

港湾構造物のレベル1入力地震動 ～関東地方～

LEVEL-ONE GROUND MOTION FOR PORT FACILITIES IN KANTO REGION

長尾 毅¹・山田雅行²・野津 厚³

Takashi NAGAO, Masayuki YAMADA and Atsushi NOZU

¹正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 工修 株式会社ニュージェック 技術開発グループ (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

³学生会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

This paper aims at presenting the level-one ground motion for port facilities in Kanto region. Authors proposed a new framework for seismic hazard analysis considering source, path and site amplification effects especially due to the deep subsurface structure. Seismic hazard by the proposed method is obtained as time histories of seismic motions and therefore it can be used directly for dynamic analysis. Difference of earthquake response of quay walls by ground motion of present design method and that of proposed method is discussed.

Key Words : Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Design Ground Motion, Site Amplification Factor, Stochastic Green's Function Method, the level-one ground motion, port facilities

1. はじめに

港湾構造物の耐震設計は、基本的に地震動の作用による影響を静的な力の作用により考慮する震度法が用いられている。設計震度は、工学基盤における震度に対応する地域別震度に、表層地盤における地震動の増幅を考慮する地盤種別係数、構造物の重要度を考慮する重要度係数を乗じて求められる。ここで、地域別震度は、日本全国を5のブロックに分割し、ブロックごとに0.08～0.15の地域別震度が与えられている¹⁾。また、耐震性能照査や液化化予測を行う際には八戸波・大船渡波・神戸波などの構造物建設サイトとは必ずしも一致しない地点で観測された地震波形を用いて地震応答解析を行っている。

ところで、土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会が策定した土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)²⁾においては、地震動強度は、震源特性、伝播経路特性、対象地点周辺の地盤特性に依存するとともに、構造物の地震応答は入力地震動の振幅の大きさだけではなく周期成分にも依存するため、設計入力地震動はこれら諸特性を適切に反映したものであることが望ましいとしている。従って、現在の港湾構造物の耐震検討の方法は簡便であるものの、構造物が建設されるサイトごとの地震動強度の適切な評価という観点からは改善の余地があると考えられる。

さらにまた、現在、設計地震動は、レベル1地震動は震度または応答スペクトル、レベル2地震動は応答スペクトルまたは時刻歴波形として表現されることが多いが、これら表現の違いは本来望ましいものとはいえない。このため筆者は汎用的な設計地震動の表現方法として時刻歴波形算定を念頭に置き、確率論的に表現される条件ごとに震源特性等の諸特性を考慮して時刻歴波形を算定する手法を提案している³⁾。震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を考慮して時刻歴波形算定が可能な手法としては、統計的グリーン関数法を採用し、深層地盤が地震動の振幅と位相に及ぼす影響については、スペクトルインバージョンを用いている。

本方法によれば、耐震設計、耐震性能照査、液化化判定はすべて共通の考えに従って設計地震動が設定できることとなる。図-1に現行設計法と提案する方法による違いを示した。

本研究では、提案する方法により関東地方を対象としたレベル1入力地震動を示すとともに、入力地震動の違いによる構造物の地震応答の違いについて検討した。

2. 設計地震動算出方法

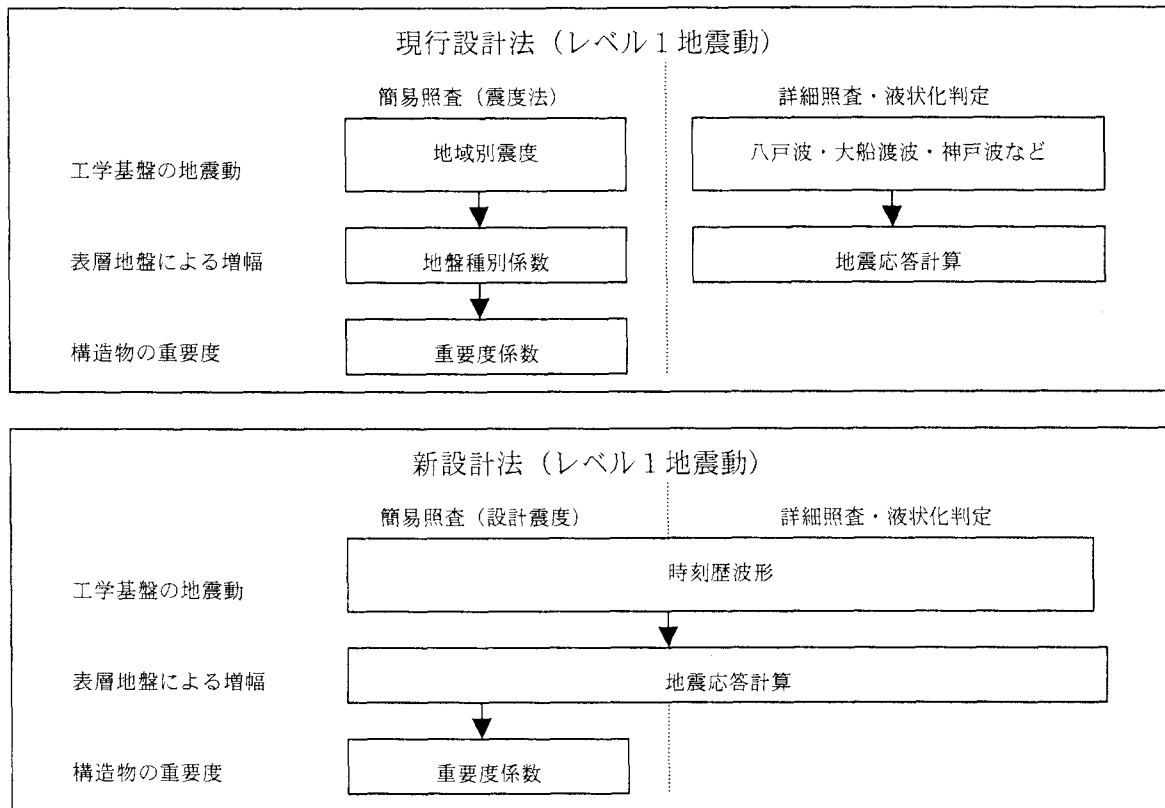


図-1 現行設計法と提案する方法による違い

本研究では、著者らが提案している確率論的地震ハザード解析³⁾（以下、単に地震ハザード解析と言う）を用いて、関東地方を対象に設計地震動を時刻歴波形として作成し、地震応答解析を実施した。

地震ハザード解析とは、地震発生条件は考える条件を考慮するだけ設定し、その結果得られる強震動の予測値を「確率的」に表現することで、期待値やハザード曲線を求める手順である。実際には、地震規模、発生位置（距離）をある確率に従うように設定し、距離減衰式によってその地震に対する対象地点の振幅値を求め、その振幅値を確率的に整理し、その振幅値の期待値や振幅値の超過確率を求めるものである。

この手法は得られた数値の取り扱いやすさから、構造物の設計や安全照査には従来から多く用いられてきており、その実績からある程度の信頼性を図り知ることができる。データの面では、活断層や新しい地震記録を用いた距離減衰式など最近の知見が反映されているが、手法の面では新たな手法を取り入れるなどの精度向上があまり試みられていないものと考えられ、以下に示す問題点を有していると考えられる。

- ①震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性といった地震動の物理的な影響因子が必ずしも十分に考慮されているとは言えない。
- ②とりわけ、サイトにおける詳細な地下構造の情報を反映できないので、得られた結果は、平均的な地下構造を有するサイトに対しては正しくても、それ以外のサイトに対しては精度があまり期待

できない。

- ③時刻歴波形の算定に即して言えば、震源の破壊過程や深層地盤の影響による遅延といった位相に関する情報が十分に反映されない。

- ④したがって、算定された時刻歴波形は距離減衰式による最大加速度、応答スペクトルに適合する代表値でしかなく、地震動の物理的な影響因子を考慮して得られたものとは異なる可能性がある。

そこで、提案する地震ハザード解析、すなわち、確率論的な設計入力地震動の作成手法は、震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を明確に反映できるものとしている。

震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を考慮して時刻歴波形算定が可能な手法としては、統計的グリーン関数法を採用することとした。統計的グリーン関数法とは震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性を考慮して時刻歴波形算定が可能な手法の一つで、図-2 に示すようにグリーン関数と呼ばれる小地震波形を断層の破壊過程に従って、時刻遅れと振幅を調整して足し合わせる手法である。また、統計的グリーン関数法では図-3 に示すように、小地震記録（グリーン関数）は地震基盤($V_s=3000\text{m/s}$)において理論的振幅特性と「統計的」位相特性に基づいた波形を作成し、その波形にサイトの増幅特性を掛け合わせて地表や工学的基盤($V_s=300\text{m/s}$)での波形を作成する。

一方、深層地盤が地震動の振幅と位相に及ぼす影響については、スペクトルインバージョンという手法を用いて強震記録から抽出される深層地盤による

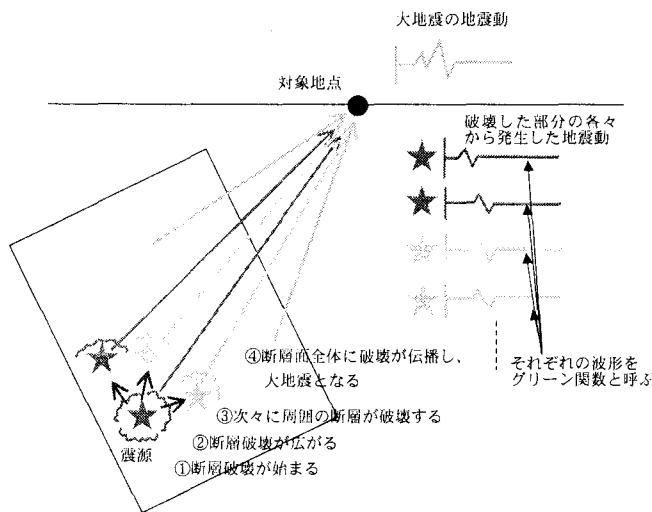


図-2 震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性を考慮できる時刻歴波形算定方法のイメージ

(理論振幅+統計的位相) × サイト増幅特性 = 統計的グリーン関数

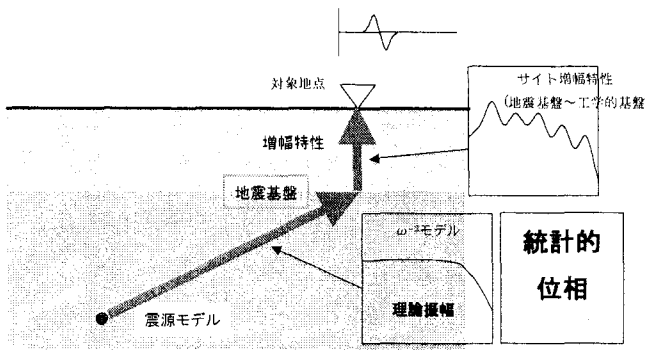


図-3 統計的グリーン関数

増幅特性を活用することとした。スペクトルインバージョンでは、サイトにおける地震観測記録が震源特性×サイト増幅特性(実際には、伝播経路特性も含まれるが、簡単のためここでの説明では省略する)で表されると考える。それぞれの「地震観測記録=震源特性×サイト増幅特性」を方程式と考えると、図-4のように震源特性とサイト増幅特性を未知数とする連立方程式となるため、地震観測記録が十分に多くあれば最小二乗法を用いて未知数を求めることができる。

提案する地震ハザード解析は、震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性それぞれの確率的に表現される条件ごとに時刻歴波形を算定し、地震の発生確率を加味して、フーリエ振幅スペクトルのハザード曲線を作成する手法である(同時に位相特性も群遅延時間として統計処理を行っている)。したがって、あるハザードレベルを設定すると一様ハザードフーリエ振幅スペクトルとそれに対応した位相スペクトルが得られ、フーリエ逆変換により時刻歴波形を直接しかも簡単に算出することができる。

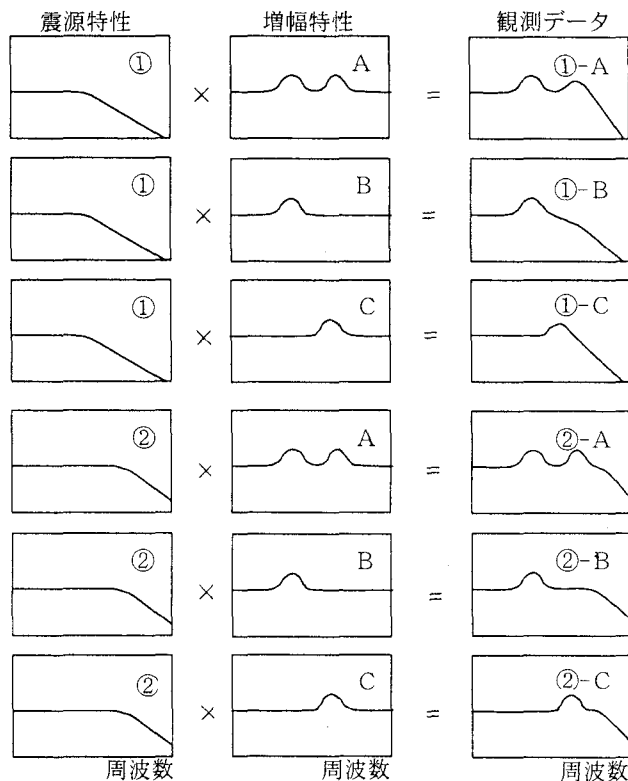
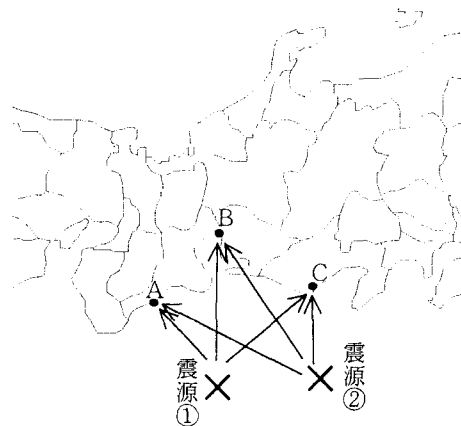


図-4 スペクトルインバージョンの概要

3. 関東地方における設計地震動

2. に示した手法を用いて算定した設計地震動の時刻歴波形を図-5に示す。図-5に示した波形は、図-6に示す関東地方における20kmメッシュのうち、東京湾沿岸地域を西から東に囲む①～⑦のメッシュ(①横須賀、②横浜、③東京、④千葉、⑤袖ヶ浦、⑥木更津、⑦富津)に相当する位置において、提案する地震ハザード解析を適用し、再現期間75年に相当する設計地震動の算定を行ったものである。

一方、図-7に関東地方の地質構造⁴⁾として、(a)関東地方の表層地質、(b)関東地方の重力異常を示した。関東地方の表層地質から、メッシュ①および⑦の南側には第三紀の地質が分布し、それ以外のメッシュ②～⑥には第四紀の地質が分布していることがわかる。また、重力異常を見ても同様の傾向(メッシュ①、

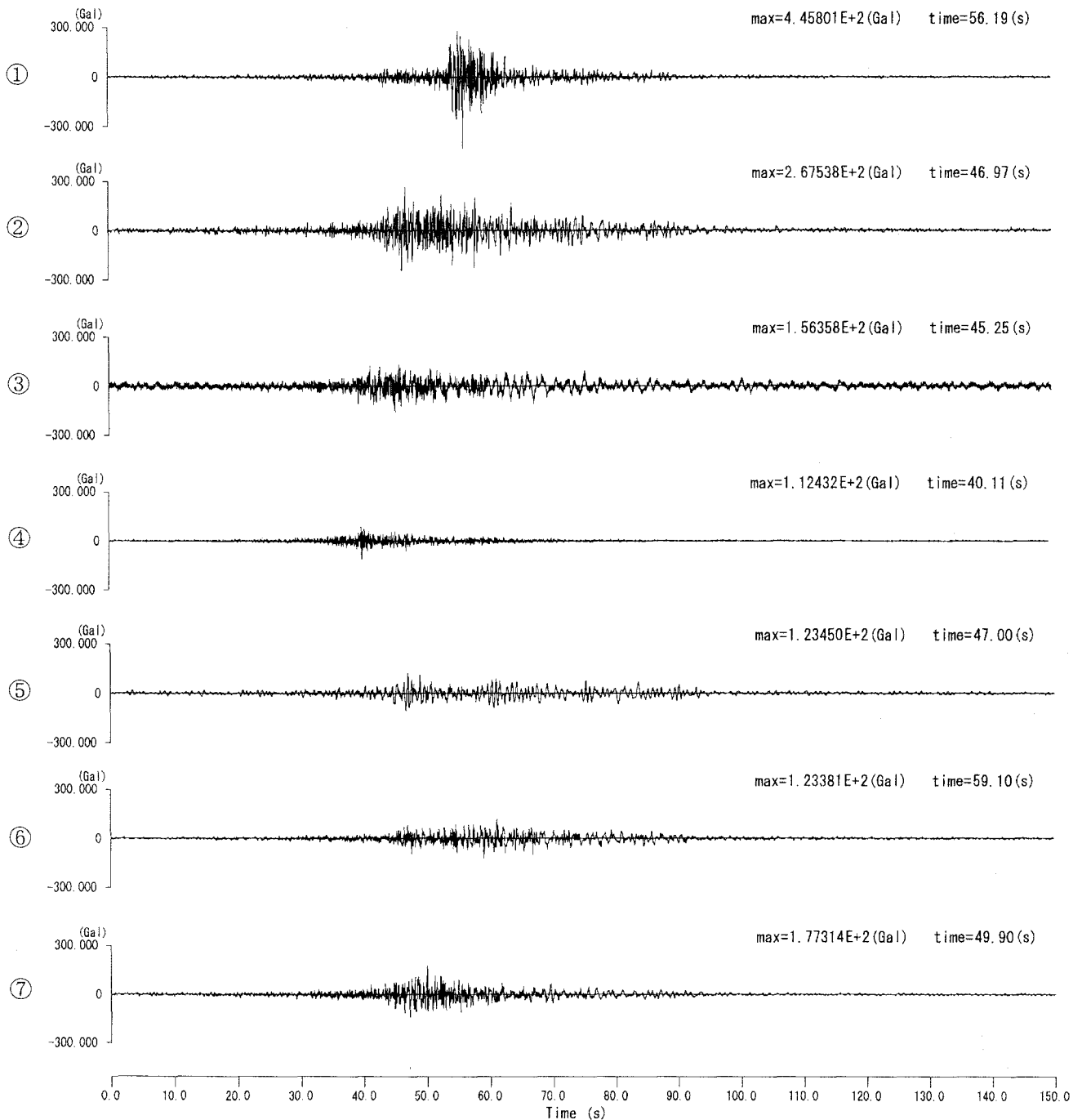


図-5 関東地方における設計地震動の時刻歴波形

⑦では高重力異常，メッシュ②～⑥では低重力異常)がみられ，特にメッシュ②③⑥は非常に強い低重力異常を示している．一般に，高重力異常は基盤となる岩盤の深さが浅く，低重力異常は深いとされるため，メッシュ①⑦では表層地質が硬質であるだけでなく，基盤が比較的浅く，逆にメッシュ②～⑥では表層地質が柔らかいことに加えて基盤が深いものと推察される．なお，基盤深度に関するこのような傾向は，近年実施されている詳細な地盤調査結果からも明らかにされつつある⁵⁻⁸⁾．

図-5 に示した設計地震動と，図-7 の地質構造を対比すると，本研究で設計地震動を算定したメッシュ

①～⑦のうち最も基盤深度が浅く，表層地質も硬質であると考えられるメッシュ①(横須賀)の設計地震動は，堆積層の影響をあまり受けていないため，主要動の継続時間振幅が短く，最大振幅も大きい波形を呈している．また，比較的硬質と考えられるメッシュ⑦(富津)の設計地震動にもメッシュ①と類似の傾向が認められる．それに比べて基盤深度が深く，表層地質も第四紀層に相当するメッシュ②～⑥における設計地震動は，堆積層の影響を強く受けているため，比較的周期の長い波形が長時間にわたって続いており，そのために振幅も比較的小さい値(100Gal程度)となっていることがわかる．

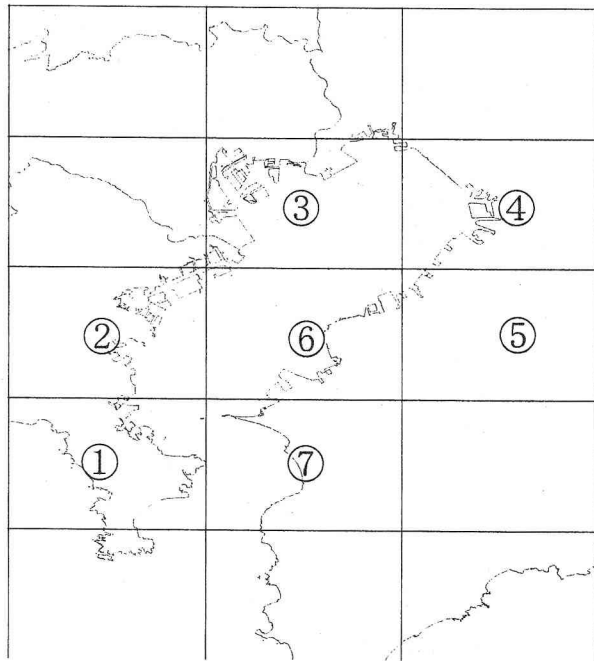


図-6 関東地方における設計地震動算出地点

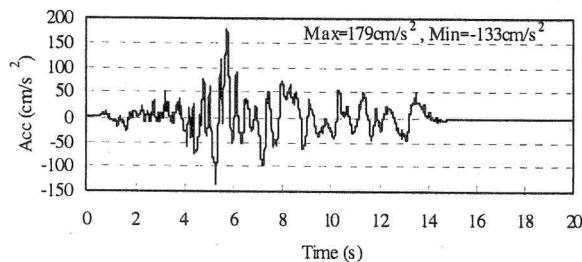


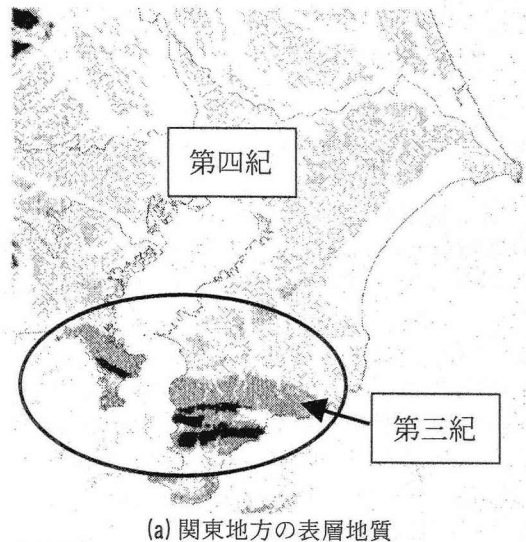
図-8 八戸波

4. 設計地震動の違いによる地震応答の違い

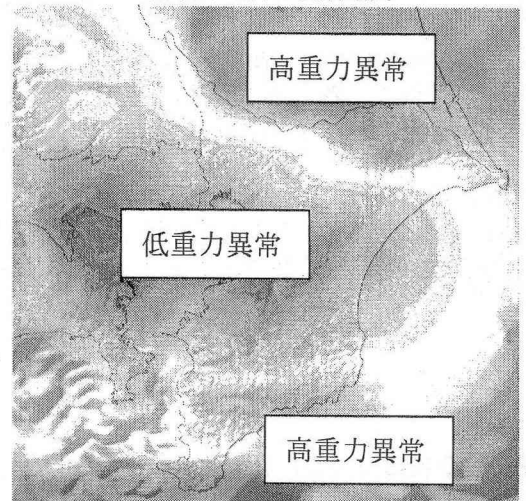
本研究で作成した設計地震動による構造物(岸壁)の地震応答の評価を行った。検討は、水深-7.5m, 設計震度 0.1 のケース (case1) と、水深-14.5m, 設計震度 0.2 のケース (case2) の条件で実施した。地盤条件は、地盤固有周期が 1.2s となるように設定した。用いた地震応答解析コードは FLIP⁹⁾である。また、従来用いられてきた波形との比較を行う観点から、図-8 に示す八戸波を用いて基盤最大加速度を 350Gal とした検討も併せて行った。

検討結果として、岸壁天端残留変形量を表-1 に示す。表-1 よりわかるように、地点別に 75 年再現期間の地震動による岸壁の天端残留変形量は大きく異なる結果となった。

メッシュ①と②の設計地震動の最大加速度は、それぞれ 446Gal, 268Gal となっており、仮に波形が同じ(従来のレベル 1 の設計法では同じ波形を振幅調整して用いる)ならば岸壁の天端残留変形量はメッシュ①の方が大きい値となることが容易に予想される。しかし、図-5 に示したとおり、メッシュ①の設計地震動は地盤が硬質で地盤が深いと考えられるため、主要動の継続時間が短く、高周波が卓越し、岸壁の



(a) 関東地方の表層地質



(b) 関東地方の重力異常

図-7 関東地方の地質構造⁴⁾

表-1 岸壁天端残留変形量 (単位: cm)

メッシュ No.	case1	case2
①	14.8	11.7
②	21.4	13.6
③	14.1	14.1
④	2.1	1.9
⑤	13.4	9.5
⑥	9.0	7.3
⑦	9.4	7.8
八戸波	46.7	36.7

ような構造物に対する影響度が小さく、メッシュ②の地震動は基盤が深く、比較的柔らかい地盤であると考えられるため比較的low周波の波動が長時間にわたって継続するため岸壁には影響度が大きく、この

ことを反映して、天端残留変形量はメッシュ②の方が大きな値となっている。一方、メッシュ②～⑥(メッシュ④を除く)では、設計地震動の最大加速度、波形の継続時間やエンベロープがよく似ていることを反映して、天端残留変形量もよく似た傾向を示していると考えられる。

これは、設計地震動として震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を反映した正確な地震動を定義し、精度の高い地震応答解析を行うことによって、合理的な耐震設計が可能になることを示唆しているものと考えられる。

今回は、伝播経路特性としてスペクトルインバージョン結果のQ値を用いて設計地震動の算定を行った。一般にスペクトルインバージョンは震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性がトレードオフの関係にあるため、この手法によって得られた各特性は組み合わせて用いることが望ましいとされている。しかし、今回用いたQ値は既往の研究成果と比較すると、若干小さな値(減衰が大きい傾向)であったため、算定された設計地震動が小さめに評価されている可能性も否めない。

今後は、この伝播経路特性の取り扱いについてさらに慎重に検討を行うとともに、さらに検討対象の地点数を増やして、構造物の地震応答についても詳細な検討を行う必要があると考えられる。

5. まとめ

港湾構造物の耐震設計においてレベル1入力地震動を算定するために、震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を明確に反映した地震ハザード解析の提案を行っている。この地震ハザード解析では、震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を考慮して時刻歴波形算定が可能な手法として統計的グリーン関数法を採用することとし、深層地盤が地震動の振幅と位相に及ぼす影響については強震記録から抽出される深層地盤による増幅特性をハザード解析に活用することとしている。

この地震ハザード解析を関東地方(東京湾沿岸地域)に適用し、再現期間75年に相当する設計地震動の算定を行った。さらに、作成した地震動による構造物(岸壁)の地震応答の評価をFLIPを用いて行った。その結果、75年再現期間の設計地震動による岸壁の天端残留変形量は、必ずしも最大加速度が大きい地点が大きくないなど、地点別に大きく異なる結果となった。

これは、設計地震動として震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を反映した正確な地震動を定義し、精度の高い地震応答解析を行うことによって、合理的な耐震設計が可能になることを示唆しているものと考えられる。

今回は、伝播経路特性としてスペクトルインバージョン結果のQ値を用いて設計地震動の算定を行った。一般にスペクトルインバージョンは震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性がトレードオフの関係にあるため、この手法によって得られた各特性は組み合わせて用いることが望ましいとされている。しかし、今回用いたQ値は既往の研究成果と比較すると、若干小さな値(減衰が大きい傾向)であったため、算定された設計地震動が小さめに評価されている可能性も否めない。

今後は伝播経路特性の取り扱いについてさらに慎重に検討を行うとともに、さらに検討対象の地点数を増やして、構造物の地震応答についても詳細な検討を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究の設計地震動算定において独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET、KIK-NETの観測記録を用いさせていただいた。ここに記して謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、1999。
- 2) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)－耐震基準作成のための手引き－、2001。
- 3) 長尾 毅、山田雅行、野津 厚：震源特性、伝播経路特性、深層地盤による地震動増幅特性を考慮した地震ハザード解析、土木学会論文集、投稿中。
- 4) 工業技術院地質調査所監修：理科年表読本 コンピュータグラフィックス 日本列島の地質、1996。
- 5) 文部科学省：2000年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、2000。
- 6) 文部科学省：2001年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、2001。
- 7) 文部科学省：2002年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、2002。
- 8) 文部科学省：2003年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、2003。
- 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990。