

根入れの深い鋼矢板セル式護岸の力学的挙動に関する研究

東側豊二*・阿知波文夫**・角南 進***
・松尾 稔****

軟弱粘土層に施工された根入れの深い鋼矢板セル式護岸の合理化検討過程で得られた知見を報告する。基本設計案の地盤改良の仕様・改良範囲に着目し、数値解析により同護岸の定性的検討を行い、これらを変更した実施案を作成した。この妥当性を検証する目的で、基本案・実施案の実物セルに対して載荷試験を実施した。その結果、試験値は解析結果と良く一致し、合理化された実施案でも同等の性能がある事が確認された。

Keywords: *embedded steel sheet pile cellular bulkhead, sand compaction piles, jack loading test, back-filling loading test*

1. はじめに

中部電力(株)では電力の安定供給、電源の多様化を図るため愛知県碧南市に石炭専焼の碧南火力発電所(70万kw×3基=210万kw)を建設中で、1991年10月には1号機の営業運転開始予定である(図-1)。石炭火力発電所では、運転に伴い生ずる灰を処分する灰捨て地が必要となるが、本発電所の場合にはこの灰捨て地は隣接する海域を護岸で締め切って設置される。護岸の設計にあたっては、

- ① 「廃棄物処理及び清掃に関する法律」による管理型埋立処分場の護岸であり止水性能が要求されること。
- ② 図-2に示すように海底面以下約20mを超える軟弱な沖積粘土が存在すること。
- ③ 急速施工ができること。

等の理由で鋼矢板セル式護岸が採用された。現行の設計基準¹⁾に準拠した基本設計案(以下基本案と略す)では、根入れが深くかつ沖積粘土の安定化のため広範囲な地盤改良が必要となった。そこで、この地盤改良範囲・仕様に着目して、合理的かつ経済的な護岸を目指した検討を行った。

その結果、延長約1kmの護岸工事費に対して約9%にも及ぶ削減が可能となった。また、この検討過程において根入れの深い鋼矢板セル式護岸の力学的挙動に関し新たな知見を得たのでここに報告する。

2. 根入れ式鋼矢板セル式護岸設計法

基本案は、セルの直径と高さの比が約1/2、根入れが

* 正会員 中部電力(株)電力技術研究所 土木研究室 室長 (〒459 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1)
** 正会員 中部電力(株)土木建築部 工事第二課 課長
*** 正会員 (株)日建設計 土木設計事務所 調査部 副部長
**** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地盤工学教室

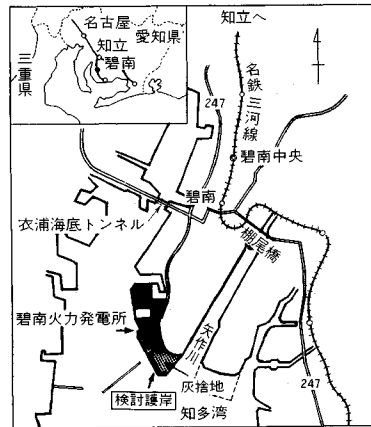


図-1 碧南火力発電所位置図

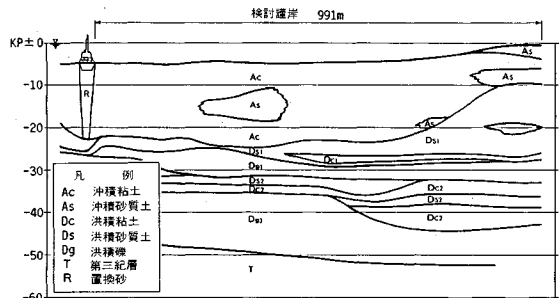


図-2 土層断面図

セル総高の約2/3という特異な形状をしており、その設計法については以下のような課題が考えられた。

(1) 鋼矢板セル式護岸設計法

鋼矢板セル式護岸は、鋼矢板の円筒と中詰土砂のせん断力とが一体となって外力に抵抗する一種の重力式護岸であり、その設計法は1965年の北島の研究²⁾に基づいている。根入れのないセルの模型実験を基にしたこの研

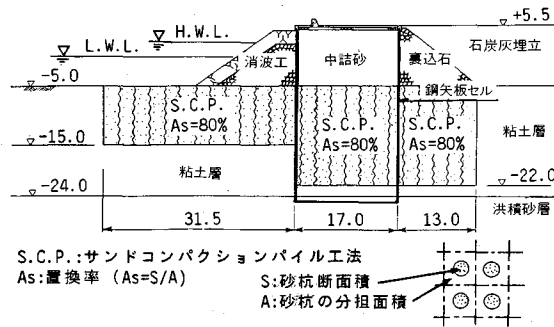


図-3 基本案断面図

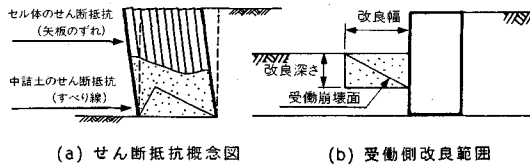


図-4 セル設計概念図

究では、護岸の水平外力に対するせん断抵抗はセルのせん断抵抗（直線矢板相互間の継手間摩擦抵抗）と、中詰土のせん断抵抗の和で表わされる（図-4 (a)）。根入れのある場合もこれと同様に考えられるとされているが、今回のように根入れがセル総高の2/3にも達するものまで想定されていたわけではなく、今回計画した護岸の変形挙動は上記の研究のみからは推定困難であった。

(2) 地盤改良範囲の設定法

基本案では、重力式護岸としての安定を確保するため、セル体の内部および前後を置換率 80%（以下 $A_s=80\%$ と表す）のサンドコンパクションパイル工法（以下 S.C.P. と略す）により改良した砂地盤として設計を行った。護岸の受働側については、直線の受働崩壊面を仮定して改良範囲を設定した（図-4 (b)）。しかしながら、受働抵抗は地盤の変形量と対応するものであり、セル体の変形と一体的に解析すべきである。

3. 根入れ式鋼矢板セルの変形挙動

前記の課題解決に向けて、セル護岸の変形挙動を定性的に把握する目的で数値解析を実施した。セル内部の土の挙動を把握する軸対称解析と、護岸の変形を検討する平面ひずみ解析の二段階のパラメーター解析を行った。地盤のモデル化は、圧密現象も考慮できるカムクレイモデル^{3,4)} によった。解析パラメーターは、地盤に対応して表-1の手順に従い、表-2のとおり設定した。また、地盤と矢板の摩擦は、以下のように仮定し、後述するリンク要素に反映した。

- 粘性土：付着力 $c_a=0.8c$ (c :地盤の粘着力)
- 砂質土：摩擦角 $\delta=25^\circ$

表-1 解析パラメーターの設定法

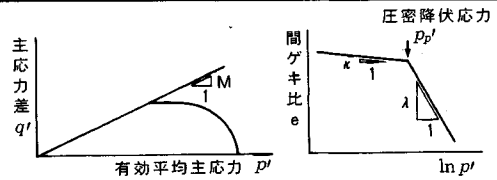
仕様	無改良	S.D. 工法	S. C. P. 工法		
			$A_s=20\%$	$A_s=50\%$	$A_s=80\%$
地盤の仮定	粘性土		複合地盤		砂質土
設定法	粘土の三軸試験より設定		砂柱と粘土の三軸試験をシミュレーションして設定		砂の三軸試験より設定

S.D.工法:サンドドレーン工法

S.C.P.工法:サンドコンパクション工法 (A_s は置換率)

表-2 解析パラメーター

仕様	無改良	S.D.工法	S. C. P. 工法		
			$A_s=20\%$	$A_s=50\%$	$A_s=80\%$
圧縮指数 λ	0.35 0.30	0.35 0.30	0.15	0.1	0.01
膨潤指数 κ	0.035 0.03	0.035 0.030	0.015	0.01	0.009
透水係数 k (cm/s)	1.04×10^{-6} 5.65×10^{-7}	1.73×10^{-5} 9.45×10^{-6}	1.38×10^{-5}	3.54×10^{-5}	—
絞り比 γ	0.3 0.35	0.3 0.35	0.35	0.35	0.28
限界状態指数 M	1.5 1.6	1.5 1.6	1.7	1.8	1.8



(1) 軸対称解析

中詰砂によるセル内地盤の沈下および矢板のフープテンションに着目し、セル内地盤の置換率をパラメーターとする解析を行った。解析モデルは図-5に示すとおりで地盤と矢板の摩擦はリンク要素で表現している。

解析結果によると、セル内地盤の沈下量・圧密時間は置換率が20%と50%では大差がない（図-6）ことがわかる。セルのフープテンションは海底面より上部は三角形分布、下部はほぼ一定値に収束しており、置換率の違いによる顕著な差は見られない（図-7）。

(2) 平面解析

セルと地盤の相互変形に着目し、セル内外の地盤改良仕様・範囲をパラメーターとする解析を行った。解析モデルは図-8に示すとおりで、円筒状のセルを二次元にモデル化するにあたって次のように考えた。

- 中詰砂の要素とセル体の要素を重ねる。
- 両要素の変位を左右両端で等値する。

セル体には矢板継手のすべりを表現するためのリンク要素を、また、セル体と周辺地盤の間も摩擦を表現するためのリンク要素を組み込んだ。さらに、パラメータスタディーの簡易化のため作用荷重としてはセルの主働側に地震時荷重に相当する水平外力を作用させた。

図-10は各解析結果をセル前面の頂部変位で比較評価した結果で、これより以下のことが言える。

- ① セル内地盤の置換率の違いは、セル頂部変位には

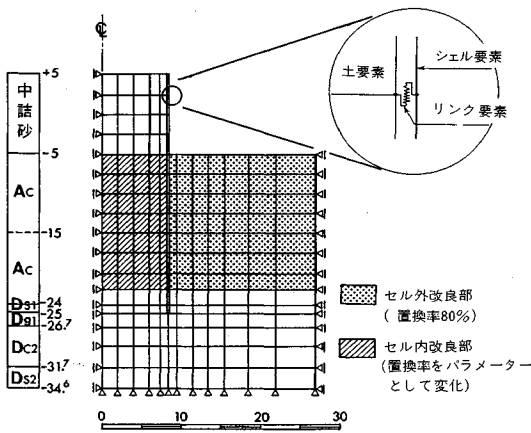


図-5 軸対称解析モデル

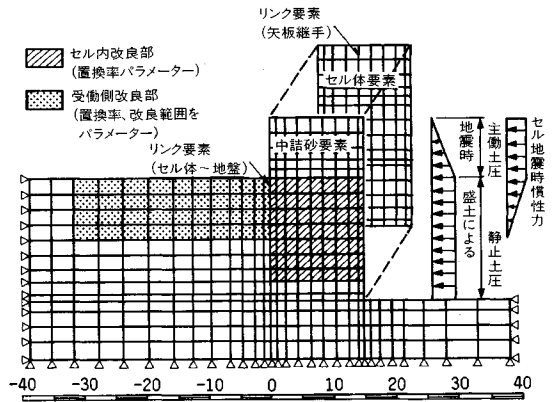


図-8 平面ひずみ解析モデル

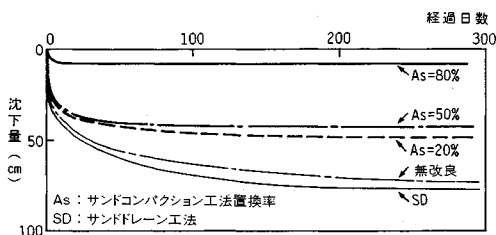


図-6 中詰沈下経時変化

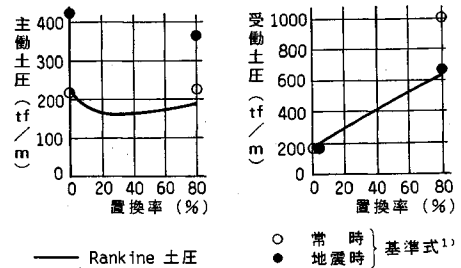


図-9 置換率と土圧の関係

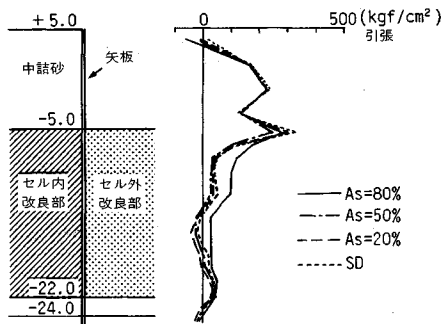


図-7 フープテンション分布

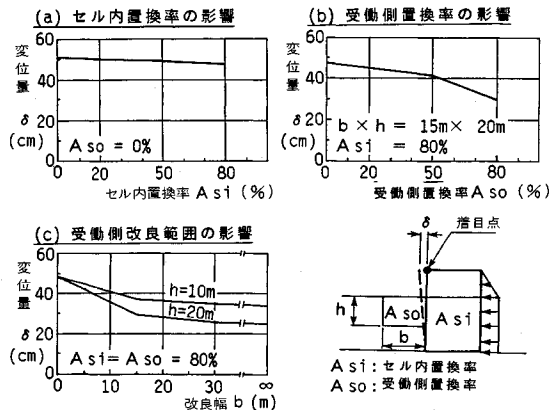


図-10 平面ひずみモデル解析結果

ほとんど影響していない (図-10 (a)).

- ② セル内が同一条件であればセル外受働側地盤の置換率が大きいほど変位抑制効果大きい (図-10 (b)).
- ③ セル内の条件が同じでセル外受働側地盤の改良幅が同一なら改良深さは深いほど変位抑制効果大きい (図-10 (c)).
- ④ セル外受働側地盤の改良幅は 15 m 程度以上になると、変位抑制効果にほとんど寄与しない (図-10 (c)).

これらの現象は、セル体の変形挙動がロッキング的であり、そのためセル内部の土がせん断抵抗に寄与する度合いが小さいことをうかがわせている。

なお、置換率と土圧・沈下の関係を別途検討した結果、受働側は置換率の変化が受働土圧に対して非常に敏感であるが、主働側は置換率の変化が主働土圧に及ぼす影響は小さい、という結果であった (図-9)。

4. 解析結果の設計変更への適用

前章の各検討結果を整理すると図-11に示すような設計変更の方針が見いだせる。セルの主働側および受働側は 80% 改良が必要であるのに対し、数値計算上セル内部は無改良又はサンドドレーン工法でも成立する。し

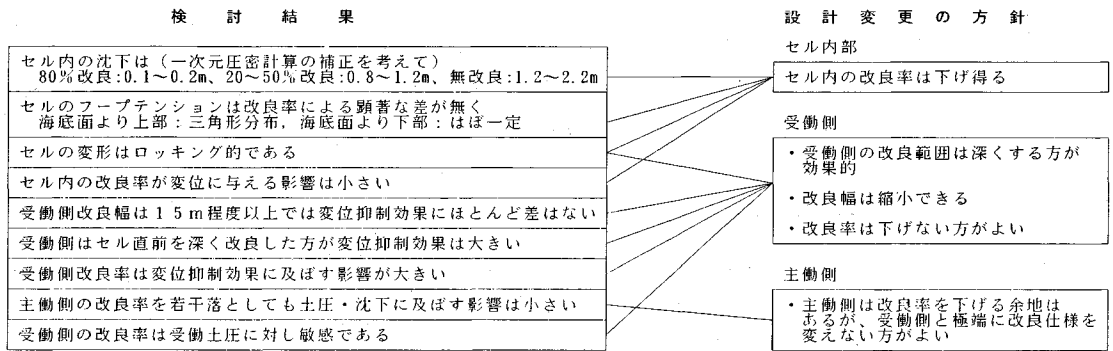


図-11 検討結果の整理と設計変更方針

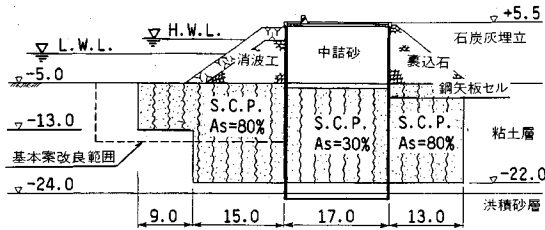


図-12 実施案断面

表-3 載荷法の比較

方法	セル単体へ集中心力載荷	連続体へ土圧載荷
荷重の相似性	× 作用点、土被圧の影響等現実とは相似でない	○ 作用形態、土被圧を含めて現実に近い
挙動の相似性	× 受働側三次元的影響等や相似性に欠ける	○ 載荷幅が十分とれば相似的
作用荷重の把握	○ 荷重制御は正確 × 大規模な反力装置が必要	× 結果としての作用土圧を測定するしか方法はない
基本案・実施案の比較	○ 2つのセルで押し合うことで可能	○ 同じ裏込を載荷することで可能
総合評価	荷重制御と計測は、容易であるが、現実の荷重・挙動の相似性に欠ける	荷重・挙動が現実と相似的で比較は容易であるが、作用荷重の制御が困難

しかし、高置換のS.C.P.改良部の間に無改良地盤をさきむような極端な地盤特性の不連続は、変位・沈下等が急激に変化するため構造物の安定上問題がある。また、施工的にも地盤改良が所要の品質を確保できない可能性がある。このような工学的判断・施工的観点を加味して、セル内部のS.C.P.改良を30%とする実施設計案（以下実施案と略す）を策定した（図-12）。この実施案は基本案（図-3）に比してS.C.P.打設延長が約20%削減されている。

5. 載荷試験

実施案は数値解析を中心に策定したが、定性的判断によるところも多い。そこで、本護岸の一部を試験施工区間として先行施工し、載荷試験で挙動を確認することとした。試験の目的を整理すると以下に示すとおりである。

- ① 試験により数値解析の仮定・結果を検証する。
- ② 基本案と実施案を同一条件下で比較することによ

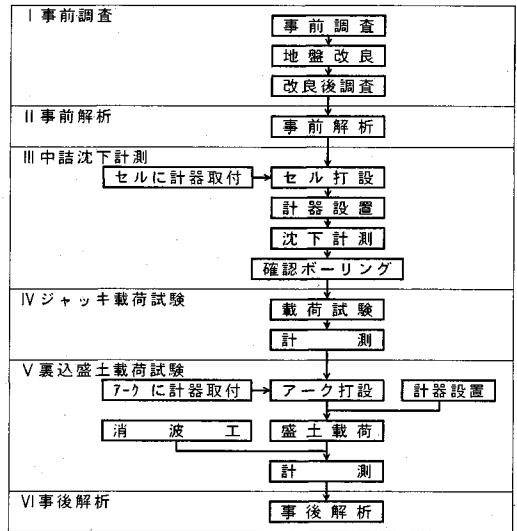


図-13 試験フロー図

り変形・安定性が不利でないことを確認する。

- ③ 根入れの深いセルの設計法の提案に寄与できるデータの取得を行う。

(1) 試験方法

上記目的を達成するためには、できるだけ現実の載荷形態を再現できる方法で載荷する必要がある。一方、試験結果を正当に評価するためには載荷荷重と計測結果との関係が定量的に把握できることが重要である。載荷の方法として種々考えられるが、現実的な方法としては

- ① セル単体にジャッキによる集中心力載荷
- ② セル護岸連続体に盛土による土圧載荷

が考えられる。この両者を比較すると表-3のとおりお互いに一長一短があり、試験結果を正当に評価するためには、この両方法の併用が必要であると判断した。

試験フローを図-13のように設定し、試験施工は護岸の代表的地層とみなせる位置で実施することとした。

図-14, 15に示すように、基本案と実施案に相当する地盤改良を実施した上で、試験セルおよび反力セル各2

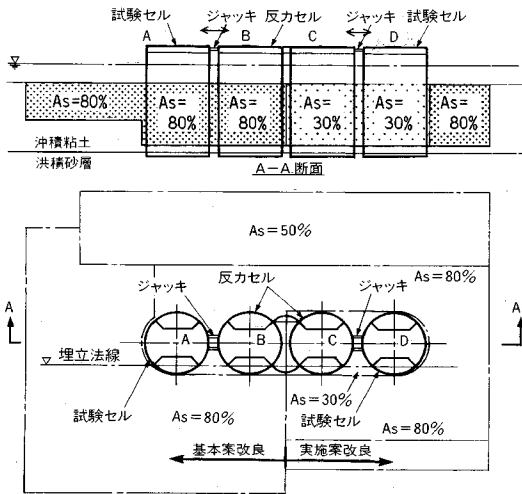


図-14 ジャッキ载荷試験概念図

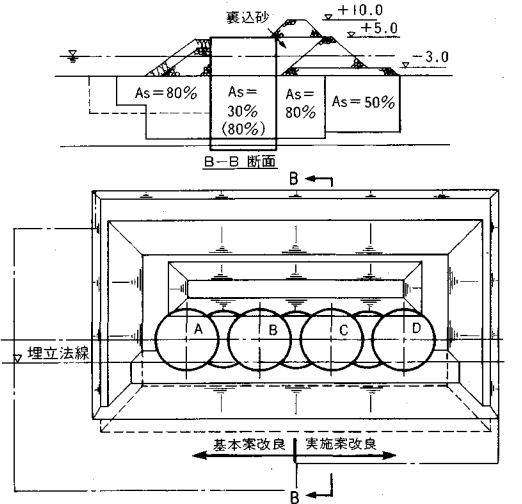


図-15 裏込盛土载荷試験概念図

函ずつ (A~Dセルと呼ぶ) 打設した。ジャッキ载荷試験時には、中央の2函を反力セルとして両端の2函をそれぞれジャッキで载荷し、裏込载荷試験ではこの連続した4函の背後に裏込めを盛土して中央の2函を土圧によって载荷した。ジャッキの载荷位置でセル体の局所的な変形を防止するためにセル頂部には厚さ1mのコンクリートを打設した。また、裏込盛土载荷試験では、セルに作用する荷重(土圧)の測定精度を上げるためセルに接する裏込部には、捨石のかわりに砂を用いた。

計測は中詰沈下時、ジャッキ载荷時、裏込盛土载荷時の3期にわけて実施した。セルの打設開始時期から試験完了まで延12カ月におよんだ。計測器の配置に関しては、矢板打設時の破損および長期に渡るための劣化等の万一の事態を考慮し、主要項目は異種の計器によるダブルチェックが可能となるよう計画した。ジャッキ载荷時

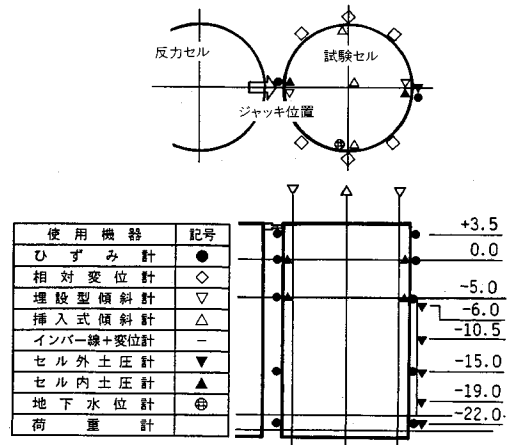


図-16 計測器配置図 (ジャッキ载荷試験)

の計器の配置例を図-16に示す。

(2) 事前解析

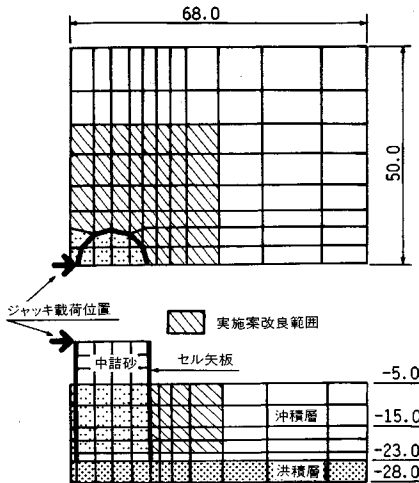
中詰沈下計測、ジャッキ载荷試験、裏込盛土载荷試験の各試験に先立ち、セル体の挙動を予測しておくため試験施工位置での一連の調査による地盤パラメータを用いて事前解析を行った。中詰の沈下解析モデルは前述の軸対称モデルと同様であるが、ジャッキ载荷試験に関しては、セル単体に载荷するという3次元効果を反映するため図-17に示す3次元モデルを新たに作成した。また、裏込盛土载荷試験では、前述の平面モデルに背面に地盤・盛土要素を追加したモデルを用いた。ジャッキ载荷試験は短時間で終了するので、圧密を考慮せず、応力~ひずみ関係はDuncan-Changの双曲線モデルを用いた。

(3) 中詰沈下計測

計測結果を図-18に示す。基本案(Bセル)は中詰砂投入後早期に沈下が終了し沈下量は約20cmであった。実施案(Cセル)は、投入後ほぼ3カ月で沈下が終了し、沈下量は60cmであった。いずれも事前解析結果に良く一致している。矢板フープテンションの計測結果は図-19に示すとおりである。すなわち海底面から上部は三角形分布、下部は一定値という事前解析結果と同じ傾向を示しており、B・Cセルで大きな差はない。つまり、セル内の沈下と共にセル内土圧が一定値に収束していくことを示している。

(4) ジャッキ载荷試験

今回試験に用いたセルは試験終了後には本護岸として使用されるため、破壊や永久変形を残すような荷重はかけられない、反面、セルの挙動を把握するにはできる限り大きな荷重をかける必要がある。設計荷重との関係(表-4)を考慮して载荷は次のように計画した。表-5に示すようにジャッキの能力としては900tfまで用意し、



	γ tf/m ³	ϕ deg	c tf/m ²	K	n	R_f	K_b	m
上部沖積粘土	1.5	-	2.5	130	0.55	0.91	$\nu=0.45$	-
下部沖積粘土	1.5	-	6.8	182	0.62	0.83	$\nu=0.45$	-
中詰砂	2.0	40	-	383	0.21	0.95	107	0.35
S.C.P. 80%	2.0	40	-	385	0.62	0.92	266	-0.30
S.C.P. 30%	1.65	14	-	214	1.25	0.89	$\nu=0.45$	-
洪積層	2.0	-	3.2	895	1.00	-	$\nu=0.45$	-

ここに

$$E_s = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

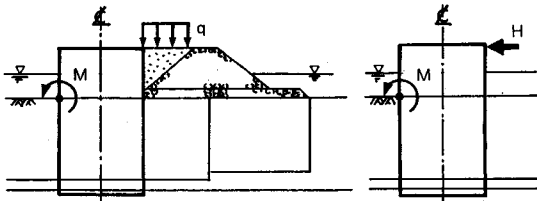
$$B = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m$$

P_a : 大気圧 E_s : 接線弾性係数 B : 体積圧縮係数

図-17 3次元解析モデル

表-4 設計モーメントと試験荷重との関係

現設計法より求まるモーメント M tf/m	裏込土圧の上載荷重 q tf/m ²	+5.0Mの水 H tf/面	備考
常時変形モーメント	115	3.5	常時土圧相当
常時抵抗モーメント	307	18.5	中詰降伏状態
地震時変形モーメント	471	29.0	地震時土圧相当
地震時抵抗モーメント	628	41.0	中詰塑性状態



試験時の荷重段階での変位量・変位速度を計測しつつ最終載荷荷重を柔軟に変更できるように計画した。

図-20に載荷サイクル図を示す。Aセルの載荷荷重が800 tfに達した時点で頂部の変位速度が急増した(図-21)のでこの荷重で載荷を打ち切った。図-22, 23にセル頂部の荷重～変位曲線を示す。事前解析との対比で見るとA・D両セルとも載荷荷重500 tf程度までは矢板

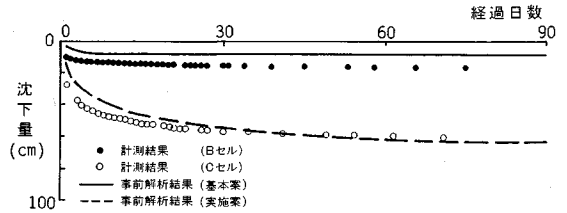
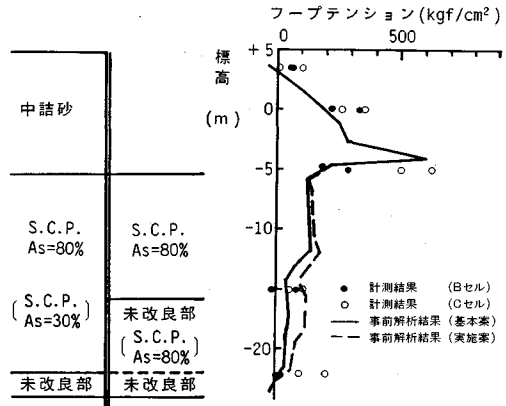


図-18 セル内旧海底面沈下経時変化



() 内は実施案モデル

図-19 フープテンション計測結果

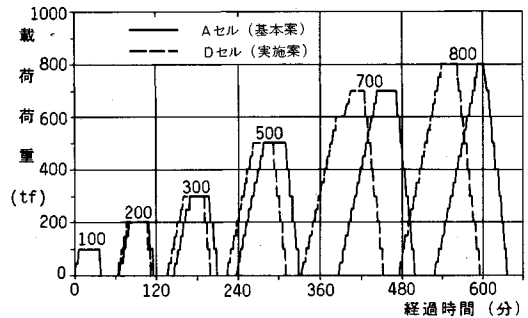


図-20 荷重サイクル図

表-5 ジャッキ載荷計画

項目	Case-1	Case-2	Case-3
計画最大荷重	600 tf	700 tf	900 tf
最終荷重段階	12段階	14段階	18段階
荷重速度	載荷時 50tf/min 除荷時 100tf/min		
荷重保持時間	載荷時 3分/step 各サイクル最大荷重時 30分/step 除荷時 3分/step 0 荷重 30分/step		
荷重ステップ	載荷時 50tf/step 除荷時 100tf/step		

～地盤の摩擦を考慮した場合に近く、これ以降は変位速度も増大し矢板～地盤の摩擦を無視した場合に移行している。これは上記荷重付近でセル体のせん断抵抗の機構に何らかの変化が生じたものと推察される。また、セルA(基本案)とセルD(実施案)の挙動には明確な違い

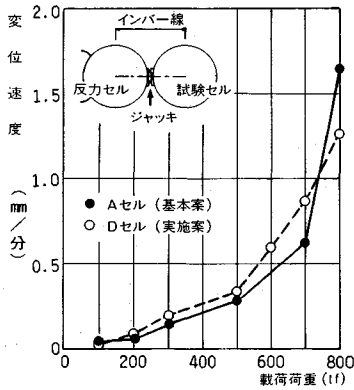


図-21 セル頂部変位速度

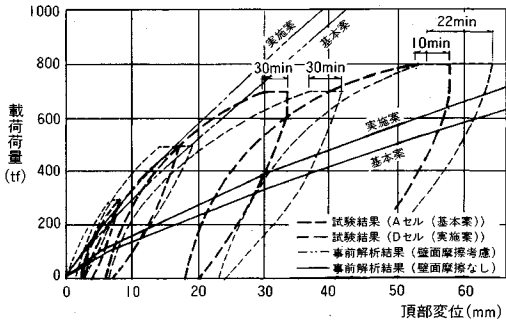


図-22 荷重～変位曲線

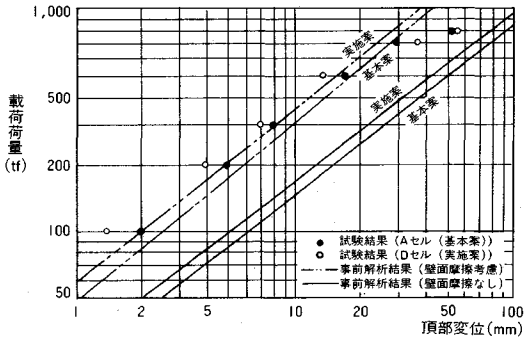


図-23 荷重～変位曲線 (両対数グラフ)

はなく、頂部変位もほとんど同等であった。

セルの変形とセル内外の土圧分布図を図-24に示す。セル内土圧の変化は少なく、かつ载荷側の土圧は減少傾向、反対側で増加傾向となっている。これは、北島²⁾による、セル体载荷側から受働(土圧の増加)の、反対側から主働(土圧の減少)のすべり線が発生するというメカニズムとは異なる。また、図-24に示すごとくセル頂部の鉛直変位がセル前面と背面で反対方向に変位しており、さらに矢板継手のずれが生じていないことよりせん断変形的挙動はしていないと考えられる。

(5) 裏込盛土载荷試験

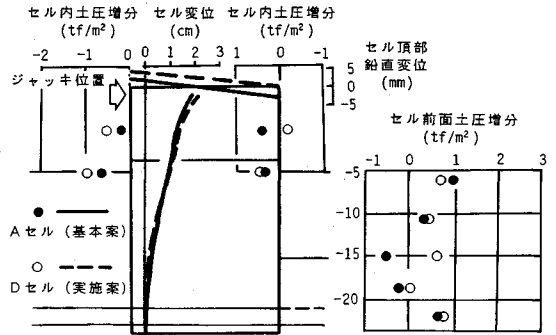


図-24 変形および土圧増分分布 (500t 载荷時)

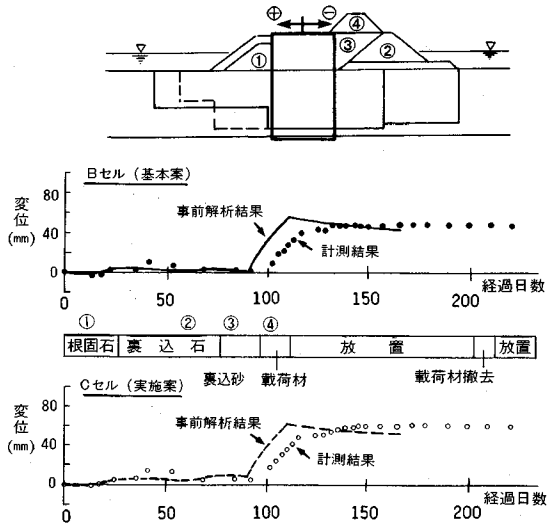


図-25 裏込盛土载荷試験頂部変位

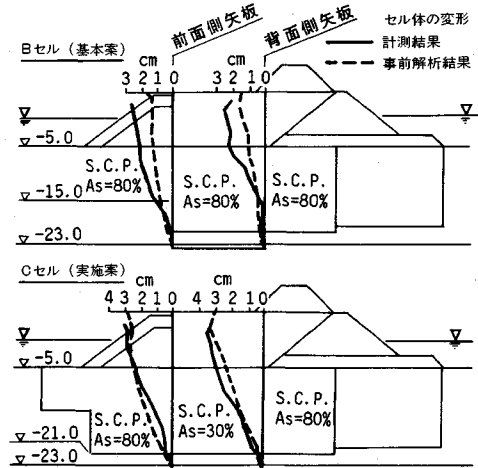


図-26 セル変位分布

ジャッキ载荷試験終了後のセル4画に対し裏込材を投入し载荷試験を行った。裏込土圧の上载荷重は表-4より降伏荷重の2/3相当 ($q=10\text{tf/m}^2$) とした。図-25に

セル前面頂部変位の経時変化を示す。頂部変位は事前解析と良い一致を示し、B・Cの変位の差はほとんどない。セルの変形は、図-26に示すようにほぼ直線的である。

6. 試験結果の総合評価

このように、大型かつ長期の試験であったにもかかわらず計器の欠損もなく、また各試験においても解釈不能な測定値もないことから、試験・計測値の信頼性は高いといえる。前述した試験目的に対する結論は以下のとおりである。

- ① 事前解析と試験値の結果は良く一致し、本検討で用いた数値解析の仮定・結果の妥当性が確認された。
- ② 基本案と実施案の対比でみると、セル頂部変位およびその他の測定値においても有意な差はなく、実施案は基本案と同等の安定性をもつことが確認された。
- ③ ジャッキ載荷試験、裏込盛土載荷試験共セル体はせん断変形的挙動はせず、根入れの深いセルに対しては新しい設計法が必要なことがわかった。また、ジャッキ載荷試験において、500 tf以降で変位が増大する、つまり抵抗機構が変化するという現象がみられた。これに関しても解析を実施したが、別の機会に報告する。

7. ま と め

今回の一連の研究は根入れの深い鋼矢板セル式護岸の

合理化をめざし、数値解析による検討、実物大試験による検証を行ったものである。その過程において、根入れの深い鋼矢板セル式護岸の力学挙動に関するいくつかの知見をみいだすことができた。この種の鋼矢板セル式護岸はその止水性から、廃棄物埋立護岸への適用の機会が多くなると考えられ、今後本研究成果が利用されれば幸いである。

謝 辞：本研究に関し御指導・御協力をいただいた運輸省第五港湾建設局、港湾技術研究所、ならびに施工を担当された大林・大日本・アイサワ・国土総合共同企業体の各位に感謝の意を表します。

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、1989.2.
- 2) 北島昭一：セル護岸の安定性に関する研究，運輸技術研究所報告，Vol.12, No.3, 1962.5.
- 3) D'Orazio and Duncan : A COMPUTER PROGRAM FOR AXISYMMETRIC FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CONSOLIDATION.
- 4) Duncan, D'Orazio, Chang, Wong and Namiq : A COMPUTER PROGRAM FOR ANALYSIS OF CONSOLIDATION.
- 5) 松尾 稔・久我 昂・前川行正：砂柱を含む粘土の力学的性質に関する研究，土木学会論文報告集，No.141, pp.42~55, 1967

(1991.4.3受付)

STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF THE DEEP EMBEDDED STEEL SHEET PILE CELLULAR BULKHEAD

Toyaji HIGASHIGAWA, Fumio ACHIWA, Susumu SUNAMI and Minoru MATSUO

This paper describes a case record of improving design of a steel sheetpile cellular bulkhead with deep embedment depth into soft clay ground, which is to be improved by sand compaction piles. Behavior of the originally designed bulkhead was investigated by means of numerical analysis. Result of this investigation suggested more advantageous design specification of the structure itself and the soil improvement. In order to verify this result, jack loading tests and back-filling loading tests were carried out on two full-size cellular bulkheads, corresponding to the original design and improved design. Observed behaviors of the bulkheads compared well with results of the numerical analysis. In the loading test, the bulkheads showed a rocking pattern instead of shear deformation. This result proved that the improved design restored the originally proposed function of structure.