

# レベル1 設計入力地震動の評価と岸壁の照査例

## EVALUATION OF LEVEL-ONE GROUND MOTION AND PERFORMANCE VERIFICATION OF GRAVITY TYPE QUAY WALLS

長尾 毅<sup>1</sup>・野津 厚<sup>2</sup>・山田雅行<sup>3</sup>

Takashi NAGAO, Atsushi NOZU and Masayuki YAMADA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>正会員 工博 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)

<sup>3</sup>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 大阪市北区本庄東 2-3-20)

This paper aims at presenting the examples of the level-one ground motions for port and harbour facilities. Authors proposed a new framework for seismic hazard analysis considering source, path and site amplification effects especially due to the deep subsurface profile. Level-one ground motions as time histories were calculated for 23 ports by this method. It is shown that PGA and PGV for each port differ a lot although regional seismic coefficient is classified into only 5 categories in the current design method. Authors also evaluated the difference of earthquake response of gravity type quay walls.

*Key Words : Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Site Amplification Factor, Stochastic Green's Function Method, Level-one ground motion, Gravity type quay wall*

### 1. はじめに

確率論的地震ハザード解析<sup>1~3)</sup>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、それぞれの確率論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が提案されている(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)。この手法では、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。なお、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おり、深層地盤が地震動の位相におよぼす影響については、規模と震源距離が十分に小さい記録の位相を利用して定めている<sup>4)</sup>。

一方、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きた。ここで用いる設計震度は、平均的な地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。また、地域別震度は、日本全国を5つ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<sup>5)</sup>。さらに、耐震性能照査や液化化予測を行う際にも八戸波・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きた。これに対して、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)<sup>6)</sup>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小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。このことから、港湾構造物の耐震設計でも、従来の震度法とは異なり、上述の確率論的地震ハザード解析を用いたレベル1設計入力地震動評価とそれを用いた性能照査に基づく体系に変革されつつある。

本検討では主要な港湾を取り上げ、その港湾に対する確率論的地震ハザード解析を用いたレベル1設計入力地震動の評価とその設計地震動に対するモデル岸壁の性能照査を行った結果について報告するものである。

### 2. 設計地震動算出方法

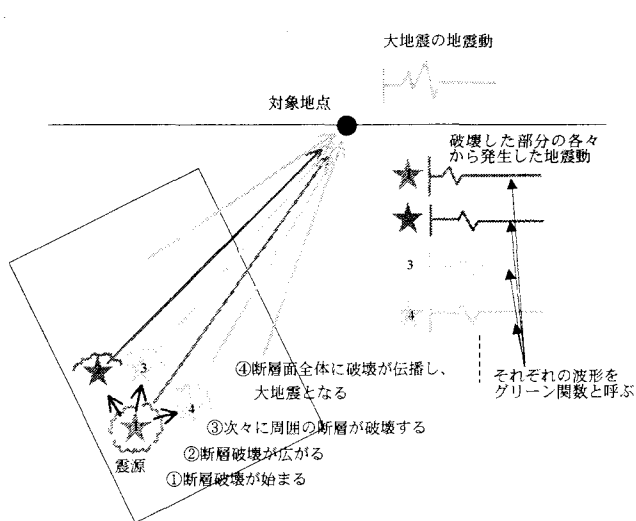


図-1 震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性を考慮できる時刻歴波形算定方法のイメージ

(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

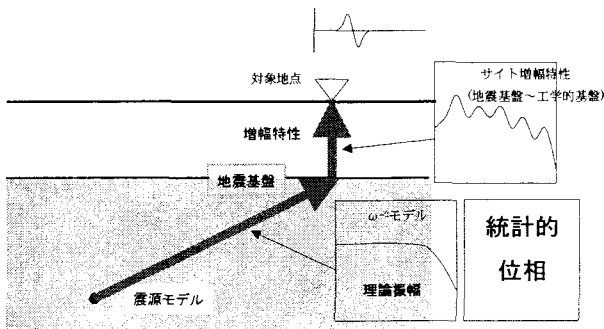


図-2 統計的グリーン関数

本研究では、上述の確率論的地震ハザード解析(以下、単に地震ハザード解析と言う) <sup>1)~3)</sup>を用いて、全国 23 港湾を対象にレベル1設計地震動を時刻歴波形として作成した。ここで、レベル1地震動は、再現期間75年の信頼度50%となる地震動としている。

一般に、地震ハザード解析とは、地震発生条件は考えう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。最近では、地震ハザードを算定するデータとして、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つつある。

これに対して、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

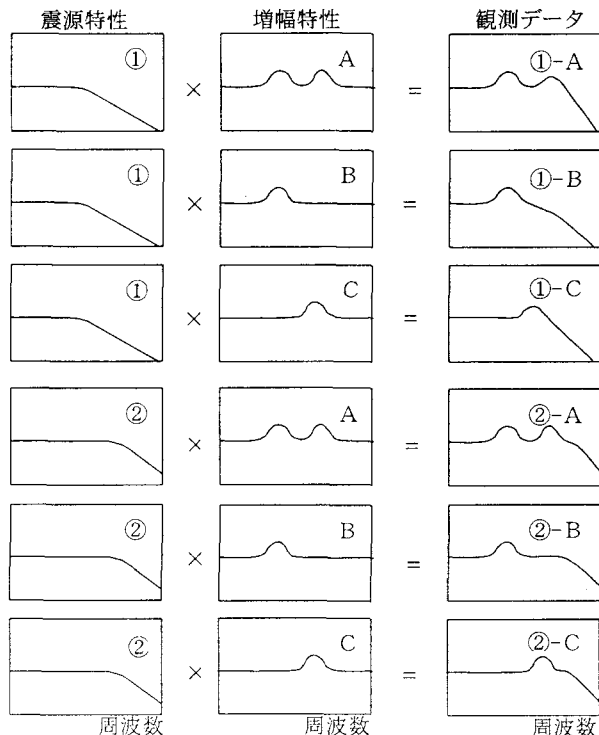
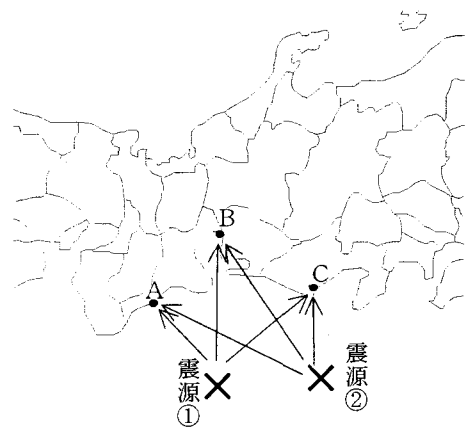


図-3 スペクトルインバージョンの概要  
(縦軸は、震源特性・観測データ:変位スペクトル, 増幅特性:増幅倍率)

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基本としている。統計的グリーン関数法とは、図-1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、時刻遅れと振幅の変化を考慮して足し合わせる手法の一つである。統計的グリーン関数法では図-2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と位相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。

地震基盤から工学的基盤(または地表)までのサイト増幅特性、すなわち、深層地盤が地震動の振幅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算定することとした。スペクトルインバージョンは地震観測記録から深層地盤による増幅特性を抽出する手法である。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と、それぞれの「地震観測記録=震源特性×サイト増幅特性」が方程式となり、複数の地震観測記録に対して、図-3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。なお、深層地盤が地震動の位相におよぼす影響については、規模と震源距離が十分に小さい記録の位相を利用して定めている。

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、それぞれの確率論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。

### 3. レベル1 設計地震動の算定

上述の確率論的地震ハザード解析<sup>1~3)</sup>を用いて、表-1に示す全国23港湾(特定重要港湾, 重要港湾)を対象にレベル1 設計地震動を時刻歴波形として作成し

表-1 解析対象とした全国23港湾

港名	港格 <sup>注1)</sup>	地区 <sup>注2)</sup>	地震観測点 <sup>注3)</sup>
釧路	重	A	釧路-G
室蘭	特	C	室蘭-G
函館	重	C	函館-G
八戸	重	B	八戸-G
酒田	重	C	YMT001(K)
仙台塩釜	特	B	仙台-G
常陸那珂	重	B	常陸那珂-G
川崎	特	A	川崎-F
清水	特	A	清水日の出-U
名古屋	特	A	名古屋空見-G
敦賀	重	A	敦賀-G
大阪	特	A	大阪南-G
境	重	D	境港-G
水島	特	D	OKY012(K)
広島	特	C	広島-G
高知	重	B	高知-G
松山	重	C	EHM008(K)
徳山下松	特	E	YMG014(K)
下関	特	E	FKOH01(KiK)
博多	特	E	FKO006(K)
伊万里	重	D	SAG004(K)
宮崎	重	C	宮崎-G
鹿児島	重	D	鹿児島-G

注1)特: 特定重要港湾, 重: 重要港湾 注2) 港湾の施設の技術上の基準・同解説に記載された設計震度に関する地区区分, A地区: kh=0.15, E地区: kh=0.08 注3)K: K-net, KiK: KiK-net, その他: 港湾地域強震観測

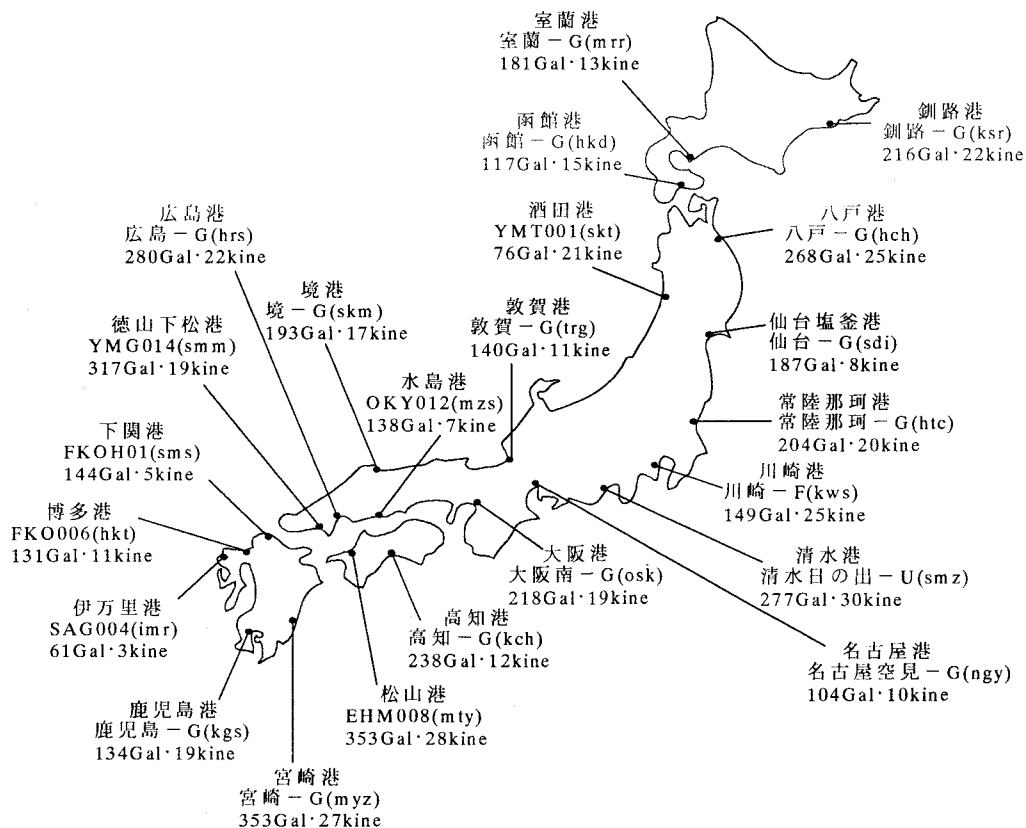
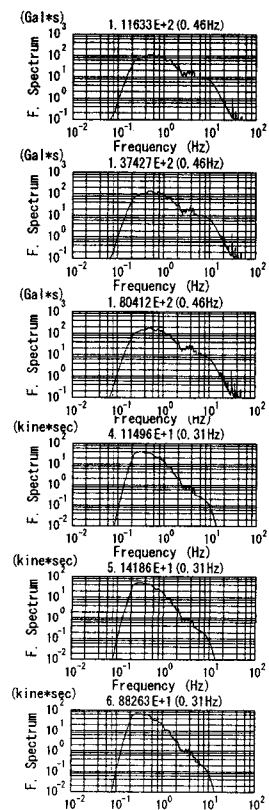
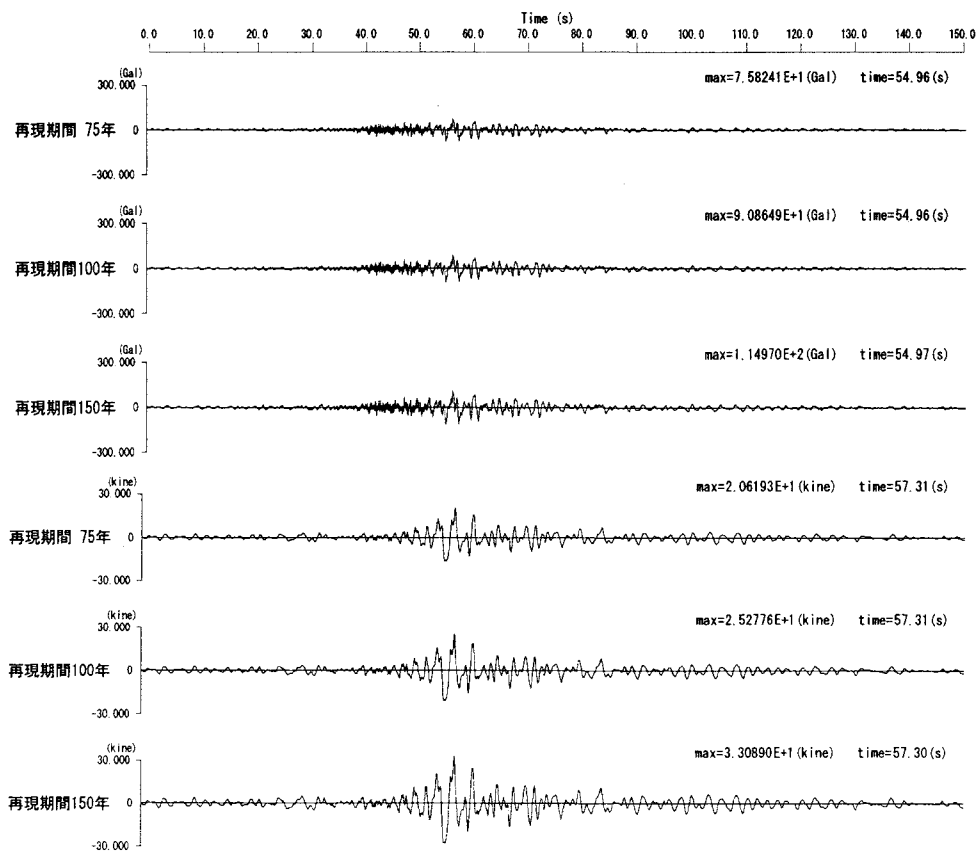
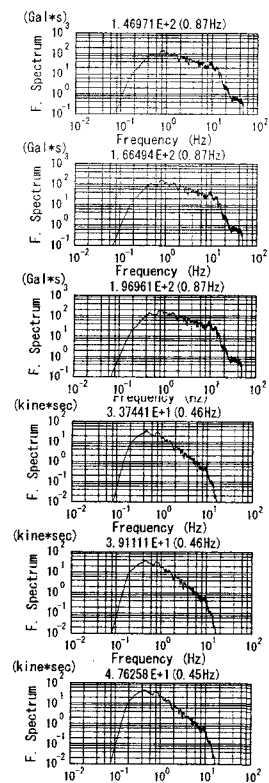
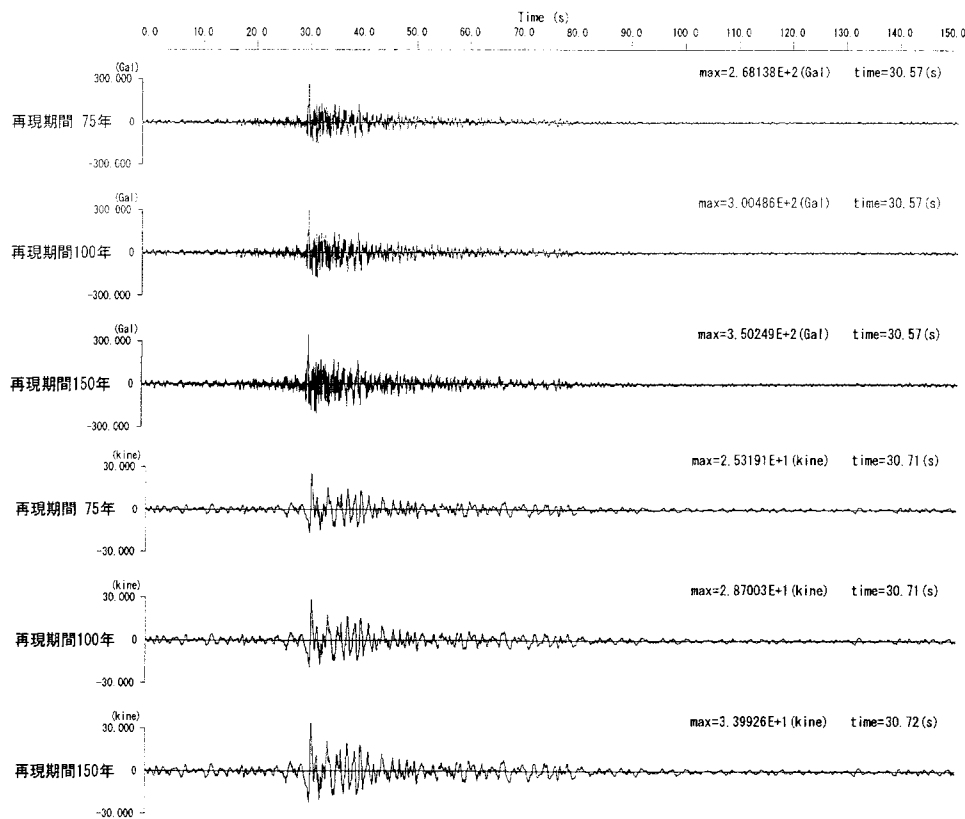


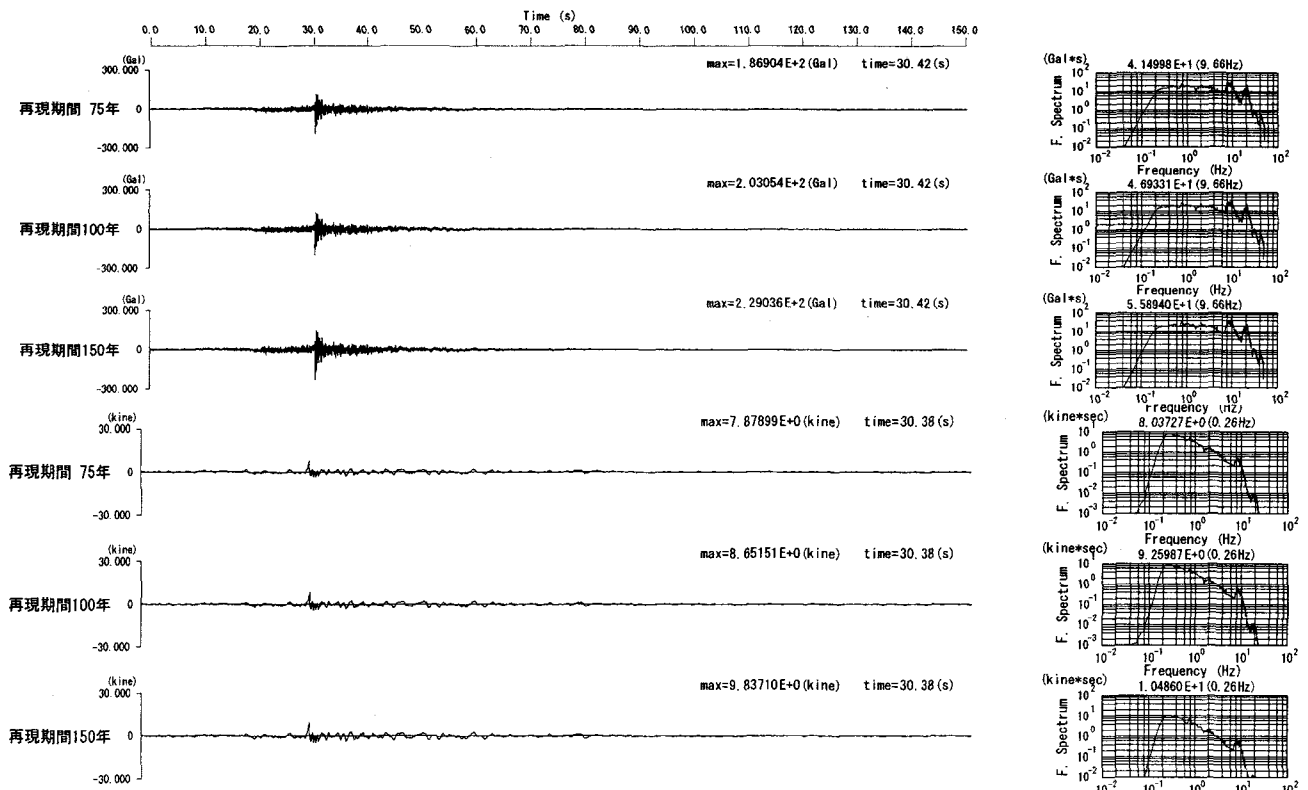
図-4 レベル1 設計地震動



(b) 酒田港(上段3波：加速度, 下段3波：速度)



(a) 八戸港(上段3波：加速度, 下段3波：速度)



(c) 仙台塩釜港(上段3波:加速度, 下段3波:速度)  
 図-5 代表的な地点の加速度・速度波形とそのフーリエスペクトル

た。なお、表-1には各港湾の港格、設計震度に関する地区区分およびスペクトルインバージョンによってサイト増幅特性を求める際の地震観測点を示した。

図-4にレベル1設計地震動作成結果の最大加速度・最大速度を示す。ここでは、レベル1地震動として、再現期間75年の信頼度50%となる地震動を基本として示した。レベル1地震動の最大加速度は、61~353Gal、最大速度は3~30kineと広い範囲にばらつく結果となった。

また、代表的な地点(八戸港、酒田港、仙台塩釜港)の加速度波形・速度波形とそれぞれのフーリエスペクトルを図-5に示す。図-5には、信頼度50%、再現期間75年、100年、150年に相当する波形を示した。再現期間を変化させることにより構造物の重要度の違いを考慮した入力地震動の選定も可能であることを示唆するものであると考えられる。

(a)八戸港では、レベル1地震動はフーリエスペクトルから0.5Hz付近の比較的長周期成分が卓越していることがわかる。これは、従来設計波として用いられてきた八戸波の特徴を模擬できるものであると考えられる。(b)酒田港では、0.3~0.5Hz付近の長周期成分が卓越するのに加えて、主要動の継続時間がかなり長いことが特徴として見て取れる。酒田付近では地盤調査等から1000mを超える堆積層が確認されており、この深い地盤構造の影響をレベル1地震動として表現できているものと考えられる。(c)仙台塩釜港では、八戸港、酒田港とは逆に非常に硬質地盤であるため、8Hz付近の高周波数成分が卓越し、主要動も短い(数秒)といった特徴を表現しているも

のと考えられる。

#### 4. 重力式岸壁を対象とした変形照査

ここで作成したレベル1地震動を用いて、重力式岸壁を対象に、解析コードFLIP<sup>7)</sup>を用いた変形照査を行った。検討断面は、設計水深として-7.5、-11、-14.5、-16mの4種類を設定し、設計震度0.1~0.25で現行設計法により断面の設定を行った。地盤モデルは、I~III種地盤として、表-2に示す3ケースを設定した。地盤固有周期は、それぞれ1.2、0.8、0.6秒である。検討断面の概要を図-6に示す。なお、レベル1地震動に対しては液状化を発生させないことが前提となっていることから、本研究においては液状化の影響は考慮していない。

解析により得られた変形量を表-3に、水深-11m岸壁に対する設計震度別の変形量の頻度分布を図-7に示す。平均的には4~14cm程度の変形が生じる結果となり、波形ごとの変形量には差が大きい。設計地震動のフォーマットの変更に伴い、1次元の地震応答計算を元に照査用震度を設定する必要がある。ただし、現在用いられている加速度最大値からの震度算出方法にはばらつきが大きい<sup>8)</sup>ことを考慮すると、照査用震度算出方法についても今後検討する必要がある。その場合、地震応答解析により得られる変形量と地表面の加速度時刻歴の相関を検討することにより、変形量に対応した震度の算出方法を検討していく必要があると考えられる。

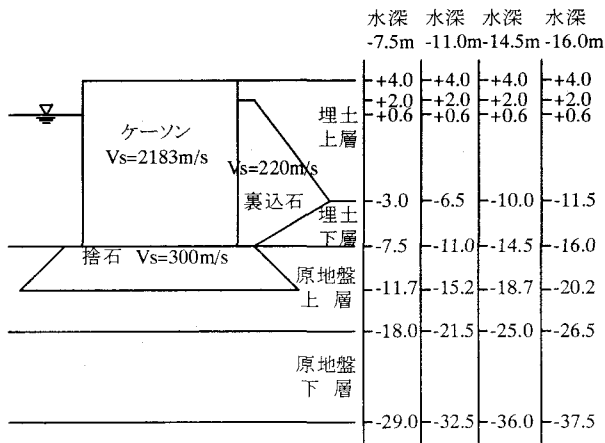


図-6 検討対象とした重力式岸壁断面

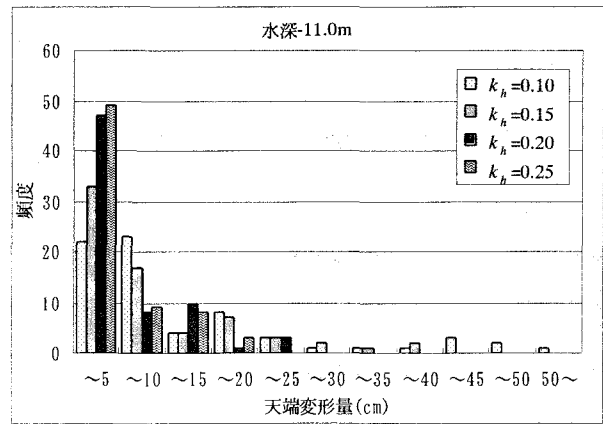


図-7 水深-11m 岸壁に対する設計震度別の  
変形量の頻度分布

表-3 解析により得られた変形量

水深(m)	ケーソン天端変形量 (cm)									
	$k_h=0.10$		$k_h=0.15$		$k_h=0.20$		$k_h=0.25$		$k_h=0.27$	
	範囲	平均値	範囲	平均値	範囲	平均値	範囲	平均値	範囲	平均値
-7.5	0.4~48.3	10.3	0.3~34.0	7.3	0.5~23.4	5.0	-	-	-	-
-11.0	0.4~55.1	12.2	0.3~35.9	8.4	0.3~24.8	5.6	0.2~19.4	4.7	0.2~16.8	4.1
-14.5	0.4~50.1	13.5	0.4~35.3	9.4	0.3~23.0	6.0	0.2~17.6	4.6	0.5~15.8	4.0
-16.0	-	-	-	-	-	-	0.2~17.4	4.5	0.2~15.4	3.9

表-2 S波速度構造 (単位: m/s)

	case1	case2	case3
埋土上層	120	180	210
埋土下層	120	180	250
原地盤上層	150	190	280
原地盤下層	150	250	450

## 5. まとめ

本論文では、確率論的地震ハザード解析を用いて、全国 23 港湾(特定重要港湾, 重要港湾)を対象にレベル 1 設計地震動を時刻歴波形として作成した(レベル 1 地震動として、再現期間 75 年の信頼度 50%となる地震動を基本とした)。また、再現期間 50 年, 75 年, 100 年, 150 年に相当する波形も合理的に示すことができることから、構造物の重要度の違いと関連付けた入力地震動の選定も可能であることを示唆するものであると考えられる。

作成したレベル 1 地震動を用いて、重力式岸壁を対象に、解析コード FLIP を用いた変形照査を行った。その結果、平均的には 4~14cm 程度の変形が生じる結果となり、波形ごとの変形量には差が大きいことがわかった。現在用いられている加速度最大値からの震度算出方法にはばらつきが大きいことを考慮すると、設計地震動のフォーマットの変更に伴って、変形量に対応した震度の算出方法を併せて検討していく必要があるものと考えられる。

## 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。また、重力式岸壁の変形照査においては国土技術政策総合研究所・藤村研究員に協力頂いたことに感謝します。

## 参考文献

- 1) 長尾 毅, 山田雅行: 地震ハザードにおける統計的グリーン関数法適用の試み, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, 2002.
- 2) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: 港湾構造物のレベル 1 地震動〜関東地方〜, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp.137-142, 2004.
- 3) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: フーリエ振幅と群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(投稿中).
- 4) 古和田明, 田居優, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, pp.97-104, 1998.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 長尾 毅, 岩田直樹, 紺野克昭: 臨海部埋立地盤の地震危険度の簡易推定法に関する研究, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp.707-712, 2003