

中部地方整備局管内におけるレベル2地震動の効率的な算定と 施設の残存耐力評価手法について

国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 内田 吉文
国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 ○本多 和彦
国土交通省 中部地方整備局 四日市港湾事務所 津松阪港事務所 木全 啓介

1. はじめに

平成19年に改定された「港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾」(以下、港湾基準と称す)では、震源特性・伝播経路特性・サイト特性を考慮した精度の高い地震動を用いて耐震性能照査を行うことを基本としている。中部地方整備局管内沿岸部(静岡県, 愛知県, 三重県)でも、この考え方に基づいてこれまでに東海・東南海地震および内陸活断層による地震に対して、特定重要港湾および重要港湾9港(13地区)と地方港湾3港におけるレベル2地震動の算定を行ってきた。本稿では、地方港湾の効率的なレベル2地震動算定手順にしたがって、耐震強化施設の建設や整備計画が進められつつある地方港湾における効率的かつ高精度なレベル2地震動の算定手法について報告を行うとともに、算定された地震動を活用した施設の残存耐力評価手法について報告を行うものである。

2. 港湾におけるレベル2地震動の算定手法

港湾基準では、レベル2地震動算定の際に、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を合理的に評価できる手法として、統計的グリーン関数法を用いることを基本としており、震源特性は地震調査研究推進本部の公開データ、伝播経路特性は震源と対象地点の位置関係によって評価することが可能である。また、サイト増幅特性の算定にはスペクトルインバージョン²⁾という手法を用いて求めた増幅特性を用いることが考えられる(図-1)。

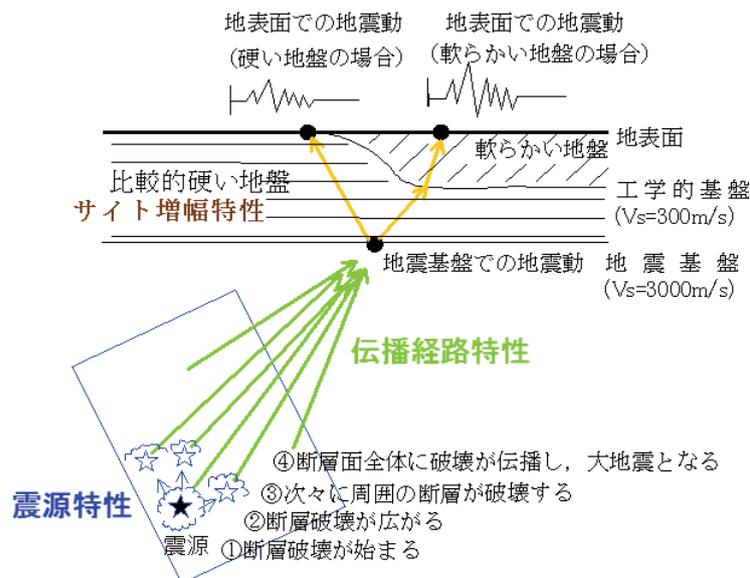


図-1 地震動特性の概念図

スペクトルインバージョンは、ボーリング、反射法探査等の地盤調査を用いずに、複数の地震観測点における多数の地震観測記録を用いて、地震記録から震源特性と伝播経路特性を取り除くことにより、観測地点のサイト増幅特性(周波数ごとの増幅倍率)を算定する手法であるため、対象地点について精度の良い地震観測記録があるかどうか、増幅特性の精度を左右することになる。

3. レベル2地震動を効率よく算定する方策

設計入力地震動(レベル2地震動)の算定において、震源特性は地震調査研究推進本部の手法を、伝播経路特性については中央防災会議が公表しているものを用いるが、サイト増幅特性については、対象となる港湾サイトにおける増幅特性をいかに精度良く評価出来るかが非常に重要である。このことから、中部地方整備局管内の地方港湾におけるサイト増幅特性の評価について検討を行った。その手法と事例を以下に示す。

3.1. 既往の地震観測点の活用

地方港湾には、対象地点またはその付近において、地震観測記録が得られていない港湾が多くみられる。そのため、一般には公開されていない自治体地震観測点の調査、地震観測記録を入手し、従来から用いられている港湾地域強震観測、(独)防災科学技術研究所の強震ネットワーク(以下 K-NET と称す)、基盤強震観測網(以下 KiK-net と称す)のデータを加えて、各港湾対象地点において微動計を用いた微動観測を実施し、そのデータより得られる水平成分フーリエ振幅と鉛直成分フーリエ振幅の比(常時微動 H/V スペクトル比)(図-2)による振動特性の比較を行った。

これにより、近傍地震観測点におけるサイト増幅特性を対象港湾の増幅特性とみなせるかどうかの評価を行うこととした。主として以下の点を確認したうえで、サイト増幅特性の評価を行った。

- ①地震観測点における常時微動 H/V スペクトル比とサイト増幅特性(地震基盤～地表)の形状、特にピーク周波数が一致すること。
- ②地震観測点と港湾の常時微動 H/V スペクトル比の形状、特にピーク周波数が一致すること。

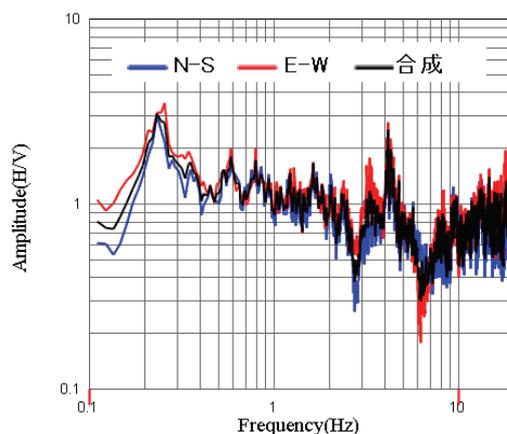


図-2 常時微動 H/V スペクトル比算出例

3.2. サイト増幅特性の評価事例

既往の地震観測点を利用したうえでサイト増幅特性を評価・算定した事例として、大井川港(静岡県)におけるサイト増幅特性の算定経緯を示す。大井川港については、近傍の地震観測点として大井川町役場および K-NET 榛原^{はいはら}の2地点があり、どちらも大井川港のサイト増幅特性として採用出来る可能性があることが確認された。そのため、観測点両者のサイト増幅特性の比較を行ったところ、図-3 に示すように K-NET 榛原に比べ大井川町役場は値が小さいことから、大井川港のサイト増幅特性として大井川町役場のサイト増幅特

性を採用した場合、危険側となることが懸念された。このため、両者のサイト増幅特性よりレベル2地震動を算定した結果、K-NET 榛原において予測されるレベル2地震動は、大井川町役場の地震動と比較すると非常に大きいものであることが確認された（図-4 および図-5）。

そこで、大井川港のサイト増幅特性として、いずれがより適切な推定であるかについて、図-6 および図-7 に示すように 1854 年安政東海地震（M 8.4）時の大井川港付近の震度分布（中央防災会議）について、静岡県市町村災害史に基づき作図し、どちらを採用するかについての妥当性の検証を行った。

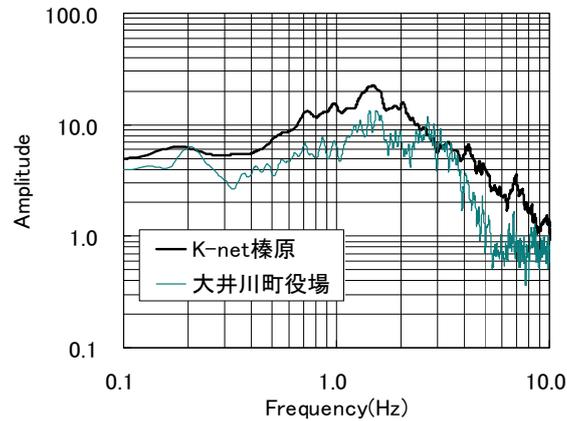


図-3 大井川町役場および K-NET 榛原におけるサイト増幅特性

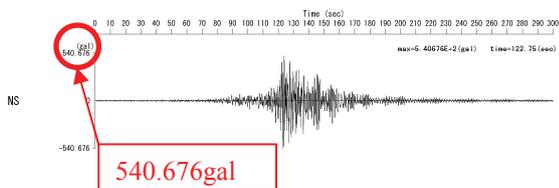


図-4 大井川町役場のサイト増幅特性を利用して算定した大井川港におけるレベル2地震動の加速度時刻歴波形

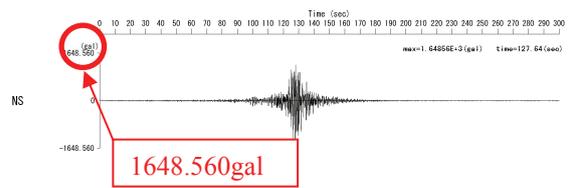


図-5 K-NET 榛原のサイト増幅特性を利用して算定した大井川港におけるレベル2地震動の加速度時刻歴波形

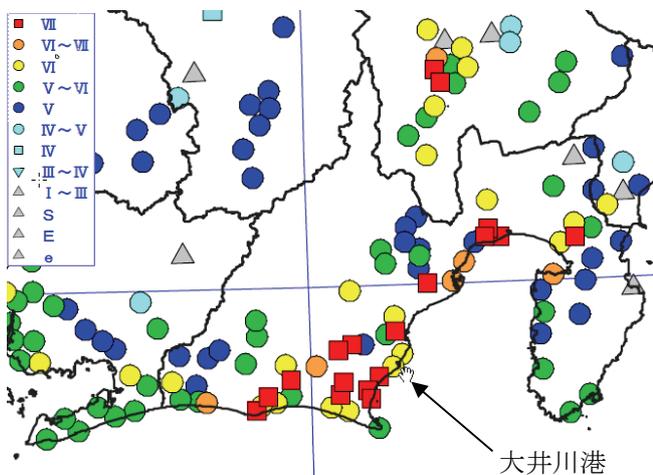


図-6 1854 年安政東海地震時の大井川港付近の震度分布（中央防災会議）

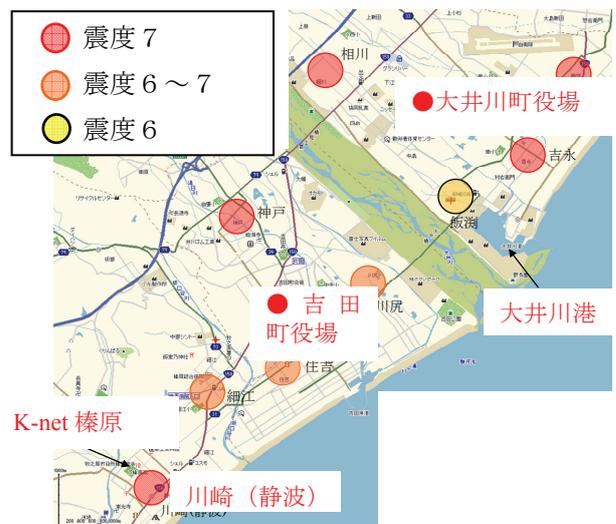


図-7 1854 年安政東海地震時の大井川港付近の大井川港付近の震度分布（静岡県市町村災害史に基づいて作図）

図-6 および図-7 を見ると、K-NET 榛原付近（川崎（静波））が震度7であったと記述されているのに対し、大井川港付近（飯渕）では震度6であったとされており、大井川港付近は K-NET 榛原付近より震度が小さい。そのため、大井川港付近は K-NET 榛原付近に比べて震度が小さくなる可能性が高いと考えられる。

また、2001年4月3日において、静岡県中部で地震が発生した際（図-8）、大井川町役場、吉田町役場、K-NET 榛原それぞれで同じ地震動が観測されていたことから、これらの地震記録に基づきフーリエスペクトルの比較（図-9）を行った。この結果、図中の円で示すように2~3Hz付近で一部逆転も見られるが、それ以外の周波数帯域では K-NET 榛原が大きい。かつ大井川町役場、吉田町役場、K-NET 榛原の地震観測記録に基づき算出したサイト増幅特性の比較（図-10）を行った結果、大井川町役場<吉田町役場<K-NET 榛原の関係があり、上述した1854年の安政東海地震時の大井川港付近の震度分布と概ね対応することがわかった。

これらを考慮した結果、大井川町役場のサイト増幅特性を大井川港のサイト増幅特性として採用することが妥当であるという結論に至った。

この手法を用いて、中部地方整備局管内の他の地方港湾においても同様に、地震動を効率的かつ精度良く算定した。

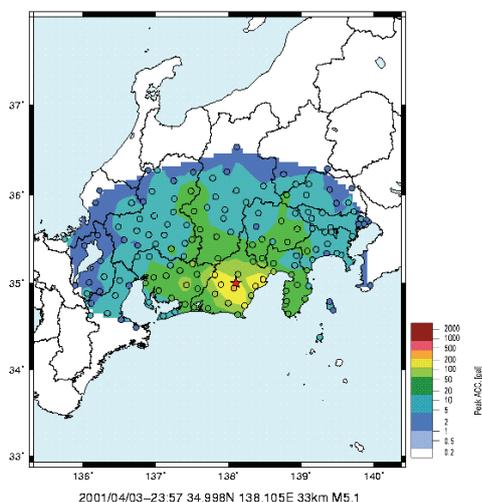


図-8 2001年4月3日静岡県中部の地震の震央図

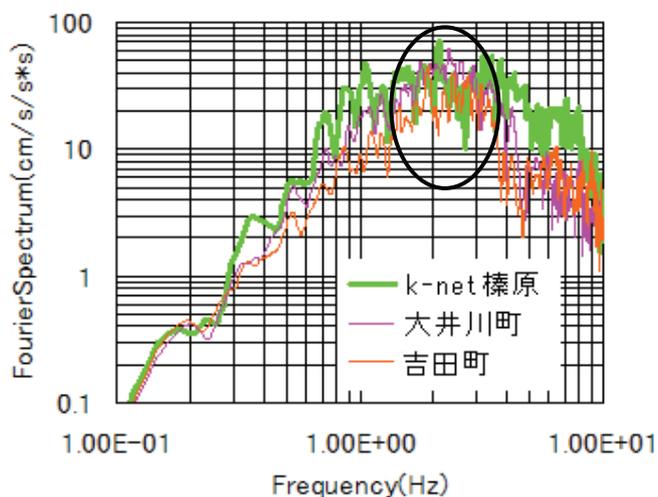


図-9 2001年4月3日静岡県中部の地震のフーリエスペクトル比較

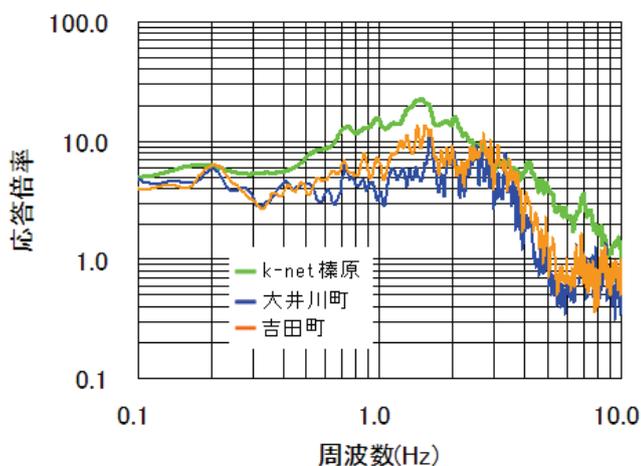


図-10 地震観測記録により算出したサイト増幅特性の比較

4. 施設の残存耐力評価手法について

算定したレベル2地震動を用いて、中部地方整備局管内の港湾施設における残存耐力評価指標について検討を実施した。

施設が地震等により被災した後の残存耐力について、例えばケーソンなどの重力式施設については、変形状況等の外観調査により概ね判断が可能であるが、栈橋式、矢板式構造物については、栈橋杭や矢板、または控え杭等が土中にあることや、変形状態からそれら部材の応力状態を識別し、把握することが困難なことから、地震後の残存耐力を評価することが難しく、被災後の供用可否判断が困難となることが懸念されている。

これらの形式の施設における地震被災後の残存耐力について、以下に示すフローにて被災後の外観調査等から判断が可能となるような評価手法を構築した。

- ①任意に設定した複数のシナリオ地震を用いて FLIP³⁾ による動的解析を実施し、シナリオ地震毎の施設残留変位や鋼部材の塑性率を算定 (図-11)。なお、図-11 に示すシナリオ地震 A およびシナリオ地震 B は、設定した任意のシナリオ地震の代表例である。
- ②鋼部材ごとに施設の残留変位と塑性率の関係をとりまとめ、両者の関係を評価 (図-12)。
- ③被災後の残留変位を入力することで、各部材の残存耐力が判定されるシステムを構築 (図-13)。

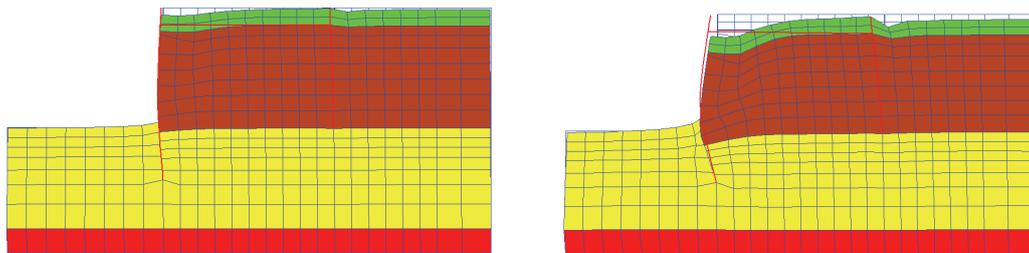


図-11 シナリオ地震 A (左図) とシナリオ地震 B (右図) それぞれの解析結果

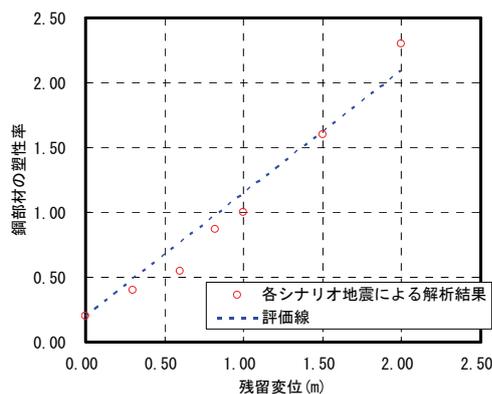


図-12 シナリオ地震ごとの塑性率と残留変位の関係

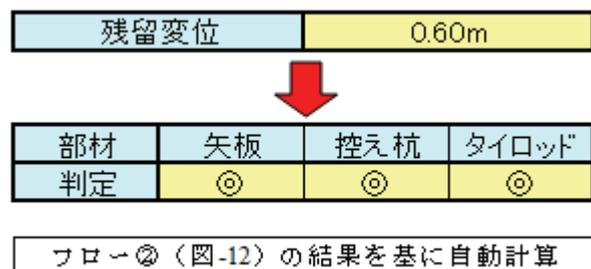


図-13 各部材の残存耐力の判定システム

また、震源特性、伝播経路特性、及びサイト増幅特性を考慮して算定された地震動として、港湾毎に①東海・東南海地震、②内陸活断層型地震、③M6.5の直下型地震、④確率的地震危険度解析により算定された地震動を設定した。なお、確率的地震危険度解析により算定された地震動については、国土交通省国土技術政策総合研究所より提供された地震動を使用した。

設定したシナリオ地震動の例として、ある施設における地震動毎の加速度応答スペクトルを図-14に示す。

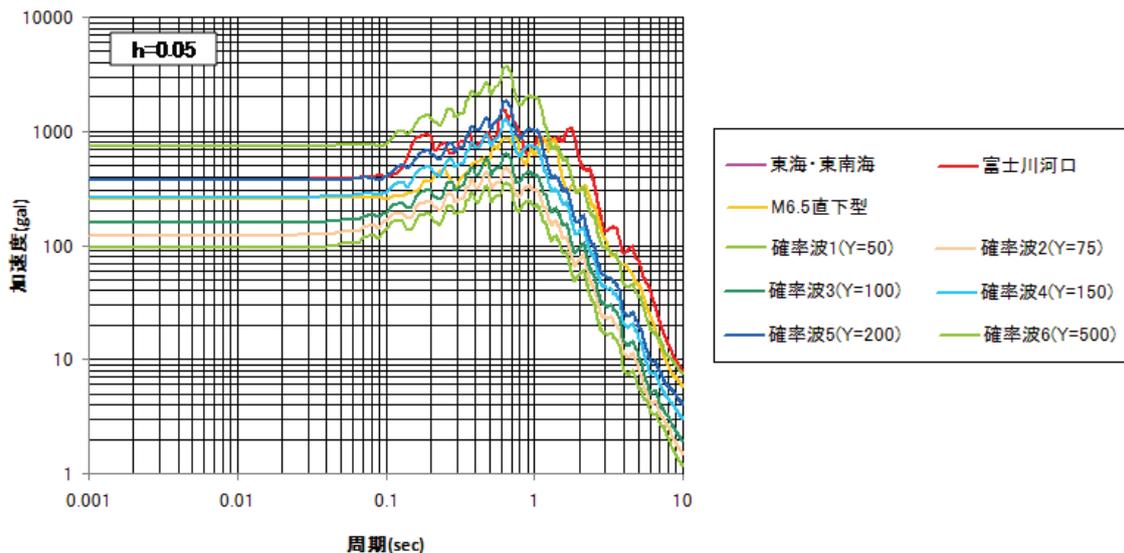


図-14 ある港湾施設におけるシナリオ地震動毎の加速度スペクトルの例（注：Y=〇〇は再現年）

港湾施設の変形モードにより，施設の天端変位が被災程度を表す指標として必ずしも適切でない可能性があることから，各施設について変形モードを分析し，適切な評価指標を検討することとした．例えば，今回参考に提示する港湾施設においては，施設前面に設置されている矢板の変形形状を比較し，地震後に直ぐに計測でき，残存耐力を表す指標として適切なものとして施設の天端の残留変位を選定した（図-15）．

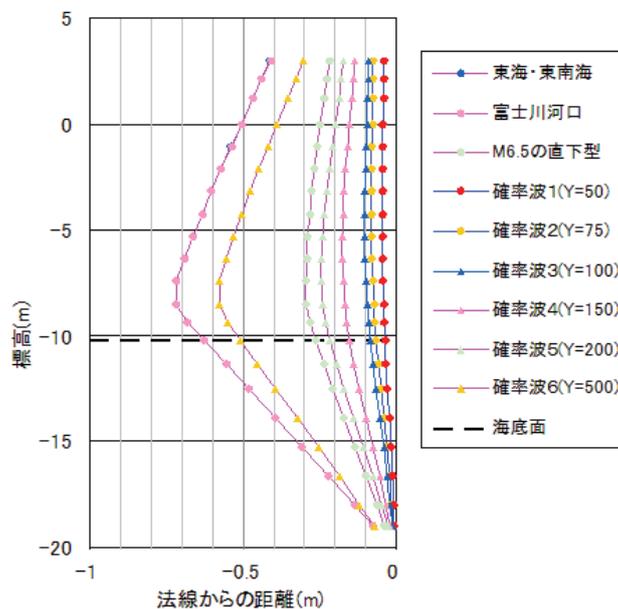


図-15 ある港湾施設における矢板の残留変形形状

これらから，FLIP 解析結果より得られる鋼部材の最大曲率比と，上記の変形モードの分析から，残存耐力を表す指標として選定した変形量との関係をとりとまとめ，残存耐力を有する変形量の限界値についてとりまとめた．ここで，施設変形量と最大曲率比の関係については，次式で表すことができることが判明した．なお， ϕ および dx は，それぞれ，最大曲率比（「(発生曲率)/(全塑性モーメント発生時の曲率)」の最大値）および施設の天端残留水平変位(m)である．

$$\phi = 10^{1.264\log_{10}(dx)+1.100} \quad (1)$$

これらから、当該港湾施設において、残留水平変位から残存耐力の相関について評価すると、図-16 のとおり最大曲率比が1を越えるのが地震被災後 0.13m 以上の残留水平変位が測定された場合であることから、当該施設は残留水平変位 0.13m 以上で残存耐力無しという評価となる（表-1）。

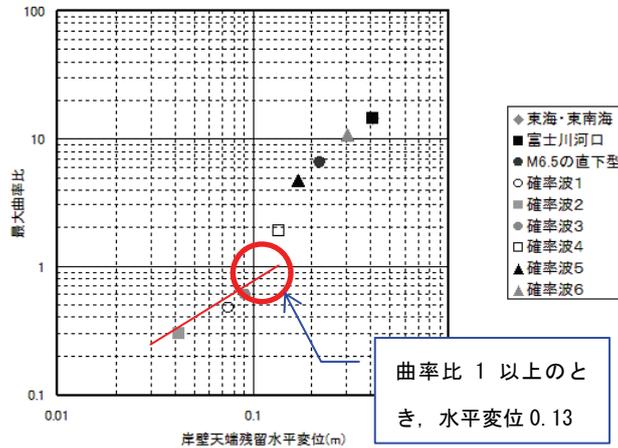


図-16 施設天端残留水平変位と最大曲率比の関係

表-1 残存耐力の評価指標

残留水平変位 [m]	評価
$dx < 0.13$	残存耐力 あり
$0.13 \leq dx$	残存耐力 なし

5. まとめ

中部地方整備局管内の地方港湾のレベル2地震動を効率よく算定する方策として、港湾近傍における既往の地震観測点のサイト増幅特性をいかに適正に評価し、港湾のサイト増幅特性として用いることが可能かという手法について検討を行った。港湾近傍における既往の地震観測点にて観測された地震観測記録から、算出されるサイト増幅特性を利用し、その適否に関する判断について、主として常時微動 H/V スペクトル比を用いたサイト増幅特性との比較により算定を行うことが、対象港湾・対象サイトの多い地方港湾でのレベル2地震動の算定において非常に有効な手段であるということを示した。

また、今回検討した残存耐力評価手法について、地震後の施設の使用可否判断をする際に、現地において施設の残留水平変位を測定することで、簡易に供用可否を判断することが可能な非常に有効な手段であるといえる。今後も主要な港湾施設の FLIP 解析事例等を収集・整理することで、被災後の残存耐力の判断だけでなく、耐震診断や港湾における防災対策にも役立つ手法であることを示した。

謝 辞

本論文を取り纏めるにあたり、ご協力頂きました京都大学防災研究所井合進教授を座長とする「管内設計入力地震動検討部会」におきましてご指導をいただきました。また、港湾地域強震観測、大都市圏総合強震観測網、K-NET (<http://www.k-net.bosai.co.jp>)、KiK-net (<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>) の地震観測記録を使用させていただきました。また、国土交通省国土技術政策総合研究所港湾施設研究室より確率的地震危険度解析により算定された地震動を使用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 港湾の技術上の基準・同解説 (2007).
- 2) 岩田知孝・入倉孝次郎 (1986): 観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, Vol.39, No.4, pp.579-593.
- 3) Iai, S., Y. Matsunaga and T. Kameoka (1992): Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, pp.1-15.
- 4) 野津 厚・長尾 毅 (2005): スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112.
- 5) 地震調査研究推進本部 (<http://www.jishin.go.jp/main/>).
- 6) 先名重樹・藤原広行 (2008): 微動探査観測用ツールの開発 その1 -常時微動解析ツール-, 防災科学技術研究所研究資料, 第 313 号.
- 7) 長尾毅, 山田雅行, 野津 厚 (2005): フーリエ振幅と郡遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.141-158.