

管内のレベル2地震動作成について

○河村 哲哉¹・齋藤 幸博¹・服部 昌樹²

¹関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 設計室 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

²北陸地方整備局 港湾空港部 港湾事業企画課 (〒950-8801 新潟市中央区美咲町1-1-1)

2011年東北地方太平洋沖地震を契機に、内閣府中央防災会議にて首都直下地震の想定が見直され、新たな震源モデルの提言がなされた。これらを受けて、港湾施設の設計に用いられる港湾技術基準(2007)の改訂も予定され、関東地方整備局では、新たな基準に則した管内のレベル2地震動作成を行った。

今回、新たに作成したレベル2地震動は、海溝型地震の震源モデル算定にSPGAモデルを適用することで、港湾施設への影響が大きい周波数0.2~1Hz程度の帯域の波形の信頼性が向上し、港湾施設の設計に適した設計入力地震動作成が行えた。

キーワード レベル2地震動、海溝型地震、SPGAモデル、パルス状波形

1. はじめに

首都地域の地震防災対策は、内閣府中央防災会議において、2005年9月に首都直下地震対策大綱が策定され、さらに2011年東北地方太平洋沖地震(M_w9.0)の発生を契機に、これまで対象とされていなかった、想定される最大級の地震を対象として含め検討すること、最新の科学的知見を踏まえて、首都直下で想定される震源モデルの点検・見直しが必要とされ、2012年に設置された「首都直下地震モデル検討会」により新たな震源モデルが提言された¹⁾(2013年12月最終報告)。

これらを受けて国土交通省港湾局では、港湾施設の設計に用いられる「港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007年)(以下、港湾技術基準とする)」の改訂を予定しており、関東地方整備局では、新しい基準に則した設計入力地震動の設定方法に従い、管内各港湾のレベル2地震動(設計入力地震動)の作成を開始した。

尚、今回は、今年度に設計予定の港湾を優先し、東京港および川崎港を対象とした。

2. 港湾施設の設計入力地震動

本章では、港湾施設の設計入力地震動の概要と地震動の設定方法について述べる。

(1) 港湾技術基準における設計入力地震動の変遷

港湾設計の分野では、1995年兵庫県南部地震後の土木学会第三次提言を受け、1999年に港湾技術基準の改訂が行われた。この改訂により、レベル2地震動に時刻歴波形を用いることとなった。しかし、当時の港湾における強震観測記録は限られていたため、設計入力地震動はすべて八戸波、大船渡波、ポートアイランド波を用いることとされた。

2007年の港湾技術基準改訂では、国際基準に準拠し、設計の自由度を向上させる観点から、仕様規定型から性能規定型へ移行した。それに伴い、各港湾において、後述する震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮した時刻歴波形を作成し、動的解析法で耐震性能照査を行い、要求性能を満たしていることを確認することとなった。

(2) 現在の科学的知見

従前の設計入力地震動は、大地震の断層面上で特にすべりの大きい領域をモデル化したアスペリティと呼ばれる領域からなる震源モデルを設定して計算し作成していた。しかし、東北地方太平洋沖地震の観測記録により、海溝型地震を対象とする強震動評価に関する研究が大きく進展し、海溝型地震においては、断層面上ですべりの大きい領域と強震動を生成する領域が一致していないことが分かってきたため、主に津波の原因となる「大すべり域」と地震波を生成する「強震動生成域(SMGA:

Strong Motion Generation Area) 」に区別された。

そこで、港湾設計の分野においても、設計入力地震動設定方法の考え方について、現在の知見に照らして古くなっている部分を見直しする必要が出てきた。

(3) レベル2地震動の設定方法

図-1に地震動の各特性の概念図を示す。地震動に影響を及ぼす重要な要因は、震源特性、伝播経路特性およびサイト特性の3つである。まず、震源特性とは、震源となる断層の破壊過程の影響であり、断層の位置、大きさやマグニチュード等の震源パラメータが挙げられる。次に、伝播経路特性とは、震源から地震基盤（せん断波速度 $V_s=3000\text{ m/s}$ 以上の非常に硬い地層）に至る間の減衰を表す特性であり、一般に距離が長くなるにつれて減衰が大きくなる。最後に、サイト特性とは、地震基盤から地表面までの堆積層による地震動の増幅を表す特性であり、対象地点毎に堆積層が異なっているため、サイト特性も地点毎に異なり、これが場所によって地震波が異なる理由である。地震動はこれら3つの特性の積で与えられる²⁾。港湾技術基準(2007)では、レベル2地震動は、これら3特性を考慮して、時刻歴波形を作成することとされた。

今回は、中央防災会議において提言された想定地震から、対象地震を選定し、適切に震源パラメータを設定して、新たな地震動を作成した。

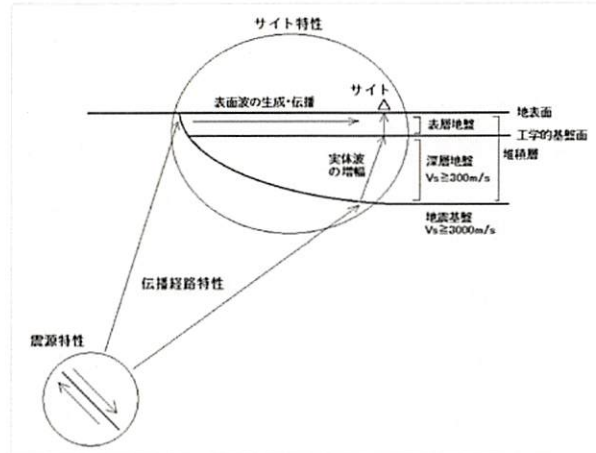
3. SPGAモデルの適用性

本章では、最新の科学的知見を踏まえた、新たな震源モデル設定方法について述べる。

(1) SPGAモデルの概要

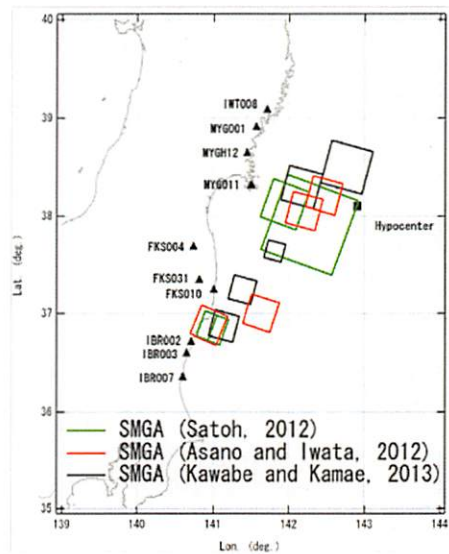
東北地方太平洋沖地震など、海溝型地震では、震源付近の観測点において、「周波数0.2~1Hz程度」のパルス状の波形(強震動パルス)が数多く観測されている。港湾の分野では、0.5~2Hzの周波数帯域が最も構造物への影響が大きい(特に、大型岸壁は1Hz以下)とされている³⁾ため、この強震動パルスは極めて重要度が高い。

今回、震源モデルの算定に適用したSPGA(Strong-motion Pluse Generation Area)モデルとは、独立行政法人港湾空港技術研究所(以下、港空研とする)によって提案された、強震動パルスの再現性が高い震源モデルである。図-2は、東北地方太平洋沖地震におけるSMGAモデルとSPGAモデルの配置図である⁴⁾。図中の■は震源を、▲は観測点を意味している。強震動生成域に着目すると、SMGAモデルは、一辺が数十kmであるのに対して、SPGAモデルは、一辺が数km程度である。SPGAモデルのサイズはパルスの周期と整合するように決められている。

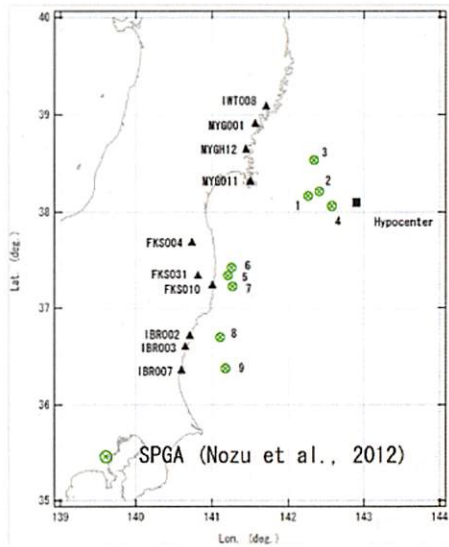


$$\text{地震動} = \text{震源特性} \times \text{伝播経路特性} \times \text{サイト特性}$$

図-1 地震動の各特性の概念図
(港湾の施設の技術上の基準・同解説より引用)



(a) SMGAモデル(3種類)



(b) SPGAモデル

図-2 東北地方太平洋沖地震における震源モデルの配置図
(文献4より引用)

(2) 海溝型地震におけるSPGAモデルの適用性

図-3は、東北地方太平洋沖地震の観測記録と、異なる震源モデル（SMGA3種類およびSPGA）を用いて計算した地震動（速度波形）を比較したものである⁴⁾。図より、図中○内の強震動パルス部分でSPGAモデル（最下段）による予測地震動が観測記録と最も一致していることが分かる。1978年宮城県沖地震、2003年十勝沖地震といった海溝型地震においても、SPGAモデルを用いた計算波形は強震動パルスを適用できることが確認されている⁹⁾。

また、歴史地震である大正関東地震に対して、SPGAモデルを適用した場合の妥当性について検討を行った。

図-4は、大正関東地震の震度分布を再現したものである。図中の背景が内閣府における震度分布の再現結果であり、□がSPGAモデルによる震度分布の再現結果を示している。図より、内陸部においては内閣府とSPGAモデルの予測結果に差があるものの、東京湾内と相模湾沿岸域では整合していることが確認でき、SPGAモデルによる予測結果は過去の震度分布とも対応するものと考えられる。

以上のことから、SPGAモデルを用いた地震動予測は十分に精度が高く、海溝型巨大地震の予測に適用可能であると言える。

4. レベル2地震動の作成

本章では、今回行ったレベル2地震動作成方法について述べる。図-5に地震動作成のフローを示す。

(1) 中央防災会議で提言された想定地震

首都直下地震モデル検討会¹⁾（以下、内閣府報告書とする）において、地震動の選定方針は、「M7クラスの地震については、～（中略）～フィリピン海プレート内の地震（Mw7.3）及び地表断層が不明瞭な地震（Mw6.8）はその発生場所を特定することはできない。このことから、M7クラスの地震については、首都中枢機能への影響が大きいと考えられる都心部あるいは、中核都市等で発生する地震を防災対策の検討対象として設定すべきと考える。」また、「相模トラフ沿いのプレート境界型のM8クラスの大規模な地震については、～（中略）～今後百年先頃には地震発生の可能性が高くなっていると考えられる大正関東地震クラスの地震を対象として、技術開発も含め長期的視野に立って向かい打つべき地震として考慮することが適切と考える。」とされている。

(2) 対象地震の選定

内閣府報告書をうけて、海溝型地震は『大正関東地震』、直下地震は『フィリピン海プレート内の地震』

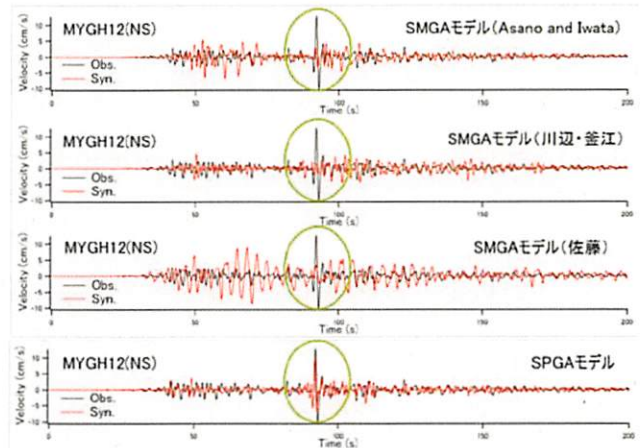


図-3 東北地方太平洋沖地震観測記録と異なる震源モデルを用いて計算した地震動の比較（文献4より引用）

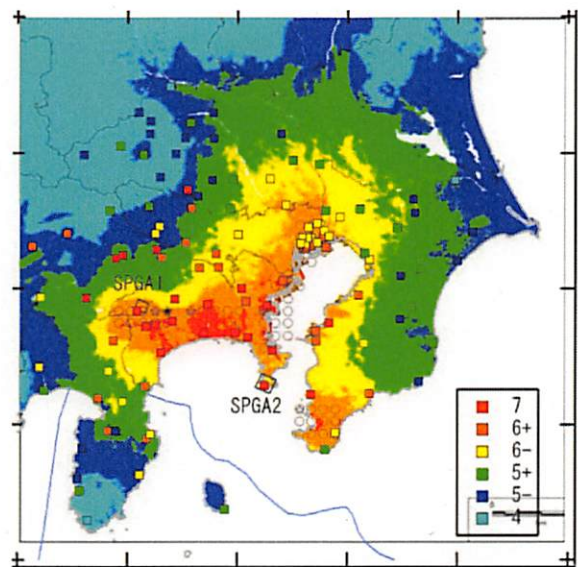


図-4 大正関東地震（歴史地震）の震度再現結果の比較

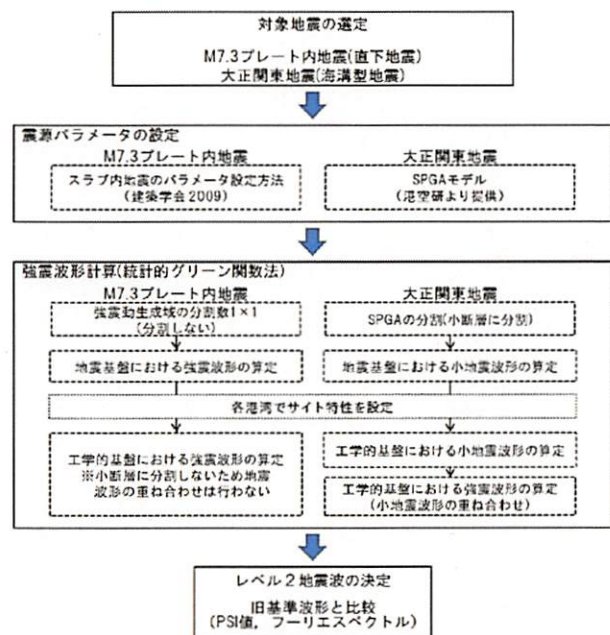


図-5 地震動作成のフロー

(Mw7.3) (以下、M7.3プレート内地震とする)』を想定地震の対象とすることとした。図-6に南関東地域で発生が予想される地震のタイプを示した。海溝型地震とは、図中の②、④または⑥のプレート境界で生じるタイプの地震である。また、今回直下地震の対象としたプレート内地震とは、図中の③のタイプに相当し、震源が深い地震である。

(3) 震源パラメータの設定および強震波形の計算

大正関東地震は、3章で検討を行った大正関東地震SPGAモデルを港空研より提供して頂いた。M7.3プレート内地震は、震源パラメータの設定方法が港湾技術基準で定められていないため、「最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法(建築学会 2009)」⁶⁾において提案されている「スラブ内地震のパラメータ設定方法」を参考に設定した。尚、スラブとは、沈み込んだプレートのことを指す。

強震波形の計算は、統計的グリーン関数法を用いた。この手法は、震源となる断層面を小要素に分割し、各要素から発生する小地震波形の重ね合わせで、地震動予測地点で観測される大きい地震波形(強震波形)を作成するものである。作成手順としては、まず、地震基盤での小地震を算定する。次に、各港湾の地震基盤～工学的基盤の増幅率(サイト特性)を掛け合わせ、工学的基盤での小地震を算定する。最後に、小地震を合成して、各港湾の工学的基盤での強震波形が完成となる。

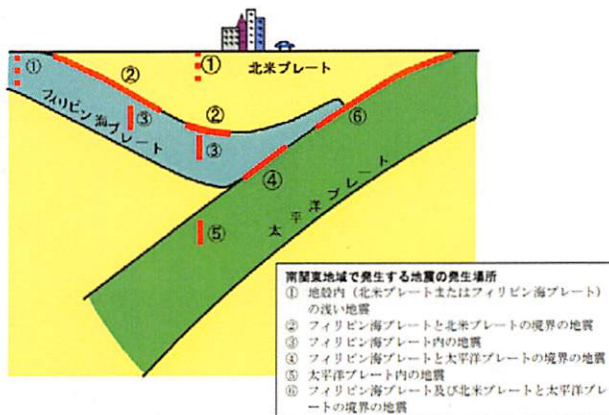


図-6 南関東地域で発生する地震のタイプ
(文献1より引用)

(4) レベル2地震波形の決定

今回作成したレベル2地震波形と現行基準(2007年)の地震波形を比較して、港湾施設への影響が大きい新たな地震波形をレベル2地震動として選定した。地震動の評価には、PSI値とフーリエスペクトルの0.5~2.0Hz平均値を用いた。PSI値とは、地震波形のエネルギーの大きさを示す値であり、構造物の変形量と相関が高いことが知られている。フーリエスペクトルとは、地震波形を、波形に含まれる周波数成分に分解し、どの周波数成分の波が大きいのかを示したものである。

今回作成したレベル2地震波形の一例として、川崎港の加速度波形(NS成分)を図-7に示す。大正関東地震

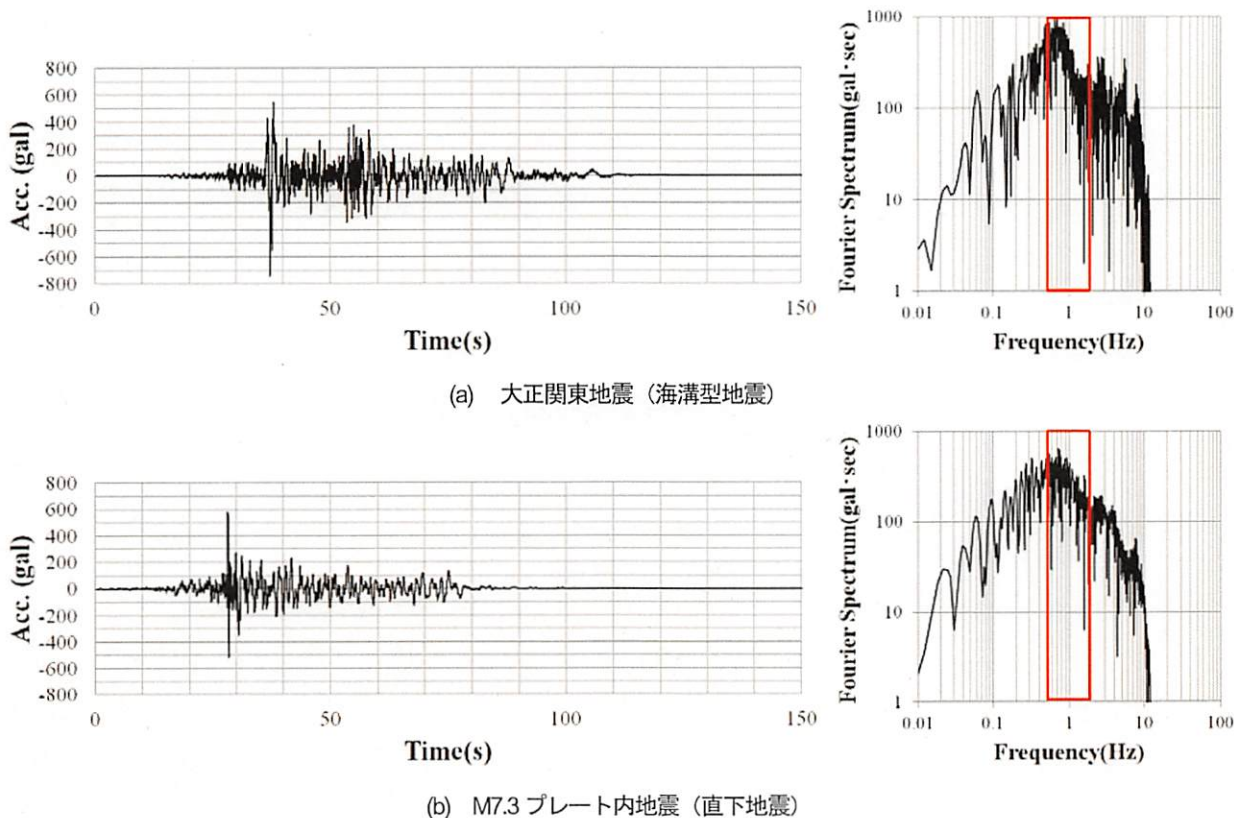


図-7 今回作成したレベル2地震波形(川崎港)

の最大加速度は743gal, M7.3プレート内地震は576galとなっている。また加速度波形の右には、フーリエスペクトルを示した。図より、今回作成した地震波形は、港湾構造物への影響が大きい周波数0.5~2.0Hzの値が大きいことが分かる。

5. 耐震性能照査

本章では、4章で作成したレベル2地震動を用いて、港湾技術基準（1999年）において整備された耐震強化岸壁の耐震性能照査を行った。

(1) 対象施設と解析断面

本検討では、港湾技術基準（1999年）において耐震強化施設として整備された「川崎港東扇島地区9号岸壁」を対象施設とした。東扇島地区は、東京湾臨海部基幹的広域防災拠点に位置付けられており、首都圏において地震被害があった場合、緊急物資輸送等の重要な拠点となることから本施設を対象とした。

図 - 8に対象施設の位置および平面図を示す。対象岸壁の地盤は、軟弱な沖積粘性土層が厚く堆積しており、強度増加を図るため、岸壁延長240mのうち、8号岸壁側の約70mはサンドコンパクションパイル（SCP）工法、残りの範囲は置換砂工法で地盤改良されている。図 - 9

に解析断面として用いた土層区分モデルを示す。

(2) 解析手法

耐震性能照査には、FLIP解析を行った。設計入力地震動は4章で作成した2つの地震波形を入力した。FLIPは、液状化による構造物被害予測プログラムであり、港湾構造物および地盤をモデル化し、基礎地盤（工学的基盤）に地震波形を入力し、港湾構造物の残留変形量等を算出が可能である。

(3) 照査結果

本施設では、大正関東地震を入力した場合の方が応答値が大きかったため、そちらで評価を行った。照査結果の概要を表 - 1に示す。表より、どちらの断面においても、多くの項目で現行基準（2007年）の許容値を満足していないことが分かる。特に、岸壁延長の約70%を占める置換砂断面では残留変形量が大きく、震災後の迅速な施設利用は難しいと考えられる。

既往研究では、岸壁の残留水平変位と入力地震動の速度PSI値の相関が高いことが指摘されている⁷⁾。そこで、上記の値に着目し、今回作成した地震波形の妥当性についても考察した。図 - 10は、入力地震動の速度PSI値と残留水平変位の関係（既往データ）に本検討による値をプロットしたものである。図より、本検討による値が既往データの非液状化地盤と対応していることが分かる

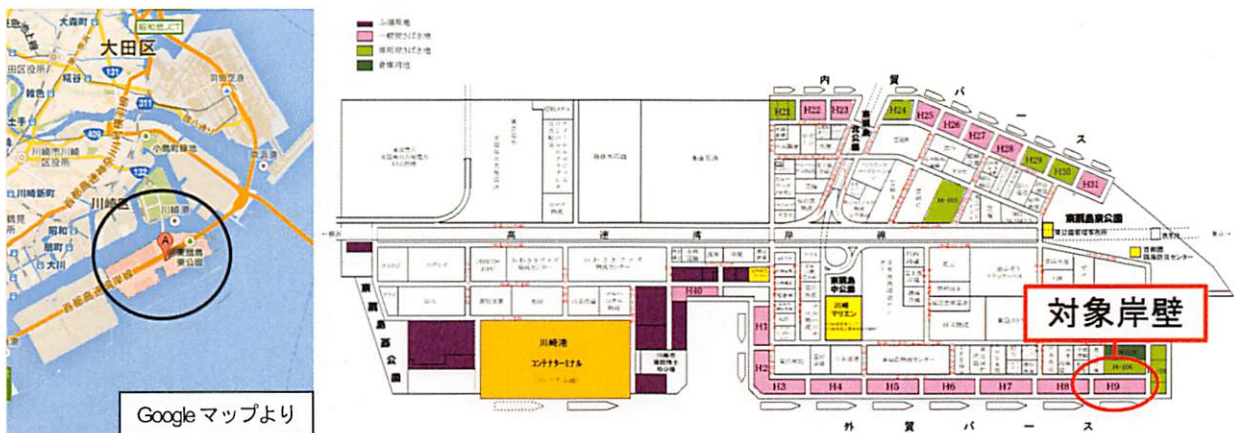


図 - 8 対象施設の位置と平面図

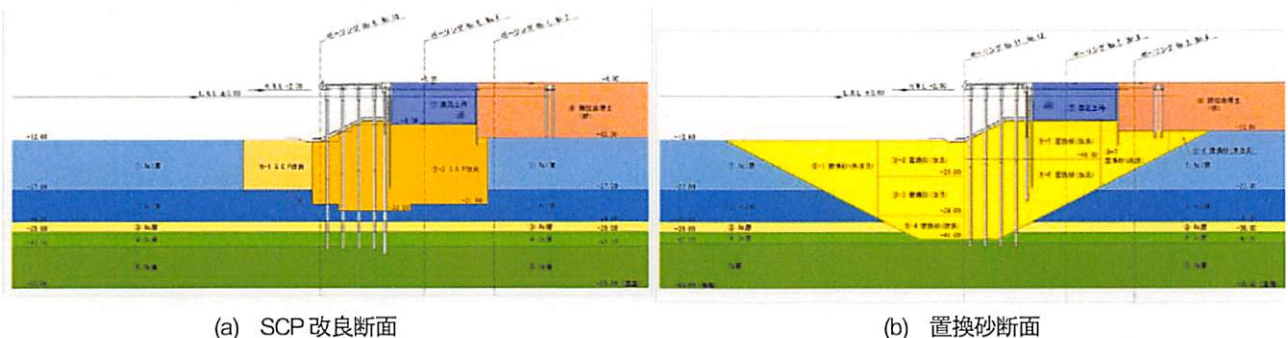


図 - 9 土層区分モデル

表 - 1 耐震性能照査結果の概要

項目	許容値の目安	(a) SCP改良断面		(b) 置換砂断面		
		結果	判定	結果	判定	
残留変位量	岸壁法線の水平変位量	100cm程度	144cm	NG	164cm	NG
	栈橋上部工の傾斜角	3°程度	0.11°	OK	0.02°	OK
	土留め護岸の変位量	100cm程度	100cm	OK	177cm	NG
栈橋構造部材の状態	上部工	設計断面耐力未満	設計断面耐力を超過	NG	設計断面耐力を超過	NG
	基礎杭の曲げモーメント	全塑性未満	地中部全塑性 2箇以上×3本	NG	地中部全塑性 2箇以上×4本	NG
	基礎杭の軸方向力	極限支持力未満	極限支持力未満	OK	極限支持力未満	OK
土留め部の構造部材の状態	矢板の曲げモーメント	降伏以下	全塑性	NG	降伏以上	NG
	タイロッドの張力	破断強度未満	破断強度以上	NG	破断強度未満	OK
	控え杭の曲げモーメント	全塑性未満	全塑性	NG	全塑性	NG

(尚、本検討のFLIP解析では、基礎地盤は非液状化地盤としている)。以上より、今回作成したレベル2地震波形は、これまでの事例から見ても適切な解析結果を与える地震動である。

6. まとめ

今回は、2013年12月の内閣府中央防災会議による首都直下地震の新たな震源モデル提言をうけ、関東管内の東京港および川崎港について新たなレベル2地震動の作成を行った。想定地震として、海溝型地震は『大正関東地震』および直下地震は『フィリピン海プレート内の地震』を選定し、震源モデルの設定にSPGAモデルを適用したことで、港湾施設的设计に適した設計入力地震動の作成が行えた。

また、川崎港において、新たなレベル2地震動を用いて、既存耐震強化岸壁の耐震性能照査を行ったところ、許容値を満足しないことが分かった。さらに、照査結果を既往研究と比較したところ、本地震動は照査用地震動として適切である。

7. 今後の課題・方針

直下地震として選定したフィリピン海プレート内の地震は、内閣府報告書ではフィリピン海プレート上面深度が15km以深と設定されている。今回対象としなかった各港湾に対して、適用範囲の設定が課題であり、研究機関等との調整が必要である。

川崎港東扇島地区では、今年度に既設岸壁の老朽化対策が予定されているため、今回作成したレベル2地震動を適用して、耐震性能の向上を図る。

謝辞：今回、大正関東地震の震源モデルの設定にあたり、SPGAモデルを独立行政法人港湾空港技術研究所より、ご提供頂きました。また、野津地震防災研究領域長には、

凡例	大正関東地震	M7.3プレート内地震
SCP改良断面	●	●
置換砂断面	×	×

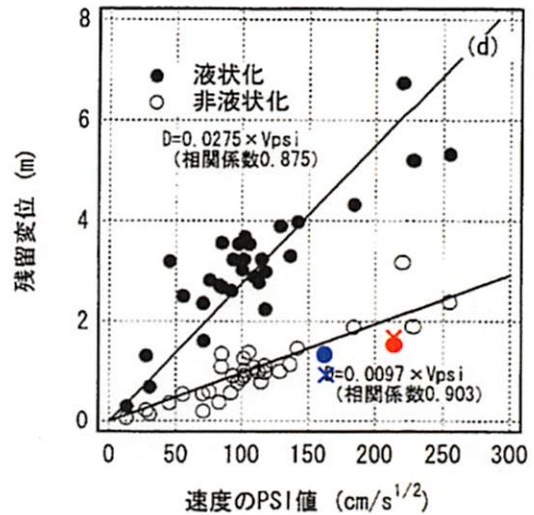


図 - 10 入力地震動の PSI 値と残留水平変位の関係 ⁷⁾加藤

貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 首都直下地震モデル検討会：首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書，2013
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007
- 3) 野津厚ら：岸壁の変位量と入力地震動タイプに関する一考察，土構造物の耐震設計に用いるレベル 2 地震動を考えるシンポジウム発表論文集，pp.73-80，1998
- 4) 野津厚：2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動を対象とした複数の震源モデルの比較，日本地震工学会大会，2013
- 5) 野津厚ら：海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケージング，日本地震工学会論文集第 12 巻，第 4 号，2012
- 6) 建築学会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法，2009
- 7) 野津厚ら：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察，平成 12 年度土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，Vol.28，pp.18-19，2001