地震防災研究領域の研究の課題と展望

令和4年度 港湾空港技術講演会　～港湾技術研究所設立60周年記念～

2022年10月13日（木）

野津　厚
港湾空港技術研究所　地震防災研究領域長

地震防災研究領域のメンバー

地震防災研究領域

野津　厚　（領域長）
大矢陽介　（上席研究官）
菅野高弘　（上級専任研究員）

地震動研究グループ

野津　厚　（グループ長）
長坂陽介　（主任研究官）

耐震構造研究グループ

小濱英司　（グループ長）
近藤明彦　（主任研究官）
毛利惇史　（研究官）
笠田龍輝　（研究員）

地震防災研究領域のメンバー

地震防災研究領域

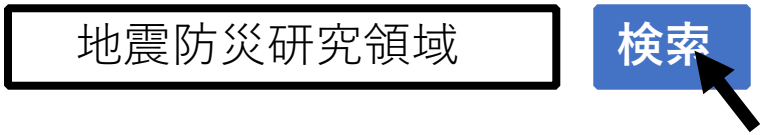
野津　厚　（領域長）
大矢陽介　（上席研究官）
菅野高弘　（上級専任研究員）

地震動研究グループ

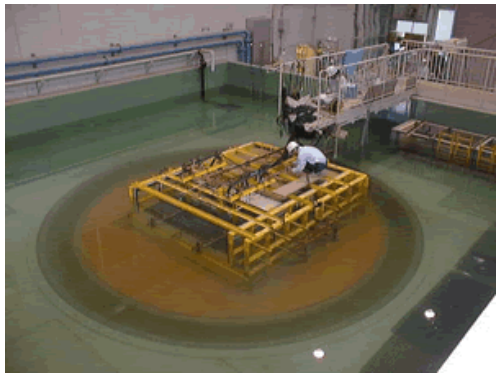
野津　厚　（グループ長）
長坂陽介　（主任研究官）

耐震構造研究グループ

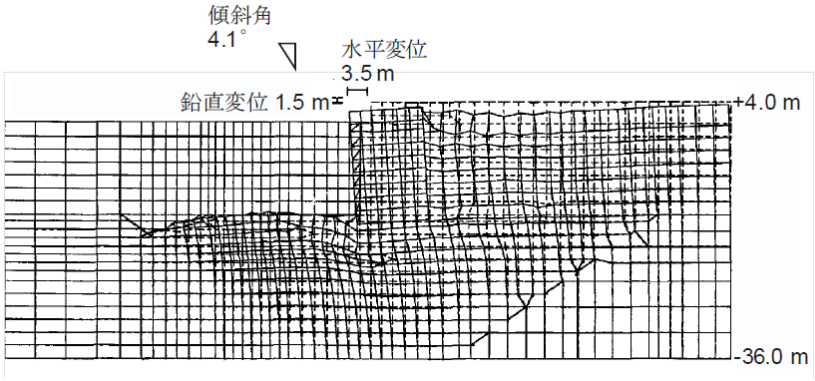
小濱英司　（グループ長）
近藤明彦　（主任研究官）
毛利惇史　（研究官）
笠田龍輝　（研究員）



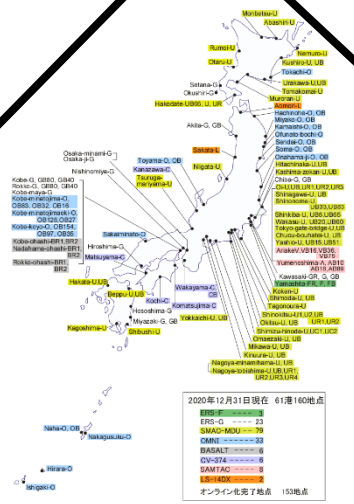
地震防災研究領域における研究の基本的ツール



3次元水中振動台



FLIP等の数値解析



強震観測

地震防災研究領域の研究

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、福岡県西方沖の地震、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・空港施設の地震対策が極めて重要である。地震防災研究領域では、そのために必要な技術について基礎から応用まで幅広く研究を行っている。特に

①想定地震による地震動を精度良く見積もる技術

②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術

③構造物の特性を考慮し効果的に対策を行うための技術

④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

などの研究に取り組んでいる。

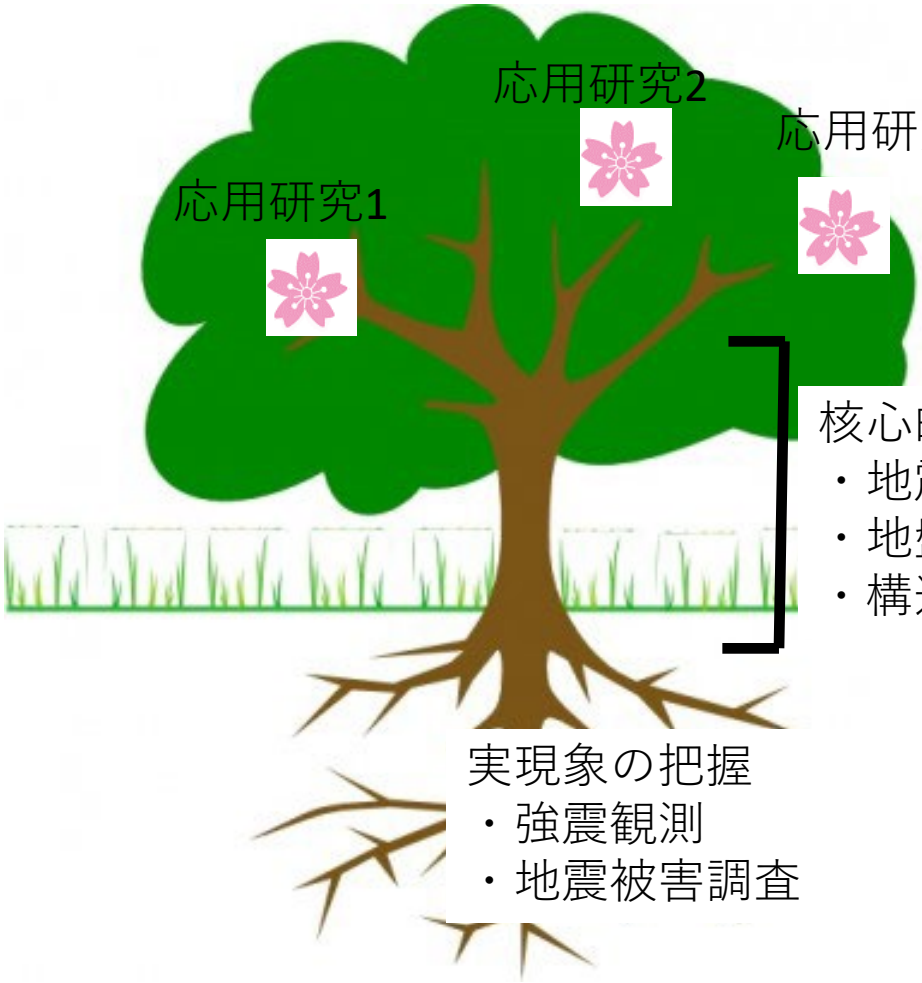
また、これらの研究全体を基礎から支えるものとして、

⑤強震観測

⑥地震被害調査

を通じて、地震被害の現場で実際に生じている現象の把握に努めている。

地震防災研究領域の研究体系



核心的な知見
- 地震動に対する深い理解
- 地盤の地震時挙動に関する深い理解
- 構造物の地震時挙動に関する深い理解

実現象の把握
- 強震観測
- 地震被害調査

地震防災研究領域の研究方針

- 整備局等に喜んでいただける応用研究と、10年後～20年後も見据えた基礎研究の両方を行っていく。

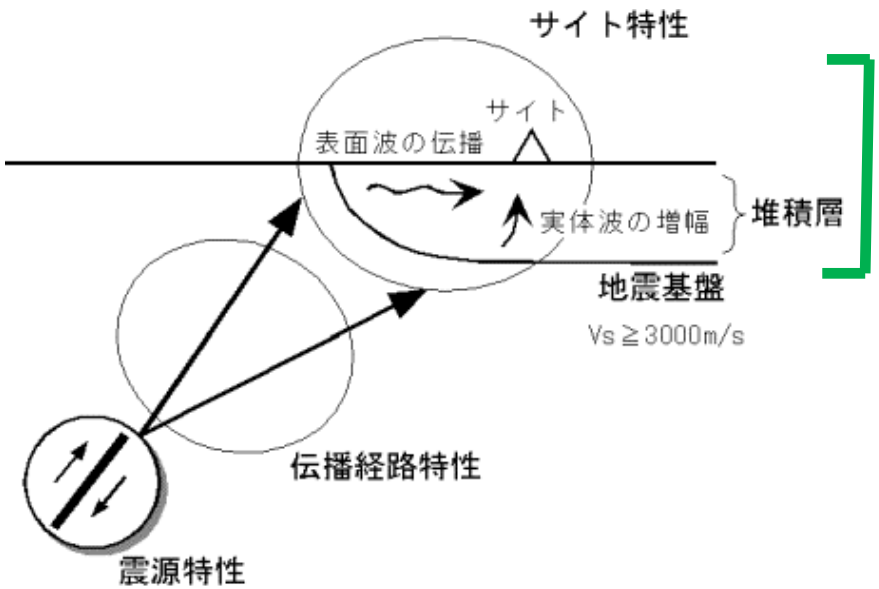
- 整備局等のニーズはダイナミックに変化すると認識。たとえば、ある時期には洋上風力が、ある時期には大規模橋梁の基礎が、重要なターゲットとなる。その時々のニーズには対応していなかければならない。

- ただし、それだけではなく、いつどのようなニーズが生じても対応できるように基礎力を磨いておく必要がある。基礎研究は短期間では成果が出ないので、ニーズが生じてから始めたのでは間に合わない。将来のニーズを見越してあらかじめ行っておく必要がある。

地震防災研究領域の研究

①想定地震による地震動を精度良く見積もる技術

地震対策の基礎となるのは想定地震による地震動を精度良く見積もる技術である。この分野の研究は土木・建築・理学の各分野の研究者が参画して実施されてきた。



・数値解析による評価
・中小地震記録による評価

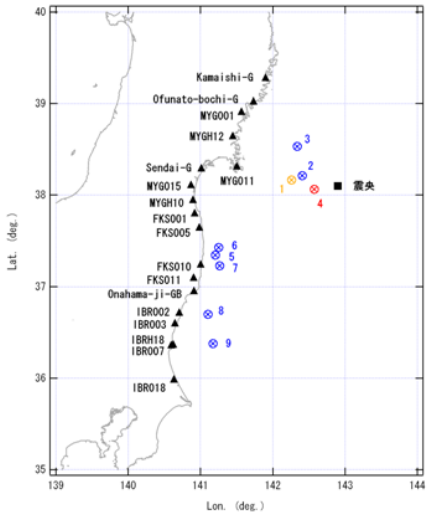
地震防災研究領域の研究

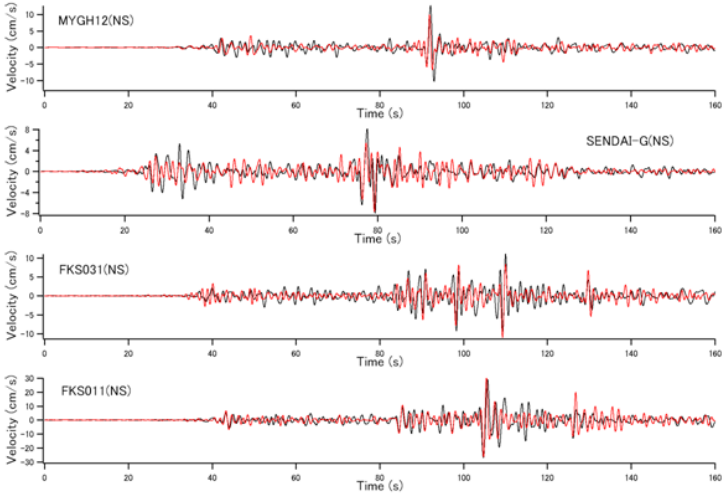
①想定地震による地震動を精度良く見積もる技術

港空研（港研）が強震動の研究に本格的に参入したのは1995年兵庫県南部地震以降である．現在，港空研は少なくとも次の二つの点でこの分野の先頭に立っていると考えている．

1) 中小地震記録を利用した強震動シミュレーション手法の開発
2) 海溝型地震による地震動を正確に計算するための震源モデルの開発

港空研以外では，日本では建築分野（大学やゼネコンの研究所）で地震動に関する研究が盛んに行われている．





SPGAモデルによる2011年東北地方太平洋沖地震の速度波形の再現結果．

地震防災研究領域の研究

①想定地震による地震動を精度良く見積もる技術

強震動の研究はまだ課題が多い．すでに起きた地震に対して，震源モデルを注意深く設定したような場合であっても，依然として，地震動の計算結果と観測結果が上手く合わない場合がある．これは，いま我々が用いている強震動予測手法や震源モデルに問題点が残されていることを示している．やや専門的になるが，おそらくは，ラディエーションパターンやdirectivityの取り扱い，伝播経路における減衰の取り扱い，表層地盤の非線形挙動の取り扱いなどに課題が残されていると考えられる．今後，より多くの強震記録を活用して，誤差要因の特定を行い，強震動予測手法の改良を行っていく必要がある．

以上のプロセスを通じて「想定地震による揺れを予測する技術」に関して，常にその時代の最良の技術を港空研が保有するように努める．そして，その技術を背景として，整備局への支援を行う．

地震防災研究領域の研究

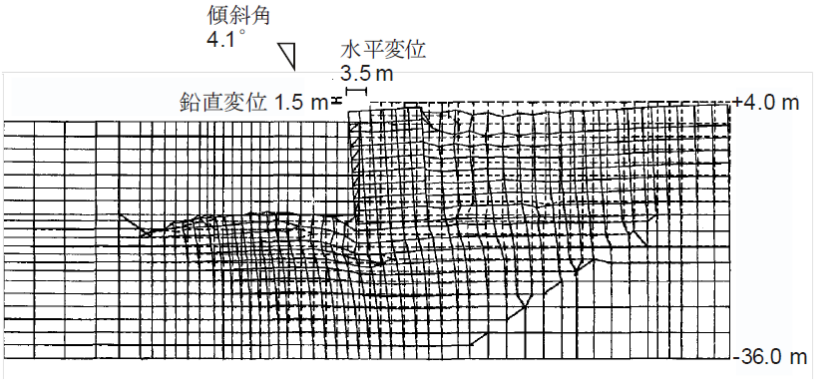
①想定地震による地震動を精度良く見積もる技術

さらに，海外への展開も視野に入れて研究を行って行きたい．米国などでは，わが国で用いられているものとはかなり異なる震源モデル，計算手法が用いられている．わが国，特に港空研で開発された震源モデル，計算手法がアドバンテージを有することをより広く理解してもらうためには，海外の地震を対象とした解析事例なども増やす必要がある．一方で，米国などで採用されている手法に良い点があれば，それを部分的にでも取り入れて，わが国の設計に活用できるようにすることも，港空研としてやるべき仕事であろう．

この他，事業者が港湾・空港において照査用地震動を設定する際の技術支援については，現中長期期間においてはかなりのエフォートを割いて行ってきたところであり，これは次期中長期期間においても，国総研とも連携しながら，継続的に行って行く必要がある．

②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術

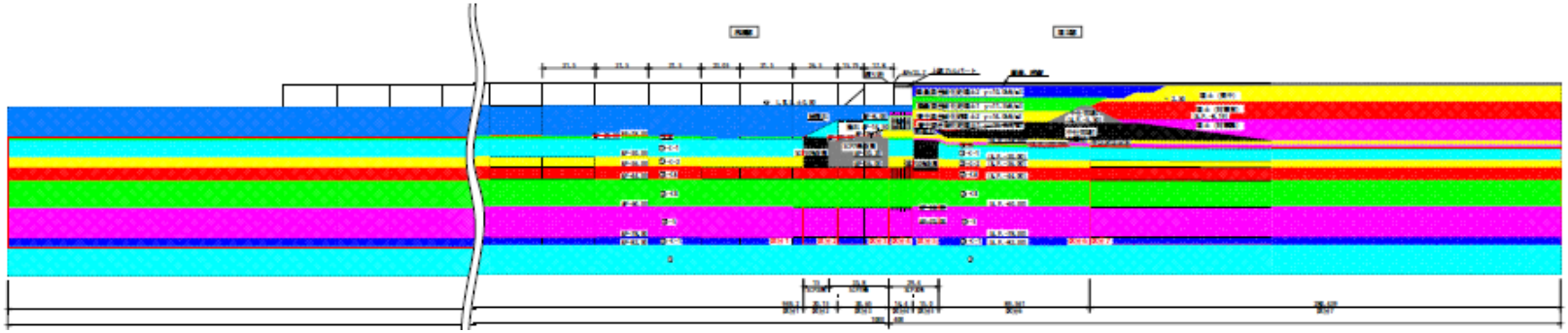
地盤－構造物系の地震時被害予測技術は，港湾空港施設の地震対策を行っていく上での基幹的な技術である．当研究所はこれまでも，地盤－構造物系の被害予測に関する数値解析技術の開発において中心的な役割を果たしてきたが，現時点でもこの分野における数値解析技術は多くの課題を抱えており，未成熟な段階にある．今後10年ほどかけて，この分野における数値解析の抜本的な信頼性向上を図る必要がある．

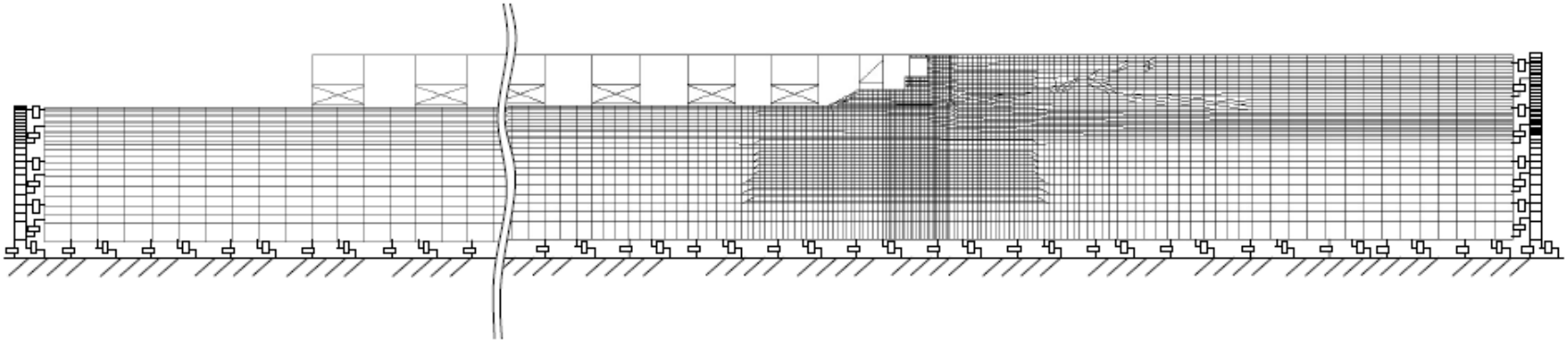


FLIP等の数値解析

地震防災研究領域の研究

②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術

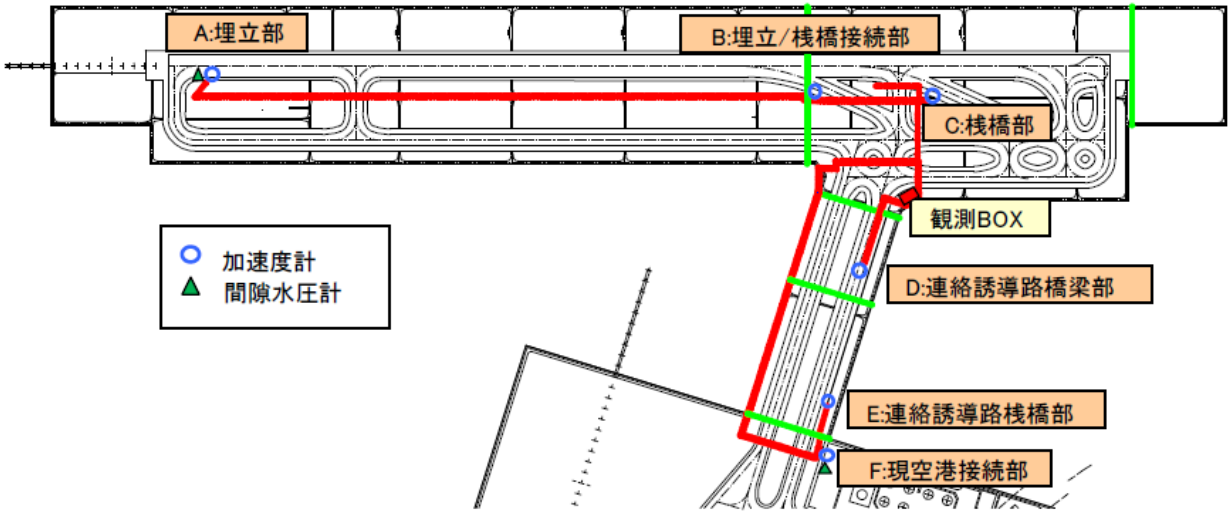




地震時被害予測技術の現在の到達点：羽田空港D滑走路のFLIP解析

地震防災研究領域の研究

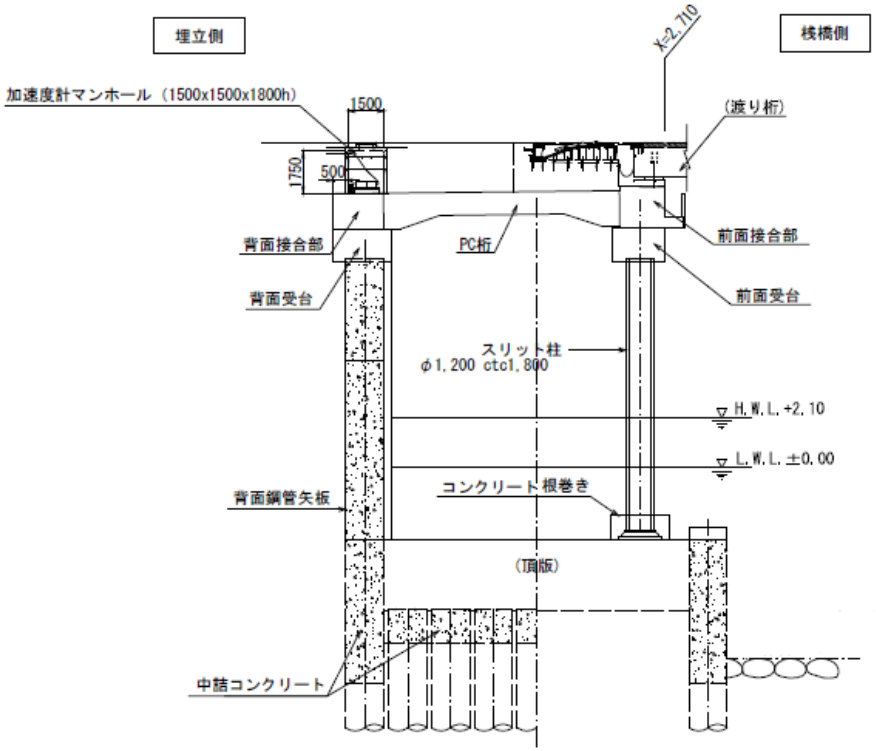
②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術



地震時被害予測技術の現在の到達点：羽田空港D滑走路のFLIP解析

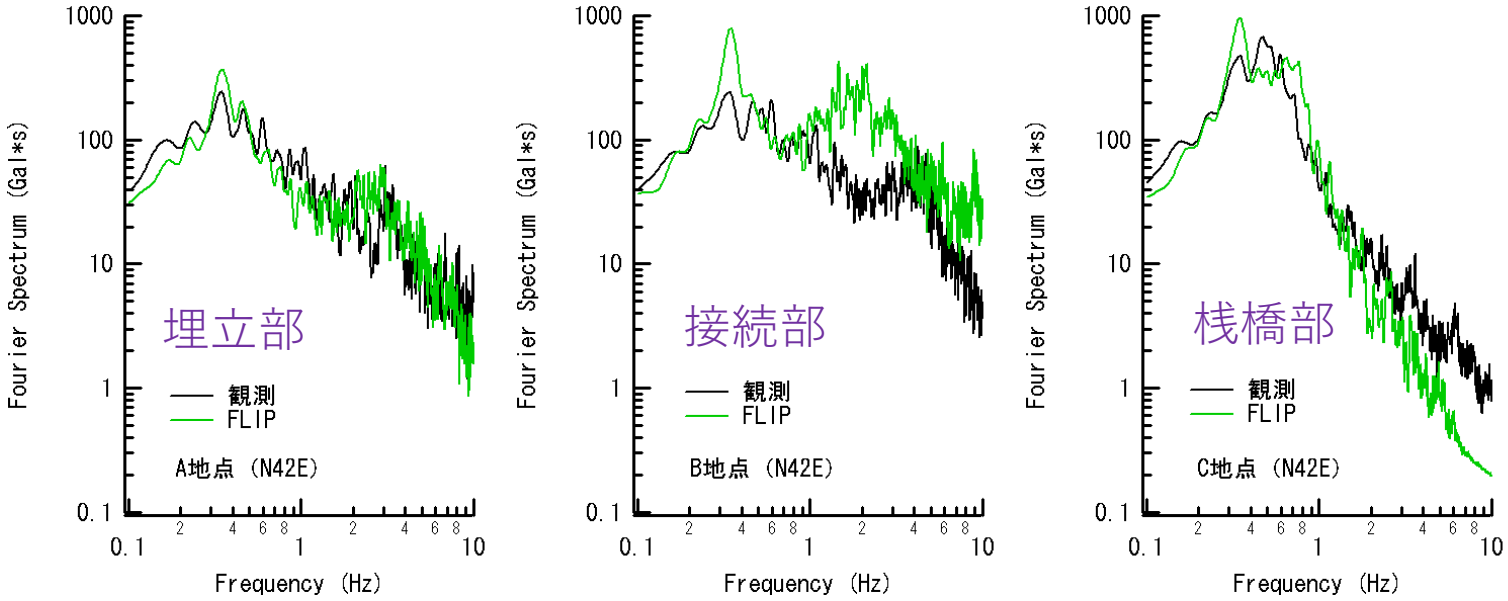
地震防災研究領域の研究

②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術



地震時被害予測技術の現在の到達点：羽田空港D滑走路のFLIP解析

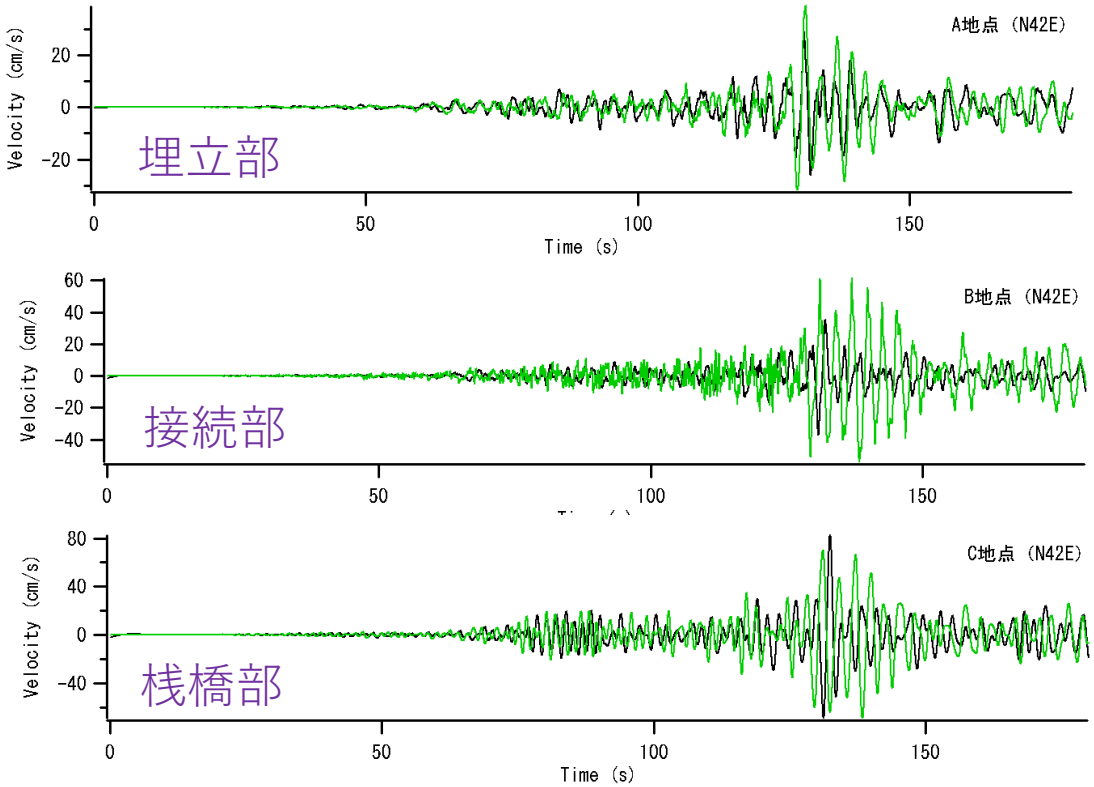
②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術



地震時被害予測技術の現在の到達点：羽田空港D滑走路のFLIP解析

地震防災研究領域の研究

②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術



地震時被害予測技術の現在の到達点：羽田空港D滑走路のFLIP解析

②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術

項目	実測との比較
埋立部の応答波形，スペクトル	極めて良好に再現
桟橋部の応答波形，スペクトル	極めて良好に再現
埋立／桟橋接続部の波形，スペクトル	やや過大評価
埋立／桟橋接続部の残留相対変位	かなり過大評価

設計時のモデルは，実際よりも変位の出やすいモデル（安全側の計算結果を与えるモデル）になっていたものと考えられる．設計上はこれで問題無かったが，今後想定される地震に対する被災程度予測をより実状に近づけていくことは重要　→　1個1個の事例について丹念に誤差の原因を見つけていく必要がある（自重解析時の粘性土の扱いなど）

地震時被害予測技術の現在の到達点：羽田空港D滑走路のFLIP解析

②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術

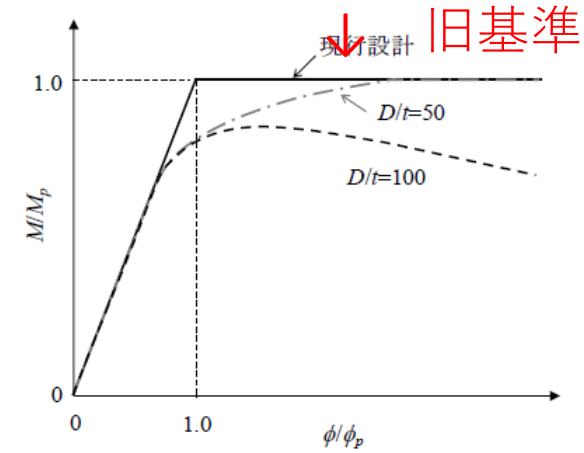
FLIP解析における鋼管杭のモデル化

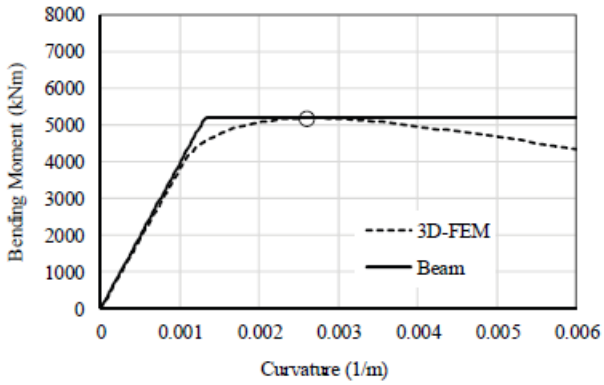
※旧基準では全塑性モーメントを折れ曲がり点とするバイリニア型のM-ϕ関係が用いられていたが，D/tの大きな鋼管杭は実際には全塑性モーメントに到達する前に局部座屈が生じて耐力低下が生じる危険性が高い（課題１）．

※一方，D/tの小さな鋼管杭は局部座屈による耐力低下が起こりにくく，変形が進んでも耐力を保ち続けることができるが，その変形性能は旧基準では十分に考慮されていなかった（課題２）．

→これらについて検討がなされ（大矢・塩崎他，2017，港空研報告），D/tや軸力比を適切に考慮できる鋼管杭のモデルが平成30年基準で導入された．

→現中長期の大きな成果の一つ



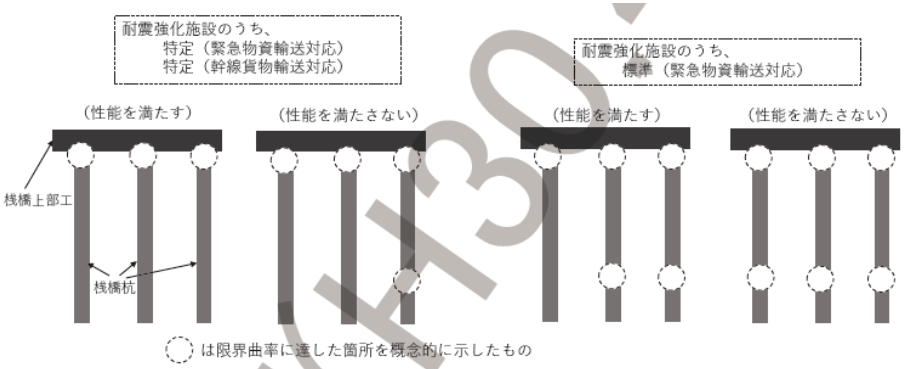


②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術

FLIP解析における鋼管杭のモデル化

※ただし現状のFLIPはポストピークの問題にうまく対応できていない．すなわち，現状のFLIPは限界曲率を越えた箇所についてもそのままバイリニアで（モーメントが低下しないと仮定して）計算を続けていく．実際には，限界曲率を越えた箇所では，局部座屈が生じてモーメントが低下し，そのモーメントが他の杭に再配分されたり，鉛直方向の耐荷力が失われる危険性がある．このことが現状のFLIPでは考慮できていない．

→今後の大きな課題の一つ



図－5.2.14　限界曲率に達した杭の数え方に関する概念図

地震防災研究領域の研究

②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術

★現状の被害予測技術は，限られた被災事例に基づいて検証されているに過ぎない．構造物-地盤系の被害予測技術の信頼性向上を図るためには，より多くの被災事例に基づいて検証を行うことが必要と考えられる．
★現状の被害予測技術が誤差を含むことは当然としても，現状は，その誤差の程度がどの程度であるかさえ，十分には把握できていない．「倍半分」という言葉が安易に使われることがあるが，それは，対数標準偏差が$\log_{10} 2=0.3$程度という意味なのだろうか？
★被害を再現できた場合でも，すぐ隣の無被災事例を再現できない場合がある．
★特殊な構造形式や新しい構造形式に対する被害予測は，検証用のデータがそもそも存在しておらず，被害予測技術の信頼性は低い段階に留まっている．

→これらの課題の全てについて，次期中長期計画期間中に解決可能ではないかもしれないが，解決できる課題は解決すべきである．

地震防災研究領域の研究

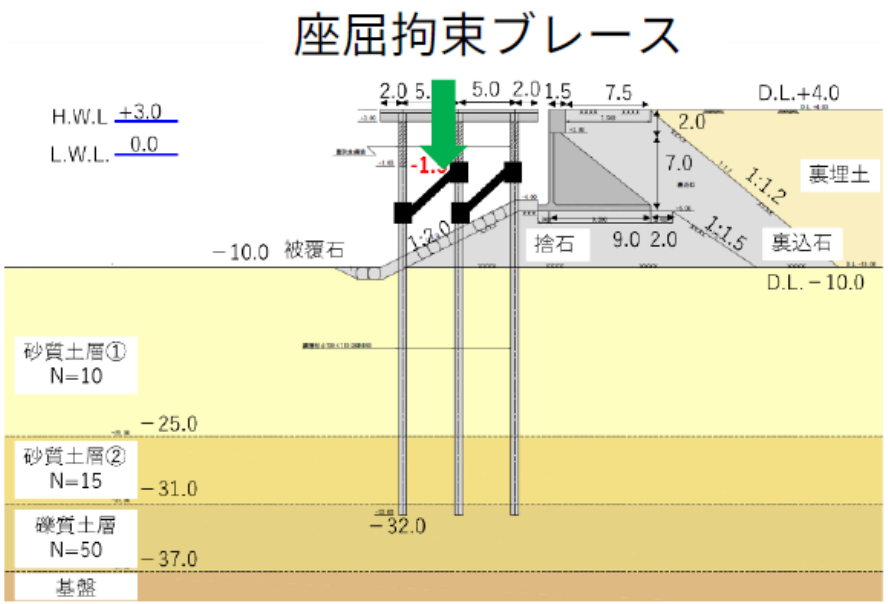
②想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術

★具体的には次のことを実行する必要がある.

1) 強震観測の継続的な実施　←被災事例DBの拡充
2) 地震被害調査の継続的な実施　←被災事例DBの拡充
3) 多量の被災事例に基づく構造物-地盤系の被害予測技術の検証および誤差要因の分析　←先ほどの羽田の事例のように誤差の生じる場合に着目する
4) 構造物-地盤系の被害予測技術の改良
5) 水中振動台の活用　←特殊な構造形式や新しい構造形式に対しては，実物の被災事例が存在しておらず，実被害に基づく検証は不可能なので，模型振動実験を活用して数値解析の検証を行う必要性が特に高い.

③構造物の特性を考慮し効果的に対策を行うための技術

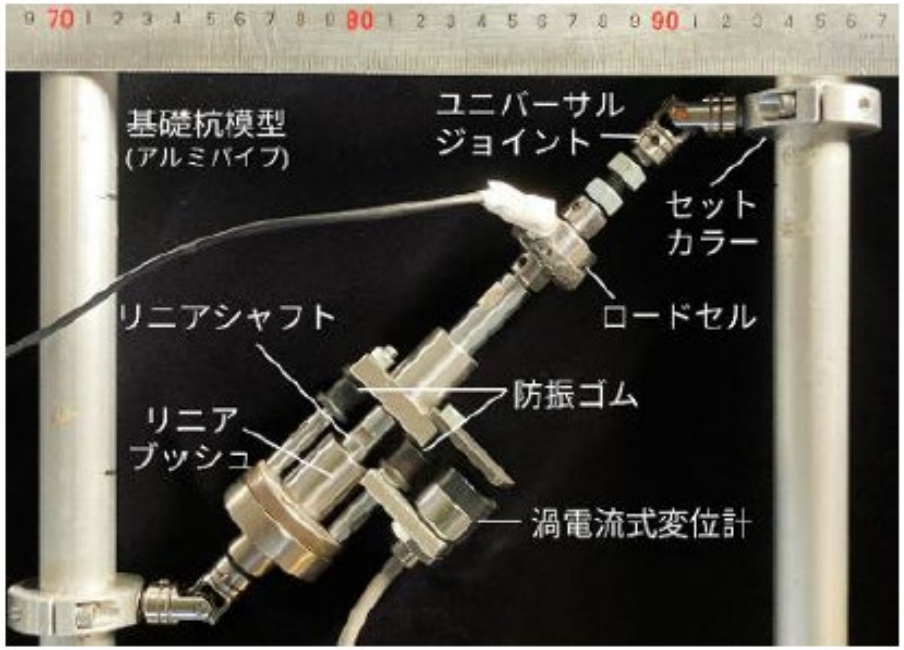
沿岸域施設の耐震性向上のための改良においては、これまで、地盤改良による方法が多く用いられてきたが、供用しながらの改良において制約が大きいものも多く、また、条件によっては改良範囲が大きくなり高コストとなる場合もある。そこで、現中長期計画期間からは、構造的対策を含めた新たな耐震対策技術について検討を開始している。その際、従来のように単に地震に強い構造を検討するだけでなく、万が一被災した場合においても、一部の部材の交換等により早期の供用を可能とする構造についても検討している。



直杭式桟橋に座屈拘束ブレースを追設した構造

③構造物の特性を考慮し効果的に対策を行うための技術

これまでの研究では、追設部材を防振ゴム等により模擬した模型振動実験により、設置角度が部材追設の効果に影響を及ぼすこと、基礎杭の損傷の観点から適切な部材特性の選定が望まれること等の知見が得られている。
地震後に復旧しやすい構造の研究はまだ始まったばかりで、次期中長期計画期間においても継続的に取り組む必要がある。例えば既設構造物の特性（例えば劣化の程度）に応じた最適な対策工法を提案するなど研究を進めていく必要がある。ポストピーク後、地震動後作用による挙動・安定性の解明に基づいた要求性能を考慮することも必要である。

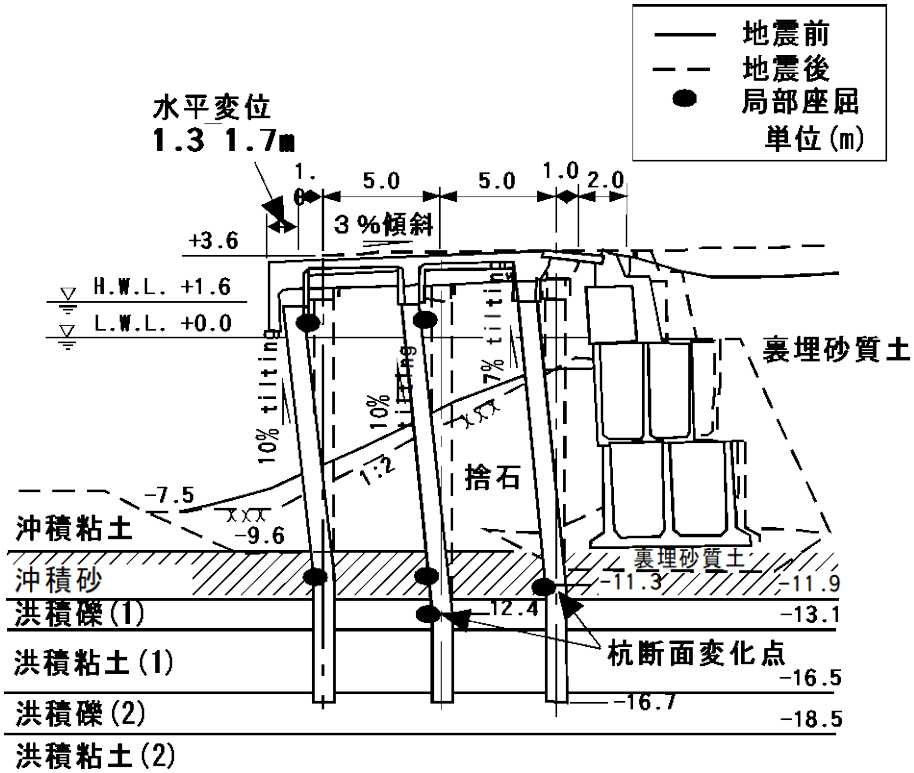


追設部材の再現に用いた防振ゴム等

④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

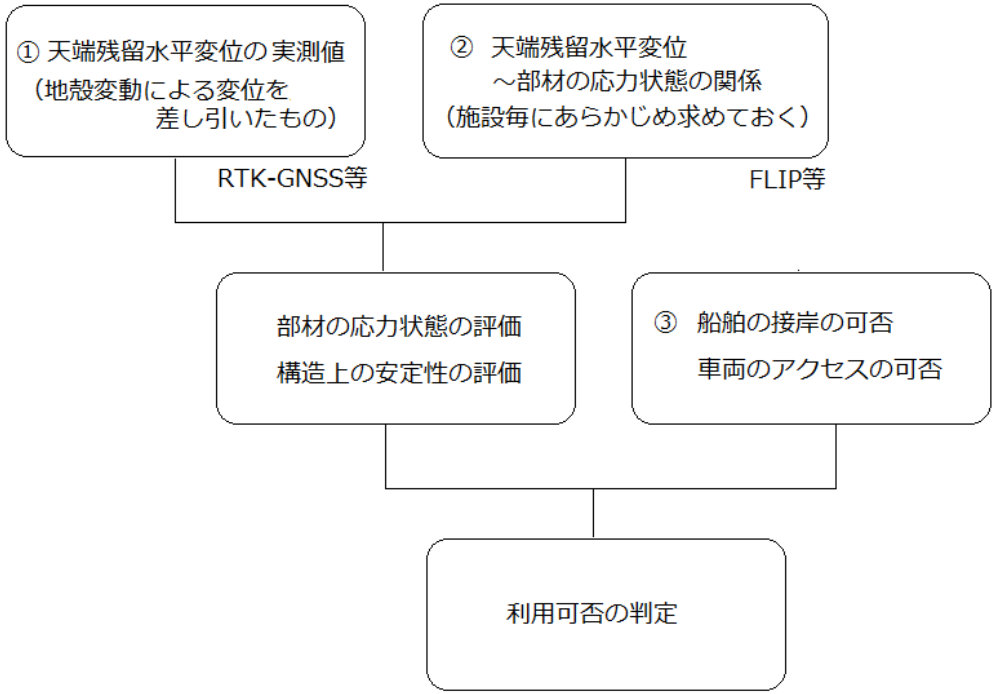
桟橋の被害例（神戸港高浜桟橋、1995年兵庫県南部地震）

◎矢板・桟橋など鋼部材を含む係留施設の利用可否判断においては，部材の応力状態を必ず確認する必要がある．
◎そのためには少なくとも天端残留水平変位を明らかにする必要がある．



④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

◎各施設の構造や地盤条件などの個別性の影響が大きいので，原則としては，『港湾の施設の技術上の基準・同解説』（平成30年）のp.1856に記載されている図に示すような流れで，施設の個別性を考慮して利用可否判断を行うことが望ましい．



④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

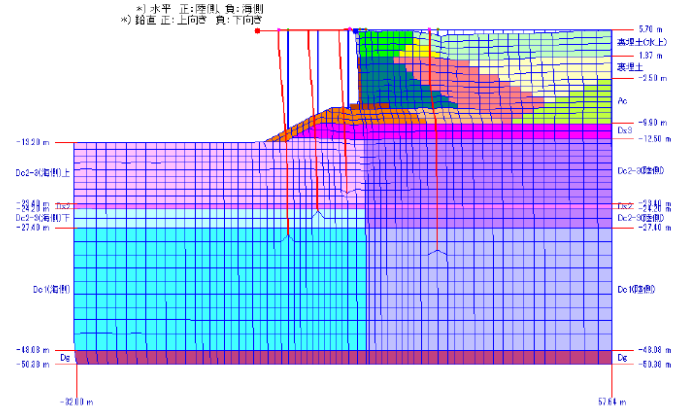
天端残留水平変位～部材の応力状態の関係
（九州地方整備局における事例）

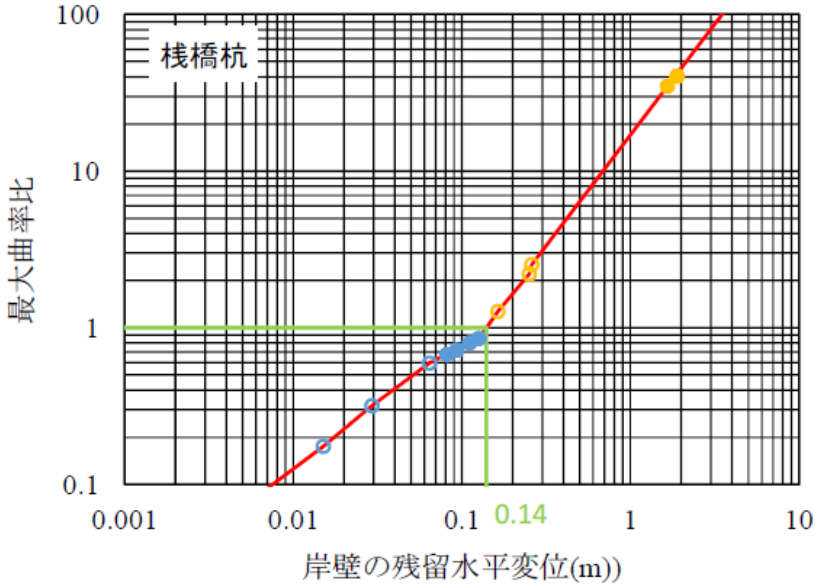
(1) 残留変形図

位置	変位(m)	水平	鉛直
岸壁天端	残留	-1.66	-0.03
	最大	-1.66	-0.04
土留天端	残留	-1.72	-0.31
	最大	-1.72	-0.31

構造スケール ⟶ 5 m

変形スケール ⟶ 5 m (構造スケール×1)





(1)残留水平変位と地震中の桟橋杭の最大曲率比

④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

天端残留水平変位について

◎一見動いていないように見える岸壁でも動いていることがある。

写真－4.2.3.5　摩耶埠頭第1突堤第3岸壁

←後に航空写真測量で50cm程度動いていることが判明した。

◎係留施設の変位　＝　地殻変動による変位　＋　係留施設の変形による変位

・地震前後の絶対座標の差をとるだけではだめ

・地殻変動に関する変位を外部機関から入手しようとすると時間がかかる

④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

このような観点から、現中長期計画期間中に、RTK-GNSSによる岸壁使用可否判断支援システム「Berth Surveyor」の開発を行ってきた。

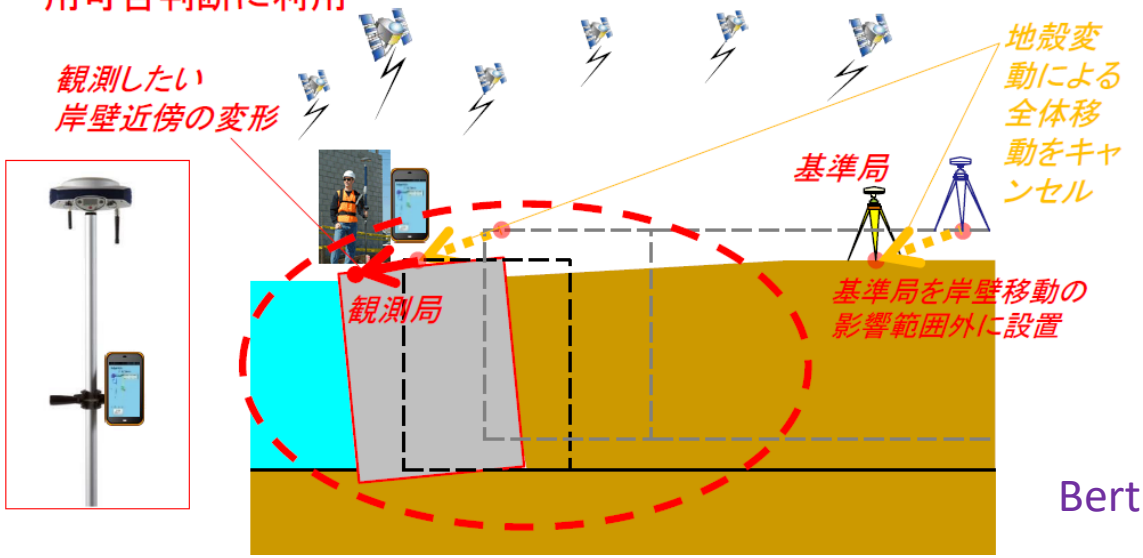
岸壁使用可否判断支援システム「Berth Surveyor」

④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

RTK-GPSを用いた岸壁変形量計測ツールの検討

- Androidアプリにより、簡単にGPSアンテナを操作，計測
  - 計測時の携行機器はGPSアンテナおよび操作端末，1人でも計測が可能
- RTK-GPS方式により、誤差1-2cmの高精度な計測が可能

⇒現場にて即座に変位量を把握し、要詳細調査個所を抽出、簡易使用可否判断に利用



Berth Surveyor

④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

敦賀港における適用調査

Berth Surveyor

④地震後に施設の供用可否判断を迅速に行うための技術

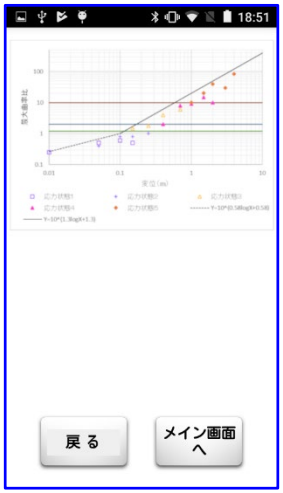
関東地整受託研究（H30d～R3d）

- RTK-GNSSスマホアプリ上での供用可否判定結果の表示機能追加（変形量－部材損傷関係の取り込み）
- H30d基準 鋼管M-φモデル改訂の反映
- 関東管内港湾での試計測
- 関東地整防災情報プラットフォームへの連携

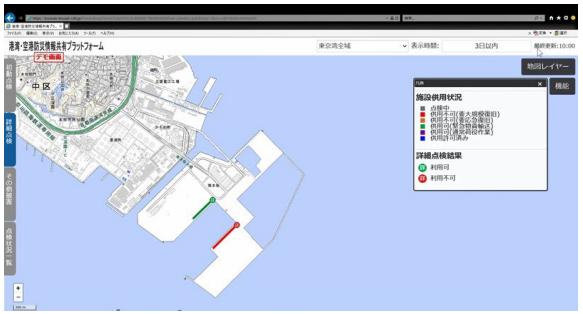
◎次期中期計画においては、引き続きRTK-GNSSによるシステムの現地への普及に努めるとともに、より多様な構造形式に適用できるよう、システムの改良を行っていく必要がある。

Berth Surveyor

アプリ上での利用可否判定表示機能追加



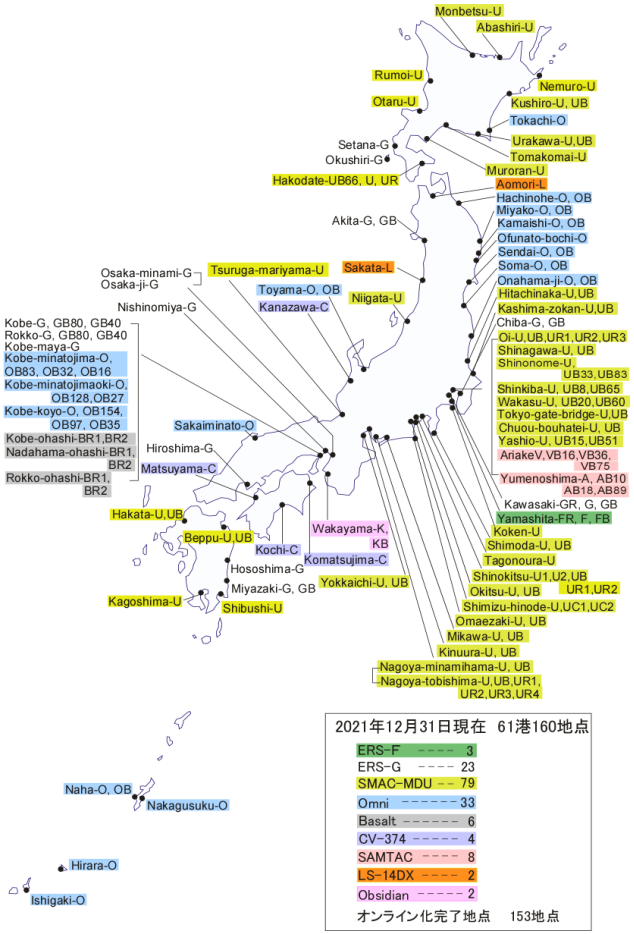
変形量－部材損傷関係上への計測変形量のプロット



防災情報プラットフォームへの判定結果データの送り込み

⑤強震観測

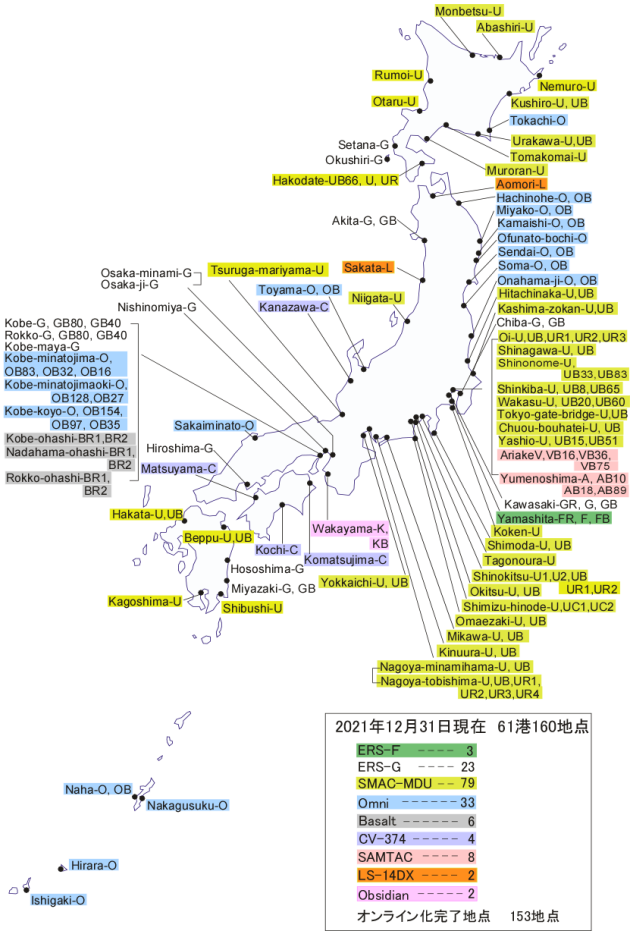
強震観測データは、地震時の行政機関による対応、被災原因の究明、施設整備の際の設計地震動の設定などに必要不可欠であるほか、被害予測技術や耐震補強技術の検証など、研究面でも欠かすことのできないものである。港湾地域強震観測は昭和37年から継続的に実施されており、令和3年末現在では61港湾の160箇所で観測を行っており、令和3年1月～12月の期間で3072個の強震記録が取得されている。地震発生時には地震動情報即時伝達システムを介して港湾における加速度等の情報を行政機関等に即時配信し、行政機関に活用された。



地震防災研究領域の研究

⑤強震観測

次期中長期期間においては、引き続き行政機関と連携して観測網の維持管理を適切に行っていくとともに、観測記録の整理解析を進め、地震時の行政機関による対応の支援、地震災害の軽減や復旧に関する研究に活用していく予定である。



⑥地震被害調査

被害地震発生時に、現地調査を行い、被害の実態を正確に把握することは、設計手法の検証用のデータを取得するという意味においても重要であるだけでなく、過去に知られていなかった新たな形態の被害が生じていないかを知るという意味でも重要である。

現中長期期間においては、2016年熊本地震（熊本港、八代港、別府港など）、2018年北海道胆振東部地震（苫小牧港）、2021年2月13日福島県沖の地震（相馬港）、 2022年3月16日福島県沖の地震（相馬港、仙台塩釜港石巻港区）において現地調査を行った。

地震被害調査については、次期中長期期間における予定が予めたてられるものではないが、万が一被害地震が発生した場合は、上記の観点から着実に現地調査を行うことが必要である。