

港 湾 技 研 資 料

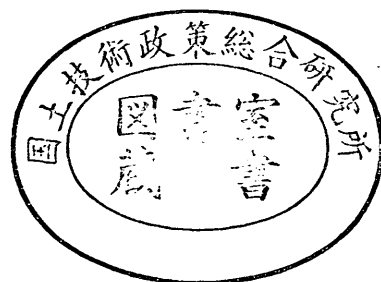
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 639 Mar. 1989

鋼矢板セル模型の水平載荷実験
—その2 動的挙動—

野	田	節	男
高	橋	邦	夫
神	田	勝	己
寺	崎	滋	樹
三	浦		聰
水	谷	太	作

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	5
1. まえがき	5
2. 鋼矢板セルの耐震設計法の現状	6
2.1 現行設計法	6
2.2 鋼矢板セルの耐震性に関する既往研究	8
2.3 過去の大地震における鋼矢板セルの変状	8
2.4 鋼矢板セルの耐震設計法の現状	8
3. 実験目的	10
3.1 実験目的	10
3.2 解明すべき鋼矢板セルの動的挙動	10
4. 模型実験	10
4.1 実験概要	10
4.2 試験体	13
4.3 測定項目および測定方法	14
4.4 加振方法	21
4.5 地盤の作成方法	23
4.6 使用した砂	26
4.7 支持地盤, 中詰めおよび背面地盤の性状	27
5. 単体セルによる共振試験(実験1)	29
5.1 入力加速度	29
5.2 応答加速度	30
5.3 振動後のセル径の変化およびセル中詰め, セル殻ならびに地盤の沈下	32
6. 三連セルによる振動破壊実験(実験2)	33
6.1 入力加速度	33
6.2 応答加速度	34
6.3 振動中のセル水平変位	37
6.4 振動中の土圧	40
6.5 振動中のセル殻発生応力	49
6.6 振動中の過剰間隙水圧	52
6.7 振動後のセル体および地盤表面の残留変位	53
6.8 振動後のセル体の断面変形	55
6.9 継手フリーセル模型の継手ずれ	56
7. 継手の有無によるセル構造物の動的挙動への影響	57
7.1 セル中詰め慣性力への影響	57

7.2 振動時の動的挙動（変位，地盤反力，変形）への影響	59
8. セル構造物の動的挙動	63
8.1 振動時のセル背面土圧	63
8.2 振動時のセル中詰め土圧	67
8.3 振動時のセル殻発生応力	67
9. 模型護岸の安定性	70
9.1 現行設計法による安定計算	70
9.2 根入れ効果を考慮した安定計算	72
10. まとめ	74
11. あとがき	76
参考文献	77
主要記号表	78

Horizontal Loading Tests on Models of Steel Sheet Pile Cellular Bulkheads

— Part 2 Dynamic Behavior —

Setsuo NODA*
Kunio TAKAHASHI**
Katsumi KANDA***
Shigeki TERASAKI****
Satoshi MIURA*****
Tasaku MIZUTANI*****

Synopsis

In order to make clear the dynamic behavior of steel sheet pile cellular bulkheads, shaking table tests were carried out on model cells with 50 cm in diameter and 50 cm in height above the sea bottom.

Two kinds of tests were carried out ; one is resonant tests for single cells (ratio of embedment length to wall height ; $D/H = 1/4$) and another is failure tests for walls by cells ($D/H = 1/4, 1/2$).

As a structural difference of sheet pile cells to plate cells is existence of joints, the tests were mainly intended to evaluate the extent of influence by the joints on dynamic behavior of the cellular structures. Major results are as follows ;

- 1) Under the strong ground motions, the existence of joints gives no significant difference on the displacement of walls and deformation of shape of cells, and it is considered that the cells behave like rigid body.
- 2) The existence of the joints has some extent of influence on ground reactions against cells. Although larger strains possibly occurred in fills of sheet pile cells, the failure due to shear did not happen in any models.
- 3) The existence of joints do not have any influence on the inertia force acting on cell fills during vibration.
- 4) It is practically considered that the earth pressure on cells due to backfill soils is evaluated by the active earth pressure during earthquake by Mononobe-Okabe formula.
- 5) It is also considered that the earth pressure due to cell fills is obtained by the above-mentioned formula.
- 6) Judging from the model tests in this study, a current method for evaluating an earthquake stability of sheet pile cellular bulkheads gives rather conservative results, and this tendency increases with increase of embedment.

Key Words : Cellular Bulkhead, Shaking Table Test, Joint of Cell, Earthquake Resistant Analysis

* Chief of Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structures Division.

** Chief of Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division

*** Chief of Design Standard Laboratory, Planning & Design Standard Division.

**** Construction & Architectural Materials Development & Engineering Service Division, Nippon Steel Co., Ltd.

***** Construction Materials & Engineering Department, Engineering Division, Kawasaki Steel Co., Ltd.

***** Research & Development Center, Engineering Division, Kawasaki Steel Co., Ltd.

鋼矢板セル模型の水平載荷実験

—その2 動的挙動—

野田 節 男 * 高橋 邦 夫 ** 神田 勝 己 ***

寺崎 滋 樹 **** 三 浦 聡 ***** 水谷 太 作 *****

要 旨

根入れされた鋼矢板セルの動的挙動を明らかにするため、直径50cm、海底面上の壁高50cmのセル模型を使用して、単体セル模型の共振試験(D/H(根入れ・壁高比)=1/4)および護岸モデルの振動破壊実験(D/H=1/4, 1/2)を行った。鋼矢板セルの構造的な特徴はセル殻に継手の有ることであるため、主としてセル殻継手の有無が動的挙動に及ぼす影響を調査することを目的として、両実験ではセル殻継手のある「継手フリーセル模型」とセル殻継手のない「鋼板セル模型」を使用した。以上の実験により、次の結果を得た。

- 1) セル殻継手の有無は、振動時のセル体全体の変位・変形挙動にほとんど影響せず、振動時の鋼製セル構造物はほぼ剛体的と考えられる。
- 2) セル殻継手の有無は、地盤反力の大きさに若干影響を与えており、振動中のセル体のせん断ひずみは、継手のあるセルの方が若干大きかった可能性があるものの、継手のあるセルにおいてもせん断破壊は生じなかった。
- 3) セル殻継手の有無は、セル中詰め慣性力の大きさに対してほとんど影響しない。
- 4) 振動中にセル背面に作用する土圧の値は、実務上、物部・岡部式による地震時主働土圧とみなしてよい。
- 5) 前面壁に作用する振動中のセル中詰め土圧も、おおむね物部・岡部式による地震時主働土圧で表せる。
- 6) 根入れのある鋼矢板セル式構造物に対する従来の地震時安定検討法は、模型振動実験結果より判断すると、かなり安全側の結果を与え、その傾向は根入れの増大とともに増加する。

キーワード：鋼矢板セル，模型振動実験，セル殻継手，地震時安定計算法

1. まえがき

鋼矢板セルは、昭和29年に塩釜港一万トン岸壁で使用されて以来全国各地で建設されている構造形式である。(図-1.1. 参照)

鋼矢板セルは、直線形鋼矢板を円形に組んだセル殻に砂を中詰めした一種の重力式構造物であり、耐震性が高

いこと、また止水性にすぐれていることから、岸壁、廃棄物埋立護岸などの築造工法として使用されている。

鋼矢板セルは、港湾構造物として使用される場合、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾に示された設計法にもとずき設計されている。この現行設計法は、主として根入れの無い二重壁モデルの静的水平載荷試験の実験結果²⁾に基づいて得られたものである。しかし

* 構造部 地盤震動研究室長

** 土質部 基礎工研究室長

*** 計画設計基準部 設計基準研究室長

**** 新日本製鐵(株) 建材開発技術部

***** 川崎製鐵(株) エンジニアリング事業部建材技術部

***** 川崎製鐵(株) エンジニアリング事業部研究開発センター

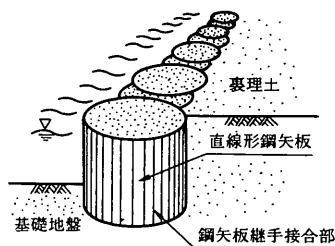


図-1.1 鋼矢板セル (概念図)

ながら、十勝沖地震(1968年)³⁾、根室半島沖地震(1973年)⁴⁾、宮城県沖地震(1978年)⁵⁾などの過去の大地震において鋼矢板セル構造物の被災例がないことから推定できるように、現行設計法は十分安全な耐震設計法といえる。さらに根室半島沖地震(1973年)の地震動を経験した釧路港錦町岸壁では、鋼矢板セル岸壁が無被災であったのに対して同一法線上のセルラブロック式岸壁に法線の沈下とはらみだしなどの変状が認められたことから⁴⁾、現行設計法はやや安全側すぎるの可能性も考えられる。

そこで、鋼矢板セル構造物のより合理的な設計法を模索するため、鋼矢板セルの地震時の挙動の解明を目的として、砂地盤上の根入れのある鋼矢板セルの振動実験を行うことにした。

鋼矢板セルの耐震設計法における問題点を検討した結果、本実験では、鋼矢板セルの動的挙動に関する次の二項目を解明するものとした。

- ①セル中詰め物の慣性力
- ②セル体の動的挙動(変位、地盤反力、変形)

また、今後のより合理的な設計法確立のためのデータ集積を目的として、次の三項目に関する実験も行うものとした。

- ③セル背面に作用する土圧
- ④セル中詰め土圧
- ⑤セル殻張力

なお、本実験は、運輸省港湾技術研究所と、新日本製鐵(株)および川崎製鐵(株)との共同研究として実施したものである。振動試験は、新日本製鐵(株)相模原技術センターの振動試験機を使用して行った。なお、本実験と平行して、鋼矢板セルの静的挙動を把握するため静的載荷実験⁶⁾も実施した。

2. 鋼矢板セルの耐震設計法の現状

2.1 現行設計法

鋼矢板セルは、港湾構造物として使用される場合、現在「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾に示された設計法にもとづき設計されている。同基準に示された鋼矢板セルの設計手順は図-2.1のように表すことができる。

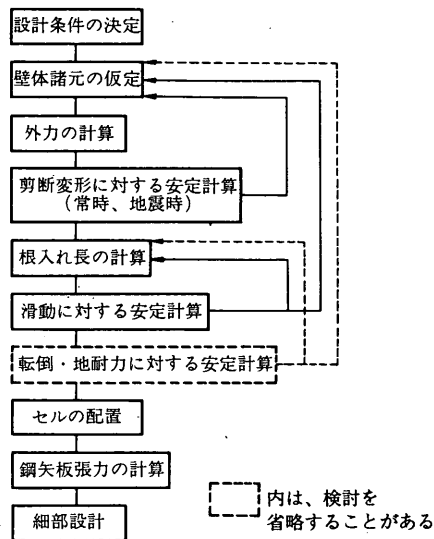


図-2.1 鋼矢板セルの現行設計法の設計手順

設計法は、一般に、対象となる構造物の安全を確保すると同時に経済的に建設するため、構造物が破壊しないようあるいは過度の変形を起こさないよう、既往の知見にもとづき決定される。現行設計法では鋼矢板セルの基本的な破壊形態を次の三つと考えている。

- ①セル体のせん断破壊
- ②セル体を剛体と見なした時のセル体の全体的破壊(主としてセル体のすべり出し)
- ③セル殻の破裂

現行設計法では、セル体のせん断破壊に対しては「せん断変形に対する換算壁体幅の計算」で検討し、セル体を剛体と見なした時のセル体の全体的破壊は「壁全体としての安定計算」で検討する。また、セル殻の破裂に対しては「矢板張力の計算」で検討する。

以下にその概要を示す。

- (1) せん断変形に対する壁体幅の検討
セル直径およびその平面形状は、セル体がせん断

破壊しないよう、過度な変形をしないよう決定する必要がある。セル体のせん断破壊あるいはせん断変形の検討は、セル体をセルの前壁、後壁および隔壁をすべて直線に置き換えた仮想壁体と仮定し、その壁体幅である換算壁体幅を用いて計算する。

「せん断変形に対する(換算)壁体幅」は、セル体がせん断破壊しないあるいは過度なせん断変形しない必要セル直径に相当する壁体幅であり、次式で計算する。

$$M_a \times F \leq M_R \quad \dots(2.1)$$

ここに

M_a : 海底面における変形モーメント(tf·m/m)

M_R : 海底面における抵抗モーメント(tf·m/m)

F : 安全率、中詰めが砂の場合

常時 1.2以上, 異常時 1.2 以上

上記のセル体のせん断変形に対する異常時の安全率が、常時の値に比較し割り引かれていないのは、抵抗モーメントの計算で、常時では壁体の変形が起こらない時の算定式を用いており、また異常時では壁体の変形が多少生じた時の算定式を用いているためである。また、セル体の海底面における抵抗モーメント M_R は、中詰めが砂の場合、次の式で計算される。なお、次式の第一項はセル中詰めのせん断抵抗による抵抗モーメントを示し、第二項はセル殻のせん断抵抗による抵抗モーメントを示しており、セル体の抵抗モーメントはその和で表されている。

$$M_R = \frac{1}{6} \gamma (R_o H_o^3 + R_s H_s^2) \quad \dots(2.2)$$

ここに

M_R : 海底面における抵抗モーメント(tf·m/m)

γ : 中詰めの換算単位体積重量(t/m³)

R_o : セル中詰めによる抵抗モーメントの抵抗係数

$$\text{常時} \quad R_o = \frac{2}{3} \nu_o^2 (3 \cdot \cos \phi) \tan \phi / \sin \phi \quad \dots(2.3)$$

$$\text{異常時} \quad R_o = \nu_o^2 (3 \cdot \cos \phi) \sin \phi \quad \dots(2.4)$$

H_o : 換算壁高(中詰めによる抵抗モーメントを計算するための仮想の壁高)(m)

R_s : セル殻のせん断抵抗による抵抗モーメントの抵抗係数

$$\text{常時} \quad R_s = \frac{3}{2} \nu_s f \tan \phi \quad \dots(2.5)$$

異常時 同上

H_s : 換算壁高(セル殻のせん断抵抗による抵抗モーメントを計算するための仮想の壁高)(m)

ν_o : B/H_o

ν_s : B/H_s

B : 換算壁体幅(m)

f : 矢板継手間の摩擦係数 $f=0.3$

(2) 壁全体としての安定の検討

また、「壁全体としての安定」は、せん断破壊に対して安全な壁体幅をもつセル体について、コンクリート製ケーソンなどの重力式構造物の安定計算に準じて検討する。なお、セルの根入れ長は、前面矢板の場合、セル前面壁背面に作用する海底面より上の主働土圧合力の鉛直分力押し込み荷重とし、これに対して支持できる根入れ長として仮定する。ただし、セルの前面と背面で根入れ長が異なる場合は、全体安定、特に滑動に対して、より危険側である条件として、根入れの浅い背面の矢板下端を仮想のセル底面と仮定する。

計算上セル体に作用する外力には、a)壁体背後の主働土圧、b)残留水圧、c)壁体中詰めに作用する地震力、d)壁体中詰めの重量、e)載荷重量を考慮する。

またセル体の抵抗力には、f)根入れ部前面側の受働土圧、g)セル底面における摩擦力および粘着力を考慮する。なお、全体安定の計算は、一般に、すべり出しのみとし、転倒、地盤反力などの検討はしないことが多い。

(3) 矢板張力の検討

「矢板張力」は、次式により算定し、矢板張力が許容矢板張力を越えているかどうかを検討する。

$$T = [(\gamma H_o + q) K_i + \gamma_w h_w] R \quad \dots(2.6)$$

ここに

T : 矢板張力(tf/m)

γ : 中詰めの換算単位体積重量(t/m³)

H_o : 換算壁高(m)

q : 載荷重(tf/m²)

K_i : 中詰めの土圧係数 $K_i=0.6$

γ_w : 海水の単位体積重量(t/m³)

h_w : セル内と前面との水位差(m)

R : セルの半径(m)

2.2 鋼矢板セルの耐震性に関する既往研究

鋼矢板セル構造物は、数多くの建設実績を有しているものの、その耐震性に関する既往の研究は以下に述べる程度である。

(1) 各種けい船岸の振動特性に関する研究（第4報） —セル型岸壁の振動性状について—（林・宮島）⁷⁾

林・宮島は、各種けい船岸の振動性状に関する研究の一環として旧八幡製鉄(株)戸畑港セル型岸壁（背面土あり）の振動試験を実施した。試験は、①地盤振動に対する構造物の応答および構造物各部の震度分布、②振動時における矢板のフープテンションの変動を調査することを目的に行われた。

本セル岸壁のセル諸元を示すと、壁高が14.5m、セル直径が20.37m、セル根入れ長が1.5mであった。また、セル岸壁の加振は、セル前面の海底地盤でダイナマイトを爆発させることにより行った。なお、セル構造物に作用した加速度は10ガルを越えていた。この振動試験の主要な結果は次のように要約できる。

①人工的振動源による振動測定の結果、セル岸壁の固有振動数は0.15秒（6 Hz）と推定された。この値は、これまでに実測された栈橋、重力式岸壁などに比べて比較的短周期であったが、これは、セル型構造の特性というよりもむしろ当地付近の地盤条件の特性に基づくものと考えられる。

②振動によるフープテンションの変動量は、振動前の静的な値に比べて極めて小であり、本岸壁の設計震度程度の地盤によってフープテンションが増大しセルが破裂することは考えられない。

(2) 直線型鋼矢板を用いたセル構造物の特性（石田・川井 他）⁸⁾

石田・川井、他は、①直線型鋼矢板の打設試験、②中詰め時のセル体挙動観測、③振動実験、④水密性実験を目的として川崎製鉄(株)千葉製鉄所構内で実物大の単体鋼矢板セルの試験をおこなった。対象としたセルの諸元を示すと、壁高が8.0m、セル直径が10.18m、セル根入れ長が14.5mであった。また、セル体の振動特性を把握するため試験A（セル中詰め地表面に起振機を置き、セル体に強制振動をあたえる試験）、試験B（セル体の近傍の周辺地盤上に起振機を置き、周辺地盤に外乱を与えることによりセル体を振動させる試験）、試験C（地盤およびセル体の常時微動を観測する試験）を行った。

振動試験の結果を要約すると次のように表せる。

①三種の異なった振動試験の結果、セル構造体の固有振動数は5.5Hz、減衰定数は約6.2%であった。

②この結果から、昭和53年6月に発生した宮城県沖地震波形（この波形は、川鐵千葉で得られた加速度記録を使用した。その最大加速度は地表面で15ガル程度であったが、これを100ガルに増幅した波形を計算で使用した。）を入力し、最大応答スペクトルを計算すると、本構造物の最大応答加速度は76ガル程度であった。また、河角マップによる100年生起の最大地震動250ガルを適用しても、最大応答加速度は190ガル程度であった。

2.3 過去の大地震における鋼矢板セルの変状

過去の大地震における鋼矢板セルの被災例は無い。厳密に言えば、付属構造物に破壊や変状があったものの、セル本体の変状が認められた例は無い。

鋼矢板セル構造物が大地震を受けた例としては、十勝沖地震（1968年）、根室半島沖地震（1973年）、宮城県沖地震（1978年）によるものがあげられる。

鋼矢板セル構造物は、十勝沖地震（1968年）により初めて大きな地震力を経験した。この地震により200ガル以上の地震動を経験したと推定されるが、青森港の浜町ふ頭西側1万トン岸壁（-9.0m）、東側1万トン岸壁（-9.0m）、先端5千トン岸壁（-7.5m）、室蘭港の日通ふ頭5号、6号岸壁（-7.5m）、7号岸壁（-7.5m）の6例が地震力を受けたものの、いずれも無被災であった³⁾。

根室半島沖地震（1973年）では、釧路港の錦町岸壁（-6.0m）の鋼矢板セルが大きな地震動を経験した。釧路港の地盤上に設置された強震計によると、最大170ガルの水平加速度が観測されたが、錦町岸壁の鋼矢板セルは、この地震によっても無被災であった。なお同一法線上にあるセルラブロックに法線の沈下とはらみだしが認められており、セル岸壁が無被災であったことと対照的であった⁴⁾。

また、宮城県沖地震（1978年）では、塩釜港の貞山ふ頭1号岸壁（-9.0m）の鋼矢板セルが最大280ガル（塩釜港の地盤上の強震計）の地震動を経験したが、無被災であった⁵⁾。

2.4 鋼矢板セルの耐震設計法の現状

以上、鋼矢板セルの現行設計法、耐震性に関する既往の研究および過去の大地震における鋼矢板セルの変状をみてきたが、鋼矢板セルの現行耐震設計法の合理性は、基本となった研究あるいは既往の知見から判断して次のように考えられる。

(1) セル体のせん断変形に対する壁体幅の検討

セル体の「せん断変形に対する壁体幅」の検討は、外力である変形モーメントとセル体のせん断抵抗を表す抵抗モーメントの比較により行っている。

地震時におけるセル体に作用する外力には、a) 壁体背後の主働土圧、b) 残留水圧、c) セル中詰め作用する慣性力などを考慮している。また、変形モーメントは、上記の外力の海底面まわりのモーメントとしている。

壁体背後の地震時土圧は物部・岡部の地震時主働土圧式により算出することができる。現行では、設計上この方法が地震時においても有効と考えられる。

しかしながら、鋼矢板セルのように根入れのある構造物の背面土圧は十分研究されているとは言えないので、今後のより合理的な設計法の確立のためデータの集積が望まれる。

鋼矢板セル岸壁の残留水圧の算定法は、古土井・片山の研究⁹⁾にもとづき提案されたものであり、設計上問題は生じていないと考えられる。

セル中詰め作用する慣性力は、現行設計法では、セル体の自重と設計震度の積として求めている。これは、コンクリート製のケーソンなどの非常に剛性の高い重力式構造物の設計法に準じて決定されたものと考えられる。野田らの研究¹⁰⁾によると鋼板セルのように砂(粒状体)で中詰めされた構造物が地震動を受けた場合、セル中詰めには、中詰め全質量と剛体としてセル体に作用する加速度の積より小さな慣性力が作用すると報告している。一方、鋼矢板セルではそのようなセル中詰め慣性力に関する実験的研究は行われていないので、セル中詰め慣性力の研究が必要と考えられる。

一方、抵抗モーメント算定式は、北島の「セル岸壁の安定性に関する研究」²⁾で提案された式を使用している。北島は、中詰め土内に図-2.2に示すようなRankineの主働受働すべり面が発生することを理論的に考察し、主として根入れのない二重壁モデルの模型の静的水平載荷実験により中詰めによる抵抗モーメント算定式の妥当性を報告した。また、同時に、根入れのない鋼矢板セルモデルの静的水平載荷実験も行い、2.1に示したセル殻(矢板の継手摩擦)のせん断抵抗による抵抗モーメントの算定式を導入すると、セル体のせん断変形に対する抵抗モーメントは、中詰めによる抵抗モーメントとセル殻による抵抗モーメントの和により表せることを報告した。

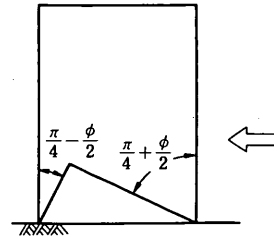


図-2.2 北島による鋼矢板セル中詰めすべり面

この算定式は、過去の大地震における被災例がないことから推定されるように、セル体のせん断変形に対し十分安全な検討法といえる。

しかしながら、本算定式に関しては、①基本的に根入れのない二重壁モデルの静的載荷試験の結果により提案されていること、②過去の大地震における鋼矢板セル構造物の被災例がないこと、③鋼矢板セルモデルを使用した振動破壊実験により、地震時の鋼矢板セルのせん断変形あるいはせん断破壊が研究されていないことなどの問題点を指摘できる。したがって、より合理的な振動時(地震時)のセル体のせん断変形検討方法を提案するためには、振動破壊実験を行って振動時のセル体のせん断変形あるいは破壊耐力を確認する必要がある。

(2) 壁全体としての安定の検討

壁全体としての安定の検討は、一般の重力式岸壁の安定計算に準じて行われる。鋼矢板セルの場合、すべり出しに対してのみ検討し、転倒およびセル底面地盤耐力の検討は行わないことが多い。

すべり出しの計算で考慮される外力は、2.4-(1)で示した外力と同じである。上記のように、確認すべき鋼矢板セルの挙動としては、セル中詰め慣性力があげられる。

また、抵抗力としては、セル根入れ部前面側の受働土圧およびセル底面における摩擦力ならびに粘着力が考慮される。

セル根入れ部前面側の地震時土圧は、物部・岡部の地震時受働土圧式により算出することができる。

現行では、設計上、この方法が地震時においても有効と考えられる。

また、セル底面における摩擦力はセル体の自重とセル底面の砂の摩擦係数の積で求められ、また、セル底面の粘着力はセル底面積とセル底面における粘性土の粘着力の積で求められる。この検討方法は、

現時点では妥当な検討法と考えられる。

鋼矢板セルの根入れ長は、前述のように、前面側の矢板の場合、セル前壁背面に主働土圧が作用しその鉛直成分がセル押し込み力として作用するものと仮定し算定している。その際、地震時の主働土圧が作用すると仮定している。これは、北島の根入れの無い二重壁モデルの静的水平載荷実験の考察結果²⁾にもとづき決定されたと考えられる。しかしながら、根入れのある鋼矢板セルにおいて、振動時に上記のような押し込み力が作用するのかが確認されていないので、セル振動時にセル前壁に作用する押し込み力を確認するか、あるいは全体安定の検討から設計上の必要性を検討しておくことが望まれる。

(3) 矢板張力の検討

矢板張力は、セル殻を円管とみなし、セル内面側に中詰め土圧および残留水圧が作用するものとして計算している。北島は、根入れのない二重壁モデルの静的水平載荷実験により、中詰め土圧は中詰め直後が最大となり、載荷後、静止土圧から徐々に主働土圧に変化するため小さくなることを報告している²⁾。そこで、セル殻張力も、セル中詰め直後が最大となると考えられるため、矢板張力は、セル中詰め直後の土圧すなわち静止土圧がセル内面側に作用するものとして求められている。

本設計法は、過去の大地震においてセル構造物のセル殻の破裂例が無いことから推定されるように、安全な検討方法といえる。

しかしながら、鋼矢板セルの振動時におけるセル中詰め土圧の測定例もないし、またセル体に作用する加速度レベルが大きい時の振動時のセル殻張力の観測例も無いので、今後のより合理的な設計法の確立のため、振動時のセル中詰め土圧およびセル殻張力に関してデータを集積していくことが望まれる。

3. 実験目的

3.1 実験目的

鋼矢板セルの現行設計法は、十勝沖地震(1968年)や根室半島沖地震(1973年)などの過去の大地震における鋼矢板セル構造物の被災例がないことから推定できるように、十分安全な耐震設計法といえる。

しかしながら、現行設計法は、2.4 で見てきたように、基本的には根入れの無い二重壁モデルの静的水平載荷実験の結果に基づき設定されているものと考えられる。また2.2 で見たように鋼矢板セルの耐震性に関する既往研

究もあまり無く、その耐震設計法の合理性を裏付けるデータも少ない。

そこで、鋼矢板セル構造物のより合理的な設計法を模索するため、鋼矢板セルの地震時の挙動の解明を目的として、砂地盤上の根入れのある鋼矢板セルの振動実験を行うことにした。

3.2 解明すべき鋼矢板セルの動的挙動

本実験では、2.4 の「鋼矢板セルの耐震設計法の現状」で検討した結果に基づき、鋼矢板セルの動的挙動に関する次の二項目を解明するものとした。

- ①セル中詰めの慣性力
- ②セル体の動的挙動(変位; 地盤反力, 変形)

また、今後のより合理的な設計法確立のためのデータ集積を目的として、次の三項目に関する実験も行うものとした。

- ③セル背面に作用する土圧
- ④セル中詰め土圧
- ⑤セル殻張力

4. 模型実験

4.1 実験概要

表-4.1 に実験の種類、実験項目、セル諸元、土質、測定項目、載荷方法および試験装置よりなる実験概要を示した。

以下に、その概要を示す。

鋼矢板セルの動的挙動を試験するため、セル直径50cm、セル壁高50cmのセル模型を使用して、

- ①単体セルによる共振試験(以下実験1と呼ぶ)
- ②三連セルによる振動破壊実験(以下実験2と呼ぶ)

の二種類の実験を行った。

(1) 実験1の概要

実験1は、主として、セル殻継手の有無により振動時のセル中詰め慣性力の大きさが異なるのかどうかを調べることを目的とした実験である。

セル中詰めの慣性力は、中詰めの各部分の質量とその作用加速度の積の総和で表される。セル構造物のように砂(粒状体)で中詰めされていると、振動中セル中詰め砂内にひずみが発生し、中詰め内の各部分に位相差が生じるものと考えられる。したがって、中詰めの各部分の質量とその作用加速度の積の総和は、中詰め全質量と剛体として発生する加速度との積より小さくなるかと推定される。剛体として発生する加速度を基本と考えれば、セル中詰めの見掛

けの質量（すなわち中詰め有効質量）が振動中は小さくなることが予想される。

図-4.1に示したような地盤に根入れさせた単体セルを地盤の強制変位により振動させると、セル体にはセル中詰め慣性力のみが外力として作用する。この状態におけるセル体の共振振動数は、セル体の質量（あるいは見掛けの質量）と地盤のバネ係数および減衰定数により決定される。

セル形状、根入れ長、セル中詰め材料が同じ鋼鉄板セルと鋼板セルを想定し、同一地盤に根入れされた単体セルを地盤の強制変位により振動させた場合、

もし両セルの中詰め慣性力に差が生じれば、見掛けのセル中詰め質量に差が生じるため、その共振振動数に差が生じるものと考えられる。

そこで、試験1では、セル殻継手のない鋼板セル模型とセル殻継手のある継手フリーセル模型の単体セル各1体を対象として正弦波入力による共振試験を行い、両セルの共振振動数の比較を行った。

実験に際しては、両セル模型とも背面土および水の無い状態で行った。また、地盤条件および入力条件のばらつきを少なくするため、図-4.1に示すように両セル模型を同一地盤に根入れさせ同一条件で

表-4.1 試験の概要

実験の種類	実験項目	セル諸元	土質	測定項目	載荷方法	試験装置
単体セルによる共振試験（実験1）	①セル中詰め慣性力	①セル模型の種類： (a)鋼板セル模型 (b)継手フリーセル模型 ②直径：50cm ③セル高：50cm ④板厚：0.27mm ⑤セル殻：亜鉛鉄板 ⑥単体・三連の別：単体 ⑦根入れ・壁高比：1/4	①砂の種類：海砂 ②セル中詰めの内 部摩擦角： 約34° ③含水比：0.24%	①振動中の測定項目 (a)セル、地盤および振動台の加速度 ②振動後の測定項目 (a)地盤表面、セル殻および中詰め表面鉛直変位	①載荷方法： 共振試験 ②入力波形： 正弦波 ③振動台加速度： 18.0~365.6 ガル (6ステップ) ④入力振動数： 各ステップとも 5~34Hz	図-4.1 参照
三連セルによる振動破壊実験（実験2）	①セル体のせん断変形 ②中詰め、セル背面、セル底面および根入れ部前面の動土圧 ③セル殻発生応力	①セル模型の種類： (a)鋼板セル模型 (b)継手フリーセル模型 ②直径：50cm ③セル高：50cm ④板厚：0.27mm ⑤セル殻：亜鉛鉄板 ⑥単体・三連の別：三連 ⑦根入れ・壁高比：1/4, 1/2	①砂の種類： 海砂 ②セル中詰めの内 摩擦角： 約33~35° ③注水前の含水比： 0.24% ④注水後の飽和度： 82~91%	①振動中の測定項目 (a)セル、基礎地盤、背面地盤および振動台の加速度 (b)セル底面、背面、根入れ部前面および中詰め土圧 (c)セル前面壁水平変位 (d)セル殻応力 (e)間隙水圧 ②振動後の測定項目 (a)セル前面壁水平変位 (b)セル断面変形 (c)海底面、裏埋土天端、セル殻および中詰め地表面の鉛直変位	①載荷方法： 振動破壊実験 ②入力波形： 正弦波 ③振動台加速度： 20~600ガル (8ステップ) ④入力振動数： 各ステップとも セル体の共振振動数付近 (23.3~5.6Hz)	図-4.2 参照

同時に振動させた。(写真-4.1 参照)

なお、実験1では、セル体の共振振動数を推定するため、セル中詰めおよび地盤の加速度を測定した。

(2) 実験2の概要

実験2は、主として、セル殻継手の有無により振動時のセル体の動的挙動(変位、地盤反力、変形等)が異なるのかどうかを調べることを目的とした実験である。

護岸あるいは岸壁として使用される鋼矢板セルに

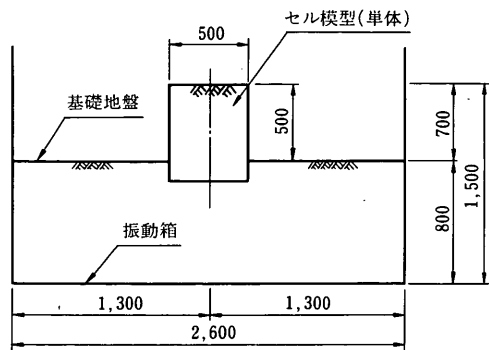


図-4.1 実験1の試験装置

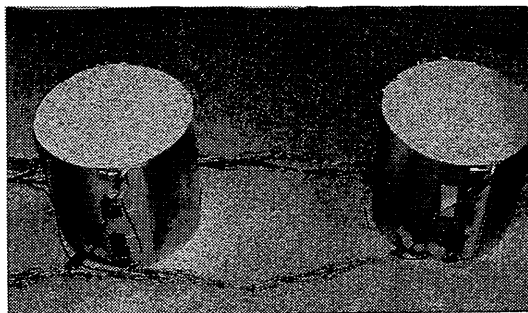


写真-4.1 実験1(単体セル模型共振試験)

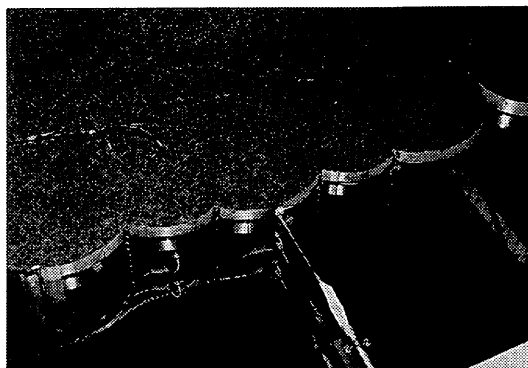


写真-4.2 実験2(振動破壊実験)

は、地震時に背面土圧、セル中詰め慣性力などが作用する。

しかしながら、地震時の鋼矢板セルの動的挙動に関する既往研究は無く、根入れのある鋼矢板セルがどのようにせん断変形するのか、あるいはせん断破壊するのかしないのかわかっていない。

一方、鋼板セルでは、野田などが、砂地盤に根入れされた鋼板セル模型に対し50~700ガルの強制振動実験を行った結果、①強制振動を受けた時の鋼板セルの外観上の挙動は剛体的であったこと、②セル護岸におおきな残留変位が生じた場合でも鋼板セルはせん断破壊していなかったこと、を報告している¹⁾。

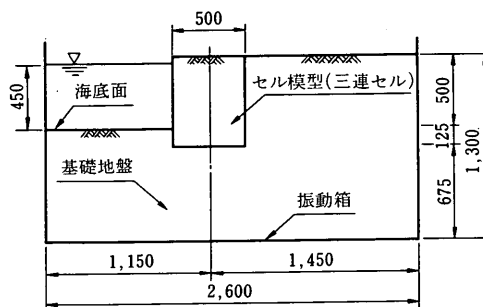


図-4.2 実験2の試験装置(D/H=1/4のセル模型の場合)

また、設計面からみると、セル殻継手の有無による振動時のセル体の動的挙動を検討する場合、

- ①振動中および振動後のセル体の全体変位(振動中および振動後のセル体水平変位)
 - ②振動中のセル根入れ部への力の伝達(セル底面土圧および根入れ部前面土圧)
 - ③振動後のセル体の変形[セル直径変化量および中詰め天端(中詰め地表面)残留鉛直変位量]
- に関し検討しておけば良いと考えられる。

そこで、実験2では、セル殻継手の有無により振動時のセル体のせん断変形が異なるのかどうかを調べるため、セル殻継手のない鋼板セル模型とセル殻継手のある継手フリーセル模型を用いて、護岸モデル(三連セル)による振動破壊実験を行ない、上記3項目に関して両セル模型で差があるのかを比較検討した。

なお、実験2は、護岸モデルを使用したためセル模型背後には裏込めをし、また水をはった状態で実験した。(写真-4.2参照)

実験2では、上記の比較項目以外に、振動中の中

詰め土圧、背面土圧およびセル殻発生応力なども測定した。

4.2 試験体

(1) セル殻模型の選定

鋼矢板セルと鋼板セルは、ともに鋼製のセル殻内を砂あるいは砂礫で中詰めした重力式構造物である。

両セルのセル殻の構成が、溶接された連続した鋼板か、継手を持つ鋼板かの相違はあるが、両者ともに中詰め土砂による内圧によってセル殻に張力を生じさせその内圧と張力の拮抗によって構造物として一体化されていると考えられる。

鋼板セルの動的挙動は、野田らにより検討されている¹⁰⁾。両セルの唯一の構造的相違はセル殻継手の有無であるので、もし両セルの動的挙動に差が生じるとすれば、セル殻継手の有無に起因すると考えて良い。

また、鋼矢板セルの継手構造の力学的要素の中でセル体の動的挙動に影響を及ぼす最大の要素は、継手摩擦係数と考えられる。

鋼矢板セルの継手摩擦係数は、現行設計法では、鋼材の摩擦係数を準用して0.3としている。一方、鋼矢板セルに適用される未使用の直線形鋼矢板を用いた継手摩擦試験（継手張力は30～150t/m）によると、鋼矢板セルの継手摩擦係数は、0.413という報告もある。また、実際に使用される直線形鋼矢板の継手摩擦係数は、継手部への土砂の混入、錆、中詰め土によるセル殻（鋼矢板）の曲がりなどにより未使用の鋼矢板に比較しかなり大きくなっているものと推定できる。

このように継手摩擦係数の実態が把握できていないため、鋼矢板の継手のモデル化は非常に困難である。

そこで、本実験では、セル殻継手の有無およびその継手摩擦係数をパラメータとして次の二つのセル模型を選定した。

- ①セル殻継手が無く継手摩擦を100%伝達する鋼板セル模型
- ②セル殻継手がありその継手摩擦を通常の鋼矢板セルより低減させた（摩擦係数を0に近づけた）継手フリーセル模型

両セル模型の試験結果を比較すれば、鋼矢板セルの構造的特徴の一つであるセル殻継手の有無によるセル体の動的挙動への影響は判断できる。

(2) 使用したセル模型

本実験で使用したセル模型の基本諸元は、直径が50cm、セル壁高が50cmである。

セル殻は、両セル模型とも亜鉛鉄板で構成されており、その板厚はおよそ1/40の縮尺モデルを想定し0.27mmとした。

鋼板セル模型は、上記の亜鉛鉄板を円形に組み、そのラップ部をハンダで接合し、作製した。

一方、継手フリーセル模型は、図-4.3に示す折り曲げ継手を持つ8枚のセル殻を円形に組立てることにより製作した。セル殻継手部には、その継手摩擦を通常の鋼矢板より低減させ摩擦係数を0に近づけるため、図-4.3に示したように嵌合した継手内にテフロンテープを入れた。この構造をもつ（テフロンテープ有り）折り曲げ継手の摩擦係数は、継手摩擦試験（写真-4.3参照）によると、図-4.4からわかるように0.127であり、通常の鋼矢板より摩擦係数を低減させるという条件を十分満たしていた。

継手フリーセル模型のセル殻の枚数（分割数）は8枚としたが、これは図-4.3に示す折り曲げ継手をもつ8分割、16分割、24分割の継手フリーセル模型による静的載荷実験により、いずれの模型においてもセル頭部水平変位、セル底面土圧およびセル前面土圧に差がほとんど無く、セル殻の分割数が継手

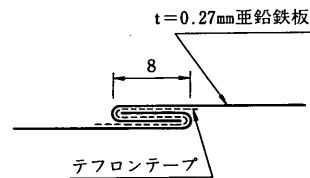


図-4.3 継手フリーセル模型の継手構造

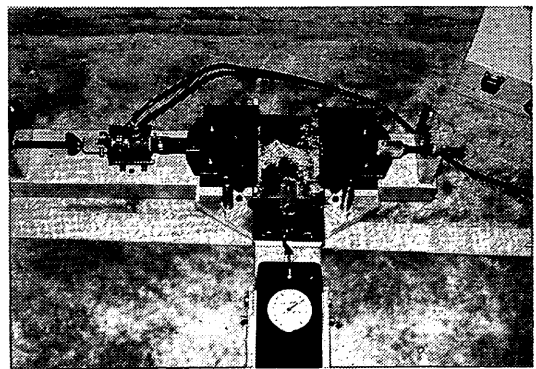


写真-4.3 継手摩擦試験

フリーセル模型の挙動におよぼす影響は小さいことを確認した上で決定した⁶⁾。根入れ・壁高比 (D/H) が $1/4$ の鋼板セル模型の構造を図-4.5に、同じく根入れ・壁高比 (D/H) が $1/4$ の継手フリーセル模型の構造を図-4.6に示した。

実験1では、上記に示す単体セル模型を使用した。実験2では、背面土のある護岸モデルを採用したため三連セル模型を使用した。

三連セル模型は、三つの本体セルとそれを連結するアーク部(連結弧)より構成される。本体セルの構造は、アーク部への連結構造部を除き、図-4.5あるいは図-4.6に示した単体セルと同じであった。

参考のため、図-4.7に根入れ・壁高比 (D/H)

が $1/4$ の三連タイプの鋼板セル模型の構造を、図-4.8に同じく根入れ・壁高比 (D/H) が $1/4$ の三連タイプの継手フリーセル模型の構造を示す。

(3) 各実験における試験体

実験1で使用した試験体を表-4.2.に示す。また、実験2で使用した試験体を表-4.3に示す。

4.3 測定項目および測定方法

(1) 測定項目および測定位置

a) 実験1の測定項目および測定位置

実験1で測定した測定項目および測定位置を表-4.4にまとめた。振動中の測定項目は、①セル

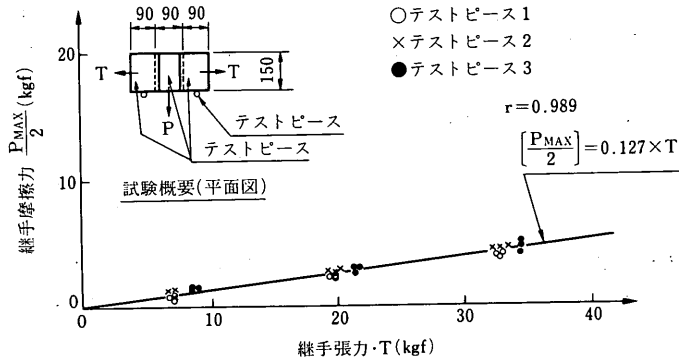


図-4.4 折り曲げ継手(テフロンテープあり)の継手摩擦係数

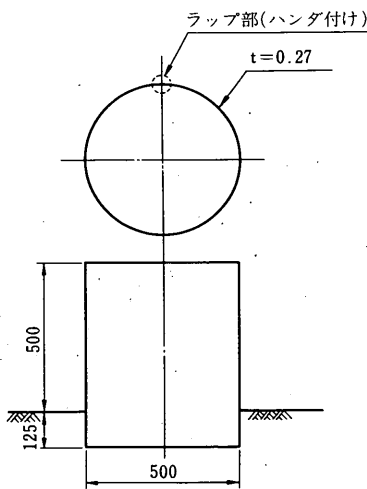


図-4.5 鋼板セル模型(単体 $D/H=1/4$)

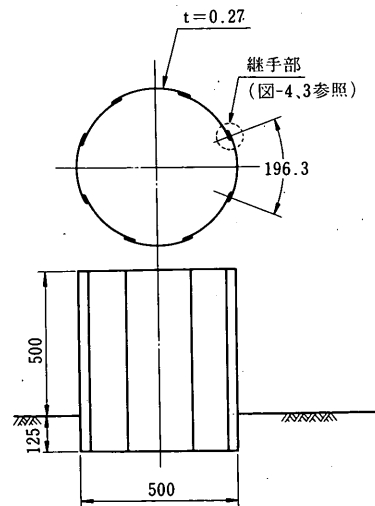


図-4.6 継手フリーセル模型(単体 $D/H=1/4$)

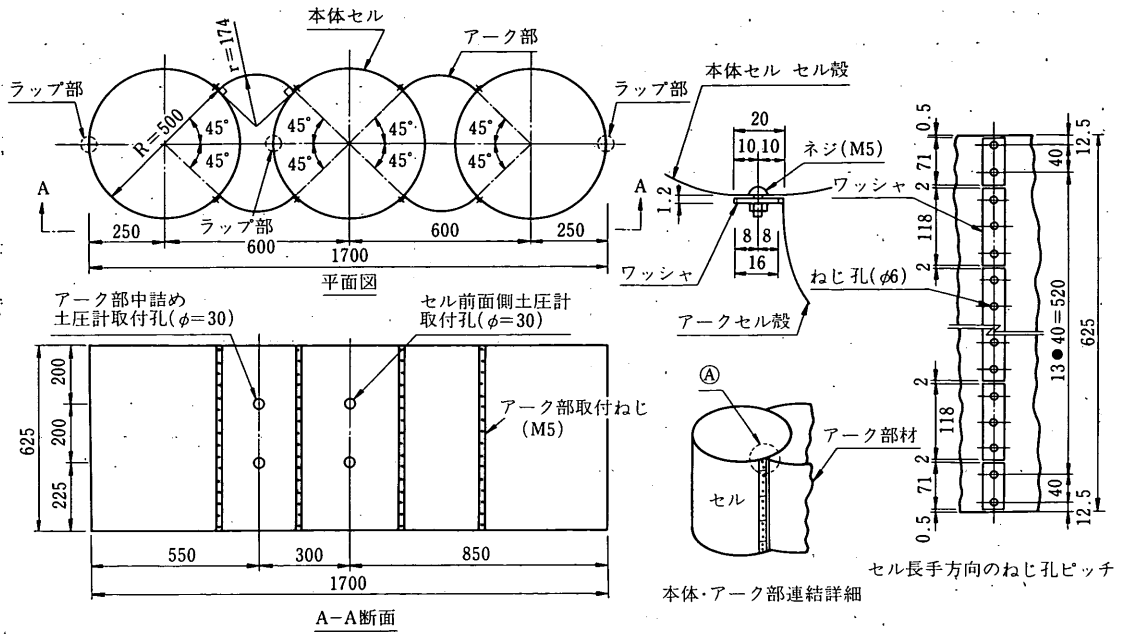
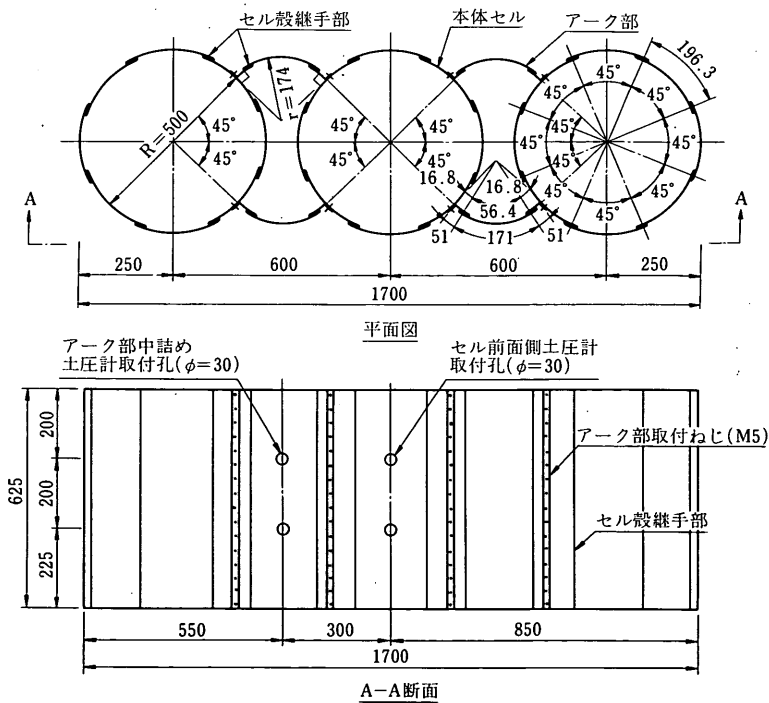


図-4.7 鋼板セル模型 (三連セル D/H=1/4)



注) 本体とアーキ部の取付けは鋼板セル模型(図-4.7参照)と同じ

図-4.8 継手フリーセル模型 (三連セル D/H=1/4)

表-4.2 試験体の種類および試験数(実験1)

セル模型の種類	根入れ・壁高比	水の有無	試験数
継手フリーセル模型	1/4	無	1
鋼板セル模型	1/4	無	1

表-4.3 試験体の種類および試験数(実験2)

セル模型の種類	根入れ・壁高比	水の有無	試験数
継手フリーセル模型	1/4	有	1
	1/2		1
鋼板セル模型	1/4		1
	1/2		1

中詰めおよびセル殻加速度, ②地盤加速度, ③振動台加速度であった。

また, 振動後の測定項目は, ①基礎地盤地表面鉛直変位, ②セル殻鉛直変位, ③中詰め地表面鉛直変位であった。なお, 振動後の測定は4.4(1)に示す各載荷ステップの終了後に行った。

b) 実験2の測定項目および測定位置

実験2の振動中の測定項目および測定位置を表-4.5にまとめた。振動中の測定項目は, ①振動台加速度, ②セル体加速度, ③前面地盤加速度, ④背面地盤加速度, ⑤セル底面土圧, ⑥セル背面土圧, ⑦根入れ部前面土圧, ⑧セル中詰め土圧, ⑨セル前面壁水平変位, ⑩セル殻円周方向応力, ⑪セル殻鉛直方向応力, ⑫過剰間隙水圧であった。

実験2の振動後の測定項目および測定位置を表-4.6にまとめた。振動後の測定項目は①セル前面壁残留水平変位, ②セル断面変形, ③海底面残留鉛直変位, ④裏埋土天端残留鉛直変位, ⑤セル殻頭部残留鉛直変位, ⑥セル中詰め地表面残留鉛直変位であった。なお, 振動後の測定は, 4.4.(1)に示す各載荷ステップの終了後に行った。

(2) 測定方法

a) 実験1の測定方法

実験1の振動中および振動後の測定項目に関する測定方法を表-4.7に, また, 振動中の加速度の測定に使用した計測機器を表-4.8に示した。

b) 実験2の測定方法

実験2の振動中の測定項目に関する測定方法を

表-4.4 測定項目および測定位置(実験1)

測定項目		測定位置
振動中の測定項目	セル中詰めおよびセル殻加速度	図-4.9 参照
	地盤加速度	
	振動台加速度	
振動後の測定項目	基礎地盤地表面鉛直変位	表-5.3 参照
	セル殻頭部鉛直変位	
	中詰め地表面鉛直変位	

表-4.5 振動中の測定項目(実験2)

測定項目	測定位置
振動台加速度	図-4.10 参照
セル体加速度	
前面地盤加速度	
背面地盤加速度	
セル底面土圧	図-4.11 参照
セル背面土圧	
根入れ部前面土圧	
セル中詰め土圧	図-4.18 参照
セル前面壁水平変位	
セル殻円周方向応力	図-4.12 参照
セル殻鉛直方向応力	
過剰間隙水圧	表-6.5 参照

表-4.6 振動後の測定項目(実験2)

測定項目	測定位置
セル前面壁残留水平変位	図-4.18 参照
セル断面変形	表-6.6 参照
海底面残留鉛直変位	図-6.37 参照
裏埋土天端残留鉛直変位	
セル殻頭部残留鉛直変位	
セル中詰め地表面残留鉛直変位	図-4.13 参照

表-4.9に示した。

また, 振動後の測定項目に関する測定方法を表-4.10に示した。

なお, 振動中の測定項目の測定には実験1と同じ計測機器を使用した。(表-4.8参照)

表-4.7 測定方法(実験1)

測定項目		測定方法
振動中の測定項目	セル中詰めおよびセル殻加速度 地盤加速度 振動台加速度	加速度計(ASW-2GA(共和電業製), A5-5(株)エスエスケイ製)により測定した。なお, 土中に加速度計を設置する場合は, 図-4.14に示した収納箱にいれた。
振動後の測定項目	基礎地盤地表面鉛直変位	図-4.15に示した沈下測定計を使用して測定した。
	セル殻頭部鉛直変位 セル中詰め地表面鉛直変位	図-4.15に示した沈下測定計を使用して測定した。

表-4.8 計測機器

分類	名称	型式	数量	適用
増幅器	動ひずみ測定器	共和電業 DPM 310A	12ch	加速度, 動土圧, セル殻応力および間隙水圧の測定
		〃 DPM 310B	5ch	
〃 DPM 311A		21ch		
〃 DPM 305A		1ch		
〃 DPM 305B		6ch		
	直流アンプ	共和電業 CDA 230A	3ch	振動中のセル前面壁の水平変位の測定
記録装置	記録装置	横河電機 YHP 1000 システム	1式	加速度, 動土圧, セル殻応力およびセル前面壁の水平変位の各データの記録およびデータ処理
	データレコーダ	ティアック XR-50	1台	セル殻応力のデータ記録
	電磁オシログラフ	三栄測器 5L33	2台	間隙水圧のデータ記録 加速度, 動土圧, セル前面壁水平変位, セル殻応力および間隙水圧の測定値のモニター

表-4.9 振動中の測定項目の測定方法(実験2)

測定項目	測定方法
振動台加速度 セル体加速度 前面地盤加速度 背面地盤加速度	加速度計〔ASW-2GA(共和電業製)〕, A5-5(株エスエスケイ製)により測定した。 土中に加速度計を設置する場合は図-4.14に示す収納箱に入れた。
セル底面土圧	土圧計(BE-1KM, 定格容量1kgf/cm ² , 共和電業製)により測定した。なお、土圧計はセル底面の地盤内に直接設置した。
セル背面土圧	土圧計(P-325F, 定格容量0.5kgf/cm ² , 株エスエスケイ製)により測定した。土圧計は図-4.16に示すようにセル殻に取付けた。
根入れ部前面土圧	土圧計(P-325F, 定格容量1kgf/cm ² , 株エスエスケイ製)により測定した。土圧計は図-4.16に示すようにセル殻に取付けた。
セル中詰め土圧	土圧計(P-325FV, 定格容量0.5kgf/cm ² , 株エスエスケイ製)により測定した。土圧計は図-4.17に示すようにセル殻に取付けた。
セル前面壁水平変位	水中変位計(M-11-100S, 株宝電研製)により測定した。水中変位計は図-4.18に示すように取付けた。
セル殻円周方向応力 セル殻鉛直方向応力	防水型一軸ひずみゲージ(WFLA-6-5LT, 東京測器製)により、測定した。ひずみゲージは一測点につきセル殻の内外面に各一枚、計二枚をはったが、各測点のひずみは内外面のひずみ計を直列に接続すること(いわゆる2ゲージ法)により、平均的な値を測定した。
過剰間げき水圧	間げき水圧計〔PM10-01-OS(定格容量0.1kgf/cm ²), PM10-02-OS(定格容量0.2kgf/cm ²)ともにST研究所製〕により測定した。

表-4.10 振動後の測定項目の測定方法(実験2)

測定項目	測定方法
セル前面水平変位	水中変位計(M-11-100S, 株宝電研製)により測定した。水中変位計は図-4.18に示すように取付けた。
セル断面変形	測定位置をセル殻に予めマーキングし、その測点間の距離をスケールにより測定した。
海底面鉛直変位	図-4.15に示す沈下測定計により測定した。
裏埋土天端鉛直変位 セル殻頭部鉛直変位 セル中詰め地表面鉛直変位	図-4.15に示す沈下測定計により測定した。

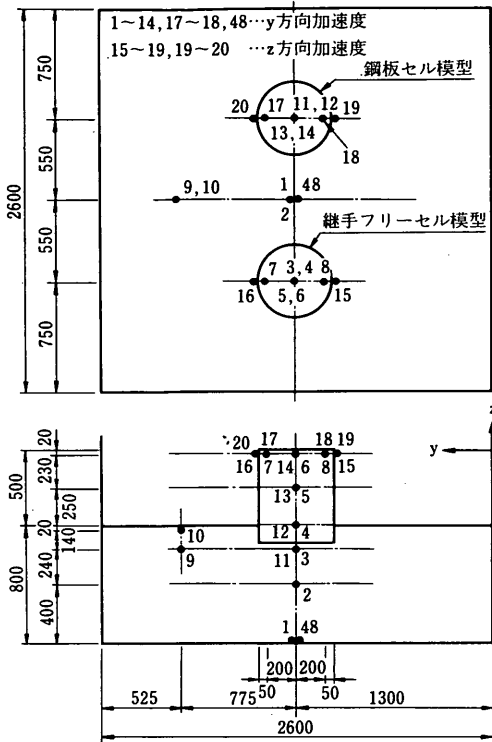


図-4.9 加速度の測定位置 (実験1)

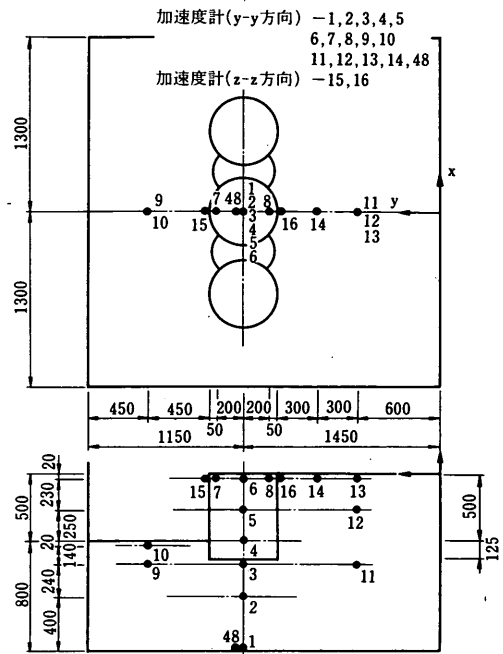


図-4.10 加速度の測定位置 (根入れ、壁高比 1/4のセル模型の場合、実験2)

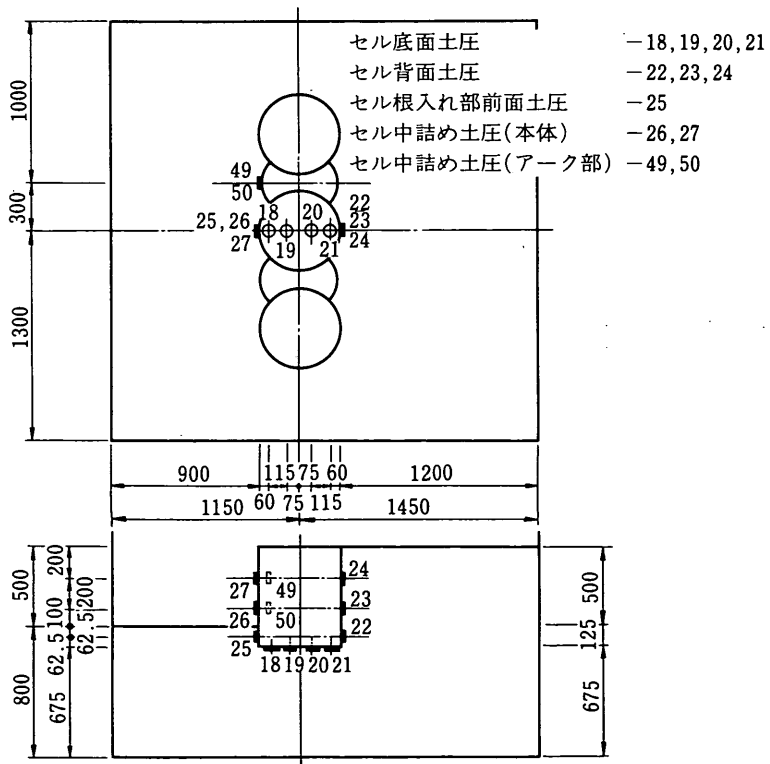


図-4.11 土圧測定位置 (根入れ、壁高比 1/4のセル模型の場合、実験2)

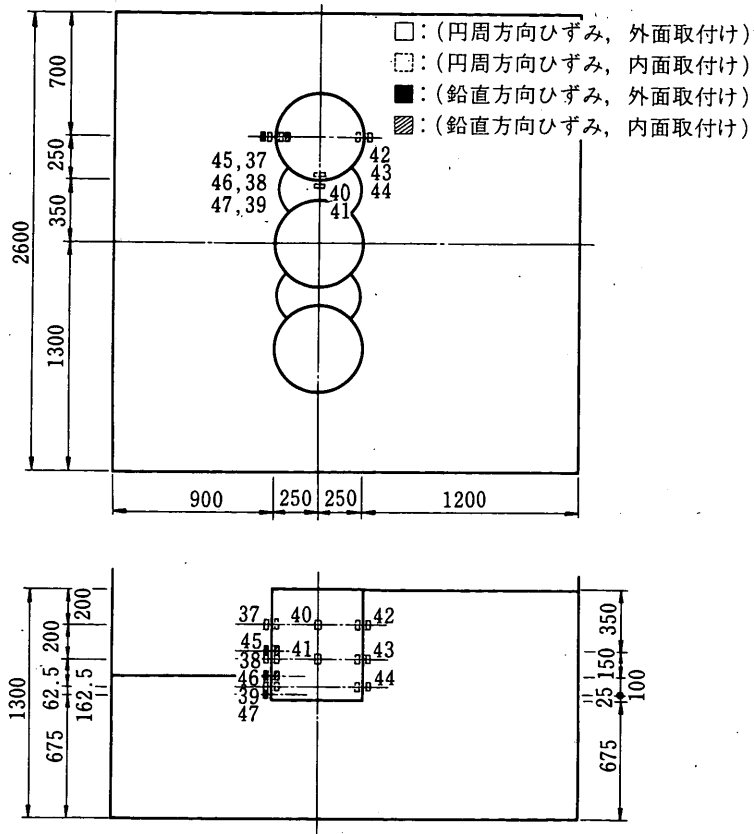


図-4.12 セル殻ひずみ測定位置 (根入れ, 壁高比1/4のセル模型の場合, 実験2)

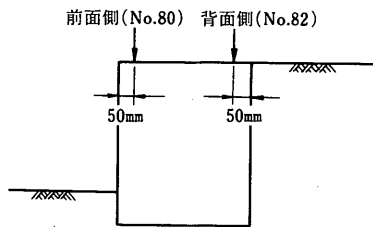


図-4.13 セル中詰め地表面残留鉛直変位 測定位置 (実験2)

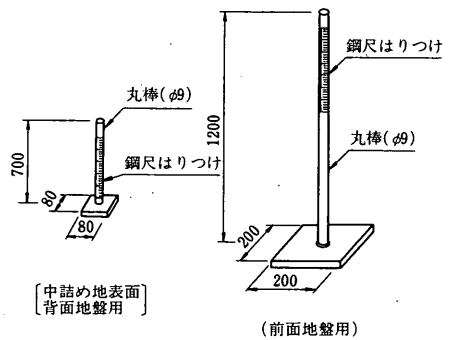


図-4.15 沈下測定計

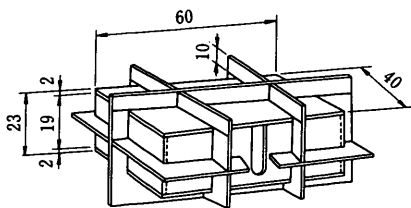


図-4.14 加速度計収納箱

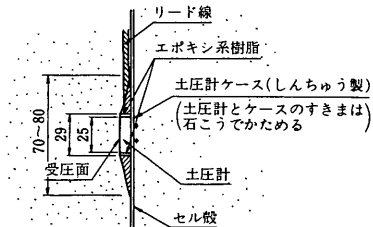


図-4.16 背面土圧, 根入れ部前面土圧, 測定用土圧計の取付方法

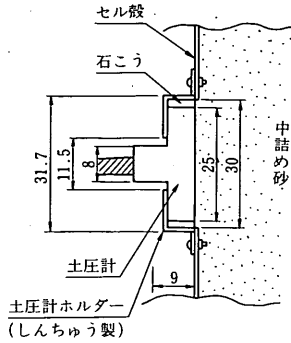


図-4.17 セル中詰土圧，測定用土圧計の取付方法

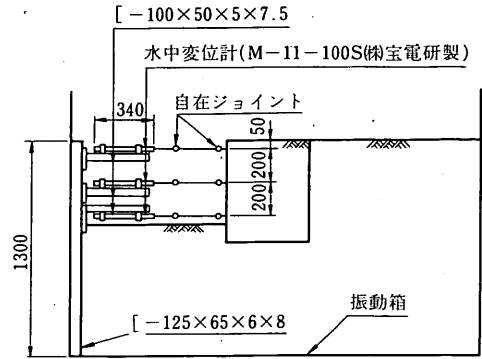


図-4.18 セル前面水平変位 測定方法

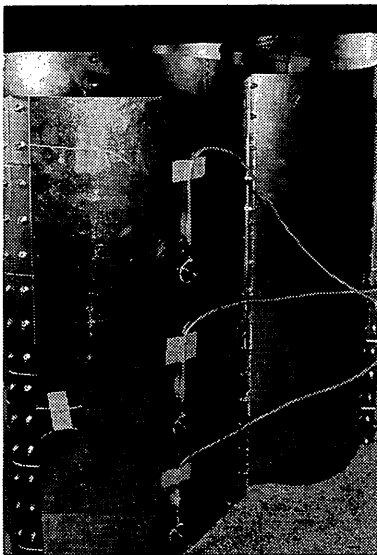


写真-4.5 背面土圧，根入れ部前面土圧測定用土圧計の取付け

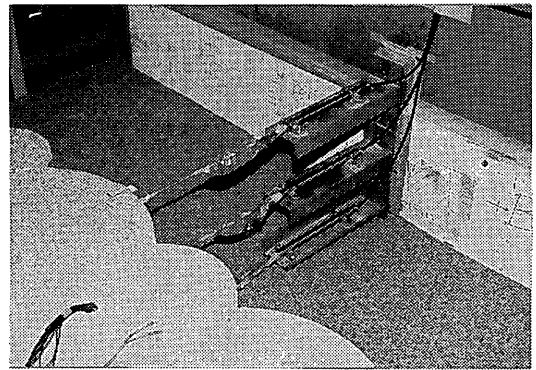


写真-4.6 セル前面水平変位測定方法

4.4 加振方法

(1) 加振方法

a) 実験1の加振方法

実験1は、先にも述べたように、単体セル模型の共振振動試験である。セル殻継手の有無により単体セルのセル体共振振動数が異なるのかどうかを試験するため、振動台入力加速度の大きさを变化させて共振試験を行った。

鋼板セル模型と継手フリーセル模型は、セル体の振動条件に影響を与える作成地盤条件のばらつき、入力条件のばらつきなどを少なくするため、図-4.19に示したように、同一地盤に根入れさせ、同一条件で同時に加振した。なお、セル模型は、単体セル模型の共振試験であることから背面土の

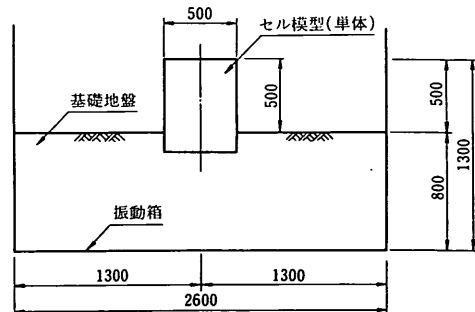
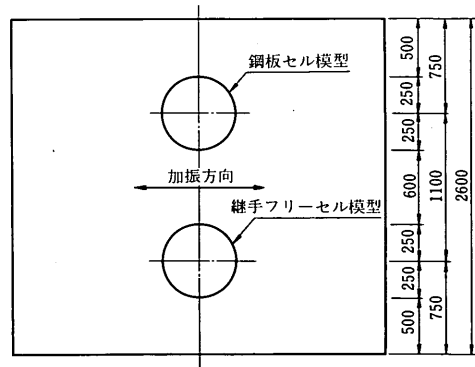


図-4.19 試験装置の概要 (実験1)

無い状態で実験しており、また、振動中の外力をセル中詰めめの慣性力のみとするため、水をはらない状態で実験した。

実験1の加振条件を表-4.11に示した。

振動台への入力は、正弦波とした。その加振ステップは、振動台加速度の大きさを18.0~365.6ガルまで変化させ6ステップとした。また、各加振ステップにおける入力振動数の範囲はおおむね5~34Hzとした。入力振動数のピッチは1Hzを基本としたが、セル体の加速度の変化量の多い周波数帯は、そのピッチを0.5Hzとした。また、各振動数ごとの入力波数は9波とした。

表-4.11 実験1の入力条件

載荷ステップ	振動台の平均入力加速度 (gal)	入力振動数の範囲 (Hz)	入力波数
第1ステップ	18.0	5.0 ~ 37.7	各振動数 毎9波
第2ステップ	46.5	5.0 ~ 37.7	
第3ステップ	93.7	5.0 ~ 33.7	
第4ステップ	190.5	5.0 ~ 33.7	
第5ステップ	291.1	3.0 ~ 33.7	
第6ステップ	365.6	4.0 ~ 33.7	

b) 実験2の加振方法

実験2は、先にも述べたように、護岸モデルの振動破壊実験である。セル殻継手の有無により振動中、振動後のセル体の動的挙動（変位、地盤反力、変形など）が異なるのかどうかを試験するため、振動台加速度を20~600ガルまで変化させた振動実験を行った。

本実験は、実物のセル構造物の使用条件に近づけるため 図-4.20に示すように背面土があり、かつ水をはった状態で実験した。

また、本実験が護岸モデルの振動破壊実験であることから、セル体への入力は、できるだけセル体が共振状態に近くなるように設定した。

表-4.12に実験2の加振条件を示した。

振動台の入力加速度を20~600ガルまで変化させ、8ステップの入力を行った。各加振ステップの入力振動数は、予備実験の測定結果にもとづきもとめられたセル体の共振振動数とした。また、各載荷ステップごとの入力波数は9波とした。

参考のため各加振ステップの入力振動数の設定方法を次に示す。

①予備実験では、継手フリーセル模型のモデル化が若干異なるものの、根入れ・壁高比を1/4とした鋼板セル模型と継手フリーセル模型を各1体ずつ試験した。試験は実験2と同じ護岸モデルを使用して、振動台加速度を10ガル程度とした掃引試験および振動台加速度を20~600ガル程度まで変化させた共振試験を行った。その結

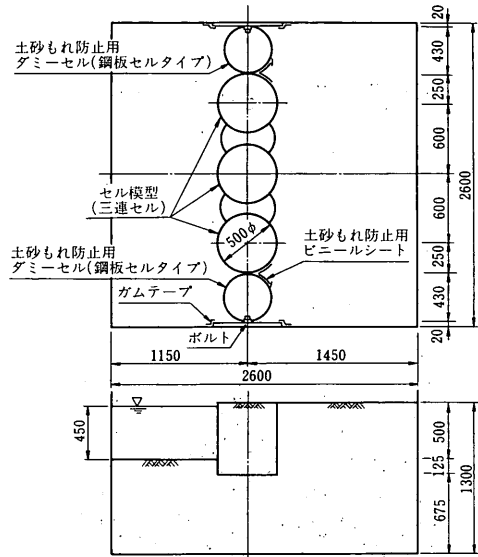


図-4.20 試験装置の概要（実験2、D/H=1/4のセル模型の場合）。

表-4.12 実験2の入力条件

載荷ステップ	入力水平加速度	入力振動数(注)	入力波数
第1ステップ	20 gal	23.3 Hz	各載荷ステップごとに9波
第2ステップ	50 gal	20.1 Hz	
第3ステップ	100 gal	16.2 Hz	
第4ステップ	200 gal	11.4 Hz	
第5ステップ	300 gal	8.7 Hz	
第6ステップ	400 gal	7.2 Hz	
第7ステップ	500 gal	6.1 Hz	
第8ステップ	600 gal	5.6 Hz	

注) 各入力ステップのセル体共振振動数は、掃引試験の共振振動数と表-4.13に示す推定低減係数にもとづき推定した。

セル体の共振振動数は、セル天端加速度の加速度応答倍率曲線が最大となる振動数、あるいはセル天端加速度と入力加速度の位相差が90°程度となる振動数と仮定し、整理した。その結果、セル体の共振振動数は、セル背面地盤の共振振動数とほぼ一致することが明らかになった。

なお予備実験では、300 ガルを超えた入力加速度では上記の条件を満たす振動数が明確でなかったため、以下の方法で推定した。まずセル体の共振時の背面地盤最大せん断ひずみを推定し、地盤のせん断剛性低下率～せん断ひずみの関係グラフからその時のせん断剛性を求め、背面地盤の共振振動数を推定した。セル体の共振振動数は、ほぼ背面地盤の共振振動数に一致することが分かっているので、その背面地盤の共振振動数を推定値とした。

②掃引試験によるセル体の共振振動数と各入力レベル毎の共振振動数の比、すなわち掃引試験によるセル体の共振振動数を1.0とした時の各入力レベル毎のセル体の共振振動数の低減率を求めた。(表-4.13, 図-4.21参照)

③実験2で最初に試験したD/H = 1/4の鋼板セル模型の掃引試験の結果と表-4.13に示したセル体の共振振動数の低減率にもとづき、各入力レベルごとのセル体の共振振動数を推定し、その推定振動数を「入力振動数」と設定した。

(2) 振動試験機の性能

振動試験機の性能の概要を表-4.14に示した。

表-4.13 セル体共振振動数の推定低減率

ステップ番号	入力水平加速度	共振振動数の推定低減率
0	掃引試験(10gal)	1.0
1	20 gal	0.88
2	50 gal	0.76
3	100 gal	0.61
4	200 gal	0.43
5	300 gal	0.33
6	400 gal	0.27
7	500 gal	0.23
8	600 gal	0.21

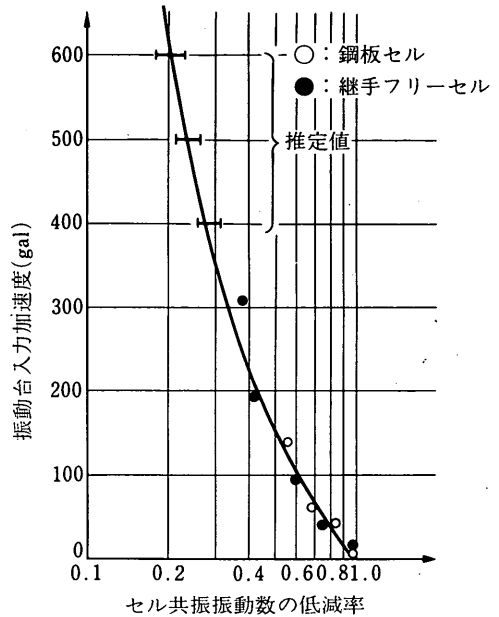


図-4.21 入力加速度とセル体共振振動数低減率関係曲線(予備試験結果にもとづく)

表-4.14 試験機の性能

項目	性能	項目	性能
振動台面積	3 m × 3 m	最大速度	19cm/sec
最大搭載重量	30トン	最大振幅	±50mm
最大加振力	30 ton-g	振動数の範囲	0.3 ~ 50 HZ
加振方向	水平一方向	駆動方式	電気油圧サーボ方式

4.5 地盤の作成方法

(1) 実験1の地盤作成方法

a) 地盤作成手順

実験1における地盤作成手順を図-4.22に示した。

まず、①～③までの基礎地盤を作成した。次に、鋼板セル模型と継手フリーセル模型を地盤上に設置した。④および⑤のセル中詰めをしたのち、⑥の基礎地盤を作成した。最後に、⑦～⑩のセル中詰めをした。なお、加速度計は、地盤地表面の高さが所定の位置になったときに設置した。

b) 基礎地盤の作成方法

基礎地盤は、乾燥砂を図-4.23に示す投入シューター付バケットを使用して振動箱の中に投入す

ることにより作成した。砂の投入時は、各層の砂の投入条件（時間当たりの投入量および砂の落下速度）を一定にするため、バケットのバルブの開口幅を一定にし、バケットのバルブの高さを地盤地表面より約3.0mと一定に保った。また、投入時の砂粒子の分散をはかるため、図-4.24に示す板を使用した。この板によるエネルギー損失を少なくするため、この板は、砂の飛び出し角をわずかに変化させる程度の角度に保った。（写真-4.4参照）

なお、①、②、③および⑥の各層の作成後、図-4.25に示す「たこ」を使用して地盤の締固めを

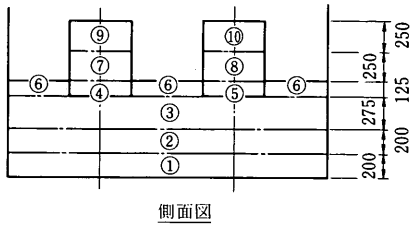


図-4.22 地盤作成手順（実験1）

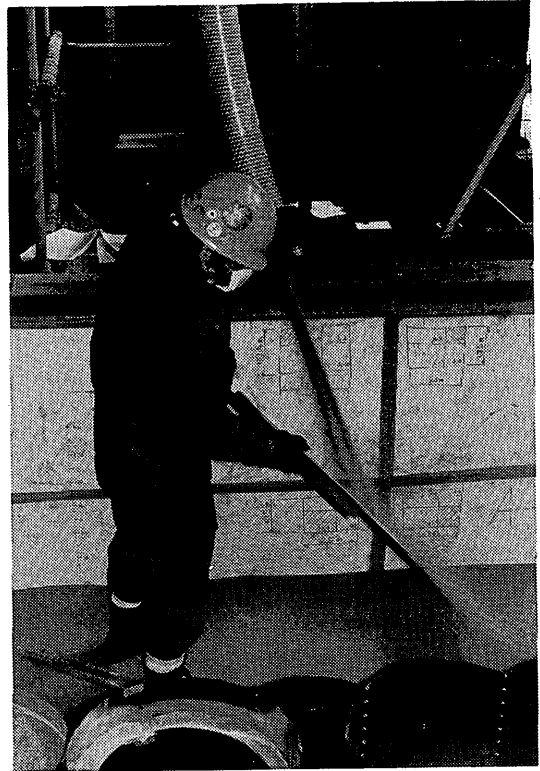


写真-4.4 基礎地盤の作成

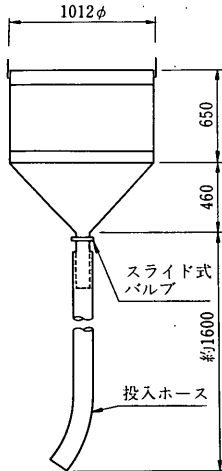


図-4.23 砂投入用バケット

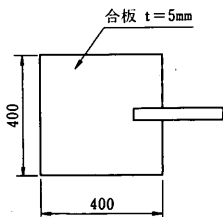


図-4.24 砂散布用板

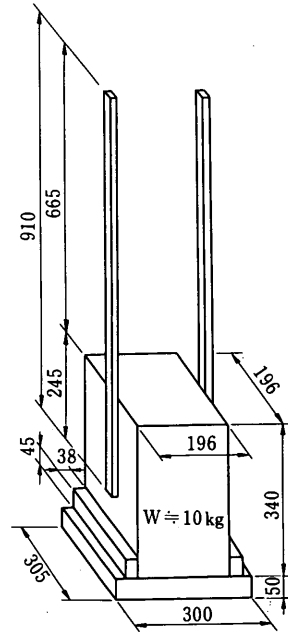


図-4.25 地盤締固め用タコ

行った。地盤の締固めは、「たこ」を40cm程度自由落下させることにより行い、各層とも「二回り」（一回りとは 地盤地表面の面積を「たこ」の接地面積で割った数程度の落下回数により、地盤地表面全体をまんべんなく締固めを行うことを指す）ずつ行った。

c) セル殻の設置方法

セル殻は、地盤地表面の所定の位置に人力で設置した。なお、セル殻内にはセル殻設置中および中詰め中の変形を防止するため木製のドーナツ型治具をいれた。またセル天端高は、振動箱の側壁からはりだしたみず糸で確認した。

d) 中詰め方法

セル中詰めは、基礎地盤の作成方法と同様に、乾燥砂を図-4.23に示す投入シューター付バケットを使用してセル内に投入することにより作成した。なお、中詰め時のバケットのバルブの開口幅は、基礎地盤を作成する時に比べ狭め、また、セル中詰めに関しては締固めを行わなかった。

e) 地盤の管理方法

基礎地盤および中詰め時の作成状態は、単位体積重量で管理した。そのため、各層の出来上がり高さ（体積）および砂の投入重量を測定した。

また、「板たたき法」により、基礎地盤の弾性波速度を、スウェーデン式貫入試験器により基礎地盤のN値（換算N値）を測定した。

(2) 実験2の地盤作成方法

a) 地盤作成手順

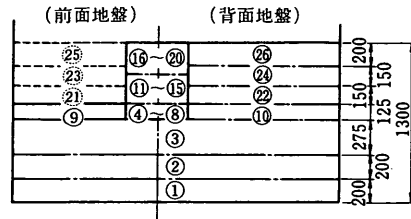
実験2で使用した地盤の作成手順を図-4.26（D/H = 1/4のセル模型の場合）に示した。

まず、①～③までの基礎地盤を作成した。次に、セル模型を地盤上に設置した。④～⑧のセル中詰めをしたのち、⑨および⑩の基礎地盤を作成した。

次に、⑪～⑳のセル中詰めをした。最後に背面土⑳、㉑、㉒を作成した。背面地盤は、背面地盤のみ作成すると地盤の締固めの際セル体が前面側に傾斜するおそれがあるため、㉑、㉒、㉓の前面地盤も同時に作成し、前・背面地盤ができあがったのち、前面側を掘削することにより作成した。

なお、加速度計、セル底面土圧計および間隙水圧計は、地盤地表面の高さが所定の位置に達した

ところで設置した。



側面図

注) 前面土(㉑ ㉒ ㉓)は背面土作成後掘削

図-4.26 基礎作成手順（実験2）

(D/H = 1/4 のセル模型の場合)

b) 基礎地盤の作成方法

基礎地盤は実験1と同じ方法で作成した。

なお ①, ②, ③および⑨, ⑩の各層の作成後、実験1と同じ方法で地盤の締固めを行った。

c) セル殻の設置方法

セル殻は、地盤地表面の所定の位置に、木製の吊り治具を使用してクレーンで設置した。

なお、本体セルのセル殻内にはセル殻設置中および中詰め中の変形を防止するため木製のドーナツ型治具をいれた。

d) 中詰めの方法

セル中詰めは、実験1と同じ方法で行った。なお、セル中詰めは、同様に、締固めを行わなかった。また本体セル中詰めは、アーク部の中詰めに先行させた。

e) 背面地盤の作成方法

背面地盤は、(1)の作成手順で述べたように背面地盤のみ作成すると、地盤の締固めの際セル体が傾斜するおそれがあるため、前面地盤も同時に作成し、前・背面地盤ができあがった後、前面側をスコップで掘削排土することにより作成した。

なお、砂の投入方法および締固めは、基礎地盤の作成方法と同じ方法で行った。

f) 注水および養生

地盤を作成し水中変位計、加速度計等の計測機器を設置した後、地盤への注水を行った。注水はセル模型の上に移動足場を組み、前面地盤側より行った。また、注水時の水の圧力による地盤の乱

れを少なくするため、散水には家庭用のシャワー蛇口を用いた。

地盤の養生は、この状態で3日間放置することにより行った。

g) 地盤の管理方法

基礎地盤、背面地盤および中詰め of 作成状態は、単位体積重量で管理した。そのため、各層の出来上がり高さ（体積）および砂の投入重量を測定した。

また、基礎地盤および背面地盤の作成状態は、地盤の貫入試験、弾性波試験および掃引試験でも確認した。

貫入試験は、注水後試験を始める直前に、背面地盤上で2箇所スウェーデン式貫入試験器により行った。弾性波試験は、同じく注水後試験を始める直前に背面地盤上で行った。地盤の弾性波は、図-4.27に示すいわゆる「板たたき法」により測定した。なお、弾性波速度は、測定番号11および12の加速度計間の距離およびせん断波の伝達時間を用いて算定した。

また、弾性試験後実施した掃引試験では、10ガル程度の振動台入力加速度により、セル体および背面地盤の共振振動数を確認した。

地盤および中詰め of 飽和度は、出来上がり体積と注水量とでその平均的な値を推定した。また、注水前に埋めこんだ10cm×10cm×10cmの内容量を持つ底付の鋼製角弁3個（背面側2個、前面側1個）を養生後とりだし確認試験を行うことによっても、飽和度をチェックした。なお、いずれの方法も測定精度は低く、その値は参考にとどまる。

h) 振動箱側壁面に接するセル模型端部の処理

振動箱側面付近の地盤は、振動中、振動箱の側面抵抗により拘束される可能性がある。そこで、振動箱の側面抵抗によるセル模型背面地盤への影響を低減するため、セル模型の幅と振動箱の幅の調整もかねて、振動箱側面には図-4.20に示すダミーセルを取り付けた。ダミーセルは、振動中、振動箱側面付近の地盤振動の拘束を増加させないよう、セル模型とおなじ程度の剛性をもたせた。また、セル模型の端部の拘束は、このダミーセルとセル模型の縁を切ることにより処理した。なお、ダミーセルは、試験後変位あるいは変形している可能性があったので、試験毎に新たに作成した。

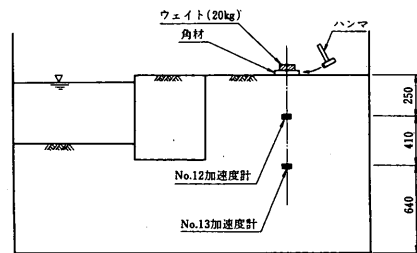


図-4.27 地盤の弾性波試験（板たたき法）(実験2)

4.6 使用した砂

実験1および実験2では、「鹿島4号」と呼ばれる粒度調整された海砂を使用した。この砂の50%粒径は0.7mmであり、最大粒径は2.0mmであった。また、均等係数は1.5であり、図-4.28に示したこの砂の粒度加積曲線よりわかるように非常に粒径のそろった砂である。

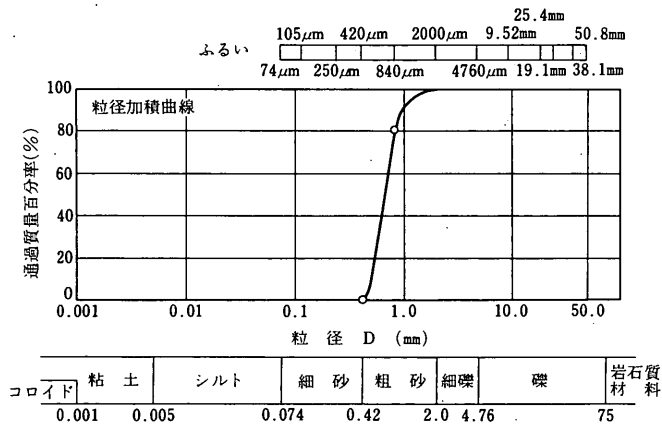


図-4.28 粒径加積曲線

なお、シルト分および粘土分は含まれていない。
注水前の砂の含水比は0.24%であり、ほとんど乾燥状態であった。

三軸CD試験（拘束圧は0.5, 1.0, 1.5kgf/cm²）により得られたこの砂の内部摩擦角と、間隙比とを図-4.29に示した。

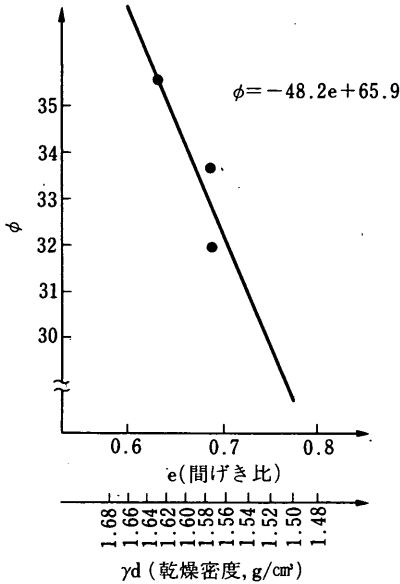


図-4.29 砂の内部摩擦角と間隙比の関係

4.7 基礎地盤、中詰めおよび背面地盤の性状

(1) 模型地盤の性状

a) 実験1の地盤の性状

実験1で作成した基礎地盤およびセル中詰めの単位体積重量を表-4.15に示した。

継手フリーセル模型のセル中詰めの単位体積重量は1.60g/cm³であり、鋼板セル模型は1.59g/cm³であり、両セル模型の値はほとんど一致していた。

また、試験前に行った「板たたき法」による砂の弾性波速度（せん断波）の測定結果を表-4.16に示した。弾性波速度は、9番と3番あるいは9番と11番の加速度計（測定位置は図-4.9参照）の加速度波形を用いて算定した。同表によると、試験1の作成地盤の弾性波速度は、平均すると217m/secであった。

また参考のため、スウェーデン式貫入試験器による地盤の貫入試験結果を図-4.30に示した。なお、貫入試験の結果は換算N値で表し、換算N値の算定には、次式を用いた¹¹⁾。

表-4.15 地盤およびセル中詰めの単位体積重量（実験1）

	単位体積重量 (g/cm ³)	備考
基礎地盤	1.63	—
継手フリーセル模型	1.60	D = 500mm
鋼板セル模型	1.59	D = 499mm

表-4.16 地盤の弾性波速度（実験1）

	第1回	第2回	第3回	平均
弾性波速度 (m/sec)	211	161	279	217

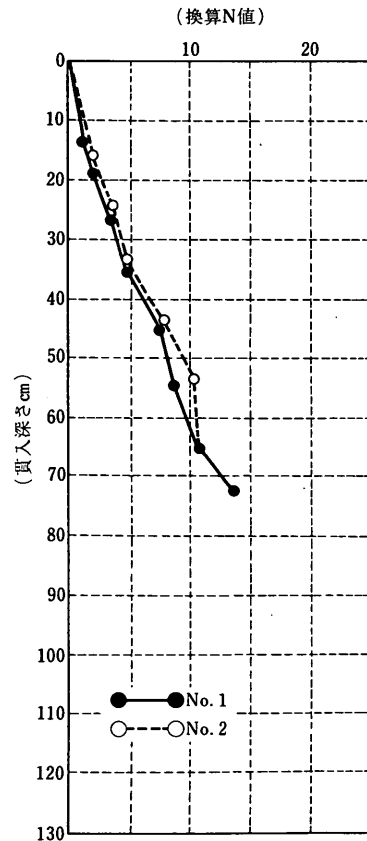


図-4.30 模型地盤のN値（実験1）

$$N = 0.02W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad \dots(4.1)$$

ここに

N : 換算N値

W_{sw} : 貫入試験器および重すいの重量 (kg)

N_{sw} : 貫入深さ1m当たりの半回転数 (回)

b) 実験2の地盤の性状

実験2で作成した基礎地盤、背面地盤およびセル中詰め単位体積重量を表-4.17に示した。同表によると、基礎地盤の単位体積重量は1.59~1.62g/cm³であり、背面地盤の単位体積重量は1.59~1.61g/cm³であった。基礎地盤および背面地盤の単位体積重量は、若干のばらつきがあったものの、

全ケースとも1.6g/cm³程度に収まっていた。またセル中詰め単位体積重量は1.58~1.62g/cm³であり、セル中詰め内部摩擦角は33~35°であった。

図-4.31に、注水後、試験前に背面地盤上(2箇所)で行ったスウェーデン式貫入試験器による地盤の貫入試験結果を示した。同図によると、若干のばらつきはあるものの、全ケースの基礎地盤

表-4.17 地盤およびセル中詰め単位体積重量(実験2)

セル模型の種類	セル模型の根入れ壁高比 D/H	基礎地盤の単位体積重量 γd (g/cm ³)	背面地盤の単位体積重量 γd (g/cm ³)	セル中詰め単位体積重量 γd (g/cm ³)	(備考)セル中詰め単位体積重量の算定に使用したセル模型の平均直径(実測値)(mm)
鋼板セル模型	1/4	1.62	1.58	1.59	500
	1/2	1.59	1.60	1.60	501
継手フリーセル模型	1/4	1.59	1.62	1.61	498
	1/2	1.61	1.61	1.59	497

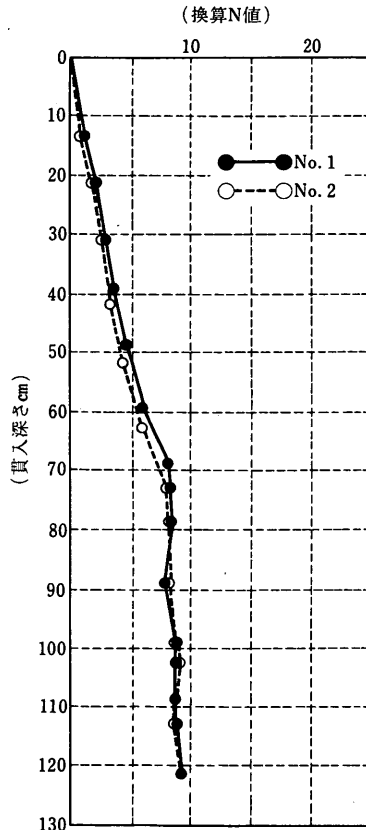


図-4.31 模型地盤(背面地盤)のN値(実験2)
継手フリーセル模型, D/H=1/4

および背面地盤は、ほぼ同様な締固め状態であったと見てよい。

表-4.18には、試験前に行った「板たたき法」による砂の弾性波速度(せん断波)の測定結果を示した。各セル模型の地盤の弾性波速度は、平均値で表すと128~138m/secであり、弾性波速度の測定結果からみても、ほぼ同様な締固め状態であったと推定される。

また、表-4.19には、試験前に行った掃引試験による各セル模型のセル体および背面地盤の共振振動数を示した。掃引試験は、振動台加速度を10ガルとして行った。また、セル体および背面地盤の共振振動数は、セル天端付近に埋込んだ加速度計(測点番号6)および背面地盤表面に埋込んだ加速度計(測点番号13)の加速度応答倍率が最大となる振動数とした。同表によると、セル体および背面地盤の共振振動数は、26.0~26.5Hzであった。この結果からも、各セル模型の作成地盤は、ほぼ同様な締固め状態であったといえる。

なお、模型地盤を均一な弾性地盤とし、振動箱底面から背面地盤表面までの深さをもつ水平地盤と仮定するならば、地盤の弾性波速度より次式を用いて背面地盤の共振振動数を推定できる。

$$f_r = V_s / 4h \quad \dots(4.2)$$

ここに

f_r : 共振振動数 (Hz)

V_s : 地盤の弾性波速度 (m/sec)

h : 地盤の深さ $h=1.3m$

各セル模型の模型地盤の弾性波速度が、平均値で表すと128 ~138m/secであったので、上式を用いて背面地盤の共振振動数を推定すると、24.6~26.5Hzとなる。この推定値は、掃引試験による試験結果(26.0~26.5Hz)と良い一致を示しているため、掃引試験による共振振動数は妥当性があると考えられる。表-4.20には、地盤の飽和度の測定結果を示した。

(2) 試験前および試験後の地盤性状の変化

a) 実験1の地盤性状の変化

試験前および試験後の地盤性状の変化は、試験前および試験後のスウェーデン式貫入試験結果の比較によりおこなった。

試験前の貫入試験結果と試験後の結果とでは、あまり差が認められなかった。

b) 実験2の地盤性状の変化

試験前および試験後の地盤性状の変化は、実験1と同様に、試験前および試験後のスウェーデン式貫入試験結果の比較によりおこなった。試験後の結果は、背面地盤で若干N値が小さくなり基礎地盤底面付近でN値の増加が見られた。

表-4.18 地盤の弾性波速度 (実験2)

模型の種類	D/H	弾性波速度 (m/sec)					
		第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	平均
鋼板セル模型	1/4	141	141	136	93	137	130
	1/2	137	128	124	178	124	138
継手フリーセル模型	1/4	114	137	-	164	128	136
	1/2	114	121	137	141	128	128

注) - : 波形が乱れているため、判読不能であった。

表-4.19 掃引試験によるセル体および背面地盤の共振振動数

模型の種類	セル模型の根入れ		共振振動数 (Hz)	
	壁高比	D/H	セル体	背面地盤
鋼板セル模型	1/4		26.5	26.5
	1/2		26.0	26.0
継手フリーセル模型	1/4		26.5	26.5
	1/2		26.5	26.5

表-4.20 地盤の飽和度 (実験2)

模型の種類	D/H	水の投入量にもとづく地盤の平均的飽和度 (%)	角ますの測定結果にもとづく地盤の飽和度 (%)		
			No.1	No.2	No.3
鋼板セル模型	1/4	85	82	85	84
	1/2	83	88	81	83
継手フリーセル模型	1/4	91	91	85	86
	1/2	80	88	82	83

5. 単体セルによる共振試験 (実験1)

5.1 入力加速度

実験1では、模型地盤性状のばらつき、セル体への入力加速度のばらつきを少なくするため、継手フリーセル模型と鋼板セル模型を同一地盤に根入れさせ、2体を同一の入力条件で同時に試験した。したがって、両セル模型への入力条件は、ほとんど同じであったと考えてよい。

各载荷ステップの振動台の平均入力加速度 (測定番号1) および入力振動数の範囲、入力波数を表-5.1に示した。

表-5.1 入力条件 (実験1)

载荷ステップ	振動台の平均入力加速度 (gal)	入力振動数の範囲 (Hz)	入力波数
第1ステップ	18.0	5.0 ~ 37.7	各振動数 毎9波
第2ステップ	46.5	5.0 ~ 37.7	
第3ステップ	93.7	5.0 ~ 33.7	
第4ステップ	190.5	5.0 ~ 33.7	
第5ステップ	291.1	3.0 ~ 33.7	
第6ステップ	365.6	4.0 ~ 33.7	

5.2 応答加速度

(1) 加速度応答倍率

a) 測定結果

振動台入力加速度（測定番号1）に対する基礎地盤およびセル体の加速度の応答倍率を求めた。

基礎地盤加速度は、地盤表面付近の加速度（測定番号10）で代表させ、その加速度応答倍率を図-5.1に示した。

継手フリーセル模型のセル体の加速度は、図-4.9に示すセル天端付近の中詰め加速度（測定番号6）とセル高の1/2の位置（地盤表面より25cmの位置、測定番号5）で代表させ、その加速度応答倍率を図-5.2と図-5.3に示した。

鋼板セル模型の加速度も、同様に、セル天端付近の中詰め加速度（測定番号14）とセル高の1/2の位置（測定番号13）で代表させ、その加速度応

答倍率を図-5.4と図-5.5に示した。

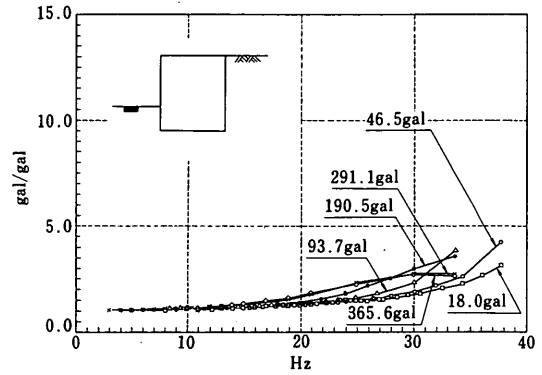


図-5.1 加速度応答倍率〔基礎地盤加速度（No10）／振動台加速度〕

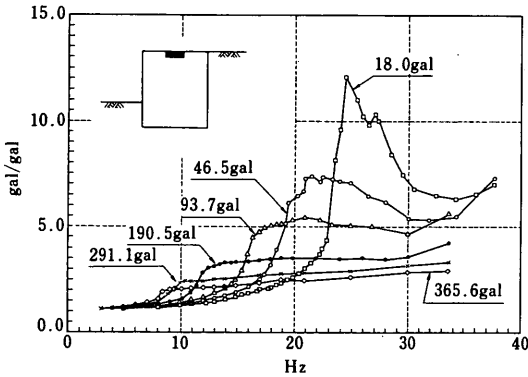


図-5.2 加速度応答倍率（継手フリーセル模型）
〔セル中詰め天端加速度（No6）／振動台加速度〕

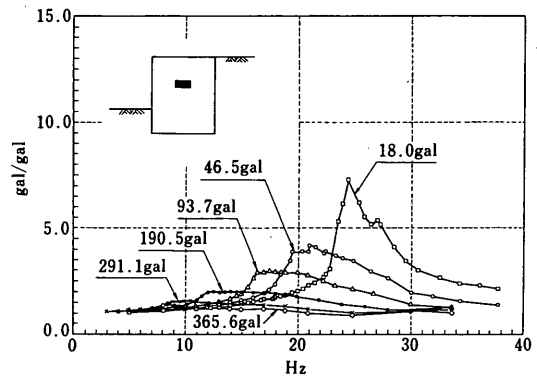


図-5.3 加速度応答倍率（継手フリーセル模型）
〔セル中詰め天端加速度（No5）／振動台加速度〕

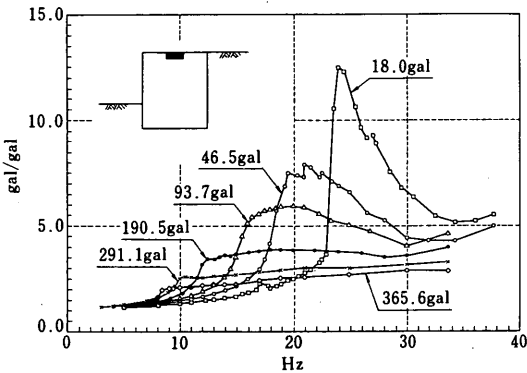


図-5.4 加速度応答倍率（鋼板セル模型）
〔セル中詰め天端加速度（No14）／振動台加速度〕

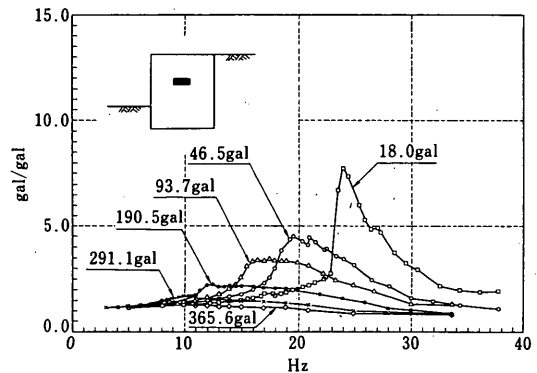


図-5.5 加速度応答倍率（鋼板セル模型）
〔セル中詰め天端加速度（No13）／振動台加速度〕

b) 継手フリーセル模型と鋼板セル模型の加速度応答倍率の比較

継手フリーセル模型のセル天端付近の中詰め加速度(測定番号6)の応答倍率(図-5.2)と鋼板セル模型の同加速度(測定番号14)の応答倍率(図-5.4)は46.5ガル, 93.7ガル入力時において若干のばらつきが見られたが, その他の入力時ではほとんど等しかった。

継手フリーセル模型のセル高1/2の位置の中詰め加速度(測定番号5)の応答倍率(図-5.3)と鋼板セル模型の同加速度(測定番号13)の応答倍率(図-5.5)もセル天端加速度と同様に, ほとんど等しかった。

(2) 位相差

a) 測定結果

振動台入力加速度(測定番号1)に対する基礎地盤およびセル体の加速度の位相差を求めた。

基礎地盤加速度は, 加速度応答倍率を算定した時と同様に, 地盤表面付近の加速度(測定番号10)で代表させ, その位相差を図-5.6に示した。

継手フリーセル模型のセル体の加速度も, 同様に, セル天端付近の中詰め加速度(測定番号6)とセル高の1/2の位置(測定番号5)で代表させ, その位相差を図-5.7と図-5.8に示した。鋼板セル模型の加速度も, 同様に, セル天端付近の中詰め加速度(測定番号14)とセル高の1/2の位置(測定番号13)で代表させ, その位相差を図-5.9と図-5.10に示した。

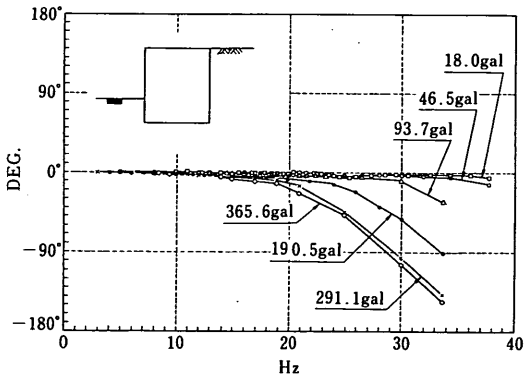


図-5.6 位相差〔基礎地盤加速度(No10)／振動台加速度〕

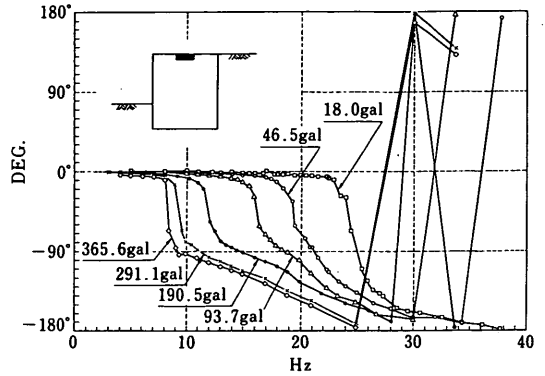


図-5.7 位相差(継手フリーセル模型)
〔セル中詰め天端加速度(No6)／振動台加速度〕

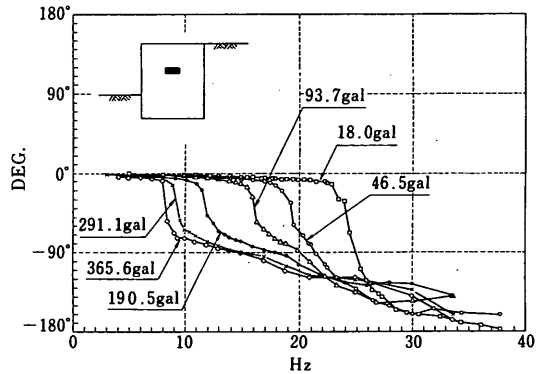


図-5.8 位相差(継手フリーセル模型)
〔セル中詰め天端加速度(No5)／振動台加速度〕

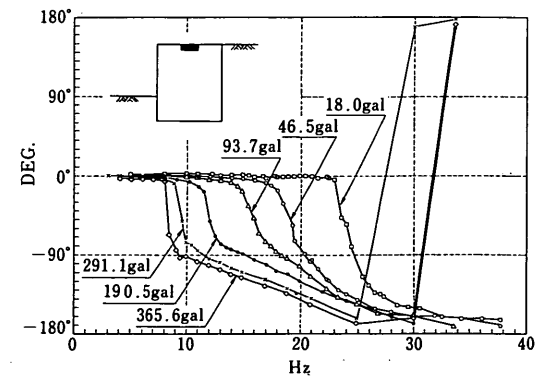


図-5.9 位相差(鋼板セル模型)
〔セル中詰め天端加速度(No14)／振動台加速度〕

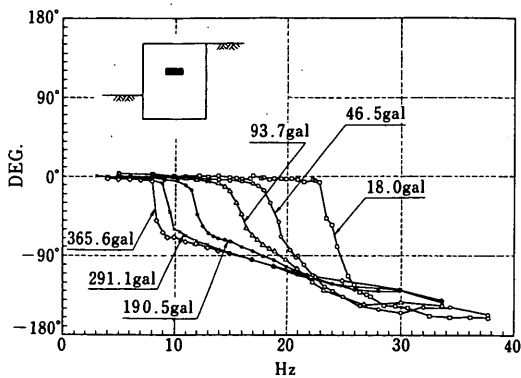


図-5.10 位相差 (鋼板セル模型)

[セル中詰め天端加速度 (No13) / 振動台加速度]

b) 継手フリーセル模型と鋼板セル模型の位相差の比較

継手フリーセル模型のセル天端付近の中詰め加速度 (測定番号6) の位相差 (図-5.7) と鋼板セル模型の同加速度 (測定番号14) の位相差 (図-5.9) は46.5ガル入力時に最大15°程度の相違があったものの、その他の入力時ではほとんど一

致していた。

また、継手フリーセル模型のセル高1/2 の位置の中詰め加速度 (測定番号5) の位相差 (図-5.8) と鋼板セル模型の同加速度 (測定番号13) の位相差 (図-5.10) も、セル天端と同様に、46.5ガル入力時に最大11°程度の相違があったものの、ほとんど一致していた。

5.3 振動後のセル径の変化およびセル中詰め、セル殻ならびに地盤の沈下

実験1では、各ステップの試験終了後セル頭部における加振方向のセル直径、およびセル中詰め地表面、セル殻頭部ならびに地盤表面の鉛直変位の測定を行った。

セル直径の測定結果を表-5.2に、セル中詰め地表面、セル殻頭部ならびに地盤表面の鉛直変位の測定結果を表-5.3に示した。

表-5.2によれば、両セル模型の振動後のセル直径変化量は小さく大差なかった。表-5.3によれば、両セル模型の中詰め地表面は、振動後沈下していたが、その沈下量は継手フリーセル模型と鋼板セル模型とで大差がなかった。また、セル体周囲の地盤沈下量もほとんど同じであった。

振動中のセル体の形状変化および体積変化は、地盤の

表-5.2 振動後のセル直径の変化量

(単位: mm)

	測点 番号	初期値	18.0gal	46.5gal	93.7gal	190.5gal	291.1gal	365.6gal
			入力後	入力後	入力後	入力後	入力後	入力後
継手フリーセル	ae	505	0	0	0	0	0	0
	bf	500	0	0	0	0	+1	0
	cg	498	0	0	0	+1	0	0
	dh	495	0	0	0	+1	0	0
鋼板セル	ae	500	0	0	0	+1	+1	+2
	bf	499	0	0	0	0	-1	0
	cg	499	0	0	0	-1	0	-2
	dh	498	0	0	+1	0	0	0

注) 各測点のセル直径の変化は、各試験前の初期値を0mmとした変化量で表した。

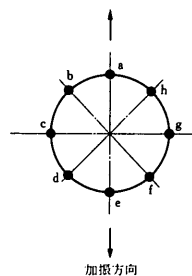
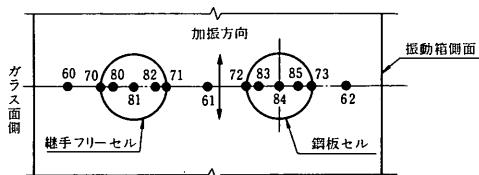


表-5.3 振動後のセル中詰め表面、セル殻頭部および地盤表面の鉛直変位

(単位：mm)

	測点番号	18.0gal 振動後	46.5gal 振動後	93.7gal 振動後	190.5gal 振動後	291.1gal 振動後	365.6gal 振動後
基礎地盤の地表面	60	+1	0	+1	0	+1	+2
	61	+1	0	0	+1	+1	+1
	62	0	+1	0	0	+1	+1
継手フリーセルのセル殻	70	+1	0	+1	0	+2	+1
	71	+1	+1	0	+1	+1	0
継手フリーセルのセル中詰め地表面	80	0	+1	+2	+4	+6	+6
	81	0	+1	+1	+3	+6	+7
	82	0	+1	+2	+3	+5	+6
鋼板セルのセル殻	72	0	+1	0	0	-2	-2
	73	0	0	+1	0	0	-2
鋼板セルのセル中詰め地表面	83	+1	+1	0	+3	+4	+4
	84	+1	0	+1	+3	+4	+5
	85	0	0	+1	+3	+5	+5

注) 各測点の沈下量は、各試験前の初期値を0mmとした変化量で表した。なお、沈下量は+、隆起は-で表示した。



バネを受ける面積の変化、中詰め質量の重心位置の変化などをもたらすため、振動条件に影響をおよぼすと考えられる。

しかしながら、①両セル模型の振動後のセル直径変化量は小さく、セル形状変化はほとんどなかったと考えてよいこと、②両セル模型の中詰め表面および周辺地盤の沈下量がほとんど同じであり、両セル模型の中詰めの体積変化は起きたとしても同じ程度であったと推定できることから、両セル模型の振動中の振動条件はほとんど同じとみなせる。

6. 三連セルによる振動破壊実験(試験2)

6.1 入力加速度

表-6.1に、実験2における各試験体の入力加速度(測定番号1)を整理した。20ガルレベルおよび50ガルレベルで若干のばらつきが見られるが、おおむね同一条件で加振できた。

同表に、基礎地盤の応答加速度の測定結果も示した。基礎地盤の応答加速度は、海底面より160mm下に設置した加速度計(測点番号9)(図-4.10参照)の応答加速度で表した。この応答加速度の値は、20ガルレベル、500ガルレベル、600ガルレベルで若干のばらつきが見られたが、ほぼ同じ値であったといえる。

本実験は、セル模型の振動破壊実験である。測定結果をまとめるに当たり、数多い加速度測定結果の中から基準となるべき加速度を設定する必要がある。その際考慮すべき点として

- ①基礎地盤の増幅効果によるセル体入力加速度のバラツキが小さくなること、
- ②セル体の振動の影響を受けないこと、
- ③護岸耐震性の検討上の基準となること、などがあげられる。

このような条件をおおむね具備している測点として、海底面下に埋込まれた加速度計測点番号9と、裏埋土天

端付近に埋込まれた加速度計測点番号13があげられる。

地震動を経験した実構造物では、その設計上の耐震性を構造物の裏埋土天端あるいは近傍の地盤上に設置された加速度記録により判断することが多い。この方法にしたがえば、裏埋土天端加速度（測点番号13）を基準として測定結果をまとめることが一案として考えられる。しかしながら、測点番号13の加速度は、地表面付近に埋められており、振動台加速度が大きくなると地盤のゆるみなどによって測定精度が低下すると推定される。一方、加速度計（測点番号9）は、その加速度レベルが測点番号13よりかなり小さく、耐震性の検討に使用すると、上記の方法に比較し過小評価する危険性はあるものの、地盤に160mm埋めこまれているため、測定精度は高い。したがって、以降のデータ整理では、同表に示した測点番号9の応答加速度を「セル体への入力加速度」と仮定し使用した。

6.2 応答加速度

(1) 応答加速度

各試験体のセル天端加速度（測点番号6）および裏埋土天端の加速度（測点番号13）の測定結果を表-6.2に示した。

セル天端加速度は、 $D/H = 1/4$ の鋼板セル模型の値が337ガルをこえると他の試験体の値に比較し大きくなっていったものの、他の3体に関してはほぼ同程度の値であった。なお、 $D/H = 1/4$ の鋼板セル模型のセル天端加速度（測点番号6）は、加速度

計収納箱が十分中詰め砂の中に埋まっていなかったか、あるいは収納箱の周囲の中詰めが振動中ゆるくなった、などの理由により測定値が他の3体の値より大きくなったことも考えられる。そこで、参考のため、同表では、 $D/H = 1/4$ の鋼板セル模型のセル天端加速度を、測定番号6と同一の高さに設置した測定番号7の測定結果によっても表した。この測点番号7の加速度の値は、おおむね他の3体のセル天端加速度と同じであった。このことから、セル天端加速度は4体ともほぼ同じであったと言ってよい。

裏埋土天端の加速度はかなりのばらつきがあったが、4試験体の測定結果はおおむね同一レベルにあったと言ってよい。

(2) 加速度モード

振動中のセル体の加速度分布を調べるため、各測点の加速度波形をもとにセル体の加速度モードを作成した。また、地盤とセル体の動きをみるため、同じ図面上で前面地盤および背面地盤の加速度モードもあわせて作成した。

図-6.1～図-6.4に一例として、セル入力加速度が335～350ガルの範囲の各試験体の加速度モードを示した。この範囲の加速度モードを選定した理由は、①セル体のせん断変形は入力加速度が大きくなると増大し、その変化は加速度モードに現れると考えられること、②350ガルは、野田ほかの提案により重力式岸壁の設計震度に換算すると、設計上

表-6.1 入力加速度の検定および基礎地盤応答加速度（※）

目標入力 加速度 (gal)	入 力 振 動 数 (HZ)	鋼 板 セ ル 模 型 ($D/H = 1/4$)		鋼 板 セ ル 模 型 ($D/H = 1/2$)		継手フリーセル模型 ($D/H = 1/4$)		継手フリーセル模型 ($D/H = 1/2$)	
		入力加速度 (No.1) (gal)	基礎地盤応答 加速度(No.9) (gal)	入力加速度 (No.1) (gal)	基礎地盤応答 加速度(No.9) (gal)	入力加速度 (No.1) (gal)	基礎地盤応答 加速度(No.9) (gal)	入力加速度 (No.1) (gal)	基礎地盤応答 加速度(No.9) (gal)
20	23.3	15	29	18	38	18	40	21	36
50	20.1	43	73	40	76	48	75	48	78
100	16.2	89	117	81	122	93	120	88	126
200	11.4	190	233	180	220	189	226	187	221
300	8.7	286	337	274	350	289	335	282	340
400	7.2	389	450	376	499	388	460	379	475
500	6.1	484	574	479	645	483	578	473	594
600	5.6	570	690	570	793	571	684	561	705

※ 基礎地盤応答加速度は、海底面より160mm下に設置したNo.9加速度計の応答加速度を指す。なお、No.9加速度計の応答加速度はセル体への入力加速度とみなし、以後のデータのとりまとめの際に「セル体入力加速度」として使用した。

表-6.2 セル天端および裏埋土天端の応答加速度

鋼板セル模型 (D/H=1/4)			鋼板セル模型 (D/H=1/2)			継手フリーセル模型 (D/H=1/4)			継手フリーセル模型 (D/H=1/2)			備考
基礎地盤 加速度 (No.9)	セル天端 加速度 (No.6) (注1)	裏埋土 天端 加速度 (No.13)	基礎地盤 加速度 (No.9)	セル天端 加速度 (No.6)	裏埋土 天端 加速度 (No.13)	基礎地盤 加速度 (No.9)	セル天端 加速度 (No.6)	裏埋土 天端 加速度 (No.13)	基礎地盤 加速度 (No.9)	セル天端 加速度 (No.6)	裏埋土 天端 加速度 (No.13)	入力振動数 (HZ)
29	100 (103)	67	38	130	92	40	260	126	36	117	76	23.3
73	357 (366)	195	76	239	174	75	391	189	78	216	154	20.1
117	431 (440)	250	122	371	263	120	467	239	126	386	253	16.2
233	566 (653)	352	220	538	421	226	589	336	221	628	405	11.4
337	1191 (692)	612	350	673	647	335	760	757	340	791	722	8.7
450	1732 (925)	1000	499	783	924	460	871	1126	475	969	1120	7.2
574	1801 (1005)	1253	645	983	1147	578	890	1363	594	1122	1250	6.1
690	724 (1192)	—	793	1105	1292	684	963	—	705	1221	—	5.6

注1) D/H=1/4の鋼板セル模型のセル天端加速度(No.6)は、同じ高さに設置したNo.7、No.8加速度に比較し、大きかった。No.6の加速度計収納箱は、十分中詰めの中に埋まっていなかったか、あるいは天端付近の中詰めが振動のためゆるくなった可能性もあるため、No.7の加速度を参考のため()内に示した。

のほぼ上限値である0.24となり、このレベルの加速度モードを調べておけばほぼ設計実務上十分であると考えられることである。

なお、D/H=1/4の鋼板セル模型の加速度モードは、(1)で指摘したように、セル天端加速度(測点番号6)は入力加速度が337ガルをこえるとその測定結果に問題があったことも考えられるので、233ガル入力時の加速度モードで表した。

加速度モードは、一周を8等分された各時刻ごとに書き表した。

セル中詰め加速度モードは、いずれの図においても、おおむね直線分布をしていた。このことから、鋼板セル模型でも継手フリーセル模型でも、振動時セル体はおおむね剛体的に挙動していたと考えてよい。一方、前面地盤では明確ではないが、背面地盤では加速度モードが地表面付近で若干折れ曲がっており、地盤地表面の加速度が大きくなっていったと推定できる。

6.3 振動中のセル水平変位

(1) 変位振幅

振動中のセル前面壁の水平変位は、4.3.(2)で説明したように、振動箱の側面に治具を取り付け、その上に水中変位計を固定し測定した。(図-4.18参照)

この方法による振動中のセル前面壁水平変位は、振動箱の側壁の変位をゼロとした相対値であるため、その値は振動箱の変位の影響が入る。しかしながら、振動台の入力条件が各試験とも同一であったことから、振動箱側壁の変位はほとんど等しかったとみなすことができる。したがって両セル模型の振動中のセル前面壁水平変位の相対値を比較する場合、振動箱の変位の影響は無視してよい。

図-6.5にはD/H=1/4のセル模型の振動中のセル前面壁変位振幅を、図-6.6にはD/H=1/2の同結果を示した。

図に表した振動中のセル前面壁変位振幅は、その波形から読み取った全振幅で表した。その際、セル前面壁の水平変位の波形は、主として繰り返し載荷により根入れ部前面地盤の残留変形が増加したため振動中に中立軸がシフトしていたので、振動中のセ

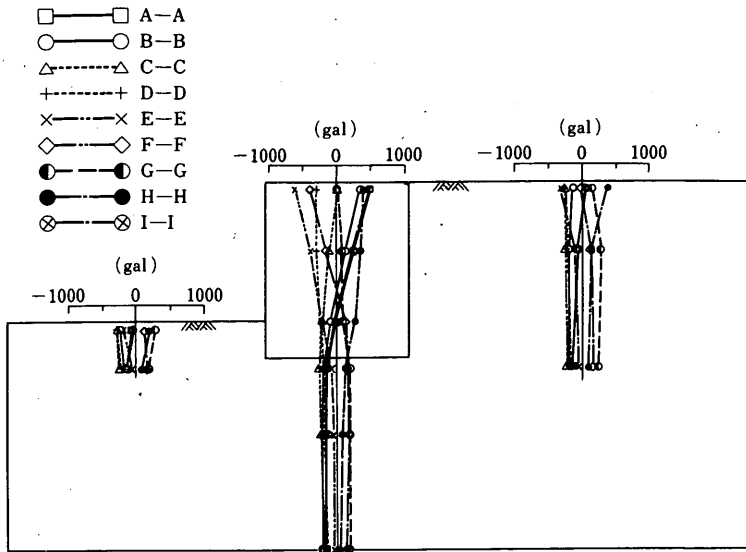


図-6. 1 加速度モード〔鋼板セル模型
($D/H=1/4$), 233gal, 11.4Hz 〕

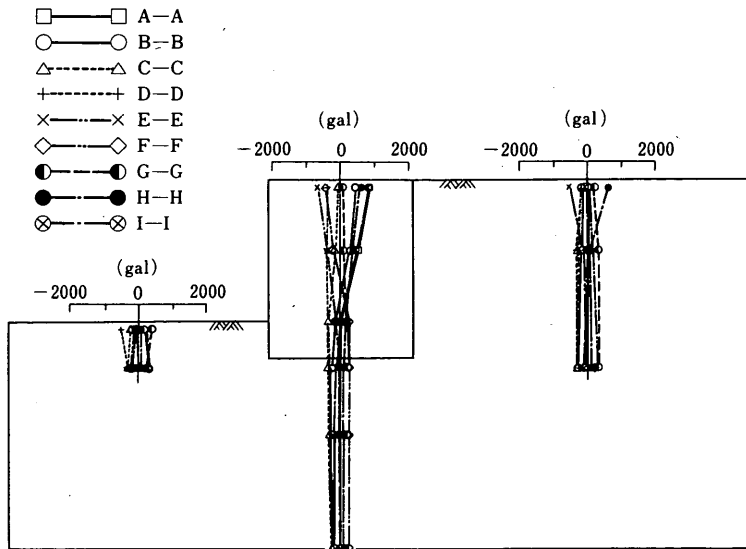


図-6. 2 加速度モード〔継手フリーセル模型
($D/H=1/4$), 335gal, 8.7Hz 〕

ル前面壁変位振幅は図-6. 7に示したように中立軸のシフトを消去した全振幅で表した。

なお、セル入力加速度が200ガル以下 ($D/H=1/2$ の継手フリーセル模型の海底面プラス5cmの位置では300ガル以下)の測定結果が含まれていない

のは、波形にノイズが多く変位振幅が明確に分離できなかったためである。

セル天端付近(海底面プラス45cm)における振動中の変位振幅を $D/H=1/4$ と $D/H=1/2$ のセル模型の間で比較すると、 $D/H=1/2$ の測定結果の

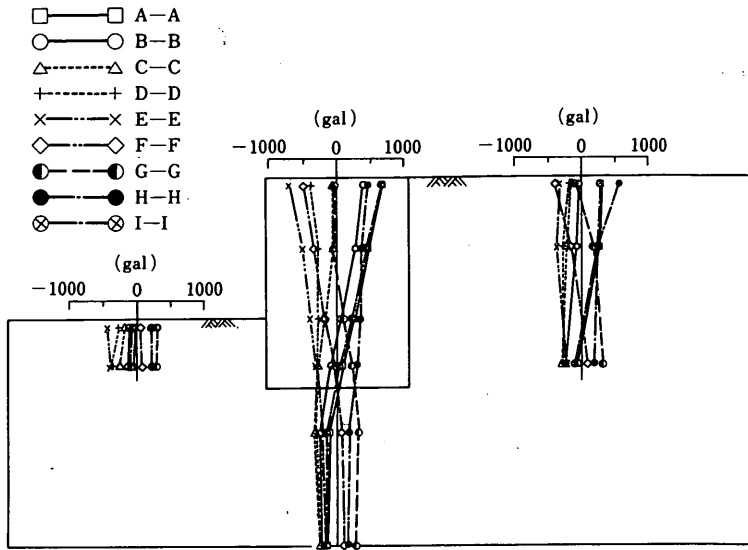


図-6.3 加速度モード〔鋼板セル模型
($D/H=1/2$), 350gal, 8.7Hz〕

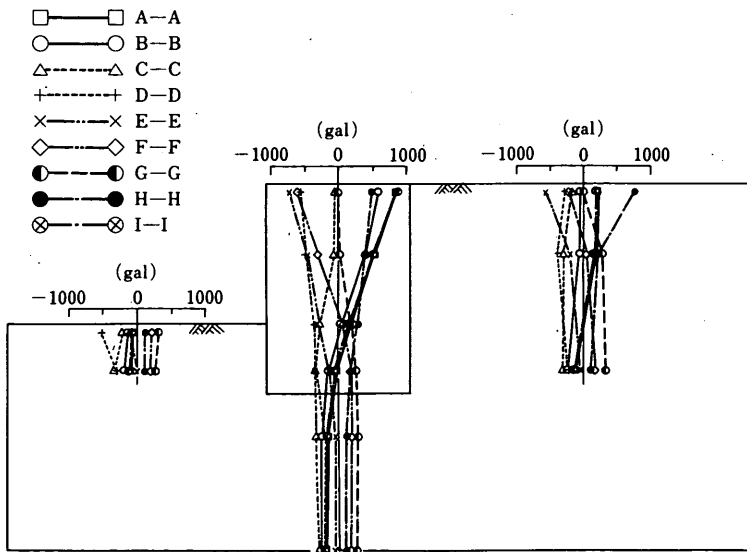


図-6.4 加速度モード〔継手フリーセル模型
($D/H=1/2$), 340gal, 8.7Hz〕

方が若干小さく、根入れ効果が認められる。この傾向は、鋼板セルでも継手フリーセルでも同様であった。また、図-6.5および図-6.6によると、両セル模型の振動中のセル前面壁変位振幅もほとんど一致しており、 $D/H = 1/4 \sim 1/2$ のセル模型では

継手の有無の影響はなかったと推定される。

(2) 変位モード

各測点の変位波形をもとにセル体の変位モードを作成した。また地盤とセル体の動きをみるため、同

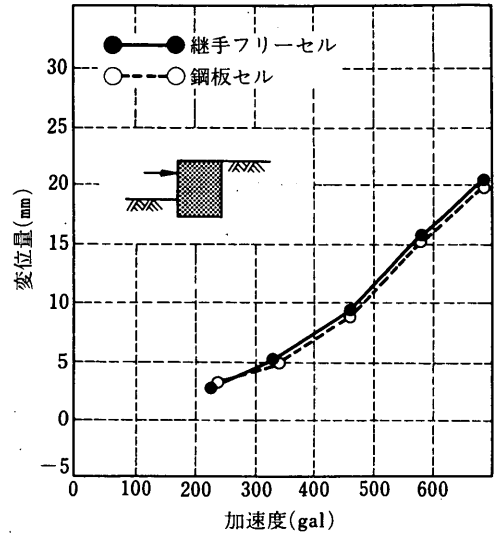
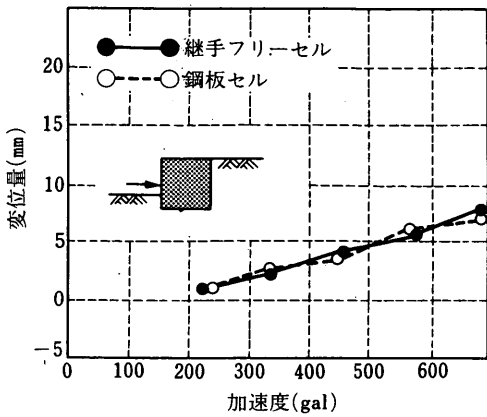


図-6.5 振動中のセル前面壁水平変位振幅
($D/H=1/4$ のセル模型)

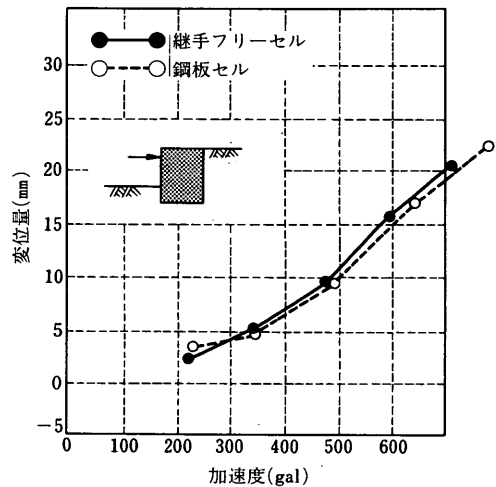
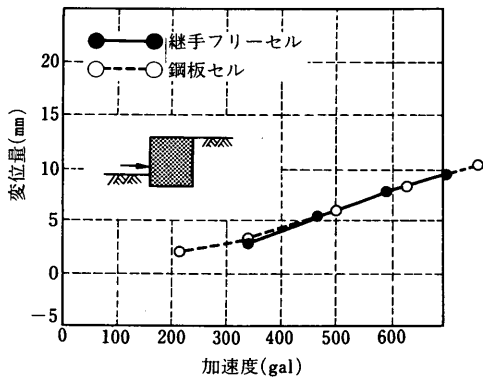


図-6.6 振動中のセル前面壁水平変位振幅
($D/H=1/2$ のセル模型)

じ図面上で前面地盤および背面地盤の変位モードもあわせて作成した。なお、各測点の変位波形は加速度波形を線型加速度法により積分してもとめた。

図-6.8-図-6.11に、このようにして求めた変位モード(加速度レベルは6.2(2)に対応)を示した。セル中詰めの変位モードは、加速度モードと同様に、いずれの図においてもおおむね直線分布をしており、鋼板セル模型でも継手フリーセル模型でも



図-6.7 振動中のセル前面壁水平変位波形の例

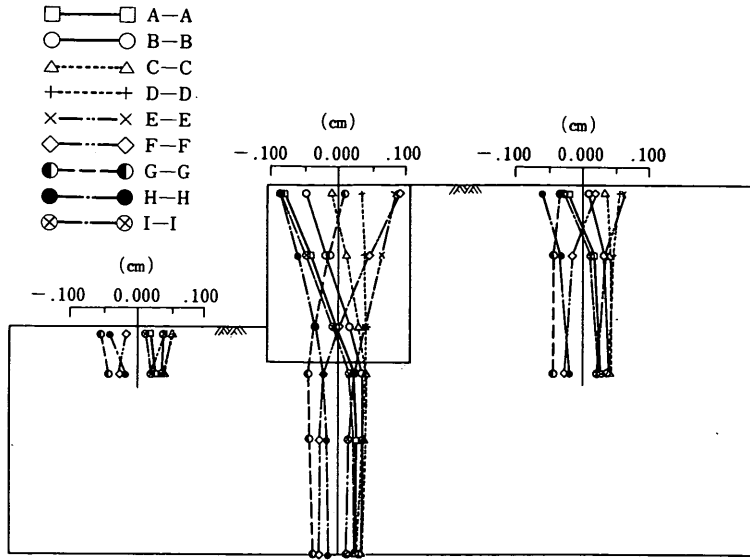


図-6. 8 変位モード〔鋼板セル模型
($D/H=1/4$), 233gal, 11.4Hz〕

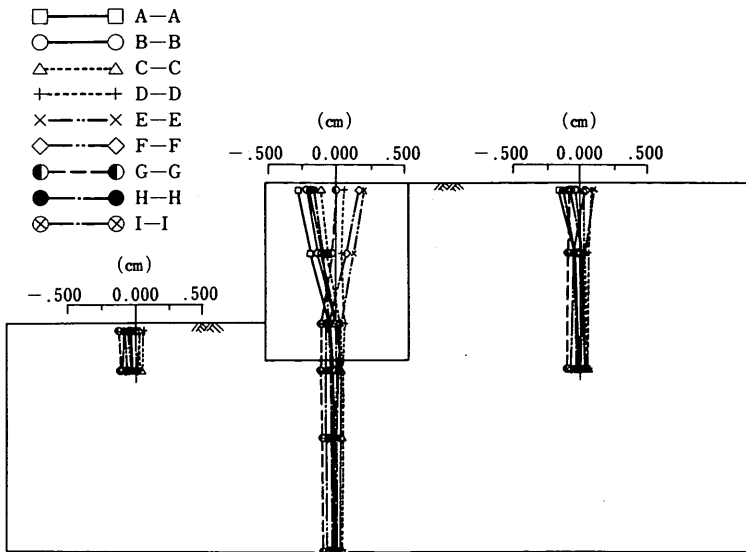


図-6. 9 変位モード〔継手フリーセル模型
($D/H=1/4$), 355gal, 8.7Hz〕

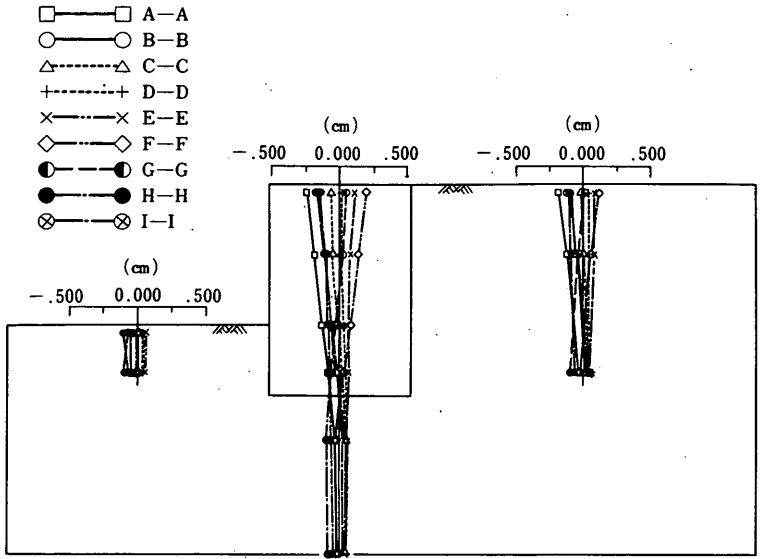


図-6.10 変位モード〔鋼板セル模型
($D/H=1/2$), 350gal, 8.7Hz〕

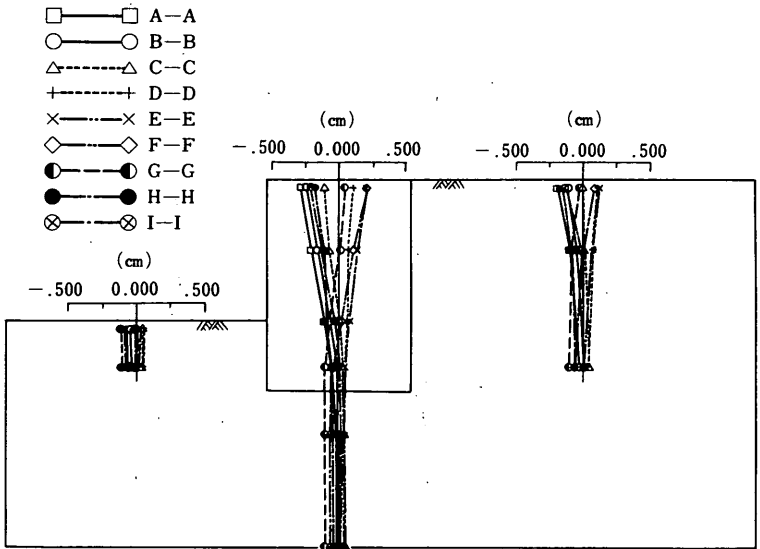


図-6.11 変位モード〔継手フリーセル模型
($D/H=1/2$), 340gal, 8.7Hz〕

6.4 振動中の土圧

(1) 最大動土圧

a) 最大動土圧の定義

一般に、振動中の土圧測定は、測定技術的に問題が多く、飽和地盤あるいはそれに近い地盤では

動土圧と動水圧と地盤の過剰間隙水圧が分離出来ないことから、非常に困難である。

このように現行の測定技術では動土圧の測定精度に問題があると思われるものの、本項では最大動土圧を振動中に土圧計により得られたデータの

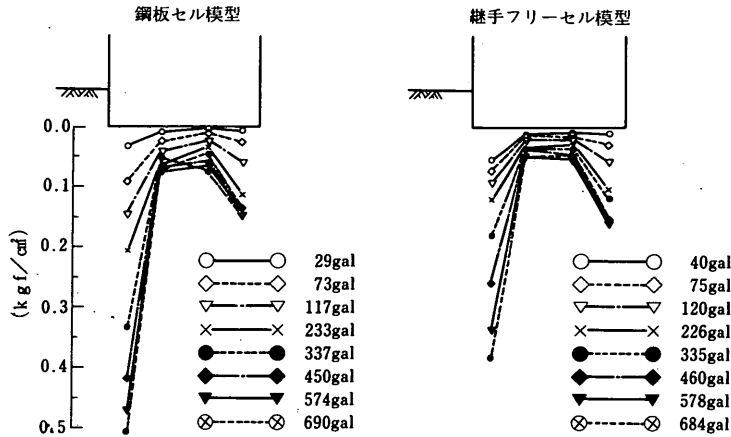


図-6.12 振動中のセル底面土圧（最大値）
(D/H=1/4, 動的増分値)

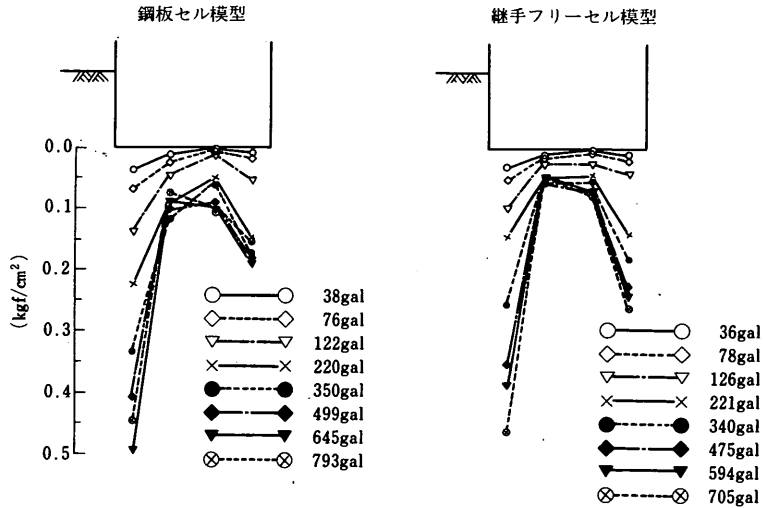


図-6.13 振動中のセル底面土圧（最大値）
(D/H=1/2, 動的増分値)

うち各入力レベルのプラス側（圧縮側）の最大値と仮定した。言い換えるならば最大動土圧は振動前の初期値をゼロとして土圧計により測定された圧縮側の最大の変動値と定義した。

b) セル底面土圧および根入れ部前面土圧

振動中のセル底面土圧（最大値）の測定結果を図-6.12および図-6.13に示した。また振動中の根入れ部前面土圧（最大値）を図-6.14および図-6.15に示した。

これらの最大土圧とセル体の水平変位との関係を調べるため、振動中および振動後の頭部水平変

位との関係を図-6.16にまとめた。図-6.16からわかるように、振動中のセル底面土圧および根入れ部前面土圧は、振動中あるいは振動後の頭部水平変位が大きくなるにつれて増大する傾向にある。このことは、基本的には、動的な状態におけるセル底面土圧（前趾土圧）および根入れ部前面土圧も、地盤のパネおよびセル体のせん断変形などを考慮し動的な水平変位が旨く推定できれば、静的な載荷状態と同様に扱え、推定可能なことを示唆している。

図-6.16の結果に関し、セル殻継手の有無によ

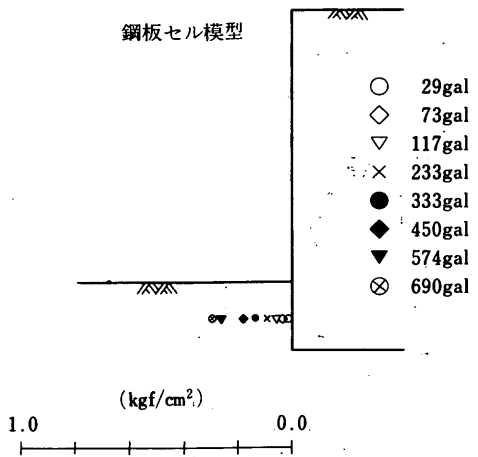


図-6.14 振動中の根入れ部前面土圧 (最大値)
($D/H=1/4$, 動的増分値)

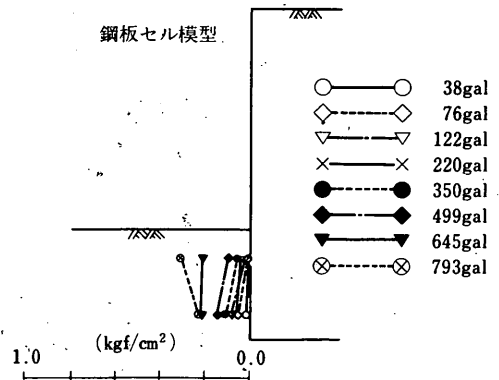


図-6.15 振動中の根入れ部前面土圧 (最大値)
($D/H=1/2$, 動的増分値)

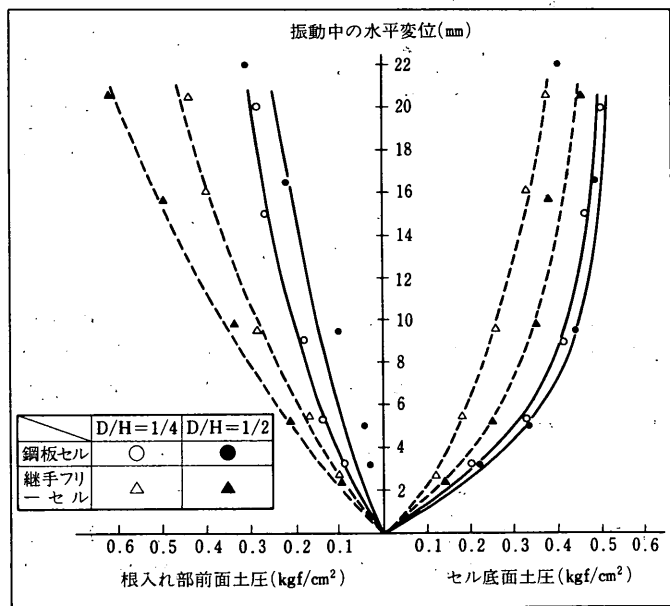
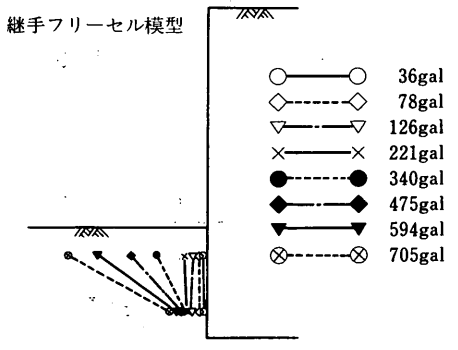
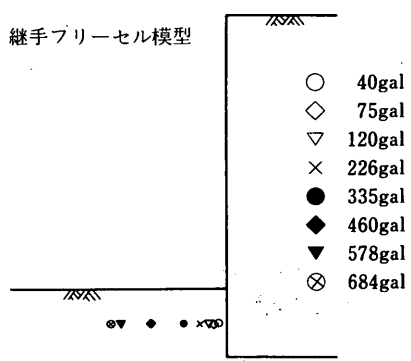


図-6.16 a) 振動中の水平変位とセル底面土圧および根入れ部前面土圧との関係

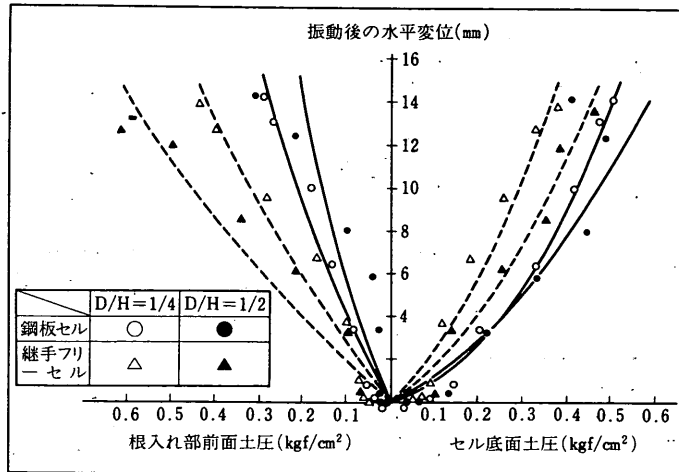


図-6.16 b) 振動後の水平変位とセル底面土圧および根入れ部前面土圧との関係

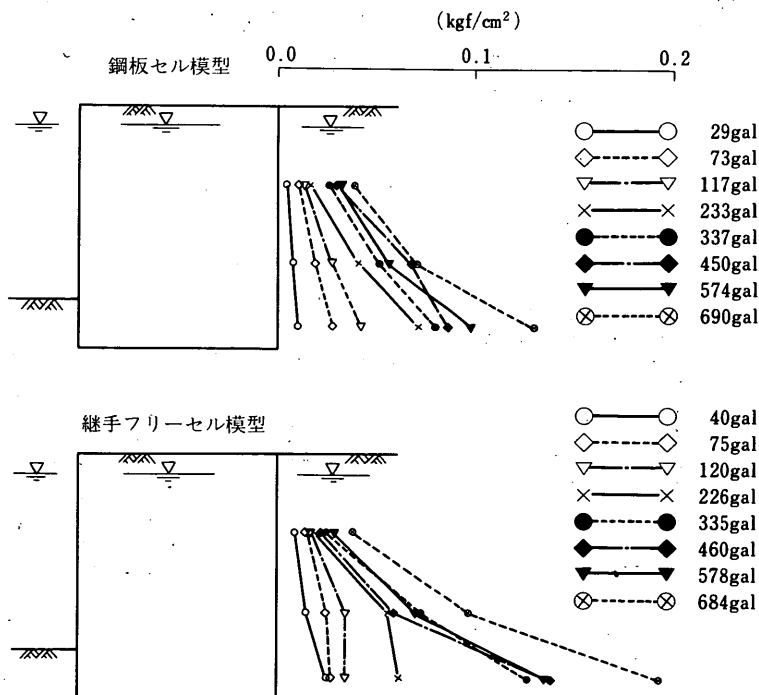


図-6.17 振動中のセル背面土圧 (最大値)
(D/H=1/4, 動的増分値)

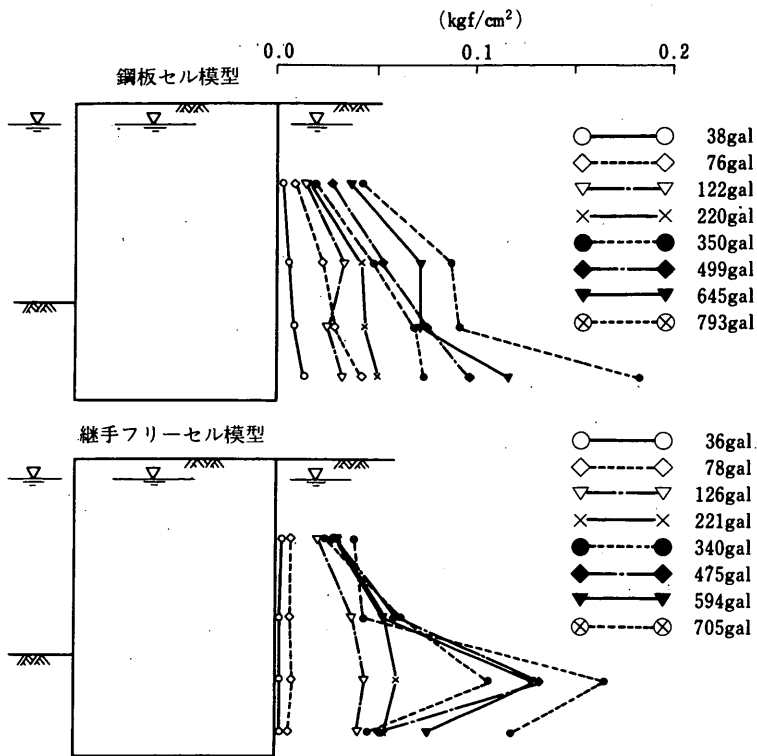


図-6.18 振動中のセル背面土圧 (最大値)
(D/H=1/2, 動的増分値)

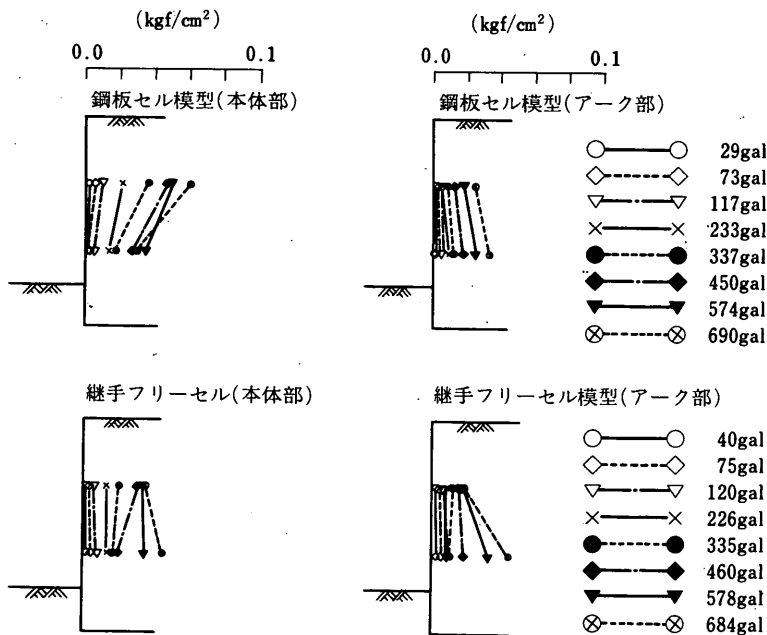


図-6.19 振動中のセル中詰め土圧 (最大値)
(D/H=1/4, 動的増分値)

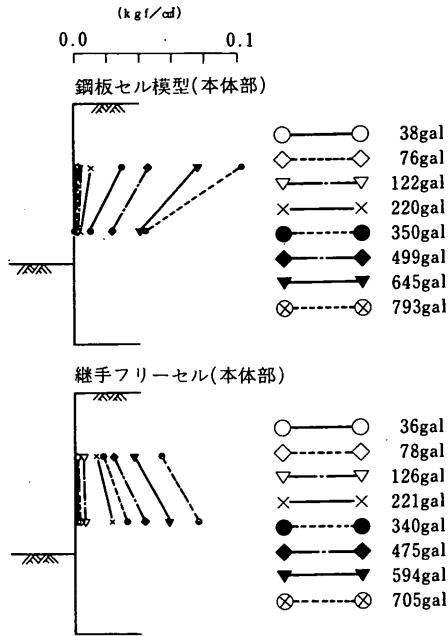


図-6.20 振動中のセル中詰め土圧（最大値）
($D/H=1/2$, 動的増分値)

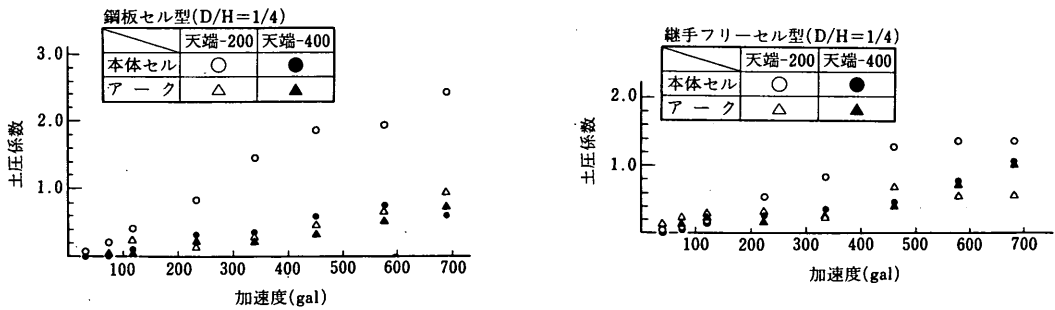


図-6.21 振動時の本体セルとアーク部中詰め土圧（動的増分値）の関係

る影響を調査するため鋼板セルと継手フリーセルの結果を比較すると、セル底面土圧（前趾側土圧）はセル殻に継手のない鋼板セル模型の方が大きく、セル根入れ部前面土圧は、継手のある継手フリーセル模型の方が大きかった。この傾向は、 D/H が $1/4$ でも $1/2$ でも同様な傾向であった。同一根入れ長を持ったセル模型の作用荷重は、載荷条件さえ一定であれば概ね等しく、その荷重に対する地盤の抵抗モーメントならびに水平抵抗力は継手の有無にかかわらず等しいはずである。図-6.16の結果から判断すると、セル殻継手の有無は、セル底面土圧および根入れ部前面土圧による地盤の抵抗モーメントならびに水平抵抗力の分担率に若干影響していると考えられる。

c) セル背面土圧

振動中のセル背面土圧の測定結果（最大値）を図-6.17および図-6.18に示した。両図から判断できるように、最大土圧で表現した両セル模型の背面土圧値は、セル体の入力加速度が大きくなるにしたがい増大し、またその分布傾向はおおむね測点が深くなるにしたがい大きくなる、いわば「静水圧分布」をしていた。

4.4.(1)の試験2の加振方法で述べたように、予備実験の結果によると、セル体の共振振動数は、セル背面地盤の共振振動数とほぼ一致することが推定された。この予備実験からは、セル背面土圧は、背面地盤での相互作用による土圧が卓越し、セル体の水平変位分布と比例した土圧分布、例えばセル頭部に近い方が大きくなる傾向の土圧分布になると推定された。

しかしながら、測定結果はその逆であり、分布形状からみるとむしろ「主働土圧」分布に近いと考えられる。

d) 中詰め土圧

振動中の本体セル部の中詰め土圧の測定結果（最大値）を図-6.19に、同じくアーク部の中詰め土圧の測定結果を図-6.20に示した。セル中詰め土圧値（動的増分値）は、セル体の入力加速度が大きくなるにしたがい増大する傾向にあった。

一方、セル中詰めの土圧分布は、セル天端に近い方が土圧の大きい分布形と、逆にセル天端に近い方が土圧の小さい分布形とが混在しており、一定の傾向が見いだせなかった。

次に、 $D/H = 1/4$ においてアーク部の最大中詰め土圧と本体セルの中詰め土圧の大きさを同一の測定高さで比較した。各々の振動中の中詰め土圧（動的増分値）を土圧係数で表し、図-6.21に示した。図-6.21によるとセル天端より400mm下がった位置では顕著でなかったが、セル天端より200mm下がった位置では、振動時のアーク部中詰め土圧は、全般的に本体セル中詰め土圧をかなり下まわっていた。

本測定結果は、動的増分値である。振動時の作用土圧の絶対値を比較する場合、振動前の静的中詰め土圧を加算する必要がある。振動前の中詰め土圧を加算し、同一測定高さにおけるアーク部中詰め土圧の比を算定した結果を図-6.22に示した。ただし、各振動試験においてすべての測定値をゼロクリアしているため、振動前の中詰め土圧をうまく測定できなかったため、ここでは鋼矢板セルの現行設計法¹¹⁾に従い土圧係数を0.6として振動前の本体セル中詰め土圧を推定した。なお、アーク部土圧係数は、根入れ鋼板セルの現場測定結果¹³⁾により本体セルの約半分が良いことが報告されているので、それに従い0.3として計算した。図中では無次元化するため本体セルの中詰め土圧とアーク部の中詰め土圧の土圧係数の比で表示した。この結果によると、動的載荷時のアーク部の中詰め土圧は、おおむね本体セルの0.3~0.8であったと推定される。

鋼板セルの現場試験¹³⁾によるとセル中詰めの土圧係数は本体セルのその約半分であった。本実験結果から判断すると、振動時においても、同様な現象が生じていると考えられる。これは主働土圧の土くさび理論にもとづいて類推すると、アーク部中央部は本体セルにより断面が縮小されており、アーク部中詰め土圧を発生させる土くさびは

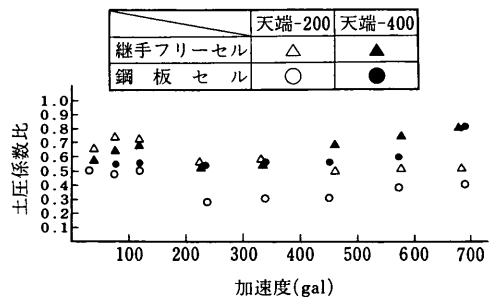


図-6.22 静止土圧により補正された振動時のアーク部中詰め土圧と本体セル中詰め土圧の比

本体セルのように自由に発達せず、本体セルに比較し小さくなるためと推定される。

(2) 土圧モード

本節ではセル体がどの位置にある時に最大動土圧が生じたのかを、土圧モードの検討結果を利用してまとめた。本検討は位相差に基づく検討でないため厳密さを欠くが、土圧モードを利用した方法でも最大動土圧が発生した時刻のセル体の位置は把握できる。

参考のため、図-6.23～図-6.26に、117～126ガル入力時の土圧モードを示した。土圧モードは、振動前の土圧をゼロとした振動時の土圧計の測定値により表しており、一周を8等分した時刻ごとに示した。

- ①セル前趾側の底面土圧(測定番号18)(図-4.11参照)は、全試験においてセル体が前面側に倒れた時に最大動土圧が発生していた。一方、セル背面側底面土圧(測定番号21)は、全試験においてセル体が背面側に倒れた時に最大動土圧が発生していた。
- ②根入れ部の前面土圧は、全試験においてセル体が前面側に倒れた時に最大土圧が発生していた。
- ③セル背面土圧は、根入れにかかわらず、殆どのケース(全体の約8～9割)で、セル体が背面側に戻りきった時に、最大土圧が発生していた。
- ④本体セルの中詰め土圧は、ほとんどのケースにおいて、セル体が前面側に倒れた時に最大土圧が発生していた。

一方、アーク部の土圧は、最大動土圧の発生時期が一定していなかった。その内訳をみると、セル体が前面側に倒れた時に最大土圧が発生していたケースが約1割、セル体が背面側に倒れた時に最大土圧が発生していたケースが約2割、最大動土圧の発生時期が明確ではなかったケースが約7割であった。

6.5 振動中のセル殻発生応力

振動中のセル殻発生応力として、ここでは最大セル殻発生応力を示した。最大セル殻発生応力は、本節では、土圧の測定結果と同様に、振動前の応力をゼロとして得られた振動中の発生応力の増分の最大値とした。なお、セル殻発生応力はひずみの測定結果より換算した。換算にあたりセル殻素材(亜鉛鉄板)のヤング率は 2.1×10^6 kg/cm²と仮定した。円周方向応力は、振動中のセル殻張

力の増加を計測することが目的であることから引張側の最大値を、鉛直方向応力は、振動中のセル殻押し込み力の増加を計測することが目的であることから圧縮力の最大値をまとめた。

(1) セル発生応力(動的増分値)分布の比較

a) セル殻張力の鉛直分布

両セル模型のセル前面壁のセル殻張力の鉛直分布は、ばらつきはあるものの、おおむね海底面プラス30cm(測点番号37)(図-4.12参照)、海底面プラス10cm(測点番号38)および海底面マイナス6.25cm(測点番号39)の応力がおおむね等しい「等分布形状」か、あるいは、海底面プラス10cmの位置で最も応力が大きくなる「くの字」型の応力分布をしていた。

なお、セル側面壁および背面壁では、両セルにおいて、セル殻張力の鉛直分布に様な傾向が見られなかった。図-6.27および図-6.28に、セル殻張力の最大値(動的増分値)の鉛直分布の例を示した。

b) セル前面壁のセル殻押し込み力の鉛直分布

両セル模型とも、地表面で応力が最も大きくなる「くの字」型の分布をしていた。なお、両セル模型の測定値は、現行設計法による発生応力よりもかなり大きく、セル殻の曲げの影響を受けていた可能性が考えられる。(図-6.29～図-6.30参照)

c) 同一水平位置における最大のセル殻張力の発生位置

海底面プラス30cm(セル高の1/2付近)の位置では、セル前面壁、側面壁および背面壁の円周方向応力の大きさを比較すると、両セルともセル前面壁において最大のセル殻張力が発生していた。

海底面プラス10cm(海底面付近)の位置で比較すると、両セルともセル前面壁および背面壁でおおむね同じ大きさの(側面壁より大きな)セル殻張力が発生していたか、あるいはおおむねセル前面壁で最大の円周方向応力が発生していた。

地表面以下の位置では、一定の傾向がみられなかった。

(2) 最大セル殻応力が生じた時のセルの位置

最大セル殻応力が生じた時刻のセルの位置について

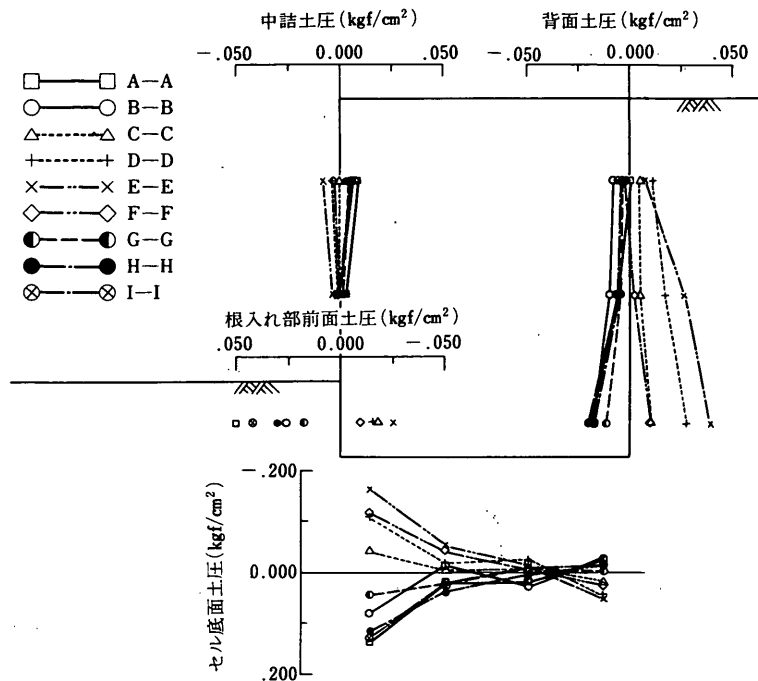


図-6.23 土圧モード〔鋼板セル模型
($D/H=1/4$), 117gal, 16.2Hz, 動的増分値]

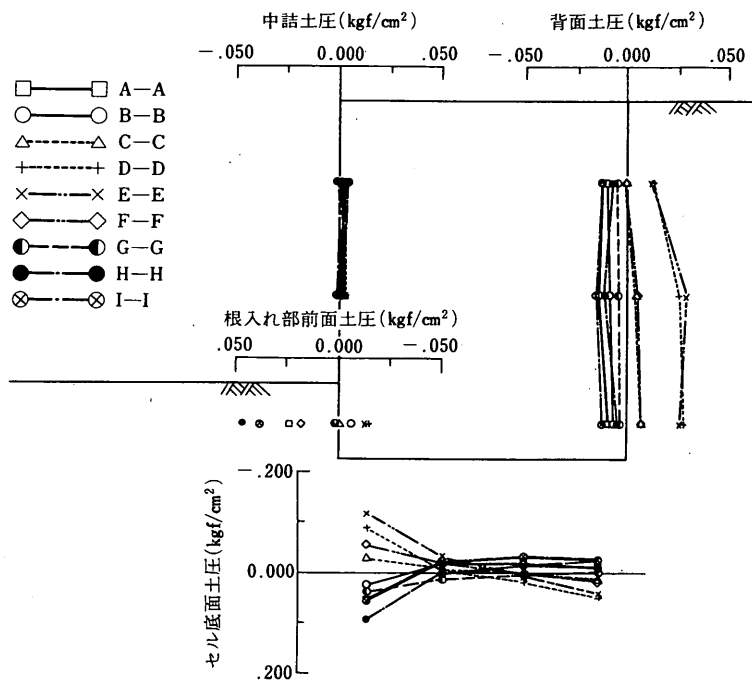


図-6.24 土圧モード〔継手フリーセル模型
($D/H=1/4$), 120gal, 16.2Hz, 動的増分値]

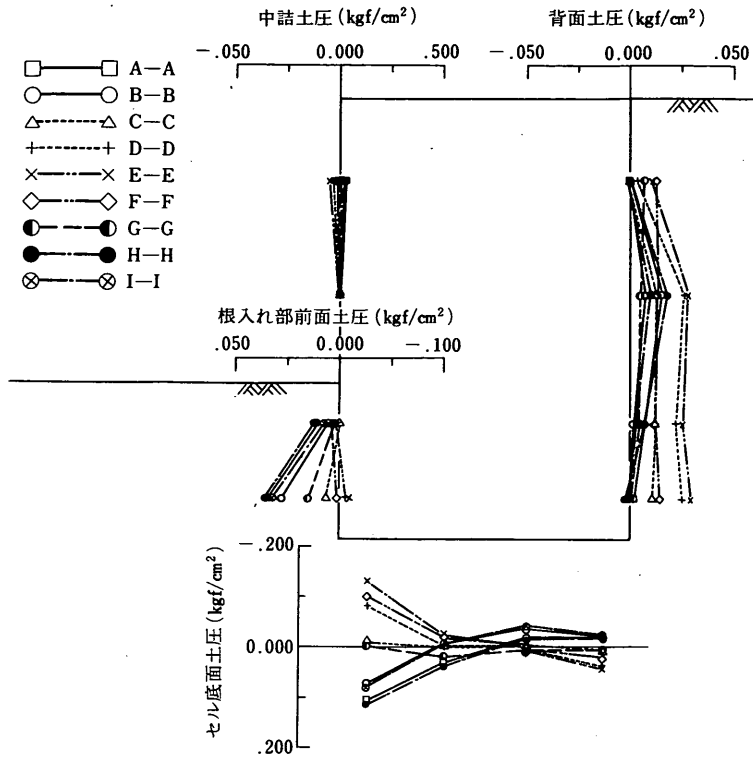


図-6.25 土圧モード〔鋼板セル模型
($D/H=1/2$), 122gal, 16.2Hz, 動的増分値〕

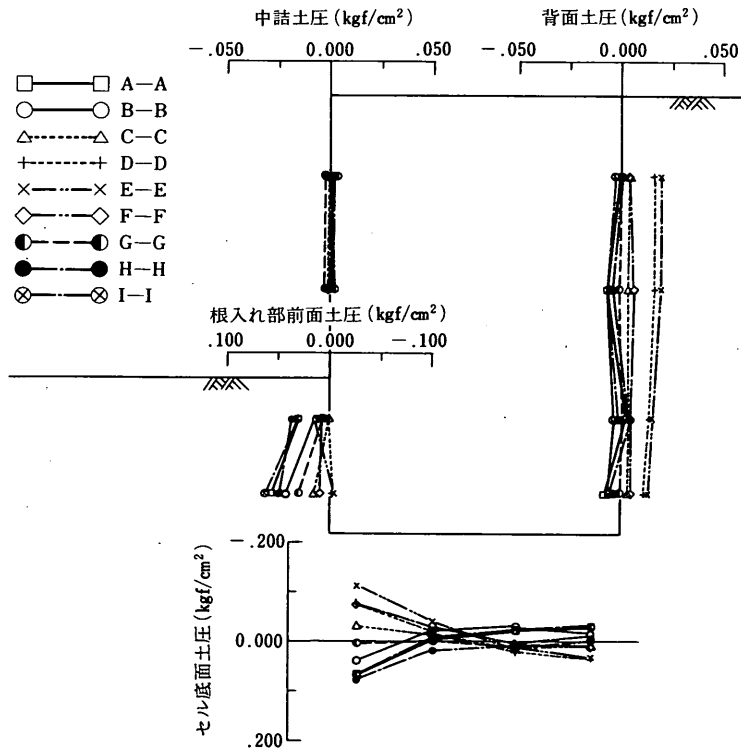


図-6.26 土圧モード〔継手フリーセル模型
($D/H=1/2$), 126gal, 16.2Hz, 動的増分値〕

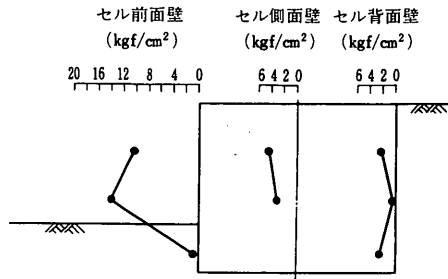


図-6.27 振動中のセル殻張力最大値（動的増分値）の鉛直分布〔鋼板セル模型(D/H=1/2) 122gal, 16.2Hz〕

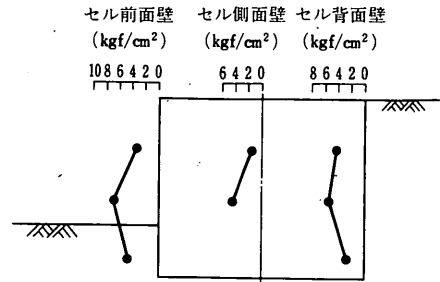


図-6.28 振動中のセル殻張力最大値（動的増分値）の鉛直分布〔継手フリーセル模型(D/H=1/2) 126gal, 16.2Hz〕

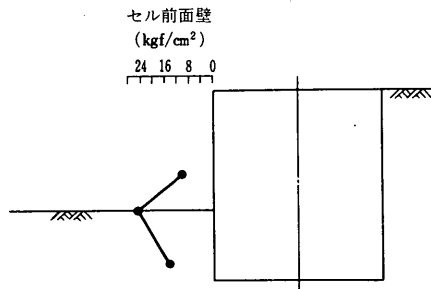


図-6.29 振動中のセル殻押込み力最大値（動的増分値）の鉛直分布〔鋼板セル模型(D/H=1/2) 122gal, 16.2Hz〕

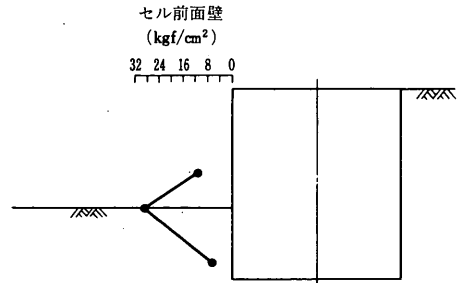


図-6.30 振動中のセル殻押込み力最大値（動的増分値）の鉛直分布〔継手フリーセル模型(D/H=1/2) 126gal, 16.2Hz〕

検討した。

円周方向応力については最大の引張応力の生じた時刻のセルの位置、鉛直方向応力については最大の圧縮応力が生じた時刻のセルの位置を、セル殻ひずみ波形とセル中詰め加速度およびセル底面土圧の波形を比較することにより推定した。

ここで行った推定は位相差による厳密な推定ではないが、最大のセル殻応力が生じた時刻のセルの位置は、上記の方法により概略推定できると考えられる。以下にその検討結果を示す。

a) 最大の円周方向引張応力（セル殻張力）の生じた時刻のセルの位置

セル前面壁の海底面プラス30cm（測点番号37）および海底面プラス10cm（測点番号38）位置では、大半（66%）のケースにおいて、セル模型が前面側に倒れた時に最大の応力が発生していた。しかし、同じくセル前面壁の海底面以下の位置では、

セル模型の位置が明確でなかったケースが62%あり、またセル模型が背面側に倒れた時に最大の応力が発生していたケースもあった（38%）。

セル側面壁（測点番号40および41）では、セル模型が前面側に倒れた時に最大の応力が発生していたケースが約45%、セル模型が背面側に倒れた時に最大の応力が発生していたケースが約10%、セル模型の位置が明確でないケースが約45%あり、一様な傾向が見られなかった。

セル背面壁（測点番号42, 43 および44）では、セル模型が背面側に倒れた時に最大の応力が発生していたケースが約43%、セル模型が前面側に倒れた時に最大の応力が発生していたケースが約17%、セル模型の位置が明確でないケースが約40%あり、一様な傾向が見られなかった。

b) 最大の鉛直方向圧縮応力（セル殻押し込み力）

の生じた時刻のセルの位置

セル前面壁（測点番号45, 46 および47）では、大半（66%）のケースにおいてセル模型が前面側に倒れた時に最大の応力が発生していた。

(3) 設計上の発生応力と最大セル殻発生応力の比較

鋼矢板セルの現行設計法¹⁾にもとずき算定された海底面における設計上の発生応力と、実験2で計測された最大セル殻発生応力（動的増分値）を比較した。

(1)で述べたように同じ水平位置でも振動中の円周方向引張応力の最大値はセル前面壁，側面壁，背面壁で大きさが異なっていたが，設計上関心があるのはその最大値であるため同一水平位置すなわち海底面プラス30cm，海底面プラス10cm，海底面マイナス6.25cmおよび12.5cmの各位置における最も大きな円周方向引張応力（本項では最大応力と略す）に注目

し，これらの値と設計上の発生応力とを比較した。

表-6.3～表-6.4には各位置における最大応力の値を加速度レベルごとにまとめた。なお，表の右欄には海底面における設計上の発生応力を参考のためかかげた。

両者を比較すると次のような結果が得られた。

①振動中の最大セル殻発生応力は，現行設計法とは異なり，セル体の入力加速度の増大にしたがい大きくなっていった。この傾向は振動中のセル前面壁中詰め土圧の増大傾向と定性的に一致していた。

②振動中の最大セル殻発生応力（動的増分値）は，セル体の入力加速度が大きくなると（No 9 加速度で表すと 335～350ガルに達すると）海底面における設計上の発生応力を超えるものがみられた。

なお，鉛直方向の発生応力は(1) b) に述べたように，セル殻の曲げの影響を受けていた可能性があるため，設計上の発生応力との比較を省略した。

表-6.3 振動中の最大セル殻発生応力（1）

(円周方向引張応力)

測定場所	セル模型の種類	D/H	29 ~ 40gal	73 ~ 78gal	117 ~ 126gal	220 ~ 233gal	335 ~ 350gal	450 ~ 499gal	574 ~ 645gal	684 ~ 793gal	設計上の発生 応力 (kgf/cm ²)
海底面	鋼板セル	1/4	1.9 (0.06)	4.2 (0.14)	6.5 (0.21)	13.9 (0.46)	*67.2 (2.20)	*94.5 (3.10)	— (—)	— (—)	30.5
	継手 フリーセル		4.2 (0.14)	5.7 (0.19)	6.9 (0.23)	12.4 (0.41)	23.7 (0.78)	*25.2 (0.83)	*42.0 (1.38)	— (—)	
+30cm	鋼板セル	1/2	4.2 (0.14)	6.3 (0.21)	10.5 (0.34)	20.0 (0.66)	36.3 (1.19)	73.9 (2.42)	87.2 (2.86)	87.4 (2.87)	
	継手 フリーセル		3.2 (0.10)	4.4 (0.14)	4.4 (0.14)	22.3 (0.73)	32.8 (1.08)	37.0 (1.21)	80.4 (2.64)	112.1 (3.68)	
最大応力・設計応力比の平均			(0.11)	(0.17)	(0.23)	(0.57)	(1.31)	(1.89)	(2.29)	(3.28)	

(円周方向引張応力)

測定場所	セル模型の種類	D/H	29 ~ 40gal	73 ~ 78gal	117 ~ 126gal	220 ~ 233gal	335 ~ 350gal	450 ~ 499gal	574 ~ 645gal	684 ~ 793gal	設計上の発生 応力 (kgf/cm ²)
海底面	鋼板セル	1/4	2.7 (0.09)	4.2 (0.14)	5.0 (0.16)	8.6 (0.28)	22.9 (0.75)	34.4 (1.13)	— (—)	— (—)	30.5
	継手 フリーセル		6.3 (0.21)	10.9 (0.36)	9.7 (0.32)	21.0 (0.69)	26.7 (0.88)	35.9 (1.18)	*54.6 (1.79)	33.2 (1.09)	
+10cm	鋼板セル	1/2	5.5 (0.18)	8.2 (0.27)	14.1 (0.46)	31.5 (1.03)	49.1 (1.61)	65.5 (2.15)	83.0 (2.72)	83.0 (1.17)	
	継手 フリーセル		4.6 (0.15)	5.7 (0.19)	7.1 (0.23)	21.4 (0.70)	60.3 (1.98)	81.5 (2.67)	115.5 (3.79)	162.1 (5.31)	
最大応力・設計応力比の平均			(0.16)	(0.24)	(0.29)	(0.68)	(1.31)	(1.78)	(2.77)	(2.52)	

注) 表中※印は，波形が乱れており定常状態となっていないが，参考のためその最大値を読みとったことを示す。なお一印は，波形が乱れており判断不能なことを示す。

表-6.4 振動中の最大セル殻発生応力 (2)

(円周方向引張応力)

測定場所	セル模型の種類	D/H	29 ~ 40gal	73 ~ 78gal	117 ~ 126gal	220 ~ 233gal	335 ~ 350gal	450 ~ 499gal	574 ~ 645gal	684 ~ 793gal	設計上の発生 応力 (kgf/cm ²)
海底面 - 6.25cm	鋼板セル	1/4	4.2 (0.14)	7.6 (0.25)	16.4 (0.54)	29.4 (0.96)	49.8 (1.63)	78.5 (2.57)	- (-)	- (-)	30.5
	継手 フリーセル		5.9 (0.19)	8.0 (0.26)	11.6 (0.38)	22.9 (0.75)	37.6 (1.23)	71.4 (2.34)	84.2 (2.76)	112.6 (3.69)	
	最大応力・設計応力比の平均		(0.17)	(0.26)	(0.46)	(0.86)	(1.43)	(2.46)	(2.76)	(3.69)	

(円周方向引張応力)

測定場所	セル模型の種類	D/H	29 ~ 40gal	73 ~ 78gal	117 ~ 126gal	220 ~ 233gal	335 ~ 350gal	450 ~ 499gal	574 ~ 645gal	684 ~ 793gal	設計上の発生 応力 (kgf/cm ²)
海底面 - 12.5cm	鋼板セル	1/2	2.1 (0.07)	2.5 (0.08)	2.5 (0.08)	2.9 (0.10)	18.9 (0.62)	40.3 (1.32)	62.0 (2.03)	49.6 (1.63)	30.5
	継手 フリーセル		4.2 (0.14)	6.1 (0.20)	4.8 (0.16)	28.4 (0.93)	70.6 (2.31)	58.0 (1.90)	41.8 (1.37)	67.2 (2.20)	
	最大応力・設計応力比の平均		(0.11)	(0.14)	(0.12)	(0.52)	(1.47)	(1.61)	(1.70)	(1.92)	

6.6 振動中の過剰間隙水圧

過剰間隙水圧の測定は、振動中にセル中詰めあるいは地盤が液状化したかどうかを調べることにあ
る。液状化したかどうかの判断は過剰間隙水圧(+側最大値)

とその測点における有効土被り圧との比較で行な
う。すなわち、過剰間隙水圧の測定値がその測点の有効土被り
圧に近ければ、液状化の可能性があったと判断した。
表-6.5によると、D/H = 1/4の両セル模型では

表-6.5 セル中詰めおよび背面地盤における振動中の過剰間隙水圧

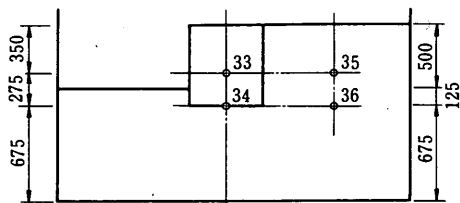
① 鋼板セル模型の測定結果

測定場所	測定 番号	過剰間隙水圧(gf/cm ²)								有効土被り圧 (gf/cm ²)
		29 gal	73 gal	117 gal	233 gal	337 gal	450 gal	574 gal	690 gal	
セル中詰め	33	0.0	0.3	0.9	4.6	12.7	20.6	24.5	23.5	36.7
	34	センサー不良								62.2
背面地盤	35	0.0	0.6	1.0	3.6	6.0	11.2	14.3	18.4	36.3
	36	0.0	0.3	0.2	0.2	1.5	4.5	7.4	14.8	61.6

② 継手フリーセル模型の測定結果

測定場所	測定 番号	過剰間隙水圧(gf/cm ²)								有効土被り圧 (gf/cm ²)
		40 gal	75 gal	120 gal	226 gal	335 gal	460 gal	578 gal	684 gal	
セル中詰め	33	0.0	0.4	1.6	6.3	12.9	19.6	22.5	20.3	37.1
	34	センサー不良								62.9
背面地盤	35	0.0	0.5	1.1	2.4	5.7	10.2	11.8	15.3	37.4
	36	0.0	0.2	0.5	0.7	1.5	4.1	6.5	9.8	63.5

(D/H = 1/4 のセル模型の場合)



注) 振動中の+側(水圧増加の方向)間隙水圧の最大値で過剰間隙水圧を代表させた。

セル中詰めおよび背面地盤の過剰間隙水圧の測定値が全入力レベルで有効土被り圧を大幅に下回っていることから、セル中詰めおよび背面地盤では液状化は生じていなかったと推定できる。

また、 $D/H=1/2$ の両セル模型でも同様な傾向であり、セル中詰めおよび背面地盤では液状化は生じていなかったと推定できる。

6.7 振動後のセル体および地盤表面の残留変位

(1) セル前面壁の残留水平変位

セル前面壁の残留水平変位は、各振動試験の前の変位を（例えば 200ガル入力後の残留変位は 200ガル入力前の変位を）ゼロとして求められた振動後の

変化量で表した。図-6.31には、 $D/H=1/4$ のセル壁の残留水平変位の測定結果を図示し、図-6.32には $D/H=1/2$ の同結果を図示した。

セル天端付近（海底面+45cm）における残留水平変位を $D/H=1/4$ と $D/H=1/2$ のセル模型の間で比較すると、 $D/H=1/2$ の測定結果の方が若干（1~2割程度）小さく、根入れ効果が認められる。

この傾向は、継手フリーセルでも鋼板セルでも同様であった。

次に、セル殻の継手の有無による影響をみると、両セル模型のセル前面壁残留水平変位は海底面プラス5cmの位置でも海底面プラス45cmの位置でもほとんど一致しており、両セル模型の差はほとんど認め

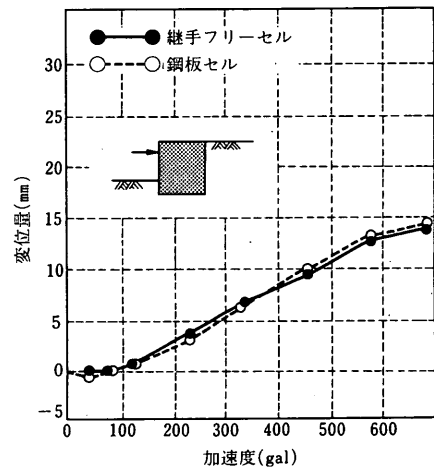
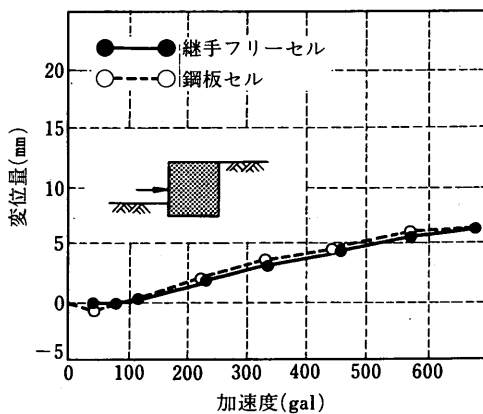


図-6.31 振動後のセル前面壁の残留水平変位($D/H=1/4$)

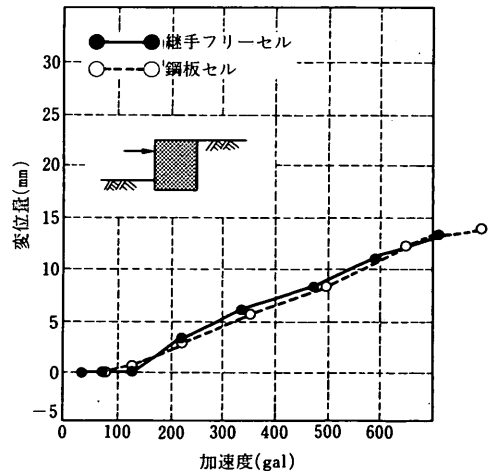
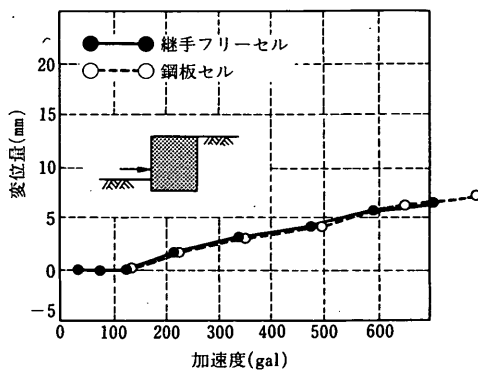


図-6.32 振動後のセル前面壁の残留水平変位($D/H=1/2$)

られなかった。

図-6.33および図-6.34にはセル前面壁の残留傾斜角を図示した。

なお、傾斜角はセル前面壁天端と地表面位置の水平変位量の差を2点間の距離で割った値(rad)で算定した。

(2) セル中詰め地表面残留鉛直変位
前面側 (セル前面壁より5cm セル中心に寄った位

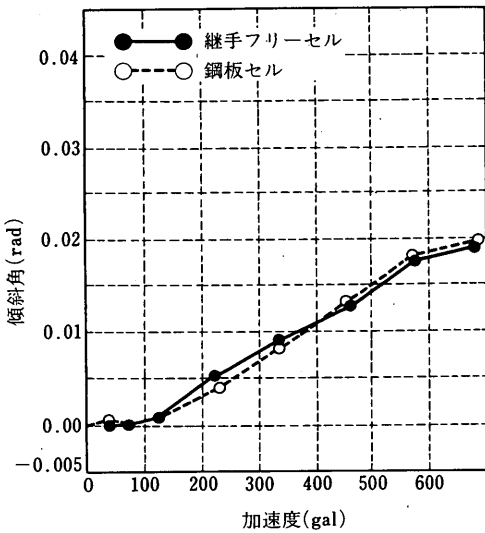


図-6.33 セル前面壁の残留傾斜角(D/H=1/4)

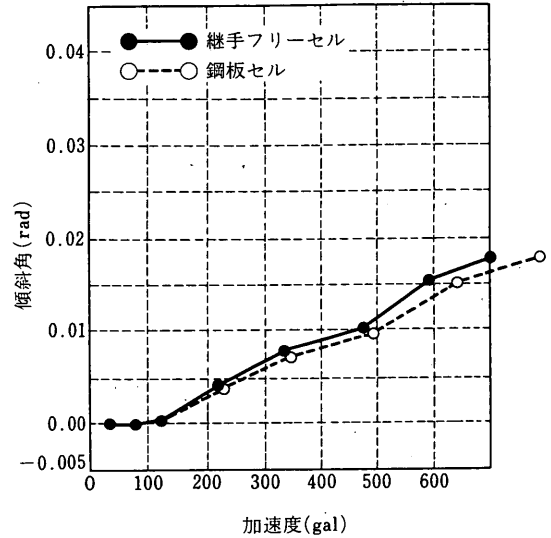


図-6.34 セル前面壁の残留傾斜角(D/H=1/2)

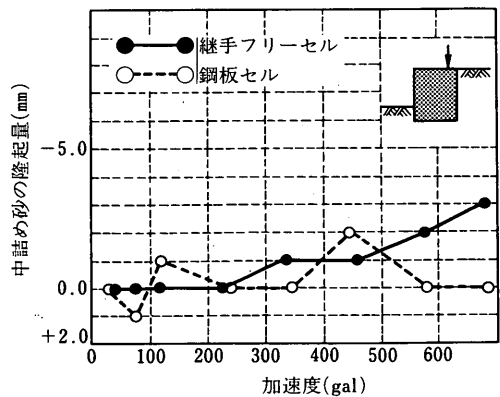
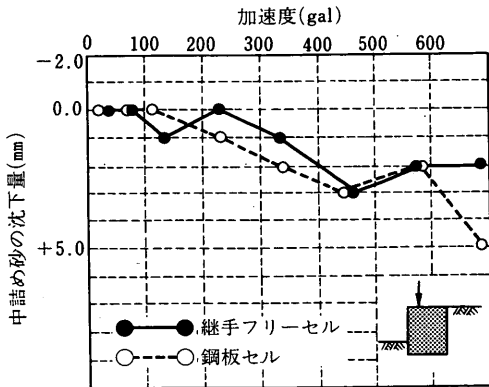


図-6.35 セル中詰め表面の残留鉛直変位(D/H=1/4)

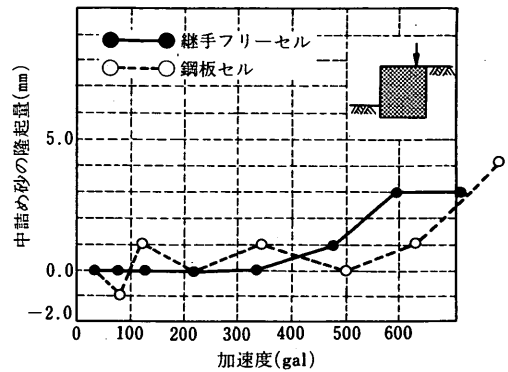
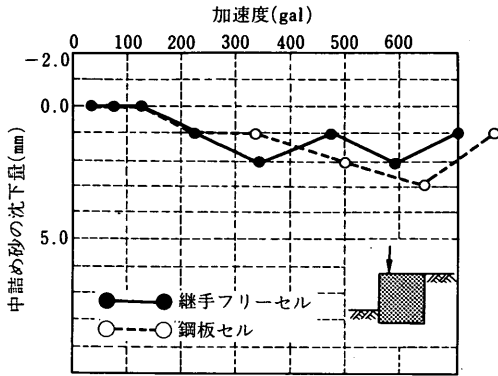


図-6.36 セル中詰め表面の残留鉛直変位(D/H=1/2)

(3) 前面地盤および背面地盤の残留鉛直変位

振動後の前面地盤の残留鉛直変位(振動後の変化量)は、セル体の残留水平変位の小さい117~120ガルまでは変化がほとんど見られなかったが、加速度がさらに大きくなると隆起しはじめ、隆起量はセル前面壁に近いほど大きかった。

一方、振動後の背面地盤の残留鉛直変位も、セル

体の残留水平変位の小さい117~120ガルまでは変化がほとんど見られなかったが、加速度がさらに大きくなると全試験体で、背面地盤は沈下しはじめ、その沈下量はセル背面壁に近いほど、大きかった。

図-6.37に、一例としてD/H=1/2の継手フリーセル模型の測定結果を示す。

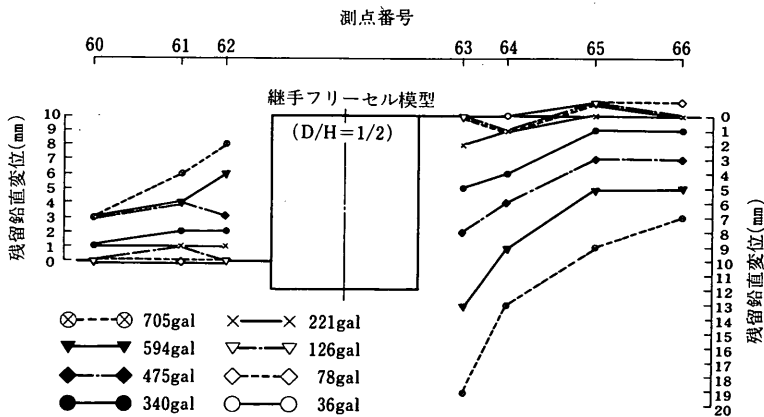


図-6.37 振動後の前面地盤および背面地盤の残留鉛直変位

6.8 振動後のセル体の断面変形

表-6.6によると、D/H=1/4の鋼板セル模型の場合、233ガルまではほとんどセル体の断面変形は無く、加速度がこれより大きくなると若干の断面変形が生じた。

本体セルの振動後の変化量は、最大変形量と初期値の比で表すと、0.6%となり小さかった。

また、アーク部の振動後の変化量は6.2%であった。この最大値は、690ガルの最終入力時に生じたものであり、それまでの加速度における最大の変化量は、2.0%と小さかった。

また同表によると、D/H=1/4の継手フリーセル模型の場合、335ガルまではほとんどセル体の断面変形は

無かった。加速度がこれより大きくなると若干の断面変形が生じたが、本体セルの振動後の変化量は、最大でも0.4%、アーク部の振動後の変化量は、最大でも2.0%と小さかった。

この傾向はD/H=1/2のセル模型でも同様であった。参考までに振動後の最大変化量のみを示すと、鋼板セル模型では本体セル0.2%、アーク部3.1%、継手フリーセル模型では、本体セル0.4%、アーク部2.0%であった。

表-6.6 振動後のセル体の断面変形 (D/H=1/4のセル模型の場合)

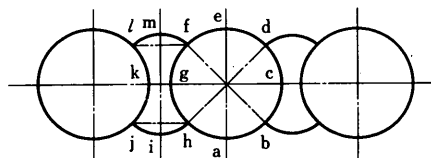
① 鋼板セル模型の測定結果

	測定位置	初期値 (mm)	変形量 (mm)								最大変形量 初期値 (%)
			29 gal	73 gal	117 gal	233 gal	337 gal	450 gal	574 gal	690 gal	
セル本体	ae	506	+1	0	0	0	0	+2	+2	+2	0.4
	bf	495	0	0	+1	0	+1	+1	+1	+1	0.2
	cg	498	0	0	0	0	-2	-3	-2	-3	0.6
	dh	500	0	0	0	0	0	-1	+2	+1	0.4
アーク部	hi	240	0	0	0	0	0	+2	+3	+2	1.3
	gk	97	0	0	0	0	+1	+2	+2	+6	6.2
	fl	246	-1	0	0	-1	0	0	0	+2	0.8
	im	463	0	0	0	+1	+1	-2	-1	-3	0.6

② 継手フリーセル模型の測定結果

	測定位置	初期値 (mm)	変形量 (mm)							最大変形量 初期値 (%)	
			40 gal	75 gal	120 gal	226 gal	335 gal	460 gal	578 gal		684 gal
セル本体	ae	502	0	0	0	0	0	+1	+1	0	0.2
	bf	494	0	0	0	0	0	+1	0	0	0.2
	cg	491	0	0	0	0	0	-1	-1	-2	0.4
	dh	503	0	0	0	+1	0	+1	+1	+1	0.2
アーク部	hi	235	0	0	0	-1	0	+1	+1	0	0.4
	gk	98	0	0	+1	0	+1	+1	+2	+2	2.0
	fl	239	0	+1	0	0	+1	0	+1	+1	0.4
	im	468	0	0	0	+1	0	0	-1	+1	0.2

(前面側)



(背面側)

注) 変形量は振動前の各測定位置の値を0とし、その振動後の変化量(距離の広がる方を+で表示)で表した。

6.9 継手フリーセル模型の継手ずれ

継手フリーセル模型は、鋼矢板セルのようにセル殻に継手があり、その継手摩擦を通常の鋼矢板に比較し低減させた継手構造を持つセル模型である。したがって継手フリーセル模型のセル殻継手は、セル体の変形にともなわずれやすい構造となっている。

継手フリーセル模型の継手のずれは、発生するとすればせん断力の大きくなる中立軸に近い継手において発生

すると考えられるが、その部分のセル殻は本体セルとアーク部の中詰め砂により囲まれており測定が困難であるため、実験2では測定ができなかった。

したがって、実験2では目視により振動後のセル殻継手のずれを観察した。目視観察のため確実なことはいえないが、おおむねD/H=1/4のセルでもD/H=1/2のセルでも、加速度が335~340ガルに達した時点でその継手ずれが顕著になってきたように見えた。また、最

終荷重による振動後の継手ずれは、どちらも10mm程度になっていた。(写真-6.1参照)

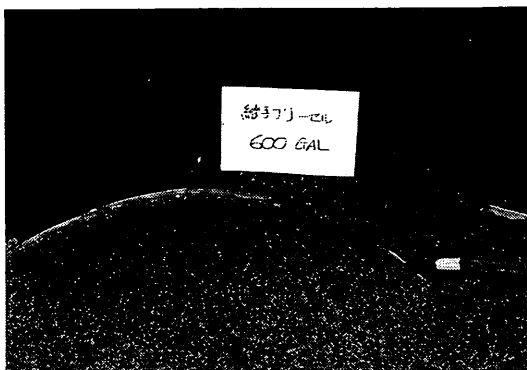


写真-6.1 振動後のセル殻継手ずれ

7. 継手の有無によるセル構造物の動的挙動への影響

本実験では、セル殻継手のない鋼板セル模型と、セル殻継手がありかつその継手摩擦を通常の鋼矢板より低減させた継手フリーセル模型を使用して、鋼製セル構造物の動的挙動を検討した。

以下に、鋼板セル模型と継手フリーセル模型とで、すなわちセル殻継手の有無により鋼製セル構造物のセル中詰め慣性力および振動時の変位、地盤反力、変形などの動的挙動が異なるのかどうかを考察した。

7.1 セル中詰め慣性力への影響

振動時のセル中詰め慣性力は、中詰めの各部分の質量とその作用加速度の積の総和で表せる。鋼板セル模型の振動実験¹⁰⁾によると、鋼板セルはセル内が砂(粒状体)で中詰めされており、構造物が地震力を受けた場合セル中詰め内には位相差が生じるため、その中詰め慣性力は中詰め全質量と地震力により剛体として発生する加速度の積より小さくなることを報告している。

「根入れ鋼板セル設計指針¹⁴⁾」ではこの実験結果にもとずき、「地震時のセル中詰め慣性力の算定」の解説の中で、セル中詰め慣性力の算定における設計震度の低減について述べ、中詰め慣性力は中詰め全質量と低減された設計震度の積で求めることができることを紹介している。

一方、鋼矢板セルの中詰め慣性力に関しては、これまでに研究されていない。したがって本項では、根入れ鋼板セルと同様に、鋼矢板セルの中詰め慣性力も、中詰め土全質量と地震力により剛体として発生する加速度の積

より小さくなるのかどうか考察した。

(1) セル中詰め慣性力に関する過去の研究

鋼板セルの中詰め慣性力の研究は、野田らにより行われている。一方、鋼矢板セルの中詰め慣性力の研究は見当たらない。

構造物は異なるものの、サイロや高炉でも類似の研究が行われており、日本建築学会の容器構造設計指針(案)¹⁵⁾では、地震時の構造物の慣性力算定の際の中詰め質量を全質量の0.8倍まで低減できるとしている。

以下に、野田らにより行われた鋼板セルの中詰め慣性力の研究結果¹⁰⁾の概略を示す。

上記報告書では、セル中詰め慣性力と剛体としての慣性力の比、すなわち、剛体としての中詰め作用加速度を基準にすれば、セル中詰め慣性力に寄与する見掛けの中詰め質量である有効質量と全中詰め質量の比を「有効質量係数」と定義した。振動時、この有効質量係数が小さくなれば、セル中詰め慣性力は、中詰め土全質量と地震力により剛体として発生する加速度の積より小さくなるといえる。

この有効質量係数が加速度とともにどのように変化するのか、ロッキング振動装置による試験と並進運動が卓越する振動台による試験により調べた。

これらの実験より、次の結果を得た。

- ①中詰め材料の種類により有効質量係数の値に差があるものの、中詰めが粒状体の場合、いずれの試験においても、有効質量係数は加速度の増加とともに小さくなる傾向が認められた。
- ②セルの大きさやセル高・直径比が有効質量係数の変化に与える影響は小さかった。
- ③中詰めが砂の場合も、有効質量係数は振動台加速度が増加するにつれて減少し、加速度が0.2g以上では0.6～0.8のほぼ一定値に漸近する傾向があった。
- ④鋼板セルにおける中詰め砂の有効質量係数 ξ は、次式で近似できた。

$$\xi = 1.0 - 1.5(\alpha/g) \quad \alpha/g \leq 0.2 \quad \dots(7.1)$$

$$\xi = 0.7 \quad \alpha/g > 0.2 \quad \dots(7.2)$$

ただし α :作用加速度, g :重力加速度

(2) 検討方法

(1)に示したように、鋼板セルは砂(粒状体)で中詰めされているため、構造物が地震力を受けた場合、

セル中詰めには、中詰め土全質量と地震により発生する加速度の積より小さな慣性力が作用すると報告されている。

セル中詰めに、中詰め土全質量と地震力により剛体として発生する加速度の積より小さな慣性力が作用する理由は、次のように考えられる。まず、セル内の砂が慣性力を受けて中詰め砂にひずみが発生し、中詰め内の各部分に位相差が生じる。そのため、セル内の各部分に注目すると、加速度の大きさおよび作用方向にばらつきが生じているため、各部分の質量と作用加速度の積の総和は、中詰め土全質量と地震力により剛体として発生する加速度の積より小さくなるものと推定できる。

鋼矢板セルと鋼板セルは、セル殻が継手のある鋼矢板であるかあるいは連続した鋼板であるかの相違があるものの、基本的にはともにセル殻内を砂により中詰めされた重力式構造物である。しかし、継手の有無により、セル体の変形や中詰め土の運動に差が生じる結果、慣性力の大きさが異なってくることも考えられる。したがって、中詰め慣性力に及ぼす継手の影響を以下に示す方法により検討した。

図-7.1のような根入れのある単体セルを想定する。この状態におけるセル体の共振振動数は、セル体の質量と地盤のバネ係数および減衰定数により決定される。

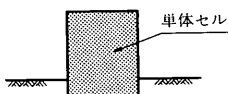


図-7.1 根入れのある単体セル

一方、地震力が作用した状態はセル根入れ部の地盤を強制変位させた状態と同じであり、セル体には慣性力のみが作用する。

セル形状、根入れ長、セル中詰め材料および単位重量が共通な鋼矢板セルと鋼板セルを想定し、図-7.1に示す状態で同一の地盤の強制加振を行った時、もし、両セルのセル中詰め慣性力の大きさが異なっていれば、見掛けのセル中詰め質量に差が生じるため、その共振振動数に差が生じるものと考えられる。

逆に、両セルの共振振動数が一致していれば、両セルの慣性力の大きさも一致していたと判断できる。

(3) 実験1のセル体の共振振動数の推定

実験1の実験結果を使用して、継手フリーセル模型および鋼板セル模型のセル体の共振振動数を求めた。

共振振動数はそれぞれのセル天端加速度（測定番号6および14）の測定結果を使用して、次に示す二つの方法により推定した。なお、二つの方法により異なった二つの共振振動数が得られた場合は単純平均した値をその共振振動数の推定値とした。

a) 加速度応答倍率曲線より推定する方法（推定方法-1）

同一レベルの加速度振幅を入力した場合、セル体の共振点では、セル天端加速度が最も大きくなるため、セル体への入力加速度の比で表される加速度応答倍率も最大となる。地盤地表面付近に設置した測点番号10の加速度をセル体への入力加速度とみなし、加速度応答倍率が最大となる振動数をセル体の共振振動数とした。

b) 位相差曲線より推定する方法（推定方法-2）

本試験で使用したセル模型は、きわめて単純化すれば図-7.2に示すようなセル体の質量を持つ一自由度系の一質点モデルに置換えられ、振動時のセル模型の挙動は、地盤を強制変位させた時の挙動で表せる。

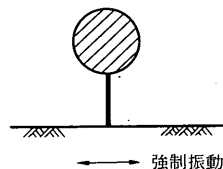


図-7.2 実験1のセル模型のモデル化

図-7.2のモデルでは、減衰定数が小さければ共振点における質点と地盤の加速度の位相差は約90°となる。

この関係が成り立つと仮定して、位相差曲線よりセル体の共振振動数を推定した。すなわち、セル天端加速度と地盤加速度（地盤表面付近に設置した測点番号10の加速度で代表させる）の位相差が90°となった振動数をセル体の共振振動数とした。

(4) 共振振動数の比較

図-7.3に両セル模型の共振振動数の測定結果を

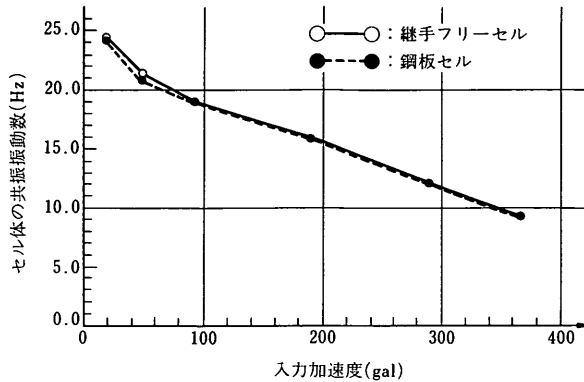


図7.3 継手フリーセル模型と鋼板セル模型の共振振動数の比較

示した。図中○印は継手フリーセル模型の結果を、●印は鋼板セル模型の結果を示す。

同図によると、両セル模型の共振振動数は、18.0ガル入力時で1%、46.5ガルで3%の差があったが、93.7ガル、190.5ガル、291.1ガル、365.6ガル入力時では非常に良く一致していた。

両セル模型のセル直径、セル高、根入れ長、中詰め材料および単位重量、地盤条件などの初期条件(4.7.(1)参照)、および振動後のセル径ならびにセル中詰め表面沈下量の変化(5.3参照)から推定される振動中の地盤条件がほとんど等しかったことから、18.0~365.6ガルまでの入力による共振試験では、両セル模型の共振振動数はほとんど一致していたとしてよい。

(5) まとめ

(4)で示したように、セル殻継手のない鋼板セル模型とセル殻継手がありかつ継手摩擦が低減されている継手フリーセル模型を使用した共振試験結果によると、両セル模型の共振振動数はほとんど一致していた。本試験は一对の試験ではあるが、①セル中詰め内部摩擦角は約34°であり標準的な角度であったこと、②鋼板セルの試験⁹⁾で「セルの大きさやセル高・直径比が有効質量係数の変化に与える影響は小さかった」ことを報告しており、両セルに対してセル径やセル高・直径比を変化させた実験を行っても、本試験と同様な結果がえられるものと類推できることから、セル殻継手の有無はセル中詰め慣性力の大きさにほとんど関係しないと判断できる。

7.2 振動時の動的挙動(変位、地盤反力、変形)への影響

(1) セル体の動的挙動に関する過去の研究

振動時の鋼板セルのセル体せん断変形は、野田らにより研究されている¹⁰⁾。野田らは、砂地盤に根入れされた鋼板セル模型の50~700ガルの強制振動試験により①強制振動を受けた時の鋼板セルの外観上の挙動は剛体的であり、ロッキング振動が卓越していた、②セル護岸に大きな残留変位が生じた場合でもセル自体の断面変形量(直径変化量)や中詰め土の沈下量が小さく、鋼板セルはせん断破壊していなかった、③中詰め土内に予め敷いた色砂層の試験前および終了後の変化より判断すると、根入れ部中詰め土は、セル前面壁側で沈下し、背面側で隆起しており、セルセンターでは沈下も隆起も生じてない部分があったことを報告している。

しかしながら、セル殻に継手のある鋼製セル構造物の動的挙動に関しては、根入れのある場合も根入れのない場合も大変形を生じさせた研究例がなく、その動的挙動は現状では明らかになっていない。

以下では、セル殻継手の有無が鋼製セル構造物の動的挙動におよぼす影響を実験2の測定結果より考察した。

(2) 検討方法

セル殻継手の有無によるセル体の動的挙動への影響について、鋼板セル模型と継手フリーセル模型の測定結果を比較することにより、次の6項目に関して検討した。

- ①振動中のセル体水平変位
- ②振動後のセル体残留水平変位

- ③振動中のセル底面土圧
- ④振動中の根入れ部前面土圧
- ⑤振動後のセル直径の変化
- ⑥振動後のセル中詰め表面残留鉛直変位

(3) 鋼板セル模型と継手フリーセル模型の測定結果の比較

a) 振動中のセル体水平変位

- ① $D/H = 1/4$ の両セル模型の振動中のセル頭部水平変位振幅はほとんど一致していた。(図-7.4参照)
- ② $D/H = 1/2$ の両セル模型の振動中のセル頭部水平変位振幅もほとんど一致していた。
- ③ 地表面付近の振動中のセル体水平変位振幅も同様な傾向であった。(図-7.5参照)

b) 振動後のセル体残留水平変位

- ① $D/H = 1/4$ の両セル模型の振動後のセル頭部残留水平変位はほとんど一致していた。(図-7.6参照)
- ② $D/H = 1/2$ の両セル模型の振動後のセル頭部残留水平変位もほとんど一致していた。
- ③ 地表面付近の振動後のセル体残留水平変位も同様な傾向であった。(図-7.7参照)

c) 振動中のセル底面土圧(最大土圧)

- ① $D/H = 1/4$ のセル模型のセル底面土圧(前趾土圧)は、継手フリーセル模型の値の方が鋼板セル模型に比べ小さかった。前面側底面土圧(測点番号18)で比較すると、75~690ガル入力時の継手フリーセルの土圧値は、平均すると鋼板セルの約0.7倍であった。(図-7.8参照)
- ② $D/H = 1/2$ の両セル模型のセル底面土圧も同様な傾向を示していた。セル前面側底面土圧(測点番号18)で比較すると、75~705ガル入力時の継手フリーセルの土圧値は、平均すると鋼板セルの約0.8倍であった。(図-7.9参照)

d) 振動中の根入れ部前面土圧(最大土圧)

- ① $D/H = 1/4$ のセル模型の根入れ部前面土圧は、継手フリーセル模型の値の方が鋼板セル模型に比較し若干大きかった。75~690ガル入力時の継手フリーセルの土圧値は、平均すると鋼板セルの約1.3倍であった。(図-7.10参照)
- ② $D/H = 1/2$ のセル模型の根入れ部前面土圧は、

継手フリーセル模型の値の方が鋼板セル模型に比較し大きかった。75~705ガル入力時の継手フリーセル模型の根入れ部前面土圧は、平均すると鋼板セル模型の約2倍であった。(図-7.11参照)

e) 振動後のセル直径変化

- ① $D/H = 1/4$ のセル模型の振動後の本体セル直径変化率は、その最大値で表すと、鋼板セル模型で0.4%、継手フリーセル模型で0.2%あり、ほとんど差が認められなかった。(図-7.12参照)
- ② $D/H = 1/2$ のセル模型の振動後の本体セル直径変化率は、同様にその最大値で表すと、鋼板セル模型で0.2%、継手フリーセル模型で0.4%であり、ほとんど差が認められなかった。
- ③ 以上のように、両セル模型の振動後のセル直径変化率は、29~793ガルの加速度を入力した試験の最大値で表しても0.数%のオーダーであり非常に小さかった。

f) 振動後のセル中詰め表面残留鉛直変位

- ① $D/H = 1/4$ セル模型の振動後の前面側(セル前面壁より5cmセル中心に寄った位置)、および背面側(セル前面壁より5cmセル中心に寄った位置)のセル中詰め表面残留鉛直変位は、若干ばらつきがあるものの、大差がなかった。(図-7.13、図-7.14参照)
- ② $D/H = 1/2$ セル模型の振動後の前面側および背面側のセル中詰め地表面残留鉛直変位も、おおむね一致していた。
- ③ セル体が剛体として回転する場合の中詰め表面回転角と、前面側および背面側の振動後のセル中詰め表面残留鉛直変位より求められる中詰め表面回転角の差は29~793ガルの加速度を入力した試験の最大値で表しても、たかだか 10^{-3} のオーダーであった。(表-7.1参照)

上記の検討結果を要約すると、次のように表せる。

- ① 振動中のセル体水平変位、振動後のセル体残留水平変位などの振動時、振動後の変位挙動、および、振動後のセル直径の変化率およびセル中詰め表面残留鉛直変位などの振動後のセル体の変形挙動に関しては、セル殻の有無の影響はほとんど無かった。

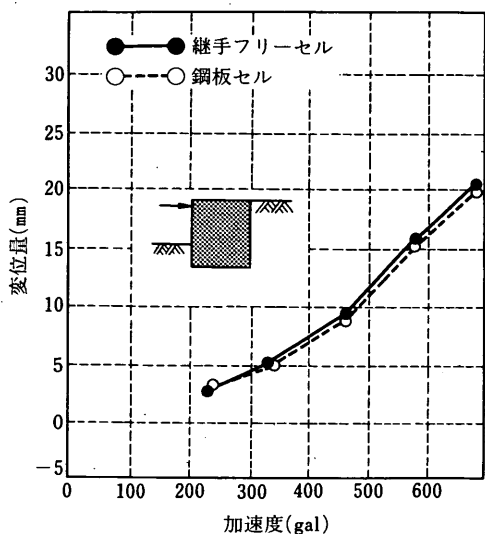


図-7.4 振動中のセル頭部水平変位振幅(D/H=1/4)

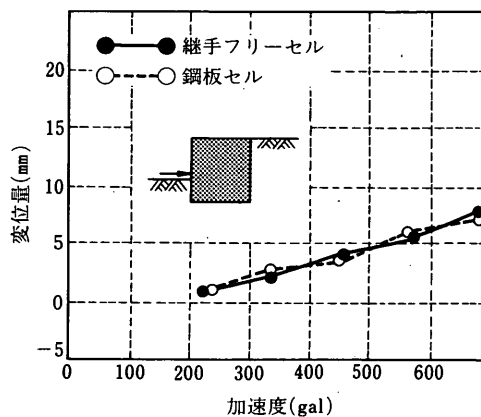


図-7.5 振動中のセル表面(海底面付近)水平変位

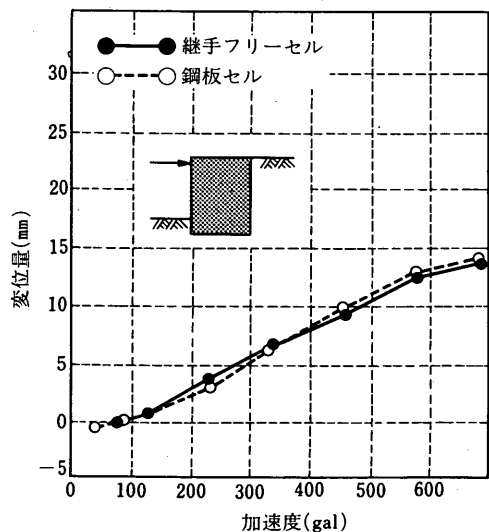


図-7.6 振動後のセル頭部残留水平変位(D/H=1/4)

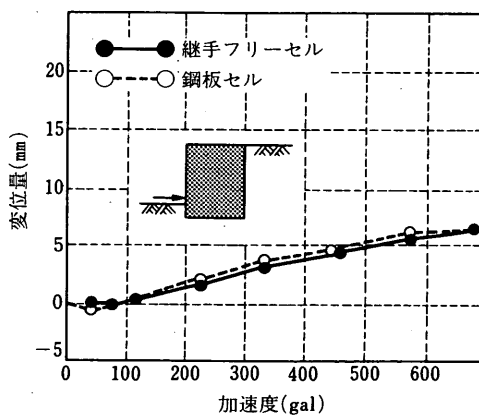


図-7.7 振動後のセル表面(海底面付近)残留水平変位(D/H=1/4)

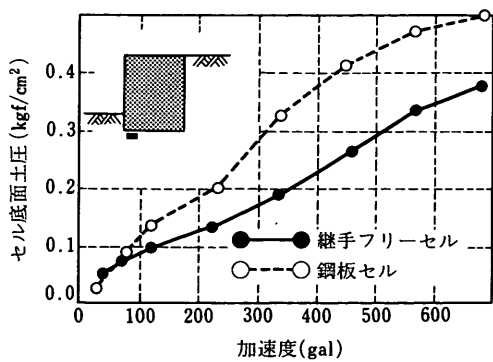


図-7.8 振動中のセル前趾側底面土圧(最大値)(D/H=1/4)

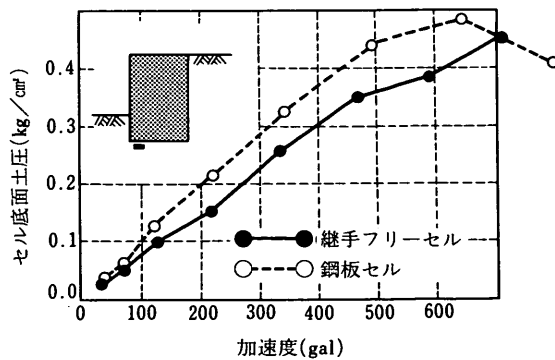


図-7.9 振動中のセル前趾側底面土圧(最大値)(D/H=1/2)

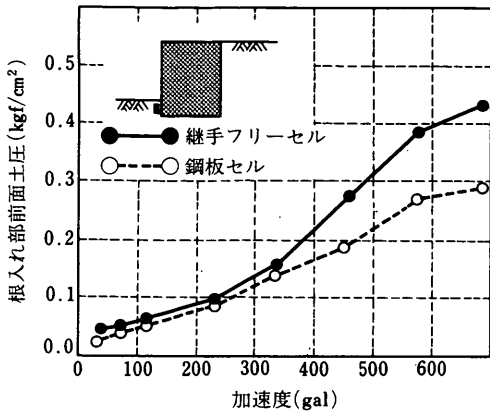


図-7.10 振動中の根入れ部前面土圧 (最大値)
(D/H=1/4)

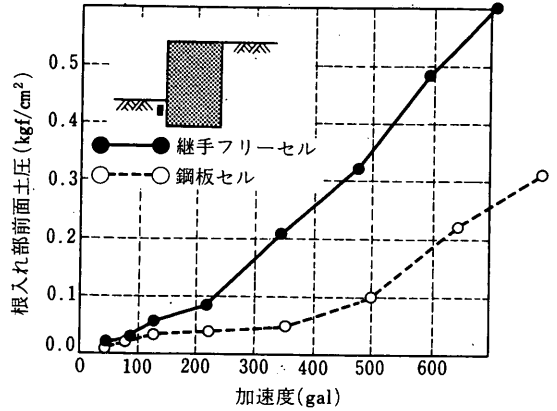


図-7.11 振動中の根入れ部前面土圧 (最大値)
(D/H=1/2)

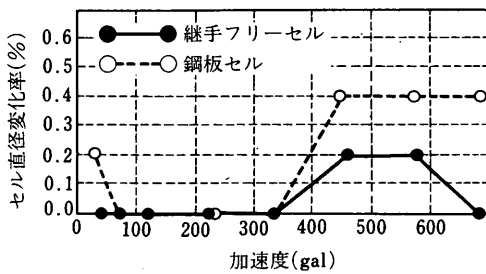


図-7.12 振動後のセル直径変化率 (本体セル)
(D/H=1/4)

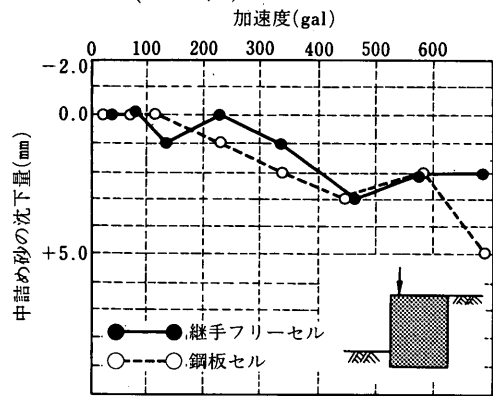


図-7.13 振動後のセル中詰め表面残留鉛直変位
(前面側)(D/H =1/4)

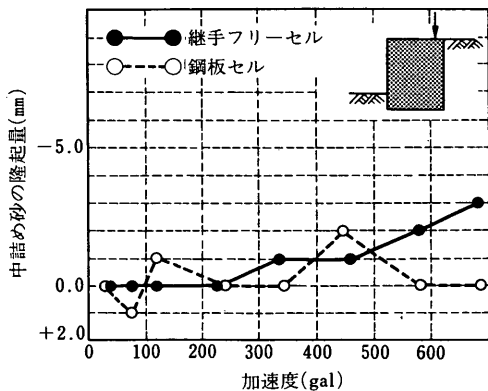


図-7.14 振動後のセル中詰め表面残留鉛直変位
(背面側)(D/H =1/4)

②振動中のセル底面土圧および根入れ部前面土圧などの土圧は、セル殻継手の有無の影響が若干認められた。

(4) 考察

鋼板セル模型の振動試験⁰⁾によれば、砂地盤に根入れされた鋼板セルの動的挙動は、外観上は剛体的であったと報告されている。また、本試験の測定結果によると、①セル体のせん断変形を示すと考えられる振動後のセル直径の変化率も非常に小さく、②振動後のセル中詰め表面残留鉛直変位で述べたように、セル体が剛体として回転する場合の中詰め表面回転角と、前面側および背面側の振動後のセル中詰め表面残留鉛直変位より求められる中詰め表面回転角の差は、29～793 ガルの加速度を入力した試験の最大値で表してもせいぜい 10^{-3} のオーダーであった。これらのことから、工学的には、両セル模型の振動時の変位・変形挙動は剛体的とみなしてよい。

一方、セル殻継手の有無により振動中のセル底面土圧および根入れ部前面土圧に差がみとめられた。継手のあるセルの方が、セル底面土圧(前趾側)は

表一7.1 振動後の中央セルにおけるセル前面壁傾斜角とセル中詰め表面回転角の差
($D/H = 1/4$ のセル模型の場合)

① 鋼板セル模型の測定結果

加 速 度	29gal	73gal	117gal	233gal	337gal	450gal	574gal	690gal
振動後のセル前面壁傾斜角, a (rad)	0.0003	0.0003	0.0010	0.0035	0.0078	0.0138	0.0180	0.0193
振動後のセル中詰め表面回転角, b (rad)	-0.0025	0	0.0025	0.0025	0.0050	0.0125	0.0050	0.0125
a - b (rad)	0.0028	0.0003	-0.0015	0.0010	0.0028	0.0013	0.0130	0.0068

② 継手フリーセル模型の測定結果

加 速 度	40gal	75gal	120gal	226gal	335gal	460gal	578gal	684gal
振動後のセル前面壁傾斜角, a (rad)	0.0003	0.0003	0.0013	0.0053	0.0093	0.0130	0.0178	0.0188
振動後のセル中詰め表面回転角, b (rad)	0	0	0.0025	0	0.0050	0.0100	0.0100	0.0125
a - b (rad)	0.0003	0.0003	-0.0012	0.0053	0.0043	0.0030	0.0078	0.0063

若干小さく、また、根入れ部前面土圧は、逆に大きかった。一般に背面土圧、中詰め慣性力などのセル体に作用する荷重は、セル体を通じてセル底面あるいは根入れ部前面地盤に伝達されるが、その伝達比率は、中詰め内のせん断ひずみの大きさに依存すると考えられる。一般に中詰め内のせん断ひずみが大きくなるほど、コンクリートケーソンなどの完全剛体の挙動から逸脱し、セル底面（前趾土圧）に伝達される荷重は小さくなり、荷重バランスをとるため、逆に根入れ部前面側に荷重伝達される比率が高くなるものと考えられる。継手フリーセル模型の方がセル底面土圧が小さく、また、根入れ部前面土圧が大きかった実験結果から推定すると、継手のあるセルの方が振動時には、セル中詰め内に若干大きなせん断ひずみが生じていた可能性がある。

しかしながら、先にも述べたように、①両セル模型の振動後のセル直径変化率は 29 ~ 793 ガルの加速度を入力した試験の最大値で表しても 0. 数% のオーダーであり小さかったこと、②両セル模型のセル体の変形は、29~793 ガルの加速度を入力した試験の最大値で表しても、せいぜい 10^{-3} オーダーであり、このことは、両セル模型がともにせん断破壊をしなかったと考えられる。したがって、振動中のセル中詰め内のせん断ひずみは、継手のあるセル模型の方が若干大きかった可能性があるものの、両セル模型とも、そのひずみ量は、600 ガルをこえる加速度を入力してもセル中詰めがせん断破壊にいたるほどのひずみにはなっていないと考えられる。

(5) まとめ

セル殻継手がセル体の動的挙動に及ぼす影響は次のように表せる。

- ①セル殻の継手の有無は、振動時のセル体全体の変位・変形挙動にはほとんど影響せず、また、振動時の鋼製セル構造物の変位・変形挙動は、工学的には、継手の有無にかかわらず剛体的とみなしてよい。
- ②セル殻継手の有無は、振動中のセル底面土圧等の地盤反力に微妙な影響を与えている。このことから判断すると、振動中のセル中詰め内のせん断ひずみは、継手のあるセル模型の方が若干大きかった可能性がある。
- ③しかしながら、両セル模型とも、そのひずみ量は、600 ガルをこえる加速度を入力してもセル中詰め内のせん断破壊にいたるほどのひずみにはなっていないと考えられる。

8. セル構造物の動的挙動

セル構造物の挙動として、振動時のセル背面土圧、振動時のセル中詰め土圧、振動時のセル殻張力を、実験2の測定結果にもとずき考察した。

8.1 振動時のセル背面土圧

振動時のセル背面土圧の算定法は、a)物部・岡部の式による地震時の主働土圧による方法、b)セル体と背面地盤はバネモデルでしめされ、背面土圧はセル体と背面地盤の相互作用であらわせると考える方法などがある。

一方、鋼矢板セルの現行設計法では、地震時のセル背面土圧は主働土圧が作用するものとして物部・岡部式により主働土圧を算定している。また、地震時の主働土圧算定式としては、現行では物部・岡部式をこえる算定式がみあたらない。

振動時の背面土圧の測定結果は6.4で示したが、その特徴は次のようにまとめられる。

- ①セル背面土圧の最大値の分布形状は、おおむね深度の増加にともない土圧値も大きくなる静水圧分布に近かった。
- ②土圧値はセル体入力加速度の増加にともない大きくなっていった。
- ③セル背面土圧の最大値はセル体が背面側に戻りきった時に発生していた。

振動時のセル体はロッキング運動に近い挙動をすることを考えられるので、セル頭部に近いところではセル体と背面地盤の相対変位が大きくなるものと考えられる。そのため、セル体と背面地盤をバネモデルであらわした場合、深度によってバネ係数は増大するものの、おおむねセル頭部に近い部分の背面土圧がおおきくなると推定できる。

これは上記の①の挙動と矛盾する。①および②の挙動は、むしろ物部・岡部式により算定される主働土圧、あるいは背面側に倒れた時に最大土圧が発生していることから受働土圧の適応の妥当性を示しているようにみえる。

そこで、本項では、振動時のセル背面土圧の測定値と物部・岡部式による地震時主働土圧および地震時受働土圧の算定値とを比較することにより、その妥当性を検討した。

なお、動土圧の測定は、その精度に問題があり、各測定値はばらつきを含むものと推定されるので、測定結果をこれから算定される背面土圧合力とその土圧合力によるモーメントで代表させ、算定値と比較した。比較にあたっては、海底面より上の土圧による背面土圧合力とその土圧合力による海底面まわりのモーメントを対象とした。

また、根入れ部背面土圧の影響も検討するため、参考として、セル底面より上の土圧による背面土圧合力とその土圧合力によるセル底面まわりのモーメントもあわせて検討した。

- (1) 測定値による背面土圧合力およびその土圧合力によるモーメントの算定方法
測定値による背面土圧合力およびその土圧合力による海底面まわりのモーメントは、振動時の最大背面土圧（+側の最大値）および最小背面土圧（-側の

最大値）を使用して算定した。

背面土圧の合力およびその合力によるモーメントの算定にあたっては、セル天端位置における土圧は測定していないのでセル天端の土圧はゼロとし、海底面における土圧は、測点番号22および23の二つの土圧測定値を結んだ直線と海底面の交点における値とした。海底面以下の土圧に関しても、同様に処理した。

上記の値は、動的増分値であり、設計値と比較するためには、載荷前の静的土圧を加算する必要がある。実験では、静的土圧がうまく測定できなかったため、本項では、載荷前の静的土圧を、土圧係数を0.5とし砂の有効重量を用いた方法により算定し、加算した。なお、背面土圧の合力およびその合力によるモーメントは、壁幅1cm当たりの値を算定した。

- (2) 測定値による背面土圧合力およびその土圧合力によるモーメントに対応する作用震度

物部・岡部の地震時主働土圧の算定式は、地震時にも土くさびができると仮定して導かれている。そこで、(1)の測定値に対応する加速度は、背面地盤に土くさびを仮定し、その重心位置の加速度とすべきと考えられる。したがって、海底面より上の土圧に対する土圧合力および土圧合力によるモーメントに対応する加速度は、海底面とセル背面の交点からすべり面が発生するものと仮定し、その重心位置（セル天端より167mm）の値とした。なお、その位置の加速度は、背面地盤の測点番号12および13の加速度測定値を補間して求めた。

セル底面より上の土圧に対する土圧合力および土圧合力によるモーメントに対応する加速度も同様にして推定した。

加速度より作用震度への換算には、次の式¹⁰⁾を使用した。

$$K_H = 1/3(\alpha/g)^{1/3} \quad \alpha \geq 200\text{gal} \quad \dots(8.1)$$

$$K_H = \alpha/g \quad \alpha < 200\text{gal} \quad \dots(8.2)$$

ここに

- K_H : 作用震度
- α : 作用加速度(gal)
- g : 重力加速度 $g=980\text{gal}$

- (3) 物部・岡部の式による算定値
物部・岡部の式による地震時主働土圧および地震

時受働土圧は、次の手順で算定した。

- ①水平方向の土圧係数を物部・岡部式で求めた。その際、背面地盤の内部摩擦角は背面地盤の単位体積重量および土質試験結果より 34° とした。また、壁面摩擦角は 15° と仮定した。
- ②地震時の背面土の土圧強度分布をもとめた。(1)で述べたように、ここでは背面土の土粒子と水と一緒に動くことと仮定したため、土圧強度は、①でもとめた土圧係数と背面土による被り圧（土の全重量で算定）の積とした。
- ③②で求められた土圧強度分布にもとずき、壁幅1cm当たりの背面土圧合力およびその合力によるモーメントを求めた。

(4) 測定値と算定値の比較

本試験は鋼製セル護岸モデルの振動破壊試験であり、各入力加速度ごとにセル体の共振振動数に近い振動数を入力した。したがって、セル体の安定にとってはかなり厳しい条件の試験といえる。

図-8.1～図-8.4に海底面より上の土圧による土圧合力およびその合力によるモーメントの検討結果を示した。同様に、図-8.5～図-8.8にセル底面より上の土圧合力および合力によるモーメントの検討結果を示した。

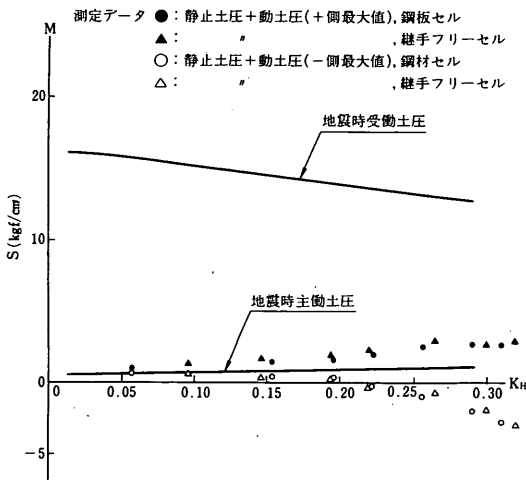


図-8.1 海底面から天端の背面土圧合力 ($D/H = 1/4$)

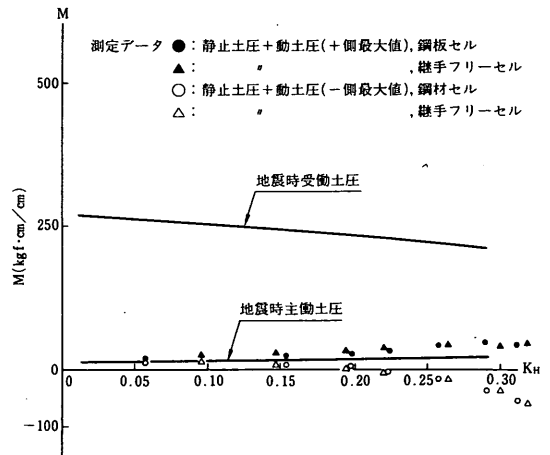


図-8.2 海底面から天端の背面土圧による海底面まわりのモーメント ($D/H = 1/4$)

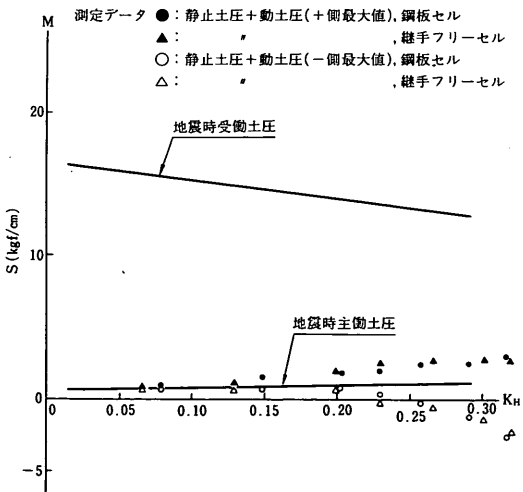


図-8.3 海底面から天端の背面土圧合力 ($D/H = 1/2$)

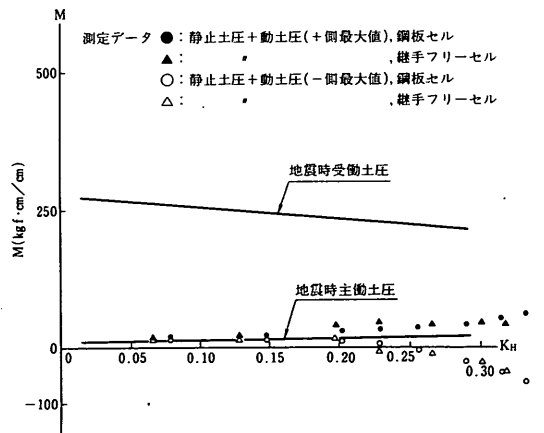


図-8.4 海底面から天端の背面土圧による海底面まわりのモーメント ($D/H = 1/2$)

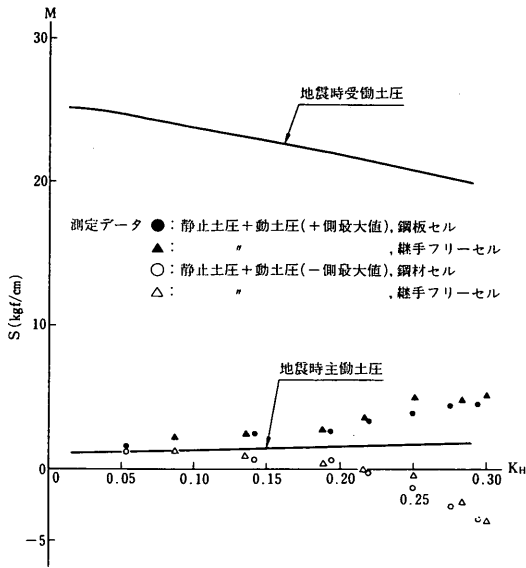


図-8.5 セル底面から天端の背面土圧合力(D/H=1/4)

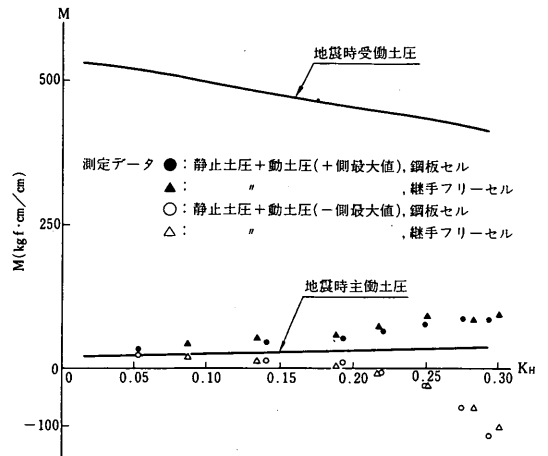


図-8.6 セル底面から天端の背面土圧によるセル底面まわりのモーメント(D/H=1/4)

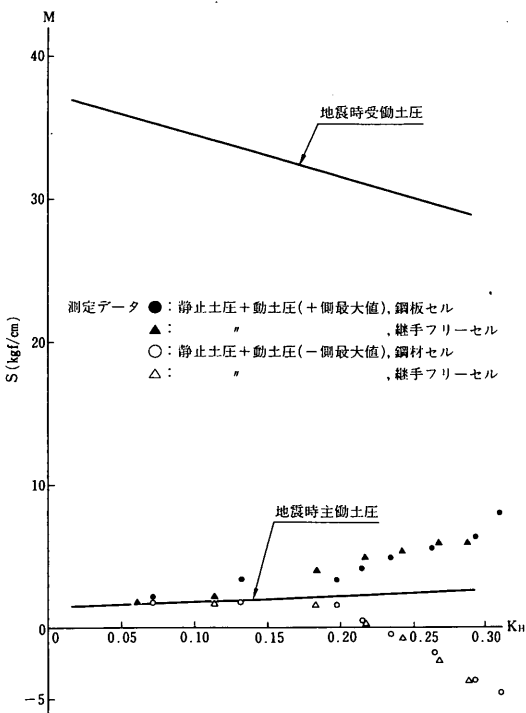


図-8.7 セル底面から天端の背面土圧合力(D/H=1/2)

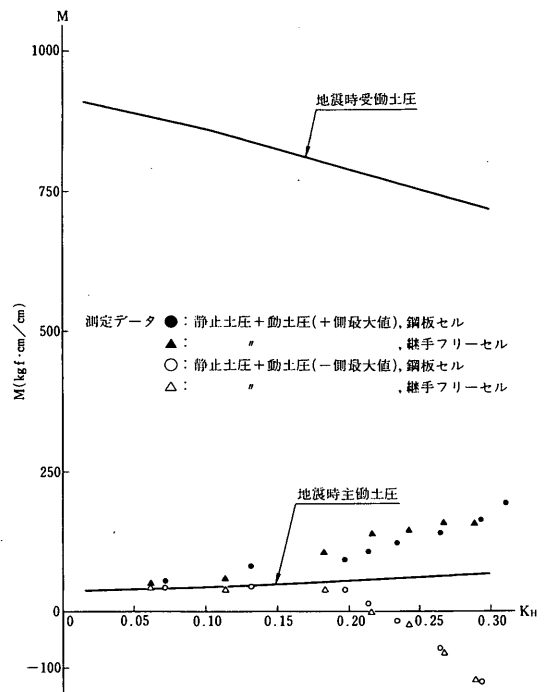


図-8.8 セル底面から天端の背面土圧によるセル底面まわりのモーメント(D/H=1/2)

これらの図より以下のことが言えそうである。

①本実験の振動時背面土圧の値は、物部・岡部式による地震時受働土圧とは異なり、むしろ同式による

地震時主働土圧に近い。

②振動時の背面土圧は、最大値(+側最大値)と比較すると、物部・岡部式による地震時主働土圧を

超えているところもあり、最小値（一側最大値）で比較すると下まわっているところもあった。しかしながら、実務上は、ほぼ地震時主働土圧とみなしてよい。

- ③振動時のセル体の安定は、前面側に倒れた時、一番厳しい状態になっていると考えられる。その際、セル体に作用する慣性力は最大となるが、逆に背面土圧は、最小となっていた。最小値で表わされる背面土圧は、物部・岡部式による地震時主働土圧をかなり下まわった。

なお、図中、最小値で表した背面土圧が負になっているのは、セル体が前面側に倒れた時にセル体と背面地盤がはなれ、その際、振動前の残留ひずみ（見かけ上静止土圧より大きい）の値を土圧計が読みとったためと考えられる。

振動時の背面土圧の測定結果を設計外力として評価する場合、設計上の護岸の作用加速度を設定し、その加速度をベースに整理すべきであるが、作用加速度の特定が困難であったため、ここではとりあえず背面地盤に作用する実加速度を基準にしてまとめを行った。したがって、本検討結果を鋼矢板セル護岸の設計に適用する場合、若干注意を要する。

また、振動時の土圧の測定には技術的に難しい点が多く、データ数もあまり多くないことから、今後さらに研究を重ね本検討結果の妥当性についてさらに検討を行うことが望ましいと考えられる。

8.2 振動時のセル中詰め土圧

前面壁に作用する振動中のセル中詰め土圧は、背面土圧と同様に、物部・岡部の地震時主働土圧算定式で表現できるかどうかを検討した。

振動時のセル中詰め土圧係数は次の手順で求めた。

- ①各測点における振動中の中詰め土圧（最大値）の土圧係数を求めた。中詰め土圧係数は、中詰め土圧から過剰間隙水圧を差し引いた値を各測点における全土被り圧（水の重量を含む土の重量）で除することにより求めた。
- ②各測点における中詰め土圧係数に対応する中詰め加速度を求めた。中詰め加速度は、各測点位置における中詰め加速度とし、測点番号4.5.6の加速度の測定値を補間することにより求めた。
- ③ここでもとめた土圧係数は、各測点における中詰め土圧が振動前をゼロとした動土圧である。物部・岡部の地震時主働土圧係数と比較するため、物部・岡部の地震時土圧係数より振動前の土圧係数を差し引

いて、動土圧成分に対応する値に変換した。なお振動前の土圧は、静止土圧により推定した。

測定結果による振動時の中詰め土圧係数は、全土被り圧（水の重量を含む土の重量）で除することにより求められた値である。したがって、振動前の土圧係数も全土被り圧に対応する値に変換する必要がある。

振動前の土圧を静止土圧により表現する場合、鋼矢板セルの現行設計法によれば、静止土圧係数は0.6となっている。この値は、海底面より300mm上に設置された測点番号27において、有効土圧で表したその被り圧を全土圧で表し換算すると、0.394となる。

同様に、海底面より100mm上に設置された測点番号26で換算すると0.360となる。振動前の中詰め静止土圧係数を、上記のように求められた両測点の換算土圧係数を平均化して求めることにすれば0.377となる。したがって、動土圧成分に対応する物部・岡部の地震時主働土圧係数は、物部・岡部の地震時主働土圧係数から0.377を引いた値で示すことができる。

このようにして求められた測定結果によるセル中詰め土圧係数と、動土圧成分に対応する物部・岡部の地震時主働土圧係数を図化すると、図-8.9となる。

振動時の土圧の測定は精度があまり良くなく、本実験の結果だけで判断することは困難であるが、図-8.9から判断すると、工学的には前面壁に作用する振動中のセル中詰め土圧は、物部・岡部の地震時主働土圧で表せると考えられる。

8.3 振動時のセル殻発生応力

鋼矢板セルの現行検討法では、セル殻張力は中詰め直後において最大となると仮定している。したがって、セル殻張力はセル殻を円管とみなして中詰め時の中詰め土圧（静止土圧、土圧係数=0.6）が内圧として作用するものとして算定し、その作用張力が許容張力を越えないかどうかを検討している。その際、鋼矢板の許容張力は、その継手強度が400tf/mの場合150tf/m（安全率：2.67）としている。

しかしながら実験2の測定結果によると、セル殻張力は入力加速度の増大とともに大きくなっていった。この傾向は前述の現行検討法の仮定と異なる。ここでは、現行検討法の地震時のセル殻破断に対する安全性を検討するため、振動時のセル殻張力が現行検討法による最大作用張力（必要断面応力）に対しどの程度の比率になっているかを算定した。

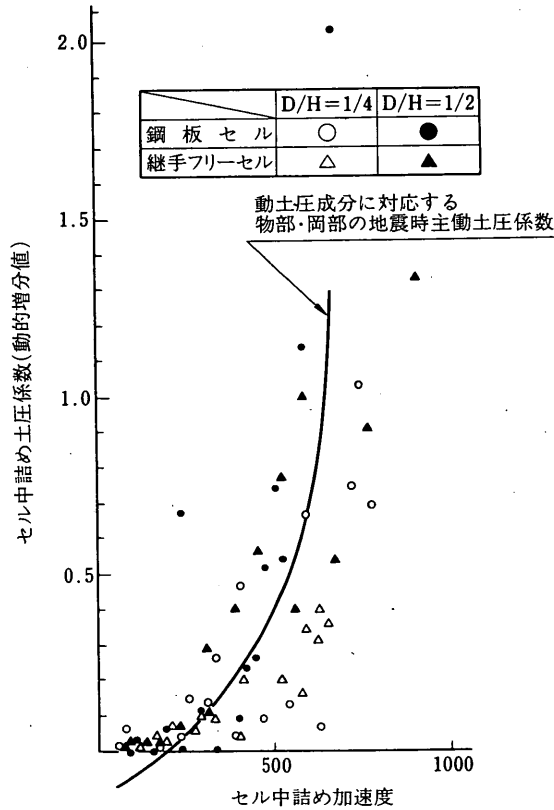


図-8.9 振動時のセル中詰め土圧係数の測定値と物部・岡部の主働土圧係数の比較
(振動前の土圧を静止土圧により算定)

振動時に発生したセル殻張力を用いて地震時のセル殻破断に対する安全性を検査する場合、設計検討上の作用震度に対応する作用加速度を求める必要があるため、本検討では以下の2測点における加速度を使用した。なお、これらの加速度は式(8.1)および(8.2)を使用し作用震度に換算した。

ケース1：セル前面基礎地盤（海底面より160mmの位置）における加速度（測点番号9）の測定結果をセル体の設計加速度とする場合

ケース2：裏埋土天端（測定番号13）における加速度の測定結果をセル体の設計加速度とする場合

実験2では、海底面プラス30cm、海底面プラス10cmおよび根入れ部で振動時のセル殻張力を測定した。各位置の入力加速度レベルごとの最大セル殻張力は、すでに表-6.3で示した。このセル殻張力は、振動前をゼロとした振動時の増分値であるため、地震時の値は、振動前の

値を加算する必要がある。ここでは、各測定位置の振動前のセル殻張力は、現行検討法により算定できると仮定して、地震時のセル殻張力を単純に各測点における現行検討法の算定値と表-6.3で示した振動時の増分値（最大値）の和で表した。この方法は、若干地震時セル殻張力を過大に評価する可能性があるが、他に適切な方法が見当たらなかったため、この方法を採用した。また、鋼矢板セルの現行検討法では、海底面においてセル殻張力は最大となり、その位置でセル殻張力の検討が行われている。すなわち、セル殻張力に対する必要断面応力は、海底面における値で決定される。

上記のように求められた地震時のセル殻張力（最大値）と現行検討法による必要断面応力の比を算定し、セル体入力加速度ごとにプロットした（図-8.10～図-8.11）。

図中の実線はセル殻張力の最大値の90%の値を平均化したものである。同図から推定されるように地震時のセル殻張力と現行検討法による必要断面応力の比は、セル

体入力加速度が100ガル($K_H = 0.10$)までは0.9~1.2程度, 150ガル($K_H = 0.15$)までは1.0~1.3程度, 200ガル($K_H = 0.20$)までは1.2~1.6程度であった。

現行検討法では, 鋼矢板(セル殻)の地震時許容張力に関する明確な規定はないが, 一般的な鋼材の許容応力度の地震時割増し係数を50%としていることから, 地震時のセル殻張力と現行検討法による必要断面応力の比が

1.5程度以内であれば, 地震時のセル殻破断に対し設計上安全といえる。通常の護岸の設計では, 設計震度はせいぜい0.2程度であり, 実験結果からは, その範囲の地震時セル殻張力と必要断面力の比は最大1.2~1.6程度であることから, 現行検討法は地震時のセル殻破断に対し安全な結果を与えるものと判断できる。

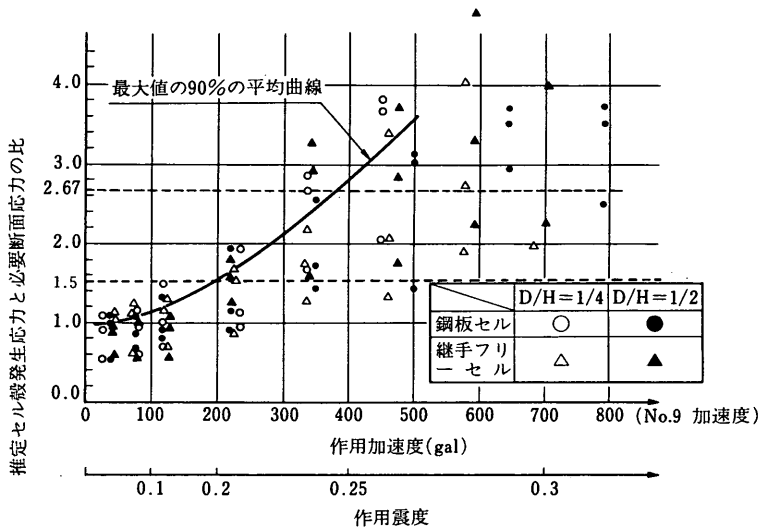


図-8.10 推定セル殻発生応力と必要設計断面応力との比
〔前面地盤 地中加速度 (No 9) を作用加速度とした場合〕

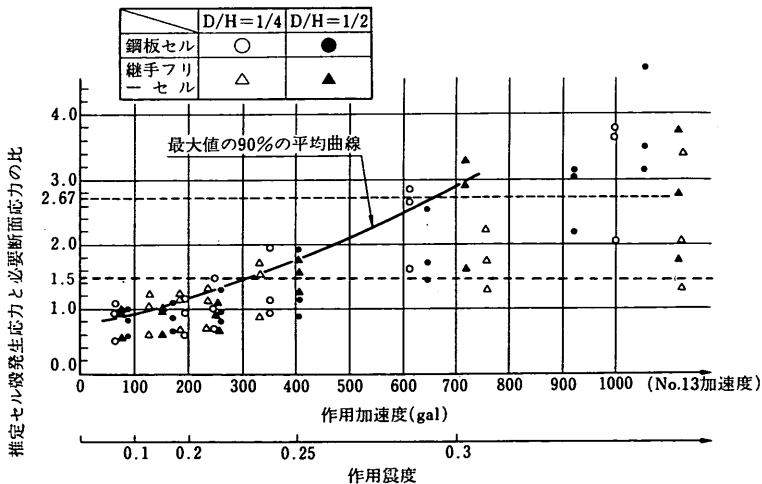


図-8.11 推定セル殻発生応力と必要設計断面応力との比
〔背面地盤 地表面加速度 (No13) を作用加速度とした場合〕

また、振動時に発生したセル殻張力が継手破断に至る（すなわち地震時のセル殻張力と現行検討法による必要断面応力の比が鋼矢板の継手強度の安全率2.67に至る）時の加速度としてみると、図-8.10, 8.11より 380-660ガル ($K_H = 0.24 \sim 0.29$) である。このことから、現行検討法によれば、実際の設計で対象となる地震条件の範囲では地震時荷重によりセル殻に破断が生じる可能性はほとんどないと推定できる。

上記の現行検討法における地震時のセル殻断面に対する安全性の検討は、本来ならば中詰め土圧係数を 0.6 とした設計張力と実際に発生した振動中の応力とを比較すべきものである。しかし本検討では、振動前の中詰め土圧係数（常時の中詰め土圧係数）を 0.6 と仮定した振動前の発生応力に、測定された動的応力を加えたものを振動中のセル殻張力と仮定したものであり、必ずし実際に発生したセル殻張力を用いたものではない。

したがって、今後の鋼製セル構造物の設計法確立のためには、常時の中詰め土圧の測定、セル殻張力の測定精度の向上などに努め、さらにより多くのデータの集積にもとずき、検討を加える必要があると考えられる。

9. 模型護岸の安定性

鋼矢板セル護岸の地震時安定性の検討は、通常「港湾施設の技術上の規準・同解説、第8編、第7章、鋼矢板セル式係船岸」¹⁾（以下現行検討法と呼ぶ。）にしたがい行われている。この検討法は、基本的には根入れのない二重鋼矢板壁模型の静的載荷実験結果²⁾にもとずき決められているものの、過去の大地震における鋼矢板セルの被災例がみあたらないことから、安全な検討法といえる。しかしながら、鋼矢板セル護岸の地震時の安定に関しては、実験的に検証した例は過去にみあたらないため、本動的載荷実験〔三連セル(継手フリーセル模型)による振動破壊実験(実験2)〕の結果を用いて、現行検討法の信頼性について検討した。

9.1 現行設計法による安定計算

(1) 検討方法

振動破壊実験(実験2)におけるセル護岸の変状結果と比較するため、現行検討法にしたがい、振動破壊実験(実験2)で使用した模型セル護岸を実物のセル護岸とみなし、安定計算を行った。安定計算は、①せん断変形に対する安定検討、②壁全体としての安定検討、③セル殻(鋼矢板の継手)の破断に対する安定検討より成り立っているが、ここではせん断変形に対する検討および壁全体としての検討

(滑動のみ)を行った。なお、セル殻の破断に対する安定検討は、8.3 で述べたように、実験において厳密な意味でのセル殻発生応力が測定されていないことから省略した。

対象としたセル模型護岸は、継手フリーセル模型による護岸であり、セル殻継手にはテフロンテープを介在させているため、通常の鋼矢板セル式護岸に比較し、セル殻継手摩擦係数は、小さくなっていた。しかしながら、ここでは、このセル模型を鋼矢板セルと仮定し、安定計算を行った。なお、安定計算では、図-9.1 および図-9.2 に示す模型護岸の条件を使用した。

現行検討法による地震時の護岸安定検討法の信頼性に関する検証は、地震時のせん断変形に対する安全率および壁全体としての安定検討(滑動)の安全率が1を切る震度(両者の内、小さい震度を計算上の破壊震度とした)と、振動破壊実験結果による作用震度とを比較することにより行った。

(2) 安定計算

表-9.1に、現行検討法にしたがって求められた震度および最小震度(セル体の計算上の破壊震度)をまとめた。この安定計算の結果によると、 $D/H = 1/4$ および $1/2$ とも、計算上の破壊震度は、全体安定ではなく、セル体のせん断変形に対する検討により決定されていることがわかる。

同じく表-9.1には、動的載荷試験結果にもとずき求められた護岸変状時の作用震度をまとめた。

「護岸の変状時」とは、「根入れ鋼板セル設計指針(案)」¹⁴⁾に示されている護岸の地震時許容水平変位に従い、振動後の護岸の残留頭部水平変位が護岸壁高(海底面より上のセル高)の1.5%変位が生じた時と仮定した。この仮定にもとづき、護岸変状時の作用震度は、護岸に1.5%の残留水平変位が生じた時のセル体の作用加速度より推定したが、作用加速度から作用震度に変換する際、次の変換式¹²⁾を使用した。

$$K_H = \alpha / g \quad \alpha \leq 0.2g \quad (9.1)$$

$$K_H = 1/3(\alpha / g)^{1/3} \quad \alpha > 0.2g \quad (9.2)$$

ここに

K_H : 作用震度

α : 作用加速度(gal)

g : 重力加速度(980gal)

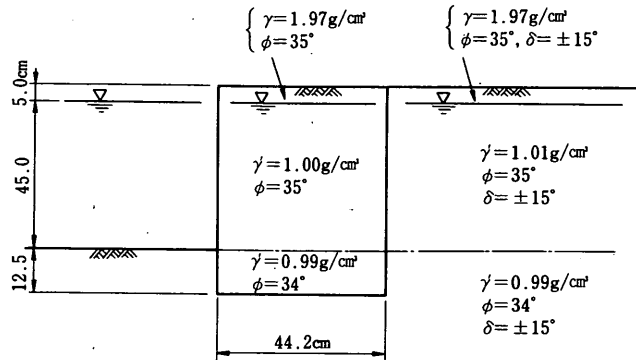


図-9.1 継手フリーセル模型(D/H=1/4)の検討条件

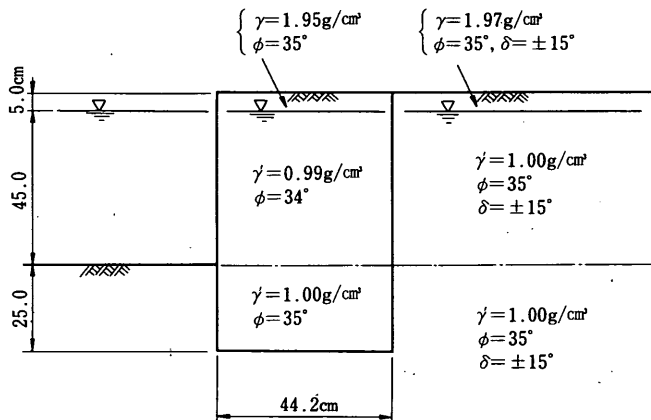


図-9.2 継手フリーセル模型(D/H=1/2)の検討条件

表-9.1 鋼矢板セル式係船岸の現行検討法による模型護岸の安定計算

壁高・根入れ比 D/H	現行検討法により、各検討項目の安全率が1となる震度			振動後1.5%残留頭部水平変位が生じる作用震度 (模型護岸の振動破壊試験結果に基づく作用震度)
	せん断変形	滑動	最小震度	
1/4	(0.15)	(0.20)	0.15	0.23
1/2	(0.15)	(0.24)	0.15	0.25

安定計算で用いるセル体の作用加速度は6.1で述べており、基礎地盤に埋込まれた(海底面より160mm下の位置に埋込まれた)NO.9の加速度計の測定値を使用した。

一般に地震動を経験した構造物の地震力による作用震度の推定は、護岸天端、裏埋土天端などに据付

られた地震計記録により行われることが多い。その例にならえば、セル天端の加速度(NO.6加速度計)あるいは裏埋土天端の加速度(NO.13加速度計)の測定結果を使用すればよいと考えられる。しかしながら、作用加速度が大きくなるにしたがって地表付近に埋め込まれた加速度計の測定精度は、埋め込ま

た地盤が液状化することから、低下する可能性がある。したがって、セル体の作用加速度としては、裏埋土天端や護岸天端位置における作用加速度よりかなり小さめの値であり、地震時の護岸安定性に関する照査のための基準加速度としては必ずしも適切とは言えないが、ここでは、基礎地盤に埋め込まれ測定結果の信頼性の高いNO.9の加速度計の値で代表させた。

現行検討法による安全率が1を切る最小震度（計算上の破壊震度、本検討ではセル体のせん断変形に対する安定検討で決定されている）は、0.15であり、1.5%残留水平変位の生じる作用震度(0.23~0.25)と比較すると、実験結果に基づく作用震度を小さめに評価しているにもかかわらず、かなり下まわっている。この傾向は、根入れの深い場合ほど著しい。

模型を用いた限られた実験結果ではあるが、この検討結果より判断すると、現行の地震時検討法はか

なり安全側の結果を与えるものであり、根入れ効果を適切に評価していないものと推定される。

9.2 根入れ効果を考慮した安定計算

(1) 検討方法

セル模型の静的載荷実験⁶⁾によると、根入れのある鋼矢板セルのせん断破壊耐力には、根入れ効果が認められ、その傾向は根入れが深くなるにしたがって大きくなった。すなわち、図-9.3に示すように、セル体のせん断抵抗モーメントは、現行設計法に用いられている北島式を拡大適用(修正北島式と呼ぶ)して求められたセル底面まわりのせん断抵抗モーメントと比較して大きく、修正北島式による抵抗モーメントに、次式で示すようにD/Hをパラメータとして求められる係数を乗じて算定できることが判っている。

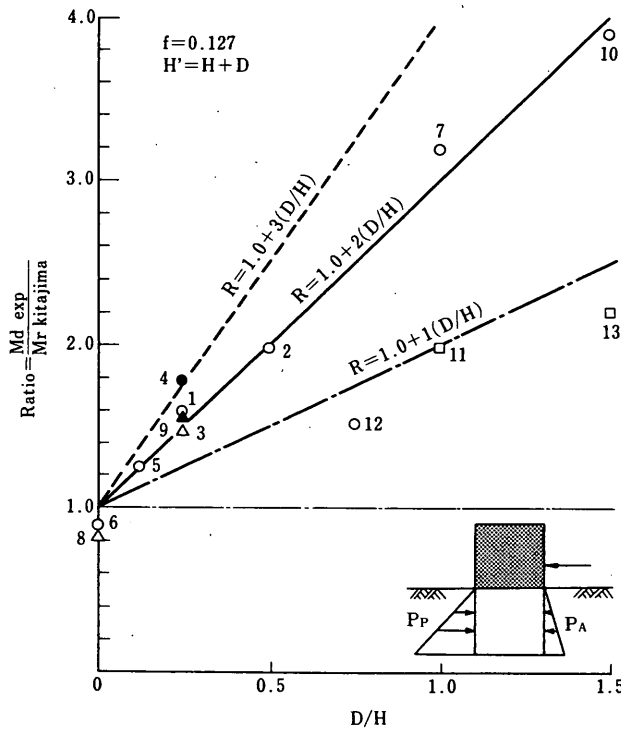


図-9.3 変形モーメントと修正北島式によるせん断抵抗モーメントとの比較

$$M_{R'} = (M_{Rf} + M_{Rs}) \times (1 + a \cdot D/H) \dots (9.3)$$

ここに、

$M_{R'}$: セル底面回りのせん断抵抗モーメント

M_{Rf} : セル底面回りの中詰めによるせん断抵抗モーメント

M_{Rs} : セル底面回りの鋼矢板継手摩擦によるせん断抵抗モーメント

a : 模型試験結果に基づく根入れ効果の係数 $a = 2.0$

D : セル体の根入れ長さ

H : セル体の高さ (海底面より上方)

また、共振振動試験 (実験 1) によると、セル体の地震時慣性力は、セル殻継手の有無にほとんど影響されないことが判った。このことから、鋼矢板セルにおいても、セル体の地震時慣性力を求める際用いる有効質量係数は、鋼板セルと同様に、作用加速度に応じて低減する方法の適用が考えられる。「根入れ鋼板セル設計指針案」¹⁴⁾によると、有効質量係数を次式で表している。

$$\xi = 1.0 - 1.0 K_H \quad K_H \leq 0.2 \quad \dots (9.4)$$

$$\xi = 0.8 \quad K_H > 0.2 \quad \dots (9.5)$$

ここに、

ξ : セル体の地震時慣性力を求める際用いる有効質量係数

K_H : 作用震度

これらの成果を参考にして、以下のように、根入れ効果を考慮した二つの地震時安定性の計算を行った。

① 検討案 1

検討案 1 は、セル体のせん断耐力の根入れ効果を考慮した(9.3)式にもとづく検討法である。セル全体安定については、滑動、転倒、地盤支持力の検討を行なった。この場合、セル壁に作用する背面土圧および前面土圧による摩擦力も考慮した。

② 検討案 2

検討案 2 は、検討案 1 に、式(9.4)、式(9.5)で表されるセル体の地震時慣性力算定法を加えた検討法である。

セル体の地震時慣性力の算定は、次式で行い、セル体のせん断変形の検討および全体安定の検討で使用した。

$$H_w = \xi \cdot K_H \cdot W \quad \dots (9.6)$$

ここに、

H_w : セル体の地震時慣性力

ξ : 震度の低減係数 (地震時慣性力算定の際のセル体の有効質量係数) [式(9.4)、(9.5)式により求める]

K_H : 設計水平震度

W : 中詰め重量 (土中の間隙水の重量も含む)

(2) 安定計算

9.1 で行ったように、振動破壊実験 (実験 2) で使用した模型セル護岸を実物のセル護岸とみなし、安定計算を行った。

安定計算は、せん断変形に対する検討およびセル壁全体としての検討 (滑動、転倒、地盤支持力) を行った。

表-9.2 に検討案 1 に基づく模型護岸の安定計算の結果を、表-9.3 に検討案 2 に基づく結果を示した。安定計算の結果は、表-9.1 と同様に、各検討項目における安全率が 1 を切る震度で示した。なお、表中の右欄には、同様に試験結果に基づく 1.5 % 残留水平変位時の作用震度 (基礎地盤の加速度計 (NO.9) の測定結果をもとに算出した 1.5 % 残留水平変位が生じる時の作用震度) を示した。

検討案 1 による計算上の破壊震度は、各検討項目の最小震度で表されるが、その最小震度は、根入れ比が 1/4、1/2 の場合、それぞれ 0.18、0.21 であり、護岸の変状が生じた作用震度 (0.23 および 0.25) に比較し小さい。さらに両者の差は表-9.1 に見られる現行検討法による検討結果との差に比べ小さくなっていることから、セル体のせん断耐力の根入れ効果を考慮した検討案 1 は現行検討法に比べ、より合理的な結果を与えていると考えられる。

検討案 2 による計算上の破壊震度も、同様に各検討項目の最小震度で表せるが、その最小震度は、根入れ比が 1/4、1/2 の場合、それぞれ 0.20、0.23 であり、実験結果に基づく作用震度 (0.23 および 0.25) に比べ小さく、かつ両者の差はさらに小さい。したがって、検討案 1 に式(9.4)、式(9.5)で表されるセル体の地震時慣性力算定法を加えた検討案 2 も合理的な地震時検討法と見なしてもよいと考えられる。

表-9.2 検討案1による模型護岸の安定計算

壁高・根入れ比 D/H	検討案1により、各検討項目の安全率が1となる震度					振動後1.5%残留頭部水平変位が生じる作用震度 (模型護岸の振動破壊試験結果に基づく作用震度)
	せん断変形	滑動	転倒	地盤支持力	最小震度	
1/4	(0.18)	(0.22)	(0.29)	(0.23)	0.18	0.23
1/2	(0.21)	(0.25)	(0.24)	(0.21)	0.21	0.25

表-9.3 検討案2による模型護岸の安定計算

壁高・根入れ比 D/H	検討案2により、各検討項目の安全率が1となる設計震度					振動後1.5%残留頭部水平変位が生じる作用震度 (模型護岸の振動破壊試験結果に基づく作用震度)
	せん断変形	滑動	転倒	地盤支持力	最小震度	
1/4	(0.20)	(0.24)	(0.33)	(0.27)	0.20	0.23
1/2	(0.23)	(0.27)	(0.27)	(0.24)	0.23	0.25

10. まとめ

本実験では、①セル殻継手の有無によるセル中詰め慣性力への影響、②セル殻継手の有無による地震時動的挙動(変位、地盤反力、変形)への影響、③セル背面に作用する振動中の土圧、④振動中のセル中詰め土圧、⑤セル殻張力などの、鋼矢板セルの地震時の動的挙動の研究を目的として、セル殻継手の無い鋼板セル模型とセル殻継手がありかつその継手摩擦を通常の鋼矢板より低減させた継手フリーセル模型を使用したセル模型の振動実験を行った。また、実験結果にもとずき、⑥鋼矢板セル護岸の地震時安定性に関する検討も行った。

以下にその実験結果および検討結果をまとめた。

①セル殻継手の有無によるセル中詰め慣性力への影響

セル殻継手の無い鋼板セル模型とセル殻継手がありかつその継手摩擦を通常の鋼矢板より低減させた継手フリーセル模型を使用した鋼製セル模型(単体セル、D/H=1/4)の共振振動試験を行った結果、両セル模型の共振振動数はほとんど一致していた。

本実験のような単体セルの共振振動数は、セル体の質量と地盤のパネ係数および減衰定数等の地盤条件により決定されると考えられる。本実験では、両

セル模型のセル形状、根入れ長、セル中詰め材料およびその単位体積重量は同一であり、また、同一地盤に根入れさせ、同時に同一条件で試験したため、振動中の地盤条件はほとんど同じであったといえる。

本実験は単体セルの振動試験のため、セル模型に作用する外力はセル中詰め慣性力だけである。したがって、両セル模型の共振振動数がほとんど一致していたことから、両セル模型に作用したセル体の慣性力の大きさは同じとみなしてよく、工学的には、セル殻継手の有無はセル中詰め慣性力の大きさに対してほとんど影響しないと判断できる。

②セル殻継手の有無による動的挙動(変位、地盤反力、変形)への影響

鋼板セル模型と継手フリーセル模型を使用した鋼製セル護岸モデル(D/H=1/4, 1/2)の振動破壊実験を行い、セル殻継手の有無による動的挙動への影響を検討した。

本検討は、a)振動中のセル体水平変位、b)振動後のセル体残留水平変位、c)振動中のセル底面土圧、d)振動中の根入れ部前面土圧、e)振動後のセル直径変化、f)振動後のセル中詰め表面残留鉛直変位に関

し、両セル模型の測定値を比較することにより行った。

以上の測定値の比較・検討結果から、セル殻継手の有無による動的挙動（変位、地盤反力、変形）への影響は、次のように要約できた。

- i) セル殻継手の有無は、振動時のセル体の変位・変形挙動にはほとんど影響せず、また、振動時の鋼製セル構造物の変位・変形挙動は、工学的には、継手の有無にかかわらず剛体的と考えてよい。
- ii) セル殻継手の有無は、振動中のセル底面土圧、根入れ部前面土圧などの地盤反力の大きさに若干影響を与えていた。セル殻継手を有しているセル模型は、セル殻継手の無いものに比較し、セル底面土圧は小さく、一方根入れ部前面土圧は大きかった。セル体の荷重により抵抗として生じたこれらの地盤反力が異なっていた理由は、その荷重を伝達するセル体のせん断ひずみの大きさが異なっていたためと推定される。また、セル底面土圧（端趾圧）は、一般的にセル体が剛体に近い方が大きい。このことから、振動中のセル中詰め内のせん断ひずみは、継手のあるセル模型の方が若干大きかった可能性がある。
- iii) しかしながら、両セル模型の振動後のセル直径変化率は、29～793 ガルの加速度で加振した場合でも、コンマ数%のオーダーであり小さかったこと、また、両セル模型の振動後のセル体の変形（前面壁と中詰め表面の折角の変化量）も高々 10^{-3} rad のオーダーであったことから、両セル模型とも、そのせん断ひずみ量は微小であり、600 ガルを超える加速度で加振してもセル中詰めのせん断破壊にいたるほどのひずみに至っていなかったと考えられる。

③振動中にセル背面に作用する土圧

継手フリーセル模型および鋼板セル模型の振動中のセル背面土圧は同様な傾向を示し、次のような特徴があった。

- i) セル背面土圧の最大値の分布形状は、おおむね深度の増加にともない土圧値も大きくなる静水圧分布に近かった。
- ii) 土圧値はセル体入力加速度の増加にともない大きくなっていった。
- iii) セル背面土圧の最大値はセル体が背面側に戻りきった時に発生していた。

iv) セル背面土圧の値は、実務上、物部・岡部式による地震時主働土圧とみなせる。

v) 振動時のセル体の安定は、セルが前面側に倒れた時に一番厳しい状態になっていると考えられる。その際、セル体に作用する慣性力は最大となるが、逆に背面土圧は、最小となっていた。この時の最小背面土圧は、物部・岡部式による地震時主働土圧をかなり下まわっていた。

④セル中詰め土圧

前面壁の中詰め土圧（最大土圧）の測定結果を用いて算定した振動時のセル中詰め土圧係数と、動土圧成分に対応する物部・岡部式の地震時主働土圧係数を比較したところ良く一致していた。

振動時の土圧の測定精度はあまり良くなく、本試験だけで判断することは困難ではあるが、上記の結果より、前面壁に作用する振動時のセル中詰め土圧は、物部・岡部の地震時主働土圧で表せると考えられる。

⑤セル殻張力

振動時のセル殻張力の測定値（引張側最大値で検討、測定値は動的増分値であるため現行検討法による静的土圧値を加算し補正した）と現行検討法の必要断面力（海底面での値）の比は、セル体入力加速度が100 ガル（ $K_H = 0.10$ ）までは0.9～1.2程度、150 ガル（ $K_H = 0.15$ ）までは1.0～1.3程度、200 ガル（ $K_H = 0.20$ ）までは1.2～1.6程度と推定された。

通常の護岸の設計では、設計震度はたかだか0.2程度であり、一般の設計では、地震時の許容応力度は常時の1.5倍程度の割増しをしている。したがって、上記の結果より、現行検討法は地震時のセル殻破断に対し安全な結果を与えると推定できる。

⑥鋼矢板セル式護岸の安定計算

振動試験で使用した護岸模型を実物のセル護岸とみなし、振動時（地震時）の鋼矢板セル護岸の安定検討法の信頼性を検証した。

安定計算は、模型護岸の形状および土質条件を検討条件とし、「現行検討法による各検討項目の安全率が1となる最小震度（計算上の破壊震度）」と「振動後1.5%残留頭部水平変位が生じる作用震度（模型護岸が変状をおこす作用震度）」とを比較することにより行った。

現行検討法による最小震度(設計上の破壊震度)は、模型護岸が変状をおこす作用震度をかなり下まわっていた。その傾向は、根入れが深い場合ほど著しかった。この結果より、現行の地震時設計法はかなり安全側の結果を与えるものであり、根入れ効果を適切に評価していないものと判断される。

また、根入れ効果を考慮したセル体のせん断耐力式(9.3)に基づく検討方法(検討案1)によると、その最小震度(計算上の破壊震度)と、模型護岸が変状をおこす作用震度との差が小さくなり、さらに検討案1に対し、式(9.4)～(9.6)によるセル体の慣性力の低減を考慮した検討方法(検討案2)によると、その最小震度と作用震度との差はさらに小さくなった。根入れ効果を考慮した上記の方法は、鋼矢板セル式護岸の地震時安定性に関して、より合理的な結果を与えると考えられる。

川崎製鐵(株) 建材技術部長 植木八寿彦氏
建材技術部課長 城郁夫氏
研究開発センター課長 金子忠男氏
(1988年11月29日受付)

11. あとがき

根入れされた鋼矢板セルの動的挙動を明らかにするため、鋼製セル模型の振動実験を行い、鋼矢板セルの特徴であるセル殻継手の有無が中詰め慣性力、変位・変形、地盤反力などの動的挙動に及ぼす影響を明らかにするとともに、根入れされた鋼製セル構造物の振動時の背面土圧、中詰め土圧、セル殻張力の検討を行った。

本報告は、壁高(基礎地盤面上のセル高さ)と根入れ長の比が $1/4 \sim 1/2$ の小型セル模型を使用し、砂質土地盤に根入れされた鋼矢板セル構造物を対象に実施した実験結果であり、これらの成果の信頼性をさらに高めるためには

- ①根入れが深くなった場合の鋼矢板セルの挙動
- ②実物セル構造物における地震応答などの現場観測による実物大セルの挙動
- ③ゆるい地盤や粘性土地盤に打設される場合の鋼矢板セルの挙動

などの検討課題が残されている。

なお、本報告書を取りまとめるにあたり、有意義な討議をしていただいた、土田隆港湾技術研究所長(前構造部長)、梅原靖文港湾技術研究所次長(前土質部長)、片岡真二第二港湾建設局環境技術管理官(前設計基準研究室長)をはじめ、新日本製鐵(株)、川崎製鐵(株)の下記の人々に対し深く感謝します。

記

新日本製鐵(株) 大阪支店建材室部長代理 海輪博之氏
建材開発技術部部長代理 藤原忠朝氏

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，第7編，第7章，鋼矢板セル式けい船岸，1979年 pp.8-42 ~8-52
- 2) 北島昭一：セル岸壁の安定性に関する研究，運輸技術研究所報告，第12巻，第3号，1962年，101p
- 3) 片山猛雄，中野拓治，蓮見 隆，山口孝市：1968年十勝沖地震などの被災例による現行設計法の検討，港湾技研資料 No.93，1969年，194p
- 4) 三橋郁雄，中山種清：1973年根室半島沖地震などの被災例による現行設計法の検討，港湾技研資料 No 184，1974年，111p
- 5) 土田肇，稲富隆昌，野田節男，柳生忠彦，田端竹千穂，徳永省三，大槻有吾，平野忠告：1978年宮城県沖地震港湾被害報告，港湾技研資料 No325，1979年 175p
- 6) 鋼矢板セル模型の水平載荷実験—その1 静的挙動—，港湾技研資料 No.638，1989年，100p
- 7) 林 聡，宮島信雄：各種けい船岸の振動性状に関する研究（第4報）—セル岸壁の振動性状について—，運輸技術研究所報告，第11巻，第3号，1961年，pp.91 ~112
- 8) 石田昌弘，川井 豊，城 郁夫，中川宏夫：直線形鋼矢板を用いたセル構造物の特性，川崎製鉄技報，Vol.11，No.3，1961年，pp.111 ~125
- 9) 古土井光昭，片山猛雄：残留水圧測定調査，港湾技研資料 No.115，1971年，105p.
- 10) 野田節男，北澤壮介，飯田 毅，森 信夫，田淵博：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年 pp.79 ~167
- 11) 土質工学会編：土質調査法（第1回改訂版），土質工学会，1982年，pp.216 ~217
- 12) 野田節男，上部達生，千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，1975年，pp.442~443
- 13) 才村幸生，森本精洋，高瀬幸紀：根入れ鋼板セル中詰め土圧の現場計測結果，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第3部（1981），pp.562~563
- 14) (財) 沿岸開発技術研究センター：根入れ鋼板セル設計指針（案），1985年，47p.
- 15) 日本建築学会：容器構造設計指針（案），構造標準委員会 容器構造分科会，1978年，p.54
- 16) 野田節男，高橋邦夫，片岡真二，寺崎滋樹，三浦聡，水谷太作：継手の有無が鋼製セル構造物の動的挙動に及ぼす影響，土木学会第42回年次学術講演概要集第1部（1987），pp.858~859
- 17) 野田節男，高橋邦夫，片岡真二，寺崎滋樹，三浦聡，水谷太作：継手の有無が鋼製セル構造物の地震時中詰め慣性力に及ぼす影響，土木学会第42回年次学術講演概要集第1部（1987），pp.860~861

主要記号表

a	: 鋼矢板セルのセル体せん断抵抗モーメントの根入れ効果係数
B	: セルの換算壁体幅
D	: セルの根入れ長さ
d	: セル模型の直径
D/H	: セル体の根入れ・壁高比
e	: 土の間隙比
F	: 安全率
f	: 直線形鋼矢板の継手摩擦係数
f _r	: 地盤の共振振動数
g	: 重力加速度
H	: 地盤面（海底面）から天端までの高さ
H ₀	: 中詰めによる転倒抵抗モーメントを求めるためのセル換算壁高
H _S	: 矢板継手摩擦力による変形抵抗モーメントを計算するための換算壁高
H _w	: セルの地震時慣性力
h	: 地盤の層厚
h _w	: セル内と前面との水位差
K _H	: 設計水平震度
K _i	: 中詰め土圧係数
M _a	: 海底面における変形モーメント
M _r	: 海底面における抵抗モーメント
M _r '	: セル底面まわりのせん断抵抗モーメント
M _r f'	: セル底面まわりの中詰めによるせん断抵抗モーメント
M _r s'	: セル底面まわりの鋼矢板継手摩擦によるせん断抵抗モーメント
N _{sw}	: スウェーデン式貫入試験における貫入深さ 1 cmあたり半回転数
P _{max}	: セル模型のセル殻の継手摩擦抵抗力
P _v	: セル壁に作用する背面土圧および前面土圧による摩擦力
Q	: セル底面の許容せん断抵抗力
q	: セルの上載荷重
R	: セルの半径
R ₀	: セル中詰めによる抵抗モーメントの抵抗係数
R _s	: セル殻のせん断抵抗による抵抗モーメントの抵抗係数
T	: セル殻張力
V _s	: 地盤の弾性波速度
W	: 中詰め全重量
W _{sw}	: スウェーデン式貫入試験器および重すいの重

	量
α	: 加速度
γ	: 中詰めの換算単位体積重量
γ'	: 水中における土の単位体積重量
γ _d	: 土の乾燥密度
γ _w	: 海水の単位体積重量
δ	: 壁面摩擦角
ν ₀	: 中詰めによるセルのせん断抵抗モーメントを求めるための換算壁幅高比 ν ₀ = B/H ₀
ν _s	: 矢板継手間摩擦力によるせん断抵抗モーメントを求めるための換算壁幅高比 ν _s = B/H _s
ξ	: セルの地震時慣性力を求める際に用いる有効質量係数
φ	: 中詰めの内部摩擦角

港湾技研資料 No. 639

1989・3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.