

根入れ鋼板セル護岸の動的応答特性

DYNAMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF EMBEDDED STEEL PLATE CELLULAR BULKHEADS

河野健二*、古川浩平**、飯田 毅***、野田節男****

By Kenji KAWANO, Kohei FURUKAWA, Takeshi IIDA and Setsuo NODA

The embedded steel plate cellular bulkhead has been developed as a new type of sea wall which is applicable even for weak sea beds and deep water sites. In order to evaluate the dynamic characteristics of this structure and the structure-soil interaction, the dynamic response analysis is carried out with the formulation of two-dimensional finite element method. Major results are as follows;

1) While the results from the earthquake response analysis give an approximately good agreement with the results from the earthquake observation data of actual structures, more investigation is necessary for the situations of the modal coupling effects between the cell-soil system and input earthquake motions.

2) In order to evaluate the cell-soil system with the simplified spring-mass model, it is important to clarify the dominating vibration modes of the system.

1. まえがき

近年、海岸の埋立や人工島などの建設事例が増加しつつある。その際の護岸等の構築法の1つとして根入れ鋼板セル工法があげられる。根入れ鋼板セル護岸の応答特性については静的水平載荷模型実験¹⁾や振動実験²⁾³⁾を通して明らかにされつつあり、支持地盤をバネに置換した設計法が提案されている⁴⁾。しかしながら、当該構造物の地震時の動的応答特性の全てが明らかになった訳ではなく、これをより明確にしておくことは、合理的な耐震設計を行う上で重要である。

本研究では根入れ鋼板セル護岸が一般に海岸線等に沿った長大な構造物であることから、地盤を平面ひずみ問題として扱い、また、鋼板セルを対称な円筒シェルの曲げ理論から得られた弾性床土上の梁としてモデル化し、動的応答解析を行った。すなわち、全体系を2次元の有限要素法で離散化し、地盤の側方を粘性境界⁵⁾⁶⁾⁷⁾で有限化して、基盤からの入力に対する応答解析を行った。さらに、中詰土剛性の変化が根入れ鋼板セル-地盤系の動的応答特性に与える影響について調べるとともに、地震観測から得られた結果⁸⁾⁹⁾と解析結果を比較することにより、本解析モデルの適用性について検討した。

* 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木開発工学科 (〒890 鹿児島市郡元1-21-40)

** 工博 山口大学教授 工学部土木工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

*** 工博 住友金属工業(株)建設技術部土木技術研究室室長 (〒314-02 茨城県鹿島郡波崎町砂山16)

**** 工博 運輸省港湾技術研究所構造部地盤震動研究室室長 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

2. 定式化

根入れ鋼板セルにおいては、構造物自身の振動特性は周辺地盤と異なると考えられる。このため根入れ鋼板セルの振動特性を明らかにし、地震動入力に対する応答評価を行うには、周辺地盤を含めた全体系の解析を行い検討する必要があると考えられる。根入れ鋼板セルは一般に海岸線等に沿った長大な構造物として利用されるため、本解析では地盤を含む鋼板セルを平面ひずみ問題として扱い、地盤を2次元の有限要素法によって離散化し、地盤の側方を粘性境界^{5) 6) 7)}によって表わすことにする。

(1) 根入れ鋼板セルのモデル化

本解析で扱う根入れ鋼板セルは、Fig. 1に示すような薄肉円筒セルで内部には砂が中詰されている。このため、根入れ鋼板セルは中詰土による円周応力と周辺地盤からの反力により曲げ応力を受けるものと考えられる。円筒セルの周辺地盤からの反力は必ずしも対称ではなく、曲げに関しては対称変形の仮定は問題であるが、平面ひずみ解析に対応した円筒セルの簡単な扱い方の一つの試みとして、本解析では円筒セルの基礎方程式の適用を行う。ここで用いたモデル化の妥当性に関しては3. で実測データを用いて比較・検討する。

内径が a 、肉厚が h 、ヤング率が E 、ポアソン比が ν の対称な円筒シェルが内径方向に荷重 q （単位長さ当り）を受けるとき、水平方向の変形 u は

$$D \frac{d^4 u}{dy^4} + \frac{Eh}{a^2} u = q \quad \text{ただし} \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

と表わされる。この式は曲げ剛性が D の連続な梁がバネ定数 $k_1 = Eh/a^2$ の弾性床上にあり、分布荷重 q を受ける場合に相当する。そこで式(1)を有限要素法で表わすため、せん断変位と回転変位からなる節点変位ベクトル $\{U_e\}$ を用いると

$$\{u\} = [N] \{U_e\} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ただし

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \\ (\xi - 2\xi^2 + \xi^3)l \\ 3\xi^2 - 2\xi^3 \\ (-\xi^2 + \xi^3)l \end{bmatrix} \quad \xi = \frac{x}{l}$$

となる。ここで $[N]$ は梁の変形を表わす形状関数であり、 l は梁の要素長、 x は要素端からの距離である。この場合、式(1)の第1項は曲げを受ける梁の場合であり、式(2)の形状関数 $[N]$ を用いて、その剛性マトリックス $[K_b]$ は容易に求めることができる。

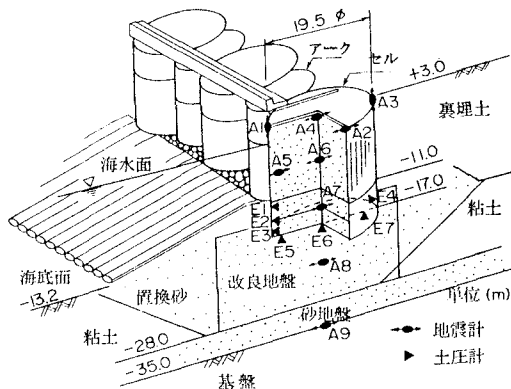


Fig. 1 根入れ鋼板セルの模式図と地震観測計測状況

一方、式(1)の第2項は仮想仕事の原理を用いて等価節点力 $\{P_{eq}\}$ で表わされる。すなわち、

$$\begin{aligned} & \{\delta U_e\}^T \left(\int_{\Omega} [N]^T k_l [N] dy \{U_e\} - \{P_{eq}\} \right) \\ & = \{\delta U\}^T ([K_s] \{U_e\} - \{P_{eq}\}) = 0 \quad \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ただし、

$$[K_s] = \frac{k_l \ell}{420} \begin{bmatrix} 156 & & & & & \\ 22\ell & 3\ell^2 & & & & \\ 54 & 13\ell & 156 & & & \\ -13\ell & -3\ell^2 & -22\ell & 4\ell^2 & & \\ & & & & \text{SYM.} & \\ & & & & & \end{bmatrix}$$

したがって、鋼板セルが地盤から受ける反力の等価節点力を $\{P_{qe}\}$ とすると式(1)は

$$\{P_{qe}\} = ([K_b] + [K_s]) \{U_e\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで $[K_b]$ は鋼板セルの節点に対応した地盤の剛性マトリックスである。このようにセルの円周応力の効果が内径方向の変形として表わされた梁のモデル化により鋼板セルは弾性地盤上の梁として表わされる。地盤を二次元でモデル化する場合、鋼板セルの断面は同一平面上の二方向から地盤反力と分布荷重を受けることになる。このため本解析ではFig. 2に示すように同じバネを有する2本の梁として表わしている。また、鋼板セルの特性が式(1)で表わされる場合、梁の特性を有するため、質量マトリックスが容易に求められる。ここでは、解析を簡単にするため集中質量マトリックスを用いることにする。以上の数式にて動的特性が表わされる鋼板セルが地盤に根入れされる場合、地盤を離散化して得られる対応節点で平衡条件を満たすように運動方程式を求めることができる。

(2) 根入れ鋼板セルー地盤系の運動方程式

根入れ鋼板セルを弾性地盤上の梁で表わし、周辺地盤を平面ひずみ問題として有限要素法により離散化する。地盤条件および解析モデルはFig. 2に示すとおりである。図中に示されていない部分の γ は $\gamma = 1.8 \text{ tf/m}^3$ である。Fig. 2のように、鋼板セルを含む地盤系を二次元領域で表わすと、剛性マトリックスや質量マトリックスが容易に得られる。側方境界は自由とし、下方境界は完全固定としている。また、地盤の離散化にともなう側方境界として粘性境界を用いると、減衰マトリックスは境界における各節点変位の速度に比例した形で表わされる。粘性境界の設定における係数は、せん断応力および垂直応力とも1.0を用いている。境界以外の要素内では5%の内部減衰を考慮して減衰マトリックスを求めている。したがって、鋼板セルー地盤系の運動方程式は

$$\begin{bmatrix} Z_{ss} & Z_{sb} \\ Z_{bs} & Z_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_s \\ U_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_b \end{Bmatrix} \quad \dots \dots \dots (5)$$

と表わされる。ここで添字 b は地震入力を受ける基盤面の節点に対応したものであり、添字 s は鋼板セルや側方境界を含む地盤の節点に対応したものである。この式は全体系の変位に相当する形で表わされており、例えば、添字 s, b に対応する係数マトリックス $[Z_{sb}]$ は振動数 ω の入力を受けるとき、

$$[Z_{sb}] = -\omega^2 [M_{sb}] + i\omega [C_{sb}] + [K_{sb}] \quad \dots \dots \dots (6)$$

となる。ここで $[M_{sb}]$, $[C_{sb}]$, $[K_{sb}]$ はそれぞれの質量マトリックス、減衰マトリックス、および剛性マトリックスである。基盤上での変位 $\{U_b\}$ に対して自由節点の変位 $\{U_s\}$ は準静的変位 $\{u_s^b\}$ と動的変位 $\{u_s\}$ の和として表わされる。また、静的な平衡条件より

$$[K_{ss}]\{u_s^b\} + [K_{sb}]\{U_b\} = \{0\}$$

すなわち

$$\{u_s^b\} = -[K_{ss}]^{-1} [K_{sb}]\{U_b\} \quad \dots \dots \dots (7)$$

が得られる。地震動入力を本解析では入力上の基盤として扱っている下方境界からのみと考えると、式(5)

において $\{F_s\}=\{0\}$ となるので式(7)の平衡条件を用いると、運動方程式は

$$[M_{ss}]\{\ddot{u}_s\} + [C_{ss}]\{\dot{u}_s\} + [K_{ss}]\{u_s\} = \{P_s\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし

$$\{P_s\} = -[M_{ss}][K_{ss}]^{-1}[K_{sb}]\{\ddot{U}_b\}$$

と表わされる。ここで $\{u_s\}$ は相対変位を表わしている。また、基盤の変位による上層地盤への影響も考えられるが、本解析では同位相入力のみを扱っており、その影響は十分小さいと考えられるので、加速度入力のみを扱っている。したがって、基盤での地震動 $\{U_b\}$ が与えられると鋼板セルの応答は式(8)に線形加速度法等を適用した時間領域での地震応答解析から求めることができる。

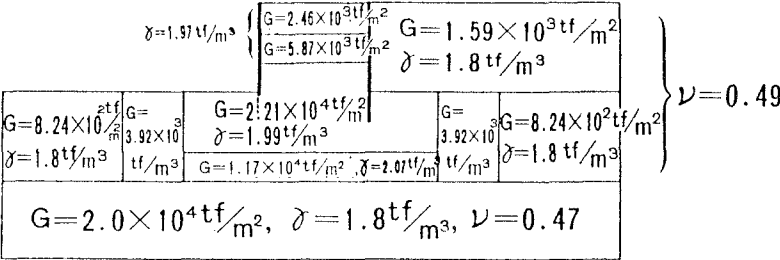
一方、基盤面上の変位入力の大きさが与えられると、式(5)から直接応答を求めることができる。式(8)に関して、非減衰時の固有振動数 ω およびモーダルマトリックス $[\Phi]$ を用いると、

$$\{U_s\} = -[\Phi](\omega_j^2 - \omega^2)^{-1} + i\omega[\tilde{C}])^{-1}[Z_{sb}]\{U_b\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

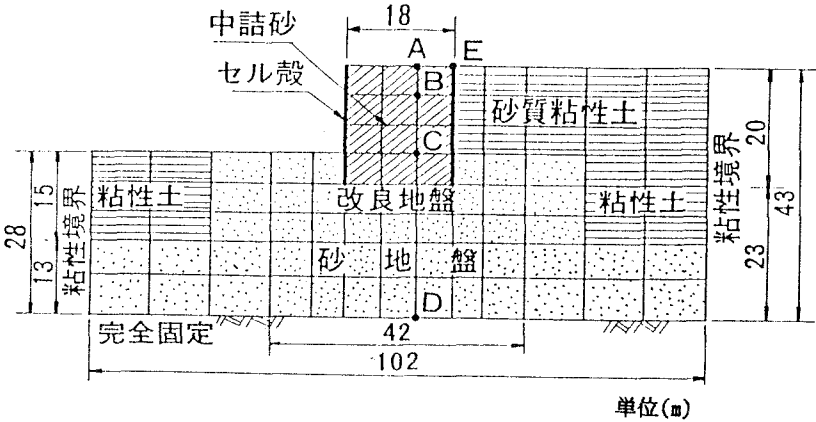
ただし

$$[\tilde{C}] = [\Phi]^T [C_{ss}] [\Phi]$$

と表わされる。このように振動数領域での応答解析は固有値解析を適用することによって、 $[Z_{ss}]^{-1}$ の計算を容易に行うことができる。



(a) 材料定数



(b) 要素分割状況

Fig. 2 解析モデル

3. 動的応答解析

(1) 根入れ鋼板セルの動的応答特性

ここではFig. 1に示す内径19.5 m (換算壁体幅⁴⁾約18 m)、板厚12mmの実在鋼板セル (和歌山地区)⁸⁾⁹⁾を対象にFig. 2に示すような根入れ鋼板セルー地盤系のモデルを用いて動的応答解析を行う。Fig. 2において、鋼板セルの基礎地盤は地盤改良されており比較的堅固であるが、基礎地盤から離れた周辺地盤は軟弱な粘性土地盤である。なお、本解析では鋼板セル側方の海水、波浪等の影響は考慮せず、鋼板セルー地盤系のみを取扱っている。Fig. 2について固有値解析で得られる鋼板セルー地盤系の固有振動数並びに固有振動モードをTable 1, Fig. 3に示す。固有値解析での境界条件は下端完全固定、側方自由であり粘性境界は考慮していない。Fig. 3より、1次振動モードでは全体系の水平振動が卓越し、応答を支配する5次モードまでは、鋼板セルの振動形は比較的単純な形であること、2次モード以上では鋼板セルに与える裏埋土の影響が大きいことなどが分かる。

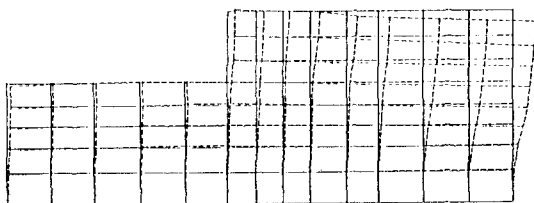
Fig. 4は基盤に正弦波を入力した場合において、点Dに対する根入れ鋼板セル各部の水平加速度の応答倍率を示したものである。鋼板セルは参考文献1)~3)も勘案すると、中詰土によって円周方向の力を受け、比較的剛体基礎に類似した応答を示すものと考えられる。Table 1, Fig. 3より全体系での1次振動数は1.03 Hz、4次振動数は2.28Hzであり、1次では全体系の水平振動が、4次ではセル、裏埋土の振動が大きくなる傾向を示している。したがって、Fig. 4において約1 Hzで生じるピークは鋼板セルを含む全体系の水平振動による応答である。また2.3Hzで生じるピークはFig. 3を考慮すると中詰土を含む鋼板セル自身と裏埋土の振動によるもので、鋼板セルはその底部を支持された片持ち梁の1次の振動モードに対応している。この点に関しては、Fig. 5に示す実在構造物の地震観測 (Fig. 1)より得られた改良地盤A8に対するセル天端部A4の伝達関数においても約2 Hzに際だったピークがあり、セルの1次のロッキング振動モードと結論付けられていることから⁸⁾⁹⁾、応答解析の結果は観測値と比較的よく対応しているといえる。なお、Fig. 4でみられる約1.3HzでのピークはFig. 5の地震観測結果ではみられないが原因については明確でない。

Fig. 4に示すように本解析モデルでは鋼板セルおよび中詰土の各点における応答は全体に類似しており、中詰土と鋼板セルは同様な振動特性を示す。なお、Fig. 1, 2に示すように鋼板セル近傍基礎地盤が比較的堅固であるのに比し、その周辺は粘性土地盤につき鋼板セルー基礎地盤を一体の堅固な土構造物とみなせるため、粘性土地盤とのおりなす振動系にもとづく影響も無視できないと考えられる。

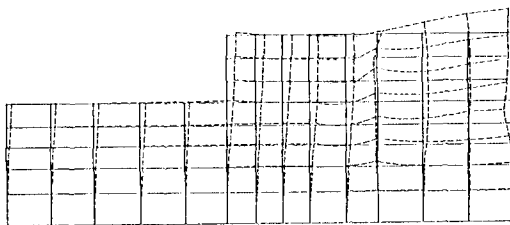
Fig. 6は中詰土の剛性が鋼板セルの応答に及ぼす影響を調べるため、中詰土のせん断弾性定数を α 倍 ($\alpha = 0.1 \sim 2$)した場合の固有振動数の変化を示したものである。Fig. 6より中詰土のせん断弾性定数が変化しても固有振動数に及ぼす影響は全般に小さい。同様に中詰土の剛性変化が鋼板セルの応答に及ぼす影響を調べるため、基盤入力に対する中詰土天端点Aの水平動の絶対加速度応答倍率を示したのがFig. 7である。Fig. 7より応答倍率がピークを示す振動数は中詰土のせん断弾性定数が小さくなるにつれ若干低振動数側へ移動し、また応答倍率も低くなっており、中詰土の剛性によって若干の相違が見られる。したがって、鋼板セルー地盤系をバネーダッシュポット系で表わすとき、中詰土の質量評価が問題になる。すなわち、鋼板セルを中詰土全質量を考慮した剛体とみなした場合の慣性力に比べ中詰土の振動特性を考慮した場合のそれは小さくなると考えられ、これを裏付ける中詰土の有効質量係数が実験的にも得られている²⁾³⁾。解析的にも中詰土の剛性が低下するにつれ、加速度応答倍率が減少し、中詰土による慣性力の低減が見られる。このため、有効質量は鋼板セルを剛体と見なした場合の応答との相違から評価しうることがわかる。

(2) 根入れ鋼板セルの地震応答解析

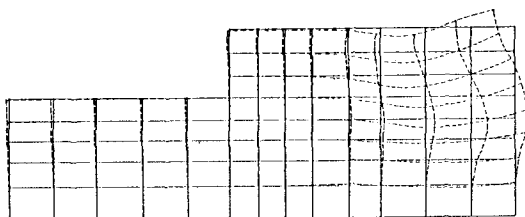
本解析モデルで対象としたFig. 1に示す実在構造物 (和歌山地区)について、観測された代表的な2つの地震を用いて応答解析を行い、根入れ鋼板セルの動的応答特性を調べるとともに、観測値との比較により本



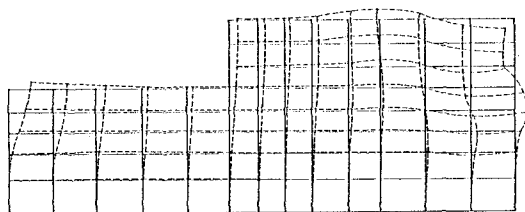
(a) 1次モード (1.03Hz)



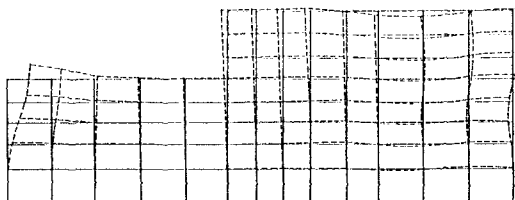
(b) 2次モード (1.87Hz)



(c) 3次モード (1.96Hz)



(d) 4次モード (2.28Hz)



(e) 5次モード (2.59Hz)

Fig. 3 1次から5次の振動モード図

Table 1 固有振動数

固有振動数	1次	2次	3次	4次	5次
ω (rad/s)	8.47	10.52	12.34	14.33	16.28
f (Hz)	1.03	1.67	1.96	2.28	2.59

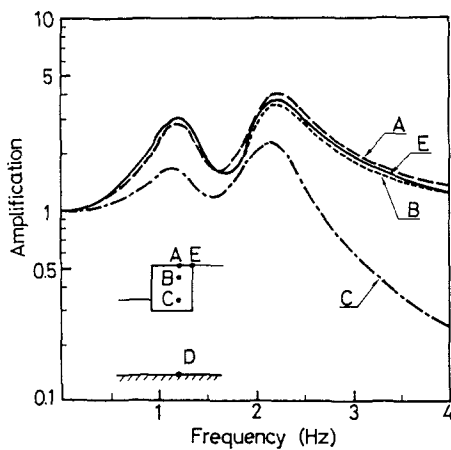


Fig. 4 鋼板セルの応答特性

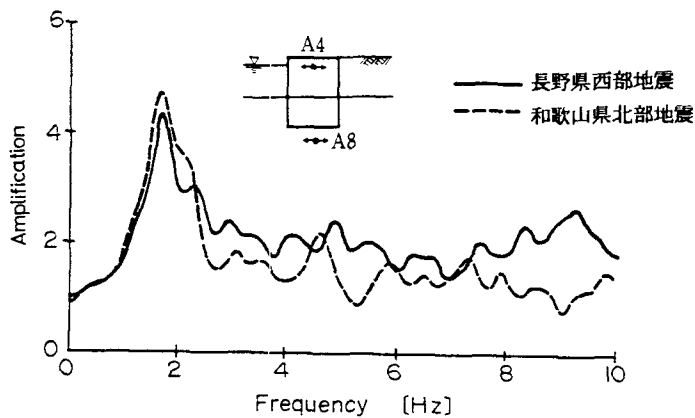


Fig. 5 地震観測から得られた天端の伝達関数(A4/A8)

解析モデルの妥当性を以下に検討する。Fig. 8は長野県西部(1984.9.14) および和歌山県北部(1985.1.6)で発生した地震に対して対象とした実在建造物の基盤で観測された地震加速度のフーリエスペクトルである。Fig. 8より、長野県西部地震は震央距離が284km と遠距離型であるため、低振動数の0.6 ～0.7Hz 成分が、また、和歌山県北部地震は震央距離が41kmと近いため、比較的高い振動数の2.5Hz 成分が卓越している⁹⁾。これらの振動数成分はTable 1 よりわかるように鋼板セルー地盤系の1次、4次および5次の固有振動数にほぼ相当している。

次に、これらの地震波を基盤に入力し根入れ鋼板セル護岸の地震応答解析を行う。応答解析には式(8) あ

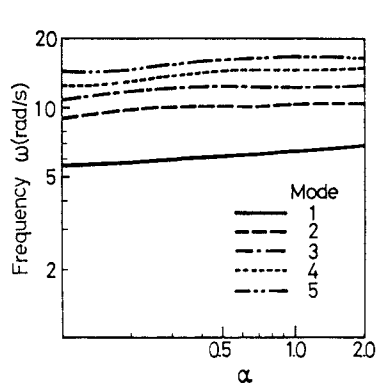


Fig. 6 中詰土のせん断剛性を α 倍した場合の固有振動数の変化

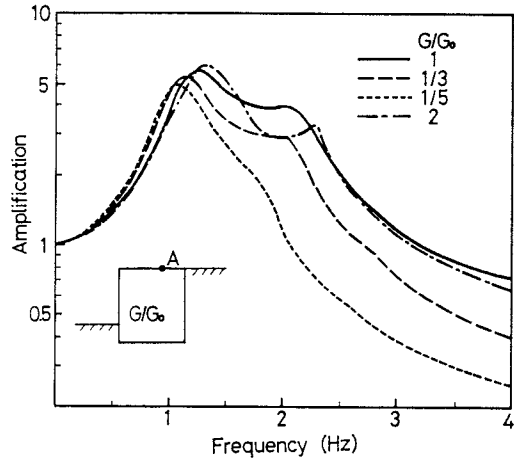


Fig. 7 中詰土の剛性変化に対する応答倍率(A/D)

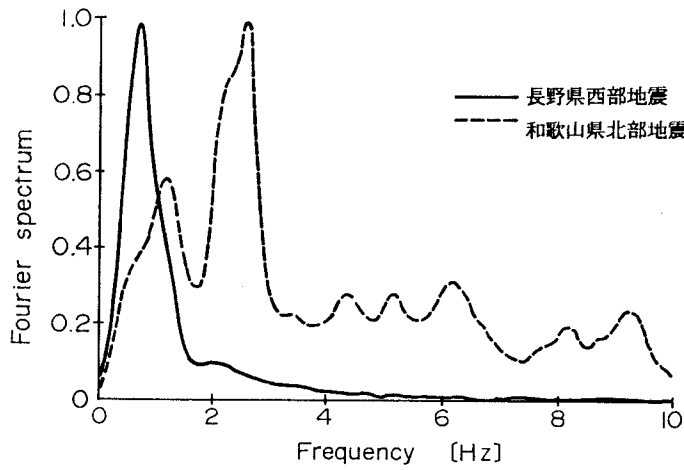


Fig. 8 入力地震動のフーリエスペクトル

るいは式(8)を用いることができるが、本解析では式(8)に対し線形加速度法を適用する。長野県西部地震に対する中詰土の応答結果をFig. 9に示す。Fig. 9に破線と点線で示す解析結果は基盤に地震波を入力し式(8)によって得られた中詰土2箇所の加速度応答から減衰定数5%の応答スペクトルを、また、実線と1点鎖線で示す観測結果では観測された地震波から直接応答スペクトルを求めたものである。Fig. 8からわかるように、この場合の入力波は周期約1.3秒(0.7Hz)の成分が卓越しており、応答スペクトルでも同様の傾向を示している。入力波の卓越振動数はFig. 4およびFig. 5に示したように鋼板セル基礎系の動的特性の卓越振動数と離れていることが分かる。したがってこの振動系の応答は1次振動の影響が最も大きく表われているものと考えられる。解析モデルから求めた応答スペクトル値は、観測値とよく一致しており本解析モデルにより、鋼板セルの動的応答特性を把握しうるものと考えられる。また、同図中に同じ地震波の入力に対し中詰土中の点Bの応答に対する応答スペクトルを示す。中詰土の応答は観測値から得られた応答と全体的に良く似た結果を与えていることがわかる。

和歌山県北部地震を基盤入力した場合の応答スペクトルをFig. 10に示す。実線、1点鎖線は観測された地震波から直接に減衰定数5%に対する加速度応答スペクトルを求めたものであり、破線および点線は応答解析から得られた鋼板セル部の加速度応答を用いて同様に応答スペクトルを求めたものである。Fig. 8よりこの場合の入力地震波は2.8Hz、2.1Hzおよび1.2Hzの振動数成分が卓越しており、特に約2.8Hz成分が最も卓越している。一方、Table 1より鋼板セルー地盤系の固有振動数において、和歌山県北部地震の卓越振動数に対応するのは4次および5次の振動である。応答解析による結果は入力地震動の卓越周期で観測値より大きな値を与え、卓越周期以外に対しては観測値より全体的に小さな値を与える。また、中詰土内の応答結果も同様の傾向を示しており、鋼板セルの卓越振動数に近い成分をもつ地震波に対しては、観測値と解析値で相違が見られる。この理由としては以下のことが挙げられる。地震応答解析の結果は入力地震波の卓越振動数に相当する約2Hzで観測値よりも大きな値を示している。これは式(8)の運動方程式を非減衰時の固有値解析から得られるモーダルマトリックスで各次モードに分解して解析を行っていることによるものと考えられる。すなわち、非比例減衰系の地震応答解析において、モード間の連成の影響を無視しているため、Fig. 9の入力地震動のフーリエスペクトルからも分かるように、入力波の卓越振動数の接近に伴う振動モード間の連成の影響が大きく生じたためと考えられる。

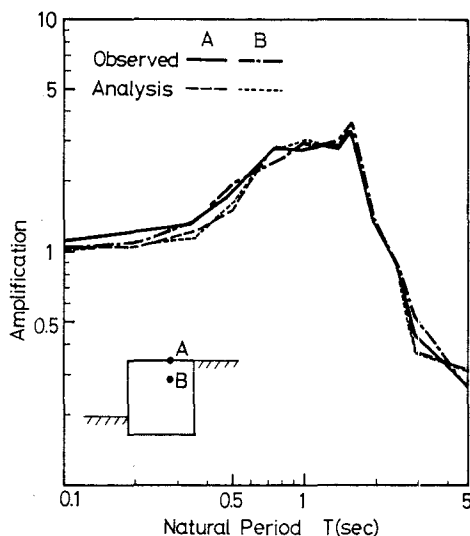


Fig. 9 加速度応答スペクトルの比較
(長野県西部地震)

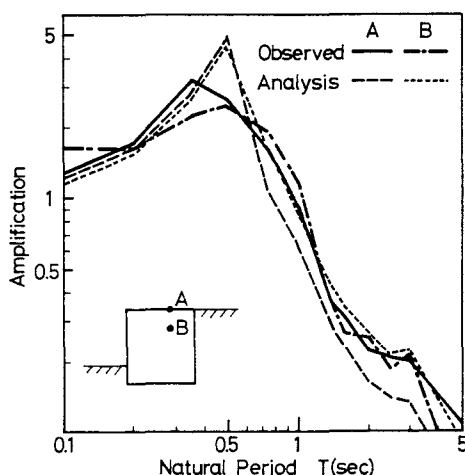


Fig. 10 加速度応答スペクトルの比較
(和歌山県北部地震)

以上、実在根入れ鋼板セル護岸に本解析モデルを適用し、観測された地震波2例を用いて根入れ鋼板セル-地盤系での応答解析を行い観測値と応答値を比較した。鋼板セルの振動形は比較的単純であり、Fig. 2に示すモデル化で近似的に表現しうるものと考えられる。しかしながら、鋼板セルに及ぼす周辺地盤の影響が無視し得ない場合もあり、入力地震動の卓越振動数によっては、振動モード間の連成を考慮した解析が必要になるものと思われる。

4. あとがき

根入れ鋼板セル護岸の動的応答特性を明らかにするため、鋼板セル-地盤系を粘性境界を用いた二次元有限要素モデル（平面ひずみ）で解析し実在鋼板セルの地震観測結果と比較したところ、以下の知見を得た。

（1）鋼板セルの振動形は比較的単純であり、本解析で示したモデル化で動的挙動を近似的に表現しうるものと考えられる。しかしながら入力地震動の卓越振動数と鋼板セル-地盤系の固有振動数が接近するとき、振動モード間の連成が応答に大きな影響を及ぼす場合もあり、さらに検討が必要である。

（2）鋼板セル-地盤系の応答を支配する低次の振動モードでは、鋼板セルの振動はその底面を支持された梁の1次振動に類似している。その際、中詰土の剛性変化による影響は無視しえない。このため鋼板セルを剛体的な構造とみなしバネ・ダッシュポットを用いてモデル化する場合には慣性力の低下に相当する有効質量の評価を行う必要がある。

以上の結果を根入れ鋼板セルの実用的設計法への適用面から検討すると、取扱いの容易なバネ・ダッシュポット系への置換の可能性は大きいと考えられる。しかしながら、振動系によっては、地盤と鋼板セルと入力地震動間の連成を無視しえないため、バネ・ダッシュポット系へのモデル化に当っては、これらを考慮する必要がある。

本論文を作成するにあたり、山口大学工学部中尾絵理子技官の助力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 北島、野田、中山：根入れ鋼板セルの静的挙動、港湾技研資料、No. 375、1981
- 2) 野田、北沢、飯田、森、田淵：根入れ鋼板セル護岸の模型振動実験、第6回日本地震工学シンポジウム論文集、1982
- 3) 野田、北沢、飯田、森、田淵：根入れ鋼板セルの耐震性に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第21巻、第3号、1982
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター：根入れ式鋼板セル設計指針、1985
- 5) 河野、古川、飯田：鋼板セル構造-地盤系の動的特性、第18回地震工学研究発表会、1985
- 6) 竹宮、三並：鋼板護岸セル構造物の応答性状、中国四国年次学術講演集、昭和59年
- 7) J. Lysmer and R.L. Kuhlemeyer : Finite dynamic model for Infinite Media, Proc. ASCE, EM4, 1969
- 8) 野田、飯田、武藤、森、田淵：根入れ鋼板セル護岸の地震時挙動の観測、第18回地震工学研究発表会講演概要、1985
- 9) 野田、飯田、倉田、武藤、森、田淵：根入れ鋼板セル護岸の地震時挙動の観測、第7回日本地震工学シンポジウム論文集、1986

(1988年10月12日受付)