

## 水搬を用いた海底放水管底部の埋戻し工法の開発 - 橋湾発電所新設放水管路工事 -

田下 貞夫\* 井上 茂\*\*

### 要 旨

火力発電所の海底放水管等大口径管の埋戻しにあたっては、ガット船からの直接投入あるいはジェット水流等補助工法併用により行われていたが、これらの施工方法は管底部への充填が必ずしも確実でないのが現状であった。そこで橋湾発電所新設放水管路工事において管底部の確実な充填を図るため、サンドポンプによる水搬・噴流機能を利用した施工方法「水搬式充填工法」を技術研究所での室内水槽実験および現地での試験施工を経て開発し、本施工へ適用したところ良好な結果が得られた。

本文では、水搬式充填工法の開発の背景と、埋戻し材の選定、室内水槽実験の目的と概要及び結果さらに現地で行った試験施工による室内水槽実験の検証と施工管理要領の確立、本施工の概要と結果について報告するものである。なお、本工法は四国電力(株)及び(株)四電技術コンサルタントと共同で開発したものである。

### 1. まえがき

橋湾発電所は、徳島県南東に位置する橋湾の小勝島に四国電力(株)と電源開発(株)が共同で立地する出力280万kWの石炭専焼火力発電所であり、平成12年の運転開始を目指している(図-1参照)。

このうち、四国電力側の放水管路工事は復水器冷却水の放水設備として、小勝島の東側約400mの沖合いに向けて大口径鋼管(φ3,900~1,850)を海底に埋設する工事であった。この施工において管底部への確実な充填は既存の工法では不十分との判断から、新たな埋戻し工法を開発した。

### 2. 1 放水管路工事の概要

放水管路は、陸側放水路トンネル出口の竖坑を起点として、延長約590mの管路である。U-1管は竖坑内に埋設され、U-2管以降U-10までと、放水管先端管のOH-1からOH-4の13本が海底に埋設される。

放水管路工事の一般平面図を図-2に、工事概要を表-1に示す。

表-1 放水管路工事概要

項 目	仕 様	
放水方式	沖合水中放水方式 (マルチパイプ平行放水方式)	
放水流量	32.0 m <sup>3</sup> /sec	
放水流速	2.98 m/sec	
放水管諸元	仕 様	鋼製(SS400)
	管路延長	590.7m (先端4条分岐)
	管 径	φ3,900 ----- 1条
		φ2,700 ----- 2条
φ1,800 ----- 4条		

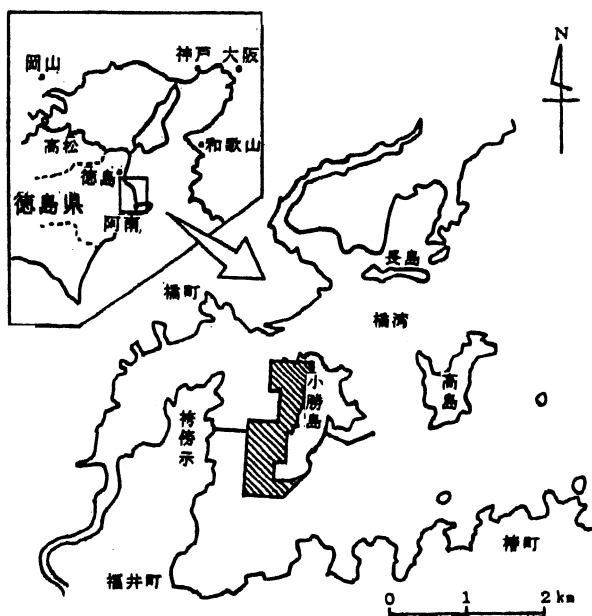


図-1 橋湾発電所位置図

### 2. 2 放水管の施工断面

代表的な施工断面を図-3に示す。なお、この断面は最終的な施工断面であり、図中に示すとおり管底から掘削底面までのクリアランスは50cmであった。

\* 北陸支店 \*\* 四国支店

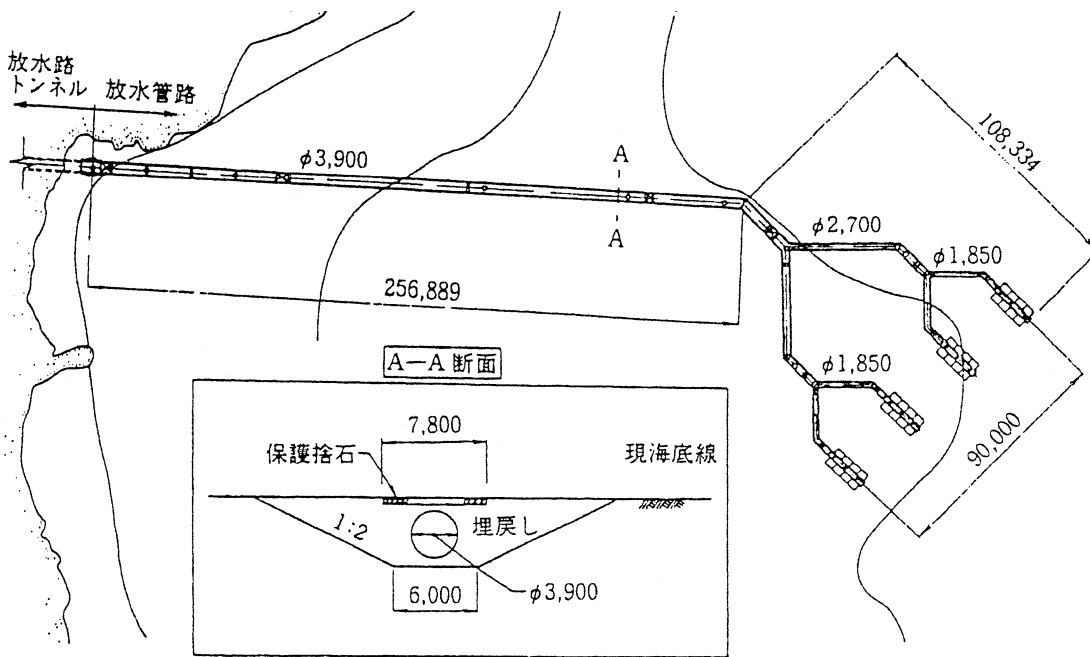


図 - 2 一般平面図

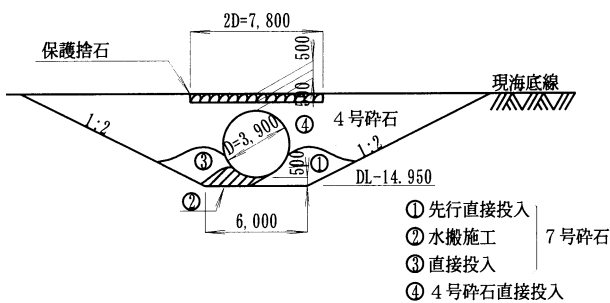


図 - 3 施工断面

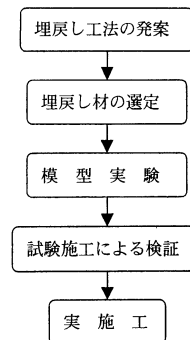


図 - 4 開発検討フロー

### 3. 水搬式充填工法の開発

#### 3.1 開発の背景

放水管等の大口径管の埋設工事においては、埋戻し荷重による管の沈下、変形を考慮して管厚を設計し、掘削断面を決定している。そのため、管底部の充填性の向上がコストの低減につながることから、当工事の埋戻し施工にあたっては、以下の条件が付された。

管厚の薄肉化を図るため適切な地盤反力を確保する必要がある。

浚渫土量の低減を目的として設定された狭隘な掘削断面内での埋戻し作業となる。

現場付近の海底は視界不良(30cm程度)であるため潜水士によるジェット水流等の補助工法の併用が困難である。

そのため、管底部を確実に充填できる工法の開発が求められた。本件の開発検討フローを図-4に示す。

#### 3.2 工法の発案

工法の発案にあたり「埋戻し」に限らず他工種の多くの工法を対象に研究し、それぞれの長所、短所を検討した。その中で「スラリー方式によるケーソン中詰砂の施工(文献3)に着目し、サンドポンプの搬送機能と噴流による充填機能を利用した「水搬式充填工法」を考案した。

工法の概要は、埋戻し材をサンドポンプにより海水とともに搬送し、先端吐出部での噴流を利用して、流速及びスラリー濃度を調節することにより狭隘な管底部を確実に充填させようとするものである。しかし、本施工法による実績が皆無なため、可能性の検証から始め、適切な埋戻し材料を選定するとともに、室内水槽実験により到達距離、吐

出方向および流速、スラリー濃度等の最適な施工条件を確立することとした。

3.3 埋戻し材料の選定

埋戻し材料は事例調査による絞り込みを行い、最終的に粒調砕石（10～40mm）、7号砕石（2.5～5mm）、粗砂（0.42～2.0mm）、水砕スラグの4種の検討を行った。

液状化と充填性及び水流による移動性、均一性について検討を行い、表-2に示すように、埋戻し材料として7号砕石を選定した。

表-2 埋戻し材の検討結果

	粒調砕石	7号砕石	粗砂	水砕スラグ
液状化の有無	粒径より液状化しない。	動的応答解析の結果、液状化しない。	動的応答解析の結果、液状化する。	参考文献2より、固結前の6ヶ月間は液状化の可能性有り。
水搬時の移動性、均一性	粒径が大きいため移動性は悪い。粒径分布が比較的広く、材料分離を起こしやすい。	粒径が小さいため移動性は良い。単粒のため、材料分離は無い。	粒径が小さいため移動性は良い。比較的単粒のため、材料分離は少ない。	比重、粒径とも小さく、最も移動性は良い。比較的単粒のため、材料分
充填性の良否	参考文献1より安息角38°であり充填性は良くない。	安息角は参考文献1では30°、実測では通常時32°、加振時24°であり、充填性はやや良い。	7号砕石と安息角、粒子比重がほぼ等しいことから、7号砕石と同程度の充填性と推定。	安息角の実測例無く、不明。
総合評価	○	◎	△	×

4. 室内水槽実験

4.1 目的と概要

室内水槽実験は、当工法により確実な充填ができることの確認と適正な施工条件の確立、材料特性の検証を目的として、模型を使用して行った。

実験はサンドポンプによる粒子到達実験、管底部充填実験と、ガット船からの直接投入を想定した直投実験を行った。実験スケールは、流速や砕石粒子の沈降速度に対してフルード則を適用し、模型縮尺、埋戻し材粒子径ともに1/2スケールとした。相似比の諸元を表-3に示す。実験用水槽はL6m×B2m×H2mの大きさとし、サンドポンプは実施工で使用予定の1/2スケールの口径3インチを使用した。計測器は配管途中に電磁流量計を、吐出口に水中変位計を取り付けた。また、放水管の模型となる2m鋼管の底部に、充填確認を行うためにアクリル製の窓を取付けた。実験設備を図-5に、実験内容を表-4に示す。なお、表中の「7号砕石相当材」は7号砕石の1/2の粒径（1.3～2.5mm）の粒調材を使用している。

表-3 相似比一覧

諸元	諸元記号	単位	原型	模型	縮尺比
管径	D <sub>m</sub>	mm	150	75	1/2
土粒子径	d <sub>m</sub>	mm	3.5	1.8	1/2
管内流速	v <sub>m</sub>	m/sec	3.77	2.67	1/2 <sup>0.5</sup>
流量	Q <sub>m</sub>	m <sup>3</sup> /min	4.0	0.707	1/2 <sup>0.5</sup>
スラリー濃度	C <sub>m</sub>	%	10	10	1
到達距離	L <sub>m</sub>	m	-	-	1/2
力(反力)	F <sub>m</sub>	kgf	-	-	1/2 <sup>2</sup>

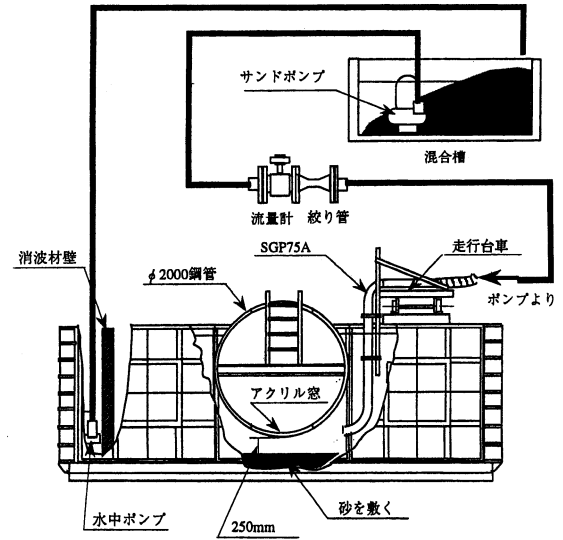


図-5 実験設備概要

直投実験は、補助工法を使用しない場合の管下の充填性を検証するもので、7号砕石相当材と海砂相当材を使用して2ケース行った。粒子到達実験は、噴流による砕石の到達距離を確認するもので、ポンプ能力と流速及び搬送距離の関係と粒径による到達距離の違いを検証し、同時に吐出反力を把握するために行った。管下充填実験は吐出管の方向及び流速等の最適な施工条件を検証するために行った。施工条件については、特に充填する反対側に先行投入の有

表-4 実験項目及び内容

実験項目	埋戻し材	目的	実験内容
直投実験	7号砕石相当材	従来工法の管底部充填性の検討	7号砕石相当材を直接投入して管を埋戻す
	海砂相当材		海砂相当材を直接投入して管を埋戻す
粒子到達実験	7号砕石	7号砕石の水搬可能性の確認	7号砕石の到達距離の計測
	7号砕石相当材	流速と到達距離、吐出反力の関係把握	7号砕石相当材の到達距離、吐出反力の計測
管下部充填実験	7号砕石	7号砕石で管下に充填できることの確認	流速3.0m/sで管下部に7号砕石を水搬する
	7号砕石相当材	先行投入の有無に対する充填性の相違、吐出管の方向、流速、スラリー濃度の検証	先行投入の有るケースと無いケースに対し、管下部に7号砕石相当材を水搬する

る、無しの違いが大きく、それぞれのケースについて実験した。

充填の観測は、アクリル窓から行い、先行投入した場合は碎石の色(産地)を変えて判別し易くした。写真 - 1 に実験状況を示す。

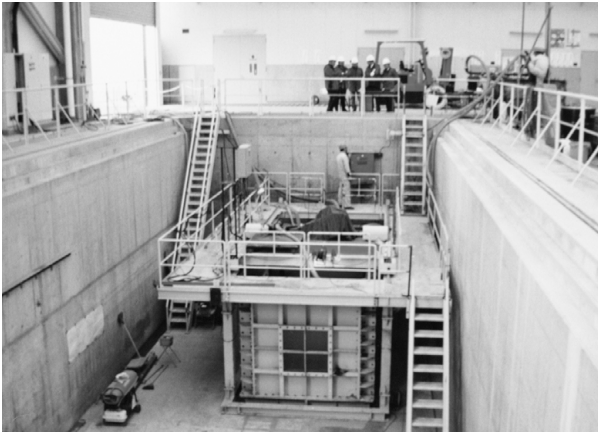


写真 - 1

#### 4.2 実験結果

##### 4.2.1 直投実験

直接投入により埋戻しを施工した場合、管の支持角度  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$  程度の相当範囲が充填不十分であることが確認された。

##### 4.2.2 粒子到達実験

7号碎石と7号碎石相当材の到達距離を比較した場合7号碎石が流速 $2.0\text{m/s}$ 及び $2.5\text{m/s}$ のとき、粒径が幅を持った材料では粒径による到達距離の違いにより充填後に材料分離が生じることがわかる。流速に対する粒子到達距離の結果を図 - 6 に示す。

また、到達距離は7号碎石相当材に限ってみると流速 $2.5\text{m/s}$ のとき $3.3\text{m}$ であり、実スケールに換算すると、流速 $3.5\text{m/s}$ で $6.6\text{m}$ の到達距離となる。この結果により、実施工では $6\text{m}$ 程度の施工スパンを設定しても十分に可能であることが確認できた。

吐出反力は、搬送管先端部の変位量を水中変位計で測定し片持ち梁として解析して吐出反力を算定した。変位計の取付位置を図 - 7 に、流速の違いによる管の変位量の変化を図 - 8 に示す。流速 $2.5\text{m/s}$ の時の最大変位量は $5.8\text{mm}$ で吐出反力は $0.38\text{kN}$ であった。これは、フルード則より実スケールに換算すると流速 $3.5\text{m/s}$ の時、水搬パイプ先端吐出口に $3.07\text{kN}$ の吐出反力が作用することが明らかになった。

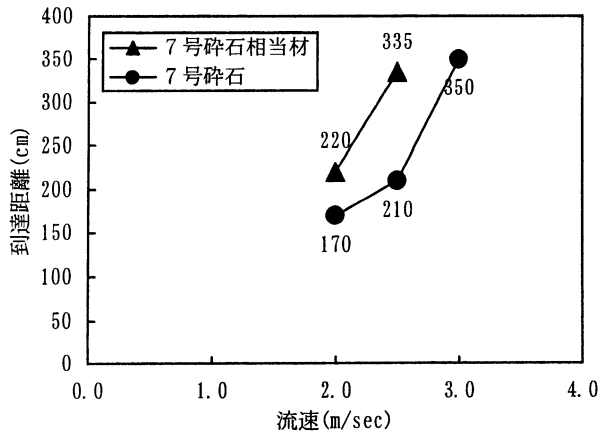


図 - 6 粒子到達距離

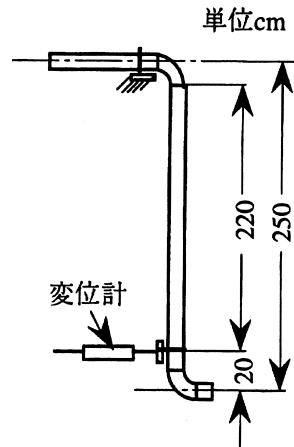


図 - 7 変位計取付位置

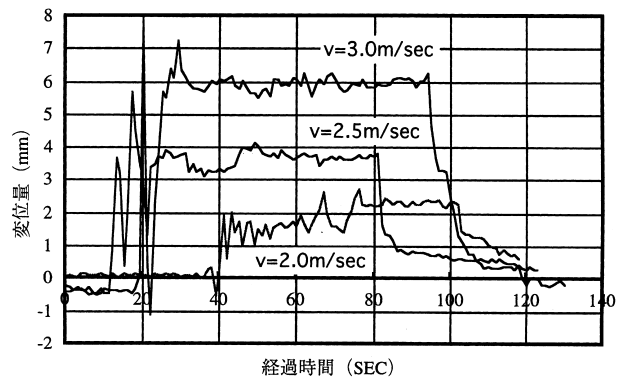


図 - 8 流速の違いによる管変位量の変化



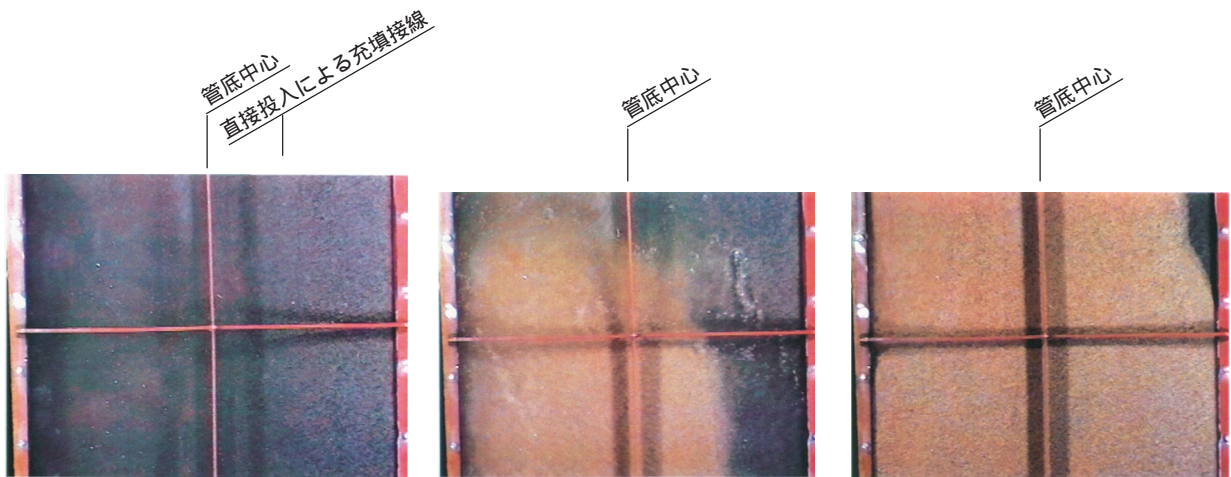


写真 - 2 水搬前（観測窓から撮影） 写真 - 3 水搬2分後（流速2.5 m/s） 写真 - 4 水搬8分後（充填完了）

#### 4.2.3 管下充填実験

管片側への先行投入のない場合及び先行投入のある場合の両ケースともに、管下への充填が可能であることを検証した。ただし、流速2.5 m/sの条件では、先行投入のある場合は充填完了までの時間が8分、先行投入のない場合は充填完了まで14分以上という結果であったため、実施工では、先行投入有りの条件で行う方が工期、経済性の面で有利となる。先行投入有りの場合の実験結果について以下に述べる。

噴流の方向を管軸に対し45°に設定し、流速を2.0 m/sと2.5 m/sの2ケースで実験を行った。水搬時間はいずれも10分間とした。流速2.0 m/sでは若干の未充填部が発生するのに対し、流速2.5 m/s（スラリー濃度9.3%）では写真 - 2 ~ 4 に示すとおり完全な充填ができた。

#### 4.2.4 まとめ

粒子が吐出管より噴出して、到達点に達するメカニズムは吹き出された粒子が持つ水平方向の速度と沈降速度によって決まる。しかし、これらの速度は水中に噴出された時点から粒子が受ける流体抵抗や流線の変化により時時刻刻変化する。また、噴出された粒子が堆積すると流れ場が変化するため、一度着底した粒子が再浮上するなどの複雑な様相を呈する。このため到達距離、充填状況などを水槽実験で検証し、実施工へ反映させることとした。

粒子の堆積状況を計算上模式的に描くと図 - 9 のようになる。粒子は洗掘域、移動域、沈降域を形成することになり、移動域において流速が移動限界流速を超えた時点から粒子が管底部へ充填されていくことになる。観測窓から観測すると、噴流が粒子の堆積により刻々とその方向、流速を変えながら充填範囲を広げていくことが確認された。すなわち、流速による移動域と沈降域の境界が管底部であれば完全な充填ができることになる。実験では、流速2.5 m/s

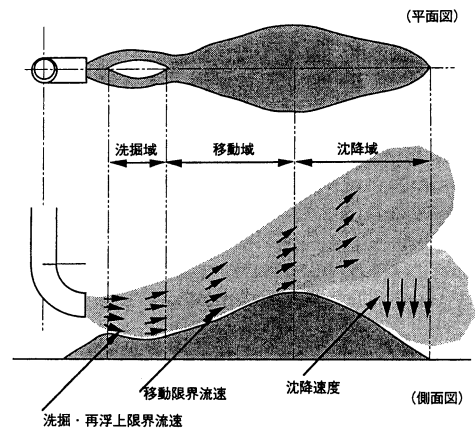


図 - 9 粒子堆積状況模式図

sのケースが8分内にこの条件を満たしたものと考えられる。

実験結果から管底部への充填が確実にいえることが検証され次の結論を得た。

7号砕石を使用する場合は、流速は3.5 m/s以上が適当である。

スラリー濃度は10%程度が適当である。

管の片側に埋戻し材の直接投入を先行して水搬量を少なくした方が経済的に有利となる。

吐出口の方向は、管軸に対して45°程度が良い。

砕石は、粒径分布の幅が小さい程、均一な埋戻しができる。

水搬時間は、施工スパンを4 mとした場合、7分程度を目安とするが、現場の状況により修正する。

流速3.5 m/sの時の吐出反力は3.07 kNであった。

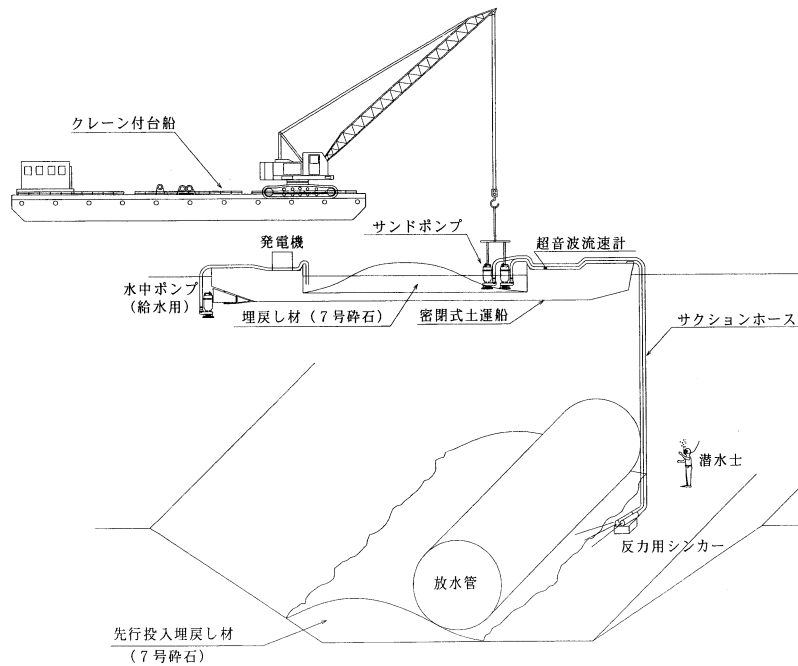


図 - 10 試験施工概要図

5. 試験施工

5.1 目的及び概要

室内水槽実験の結果を実施工に応用し、施工管理方法を確立することを目的として試験施工を行った。試験施工は本施工を考慮して、同じ船舶・機械を使用して行い管理基準値を室内水槽実験の結果をもとに設定し、検証した。試験は水搬施工の始点であるU-4管付近で行った。

5.2 使用船舶・機械

船舶は、碎石と海水を混合するための密閉式土運船とポンプの移動や他の作業をするためのクレーン付台船を使用した。7号碎石を水搬するサンドポンプは口径6インチを2台使用し、搬送管は透明サクシジョンホースを2系列平行に装備した。吐出管は6インチ鋼管2本を水中重量2tのシンカーに取付け、床掘り面より50cmの高さを確保した。搬送管途中には超音波流速計を設置し流速管理をするとともに、流速及びスラリー濃度の管理基準を満足するようサンドポンプの高さ、位置をクレーンにより調整した。使用船舶・機械を表-5に、試験施工概要図を図-10に示す。

5.3 試験内容

試験項目と試験方法を表-6に示す。

到達距離の確認は管のないオープンな場所で行い、1施工当たりの間隔(施工スパン)を決定する。安息角の測定は片側先行投入した7号碎石の埋戻し形状を検証し水搬量

表 - 5 使用船舶・機械一覧表

機械・船舶	数量	仕様及び概要
クレーン付台船	1隻	35t吊, サンドポンプおよび吐出口の設置・移動
クレーン付台船曳船	1隻	D500PS
揚 錨 船	1隻	D90PS
密閉式土運船	1隻	1,000m <sup>3</sup> 積, 7号碎石を海水と混合する
サンドポンプ	2台	口径150mm, 揚程15m, モータ出力22kw
水中ポンプ	2台	口径150mm, 土運船の土槽に海水を供給する
発電機	1台	125kVA, サンドポンプ, 水中ポンプの電源
ガット船	2隻	499t級, 7号碎石の供給運搬
潜水士船	1隻	12t
流速計	1台	超音波ドップラ流速計, モデルUFM-PD
波形記録計	1台	8803FFT/ハイコーダ, 流速記録用

表 - 6 試験項目と方法

試験項目	方 法
到達距離の確認	噴流により堆積した形状を潜水士により観察
安息角の測定 (直接投入分)	先行投入された7号碎石の安息角を、スラントルールにより測定
サンドポンプ能力の把握	吸入状況および流速の測定をし、バージ内土量の測定からスラリー濃度を算定
管底部充填確認	水搬時の30秒ごとの流速を計測。水搬は5分ごとに止め、充填した形状、到達距離を計測。
充填度の確認	事前に放水管にシース管を取り付け、突き棒により確認 (図-12参照)
濁度測定	水搬施工時の濁度を携帯式水質測定器で測定。

を推定する。サンドポンプ能力の把握は所定の流速におけるスラリー濃度を測定し、流速とスラリー濃度に関連する施工管理基準を決定する。管底部の充填確認は、水搬施工中の流速と埋戻し形状を観測することにより、施工時間（水搬時間）の管理基準値を確立するために行った。

5.4 試験結果

水搬による到達距離は、図-11に示す通り15分間の水搬施工で6m(50cm厚)に達し、これにより施工スパンは6mに設定された。片側への直接投入による管底部の未充填部分を確認したうえで、水搬施工による充填状況を図-12に示すシース管を用いて確認した結果、管底部は完全に充填されていた。

試験施工の結果から、管底を完全に充填するための流速は3.5~4.0m/s(平均流速3.8m/s)であったため、施工管理基準を3.5m/s以上とした。なお、この時のスラリー濃度は10~11%であり、同一ポンプの場合はスラリー濃度及び到達距離は流速により定まることが確認された。水搬時間は1施工スパン当たり15分とし、管径あるいは掘削形状の違う箇所についてはその都度、今回の試験施工の結果を踏まえて埋戻し数量を考慮して決定することとした。試験施工で得られた施工管理基準値を表-7に示す。

表-7 試験結果及び施工管理基準値

試験項目	試験結果	施工管理基準
到達距離の確認	5分後:6m, 10分後:6.5m 15分後:7m(6m地点で厚さ50cm)(図-11参照)	施工スパン長は最大6m
安息角の測定(直接投入分)	20~25'(平均23')であり、直接投入のみでは充填できず	
サンドポンプ能力の把握	平均流速3.8m/s, スラリー濃度10.9%, 流速と濃度は反比例する	流速3.5m/s以上(目標3.8m/s)とする
管底部充填確認	15分で施工区間(6m)は完全に充填されていた	施工時間はスパン長6mに対し15分とする
充填度の確認	十分な充填を確認	
濁度測定	問題無し	

6. 本施工

埋戻しは図-3の施工断面に示すとおり、要求される機能に対し埋戻し材料の層分け(ゾーニング)を行い、管径の1/3以下を当工法に適した7号砕石とし、その上部は4号砕石の直接投入により施工した。

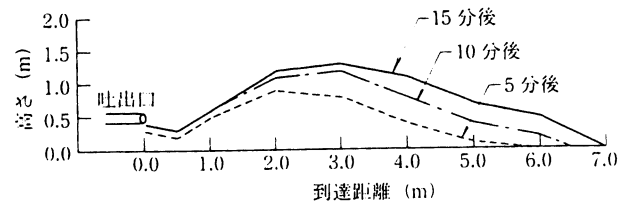


図-11 到達距離測定結果

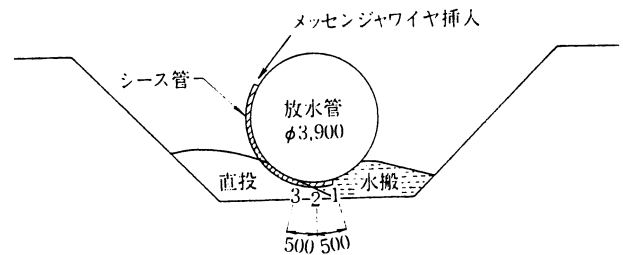


図-12 充填状況確認方法

施工は図-14に示す平面図に示す通り、83ブロックに分割し、水搬時間を1スパン6m当たり3.9mで15分、2.7mで10分とし、1.85m及び管床ブロック設置部等埋戻し断面の大きい箇所は個別に時間を設定した。

施工管理は、流速と水搬時間を管理し波形記録計で記録した。記録例を図-13に示す。この記録は7月3日の3スパン目のU-10管付近の施工であり、所定の10分を流速3.6~3.8m/sで水搬後、潜水土による確認後終了している。

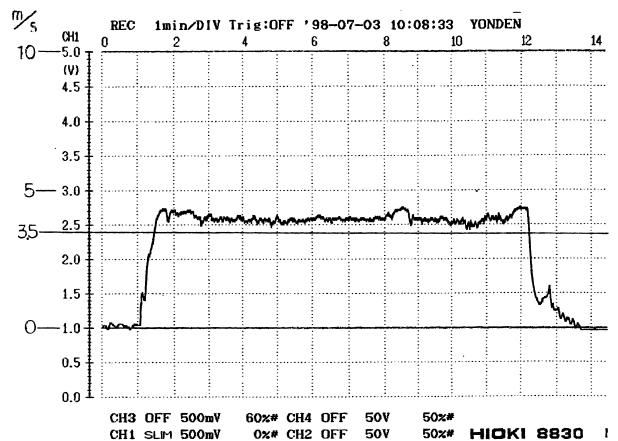


図-13 水搬施工記録

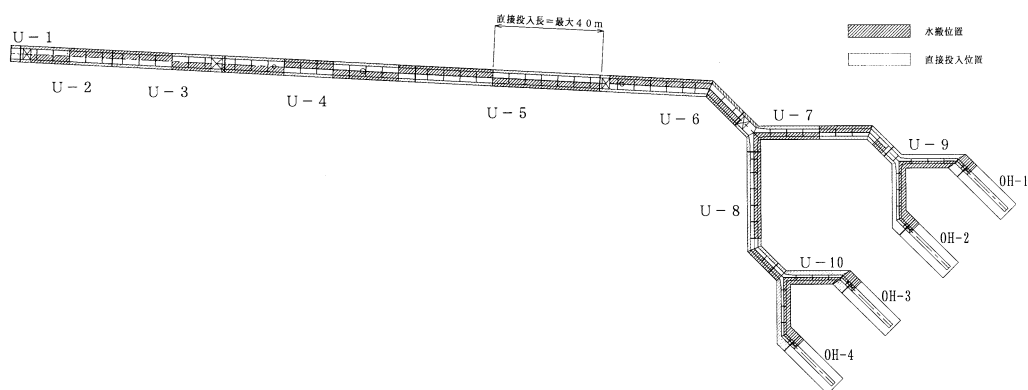


図 - 1 4 施工実績平面図

施工管理上の留意点は以下の2点であった。

スラリー濃度が高くなるとポンプの性能上、負荷が大きくなり、流速が落ち到達距離が小さくなるため、サンドポンプによる7号碎石の吸い込みを目視と流速計により調整する必要があること。

各施工スパン毎に潜水土により到達距離及び充填を確認しながら工事を進める必要があること。

以上の管理を行いながら、1期(U-4～OH-4)は平成10年6月23日～7月4日に820m<sup>3</sup>を施工し、2期(U-2～U-3)は平成10年11月2日～11月4日に206m<sup>3</sup>を施工した。

#### 7. あとがき

大口径管底部の埋戻し方法として水搬式充填工法を開発することにより、管底部の確実な埋戻しが可能となり浚渫土量の低減や管厚の薄肉化によるコスト低減が図られた。本工法は、材料(7号碎石)と工法(水搬式充填工法)が一体となって成果を出せたものであるが、今後は材料種別毎にポンプ能力及び設備・仕様、到達距離等の試験、施工データを蓄積することにより、当工法の汎用性が一層高まるものと考えられる。

また、本工法の開発の目的の一つとして埋戻し工における潜水作業の低減を試みたが、施工実績の不足で各施工スパンの確認作業が必要なこと、目視による吐出管の移動作業が必要であったことから思いの外低減しなかった。今後データの蓄積、施工実績の増加に伴い潜水作業の低減も図られると期待している。

今後の課題としては、埋戻し材の地盤反力係数を確定すること、スラリー濃度を一定に保つ方法、さらに大きな粒径材料による埋戻し方法の開発が挙げられる。

#### 謝 辞

本施工法開発にあたりご協力いただきました四国電力株式会社原次郎殿及び関係者、室内水槽実験を行っていただいた技術研究所の関係者及びペンタテクノサービス株式会社の関係者の皆様に御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理新体系土木工学23、技報堂
- 2) (財)沿岸開発センター・鉄鋼スラグ協会：港湾工事用水砕スラグ利用手引書、1989
- 3) 桐山英二・有富範伊・中丸英司・池田省三：スラリー方式によるケーソン中詰砂の施工、五洋建設研究・開発成果論文集 Vol.2、pp.135～138、1989