

粘性土地盤における根入れ式鋼板セル護岸の現場実験

THE EMBEDDED STEEL PLATE CELLULAR BULKHEAD CONSTRUCTION SITE TEST IN SOFT GROUND CONDITION

* 1 * 2 * 3 * 4

岩田邦彦 新妻弘 高瀬幸紀 石田英行

By K.Iwata, H.Niitsuma, Y.Takase and H.Ishida

In the Port of Nagoya there lies soft diluvium clay thickly. The Fifth District Port Construction Bureau, Ministry of Transport adopted the embedded steel plate cellular bulkhead to construct a part of the seawall enclosing a disposal site for spoil. The bulkhead in the Port of Nagoya is the first application to clayey ground. The design of bulkhead was based on the "Guide on the Design of Embedded Steel Plate Cellular Seawalls" by Coastal Development Institute of Technology. However, the design procedure for the bulkhead in clayey ground condition is attached as a recommendation in the Guide. Accordingly, static and dynamic behavior of the cellular structure was investigated at the construction site to obtain data useful for establishment of the design procedure. From the results of the static behavior investigation, the elastically supported design model was proved to be valid for the embedded steel plate cellular bulkhead. From the results of the dynamic behavior investigation, the oscillation properties of the cell was clarified, though the observation system is in operation to accumulate more data for the further study.

1. まえがき

名古屋港周辺の地盤は極めて軟弱な沖積粘土層が厚く堆積しており、全国でも有数の軟弱地盤地帯である

- ・ 運輸省第五港湾建設局では、直轄土砂処分場として外周護岸の一部に根入れ式鋼板セルを採用している
- ・ 根入れ式鋼板セルは、過去和歌山港において粘性土を砂で置換した改良地盤に施工されたことはあるが
- ・ 名古屋港の根入れ式鋼板セルは粘性土地盤に直接打設された初の事例である。

このときの根入れ式鋼板セルの設計は、最新の研究・実験成果を踏まえた新しい設計法を粘性土地盤に拡張し適用して行った。

その後、「(財)沿岸開発技術研究センター」に「根入れ式鋼板セル技術基準検討委員会」が設けられ、砂質土盤上の根入れ式鋼板セルの設計法が指針として取りまとめられた。しかし、粘性土地盤やサンドコンパクションパイルにより改良された複合地盤に施工される根入れ式鋼板セルについては、現地では調査研究が必ずしも十分でないため指針の付録として掲載されている。

このような背景から軟弱地盤に築造された根入れ式鋼板セルの挙動を解明し、設計法を確立することを目的として実物根入れ式鋼板セルにおいて各種の現場実験が実施された。

本論文は根入れ式鋼板セルの設計、現場実験、実験結果および考察さらに解析について概説したものである。図1に現場実験に使用した名古屋PⅠの根入れ式鋼板セル護岸の標準断面図および平面図を示す。

- * 1 運輸省第五港湾建設局 前 名古屋港工事事務所 所長 (〒455 名古屋市港区築地町二番地)
- * 2 前運輸省第五港湾建設局 名古屋港工事事務所 工務課長 (〒455 名古屋市港区築地町二番地)
- * 3 住友金属工業(株) 鉄構技術部 土木海洋設計室 室長 (〒100 東京都千代田区大手町1-1-3)
- * 4 住友金属工業(株) 鉄構技術部 土木海洋設計室 参事 (〒100 東京都千代田区大手町1-1-3)

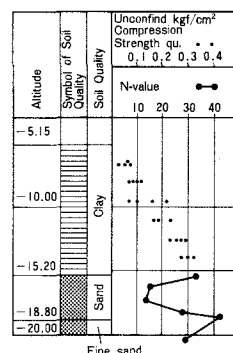
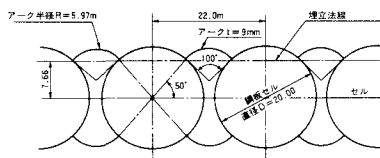
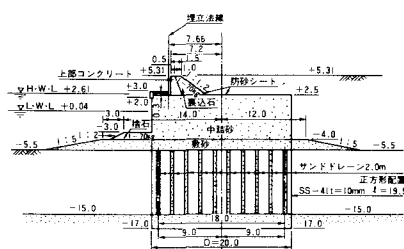
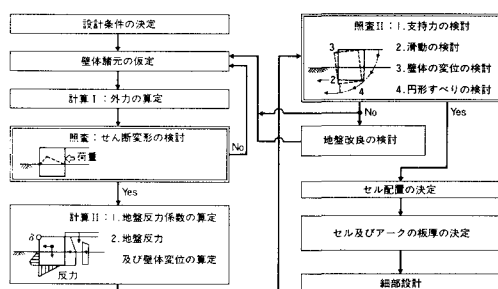


図1 根入れ式鋼板セル護岸標準断面図および平面図

2. 粘性土地盤における根入れ式鋼板セルの設計

(1) 設計の基本的考え方について

「根入れ式鋼板セル設計指針（以下指針と呼ぶ）」によると粘性土地盤における設計の手順は図2に示すように砂質土地盤の場合と基本的には同様と考えられている。設計法の概要は次のとおりである。



1) せん断変形の検討

根入れ式鋼板セルは、中詰土がセル殻により拘束されているため、一般には、セル殻と中詰土が一体となり、壁体の変位に対して壁体の変形が無視でき剛体とみなし得ると言われているが、しかし、セル径が極端に小さくなりセルを剛体とみなす仮定が満たされなくなることを防ぐ歯止めとして、常時の荷重に対してせん断変形の検討を行うものとされている。

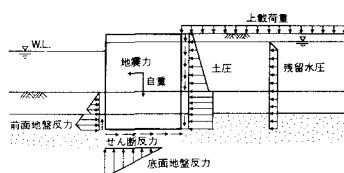


図3 外力及び地盤反力度分布

具体的には作用外力による壁体の変形
モーメントに対する中詰の変形抵抗モーメントの比により検討する。

2) 壁体が地盤に弾性支持されて重力式壁体とみなして壁体の安定を検討する。

図3に示すように壁体に作用する荷重に対し、水平地盤反力、鉛直地盤反力および底面のせん断反力等で抵抗するものとし、地盤反力および壁体の水平変位がそれぞれの許容値を越えない場合に重力式壁体として安定が確保される。

(2) 鉛直方向地盤反力係数の低減について

「指針」の付録では本護岸断面のようなセル内に粘性土がある場合、図4の算定図に基づいて鉛直方向地盤反力係数を低減することと提案されている。つまりセル内に砂質土より強度の小さい粘性土があれば、壁体底面の鉛直方向地盤反力はその粘性土の影響を受けると考えられる。そこで3次元軸対称有限要素法により検討した結果、鉛直方向地盤反力係数は総根入れ長とセル径の比、砂質地盤への根入れ長とセル径の比、および砂質土盤とセル内粘性土の変形係数の比に依存することが明らかになった。

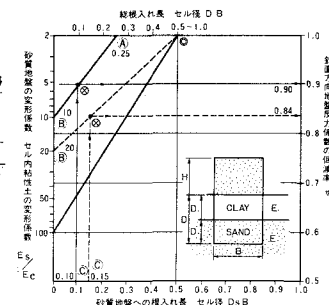
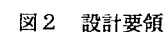


圖4 鉛直方向地盤反力係數算定図

3. 現場実験

(1) 概要

粘性土地盤における設計法を確立するため表1に示す項目について現地調査および現場実験を実施した。現場実験は図5に示すようにNo.9、10セルの頭部を補強し、静的水平載荷実験を実施した。また自由振動実験および地震観測はNo.8セルに計器類を取付けて行なった。なお地震観測については鋼板セルの背後にまだ裏込めの無い状態において観測されたデータの整理を行っている。現在は裏込めが投入されている状態であり今後も継続して観測を進めている。

表1 現地調査および現場実験一覧

項目	実施年度	目的
土質調査	昭和60、61	実験結果を解析するための土質条件の確認
静的水平載荷実験	昭和61	静的荷重に対するセルの挙動を確認し、粘性土地盤に対するバネ評価モデルの適用性および地盤反力係数の設定方法の検証
自由振動実験	昭和60	動的挙動解析のための基礎データを取得する
地震観測	昭和61～ (継続中)	動的（地震時）荷重に対するセル挙動を確認するとともに、中詰の地震時慣性力の低減等を検証する。

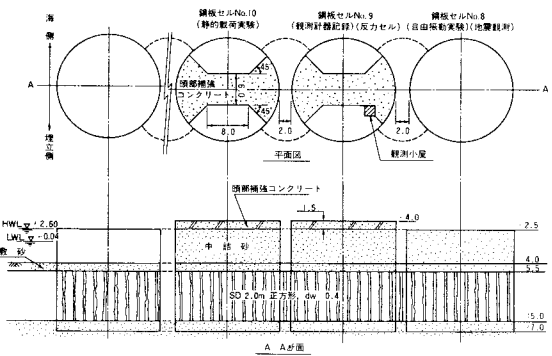


図5 現場実験一般図

(2) 静的水平載荷実験

1) 実験方法

No.9セルとNo.10セル間に油圧ジャッキ（500トン×4台）を挿入しNo.9セル側を反力として諸計器を取り付けているNo.10セルの挙動に関して計測および観測を行った。

実験の載荷サイクルは3サイクルとし、各サイクルの最大荷重は、第1サイクル500トン、第2サイクル1,000トン、第3サイクル1,213トンとした。

2) 測定項目

測定項目および測定位置は表2および図6に示すとおりである。

表2 測定項目

測定項目	数量	測定手段	測定位置
載荷量	5	①プレッシャーヘッド+荷重指示計 ②プレッシャーヘッド	No.10、9セル間ジャッキ
変位	6	①変位計+インバー線 ②光波距離計	No.10、9セル載荷方向頭部
	3	変位計	No.10、9セル間
	4	レベル+標尺	No.10セル頭部
	2	光波距離計+スケール（トランシット）	No.10セル頭部
変形	3	①変位計+インバー線 ②スケール	No.10、9セル頭部載荷直角方向、No.10セル載荷方向
	4	底面土圧計	E-1～E-4
土圧	7	側面土圧計	E-5～E-11
	8	変位計	S-1～S-8
潮位	1	スケール	No.9セル
セル内水位	1	スケール	No.10セル

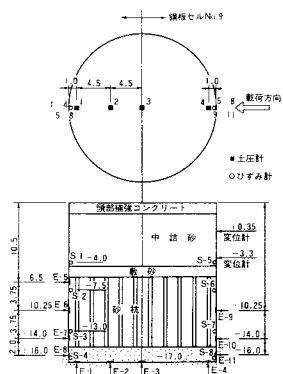


図6 静的水平載荷実験測定位置（No.10セル）

(3) 自由振動実験

1) 実験方法

実験は中詰投入完了後のNo.8セル頭部を護岸法線に対し、直角方向に埋立側に引張り、セルに自由振動を与えることによって行った。外力は、図7に示すようにセル頭部に取り付けたワイヤーに、所定の荷重に達すると破断する切断金物を介してタグボートで牽引することによって与えた。

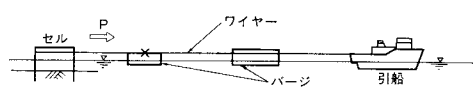


図7 実験要領

2) 測定項目

測定は図8に示すようにセル殻に加速度計を鉛直2点(測点1, 2)および水平2点(測点3, 4)設置して行なった。

(4) 地震観測

1) 観測方法および測定項目

観測は長期にわたるため、電源として太陽電池を採用した。

また測定は図9に示すように土圧計を底面4点、側壁8点および中詰4点設置して行なった。また加速度計は鉛直2点、水平7点設置して測定を行なった。

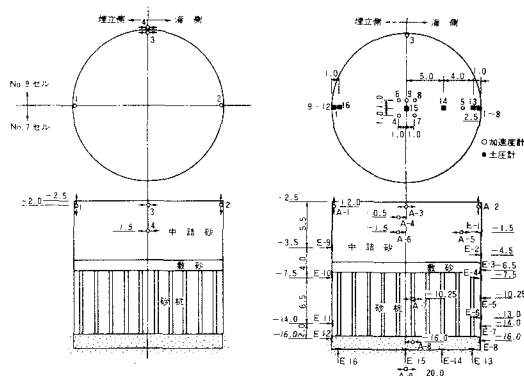


図8 自由振動実験測定位置 (No.8セル)

図9 地震観測測定位置 (No.8セル)

4. 実験結果および考察

(1) 静的水平載荷実験

1) セルの変位

No.10セルの頭部(A点)の水平変位は図10に、またNo.9セルとNo.10セル間の水平変位は図11に示すとおりである。最大荷重時1,213トンのセル頭部の水平変位は102mmであった。またセル間の水平変位は深度方向にほぼ直線性を示しており、セルは一体として挙動していると考えられる。

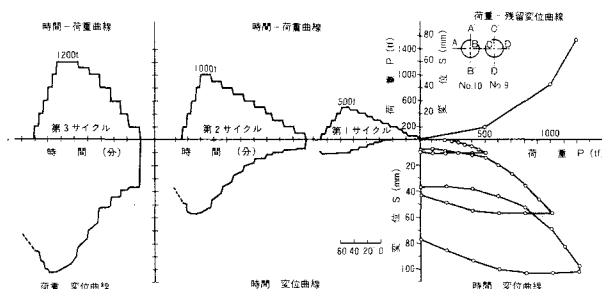


図10 A点の水平変位(インバー線)

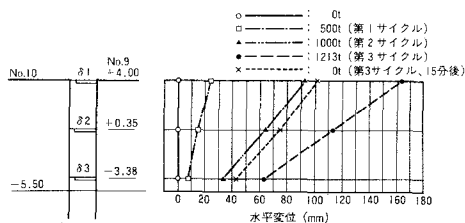


図11 セル間水平変位(第1～第3サイクル)

2) セルの前面、背面および底面土圧

荷重と各土圧計圧力分布の関係を各サイクル毎にプロットしたものを図12に示す。セル前面の土圧は各サイクルとも根入れ部のほぼ中間付近で土圧の増加が最大となっている。またセル下端の前趾側土圧と後趾側土圧の挙動をみると荷重の増加にしたがって台形分布から三角形分布に移行する傾向がみられる。

3) 遷移荷重と過去の模型実験結果との対比

静的載荷実験で得られたデータに関して変位または変形が顕著となる荷重を遷移荷重とした。具体的には荷重とセルの変位等の関係を両対数グラフにプ

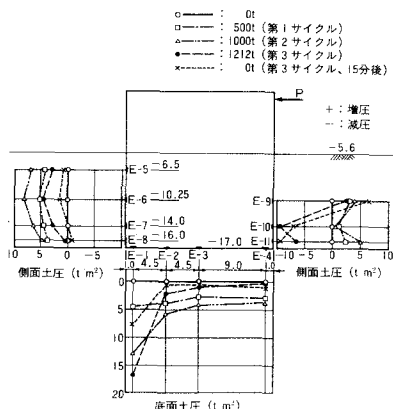


図12 土圧計圧力分布(第1～第3サイクル)

ロットし直線の勾配が変化する点を読みとって表3に示している。また今回の模型実験で算出した遷移荷重と過去、運輸省港湾技術研究所、運輸省第四港湾建設局等で行われた模型実験で得られた塑性化荷重を対比したものを表4に示す。本表により模型実験の塑性化荷重と遷移荷重は比較的よくあっていることがわかる。このことから今回の実験で得られた遷移荷重 $P_p=800\sim1,000$ トンは、中詰の塑性化または中詰の変形の指標であると考えられる。

表3 遷移荷重一覧(単位: ton)

荷重 - 水平変位		荷重 - 鉛直変位		荷重 - セルの傾き		荷重 載荷
A 点	B 点	A 点	B 点	セル天端傾き	セル間の傾き	直交方向の直交変化
インバー線 光速度計	インバー線	レベル	レベル			
1,000	800~1,000	1,000	1,000	1,000	800~1,000	800

表4 模型実験の塑性化荷重との対比

		過去の模型実験における 塑性化荷重 : P_p	今回の実験における 遷移荷重 : P_p
(水平変位) (変位)	$\frac{\delta H}{H}$	0.11~2.4%	0.4% (800) 0.6% (1,000)
(直交変化) (直交) : 載荷方向または載荷直交方向	$\frac{\Delta Z}{2R}$	0.02~0.13% (載荷方向)	0.1% (800) (載荷直交方向)
(塑性化荷重の平均または P_p 荷重) (変形モーメントから逆算した荷重)	$\frac{P_p}{P_p'}$ $\frac{P_p}{P_p'}$	1.04~1.11 ($\bar{P}_p$)	0.98 (800) 1.23 (1,000)

(2) 自由振動実験

1) 固有振動数

図13に測点1~4の加速度記録のパワースペクトル密度を示す。いずれの測点においてもスペクトル密度のピークは複数みられ多くの振動成分が含まれているが、各測点とも卓越周波数は共通して2.0HZ付近である。また参考として測定した常時微動のパワースペクトルも2.0HZ付近でピークが確認できた。このことから、セルの一次振動モードに対応する固有振動数はおよそ2.0HZであると考えられる。

2) 振動モード

図14は測点1~4の自由振動波形から同一時刻における加速度振幅と方向を読みとりセル断面図上にプロットしたものである。この図より、測点1, 2の鉛直加速度は振幅がほぼ同じで加速度の向きが逆転していることがわかる。また測点3, 4の水平加速度は測点4の方が振幅が小さく、加速度の向きが一致している。これらのことから鋼板セルの一次振動モードはセル下方を中心としたロッキング振動であると考えられる。

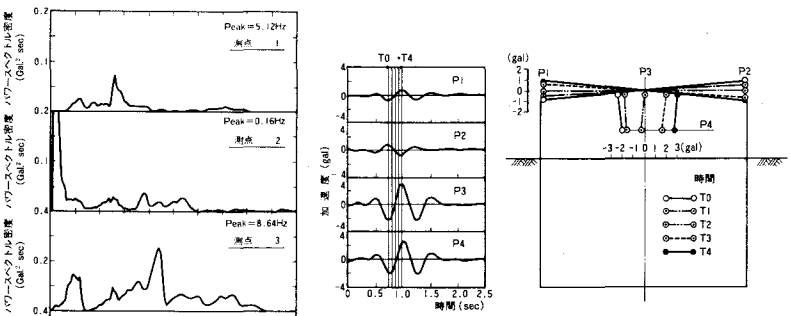


図14 セルの動的挙動特性

(3) 地震観測

図13 自由振動パワースペクトル密度

1) 地震波形

昭和61年度から、これまでに震度Ⅲの地震を含めて数例のデータが取得できている。この中で加速度が最大の地震は1986年12月11日発生の伊勢湾北部を震源地とした記録No.86-1であり、そのときの支持地盤(A-9)の最大加速度は図15に示すように19Gal、セル上部(A-4)で30Gal程度となっている。測定された地震は震源の深さが9~10kmと浅く、震央距離も9~12kmと近く直下型の地震であり卓越振動数が高いことに特徴がある。

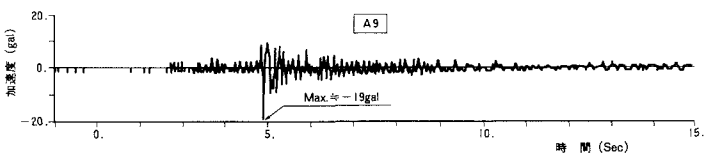


図15 地震加速度波形 (A-9)

2) 図16に支持地盤(A-9)のパワースペクトル密度を、また図17にセル天端付近(A-3)の伝達関数と振動数の関係を示す。これらの図より、2Hz付近にピークが見られることから、この振動数はセルの一次振動モードに対応する固有振動数と思われる。

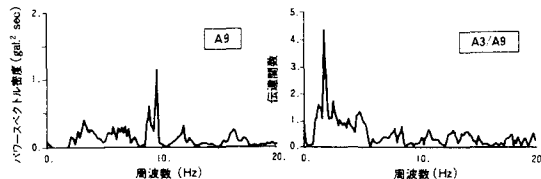


図16 加速度のパワースペクトル (A-9) 図17 伝達関数 (A-3/A-9)

5. 解析

(1) 静的水平載荷実験

静的載荷実験で測定した鋼板セルの全体挙動に対し、地盤をバネ評価した解析を行い、実験結果と比較した。バネ条件として「道路橋示方書・同解析 IV下部構造編」に準拠する場合(Aシリーズ)および「指針」に準拠する場合(Bシリーズ)の2通りの方法で検討した。以下に主な概要を説明する。

1) 地盤反力係数

地盤反力係数の計算結果を表5に示す。表中のケースは地盤反力係数を算出する際にプレシオメーターによる場合、N値より換算する場合、または低減率を考慮した場合等によって区分している。ただしB1は「指針」の提案法にしたがって計算したものである。

この表より、AシリーズとB1におけるK値はAシリーズよりも大きくなっており、特にB1のK_vはAシリーズに対して4～5倍となっている。これは道路橋示方書においてK値が載荷幅の3/4乗に反比例することと規定されているのに対し、「指針」では杭におけるK値を使用していることによるものである。

表5 地盤反力係数(単位: kg/cm³)

シリーズ	道路橋示方書(下部)			指 針	
地盤反力係数	A1	A2	A3	B1	B2
水平地盤反力係数(粘性土) K _{hc} ($\eta=0.87$)	0.0549	0.137	0.137	0.0965	0.0965
水平地盤反力係数(砂質土) K _{hs}	0.784	0.768	0.768	1.400	1.400
鉛直地盤反力係数 K _v	0.248	0.243	0.279	1.218	0.560

※A1のみプレシオメーターによる値を用いており他は全てN値より換算を行なっている。また η は低減率を示す。

2) 頭部水平変位および頭部鉛直変位

図18にセル頭部水平変位の解析結果を示す。この図より、荷重～セル頭部変位曲線は、ほぼ線形的挙動を示している。またAシリーズとBシリーズの計算値を比較すると、AシリーズによるほうがBシリーズよりも2倍程度の大きな変位となっている。次に、計算値と実測値を比較した結果、「指針」に基づいた方法(B1)で計算すると載荷重800トン付近までは計算値が実測値を上まわっている。

図19にセル頭部鉛直変位の解析結果を示す。この図より、「指針」に基づいた方法(B1)で計算した変位がほぼ実測値に一致しており、その他のケースはいずれも計算変位が実測値を大きく上まわっている。

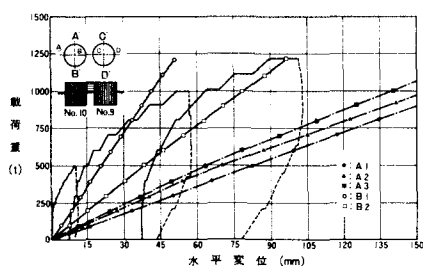


図18 A点変位の実測値と計算値

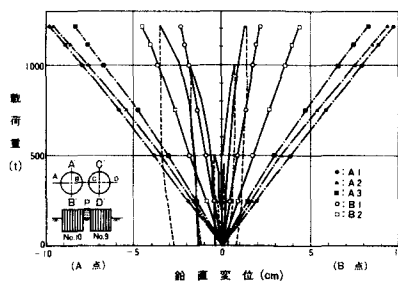


図19 セル頭部鉛直変位の実測値と計算値

(2) 地震観測

これまで観測された地震データはセルの背後に裏込めが行われていない状態でのものであり、また加速度値も小規模ではあるが予備的に解析した結果では、自由振動実験と同様の振動特性が確認されている。図20には、その一部として運輸省港湾技術研究所所有の等価線形解析プログラム「FLUSH」を用いて解析したセ

ル体各部加速度の観測値と計算値の比較を示している。これらの図より計算値でも観測値同様、おおよそ2Hz付近においてピークを示し、応答倍率は天端にむかうほど増加の傾向を示している。

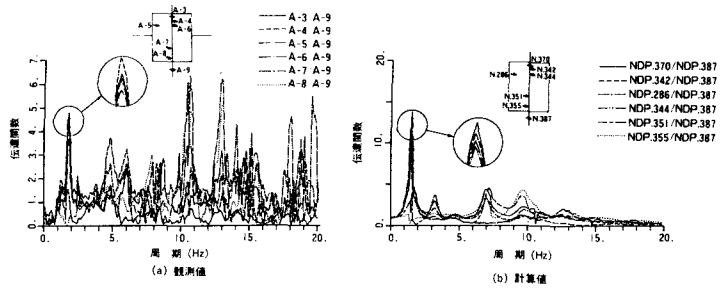


図20 セル体各部の伝達関数の比較

6. まとめ

今回の現場実験により得られたおもな知見は次のとおりである。

(1) 静的水平載荷実験

塑性化荷重にいたるまでの荷重の範囲内においては、根入れ式鋼板セル設計指針に基づいた設計法は粘性土の場合でも実測値に対して安全な結果を示していた。また道路橋示方書に基づく地盤反力係数による計算結果では、各計算値とも実測値よりも非常に大きな値となり不経済な設計となる可能性もあると思われる。

(2) 自由振動実験および地震観測

自由振動実験および地震時のセル体各部の周波数伝達関数より本セルの1次固有振動数はおおよそ2Hz付近と思われ、またセルの1次振動モードはセル下方を中心としたロッキング振動であると思われる。

7. あとがき

名古屋港第2ポートアイランド護岸に試験的に採用した根入れ式鋼板セルは、軟弱地盤に直接築造された初の事例で設計、施工に際しての先例もほとんどない状態からスタートしたが、現在は埋立がほぼ完了している状況である。現場実験によって粘性土に根入れを有する鋼板セルの静的挙動が実物セルにおいて確認でき、地盤に弾性支持されると考えるセルの挙動モデル（バネモデル）の妥当性が確認できた。動的挙動については、まだセル背後に裏込めの無い状態であり、また観測された地震波も小規模ではあるが、セルの基本的な振動特性を把握することができた。今後、バネモデルの地震時への適用性、中詰の地震時慣性力等残された課題もあり、これからも計測を継続し、データの蓄積を図るとともに検討、解析を進める予定である。本調査は、現在も継続中で最終的なとりまとめは動的挙動の解析とあわせて行うこととしており、今後の調査成果についても機会を見つけて報告したいと考えている。

本報告の終わりにあたり、建設に関与された諸先輩ならびに関係者の方々に謝意を表します。現場実験の実施および解析にあたっては運輸省港湾技術研究所ならびに奥村樹郎(財)沿岸開発技術研究センター常務理事を委員長とする委員会に御指導頂いた、ここに、委員ならびに関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 北島昭一, 野田節男, 中山種清: 根入れ式鋼板セルの静的挙動, 港湾技研資料, No.375, 1981年
- 2) 野田節男, 北澤壮介, 飯田 毅, 森 信夫, 田淵 博: 根入れ式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年
- 3) 江川直人, 大隈正登, 口田 登: 粘性土地盤における根入れ式鋼板セルの静的挙動について、土と基礎 第33巻, 第8号, 1985年
- 4) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 根入れ式鋼板セル設計指針, 昭和60年
- 5) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, 昭和55年

(1988年10月12日受付)