

ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分

運輸省港湾技術研究所 正会員 野津 厚
運輸省港湾技術研究所 正会員 井合 進
運輸省港湾技術研究所 正会員 一井康二
飛鳥建設(株)技術研究所 正会員 沼田淳紀

1. はじめに

レベル 2 地震動に対応した土構造物の耐震設計においては、構造物の変形を考慮することが重要である。従って、変形に寄与する地震動の振動数成分を把握しておくことが、耐震設計に用いる入力地震動を適切に与えるために必要である。前報¹⁾においては、ローパスフィルタ通過後の地震波を入力した有効応力解析により、ケーソン式岸壁の変形に寄与する振動数成分を抽出することを提案した。また、この方法をモデル岸壁(前面水深-14m, 設計震度 0.15)に適用して、対象とした岸壁については 1Hz 以下の比較的低い振動数成分が変形に寄与する割合が大きいことを明らかにした。しかしながら、変形に寄与する振動数成分が何によって決まるかについては十分な検討を行わなかったため、前面水深や設計震度の異なる他のケーソン式岸壁について同様のことが言えるかどうかについては、前報の結果だけからでは判断できなかった。前報で解析に用いた地震波 3 波のうち 2 波は内陸直下地震の震源近傍に特有のやや短周期パルス²⁾を含む地震波であって、このパルスが変形を支配したとする説明も一方では考えられた。この説明では、変形に寄与する振動数成分はパルスの特性によって決まり、岸壁-地盤系の固有振動数にはあまり左右されないはずである。しかしながら、変形に寄与する振動数成分が岸壁-地盤系の固有振動数によって決まるとの説明もあり得た。いずれがより実状に則した説明であるかについては前報の解析結果のみからでは判断できなかった。そこで、新たに解析を行って、変形に寄与する地震動の振動数成分と岸壁-地盤系の固有振動数との関係について調べた。また、固有振動数の他にも、岸壁の設計震度や過剰間隙水圧の有無など変形に寄与する振動数成分に影響すると考えられる要因が存在するので、それらの影響についても調べた。

2. 検討方法

ここで用いる解析手法は、前報と同様、地盤をマルチスプリングモデルで表現する FLIP³⁾である。解析対象は図-1 に示す 4 つの岸壁モデルとした。モデル A は前報で用いたものと同じモデルである。このモデルは、兵庫県

南部地震で被災した神戸港六甲アイランド南側岸壁(前面水深-14m, 設計震度 0.15)の被災の再現計算⁴⁾に用いられたモデルに下方粘性境界を設け、地震波を 2E 波として入力できるように変更したものである。このとき基盤の物性は $V_p=1600\text{m/s}$, $V_s=350\text{m/s}$, $\rho=1.7\text{t/m}^3$ とした。なお、モデル下端に不自然な変形が生じるのを防ぐ目的で、モデル下端一列の節点の基盤に対する相対変位は一様であるとした。解析に用いた材料定数を表-1 に示す。

モデル B はモデル A の高さと幅をそれぞれ 1/4.637 倍としたもので、前面水深-3.0m である。材料定数は、モデル A と同様、表-1 のものを使用した。表-1 に示す初期せん断剛性は基準有効拘束圧に対応するものであり、モデル各部の初期せん断剛性は実際には自重解析後にモデル各部の有効拘束圧の平方根に比例する形で与えられる。また、内部摩擦角やジョイント要素の摩擦係数などの無次元量はモデル A と B で共通とした。この結果、大小のモデル間には 1G 場の相似則⁵⁾が成立することになり、モデル B の線形時の固有振動数はモデル A の $4.637^{0.75}=3.16$ 倍となるはずである。実際、モデル A と B に D.C. ~ 50Hz でフラットなスペクトル特性を有するホワイトノイズを作用させて線形の条件で応答を計算すると、図-2 に示すようにモデル A と B の固有振動数はそれぞれ 1.5Hz と 4.5Hz であり、固有振動数は約 3 倍となっていることが確認される。モデル B を導入した目的は、岸壁-地盤系の固有振動数が変形に寄与する振動数成分に及ぼす影響を調べることである。なお、1G 場の相似則によりモデル B の設計震度は 0.15 である。

モデル A' と B' はそれぞれモデル A と B の幅を 2 倍として幅広のケーソンとしたものであり、設計震度は 0.25 である。これらのモデルは、変形に寄与する振動数成分に及ぼす設計震度の影響を調べる目的で導入した。

以上の 4 つのモデルでは、基礎地盤から背後地盤にかけて連続的なせん断変形を生じる被災モード⁴⁾を想定している。ケーソンが岩盤上に直接設置されているような場合には、ケーソン底面での滑動が卓越した被災モードになることが予想されるが、このような場合については本論文の検討対象とはしない。

検討ケースを表-2 に示す。モデル A および B については、背後地盤および基礎地盤で過剰間隙水圧の発生を許

Frequency components of seismic ground motion which contribute to deformation of caisson quay walls.

Atsushi NOZU/ Susumu IAI/ Koji ICHII/ Atsunori NUMATA

Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport/ Tobishima Corporation

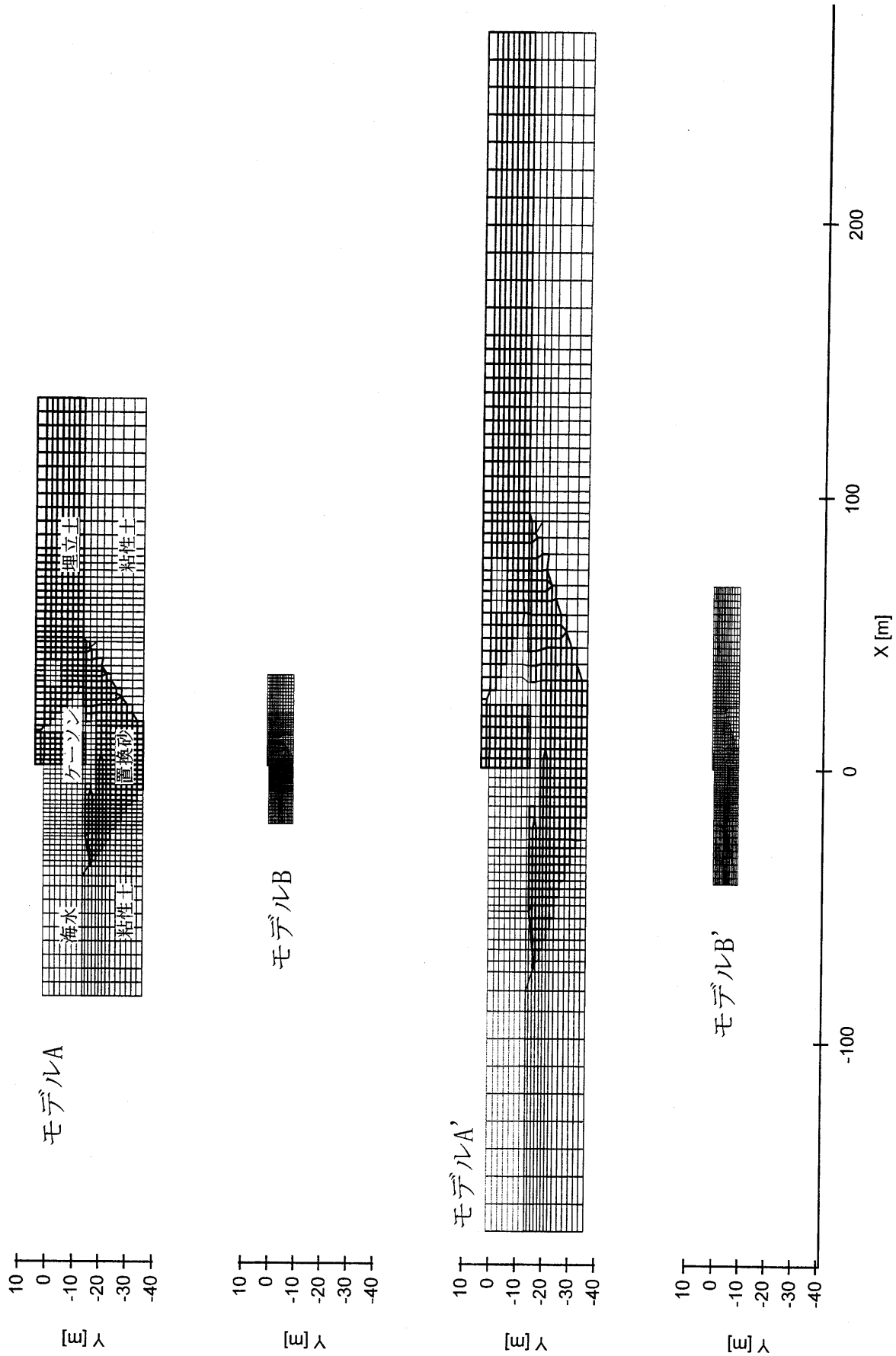


図-1 解析対象とした4つの岸壁モデル

表-1 解析に用いる材料定数

材料	密度	初期せん断剛性	基準有効拘束圧	内部摩擦角	ジョイント要素	tan φ
	(t/m**3)	(kPa)	(kPa)	(度)		
裏込石・捨石	2.0	180000	98	40	ケーソン底面	0.60
埋立土・置換砂*	1.8	58320	106	37	ケーソン背面	0.27
粘性土	1.7	74970	143	30		

*過剰間隙水圧ありの場合、変相角28度、W1=5.5、P1=0.6、P2=0.6、C1=2.3、S1=0.005.

*レーレー減衰定数βはモデルA、A'で0.002、モデルB、B'で0.00063.

表-2 検討ケース

解析モデル	前面水深	設計震度	過剰間隙水圧	入力波形	ローパスフィルタの遮断振動数(Hz)
モデルA	-14.0m	0.15	あり/なし	strike波, dip波, subduction波	0.1, 0.178, 0.316, 0.562, 1, 1.78, 3.16, ∞
モデルB	-3.0m	0.15	あり/なし	strike波, dip波, subduction波	0.1, 0.178, 0.316, 0.562, 1, 1.78, 3.16, ∞
モデルA'	-14.0m	0.25	なし	strike波, dip波, subduction波	0.1, 0.178, 0.316, 0.562, 1, 1.78, 3.16, ∞
モデルB'	-3.0m	0.25	なし	strike波, dip波, subduction波	0.1, 0.178, 0.316, 0.562, 1, 1.78, 3.16, ∞

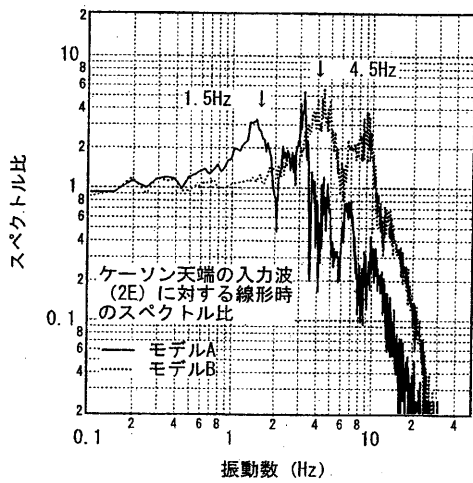


図-2 ケーソン天端の入力波に対する線形時のスペクトル比

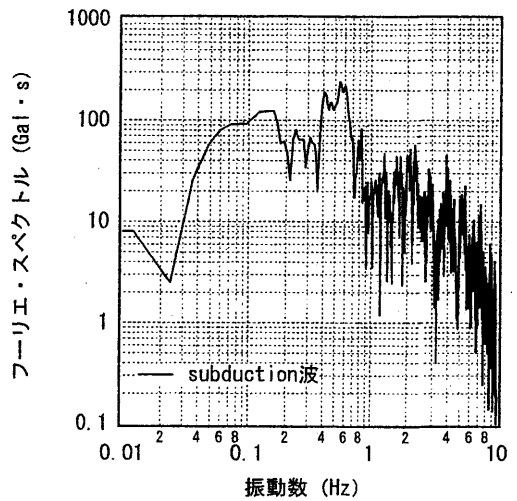
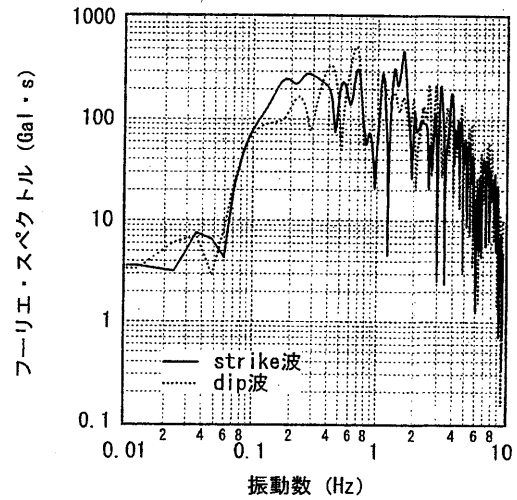


図-4 入力波のフーリエスペクトル
(上) strike波とdip波、(下) subduction波

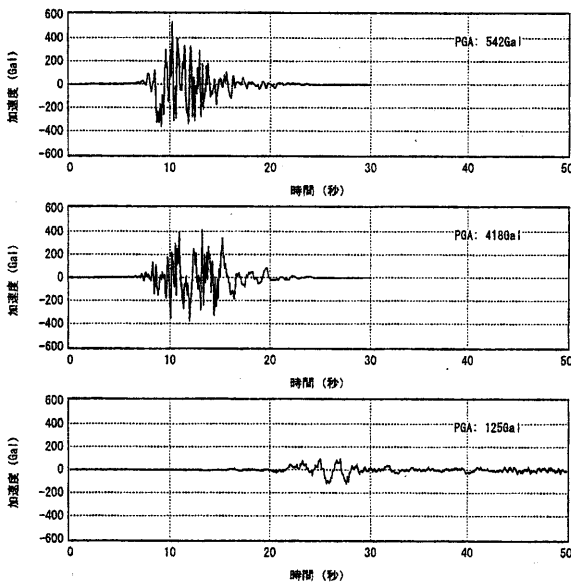


図-3 入力波
(上) strike波、(中) dip波、(下) subduction波

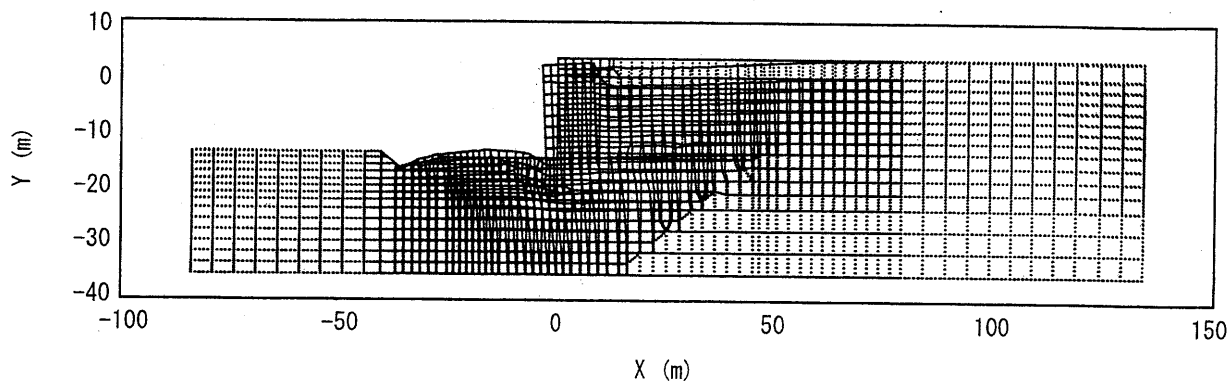


図-5 モデル A (過剰間隙水圧あり) に strike 波を入力したときの残留変位

す解析と許さない解析の二通りを実施し、変形に寄与する振動数成分に及ぼす過剰間隙水圧の影響を調べた。検討に用いた地震波は震源断層の破壊過程を考慮して試算された地震波⁶⁾であって、内陸活断層の震源近傍波である strike 波と dip 波、プレート境界地震による subduction 波の 3 波である。これら試算波は工学的基盤 ($V_p=1600\text{m/s}$, $V_s=350\text{m/s}$, $\rho=1.7\text{t/m}^3$) の解放面における地震波として与えられており、モデルで想定している基盤の物性と整合するものとなっている。これらの地震波の波形を図-3 に、フーリエスペクトルを図-4 に示す。それぞれの地震波について、原波形を入力した解析と、ローパスフィルタ通過後の波形を入力した解析を実施し、ケーソン式岸壁の残留変位を求める。このとき、ローパスフィルタの遮断振動数は表-2 に示す 7 通りとした。これらの遮断振動数は対数軸上で等間隔となるように選定した。図-5 はモデル A (過剰間隙水圧あり) に strike 波を入力したときの残留変位である。下方粘性境界を用いているので、モデル下端にもわずかながら残留変位が生じる。そこで岸壁の水平変位および鉛直変位はケーソン天端とモデル下端の相対変位として求める。回転角はケーソン上端と下端の水平変位の差から求める。

3. 水平変位, 鉛直変位, 回転角の関係

前報においては、ケーソン式岸壁の水平変位, 鉛直変位, 回転角のそれぞれについて検討を実施したが、本研究においては解析ケースが増えたので、水平変位, 鉛直変位, 回転角の 3 者について検討を行うと煩雑になる。そこで、以下の検討においてはケーソン式岸壁の変形を代表する指標として残留水平変位を対象とする。なお、鉛直変位および回転角と水平変位との間には比較的良好な相関がある。例えば図-6 はモデル A (過剰間隙水圧あり) に strike 波を作用させた場合の鉛直変位および回転角と水平変位との関係を検討した結果であるが、鉛直変位および回転角と水平変位との相関は十分に高い (相関係数は 0.996 と 0.993)。これは、水平変位, 鉛直変位, 回転

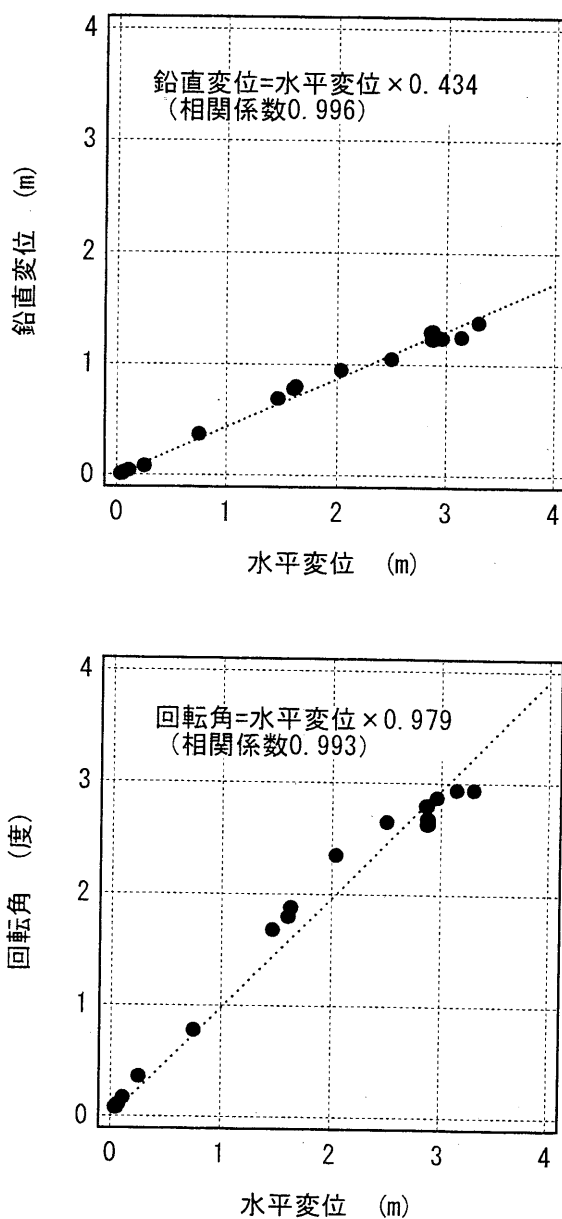


図-6 モデル A に strike 波を作用させた場合の鉛直変位および回転角と水平変位の関係

の 3 者が独立に発生するのではなく、地盤のせん断変形という一つのメカニズムによって同時に発生するためであると考えられる。

4. 岸壁-地盤系の固有振動数の影響

遮断振動数 f のローパスフィルタ通過後の波形を入力して得られるケーソン式岸壁の残留水平変位を D とする。一方、原波形入力時の残留水平変位を D_0 とする。 D を D_0 で除した値 D/D_0 を遮断振動数 f の関数として図-7 に示す。図-7(a)は strike 波、(b)は dip 波、(c)は subduction 波を入力した場合の解析結果に対応する。それぞれモデル A (過剰間隙水圧あり/なし)、モデル B (過剰間隙水圧あり/なし)の 4 とおりの解析を行っている。モデル A (線形時の固有振動数は 1.5Hz) の場合、過剰間隙水圧の有無に関わらず、1Hz 以下の比較的低い振動数成分が変形に寄与する割合が大きく、1Hz 以下の振動数成分のみを入力した解析でも、実変位 D の 90%以上の変位が計算される。一方、モデル B (線形時の固有振動数は 4.5Hz) の場合、変形に寄与する振動数成分は高周波側にシフトする傾向が見られる。モデル B の場合、1Hz 以下の振動数成分のみを入力した解析では、波形にもよるが、全変位 D の 60 ~ 80%程度の変位しか計算されない。このことから、変形に寄与する振動数成分は岸壁-地盤系の線形時の固有振動数と正の相関があることが認められる。ただし、線形時の固有振動数が約 3 倍となっても、変形に寄与する振動数成分が高周波側に 3 倍シフトするわけではない。変形に寄与する振動数成分の高周波側へのシフトは波形にもよるが 1 ~ 3 倍の範囲にある。3.16Hz 以下の振動数成分のみを入力した解析では、モデルや波形によらず、全変位 D の 90%以上の変位が計算される。

上述の結果において、変形に寄与する振動数成分は線形時の固有振動数より低周波側にあることが認められる。そこで、一つの試みとして、変形に寄与する振動数成分と非線形時の等価な固有振動数との関係を検討した。ここに、非線形時の等価な固有振動数とは、非線形計算を実施して得られるスペクトル比がピークを示す振動数であると定義することにして、非線形計算時のケーソン天端の水平加速度を出力して入力波 (2E) に対するスペクトル比を求めた。その一例として、dip 波を入力して過剰間隙水圧なしの条件で計算した場合のスペクトル比を図-8 に示す。図-8 に示すように、スペクトル比はモデル A、B とも 0.5Hz と 0.8Hz にピークが認められる。しかしながら、これらのピークがモデル A と B に共通していることから、これらのピークが非線形時の固有振動数に対応していると考えるのは不自然であると判断された。そこで、これらのピークを入力波 (dip 波) のフーリエスペクトルと比較してみると、スペクトル比のピークは入力波のスペクトルの谷に相当していることがわかる。一般に非線形地震応答計算では、入力波に全く含まれなかった振動数成分が応答波に現れることがある。この場合も、入

力波にほとんど含まれていなかった 0.5Hz と 0.8Hz の成分が応答波に現れ、その結果、スペクトル比にピークが現れたものと推察される。このように、非線形時の固有振動数をスペクトル比から求めることは困難である。この点についてさらに検討を行うには、非線形時の固有振動数とは何かという根本的な問題に立ち返る必要がある。本研究において、非線形時の固有振動数についてこれ以上の検討は行わないこととした。

5. 過剰間隙水圧の影響

次に、変形に寄与する振動数成分に及ぼす過剰間隙水圧の影響を検討する。背後地盤および基礎地盤で過剰間隙水圧が発生すると、地盤の剛性が小さくなるので、岸壁-地盤系の固有振動数は低周波側にシフトすると考えられる。このことを考えると、変形に寄与する振動数成分も過剰間隙水圧の影響を受けて低周波側にシフトすることが定性的には予想される。この点について定量的に検討するため、基礎地盤および背後地盤で過剰間隙水圧の発生を許す解析と許さない解析を実施し、変形に寄与する振動数成分をそれぞれ求めた。その結果を図-7 に示す。図-7 によると、モデル A に dip 波を入力する場合、過剰間隙水圧が発生することにより変形に寄与する振動数成分が低周波側に 0.2Hz 程度シフトすることが認められる。しかしながら、モデル A に他の波形を入力する場合、あるいは、モデル B を対象とする場合には、変形に寄与する振動数成分に及ぼす過剰間隙水圧の影響は小さい。全体として、変形に寄与する振動数成分に及ぼす過剰間隙水圧の影響は認められるが、4. で検討した固有振動数の影響ほど顕著ではない。

6. 設計震度の影響

さらに、変形に寄与する振動数成分に及ぼす設計震度の影響を検討する。震度法による耐震設計の考え方によれば、岸壁に作用する加速度と重力加速度の比が震度であり、この値が設計震度を上回ってはじめて岸壁に変形が生じる。この考え方によれば、岸壁の設計震度が高いほど、岸壁に変形を生じるために大きな加速度を必要とする。一般に地震動の最大加速度は高周波成分と関連しているため、設計震度の大きな岸壁では、変形を生じるために高い振動数成分が必要であることも予想された。この点について具体的に検討するため、設計震度 0.15 の岸壁 A および B と、設計震度 0.25 の岸壁 A' および B' について解析を実施し、変形に寄与する振動数成分をそれぞれ求めた。その結果を図-9 に示す。図-9 によると、strike 波入力の場合に、設計震度 0.25 のモデル A' ではモデル A よりも変形に寄与する振動数成分が高周波側に若干シフトすることが認められる。しかしながら、全般的には、変形に寄与する振動数成分に及ぼす設計震度の影響はあまり顕著でない。

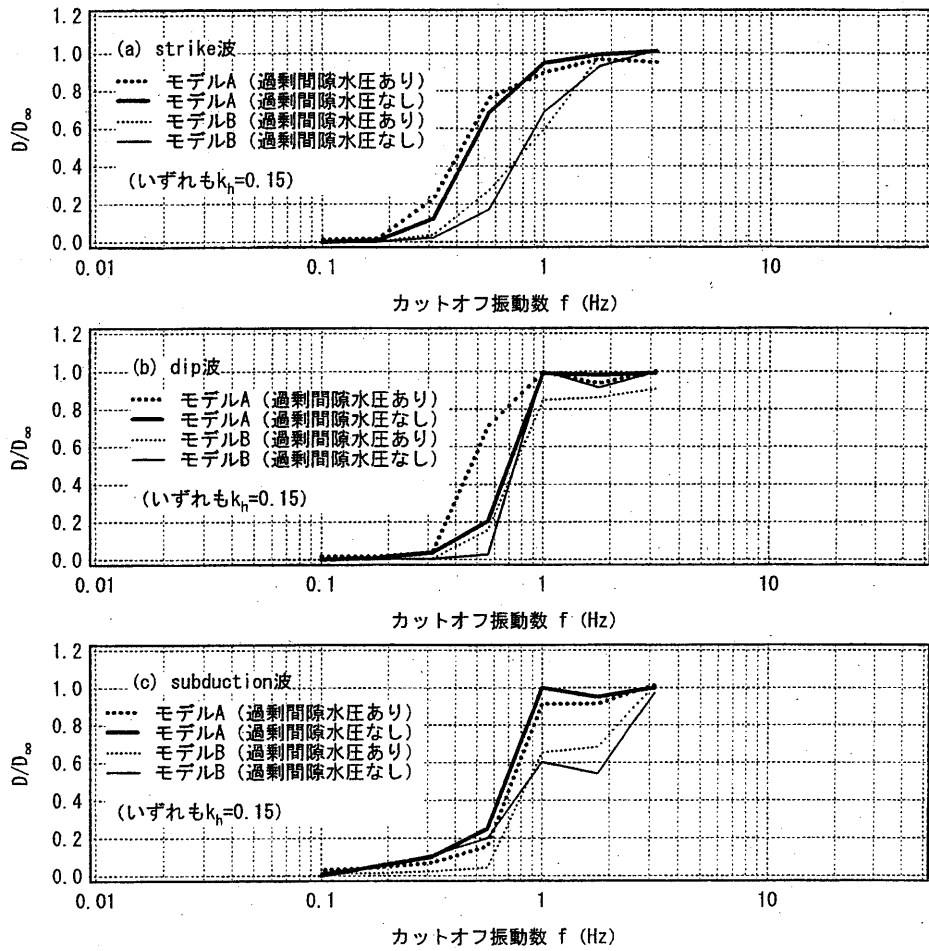


図-7 変形に寄与する振動数成分に及ぼす固有振動数
および過剰間隙水圧の影響

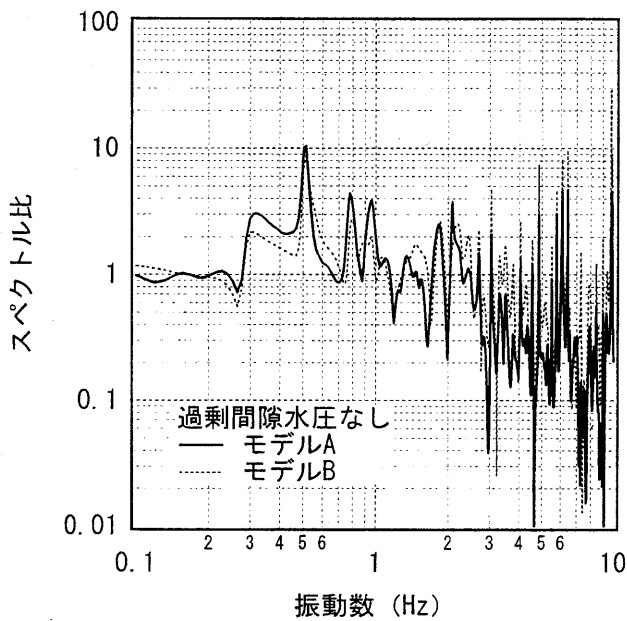


図-8 モデル A, B (過剰間隙水圧なし) に dip 波を
入力したときのスペクトル比

7. 考察

強震動予測においては、予測すべき地震動の振動数成分に応じて適用される手法が異なってくる。従って、変形照査用の入力地震動を強震動予測によって設定する場合、予測すべき地震動の振動数成分を明らかにしておくことは重要である。前報¹⁾においては、大型岸壁（前面水深-14m）を対象として検討を行い、対象とした岸壁については 1Hz 以下の比較的低い振動数成分が変形に寄与する割合が大きく、変形照査においては 1Hz 以下の振動数成分を精度良く予測して入力することが重要であることを述べた。一方、本研究においては、より小型の岸壁では変形に寄与する振動数成分が高周波側にシフトすることが認められた。従って、より小型の岸壁を対象として変形照査を行う場合には、より高い振動数成分の予測が必要となる。しかしながら、実在する岸壁の規模には下限があるので、変形に寄与する地震動の振動数成分には上限が存在する。

図-10 はモデル A (過剰間隙水圧あり/なし)、モデル B (過剰間隙水圧あり/なし) の 4 通りのモデルについて、

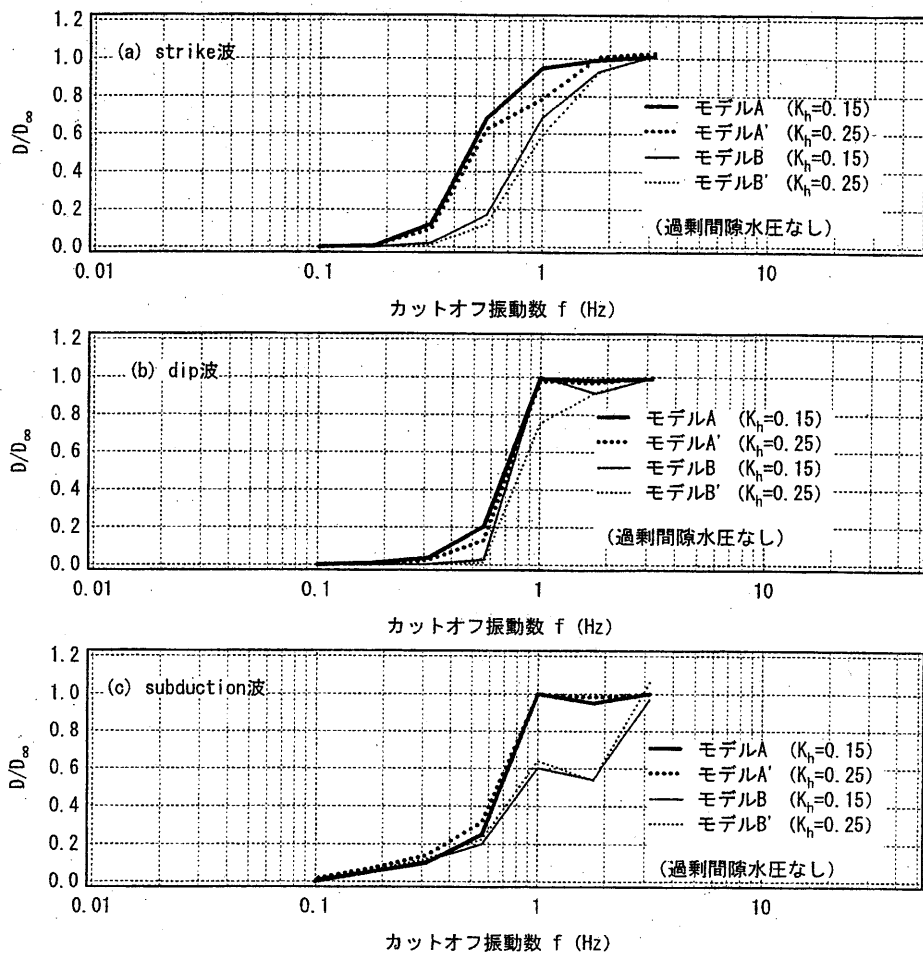


図-9 変形に寄与する振動数成分に及ぼす設計震度の影響

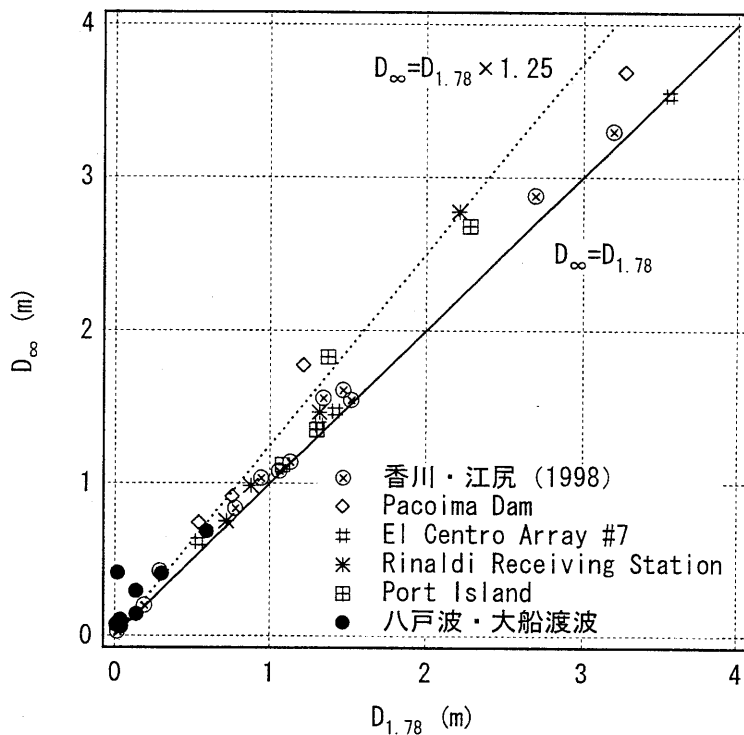


図-10 原波形入力時の変位 D_{∞} と 1.78Hz 以下の振動数成分のみ入力時の変位 $D_{1.78}$ の関係
 モデルはモデル A (過剰間隙水圧あり/なし), B (過剰間隙水圧あり/なし).

表-3 解析に用いた強震記録

年月日	地震名	観測点	成分	最大加速度 (Gal)	データ長 (秒)
1968/5/16	十勝沖	八戸港*	S	210	20.0
1971/2/9	San Fernando	Pacoima Dam	Fault Normal	1150	40.0
1978/6/12	宮城県沖	大船渡	E41S	275	20.0
1979/10/15	Imperial Valley	El Centro Array #7	Fault Normal	449	36.0
1994/1/17	Northridge	Rinaldi Receiving Station	Fault Normal	857	14.0
1995/1/17	兵庫県南部	ポートアイランド*	NS	817	20.0

*は工学的基盤の2E波

1.78Hz 以下の振動数成分を入力して得られる水平変位 $D_{1.78}$ と原波形を入力して得られる水平変位 D との関係を示したものである。モデル A と B の規模はほぼ実在岸壁の規模の上限と下限に相当するものと考えられる。ここでは香川・江尻⁶⁾による試算波を入力した計算結果に加え、表-3 に示す強震記録を入力した計算結果を同時に示している。表-3 に示す強震記録は、内陸直下型地震の震源近傍における記録や、プレート境界地震による震源からやや離れた位置の記録を選択したものである。図-10 によると、 D はほぼ $D_{1.78} < D < 1.25D_{1.78}$ の範囲にある。そこで、1.78Hz 以下の振動数成分を与えて変形照査を行えば、得られた変位 $D_{1.78}$ に 1.25 を乗じることで、実変位 D について安全側の評価が可能である。例外的に $1.25D_{1.78} < D$ となる事例は存在するが、このような例外は変位の絶対値の小さな領域で発生しているため、予測誤差 $D - 1.25D_{1.78}$ の絶対値はこの場合にも大きくはない。また、平均的な関係として $D = 1.12D_{1.78}$ (相関係数 0.984) を用いることもできる。

以上のことを踏まえると、ケーソン式岸壁の変形照査のための強震動予測のあり方について、次のようなことが考察される。まず、0 ~ 1Hz の振動数成分は岸壁の変形照査を実施する上で最も精度が要求される振動数成分である。香川・江尻⁶⁾の試算波に対し、1Hz 以下の振動数成分のみを入力した計算でも、大型岸壁(前面水深-14m)で全変位の 90%以上、小型岸壁(前面水深-3m)で全変位の 60 ~ 80%が計算される。従って 0 ~ 1Hz の振動数成分を可能な限り精度の高い手法で予測する必要がある。震源と地下構造の条件が与えられた場合には、0 ~ 1Hz の帯域で最も精度のよい強震動予測手法は(経験的 Green 関数法を除けば)理論的な手法である。現在関係機関により実施されている地下構造調査⁷⁾などにより 0 ~ 1Hz の振動数成分を理論的手法で予測するのに十分なデータが蓄積された場合には、これを利用して理論的な強震動予測を行うことは一考に値する。次に 1 ~ 2Hz の振動数成分については、比較的小規模な岸壁の場合にはこの範囲の振動数成分を与えることが変形照査において必要である。現状では理論的な強震動予測手法の適用可能な振動数成分の上限は神戸地域のように比較的地下構造が良く調べられている場所でも 1Hz 程度であるから⁸⁾など、統計的 Green 関数法⁹⁾等で 1 ~ 2Hz の振動数成分を補う必要があると考えられる。2Hz よりも高い振動数成分については、ケーソン式岸壁の変形への寄与は大きくない。仮

にこの範囲の振動数成分を全く入力しなくても、2Hz 以下の振動数成分のみを入力した変形照査の結果を補正すれば実変位 D を推定できる。

8. まとめ

ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分を検討するため、ローパスフィルタ通過後の波形を入力した有効応力解析を実施した結果、岸壁-地盤系の固有振動数と変形に寄与する振動数成分には正の相関があること、2Hz 以下の振動数成分のみを入力した変形照査の結果から岸壁の実変位を推定できること等がわかった。

参考文献

- 1) 野津厚, 井合進, 一井康二: 岸壁の変形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, 1998年, pp.73-80.
- 2) 川瀬博: 震源域の強震動特性と構造物破壊能, 第一回地震調査研究と地震防災工学の連携ワークショップ予稿集, 2000年, pp.23-32.
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, 1992, pp.1-15.
- 4) 一井康二, 井合進, 森田年一: 兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析, 港湾技術研究所報告, 第36巻, 第2号, 1997年, pp.41-86.
- 5) Iai, S.: Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.1, 1989, pp.105-118.
- 6) 香川敬生, 江尻讓嗣: 震源断層の破壊過程を考慮した震源近傍地震動の試算, 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, 1998年, pp.1-6.
- 7) 科学技術庁: 第1回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集, 2000年.
- 8) 松島信一, 川瀬博: 1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文報告集(投稿中).
- 9) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケールング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, 1991年, pp.1-9.