

継目グラウチングの充填材検知システムの開発

佐藤英明* 西田勝彦** 吉田 宏*** 原田雅弘****

ダムなどのマスコンクリート構造物は、打設設備の制限や温度ひび割れ制御等のために通常ブロック分割して施工されるが、施工の最終段階で躯体の構造的な一体性を確保するための継目グラウチングが行われている。一方、従来継目グラウチングは、継目内部の注入状況が確認できないため、信頼性、確実性が疑問視されていた。そこで、継目充填材やグラウトストップを見直すと共に、検知センサならびに充填材検知システムを開発し、橋梁下部工(来島大橋4 Aアンカレイジ)へ導入して良好な結果を得た。

キーワード：継目グラウチング、充填材、検知センサ、電気抵抗、ジョイントグラウト、グラウトストップ

1. はじめに

コンクリートダムに代表されるマスコンクリート構造物は、コンクリート製造・打設設備の制約や温度ひび割れ制御のために、通常ブロック分割して施工されるが、分割施工されたブロックは、設計上基本的に一体化させ、各ブロック間の応力伝達を図る必要がある。そこで、一般には、パイプクーリングなどによって各ブロックを安定温度まで冷却、収縮させて継目を十分に開かせ、その隙間にセメントミルク等の充填材を注入して一体化する継目グラウチングが行われている。

継目グラウチングは、柱状工法のコンクリートダム等では古くから一般的な工法として行われており、継目位置は構造的に圧縮状態となる領域に設けられていた。そのため、継目グラウチングはブロック間の隙間を間詰める程度でも十分と考えられており、これまで躯体の一体性を確保するための継目グラウチング技術についてはさほど大きな問題として取り上げられることはなかった。

一方、構造物の形状や構造形式などによっては、構造物に適当な圧縮領域がなく、やむ終えず引張、せん断あるいは曲げ応力が働く領域にブロックジョイントが設けられることがあるが、ブロック間の応力伝達や貫通する鉄筋の防食への対応等に対し、従来の継目グラウチングはその信頼性や確実性について疑問視する向きがあった。特に、大型橋梁下部工のアンカレイジなどでは、継目グラウチングの制御や施工状況によっては、躯体の変形を招くだけでなく、ブロック間の貫通鉄筋に大きなストレスを生じさせるなど、技術的にも大きな課題であった。また、一般に継目グラウチングの施工は経験に頼るところが大きく、とりわけ継目内の実際の注入状況については、セメントミルクの注入圧力、躯体・継目の挙動、継

目面から排出されるセメントミルクの濃度、注入セメント量等の間接的なデータなどを基に推測・判断する方法しかなく、施工品質は経験に大きく影響を受けるものであった。

このような背景を踏まえて、躯体の確実な一体化を図るための継目グラウチングに関し、継目充填材の見直しを始めとして、微小な継目に注入される充填材を検知できるセンサ、測定装置およびパソコンによって一連の解析処理が行える計測管理システムを開発した。

本報は、来島大橋4 Aアンカレイジの施工に当たって研究開発を行った継目充填材および充填材検知システムの概要、ならびに一連のシステムを導入した施工結果について報告するものである。

2. 継目充填材の選定

2.1 目的

継目グラウチングに用いられる充填材は、基本的に躯体コンクリートと同程度の強度特性が必要とされるため、一般に躯体コンクリートと同等のセメントが用いられることが多いが、本来充填材としては、微小な継目幅への注入が容易で流動性に富み、目詰まりを起こさないよう粒径が小さく、注入時にリークが発生した場合などでも処理作業中に管内閉塞が生じることのないよう凝結・硬化時間が比較的長い特性を持つ材料であることが重要である。また、継目グラウチングではセメントミルクの配合濃度を薄い配合から濃い配合へと段階的に切り替えて注入されるが、最終配合でも配管途中で閉塞等が起こらないよう材料分離がなく、粘性抵抗、ブリージングならびに硬化収縮が小さい特性を持つことも重要である。

すなわち、継目充填材として具備すべき主な条件は、以下のとおりと考えることができる。

- ①注入箇所に応じた適切な粒径
- ②ミルクとして粒子が均等に分散し、安定している
- ③硬化後に所要の強度を有する
- ④硬化時の体積収縮が小さい

*	土木事業本部	土木技術部	ダム技術グループ
**	広島支店	土木事業部	
***	関西支店	愛媛営業所	
****	関西支店	土木事業部	土木部第1工事部

そこで、より高品質な継目グラウチングを目指し、一般的な普通ポルトランドセメントに比べて最大粒径の小さい市販の充填材数種類について、各種の材料試験を行い基本的な性能を評価して、継目グラウチングとして最適と考えられる充填材の選定を行うこととした。

2.2 試験概要

2.2.1 試験材料

比較試験に用いた充填材は、岩盤グラウチング等で用いられている「超微粒子セメント系」を3種類、ひび割れ補修材のうち「無機系注入材」を3種類、および比較のための普通ポルトランドセメントを加えた計7種類とした (Table 1 参照)。なお、セメント系充填材には高性能減水剤をセメント量に対して1%, 無機系注入材には各々専用の混和剤を所定量混和した。

2.2.2 試験項目

充填材の充填性、圧送性については、ブリージング試験 (JSCE-F 522)、粘度試験 (JIS K6833)、および流動性試験 (JSCE-F 531:旧規格で実施)をそれぞれ10, 20, および30°Cの条件の基で実施した。また、凝結、強度特性については、凝結試験 (JIS R 5201)、圧縮試験 (JIS A 1108)、引張強度 (JIS A 1113)、乾燥収縮率 (JIS A 1129)をそれぞれ標準養生 (20°C)の基で実施した。

Table 1 比較試験に用いた充填材

試験材料	メーカー	粒径 (μm)		試験配合 (W/C)	
		最大	平均		
普通ポルトランドセメント	O社製	約100	約20~30	100%	
超微粒子セメント	S	N社製	10	4	100%
	M	O社製	8	4	100%
	AD	ON社製	10	3	100%
無機系注入材	H (高炉スラグ系)	N社製	10	2.8	70%
	R (ポリマーセメント系)	O社製	10	4	61.5%
	A _M (ポリマーセメント系)	D社製	16	-	68%

2.3 試験結果

試験の結果、超微粒子セメントSは、ブリージング率および乾燥収縮率が大きいので、材料分離や硬化後の充填性に問題がある。また、引張強度も小さい。Mは、流動性がやや悪く粘性も高いので閉塞の危険性があり、圧送性にもやや難がある。ADは、強度発現が最も遅く、引張強度も小さいので、構造的な荷重の伝達性能にやや難がある。無機系注入材Hは、実施した全ての試験で総合的に安定した性能を示した。Rは、ブリージング率測定用のポリエチレン袋を溶かしてしまう特性がありブリージング率については評価できなかったが、超微粒子セメントMと同様、流動性、粘性にやや難がある。A_Mは、ブリージングがほとんど無く、初期強度は高いが、材齢3日以降の強度発現が小さい。また、凝結が最も早く、流動性・粘性が悪いので、継目グラウチングのような大規模な注入作業には適さない。Table 2 に、各種充填材の試験結果および比較検討結果を示す。

以上の結果より、材料分離などに対する安定性が良く、粘性が小さく流動性に優れ、強度特性が良く、高い充填性が期待できる無機系充填材のH (ハイスタッフ:日鐵セメント(株)製)を、継目グラウチングに最適な充填材として選定することとした。

3. 充填材検知システムの開発

3.1 全体システムの概要

本研究では、継目グラウチングによってコンクリートブロック間の微小な継目面に充填される充填材の充填状況を把握する方法として、充填材の導電性、特に電気抵抗特性に着目した電気探査技術について研究を行った。

なお、開発する充填材検知システムは、予め継目面に専用のセンサ (充填材検知センサ)を所定の間隔で設置し、継目グラウチング時に充填材の電気抵抗を測定して、

Table 2 各種充填材の比較検討結果

試験項目	充填材の種類	普通ポルトランドセメント (O社製)	超微粒子セメント			無機系注入材			
			S (N社製)	M (O社製)	AD (ON社製)	H (高炉スラグ系) (N社製)	R (ポリマーセメント系) (O社製)	A _M (ポリマーセメント系) (D社製)	
配合		W/C=100%	W/C=100%	W/C=100%	W/C=100%	W/C=70%	W/C=61.5%	W/C=68%	
粒径	最大	約100 μm	10 μm	8 μm	10 μm	10 μm	10 μm	16 μm	
	平均	約20~30 μm	4 μm	4 μm	3 μm	4 μm	4 μm	4 μm	
ブリージング率	10°C	22.5%	13.0%	1.9%	2.7%	4.1%	-%	0.0%	
	20°C	25.9%	19.7%	1.4%	2.1%	4.7%	1.7%	0.0%	
	30°C	31.1%	24.7%	2.2%	6.8%	4.3%	2.7%	0.0%	
流動性	Jロート (max)	10°C	4.7s	4.1s	5.1s	4.2s	4.9s	5.4s	31.0s
		20°C	4.6s	4.1s	5.2s	4.3s	4.5s	5.3s	10.3s
		30°C	4.5s	4.2s	5.1s	4.3s	4.6s	5.3s	14.7s
	Pロート (max)	10°C	9.6s	8.6s	10.2s	8.7s	9.3s	11.2s	41.0s
		20°C	9.5s	8.5s	10.7s	8.7s	9.5s	10.8s	18.0s
		30°C	9.4s	8.6s	10.7s	8.7s	9.5s	11.0s	22.7s
粘性	見掛け粘度 (max)	10°C	138cp	60cp	422cp	51cp	216cp	299cp	1601cp
		20°C	97cp	37cp	455cp	30cp	81cp	300cp	691cp
		30°C	47cp	24cp	405cp	28cp	79cp	236cp	737cp
凝結時間	開始	11h10min	20h40min	19h30min	36~48h	13h10min	13h00min	5h50min	
	終了	14h10min	22h40min	24h30min	36~48h	16h10min	14h00min	9h50min	
圧縮強度 (材齢)	3日	6.0N/mm ²	4.6N/mm ²	9.2N/mm ²	0.4N/mm ²	15.2N/mm ²	13.4N/mm ²	20.0N/mm ²	
	7日	14.2N/mm ²	14.6N/mm ²	14.4N/mm ²	6.1N/mm ²	14.1N/mm ²	16.9N/mm ²	20.8N/mm ²	
	28日	22.0N/mm ²	31.4N/mm ²	23.6N/mm ²	28.4N/mm ²	25.3N/mm ²	19.8N/mm ²	21.8N/mm ²	
引張強度 (材齢)	3日	0.92N/mm ²	0.71N/mm ²	0.72N/mm ²	0.05N/mm ²	0.86N/mm ²	1.06N/mm ²	1.12N/mm ²	
	7日	0.92N/mm ²	0.72N/mm ²	0.61N/mm ²	0.51N/mm ²	1.03N/mm ²	1.37N/mm ²	1.26N/mm ²	
	28日	1.82N/mm ²	0.79N/mm ²	0.74N/mm ²	0.68N/mm ²	1.38N/mm ²	1.44N/mm ²	1.41N/mm ²	
乾燥収縮率 (材齢)	1日	0.014%	0.137%	0.045%	0.015%	0.098%	0.061%	0.042%	
	3日	0.057%	0.264%	0.114%	0.181%	0.177%	0.130%	0.106%	
	7日	0.146%	0.347%	0.166%	0.383%	0.234%	0.198%	0.189%	
	14日	0.349%	0.449%	0.229%	0.549%	0.303%	0.272%	0.256%	
28日	0.486%	0.603%	0.291%	0.715%	0.365%	0.311%	0.318%		
総合評価	-	△	△	△	△	○	△	×	

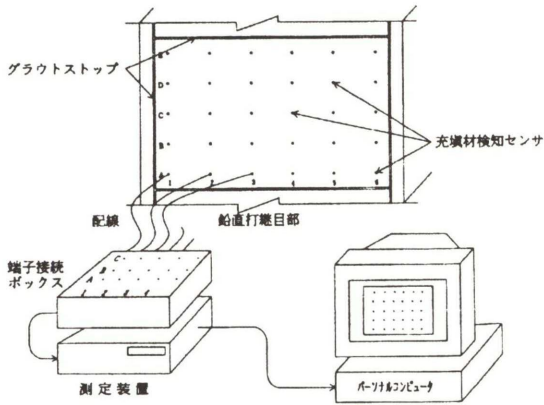


Fig.1 充填材検知システムの全体概要

継目面全体の充填状況をリアルタイムに把握できるシステムを目標とした (Fig.1を参照)。

3.2 充填材検知センサの開発

3.2.1 基礎研究²⁾

(1) 予備実験

導電体の電気抵抗の測定における測定電源には、直流方式と交流方式とがあるが、前者は測定ケーブルが受ける誘導障害が少ないので測定電圧を小さくできるメリットがあるが、継目面での測定電極や貫通鉄筋などの電蝕や被測定体の電気分解等を生じる可能性がある。

そこで、本研究では、測定電源として交流方式を用いるものとし、交流電源における測定周波数および測定電圧を定めるために予備実験を行った。

測定材料には工業用水を用い、メスシリンダの底面と水深 21.3cm (600cc) の水面に設置した面積 16cm² (=40×40mm) の電極間の電気抵抗を LCR メータで測定する方法とした (Fig.2を参照)。なお、電極には耐蝕性に優れた SUS304 を用い、LCR メータと電極間のケーブル長は 50m として、測定電圧 0.01V、0.1V、1V および 5V について実験を行った。Fig.3 に、測定電圧を変えた場合の測定周波数と電気抵抗値との関係を示す。

この結果、測定周波数が低い場合は電気抵抗値のバラツキが大きく、特に電圧 0.01V の場合は測定不能であったが、逆に周波数を高くしていくと電気抵抗値は減少する傾向が見られた。安定した測定が行えた範囲としては、測定周波数が 1~4kHz、測定電圧は 1~5V であった。

なお、特定の高い周波数では測定材料のキャパシタンやインダクタンスと共振して測定誤差が大きくなることが知られており、安定した測定値が得られる範囲内で測定周波数はできるだけ低い方がよい。また、実施工で測定ケーブルが長くなった場合の誘導障害に対しては、測定電圧は高い方が望ましい。

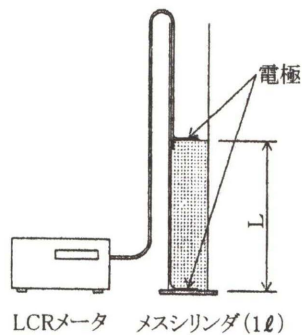


Fig.2 実験方法

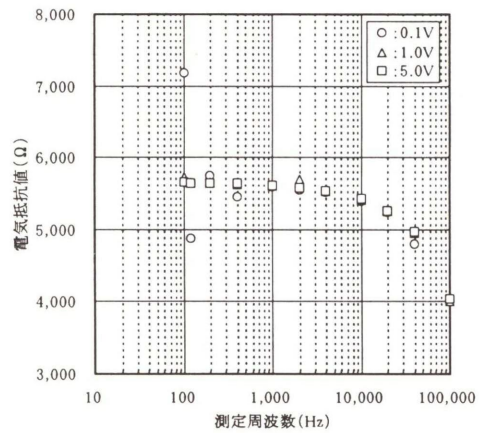


Fig.3 測定周波数と電気抵抗値との関係(工業用水)

以上より、充填材検知システムにおける測定電源は、1kHz、5V を標準とすることとした。

(2) 基礎実験

継目充填材の基礎的な電気抵抗特性を把握するために、Fig.2の方法により 1kHz、5V の交流電源を用いて、一般的な施工で用いられている配合濃度について、電極間距離 L を変化させた実験を行った。なお、測定材料としては、既往の普通ポルトランドセメントによるセメントミルクと今回継目充填材として選定した無機系注入材 (ハイスタフ) の 2種類とした。Table 3 に、実験を行った各材料の配合濃度を示す。

実験の結果、セメントミルクおよび充填材共に、配合濃度と電気抵抗値との間には、ほぼ直線的な比例関係があり、配合濃度が濃く (W/C が小さくなる) なるにしたがって電気抵抗値は小さくなるのが分かる (Fig.4 参照)。同一配合におけるセメントミルクと無機系注入材との電気抵抗値は、無機系注入材の方がやや大きく、充填材の種類によって電解質成分が異なることも分かる。

また、電極間距離と電気抵抗値との間にもほぼ線形的な比例関係があり、同一電極間距離においては配合濃度が薄いほど電気抵抗値は大きくなるのが分かる (Fig.5 参照)。なお、予備実験の結果 (Fig.3) から分かるように、セメントミルクや無機系充填材に比べて水の電気抵抗値は非常に大きい値を示すことが分かる。

したがって、継目面に検知センサを設置してその電気抵抗値を測定することで、センサに接触 (センサ位置に充填) した材料が水押しテスト時の残留水などであるか、継目グラウティングにおける継目充填材であるか、更には配合切り替え時のどの配合濃度のものであるか、などの充填状況の判断、評価が可能であると考えられる。

3.2.2 検知センサの基本構造の研究

(1) センサ基本構造

Table 3 測定材料の配合濃度

測定材料	配合濃度:W/C(%)
セメントミルク ^{*1)}	100, 200, 400, 600, 800, 1000
無機系注入材 ^{*2)}	80, 100, 200, 400, 600, 800

*1)普通ポルトランドセメント(ポゾリスGF-1700:C×1%)

*2)ハイスタフ(ハイスタフエイド(無収縮材):C×2%)

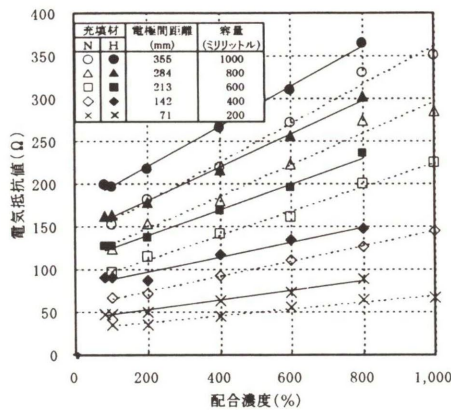


Fig.4 充填材の配合濃度と電気抵抗値との関係

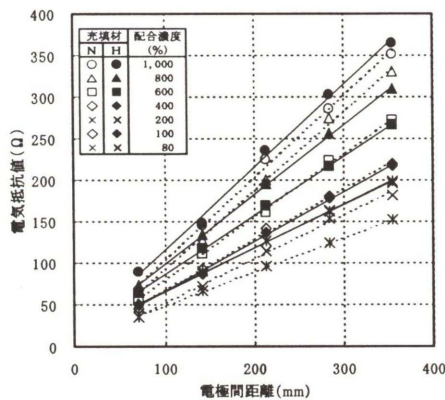


Fig.5 電極間距離と電気抵抗値との関係

充填材検知センサは、コンクリート打設時の振動・衝撃などで破損しないような剛性が必要であり、加えて微小な継目開度へも確実に追従できることや、雨水・養生水への耐水性は勿論、継目面に進入するモルタルやノロ等にも影響を受けることのない構造である必要がある。

そこで、基本的な構造としては、継目グラウチングで一般に用いられている充填材注入用のアウトレット（コンジットボックス：Fig.6）を参考に、センサ部とそれを覆う保護カバーとからなる一対の構造とし、先行ブロックで保護カバーを取り付け、後行ブロックでは保護カバーにセンサ部を後付けする方法とした。また、ブロックの収縮挙動に追従できるように、それぞれ背面にコンクリートへのアンカーを備え持つ構造とした。

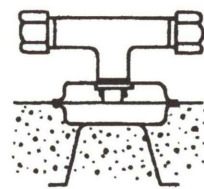


Fig.6 グラウトアウトレット (コンジットボックス)⁴⁾

(2) 電極の材質

実構造物の継目面に設置したセンサは、その設置から継目グラウチング時に作動させるまでに、少なくとも数ヶ月、構造物の規模によっては低標高部では数年間も経過することを考慮しておかなければならない。特に、アンカレイジなどの海洋構造物では腐蝕が問題となることから、センサの電極は導電性が良いだけでなく、経年的、化学的に安定した材質のものを用いる必要がある。

そこで、検知センサの電極には、長期的な耐食性、耐候性、耐久性等を考慮して、ステンレス (SUS304) を用いることとした。

(3) センサ部の基本仕様

検知センサには、主として2つの機能を持たせることとした。一つはセンサに到達した充填材の配合濃度を測定する機能で、もう一つは複数のセンサ間で電気抵抗を測定してトモグラフィ解析処理を行って継目面全体の状況（例えば、場所的な継目開度、センサ間での充填不良箇所など）を把握しようとする機能である。

これまでの予備実験、基礎実験でも分かる通り、一般に導電体の電気抵抗は、導電体の長さ に 比例し、導電面積に反比例することが知られている。

$$R \propto R_0 \frac{L}{A} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R : 導電体の測定抵抗値 (Ω) , R_0 : 導電体の比抵抗値 (Ω cm) , L : 導電体の測定長さ (cm) , A : 導電面積 (cm²) , である。

式(1)によれば、継目全体の充填状況をトモグラフィ解析するためのセンサ間の測定では、測定距離 L が大きい ため電極面積を小さくすると測定誤差が大きくなる可能性があることが分かる。一方、センサ位置に到達した充填材の配合濃度を精度良く測定するためには、 L/A が一定となるような条件の下で測定を行わなければならないことも分かる。そこで、電極面積と電気抵抗値との関係について、大型水槽を用いて種々の L/A の条件の基での測定実験を行い、両者の測定電極を併せ持つセンサの基本仕様を Table 4 のように定めた。

すなわち、トモグラフィ解析を行うためのセンサ間の測定電極は、設置時の施工性や測定値の安定性を考慮して 70cm² 以上とし、センサ全体を電極と見なして φ100 mm の円形センサとした。また、充填材の配合濃度を測定する電極については、φ100mm の電極を持つセンサ内に L/A が一定となるようなスリットを設けて、その中に一対の小型電極を設置して、測定する方法を考案した。なお、その小型電極の設置距離をセンサ半径より大きくすると迂回電流の影響が大きくなり、また逆に近づけすぎると分極現象が生じる可能性があるため、小型電極間距離はセンサ半径の 1/2 の 50mm とした。これを基に、電極面積とスリット幅について、継目充填材を用いた数十ケースの実験を踏まえて、検知センサの基本的な仕様を決定した。

Table 4 充填材検知センサの基本仕様

項目		基本仕様	
測定電源	電源周波数	1kHz(交流)	
	測定電圧	5V(以上)	
充填材検知センサ	充填状況確認用	電極の材質	ステンレス(SUS304)
		電極寸法(面積)	φ100mm(±78.5cm ²)
	配合濃度測定用	電極の材質	ステンレス(SUS304)
		電極寸法(面積)	5×5mm(=0.25cm ²)
	電極間距離	50mm	
	スリット	高さ	5mm
		幅	30mm

3.2.3 細部構造の研究

(1) アンカー

保護カバーおよびセンサの背面に設けたコンクリートアンカーは、躯体へ確実に定着できるように、それぞれ異形鉄筋 D10（定着長：35D 以上）を各 2 本ずつ用いた。

(2) 固定ナット

当センサは、センサ部と保護カバーとの固定はボルト・ナットで行う構造としたが、アンカーの引抜き耐力に対してボルト・ナットは容易に破断して、ブロックの変形（継目の開き）に確実に追従できなければならない。

そこで、保護カバーを試作し、実際の敷設状況と同様にコンクリート（30-8-40N）へ埋設してアンカーの引抜き耐力試験（コンクリート材齢：5日，7日，10日，14日，22日，28日，56日）を、また各種材質のナット（M3）を用いて継目開度への追従性を確認するための保護カバーのフランジ部の剥離耐力試験を実施した。

Fig.7 に、保護カバーの引抜き耐力試験結果の一例を示すが、アンカーの引抜き耐力はコンクリートの材齢に関わらず概ね 7 t 程度であるが、荷重が 2 t 以上ではアンカーの付着が低下し保護カバーがコンクリートから抜け始めることが分かる。一方、保護カバーのフランジの剥離耐力試験結果（Table 5 参照）では、金属系ナットの破断荷重は 1 t 以上必要とするが、プラスチックナットは 1/10 程の荷重で破断でき、防水用シール材を塗布しても 1tf 以下の荷重でフランジを剥離できることが分かる。

そこで、保護カバーとセンサ部の固定にはプラスチックナットを用いることとし、コンクリート打設時のフランジ部の漏水防止対策にはシール材を用いる塗布するものとした。

3.2.4 測定ケーブルの仕様

交流電源を用いた測定ケーブルには、一般に同軸ケー

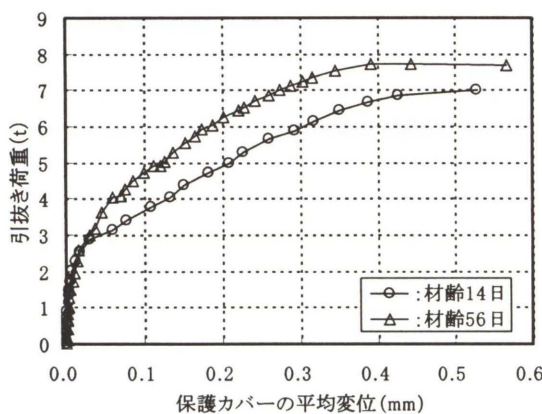


Fig.7 保護カバーの引抜き耐力試験結果の一例

Table 5 保護カバーの剥離耐力試験結果

ナットの材質	漏水防止用 シリコンシール材	M3ナット破断荷重 (kgf)
スチール	-	1,026
アルミ	-	1,212
真ちゆう	-	1,207
プラスチック	-	130
	材齢1日	251
	材齢7日	553

ブルやツイストケーブルが用いられるが、同軸ケーブルは実際の施工での取り回しにやや難があるので、施工性を考慮して今回は電気抵抗値の測定にはツイストケーブルを用いることとした。また、センサには熱電対も内蔵させ、センサ位置での躯体温度の測定も行うこととした。

なお、電気抵抗値測定用ツイストケーブル（0.5sq.）×2本と温度測定用熱電対（T型-0.65）×1本は、全体を1本にとりまとめてφ11.5mmの専用ケーブルとした。

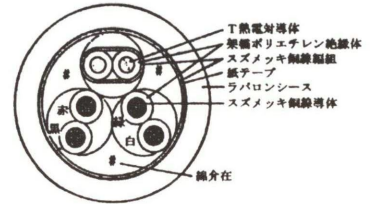


Fig.8 専用の測定ケーブル

3.2.5 開発した充填材検知センサ

Fig.9 に、開発した充填材検知センサを示す。

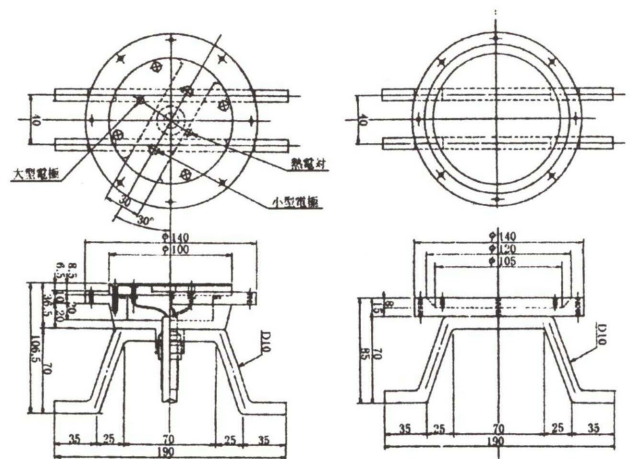
なお、センサ内の配合濃度測定用のスリットは、基本的には充填材注入時における残留エアの排出および充填材の流入がスムーズに行われるよう、鉛直方向に設置するのが望ましいが、継目へ侵入、落下した養生水やノロなどが内部の小型電極に直接付着するのを避けるために、鉛直軸に対して30°傾けて設置することとした。

3.3 測定装置の開発

現場の継目面に設置した複数の充填材検知センサを、交流電源により連続して（電気抵抗値を）計測し、データを記録・保管できる市販の装置が見あたらないため、今回新たに専用の測定装置の開発を行った。

開発したデータロガーは、温度、ひずみ、電圧などの測定が行える市販品（TDS-302：（株）東京測器研究所製）に、新たに電気抵抗値の測定機能を付加させたもので、充填材検知センサを接続する二種類のスイッチボックスの他に、熱電測定用としての市販のスイッチボックスも連動させて同時に計測を行うものである（Photo.1 参照）。

新開発の配合濃度測定用スイッチボックスは、センサ内の配合濃度を測定する小型電極を接続し、センサに接触した充填材の電気抵抗値の測定を行うもので、トモグラフィ解析用のスイッチボックスは、大型電極を接続し



(1) 検知センサ

(2) 保護カバー

Fig.9 開発した充填材検知センサ

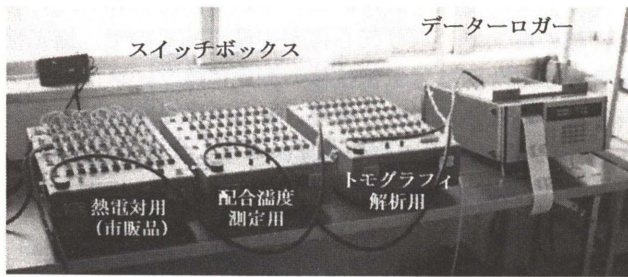


Photo.1 新開発の測定装置

各センサ間の電気抵抗値をマトリックス的にスキャンして測定を行うものである。なお、何れのスイッチボックスにも、測定周波数および測定電圧を切り替えられる測定電源を内蔵させている。

3.4 計測管理システムの開発

継目グラウチングにおける注入管理を総合的に評価・判断するために、注入管理システムと充填状況管理システムからなる計測管理システムを開発した。

注入管理システムは、継目グラウチングにおけるブロック間のズレや継目開度などの躯体の相対変位挙動、ならびに継目充填材の注入圧力等の計測データをリアルタイムに計測管理を行うシステムである。

充填状況管理システムは、従来把握することができなかった継目グラウチングにおける継目内の充填材の充填状況を可視化するシステムで、充填材検知センサに到達した充填材の配合濃度の分布状況や、各センサ間の電気抵抗値をトモグラフィ解析を行うことによって継目全体の面的な状況を把握しようとするシステムである。

3.5 総合確認実験

3.5.1 実験の目的

開発した充填材検知センサの一連の施工方法ならびに測定装置、計測管理システムの動作状況を確認するために、総合的な確認実験を行った。

実験の目的は、以下に示すとおりである。

- ①保護カバーおよび検知センサの設置方法の確認
 - ②コンクリート打設時におけるセンサ部へのノロ等の漏水・漏洩の確認
 - ③継目開度への保護カバーの追従性の確認
 - ④測定装置およびシステムの動作状況の確認
 - ⑤継目グラウチングにおける充填材の注入状況の確認
- なお、①～③についてはコンクリート試験体の打設実験で、④、⑤については継目充填材の注入状況可視化実験で確認を行った。

3.5.2 コンクリート試験体打設実験

(1) 実験概要

製作した試験体は、実際のマスコンクリート構造物と同様に内部に鉛直打継面を持つ□700×1,000mmのコンクリートブロックで、継目面にはグラウトストップで囲んだ500×500mmのグラウトゾーンを設け、実際の施工手順に準じて、先行ブロックには注入配管を接続したグ

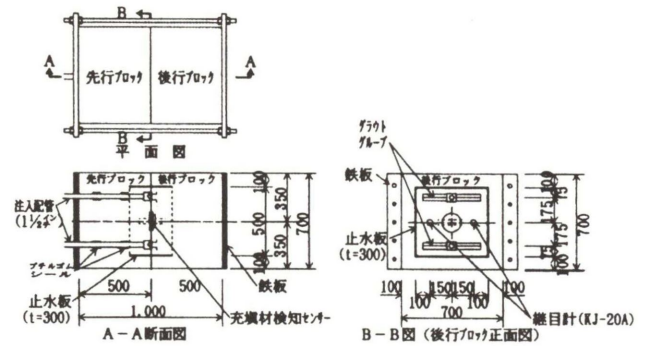


Fig.10 コンクリート試験体

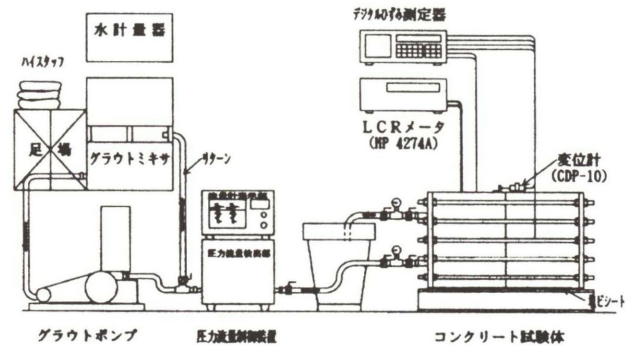


Fig.11 コンクリート試験体の注入実験の概要

ラウトグループ、センサの保護カバーおよび継目計を設置し、後行ブロックでは充填材検知センサを取り付けてそれぞれコンクリートを打ち込んだ。なお、コンクリート硬化後、ブロック間継目の開きを従来の注入限界と言われている0.3mm程度に調整し、継目充填材(ハイスタップ)を注入して充填状況の確認も行った。

Fig.10にコンクリート試験体の概要を、Fig.11にコンクリート硬化後の注入実験の概要を示す。

(2) 実験結果

実験の結果、先行ブロックにおける保護カバーの型枠への取り付け方法については、簡便な釘でもコンクリート打設時にガタつきや脱落などもなく十分固定できたが、打設時にカバー内部やセンサ部固定用のネジ穴にノロ・ペースト分が侵入することが明らかとなったので、シーリング材等によるコーキング処理が必要であることが把握できた。また、後行ブロックにおける検知センサの設置方法については、保護カバーのフランジ部に接着シール材を塗布してセンサを密着させナットで固定すること



Photo.2 継目面を解体したコンクリート試験体と充填前の試験体

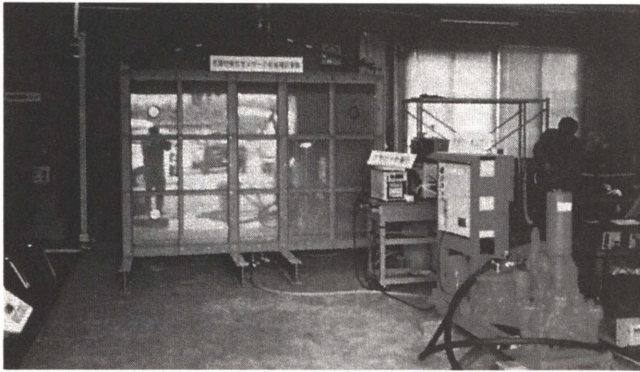


Photo.3 注入状況可視化実験装置の全景

で、ノロ等の漏水・漏洩を防止できることが確認できた。
 なお、ブロック間継目を強制的に開かせて充填材を注入し、硬化後ブロックを解体してセンサ内部および継目面の注入状況を確認した結果、継目開度が0.38mmと微小であったにも関わらず充填材が完全に充填されており、微小な継目開度への保護カバーの追従性ならびにハイスタップの充填性は極めて良好であることが確認できた。

3.5.3 継目充填材の注入状況可視化実験

(1) 実験概要

実験装置は、グラウチングゾーンに見立てた幅2.5m×高さ1.7mパネルに、約0.5mmの隙間を設けて前面をアクリル板として注入状況が観察できるようにしたもので、上下端にはグラウトグループを設け、上下2段に各2個ずつ計4個の充填材検知センサを取り付けて、注入時のセンサおよび計測管理システムの動作状況の確認を行った。Photo.3に、注入状況可視化実験装置の全景を示す。

(2) 実験結果

実験は、実際の施工と同様に水押しテストから始め、継目面まで充填されたことを確認して一旦排水し、開始後30分後に配合濃度400%のハイスタップの注入を、約50分後には配合濃度70%へ切り替えて注入を行った。

実験の結果、計器初期値の分析や校正係数の入力などシステムの取り扱いがやや煩雑であったが、測定装置および計測管理システムの作動状況には基本的に問題がないことを確認した。

Fig.12に検知センサ間の電気抵抗値の経時変化の一例

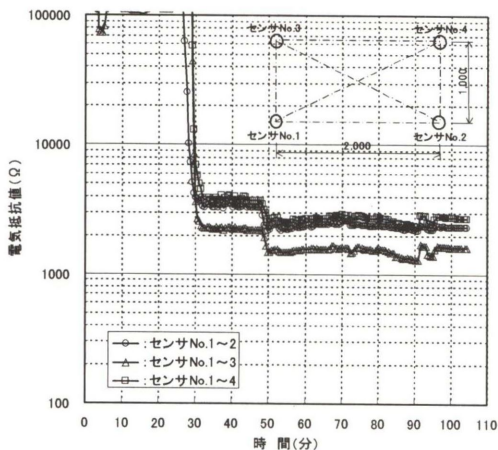


Fig.12 充填材検知センサ間の電気抵抗値の経時変化の一例

を示すが、継目開度がほぼ一定の条件の基では、配合濃度の切り替え状況が十分な精度で確認できること、ならびにセンサ間の電気抵抗値は、センサ間の距離に比例して大きくなるのが分かる。

したがって、実際の現場で複数のセンサ間の電気抵抗値をマトリックス的に測定し、トモグラフィ解析を行うことによって、継目面全体の充填状況が把握できるものと考えられる。

4. 橋梁下部工における継目グラウチング

4.1 工事概要

本州四国連絡橋来島大橋は、愛媛県今治市と対岸の大島の海峡部延長約4kmを結ぶ来島第一大橋、来島第二大橋および来島第三大橋の三橋からなる連続した吊り橋で、来島大橋下部工東工事は三連橋のうちの来島第一大橋3P主塔基礎と来島第一大橋と第二大橋共用の4Aアンカレイジの施工である (Table 6 参照)。

このうち、4Aアンカレイジ (Photo.4) の気中コンクリートでは、4ブロックに分割して施工されていた躯体を一体化するための継目グラウチングについて、ブロック間を貫通する構造鉄筋への影響や、形状・構造上注入圧力を大きくできないことなどによる信頼性、確実性が懸念されていた。

そこで、今回新しく選定した継目充填材、開発した充填材検知センサ、測定装置、および一連の計測管理システムを導入し、継目グラウチングにおけるブロック間継

Table 6 来島大橋下部工東工事の工事概要

工 事 名		来島大橋下部工東工事
発 注 者		本州四国連絡橋公団
工 事 場 所		愛媛県越智郡吉海町大字椋名地先
工 期		平成4年3月～平成8年1月
3P	海 底 掘 削 工	約 67,900 m ³
	鋼 ケ ー ソ ン 根 固 工	約 6,200 m ³
	底 面 清 掃 工	約 1,100 m ²
	水 中 コ ン ク リ ー ト 工	約 38,000 m ³
	気 中 コ ン ク リ ー ト 工	約 6,000 m ³
4A	薄 肉 P C パ ネ ル 工	約 2,000 m ²
	主 塔 ア ン カ ー フ レ ー ム 設 置 工	2 基
	鋼 ケ ー ソ ン 根 固 工	約 1,600 m ³
	水 中 コ ン ク リ ー ト 工	約 50,300 m ³
	気 中 コ ン ク リ ー ト 工	約 101,600 m ³
共通	薄 肉 P C パ ネ ル 工	約 9,000 m ²
	グ ラ ウ チ ング 工	1 式
	水 平 支 承 受 梁 工	1 式
	受 配 電 設 備 工	1 式
	水 質 調 査 工	1 式
シ	海 底 ケ ー ブ ル 敷 設 工	1 式
	シ ン カ ー 工	1 式

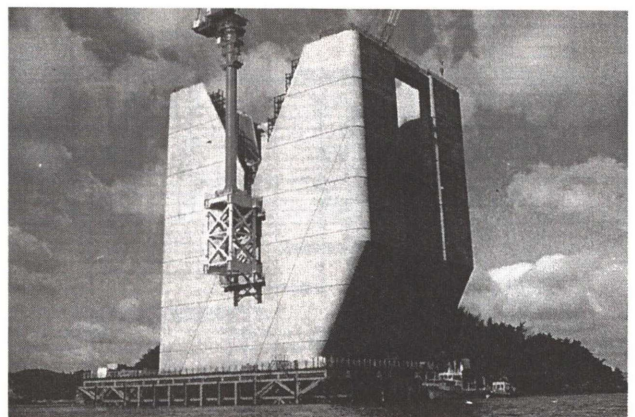


Photo.4 来島大橋4Aアンカレイジの全景

目の充填状況の確認ならびに注入管理に適用した。

4.2 継目グラウチングの施工⁵⁾

4.2.1 施工概要

(1) グラウチングゾーンの分割

継目グラウチングでは、グラウチングゾーンを高くすると注入作業の効率を高めることができるが、ブロックの安定性の問題やゾーン内での凝結硬化速度の違いによる配管系の閉塞などへのリスクが大きくなるため、一般にコンクリートダムでは15m程度が標準とされている。一方、躯体下部がオーバーハング形状を持つ当アンカレイジでは、構造的な安定性や貫通鉄筋への影響等から、注入圧力はできるだけ低く抑える必要がある。

そこで、4Aアンカレイジにおけるグラウチングゾーンは、継目面の形状、注入時の施工性等も踏まえて、Fig.13に示すように6.0~7.5mに分割することとした。

なお、充填材検知センサは、継目開度の大きいゾーンとして橋軸直角方向のJ3-2を、継目開度の小さいゾーンとしてJ3-3の2ゾーンに設置して、充填状況の制御、管理および観察を行うこととした。

(2) 配管

Fig.14に、継目グラウチングの配管系統図を示す。

継目充填材の注入配管には、薄肉電縫管を使用し、サプライ管・リターン管・ウォッシング管・ベントリターン管には1-1/2" (38.1mm)を、ライザー管には3/4" (19.1mm)を用いた。ただし、充填材検知センサを設置したグラウトゾーン(J3-2, J3-3)については、センサ間の電気抵抗値を測定する際に配管をショートパスする可能性があるため、ライザー管およびサプライ管等には同径の塩ビ管を使用した。

(3) アウトレット

ライザー管の設置間隔は鉛直方向に1.0~1.5mを標準とし、アウトレットは水平方向に3m間隔で千鳥に配置した。なお、アウトレットには、コンジットボックスを使用した。

(4) グラウトストップ

注入作業においてリークが発生すると、確実な注入が行えないばかりでなく、場合によってはブロックの一体化への信頼性が大幅に低下する可能性もある。

そこで、グラウトストップについては、従来一般に用いられている塩ビ性止水板に代えて、より止水性能の高いブチルゴム性止水板(B=300mm, t=6mm, 鉄板入り：早川ゴム(株)製)を用いることとした。

また、リフト打設されるマスコンクリート構造物では、温度応力に起因するそり応力によってブロック端部の水平打継目が開き、それが鉛直打継目と繋がってみずみちを形成してリークの発生原因となる場合がある。そこで、これに対して止水板を内部へ折り曲げてコの字形に設置する方法を考案し、採用した(Fig.15参照)。

(5) 施工方法

Fig.16に、継目グラウチングの標準施工手順を示す。

継目グラウチングは、下段ゾーンより順次行うものとし、1ゾーン/日を施工の標準とした。また注入圧力の管理は、基本的にベント側圧力で行うものとし、ダムでの施工方法を参考に最大0.2MPa(2.0kgf/cm²)に設定した。

なお、躯体の許容継目相対開度は、0.5mm以下とした。

4.2.2 継目充填材の配合

継目充填材として選定したハイスタップ(日鐵セメント製)は、粒子が細かく注入性能が極めて良いので基本的には配合切り替えを行う必要はないと考えられるが、リーク発生時の漏洩に対する経済性やリーク処理等の注入遅延時に生じる管内閉塞などの影響を考慮して、二段階の配合濃度切り替えを行うこととした。Table 7に、充填材の注入配合濃度の標準を示す。

Table 7 継目グラウチングにおける継目充填材の注入配合濃度

W/H (%)	水 (%)	ハイスタップ (kg)	ハイスタップ エイド (g)	混練量 (%)	比重	Pポート (試験室) (s)
400	159.2	40	800	173.4	1.15	8.2
70	108.8	160	3,200	165.8	1.64	8.8

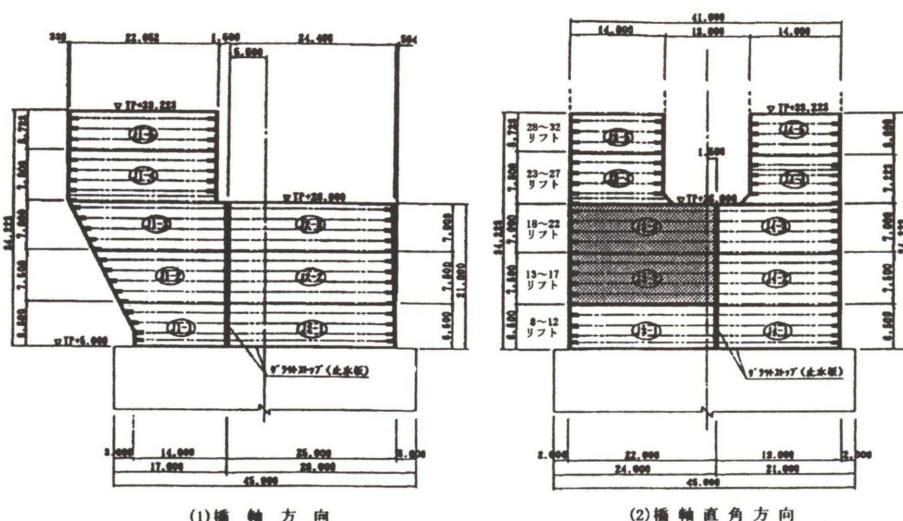


Fig.13 来島大橋4Aアンカレイジの継目グラウチングにおけるグラウチングゾーンの分割
(※網掛け部は、充填材検知センサ設置ゾーン)

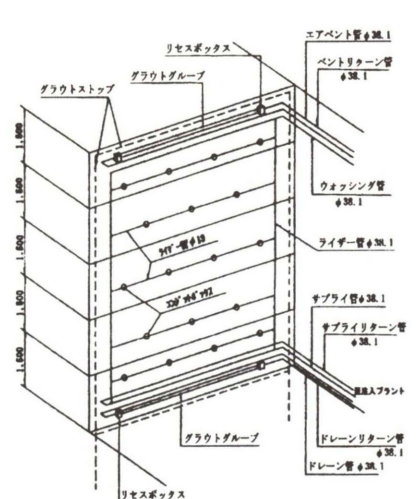


Fig.14 継目グラウト配管系統図

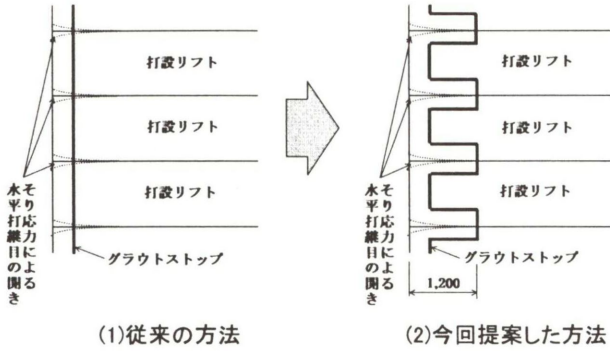


Fig.15 グラウトストップの見直し

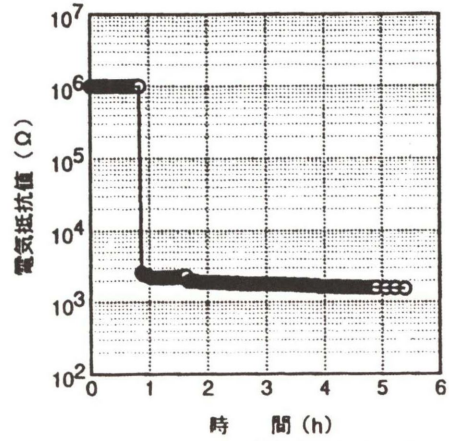


Fig.18 センサ No.13における電気抵抗値の経時変化

ング前の平均継目開度は0.38mmと極めて小さかったが、ハイスタップによる注入状況は極めて良好であった。なお、充填材注入前後の継目の相対変位は0.1mm以下に制御でき、貫通鉄筋への影響も設計以下に抑えることができた。

センサ位置における充填材の配合濃度の測定結果の一例として、Fig.18にJ3-3ゾーンにおけるセンサ No.13位置での配合濃度の経時変化を示す。これより、充填材注入前の水押しテストによる継目面の充水状況や、注入開始後配合濃度400%の充填材のセンサへの到達、その後およそ50分程からの70%の最終配合へ徐々に継目面の配合濃度が置換されている状況が的確に把握することができる。

また、充填材の注入状況については、充填材検知システムによって配合濃度の測定結果をリアルタイムにコンター図として可視化した。等電気抵抗線図の一例として、Fig.19にJ3-2ゾーンにおける注入開始15分後、23分後および注入完了後(4時間後)のモニタ画面の表示結果を示す。これによれば、継目充填材は継目面の下方よりほぼ均等の高さで注入されていくことが分かる。

5. まとめ

以上に、充填材検知システムの開発概要ならびに実構造物での導入結果を示してきた。

得られた結論をとりまとめて、以下に示す。

- (1) 開発した充填材検知システムは、従来把握することが困難であった継目グラウチングにおける充填状況を

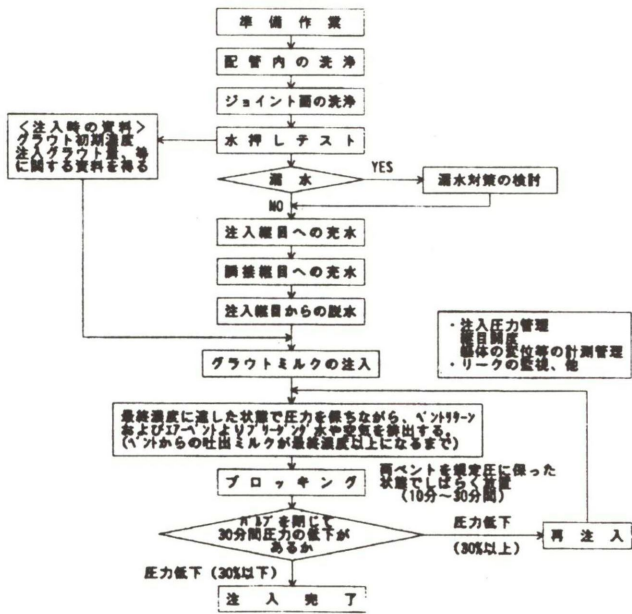


Fig.16 継目グラウチングの標準施工手順

4.2.3 充填材検知センサの設置

充填材検知センサは、継目面に対して鉛直・水平共におよそ3m間隔で設置した。Fig.17に、J3-2ゾーンにおける充填材検知センサの配置を、注入用のアウトレットと併せて示す。なお、J3-3ゾーンについては、中段のセンサのみを一つ置きに6m間隔で配置した。

また、Photo.5に、後行ブロックのコンクリート打設時における充填材検知センサの敷設状況を示す。

4.2.4 施工実績

検知センサを配したJ3継目面において、継目グラウチ

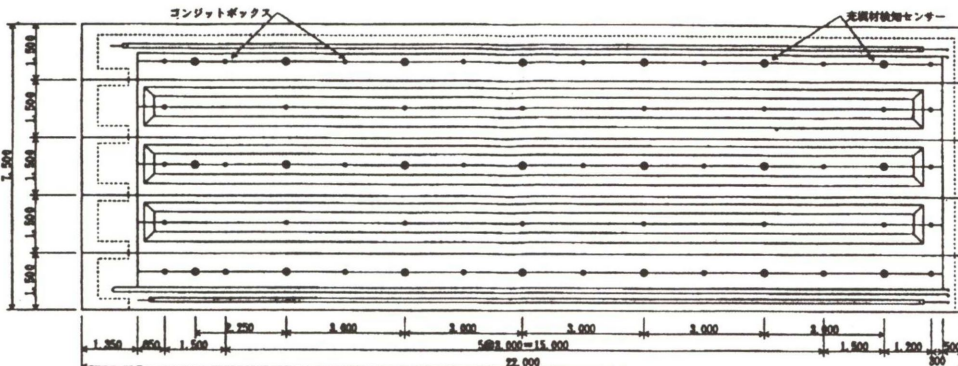


Fig.17 J3-2ゾーンにおけるアウトレットと充填材検知センサの設置位置 (J3-3ゾーンでは、中段センサを一つ置きとした)

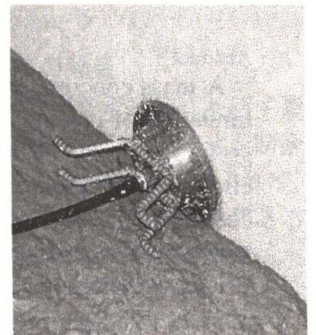
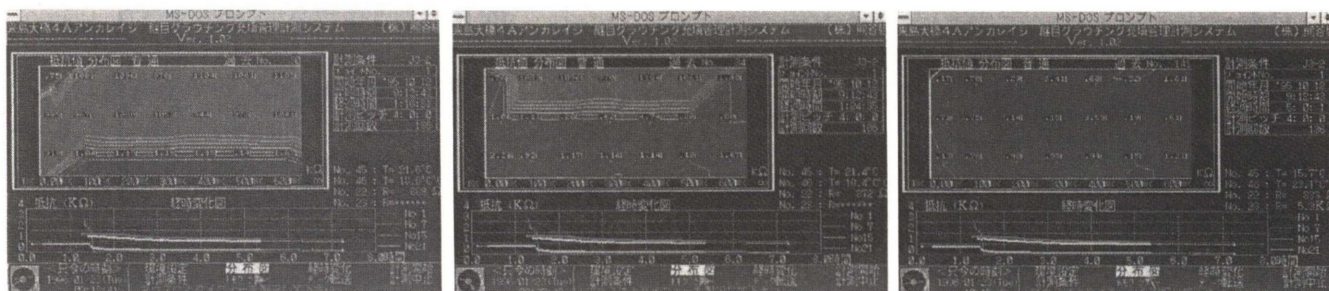


Photo.5 充填材検知センサの設置状況(後行ブロック)



(1)注入開始 15 分後 (2)注入開始 23 分後 (3)注入完了後(4 時間後)

Fig.19 J3-2ゾーンにおける充填材の配合濃度の等電気抵抗線図の一例

リアルタイムに把握できる新しい施工管理手段として、極めて有効であることを明らかにした。

(2)当システムによって、既往の技術として従来から踏襲されてきた配管レイアウト、アウトレットの設置位置・設置数、注入圧力などの基本的な注入方法についての考え方は、大きな問題がないことを明らかにした。

(3)継目充填材として選定したハイスタッフは、今回のように継目開度が小さい場合でも極めて良好な注入状況を実現でき、躯体の一体化としての継目グラウチングの信頼性、確実性を十分に確保することができた。

また、当システムによって充填状況をモニタリングすることで、継目面に残留するエア溜まりや充填不良箇所の発見、更にはそれらに対し注入圧力や排出箇所の調整等により継目面の充填材の流れを積極的にコントロールした注入制御技術等へ発展させることも可能と考える。

なお、総合確認実験では良好な動作状況を示したセンサ間の電気抵抗値の測定について、実施工での測定データのトモグラフィ解析を試みたが満足できる結果を得ることができなかった。これに関しては、継目面の微細な凹凸に残留する気泡の影響やセンサ設置後注入まで最長 21 ヶ月が経過していることによる性能低下による測定値のバラツキ、トモグラフィ解析手法の問題など幾つかの要因が考えられたが、明らかにはできなかった。

最後に、当研究成果を受け、その後の土木構造物における躯体の一体化等の重要かつ確実な注入を行う必要が

ある多くの場合において、セメントミルクに代わりハイスタッフが用いられるようになったことを付記しておく。

謝辞

当検知システムの来島大橋 4 A アンカレイジ下部工本体工事への導入に関し、ご理解ご判断を頂いた本州四国連絡橋公団第三建設局今治工事事務所の関係者の方々に、感謝の意を表する次第である。また、システムの開発に当たって、検知センサおよび測定機器の製作に多大なご尽力を頂いた(株)東京測器研究所の関係者の各位、ならびに充填材の選定試験ならびに継目グラウチングの施工管理にご協力を頂いた日特建設(株)および日鐵セメント(株)の関係各位にも併せて感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) グ라우チング技術指針 同解説、(財)国土開発技術センター、昭和 58 年 11 月
- 2) 佐藤英明, 小林博明, 伊藤健生: ジョイントグラウチングにおける充填材の電気的特性に関する基礎的研究, 土木学会第 49 回年次学術講演会, 平成 6 年 9 月
- 3) 大岸佐吉, 小野博宣, 文 堅: セメント硬化体の電気抵抗と電気容量に及ぼす測定条件の影響, コンクリート工学年次論文報告集, 第 12 巻第 1 号, 1990 年
- 4) コンクリートダム細部技術, ダム技術センター, 昭和 58 年 2 月
- 5) 来島大橋下部工東工事 工事報告書 (1/6) ~ (3/6) I。概要・4 A 編, 本州四国連絡橋公団第三建設局今治工事事務所, 熊谷・大林・飛島・戸田・五洋来島大橋下部工東工事特定建設工事共同企業体, 平成 8 年 1 月

Development of the sealing material detection system for joint grouting

Hideaki SATOH, Katsuhiko NISHIDA, Hiroshi YOSHIDA, Masahiro HARADA

Abstract

A mass concrete structure such as concrete dams are usually constructed by the block division because of limitation of placing equipment or for the thermal crack control, and to secure a structural integration, joint grouting is done at the closing phase of construction. On the other hand, as for joint grouting, because the circumstance of the injection in the joint face are not able to be confirmed, reliability and the certainty were doubted. Therefore, the joint sealing material and the grout stop were reviewed, the detection sensor and the sealing material detection system were developed, and it introduced into an anchorage (Kurushima Kaiyō Bridge 4A anchorage), and an excellent result was obtained.

Keywords: joint grouting, sealing material, detection system, electric resistance, grout stop, anchorage