

7. 港湾における地盤災害と耐震設計

港湾関係の被害状況と被害のメカニズム分析の結果については、平成10年6月の報告会で述べた通りであるが、下記の点が特筆すべきものと考えられる。

- ・神戸港域の護岸及び防波堤では、そのほとんどが設計断面として置換砂層上に設置された捨石マウンド+重力式コンクリートケーソン構造となっている。地震時には、置換砂層の地表面部で液状化が激しく発生して局部的な支持力低下や流動が生じたようであり、収集した被害データ・設計断面を分析した結果、護岸・防波堤の沈下量の大小は置換砂層厚やケーソン高さとはあまり関係が無く、ほぼ同程度の沈下量を示すことが判明した。未貫通の置換砂断面でも被害は同程度であった。また、地表面部の軟弱沖積粘土層の強度との関係を検討したが、若干の相関性は得られたが、特定できるまでには至らなかった。
- ・被害のメカニズム分析に関して、震度と被害との関係、及び応答解析における工学的基盤深さの影響を検討するため、六甲アイランド、甲子園浜、大阪港南港での被害例について有限要素法プログラムFLIPによる液状化解析を実施した。福島らの¹⁾式で推定した入力加速度を洪積粘性土層Ma12下部に入力した結果、被害実例と解析での沈下量は相関し、被害状況のある程度は説明できた。ただし、液状化解析(FLIP)には問題点があり、減衰定数(レーレー減衰)や工学的基盤深さの設定の如何で、解の発散や計算不可の場合が生じた。

報告会後も当WGでは、被害分布や解析手法について引き続き検討した結果、1)沖合いの防波堤の沈下量に着目すると沈下量の東西方向変化がある傾向を示すこと、2)FLIPによる液状化解析例が蓄積され、パラメータ設定方法に関する知見が得られつつあることが判明したので、これらの点について報告する。

7.1 被害概要と被害分布

港湾関係の被害状況の特徴として、陸上部での地震被害分布と同様に、甚大な被害は武庫川以西に集中し、武庫川を境に急激に被害が減少する。このような被害変化を液状化解析により検討したが、被害集中域内での被害程度の変化を検討するため、西宮沖～和田岬間の防波堤沈下量の東西方向変化に着目した。

7.1.1 東西方向の被害概要と地盤との比較

図7.1.1の①—①'断面に示す大阪湾の東西方向に分布する防波堤の沈下量と地層断面図を示したものが図7.1.2である。また、沈下量とAc層厚との関係を整理したものが図7.1.3である。防波堤は構造的に土圧を受けない構造物であるため、沈下量のみで地震被害を評価できる構造物である。これらの図よりAc層の層厚が厚くなると、沈下量は増加する傾向にあることが判る。なお、この傾向は、上述の「液状化被害は、置換砂の厚さに関係しない」と相反するものである。

一方、運輸省²⁾によれば、護岸の被害は震度により変化すると報告されているが、地震時に大阪湾内での程度の加速度が生じたか記録が無いため、概略の傾向を知る目的で福島ら¹⁾の式で計算した工学的基盤での想定加速度分布を図7.1.1に示す。同図より地震で加速度が南東方向に指数関数的に低下して行く傾向にあることが判る。従って、基盤部での加速度変化は図7.1.2の被害変化を説明できず、Ac層厚の変化による地震動の変化等の要因を検討する必要がある。

7.1.2 Ac層の層厚が地震被害に与える影響

Ac層の層厚が地震被害に与える影響を調べるため、Ac層の層厚を変化させた場合のケーススタディとして、工学的基盤をMa13下部と仮定し、入力基盤加速度(入力波はPI-79 NS Base)を250, 500GALの2種類について、SHAKEで解析を行い、海底面での応答加速度、応答水平変位の解析結果を図7.1.4~7.1.5に示す。これらの図より以下のことが判る。

- ・Ac層の層厚が厚くなると応答加速度が減少し、Ac層の厚さと沈下量増加の傾向は説明できない。
- ・Ac層の厚さが厚くなると応答水平変位が増加し、Ac層の厚さが沈下量増加に何らかの影響を与えることを示唆している。

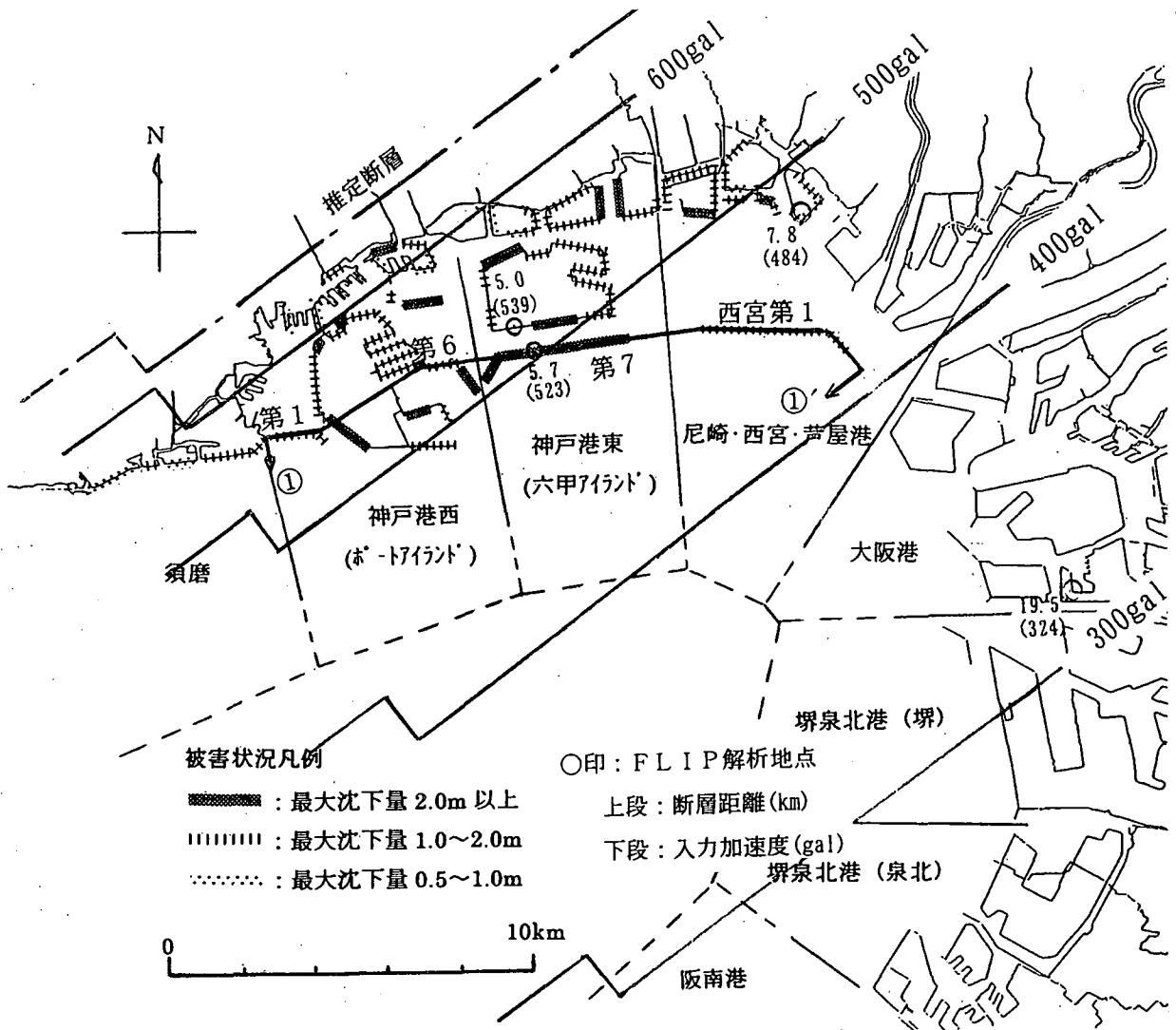


図 7.1.1 大阪湾内想定加速度分布図

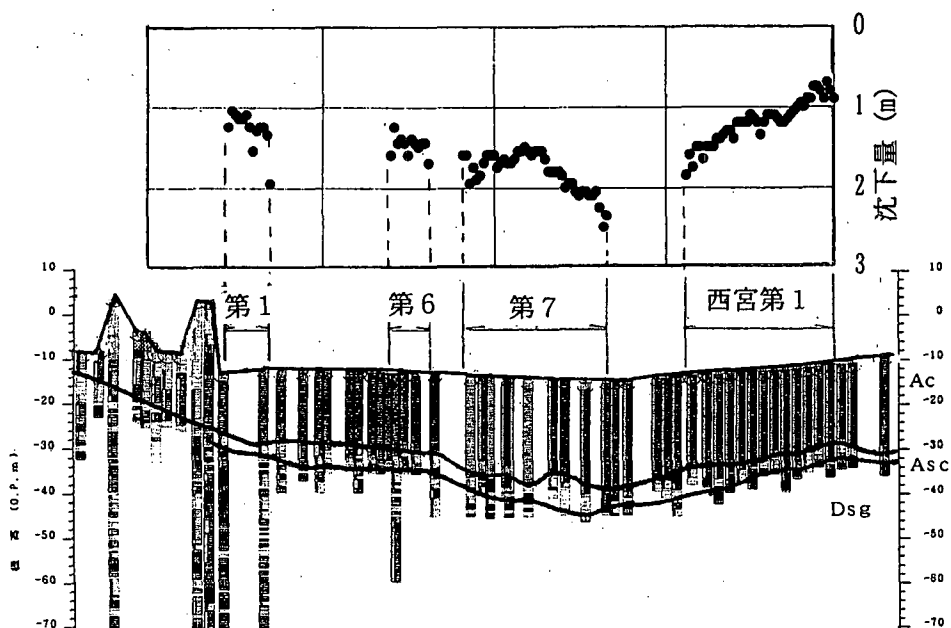


図 7.1.2 沈下量と地層断面図 (①—①' 断面)

また、今回の SHAKE による解析を通し、以下のような解析上の問題点も明らかになった。

- ・今回の地震のように入力加速度 (431~551gal) が大きくなると、入力地盤定数のひとつである「せん断剛性—せん断ひずみ曲線」において、せん断ひずみが大きな範囲 (等価線形が保てるぎりぎりの範囲) で収束計算が行われてしまい解が不安定となる (図 7.1.6 参照)。
- ・図 7.1.4 に示すように、入力基盤加速度が 500GAL の場合には海底面での応答加速度は減衰する傾向を示すが、逆に 250GAL の場合には同程度か増幅する傾向を示す。

現時点では、Ac 層の層厚が地震被害に直接影響を与える原因は特定できないが、今後、解析、模型実験等による原因究明の研究が望まれる。

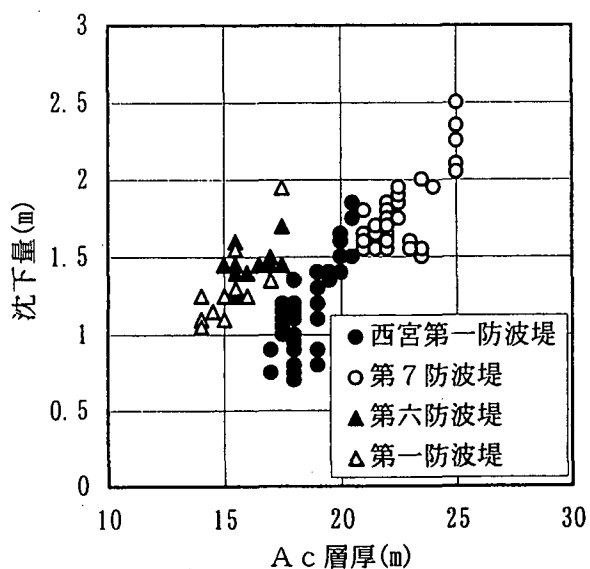


図 7.1.3 沈下量と Ac 層厚の関係

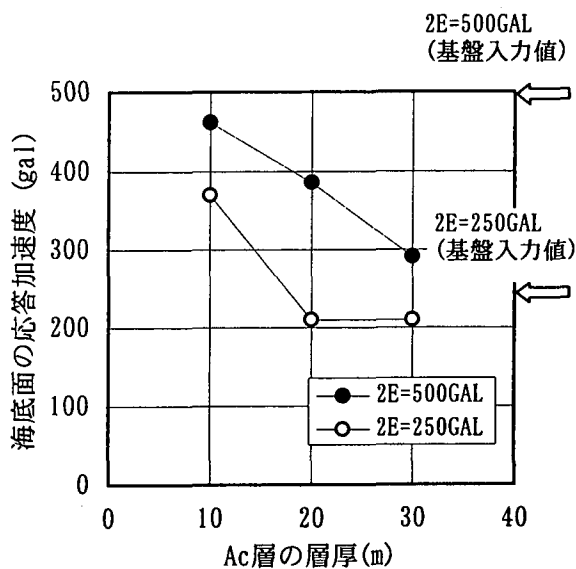


図 7.1.4 海底面の応答加速度と Ac 層の層厚

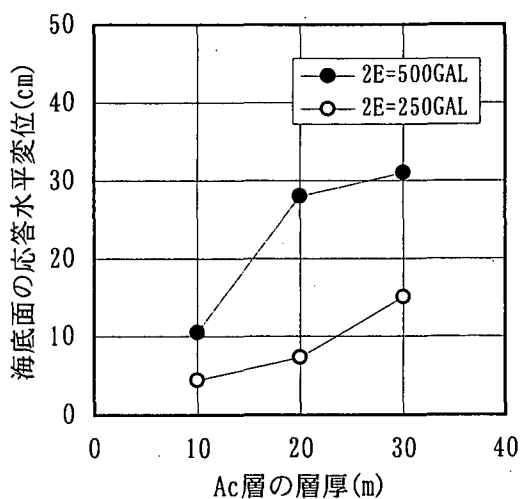


図 7.1.5 海底面の応答水平変位と Ac 層の層厚

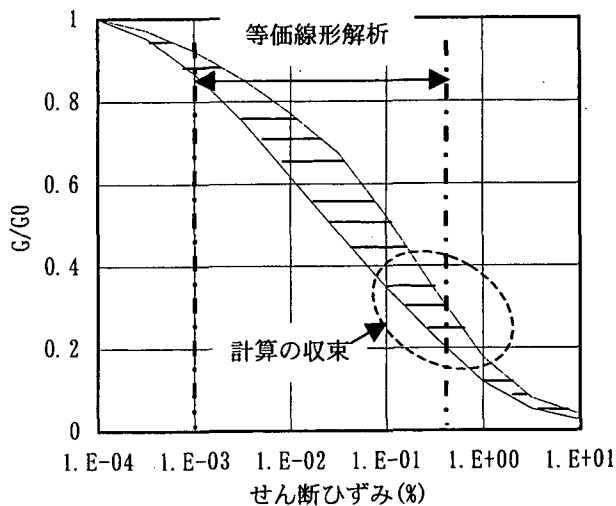


図 7.1.6 G/Go とせん断ひずみの関係における問題点

7.2 FLIPを用いた設計法の考察（現状分析）

7.2.1 概要

前述のように当WGでは、レベル2地震動に対する耐震設計の耐震照査の手法のひとつであるFLIPを用いて、六甲アイランド、甲子園浜、大阪南港の3護岸及び神戸港第7防波堤について、動的液状化解析を行った。解析にあたっては、震災以降に当該地で最も適切な解析手法と考えられる手法、すなわち1)ポートアイランドの観測波に基づく地震波形(PI-79 NS Base)を用い、2)確実な工学基盤として洪積粘性土(Ma12層)下部の洪積互層を選択することを考え、上記4地点における液状化解析を行った。

解析断面の模式図を図7.2.1に示す。

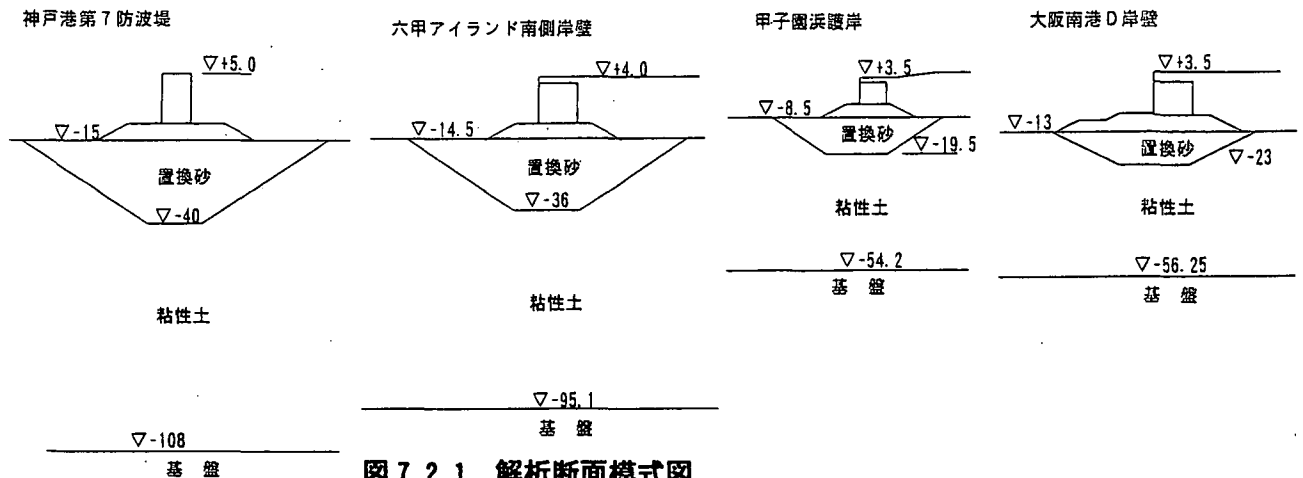


図 7.2.1 解析断面模式図

解析に用いた入力地震動は、港湾施設の耐震設計の基準波とされる PI-79 NS Base (図 7.2.2) を基盤に入力するものとする。なお最大加速度の値は図-7.1.1 に示すように断層からの距離減衰より算定された推定最大加速度、539gal (六甲アイランド), 484gal (甲子園浜), 324gal (大阪南港), 523gal (神戸港第7防波堤) を用いた。

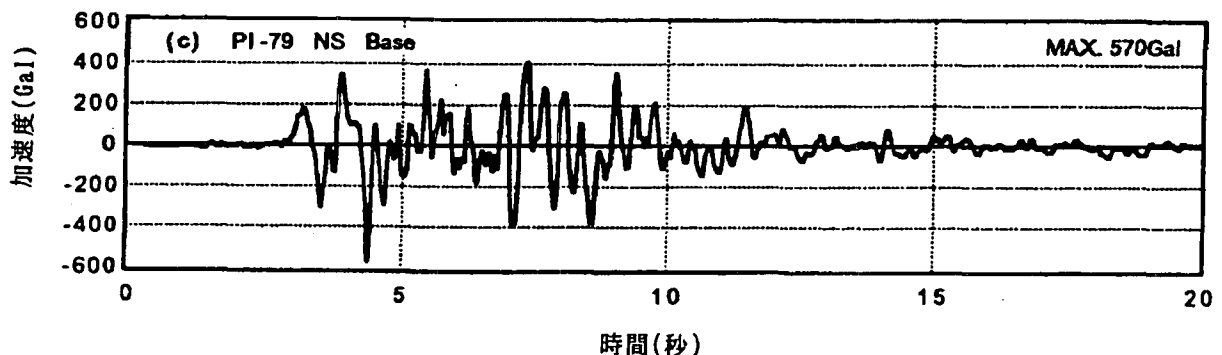


図 7.2.2 ポートアイランド(-79.0m)波形

7.2.2 FLIPのパラメータについて

FLIPの解析に必要なパラメータは、有効応力モデルに関するパラメータとして、土の物性（動的変形特性）に関する4個のパラメータと砂質土の液状化特性に関する6個のパラメータ、計10個と、動的解析の減衰特性を規定するパラメータ（レーレー減衰）1個が必要である。

土の物性に関する10個のパラメータに関しては、埋立材料については文献3)の値をそのまま使用し、海底地盤材料については標準貫入試験のN値とPS検層の結果から設定していく簡易設定法を用いた。

先述のように減衰特性を規定するレーレー減衰 β の決定法としては、従来は、SHAKEを用いた等価線形解析とFLIPの自由地盤の最大加速度解析値との比較で決定することとされていたが、今回工学的基盤をMa12層下とし不規則地盤動的解析を行ったところ、大きなメッシュであるため、加速度や過剰間隙水圧

が発散し不安定な結果（六甲アイランド，大阪南港）が生じ，また収束しない（第 7 防波堤）結果となった。このため，第 7 防波堤以外では，解が安定するまで β を大きくし，第 7 防波堤では，さらに加振力の入力位置を変更するなどして，解析結果を得た。解析に用いた β の値を下表に示す。

表 7.2.1 レーレー減衰値

項目	場所	六甲アイランド	神戸第 7 防波堤	甲子園浜	大阪南港
レーレー減衰 β		0.001	0.001	0.001	0.01

7.2.3 解析結果及び考察

本解析結果の内，岸壁及び防波堤の法線の変位量の実測値と解析値を表 7.2.2 に示す。

表 7.2.2 変位量比較表

	六甲アイランド		神戸港第 7 防波堤		甲子園浜		大阪南港	
	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向
実測値	255 cm	108 cm	9.5 cm	193.7 cm	135.1 cm	135.3 cm	0 cm	4.9 cm
本解析結果	180 cm	80 cm	0.7 cm	87.3 cm	76 cm	33 cm	37 cm	22 cm
入力加速度	539 gal		523 gal		484 gal		324 gal	

当WGにより得られた成果は以下の通りである。

- 工学的基盤面 Ma12 下で不規則地盤応答解析を FLIP で行った結果，岸壁および防波堤の共通の被災のメカニズムとして，ケーソン直下の置換砂の間隙水圧の上昇によりせん断抵抗の低下が起き，局所的な水平流動を主とする変形が生じ，岸壁および防波堤が大きな沈下を生じたことがわかった。
- 地震入力波形を工学的基盤 Ma12 下で入力して得られた解析値は実測値と比較すると 50%~70%の値となった。これは Ma12 層での加速度の減衰が大きいためと思われる。
- レーレー減衰 β の設定については，当初 SHAKE と FLIP の自由地盤解析の比較で決めた β 値では，解が発散したり，収束しないケースがあったため，解が得られるまで β 値（表 7.2.1）を大きくして結果をだした。今年度も当 WG で引き続き β 値の設定について研究し，既往の解析事例や β の設定方法に関する以下の知見が得られた。
 - 減衰パラメータ β は，数値計算の安定化，線形要素の減衰の代用，非線形要素の微小歪時の減衰の代用，およびその他の減衰効果を総合的に表現することを目的としている。この為，最も標準的な β の決定方法は既往の地震被害解析事例に基づいて適切に算定すべきものであること。
 - 既往の解析事例を地盤の固有周期とレーレー減衰パラメータ β の関係に着目した調査結果で β の範

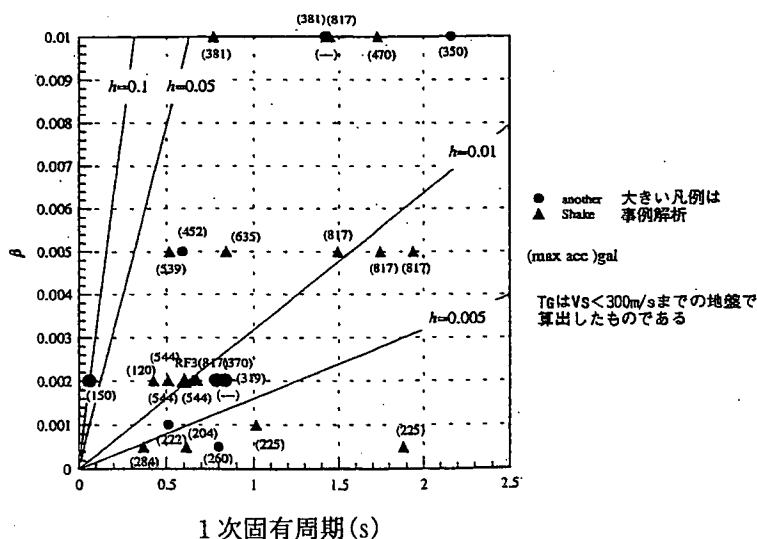


図 7.2.3 既往解析事例の地盤の 1 次固有周期とレーレー減衰 β の関係⁴⁾

囲は、0.0005～0.01（図 7.2.3）と報告されていること。

iii) β の算定方針として、耐震性能照査を目的とする解析実務においては、下記の 3 つの算定方法のいずれかを採用していること。

- ① 地震応答に影響を与えなくなる臨界点に基づく方法（地盤相対変位の地中分布が変わらなくなる β の最小値）
- ② 自由地盤部の固有周期と減衰定数 β （1%を目安）に基づく方法
- ③ 等価線形解析結果との比較による方法（SHAKE と FLIP の自由地盤解析の比較）

以上のことから、当WGにおいて行った β の設定方法及び解析数値は適切であったことが判明した。

参考文献

- 1) Fukushima, Y. and Tanaka, T. :A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seismol. Soc. Am, Vol. 80, pp. 757-783, 1990.
- 2) 運輸省港湾局技術課，運輸省港湾技術研究所，運輸省第三港湾建設局：阪神・淡路大震災による港湾施設等被災状況調査報告書（第2集），pp. 115-116, 1995.
- 3) 運輸省港湾技術研究所，港湾技研資料 No. 813 Sep. 1995
- 4) FLIP 研究会：FLIP の各種パラメータの感度解析の概要と感度解析結果のまとめ，p. 51, 1998.