

関西国際空港における根入れ式鋼板セル護岸の施工について

関 西 国 際 空 港 機 建 設 事 務 所 正 会 員 高 井 俊 郎
 同 上 正 会 員 〇 小 野 文 雄
 東 亜 ・ 不 動 ・ 清 水 ・ 国 土 総 合 建 設 工 事 共 同 企 業 体 正 会 員 今 野 建 太 郎
 同 上 正 会 員 中 村 正 邦

1. まえがき

大阪湾泉州沖約5kmの大水深軟弱地盤上で建設が進められている関西国際空港外周護岸約11kmのうち、図-1に示すように連絡橋取付部を中心とする南東・北東側護岸延長1,790mにわたって根入れ式鋼板セル工法がサンドコンパクションパイル(SCP)工法との組合せで採用された。

根入れ式鋼板セル工法は、昭和55年に実用化された比較的新しい工法で、あらかじめ加工された鋼板セルを同期運搬された複数のバイプロハンマーを用いて、一気に海底地盤に打ち込み、その後中詰めして柱状構造物としたあとセル間をアークで接続して、護岸や岸壁を築造する工法である。

本工事は過去の施工実績とくらべて、セルの大きさ、施工延長とも最大規模で、初めてウォータージェットが採用された。また地盤改良においてはSCPによる隆起地盤も同じくSCP工法による改良が実施された。

本論文は鋼板セルの打設結果について取りまとめ、二・三の考察を加えたものである。

2. 施工条件¹⁾

2-1 地盤条件

空港建設海域の海底は、1/750程度の緩やかな傾斜面となっており、16.5mから19.0mの水深である。海底下には厚さ16~20mの沖積粘土層の下に、薄い砂礫層をはさんだ洪積粘土層が数百mの厚さで堆積している。沖積粘土層の土性は建設場所全体にわたって顕著な相違はなく以下のようなものである。

一軸圧縮強さ : $q_u = 0.04z$ (kgf/cm²) $z = 0$ m at G.L.

単位体積重量 : $\gamma_t = 1.4 \sim 1.6$ (gf/cm³)、圧密係数 : $C_v = 60 \sim 140$ (cm/day)

含水比 : $\omega = 120 \sim 150$ (%)、体積圧縮係数 : $m_v = 0.18P^{-1.08}$ (cm³/kgf)

液性限界 : $\omega_L = 120 \sim 30$ (%)、液性指数 : $I_L = 1.2 \sim 0.8$

2-2 海象条件

建設予定地の海上観測施設の観測結果や周辺海域における既往資料による海象条件は、大体つぎのとおりである。

(1) 潮 位

H.H.W.L. + 3.2m

H.W.L. + 1.6m

M.S.L. + 0.9m

L.W.L. + 0.1m

(2) 潮 流

最大流速は下げ潮時に現われ、表層および中層では50cm/s、底層で35cm/s程度、流速の平均は10cm/s前後である。

(3) 波 浪

施工に影響する75cm以上の波は、冬期に最も多く出現する。C護岸付近では50年確立波によると、SSW方向が最大で $H_{1/3} = 2.3$ m、 $T_{1/3} = 5.5$ secである。

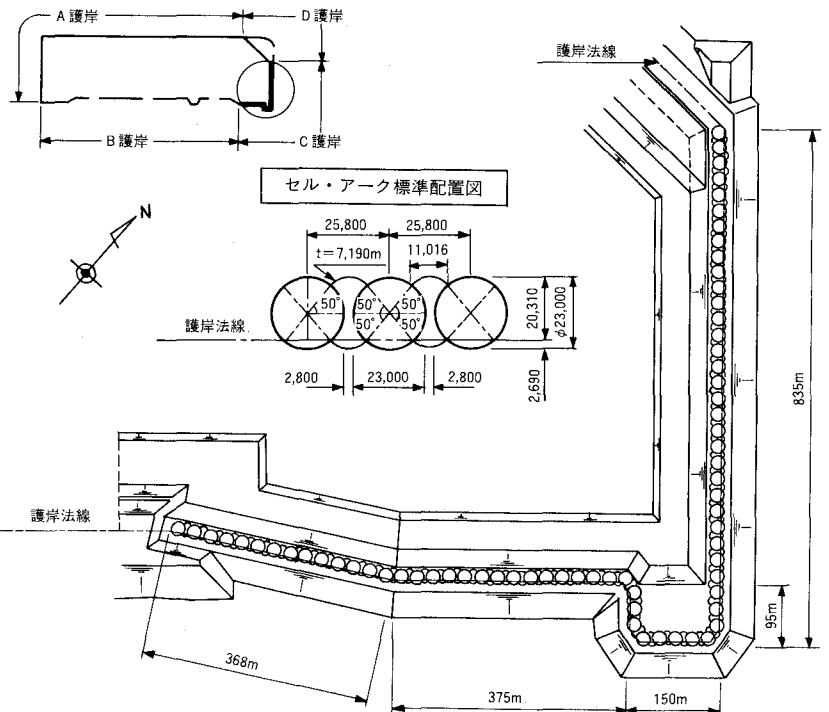


図-1 鋼板セル護岸位置図およびセル・アーク配置図 (C護岸)

3. SCP工法による地盤改良

3-1 SCP施工

SCPの打設は、厚さ3m（海砂1mの上に山砂2m）の敷砂を敷設した後に実施された。

当SCP施工の特徴は、沖積粘土層に打設したSCPによって生ずる隆起地盤に対してもSCP施工を行い、隆起土の有効利用を図ったことである。すなわちセル護岸部では図-2に示すように直径2.0mのSCPを2.1mピッチで造成し70%改良となっているが、SCP打設直前の敷砂天端高から3m下った面をSCP天端基準高さとしている。

またSCPは支持層（N値10以上に相当）への着底が原則となっており、当現場では着底の確認方法として初めて貫入速度デジタル管理方式が採用された。本施工に先だち、ボーリング地点におけるSCP船のケーシング貫入試験結果から、DL-25.0m以深で貫入速度 $v \leq 0.4$ m/分が30秒継続した地点を着底深さとした。

施工順序は隆起地盤形状をより平坦化すべく施工初期の段階で試験的施工を実施し、護岸部ではセル中心から堤内外へ振り分ける施工とした。

3-2 改良地盤の特性

護岸部のSCPに対し、別途実施された計12本のチェックボーリング結果を、セル根入れ部分を中心に示す。隆起地盤および原地盤における想定N値はそれぞれ10、15であるが、SCP杭芯N値は図-3に示すように平均的には想定N値を上回っている。杭芯N値の深さ方向分布はN値=（1~5）zの範囲でばらついているが、そのうちN値=（1.5~3）zは全体の67%であり、改良地盤の平均N値は、N値=2.5z程度と考えられる。

SCPによる護岸部の平均隆起高さは5m前後であり、従来の予測手法による予測隆起高さ2.8mを大きく上回っている。

4. 鋼板セル・アークの施工法

4-1 セル・アークの製作および運搬

セル・アークは住友金属工業和歌山製鉄所構内の製作ヤードで全数量製作された。セルの製作方法は、写真-1に示すようにセル殻を縦に4分割した円弧状の鋼殻ブロックを製作し、4ブロックを建込んで円筒状のセルを完成する方式をとった。

セル・アークの構造図は図-4に示すとおりであり、材質はセル胴板にSM50A、アーク胴板の海側にSM50A、埋立側にSS41が用いられた。なおセルには最初の3函以外の全函および全アークにウォータージェットが取付けられた。

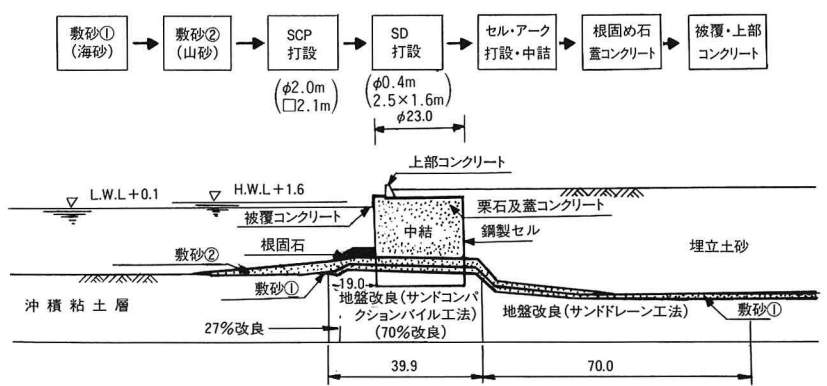


図-2 鋼板セル護岸(C護岸)標準断面図)

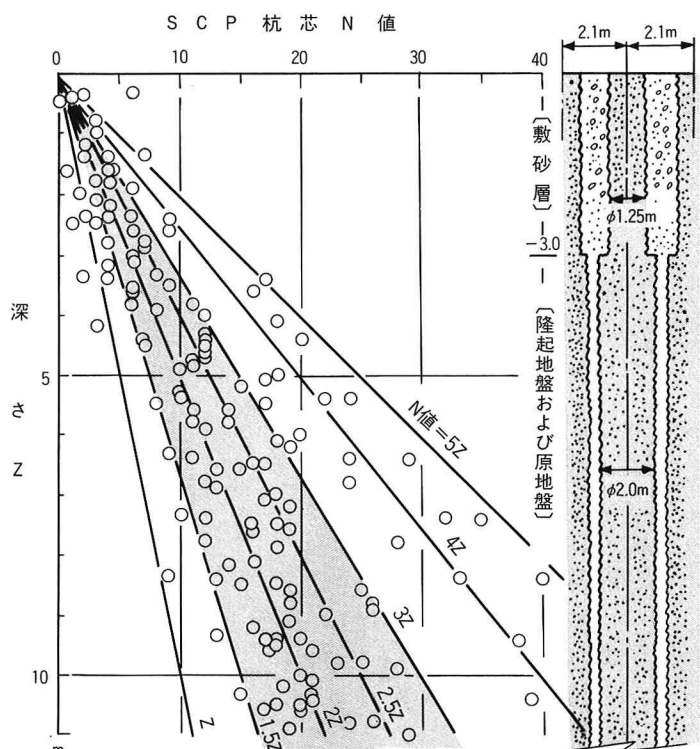


図-3 SCP改良地盤チェックボーリング結果



写真-1 鋼板セル製作状況

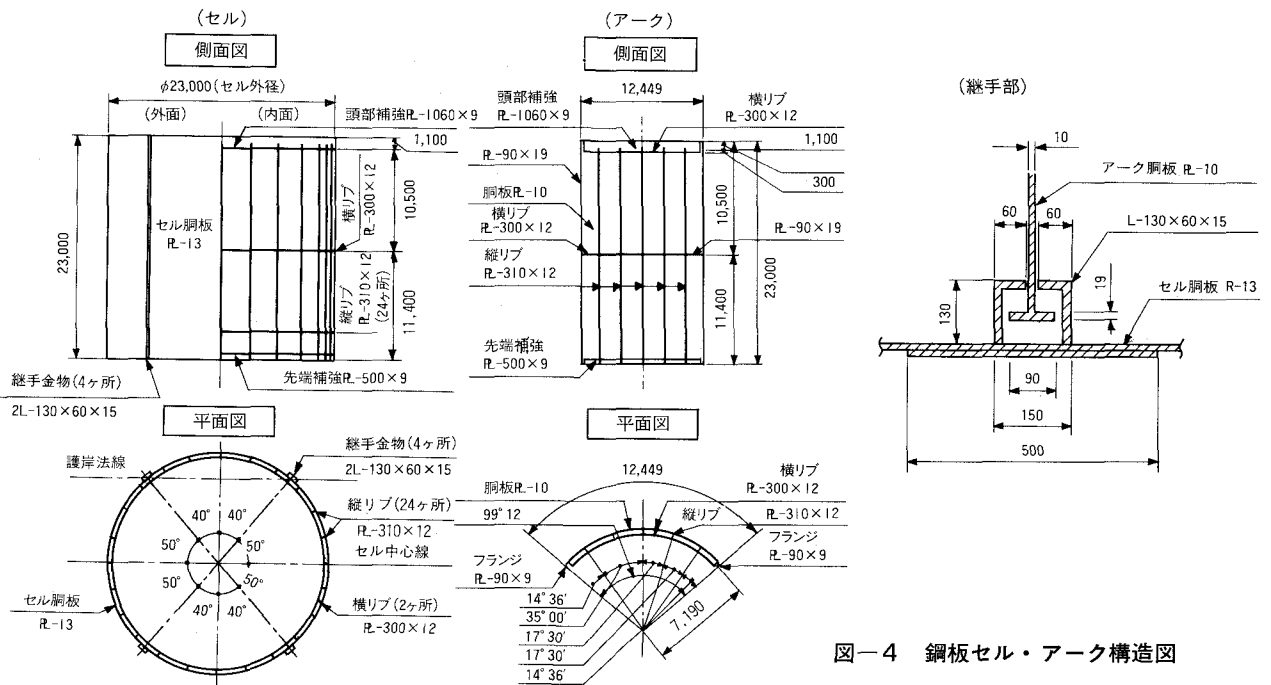


図-4 鋼板セル・アーチ構造図

セルは製作完了後、2 函ずつ専用台船で製作ヤードから現場近くの仮置き場まで運搬され、セルの打設当日、図-5 に示すように打設装置を装備した起重機船で吊取られたまま約10km離れた現場まで曳航され、所定の打設位置にセットされた。

4-2 打設装置

セルの打設装置は、パイプロハンマー、ベースリング、油圧チャック、ショックアブソーバー、吊治具などより構成され、さらにウォータージェット併用時には専用ジェット台船上に配置された高圧ジェットポンプなどが加わった。パイプロハンマーはセルの場合8台、アーチの場合3台を用い同期運転された。高圧ジェットポンプは最大圧力 150kg/cm²の定圧ポンプで、当現場ではこのポンプ1台につきノズル（口径 4.5mm）2本の組合せを原則とした。この場合のノズル1本当たりのウォータージェット流量計算値は、最大圧力下で 130ℓ/分であった。ジェットノズルは、周辺地盤への影響および水質汚濁の恐れを考慮しセル・アーチの内側に、且つ下端より20cm（当初は50cm）上方に約 1.5m 間隔で取付けられた。

打設装置は、ウォータージェット関係を除き、「根入れ式鋼板セル工法・施工マニュアル」および過去の施工実績をもとに検討の上、決定されたものであり、当時SCP施工が進行中につき工程の進捗を図るために、打設能力の算定は前述のSCP想定N値をベースとした。

打設装置製作後、SCP改良地盤のN値がチェックボーリングによって確認されたが、既述したように、想定N値を上回り、そのうえ隆起地盤高さが当初の予測値を大きく越えたことなどから、工程上パイプロハンマー台数はそのままにしウォータージェットを併用することになった。

表-1 打設装置の主要構成

機 械 名	仕 様	数 量
起 重 機 船	1,300t-吊	1
パイプロハンマー	VM ₂ -25000A	8
油 圧 チャック	VM ₂ -4000用	24
発 電 機	500 KVA	8
〃	75 KVA	1
ベ ース リング	623m、箱形 幅 1.2m、高さ 1.2m	1
吊 治 具	H鋼組（16角形）	1
ウォータージェット	ジェットカッター SJ-125E 他	24

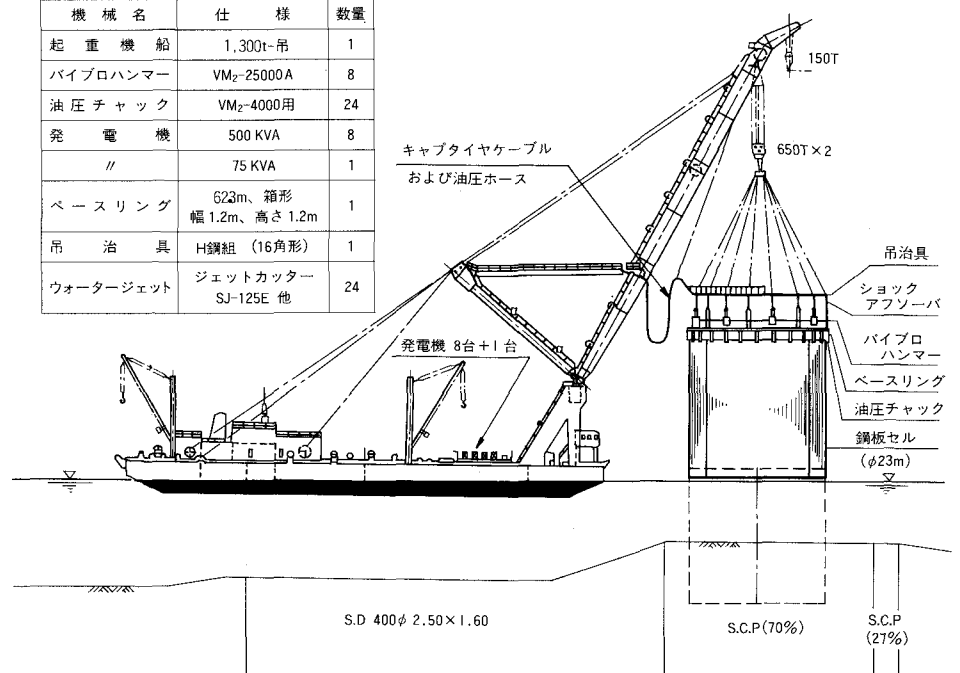


図-5 セル本体 打設装置 姿図

4-3 打設方法および施工管理

従来のセルの位置決めは、直交する2方向からの測量によっていたが、今回は測量ヤグラ1基に据付けた光波測距儀を用いる一方向測量を主体とし、既設セルに取付けた間隔保持器を補助的に用いた。

打設準備完了後、セルを一旦海面上に吊上げ、ウォータージェットの噴射状況を確認した後、打設を開始した。

打設中は、セルの位置・貫入速度・傾斜・バイプロハンマー出力などを管理しながら適宜ウォータージェット圧力を増減させ、打設完了直前にウォータージェットを停止し、さらにバイプロハンマーによって周辺地盤の振動締固めを数分間おこない、打設を完了した。

一方、アークの打設については、旋回式起重機船を用い、打設位置でアーク台船よりアークを吊取り、既設セル2函の継手にアーク継手をはめこんで建込みを完了、以降セルと同じ手順で打設をおこなった。

セル打設における施工管理には、位置管理システムと水平度管理システムが用いられた。前述の光波測距儀にポータブルコンピューターを接続し、そのアウトプットを無線電送して起重機船操船室のモニターに図-6のように表示した。

4-4 中 詰 工

セル打設終了後、直ちに中詰めが実施されたが、中詰土には山砂が使用され大型のリクレーマー船で作業が行われた。中詰土量はセル1函あたり、6,000～7,000m³であり、このため土運船2隻がセル打設当日配備された。

5. セル打設結果および解析

5-1 打設結果

セルは当初パイプロのみによる打設を行ったが、SCP隆起地盤高さの増大および改良地盤の貫入抵抗の部分的大幅増加などの理由により、所定根入れ深さへの打設が困難となった。対策としてパイプロ台数増強案も考えられたが、ウォータージェットを補助工法として併用する案が採用された。セルの根入れ長は隆起地盤高さにより異なり8～13m、打設水深は6～11mであった。

表-2 セル・アーク関係主要諸元

	諸 元	セ ル		ア ー ク	
		仕 様	重 量	仕 様	重 量
打 設	台 数 (n)	8 台	100.0tf	3 台	33.0tf
	偏心モーメント (Ko)	15,000kgf・cm/台		15,000kgf・cm/台	
	回 転 数 (ω)	845cpm		845cpm	
	起 振 力 (Po)	120tf/台×8台		120tf/台×3台	
	定 格 出 力 (kW)	150KW/台		150KW/台	
	ウォータージェット	台数・最大圧		4～6台、150kgf/cm ²	
装 置	シ ョ ッ ク アブソーバー	台 数	85.3tf	3 台	38.0tf
	パネ定数 (k _i)	全16台(大8、小8) 1,125; 562.5kgf/cm台		1,125kgf/cm台	
	ベースリング	直径または長さ		r 7.19m	
		高 さ ・ 幅		H 1.0m、B 1.2m	
セル・アーク	直径(φ)または長さ(ℓ)・高さ(H)	φ23.0m、H 23.0m	209.0tf	ℓ 12.449m、H 23.0m	29.0tf
	肉 厚 (t)・先 端 部 肉 厚 (tp)	t 13mm、tp 22mm		t 10mm、tp 19mm	
	ジェットノズル数・ノズル径 (bj)	48本、bj 4.5mm		8～10本、bj 4.5mm	
	重 量 計 (Qo)	394.3tf		100.0tf	

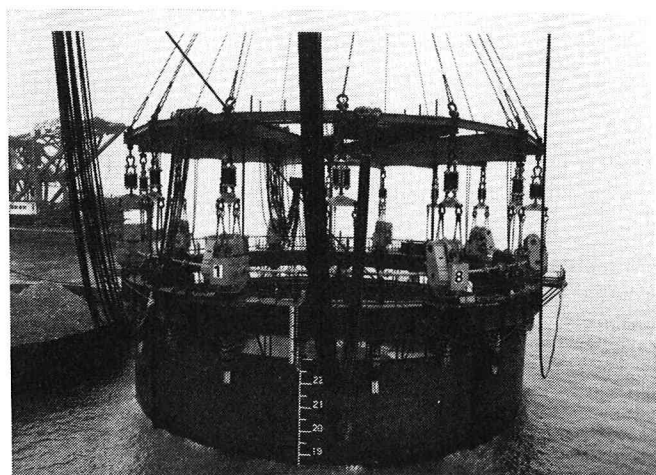
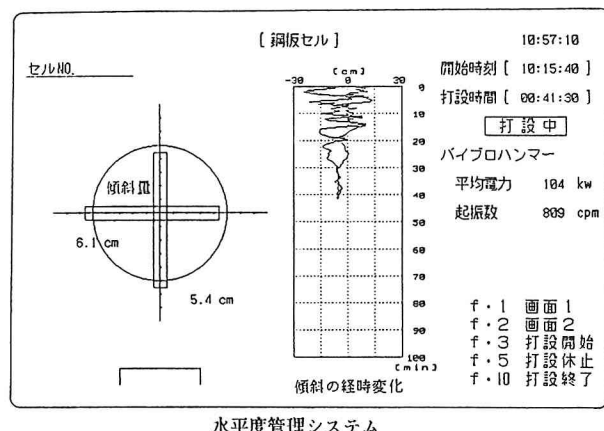
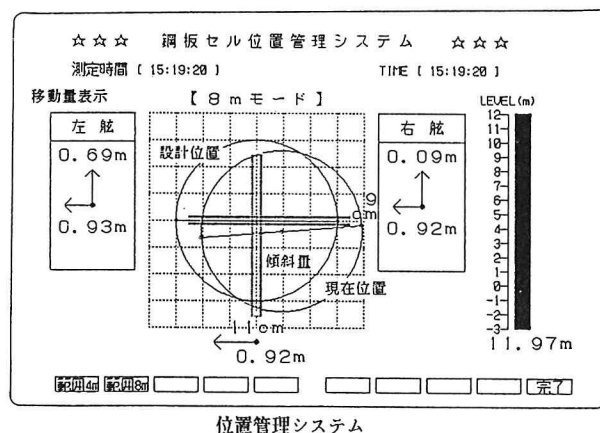


写真-2 鋼板セル打設状況

図-6 施工管理システムにおけるモニター表示例

セル打設工は平均して2日に1函のペースであったが、ジェット併用時のセル打設時間は約1時間であり、施工精度および管理目標はつぎのとおりとした。

セル中心 ±20cm (管理目標 ±10cm)
 天端高さ ±10cm (同 ±10cm)
 傾斜 1/100以下 (同 1/200以下)

5-2 セルの貫入抵抗²⁾

セルの貫入能力に関する従来の検討は周面摩擦を主体とするものである。しかし、図-7の記録解析例に示すようにアイドリング時ならびに同じ深さにおける貫入時・引抜き時のパイプロ1台当り平均出力（以後、出力と呼ぶ）より、周面摩擦・先端抵抗に相当する出力が区別できると思われる。

セル打設時の振動挙動を1質点1自由度とすれば振動方程式は一般に、

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = P\sin\omega t$$

で示されるが、この式を基本にセル打設時の出力KWを求めると、つぎようになる。

$$KW = KW_0 + \Delta KW$$

$$KW_0 = C_1 \cdot \frac{g^2 \omega_0 P_0}{2(\omega_0^2 - \lambda_1^2)} \cdot \frac{1}{n}$$

$$\Delta KW = \frac{C_\eta}{C_\omega} \cdot \frac{g^2 \omega_0}{2(\omega_0^2 - \lambda_1^2)} \cdot \frac{P_0}{Q_0} \cdot \frac{1}{n} \cdot R$$

$$R = \mu_f \cdot \frac{1}{5} \pi D z (mz + N_0) + \mu_p \cdot 30 \pi D t_p (mz + N_0)$$

ここに、 KW_0 ：アイドリング時出力、 ΔKW ：増加出力、 C_1 ：同調効率、 C_η ：振動加速度変化率、 C_ω ：振動数変化率、 R ：地盤の動的貫入抵抗（周面摩擦項と先端抵抗項の和）、 μ_f 、 μ_p ：振動による周面摩擦・先端抵抗低減率、他の記号は表-2参照。

一方パイプロのみによる当初のセル3函のデータ解析などから上式中の諸係数を求めると以下のとおり。

$$C_1 = 0.81 \text{ (アイドリング実測値より)}$$

$$m = 2.5, N_0 = 0 \text{ (平均地盤N値} = 2.5z \text{)}$$

$$C_\omega = 1 - 1.8 \times 10^{-5} \cdot R' \text{ (図-8参照)}$$

$$C_\eta = 1.0 \text{ (過去の施工実績より)}^{3)}$$

$$\mu_f = 0.363, \mu_p = 0.204$$

図-9は上記の出力計算結果とセル3函の実測出力を対比したものであり、比較的良く一致していると思われる。したがってセルの貫入能力検討では、周面摩擦と先端抵抗の和で考える必要があると考えられる。

5-3 ウォータージェットの効果²⁾

つぎにジェットを併用したセル66函の全データを整理し、出力にあたるジェットの低減効果について調べた。解析ではノズル位置20cm、ノズル数48本で施工したセル55函のデータを主として用いた。

ジェットによる低減効果は、セルの周面摩擦・先端抵抗それぞれに対して異なると考えられるが、ここでは双方あわせたもので、パイプロのみの貫入時増加出力に対する低減効果を調べた。

図-10はパイプロのみによる計算出力を KW_v 、ジェット併用時の実測出力を KW_m として、出力比 KW_m/KW_v

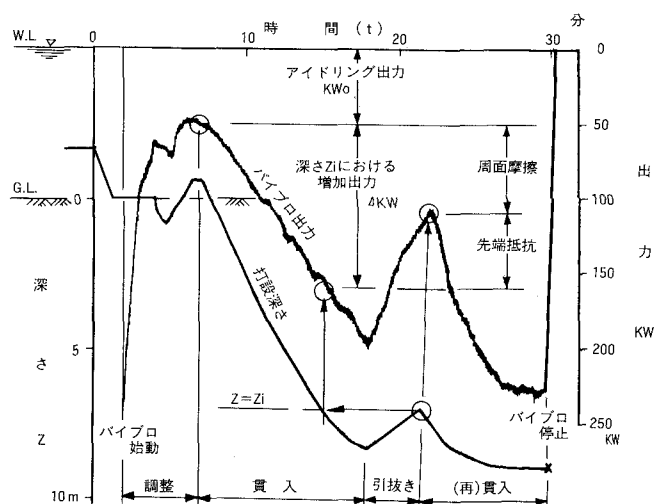


図-7 セル打設記録 解析例

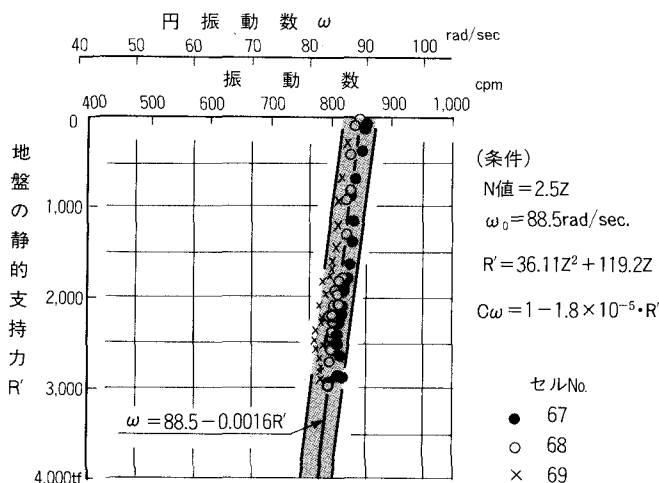


図-8 振動数と静的貫入抵抗の関係

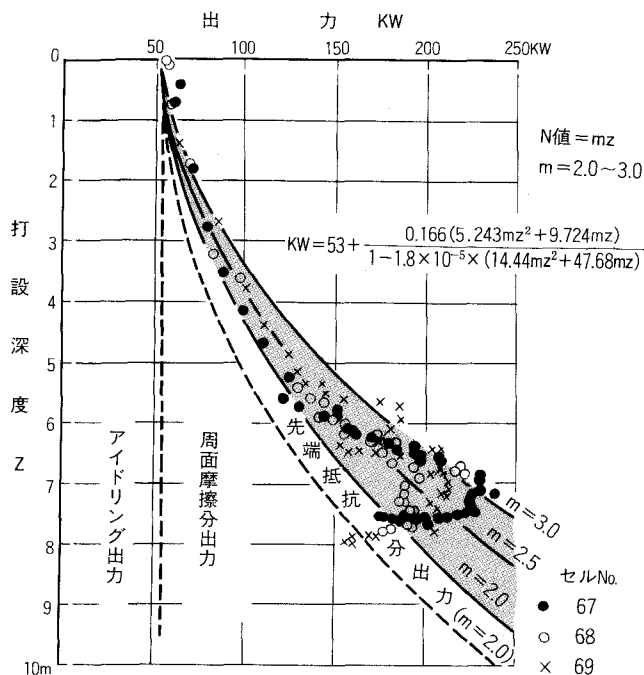


図-9 パイプロ出力結果と理論式の対比

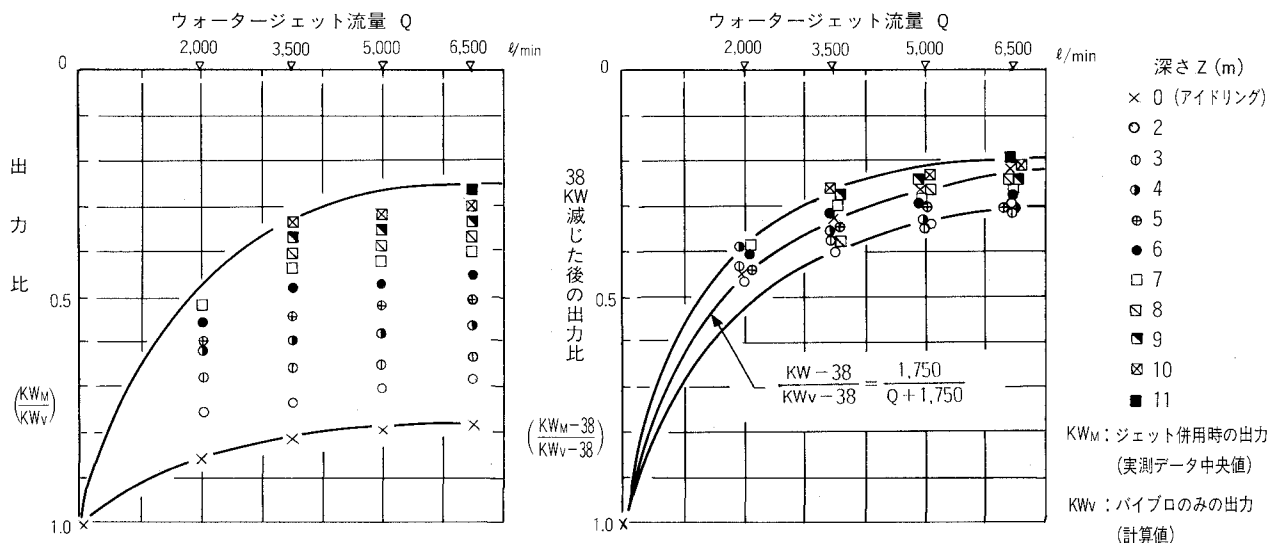


図-10 ジェット併用有無による出力比

と、ウォータージェット流量 Q との関係性をセルの貫入深さごとにプロットしたものである。実測出力 KW_M は、各深さ、各流量における出力分布よりその中央値を平均地盤 N 値 $= 2.5z$ に相当するものと考え、採用した。図-10より考察されたことを以下に示す。

- ① アイドリリング時出力 KW_0 もジェット流量 Q の増大にしたがい、減少していく。
- ② 貫入深さの増大にともない、出力比 KW_M / KW_V が減少する。すなわち出力低減度合が大きくなる。
- ③ KW_M 、 KW_V それぞれから 38 KW (流量 ∞ の場合の KW_0 、外挿値) を減じたものの比 $(KW_M - 38) / (KW_V - 38)$ がほぼ一線上に集まる。したがって、ジェットによる低減率を μ_w とすると、 $\mu_w = 1,750 / (Q + 1,750)$ で表され、この低減率が $(KW - 38)$ に対して適用される。これによりジェット併用時の出力推定が可能となる。

5-4 ジェット併用による地盤の乱れの調査

ウォータージェットによる改良地盤の乱れの有無を調べるために、セル殻内側の 5ヶ所 (殻より 30cm、1m、5m) でセル中詰後に標準貫入試験を実施した。図-11にその結果を示すが、比較のためにセル打設前の地盤 N 値ならびに中詰土の荷重を考慮した推定 N 値を Meyerhof 式⁴⁾より求め示す。

この図より、ジェット併用による地盤の乱れや強度低下はあまり認められず、むしろ振動によって締固められ N 値の増大箇所がみうけられる。

6. まとめ

以上の内容を要約するとつぎのようになる。

- ① セルの打設を考慮して SCP による隆起地盤の平坦化を図るべく SCP の施工順序を決定した。改良地盤 N 値は $(1 \sim 5)z$ で分布しているが、平均 N 値は $2.5z$ 程度と考えられる。
- ② セルの貫入能力の検討には周面摩擦だけでなく、先端抵抗もあわせて考慮することが必要と思われる。出力推定式は実測値にはほぼ一致する。
- ③ ウォータージェットの併用により、出力はバイプロハンマーのみの出力に対し、15~75% 低減される。出力推定もある程度可能である。
- ④ ジェット併用による地盤の乱れが認められなかったことから、ウォータージェット併用によるセル打設は適切であったと考えられる。

最後に本論文とりまとめに際しご教示ご協力賜った関係者に心より謝意を表します。

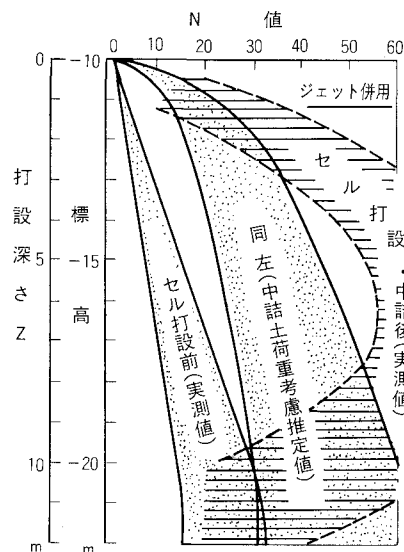


図-11 セル打設前後の N 値比較

参考文献

- 1) 空港工事における大規模施工 第2回 昭和62年講話会、(財)土質工学会関西支部 昭和63年2月19日
- 2) ウォータージェットを併用した根入れ式鋼板セル工法の振動貫入に対する解析 報告書、関西国際空港機建設事務所、東亜・不動・清水・国土総合建設工事共同企業体、1988・8
- 3) たとえば、荻野秀雄ら：根入れ式鋼板セル施工実験、土木学会第35回年次学術講演会Ⅲ-203、1980
- 4) 土質調査法 第6章サウンディング、(財)土質工学会、P.206、昭和58年7月