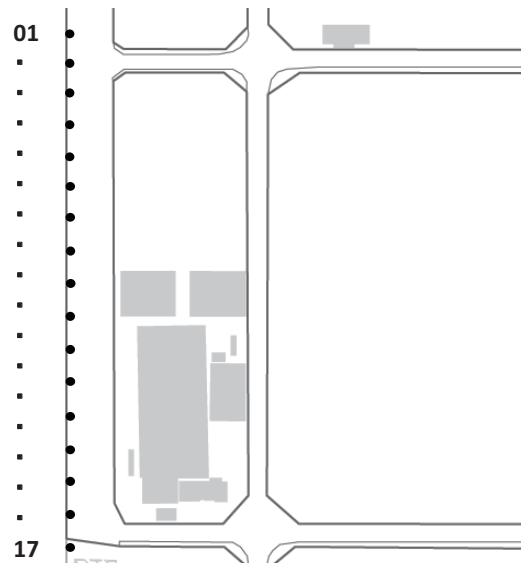


図-23 計測点の設置例（矢板式係船岸）

により Berth Surveyor に取り込んだ部材損傷—変位量関係の情報をもとに構造安定性の診断結果が正しく表示されるか確認を行った。仮想変位は、図-24 の概略図で示す位置にマーキングを行い、計 14 箇所の計測を行った。使用した RTK-GNSS の仕様を表-6 に示す。計測結果を図-25～図-27 に示すように、仮想変位③、⑤、⑥と残留水平変位が大きくなるにしたがって各部材の損傷推定結果が悪



表-5 基準点の測量結果

公共測量座標系	X	Y	Z
	-55019.413 m	-5371.754 m	20.083 m
WGS84係	緯度	経度	楕円体高
	35°30'14.62"	139°46'26.83"	55.838 m

表-6 GNSS の仕様

GNSS	メーカー：Spectra Precision 製品名：SP60
測位性能 (RTK 測位時)	水平：8mm+1.0 μ m/m 高さ：15mm+1.0 μ m/m
寸法, 重量	寸法：210mm×210mm×70mm 重量：0.93kg (GNSS 本体のみ)

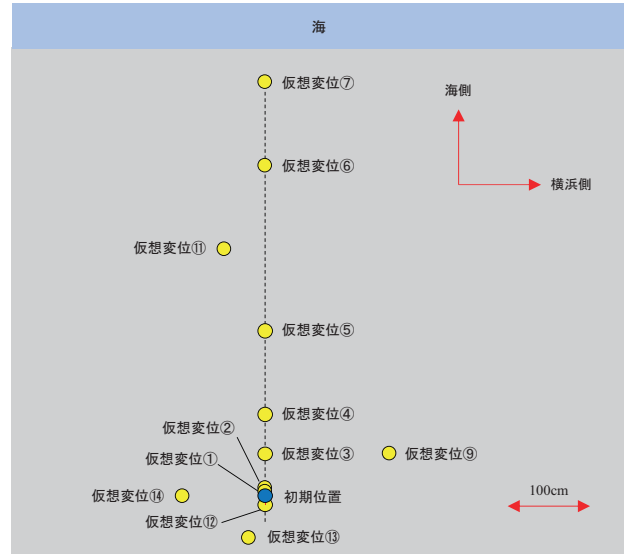


図-24 仮想変位位置図

仮想変位③

(変位詳細: 法線直角方向 50cm、法線方向 0cm)

測定点「SP00」に発生した変位量は以下の通りです。 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 開始点: 2019/03/04 13:29:47  
終了点: 2019/03/04 13:32:31 終了点: 2019/03/04 13:32:31

50.0cm変位発生!  
49.9cm直交変位発生!

詳細変位

構造安定性

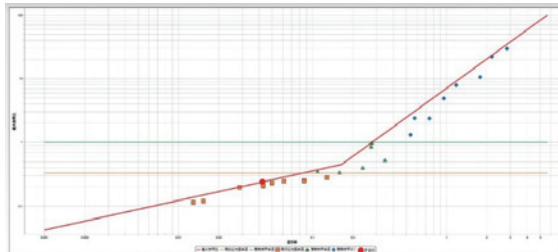


50.0cm変位発生  
49.9cm直交変位  
1.3cm隆起発生

(詳細)  
X:南へ 42.8cm  
Y:東へ 25.8cm  
1.3cm変位発生!

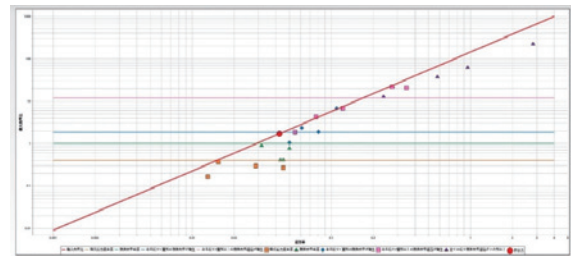
戻る

左から2番目



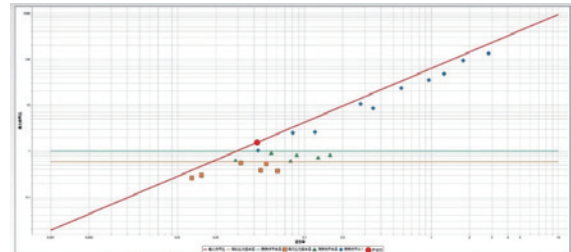
このファイルは土留め矢板の耐力です。

左から1番目



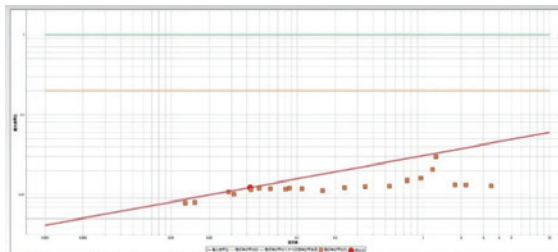
このファイルは栈橋杭の耐力です。

左から3番目



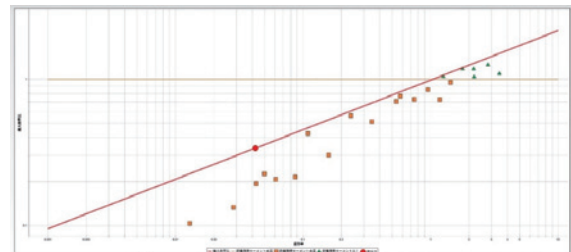
このファイルは控え杭の耐力です。

左から4番目



このファイルはタイ材の耐力です。

左から5番目



このファイルは上部工の発生曲げモーメント/終局限界モーメントです。

■ : 損傷レベル1 ▲ : 損傷レベル2 ◆ : 損傷レベル3 ■ : 損傷レベル4 ▲ : 損傷レベル5 ● : 計測結果

— : 岸壁法線変位量から各部材耐力の推定

図-25 仮想変位③の計測結果

仮想変位⑤

(変位詳細:法線直角方向 200cm、法線方向 0cm)

測定点「SP00」に発生した変位量は以下の通りです。 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 開始点: 2019/03/04 13:29:47  
 終了点: 2019/03/04 13:34:23 終了点: 2019/03/04 13:34:23

200.1cm変位発生! 200.1cm直交変位発生!

構造安定性

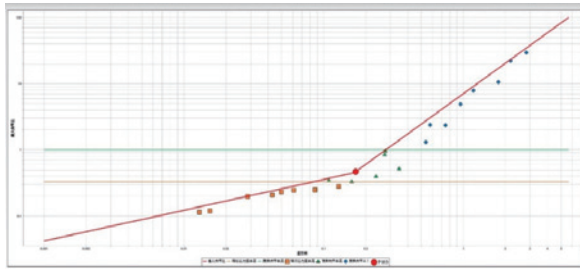
△ △ × ○ ○

200.1cm変位発生  
200.1cm直交変位発生  
2.8cm沈下発生

(詳細)  
X:南へ 173.6cm  
Y:東へ 99.6cm  
Z: 2.8cm沈下

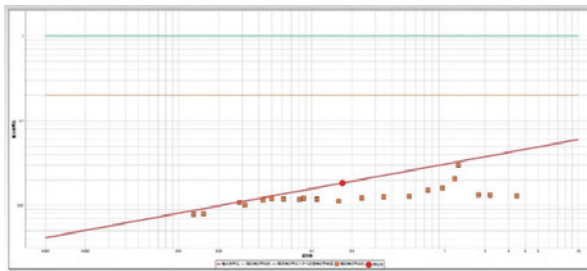
戻る

左から2番目



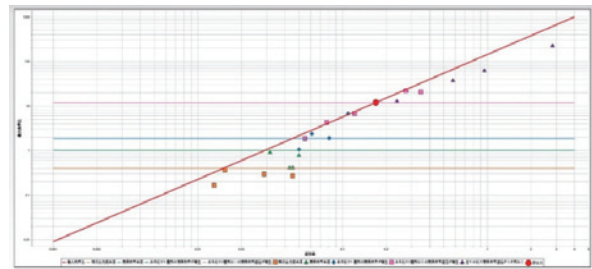
このファイルは土留め矢板の耐力です。

左から4番目



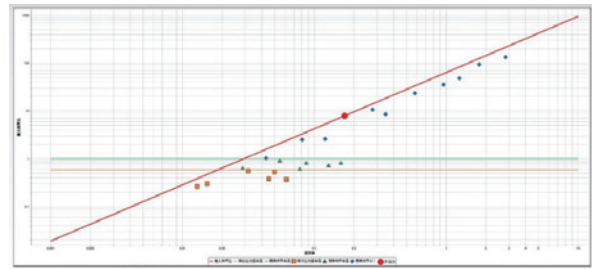
このファイルはタイ材の耐力です。

左から1番目



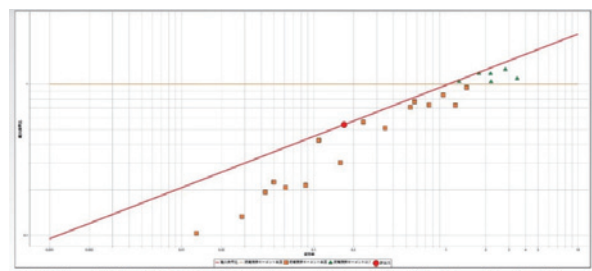
このファイルは栈橋杭の耐力です。

左から3番目



このファイルは控え杭の耐力です。

左から5番目



このファイルは上部工の発生曲げモーメント/終局限界モーメントです。

- : 損傷レベル1    ▲ : 損傷レベル2    ◆ : 損傷レベル3    ■ : 損傷レベル4    ▲ : 損傷レベル5    ● : 計測結果
- : 岸壁法線変位量から各部材耐力の推定

図-26 仮想変位⑤の計測結果

くなるほうに変化していることが確認できる。また、各図にあるように、5種類の部材の法線直交水平変位-損傷の関係のグラフ上に測定された変位量がプロットされ、各部材の判定結果が判定閾値に対してどの程度であったかも確認ができる。

大地震発生時には地殻変動が発生する可能性があるため、地殻変動発生時には予め測量を行った GNSS 基準点座標が実際の座標値と異なり、その座標値の違いにより GNSS 測量に影響を与える可能性がある。そこで、大地震発生時の地殻変動により基準点の入力座標値と実際の座標値の相違による影響を確認するために、地殻変動を模擬した RTK-GNSS 測量を行い、計測精度の検証を行った。検証にあたっては、写真-3 に示すように基準点の GNSS 受信機を移動させた状態(東に 20cm, または、北に 20cm)で図-28 に示す基準点及び東西南北に所定の距離を離し

た計測点について RTK-GNSS 測量を行った。初期座標測定では基準点は動かさず、計測点も図-28 の中心位置として計測し、その初期座標との差から変位量を算出した。基準点移動前の基準点と相対距離が等しくなる計測点を基準に変位量が所定の距離であるか確認しており、結果を表-7、表-8 に示す。検証の結果、所定距離(基準となる E-20 または N-20 からの距離)との差は 0~2.7cm であり、通常の RTK-GNSS 測量と同程度の計測精度であった。

また地殻変動により基準点の入力座標値と実際の座標値の相違による影響に関して、RTK-GNSS 測量が不可能となる限界を確認するために検証を行った。検証にあたっては、GNSS 基準点に入力する座標値を変更することによって仮想的に地殻変動を再現して RTK-GNSS 測量を行った。測量結果を表-9 に示すように、例えば基準点が地殻変動で 200m 発生した場合でも計測は可能であった。実際

に発生する地殻変動は数 m 規模であるため十分対応可能と考えられるが、地殻変動 100m を想定したケースでは Y 座標、Z 座標において誤差が 10cm 弱となっており、地殻変動量が非常に大きい場合には注意が必要である。なお、

この計測限界は GNSS 受信機の機種に依存するとも考えられるため、別機種を使用する場合には同様の確認をすることが望ましい。

**仮想変位⑥**  
(変位詳細:法線直角方向 400cm、法線方向 0cm)

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 13:35:08

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 13:35:08

400.6cm変位発生!  
400.5cm直交変位発生!

構造安定性

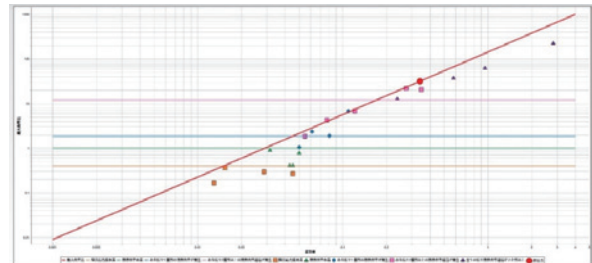
詳細変位

400.6cm変位発生  
400.5cm直交変位発生  
7.3cm沈下発生

(詳細)  
X:南へ 348.6cm  
Y:東へ 197.4cm  
Z: 7.3cm沈下

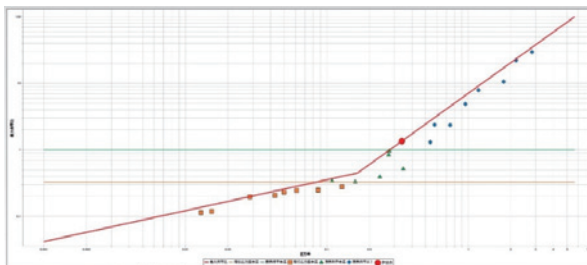
戻る

左から1番目



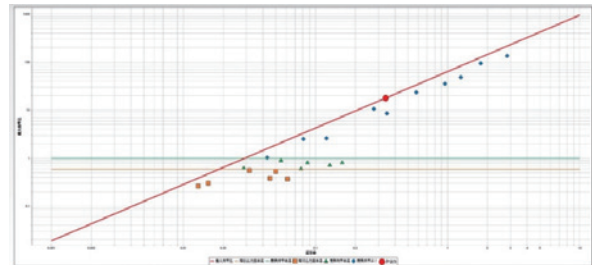
このファイルは栈橋杭の耐力です。

左から2番目



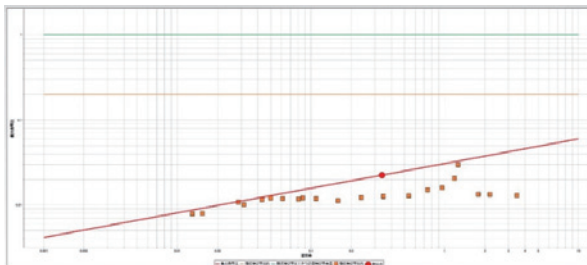
このファイルは土留め矢板の耐力です。

左から3番目



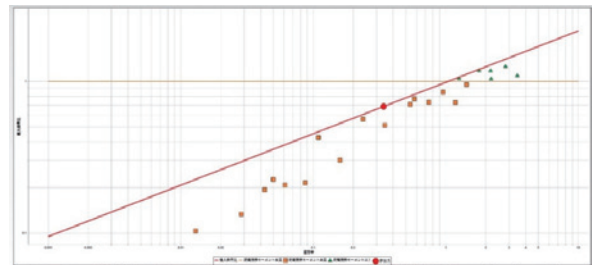
このファイルは控え杭の耐力です。

左から4番目



このファイルはタイ材の耐力です。

左から5番目



このファイルは上部工の発生曲げモーメント/終局限界モーメントです。

- : 損傷レベル1    ▲ : 損傷レベル2    ◆ : 損傷レベル3    ■ : 損傷レベル4    ▲ : 損傷レベル5    ● : 計測結果
- : 岸壁法線変位量から各部材耐力の推定

図-27 仮想変位⑥の計測結果



写真-3 GNSS 受信機の位置の変更

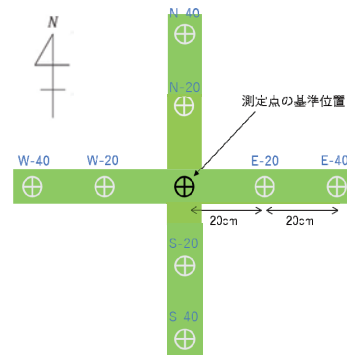


図-28 計測点位置図



表-7 計測結果（基準点を東に20cm移動させた場合）

計測点位置	E-20からの距離	測定変位量	誤差
C	西に20cm	西へ19.0cm	1.0cm
E-20	0cm	東へ0.3cm	0.3cm
E-40	東に20cm	東へ19.8cm	0.2cm
W-20	西に40cm	西へ39.9cm	0.1cm

表-8 計測結果（基準点を北に20cm移動させた場合）

計測点位置	N-20からの距離	測定変位量	誤差
C	南に20cm	南へ20.0cm	0.0cm
N-20	0cm	南へ0.9cm	0.9cm
N-40	北に20cm	北へ17.3cm	2.7cm
S-20	南に40cm	南へ40.3cm	0.3cm

表-9 基準点の仮想地殻変動発生時の計測検証結果

	基準点座標				計測点座標			
		X	Y	Z		X	Y	Z
ケース1 (入力値を100mずらした場合)	真値	-55019.413 m	-5371.754 m	20.083 m	真値	-55019.764 m	-5374.396 m	18.392 m
	設定値	-55119.413 m	-5371.754 m	20.083 m	想定値	-55119.764 m	-5374.396 m	18.392 m
	測定値				測定値	-55119.748 m	-5374.465 m	18.476 m
	真値と設定値との差	100 m	0 m	0 m	真値と測定値の差	99.984 m	0.069 m	0.084 m
ケース2 (入力値を200mずらした場合)	設定値	-55219.413 m	-5371.754 m	20.083 m	想定値	-55219.764 m	-5374.396 m	18.392 m
	測定値				測定値	-55219.736 m	-5374.414 m	18.304 m
	真値と設定値との差	200 m	0 m	0 m	真値と測定値の差	199.972 m	0.018 m	0.088 m
	想定値と測定値の差(誤差)				想定値と測定値の差(誤差)	-0.028 m	0.018 m	0.088 m
ケース3 (入力値を300mずらした場合)	設定値	-55319.413 m	-5371.754 m	20.083 m	想定値	-55319.764 m	-5374.396 m	18.392 m
	測定値				測定値	計測不可	計測不可	計測不可
	真値と設定値との差	300 m	0 m	0 m	真値と測定値の差	—	—	—
	想定値と測定値の差(誤差)				想定値と測定値の差(誤差)	—	—	—

#### 4. まとめ

本研究の検討から得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 各部材の損傷の推定にあたっては、地震条件を変更した大小複数の地震動を入力した地震応答解析結果より法線変形率と各部材の損傷状態を整理し、安全側の評価になるように変形率一部材損傷関係を求めた。
- (2) 大地震発生時の港湾施設の使用可否診断のための安定性評価を支援するために、RTK-GNSSのGNSS受信機の操作にはスマートフォン端末を用いてタッチパネルで簡単に操作でき、測量結果から簡単に残留変位量を計測し、残留変位量から施設損傷を概略判断できるアプリケーション「係留施設地震時変形量調査・安定性評価支援システム Berth Surveyor」を開発した。Berth Surveyorには、「計測機能」や「計測点の設定機能」、「変位、安定性確認機能」、「計測点への誘導機能」を有することにより作業の効率性を上げ、現場で即時に残留変位量の確認が可能となっている。

- (3) 基準点、計測点の現地設置について検討した。現地試計測を行い、計測された変位量により Berth Surveyor に取り込んだ変位一部材損傷関係の情報をもとに構造安定性の診断結果が正しく表示されるか確認するために地震発生後の仮想変位計測を行った。仮想変位は残留水平変位が大きくなるにしたがって各部材の損傷推定結果が悪くなるほうに変化していることが確認できた。
- (4) 地殻変動によるGNSS基準点座標が実際の座標値と異なることによる影響の有無を確認するために、GNSS基準点を実際に移動させた場合と、入力する基準点座標値を変更することによって仮想的に地殻変動を再現して検証を行った。実際に想定される地殻変動量よりも非常に大きい100mの場合に誤差は10cm弱と大きくなった。

本研究では、大地震発生時の港湾施設の使用可否診断のための安定性評価を支援する「係留施設地震時変形量調査・安定性評価支援システム Berth Surveyor」の開発を行ったが、実際に港湾施設の供用可否判断にあたっては

「Berth Surveyor」の各部材の損傷推定結果のみで判断するのではなく、表-1 に示す着眼点を踏まえて総合的に判断すべきであることに留意する必要がある。

(2020年3月6日受付)

## 謝辞

本研究は、国土交通省港湾局、国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所及び国土交通省関東地方整備局からの受託研究として実施したものである。現地実装及び測定検証の際には、港湾関係者の方々にはご協力をいただきました。関係各位に対して、ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本港湾協会 (2018) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (下), pp.1853.
- 2) 日本港湾協会 (2018) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (下), pp.1854.
- 3) 井合進, 菅野孝弘, 野津厚, 一井康二, 佐藤陽子, 小濱英司, 深澤清尊 (2002) : 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, pp.10
- 4) 井合進, 菅野孝弘, 野津厚, 一井康二, 佐藤陽子, 小濱英司, 深澤清尊 (2002) : 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, pp.11.
- 5) 日本港湾協会 (2018) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (下), pp.1855.
- 6) 日本港湾協会 (2018) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (中), pp.1054-1055, 1196.
- 7) 内田吉文, 本田和彦, 吉村藤謙, 鬼頭孝明, 神藤明彦, 曾根照人, 楠謙吾 (2011) : 栈橋式構造の残留水平変位と応力状態の関係について(その2), 土木学会第66回年次学術講演会, pp.663-664.
- 8) 曾根照人, 宇野健司, 淵ノ上篤史, 山本芳生 (2016) : 強震計観測情報を用いた係留施設の供用可否判定システムの開発, 地盤工学会誌, 64-7(702), pp.16-19.
- 9) S. Iai, Y. Matsunaga, T. Kameoka (1992). Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, 32(2): 1-15.
- 10) 国土地理院 (2012) : 東北地方太平洋沖地震前・後の東日本の地殻変動の変化と GPS データから推定される固着域, <https://www.gsi.go.jp/cais/chikakuhendo40012.html>, 2020年1月31日閲覧.
- 11) 濱田政則, 磯山龍二, 若松加寿江 (1995) : 1995年兵庫県南部地震液状化, 地盤変位及び地盤条件, 地震予知総合研究振興会
- 12) 小濱英司, 菅野高弘 (2015) : RTK-GPS を用いた地震後岸壁変形量計測ツールの開発, 地盤工学会誌, Vol63(1), pp.34-35.

港湾空港技術研究所資料 No.1370

2020. 3

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2020) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。





古紙配合率70%再生紙を使用しています