

和歌山下津港海岸（海南地区）湾奥部ゾーン におけるL2地震動の設定について

寺本 健太郎¹

¹近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 設計担当（〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30）

施設の耐震設計にあたっては、外力条件である地震動の設定が重要となってくる。和歌山下津港海岸（海南地区）における津波対策事業を進めるにあたり、地震動が地表面の各施設に伝播するまでのサイト増幅特性について、常時微動観測結果を基に設計対象エリアをゾーン分けするとともに、湾奥部ゾーンについて、現地の土質調査結果を踏まえた適切な地盤モデルの設定を行い、東日本大震災で得られた知見を基に確立された震源モデル（SPGAモデル）にて、耐震設計に用いる地震動を設定した。

キーワード 地震動、サイト増幅特性、常時微動観測、工学的基盤面、SPGAモデル

1. はじめに

和歌山下津港海岸（海南地区）（図-1）は、東海・東南海・南海の三連動地震に伴う津波により、甚大な被害が想定されるため、2009年度より津波浸水対策事業として、防護ラインを湾口に配置し、護岸及び防波堤の補強・嵩上げと直立浮上式防波堤の設置を組み合わせた整備を実施してきた。しかし、2011年3月の東日本大震災をうけ、2012年8月に内閣府より南海トラフの巨大地震が公表されたことに伴い¹⁾、設計外力が大幅に増加したため、事業の見直しを検討し、2015年2月に新たな整備計画として、港内部の護岸嵩上げ計画を公表した（図-2）²⁾。それに伴い、新たに施設の耐震設計をすすめる必要が生じた。施設の耐震設計にあたっては、外力条件である地震動の設定が重要となってくる。

本稿では、地震動が地表面の各施設に伝播するまでのサイト増幅特性について、常時微動観測結果を基に設計対象エリアをゾーン分けするとともに、湾奥部ゾーンについて、現地の土質調査結果を踏まえた適切な地盤モデルの設定を行い、東日本大震災で得られた知見を基に確立された震源モデル（SPGAモデル）を適用して、耐震設計に用いる地震動を設定した。



図-1 和歌山下津港海岸（海南地区）位置図



図-2 新たな整備計画（防護ライン）及び検討対象施設
（点線○囲いが検討対象箇所）

2. 常時微動観測とサイト増幅特性のゾーニングの設定

(1) サイト増幅特性の評価について

図-3に地震動の各特性の概念図を示す³⁾。地震動に影響を及ぼす要因として、震源特性、伝播経路特性及びサイト増幅特性の3つがあり、中でも重要なのがサイト増幅特性である。サイト増幅特性とは、堆積層における（地震基盤から地表までの）地震動の増幅率のことで、地震動が震源から地表面に伝達される際、堆積層は緩く締まっているため、堆積層で地震動が増幅する。堆積層は対象地点毎に異なるため、サイト増幅特性も地点毎に異なる。そのため、サイト増幅特性を適切に評価しなければ、外力条件である地震動そのものが過小にも過大にもなり、設計そのものがミスリーディングになる。

サイト増幅特性を評価する方法として、①常設もしくは

は1年から数年程度の期間臨時に設置した強震計（地震計）により得られた中小地震観測記録を使用した方法と、②常時微動観測を使用した方法がある³⁾。常時微動観測とは、各種の人間活動などによって発生する地盤の微小な振動を観測することで、その振動は数ミリカイン（ $1\text{mkine}=10^{-5}\text{m/s}$ ）程度の僅かなものである。常時微動観測は持ち運び可能な観測機を使用し、また観測自体も10分程度で完了するため、コストパフォーマンスの良い観測である（図-4）。

サイト増幅特性を評価するうえでは、①の方法は地震そのものを評価するため最も有効な方法であるが、検討対象施設周辺に強震計は常設されておらず、臨時に強震計を設置したとしても、設計を早急にすすめる必要があったため、地震記録を観測する期間を確保できなかった。そのため、今回は②の方法でサイト増幅特性を評価した。

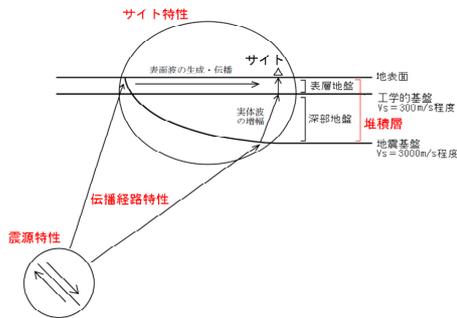


図-3 震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性³⁾



図-4 常時微動観測の様子

(2) サイト増幅特性のゾーニング設定について

サイト増幅特性のゾーニングとは、サイト増幅特性のピーク周波数を確認し、概ね同じピーク周波数を有する地域に分けることである。サイト特性のピーク周波数は常時微動観測により得られるH/V スペクトルで評価できる。H/V スペクトルとは常時微動観測によって得られる水平動と鉛直動のフーリエスペクトルの比であり、ピーク周波数はサイト増幅特性のピーク周波数と一致する特性がある。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。

海南地区における常時微動観測を行った結果、常時微動H/V スペクトルについて、図-5 のとおり、

- ・1.3～1.6Hz にピーク周波数帯を持つ船尾側ゾーン
 - ・2.0Hz にピーク周波数帯を持つ湾奥部ゾーン
 - ・4.0Hz 以上にピーク周波数帯を持つ冷水側ゾーン
- の3つのゾーンに大別できた。

常時微動観測の結果について、紙面の都合上、図-6 のとおり、代表箇所のみ（図-5 の□囲い）を掲載する。以上より、新たにゾーニング設定する港内部でのサイト増幅特性を考慮した設計地震動を設定することとする。

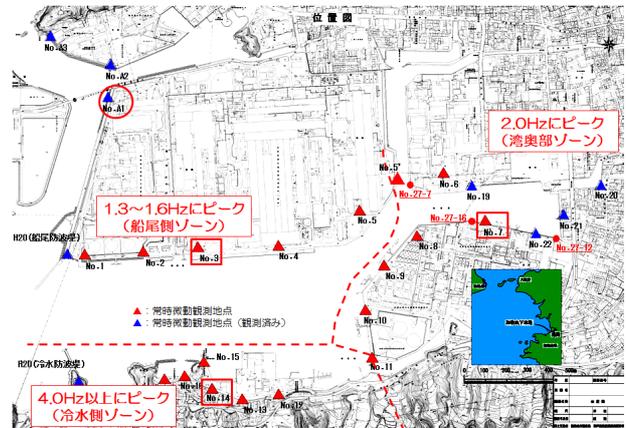


図-5 港内部におけるサイト増幅特性のゾーニング

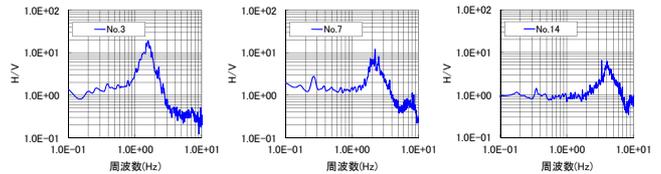


図-6 常時微動観測結果（代表箇所のみ掲載）

3. 湾奥部ゾーンにおけるサイト増幅特性の竹補正

2章の港内部のゾーン分けを踏まえ、湾奥部ゾーンのサイト増幅特性を評価する。地震観測によりサイト増幅特性が設定されている図-5 のNo.A1（関電：○囲い）において、ピーク周波数帯が1.05Hzであるサイト増幅特性が得られているが、これをベースに、湾奥部ゾーンのサイト増幅特性としてピーク周波数帯を2.00Hzへ図-7の矢印のようにシフトする。このように常時微動観測によって、直接はサイト増幅特性を評価せずに、ピーク周波数をシフトさせることを竹補正と呼んでいる⁴⁾。

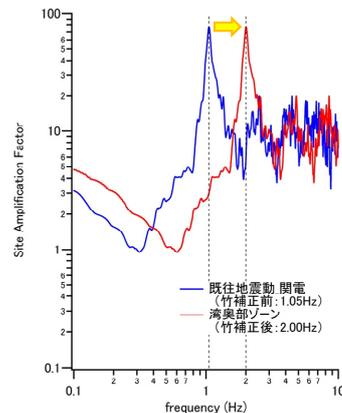


図-7 サイト増幅特性の竹補正

4. 工学的基盤面の設定

(1) 工学的基盤面を設定するうえでの留意点

工学的基盤面の設定のあたって、

- ・同一のゾーン内では整合させておく
- ・耐震性能照査における動的解析を行う際も一致させることが重要である。例えば同一ゾーン内で工学的基盤面が統一されていないこと、もしくは地震動設定と動的解析上の工学的基盤面がずれていることは問題である。

以上より、湾奥部ゾーンにおける複数箇所のボーリング結果より総合的に判断し、共通する土層を工学的基盤面と設定することとする。

(2) 湾奥部ゾーンでの地盤特性

今回地震動を設定する湾奥部ゾーンでの地盤特性として、図-8 に示す湾奥部ゾーンでの地盤モデル (No.27-7,12,16: 土質調査箇所は図-5 の●箇所) のPS 検層の結果より、「せん断波速度Vs と N 値で工学的基盤面と判断する深度が異なる」ことが挙げられる。なお、一般的には、せん断波速度Vs と N 値には相関性がある。

- ・洪積砂礫層、洪積粘性土層いずれもN 値が10 前後であってもVs=300m/s を概ね超える結果となった。
- ・N 値が50 を安定的に超えるのはDg3 層もしくは基盤岩であるPs 層である。
- ・なお、この傾向は既往土質調査や船尾側ゾーンでも同様であり、海南地区特有の地盤特性であると考えられる。

湾奥部ゾーンでのボーリング (No.27-7,12,16) におけるせん断波速度Vs と N 値の関係を図-9 に示す。

No.27-7				No.27-12				No.27-16						
深度 (m)	地層	N値	S波速度 <層毎> (m/s)	密度 <層毎> (t/m ³)	深度 (m)	地層	N値	S波速度 <層毎> (m/s)	密度 <層毎> (t/m ³)	深度 (m)	地層	N値	S波速度 <層毎> (m/s)	密度 <層毎> (t/m ³)
0.1	B1		125	1.87	0.1	B2				0.1	B2			
1.2	B1+砂礫				1.2	B2				1.2	B2			
2.3		3			2.3		300	1.90		2.3	B2	16	180	1.90
3.4	As1		123	1.89	3.4					3.4		29		
4.5					4.5		10			4.5		9		
5.6					5.6	Ac1		300	2.00	5.6	Ac1	18	180	1.90
6.7	Ac2		115	1.73	6.7	As1	19	300	1.90	6.7	As1	12	180	1.90
7.8	Ag		190	1.90	7.8	Ag				7.8	Ag	16	190	2.00
8.9					8.9	Ag		300	2.00	8.9				
9.10	Ac2		180	1.85	9.10	Ac2	7	300	2.00	9.10	Ac2	6	190	2.00
10.11					10.11	Ag		200	2.00	10.11	Ag	6	190	2.00
11.12					11.12	Ac2		300	2.00	11.12	Ac2		190	2.00
12.13					12.13	Ac3	16	200	2.00	12.13	Ac2			
13.14					13.14	Ac3		200	2.00	13.14	Ag	17	250	2.10
14.15					14.15		9			14.15	As1	18		
15.16					15.16					15.16	Ac3		210	1.90
16.17		27			16.17	Dg1	12	310	2.00	16.17	Ac3	2		
17.18	Dg1				17.18	Dc1	18			17.18	Dc1	15	290	2.00
18.19		26	430	2.02	18.19	Dc1	16	340	2.00	18.19				
19.20		27			19.20	Dg1	16	340	2.00	19.20				
20.21		21			20.21	Dg1	9			20.21		12		
21.22	Dc1	5	300	1.86	21.22	Dc1	9			21.22		28	330	2.00
22.23	Dg1	26	415	1.99	22.23	Dc1	9	340	2.00	22.23	Dg1	12	290	2.00
23.24		21	405	1.93	23.24	Dc1	13	340	2.00	23.24		11		
24.25	Dc1	21			24.25	Dc1	6	340	2.00	24.25	Dc1	12	200	2.00
25.26		22			25.26		12			25.26	Dc1	10		
26.27		25			26.27		8			26.27		25		
27.28		27			27.28		18			27.28		25		
28.29		24			28.29	Dg1	16	460	2.00	28.29		31		
29.30		33			29.30		11			29.30		25		
30.31	Dg1	16	474	2.03	30.31		16			30.31		22		
31.32		18			31.32		22			31.32	Dg1	22	500	2.00
32.33		20			32.33		26			32.33		15		
33.34		28			33.34	Dc1	11	510	2.00	33.34		28		
34.35	Dc2	12	490	2.01	34.35	Dc1	31	510	2.00	34.35		23		
35.36		15			35.36	Dc2	8	510	2.00	35.36		29		
36.37		22			36.37	Dc2	14			36.37	Dc3	13	450	2.10
37.38		20	468	2.02	37.38	Dg2	12	510	2.00	37.38		12		
38.39		19			38.39	Dg2	12			38.39		29		
39.40		31			39.40	Dc2	9	510	2.00	39.40		25		
40.41	Dc1	10	380	1.94	40.41	Dg2	29	590	2.10	40.41		23		
41.42		16	475	2.00	41.42	Dc3	30			41.42		29		
42.43	Dg2	16			42.43	Dc3	31	590	2.10	42.43	Dg2	24	450	2.10
43.44	Dc3	15	560	2.01	43.44		60			43.44		23		
44.45		16			44.45	Dg3	60	590	2.10	44.45		24		
45.46		30			45.46		36			45.46		25		
46.47		30			46.47		60			46.47	Dc3	20	450	2.10
47.48	Dg3	28	647	2.08	47.48		60			47.48		60		
48.49		60			48.49		60			48.49		60		
49.50		60			49.50	Ps		1570	2.80	49.50		60	650	2.10
50.51		60			50.51					50.51	Dg3	60		2.10
51.52	Dc3	21	490	2.03	51.52					51.52		60		
52.53	Dc3	31	560	2.16	52.53					52.53		60		
53.54	Ps	60	1285	2.32	53.54					53.54		60		
54.55		60			54.55					54.55		60		
55.56					55.56					55.56		60		
56.57					56.57					56.57		60		

図-8 湾奥部ゾーンにおける地盤モデル (土質調査結果より) (左からNo.27-7,12,16)

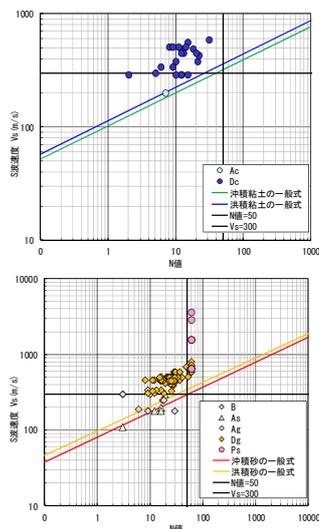


図-9 湾奥部ゾーン (ボーリングNo.27-7, 12, 16) におけるせん断波速度Vs と N 値の関係 (上: 粘性土, 下: 砂質土, 礫質土, 岩盤)

(3) 土質調査結果を受けた湾奥部ゾーンでの工学的基盤面の設定

海南地区は、元々は日方川や山田川などによって運搬・排出された土砂や海側からの漂砂などにより形成された干潟であり、後に埋立による土地造成により現在の地形となっている。

このため、土層構成の特徴としては沖積層・洪積層ともに粘土層・砂礫層の互層状態となっており、河川の影響が大きい湾奥部ほど砂礫質が卓越した土層構成となっている。一方、河川の旧河口より距離がある船尾側 (港外側) へいくほど沈降に時間を要する粘性土質が卓越した土層構成となっている。

この土層構成の卓越層変化地点は、2章で設定したゾーニングの境界と概ね同じ傾向であると言える。

今回地震動設定を行う湾奥部ゾーンにおいては、沖積層は特に砂礫層・粘性土層の互層の程度が著しい。一方、洪積層は互層の程度は比較的落ち着き砂礫層が卓越してくるものの、工学的基盤面をVs で判断しDg1.2 層上面とする場合、「今後同一の地震動を用いて設計する当該ゾーンで共通した土層である」とは言い難く、Dg1 層以深の局所的に混在する洪積粘性土層が与える影響が今後検討する耐震設計へ反映されないこととなる。

また、一般的にVs は地盤の初期剛性 (応力-ひずみ曲線における“初期の傾き”に相当)、N 値は地盤の強度 (応力-ひずみ曲線における“収束値”に相当) を示すことから、工学的基盤面はN 値で判断すべきと考えられる。

以上より、当該ゾーンにおいて共通した土層での地震動設定を行ううえでの工学的基盤面は「基盤岩: Ps 層上面」とする。

図-10 に船尾側ゾーン～湾奥部ゾーンにおける土層構成と湾奥部ゾーンの工学的基盤面を示す。

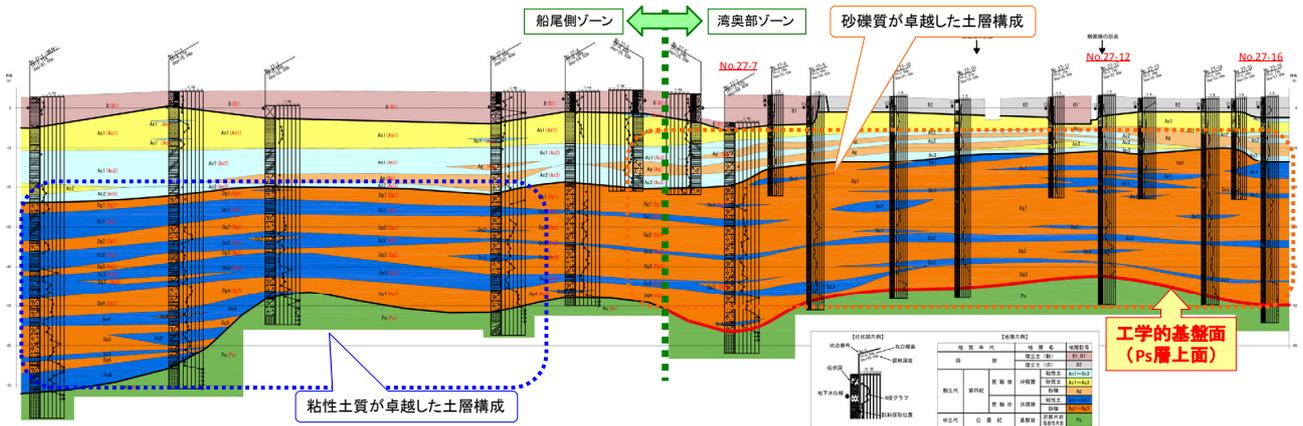


図-10 船尾側ゾーン～湾奥部ゾーンにおける土層構成と湾奥部ゾーンの工学的基盤面

5. 地表面地震動の工学的基盤面への引き戻し

別途、地表面における地震動（南海トラフ巨大地震）を作成したあと、耐震設計に用いる工学的基盤面での入力地震動の設定にあたって、地震応答解析にて地表面での地震動を工学的基盤面（Ps 層上面）まで引き戻す。引き戻しの際に適用する地盤モデルは、PS 検層を実施した3 地点（No.27-7,12,16）の結果より選定する。

選定にあたり、3 地点それぞれでの地盤モデル（図-8）にて引き戻した地震動を比較すると、工学的基盤面における速度PSI 値に異なりがみられた（表-1）。速度PSI 値とは速度波形の二乗積分値の平方根として地震波形のエネルギーに対応する値である。異なった要因として、3 地点それぞれの工学的基盤面のVs が異なっていることがある。No.27-16 については、図-11よりVs =650m/s の層が風化岩（Ps 層を指す）とは少しずれていると考えられ、Ps 層より一つ上の地層（Dg3 層）のVs を測定したものと判断した。つまり、No.27-16 はPs 層まで引き戻せていないことを意味している。

また、図-12 に地表面と工学的基盤面におけるフーリエスペクトルと伝達関数を示す。伝達関数とは工学的基盤面から地表面までの地盤モデルに基づく増幅率のことで、これにより、地表面のフーリエスペクトルを工学的基盤面に引き戻している。このときの地盤モデルとして図-12 では3通りを考えている。今回、Ps 層のS波速度がかなり大きいため、Ps 層上面よりもコントラストの明瞭な面がより深部にあることは考えにくく、サイト増幅特性のピーク周波数もPs 層より上の層で決まっていると考えられ、サイト増幅特性と伝達関数のピーク周波数が一致する方が自然と判断すると、良く一致しているのはNo.27-7 と判断できる。

以上から、No.27-7 を引き戻しの際に適用する地盤モデルとする。また、湾奥部ゾーンにおける今後の個別作業となる各設計地点のFLIP解析による耐震設計での地盤モデル設定では、地震動を入力する工学的基盤面のVs は、引き戻しの際の条件に合わせて1,300m/s 程度とする。

表-1 工学的基盤面での速度PSI 値（南海トラフ巨大地震）

PS 検層地点 (引き戻し用地盤モデル作成地点)	工学基盤面：Ps 層の Vs[m/s]	速度PSI値[m/s ^{1/2}] NS成分	EW成分
No. 27-7	1,285	38.45	39.27
No. 27-12	1,570	50.75	51.42
No. 27-16	650	71.72	72.46

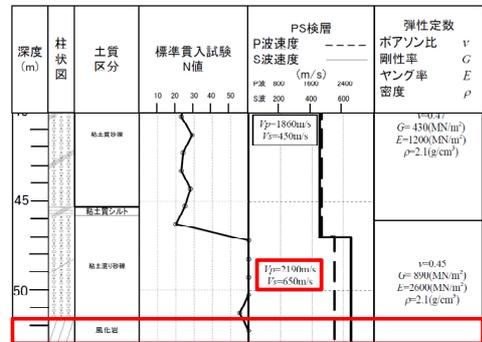


図-11 Ps 検層結果（No.27-16）（土質調査結果を一部加工）

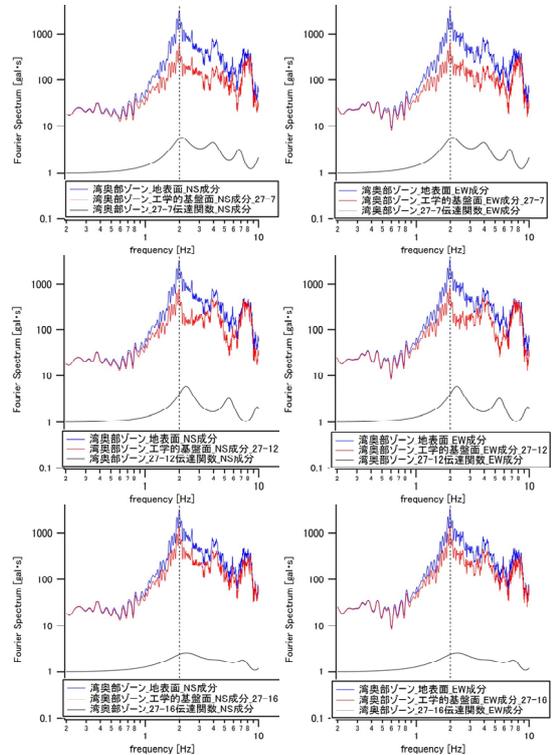


図-12 地表面（青）と工学的基盤面（赤）におけるフーリエスペクトル（南海トラフ巨大地震）と伝達関数（黒）（上からNo.27-7,12,16, 左からNS 成分, EW成分）

6. 設計地震動の設定

(1) 震源モデル

設計地震動の設定にあたっては、東日本大震災で得られた知見を基に新たな震源モデルの設定を行うこととした。その背景として、東日本大震災は今日のような密な強震観測網が構築されて以来、初めて発生した M_w 9.0クラスの巨大地震であり、これまで対象とされなかった想定される最大級の地震を対象として検討する必要が生じたためである。1章で述べたとおり、2012年8月に内閣府より東日本大震災と同等の M_w 9.0クラスの南海トラフ巨大地震が想定されている。

南海トラフ巨大地震の地震動の評価のための震源モデルについては、内閣府よりSMGA (Strong Motion Generation Areas) モデル、港湾空港技術研究所によりSPGA (Strong - Motion Pulse Generation Areas) モデルが公表されている。一般的に、SMGAモデルでは、一辺が数十km程度の領域から万遍なく強震動が生成されるとしているのに対し、SPGAモデルでは、一辺が数km程度の領域から強震動が生成されるとしている。

図-13に、東日本大震災におけるSMGAモデルとSPGAモデルを示す。内閣府のSMGAモデルは、各地点における震度を精度よく算出することを主目的としており、モデルの妥当性の検証は、東日本大震災の地震観測記録をもとに、震度が適切に評価できていることを確認することにより行っているが、構造物の安定性に大きく影響する地震動波形、スペクトル等が適切に評価できていることは検証していない。

一方、SPGAモデルにおいては、耐震検討用の地震動の評価を主目的としており、震源モデルの設定の際には、港湾構造物に影響を及ぼしやすい0.2-1Hzの周波数帯域の地震動を適切に評価できていることを確認されている。東日本大震災では、震源付近の観測点において、0.2-1Hzの周波数帯域に現れるパルス状の波形(強震動パルスと呼ばれる)が数多く観測されている。また、2003年十勝沖地震(M_w 7.9)や1978年宮城県沖地震(M_w 7.6)など、東日本大震災以外の海溝型巨大地震(あるいはそれに準ずる規模の地震)においても、強震動パルスの生成が確認されており、強震動パルスは重要度が高いといえる。

図-14に東日本大震災における速度波形(0.2Hz-1Hz)の観測結果とSMGAモデル及びSPGAモデルによる計算結果を示しているが、SMGAモデルと比較し、SPGAモデルの方が強震動パルスも含め、観測記録と概ね一致しているといえる。

なお、SPGAモデルを用いる場合、事前にSPGAの位置を予測することが困難なため、想定されるSPGAの配置に対して、地震動を強さの観点から速度PSI値で順位付けし、50%非超過、90%非超過となる地震動を算出している。その結果、50%非超過においては、地震動は内閣

府が公表している南海トラフ巨大地震の予測震度と概ね調和的な震度となった。SPGAの配置の考え方及び順位付けの詳細については、参考文献(6),(7)を参照されたい。

以上より、震源モデルについては、最新の知見を踏まえて、SPGAモデル50%非超過として、これを用いて地震動の設定を行う。

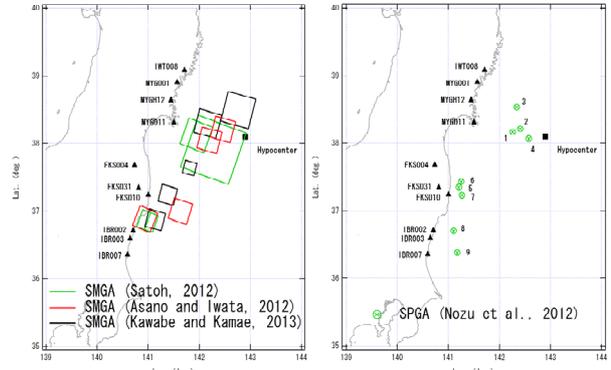


図-13 東日本大震災におけるSMGAモデルとSPGAモデル⁵⁾

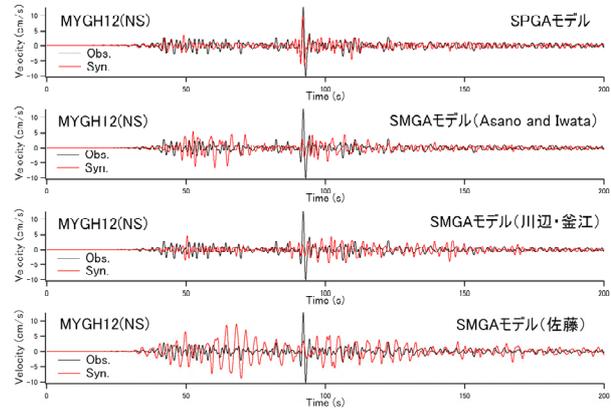


図-14 東日本大震災における速度波形(0.2Hz-1Hz)の観測結果とSMGAモデル及びSPGAモデルによる計算結果⁷⁾

(2) SPGAモデルによる入力地震動

図-15に、湾奥部ゾーンにおける工学的基盤面での入力地震動(南海トラフ巨大地震: SPGAモデル50%非超過)の加速度時刻歴波形を示す。

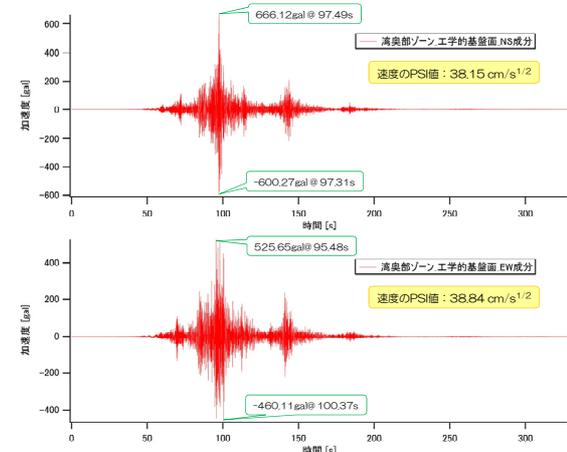


図-15 基盤加速度時刻歴波形(南海トラフ巨大地震)
(上: NS成分, 下: EW成分)

7. おわりに

今回、事業計画の見直しに伴い、地震動を新たに設定することになった。それに際して、サイト増幅特性については、常時微動観測結果を基にゾーン分けをして竹補正で評価するとともに、地盤モデルについては、現地の土質調査結果を踏まえて適切に設定した。

また、今回作成した南海トラフ巨大地震の地震動については、東日本大震災で得られた知見を基に確立されたSPGAモデルを適用することで、港湾構造物に影響を及ぼしやすい0.2-1Hzの周波数帯域を適切に評価し、最新の知見を踏まえた耐震設計が可能となった。

なお、地震動の設定をしていない冷水側ゾーンにおいても、今後地震動の設定の際には、今回の結果を踏まえ、1.05Hzピークの既往地震動を4.0Hzへ竹補正を行う必要がある。ただし、地震動を設定する工学的基盤面については、今後行う現地の土質調査を踏まえて判断する必要がある。

謝辞: 今回直営での地震動設定にあたっては、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術

研究所 野津厚 地震防災研究領域長より、御指導、御助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震に関する津波高、浸水域、被害想定公表について（平成24年8月29日発表），2012，http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html
- 2) 近畿地方整備局：和歌山下津港海岸（海南地区）津波対策事業の整備計画（案）について，2015，<http://www.pa.kkr.mlit.go.jp/pdf/press/H26d/150218.pdf>
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 4) 港湾空港技術研究所地震防災研究領域：サイト増幅特性評価手法—松竹梅，http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/research_jpn/research_jpn_2008/research_29/method.pdf
- 5) 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。
- 6) 野津厚：南海トラフの地震（Mw9.0）を対象としたSPGAモデルによる強震動評価事例，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，pp.I_872-I-888，2013。
- 7) 野津厚，若井淳：南海トラフの地震（Mw9.0）を対象とした強震動評価へのSPGAモデルの適用，港湾空港技術研究所資料，No.1271，2013。