

論文

[1181] 急硬性コンクリートの施工方法に関する研究

谷口裕史\*1・安達徑治\*2・松島博之\*3・水野征四郎\*4

1. まえがき

都市部のトンネル工事においては、地表面の構造物を防護する上で、地表面の沈下防止や切羽の安定を図ることが重要な課題であり、切羽掘削に先立ち切羽前方の防護工を事前に施工する先受け工法が注目を浴びている。筆者らは、急硬性コンクリートを適用した先受け工法の確立を目指し種々の検討を実施している。本論文では、急硬性コンクリートにおける液体急結剤の混合方法の検討結果およびスリットを模擬した大型型枠内への充填実験結果について報告する。

2. 先受け工法の概要

本研究で対象とした先受け工法の概念を図-1に示す。本工法は、切羽掘削に先立ち緩やかに湾曲したチェーンカッターでスリットを切削し、即時に急硬性コンクリートを充填することにより吹き付けコンクリートに変わる連続したコンクリートシェルを切羽外周に構築し、事前に地山の防護を図る工法である[1]。この工法に要求されるコンクリートの性状を表-1に示す。これらの性状を有するコンクリート

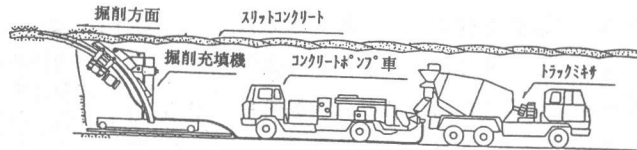


図-1 先受け工法の概念図

表-1 コンクリートの要求性能

項目	要求性能
流動性	充填性を確保するため、液体急結剤混合後2分間は、スリット12cm以上を保持する。
充填性	厚さ32cm、奥行き2m以上の地山スリット内に充填できる。
コンクリート端面の自立性	スリットコンクリートの端面が、妻枠から解放された時点で崩壊しない。掘削速度、妻枠長を考慮して、打込み5分後の圧縮強度を1kgf/cm <sup>2</sup> 程度とする。
強度発現性	トンネル掘削時の作用土圧に対し安全である。施工サイクル設計土圧を考慮して打込み4時間後の圧縮強度を30kgf/cm <sup>2</sup> 以上、材令28日の設計基準強度180kgf/cm <sup>2</sup>

として、急硬材と凝結調整剤を使用したコンクリート（以下ベースコンクリートと称す）に液体急結剤を添加して製造する急硬性コンクリートを選定した。

3. 液体急結剤の混合方法の検討

急硬性コンクリートは、コンクリートの打設直前に液体急結剤を混合することにより製造する必要がある。ここでは液体急結剤の混合方法としてウォータージェット（以下WJと称す）および機械式混合装置を選定し、これらの混合性能について実験的に検討した。

3.1 WJ性能試験

(1) 実験概要

本実験の使用材料および基本配合を表-2および3に示す。WJは、ノズル回転数500rpm、ジェット圧300および700kgf/cm<sup>2</sup>の条件で使用した。この条件は、実施工を考慮して、特殊なポンプ

\*1 ハザマ技術研究所 研究第2部第2研究室 研究員、工修（正会員）

\*2 (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 技師長

\*3 (株)大林組 土木技術本部技術第4部 課長代理、(正会員)

\*4 日本国土開発(株) エンジニアリング本部機電部 副課長

あるいは附属機器を使用

せずに適用が可能となる範囲で選定した。

実験装置の概要を図-

2に示す。実験は、鋼

管にベースコンクリートを充填し、装置内部の圧力を圧送状態を模擬して0.5kgf/cm<sup>2</sup>程度に設定した後、液体急結剤をW Jにより混入すると同時にピストンでアクリル管内にコンクリートを圧送した。圧送終了後、アクリル管を取り外し、アクリル管内のコンクリートを型枠内に流し込み、供試体を作成した。本実験での測定項目を表-4に示す。また、液体急結剤を着色することにより混合状況を目視観察した。

(2) 実験結果および考察

洗出し試験(表-4参照)による液体急結剤の混合状況、圧縮強度試験結果および化学分析結果を図-3、4および表-5に示す。ジェット圧が300kgf/cm<sup>2</sup>の場合は、液体急結剤噴入側1/3程度までしか液体急結剤が混入されていないのに対し700kgf/cm<sup>2</sup>の場合は2/3程度まで混入されている状況が観察された。圧縮強度はジェット圧の増大に伴い増加するが室内試験(ミキサで混合した場合)よりも低い強度となっている。また、化学分析結果から推定される液体急結

表-3 基本配合

Gmax (mm)	スラフ <sup>o</sup> の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水・結 合材比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					水	セメント	急硬 材	細骨 材	粗骨 材	混和剤*	
										a	b
20	20±2.5	4±1	48.2	45.0	194	350	52.5	742	925	0.081	4.03

\*a: A E 剤 b: 凝結調整剤

表-2 使用材料

使用材料	種類	基本物性*
セメント	普通ポルトランドセメント	比重3.16 O社製 比重3.16 T社製
細骨材	相模川水系川砂と市原産山砂の混合砂	比重2.55, 吸水率2.45, F.M.2.78 比重2.59, 吸水率2.46, F.M.2.80
粗骨材	津久井郡城山産砕石	比重2.64, 吸水率0.99, F.M.6.74 比重2.64, 吸水率0.99, F.M.6.70
混和材	急硬材	カルシウムサルホアルミネート系化合物 比重2.90
混和剤	A E 剤	スルホン酸炭化水素 リグニン酸化合物 <sup>o</sup> リオール複合体
	凝結調整剤	有機酸・アルカリ炭酸塩
	液体急結剤(A)	無機塩系
	液体急結剤(B)	特殊無機アルミン酸化合物

\*上段は3.1で使用。その他の実験では下段を使用  
液体急結剤は3.では(A)を4.では(B)を使用

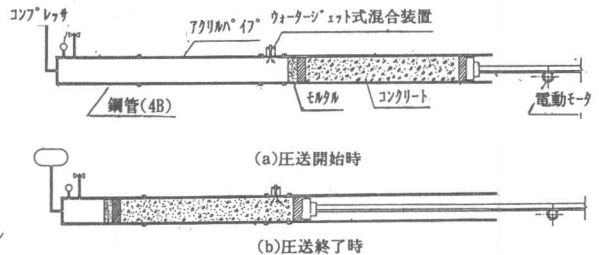


図-2 実験概要

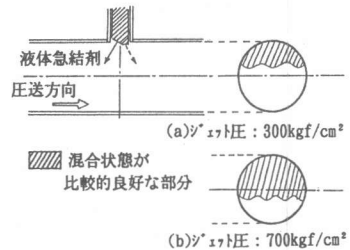


図-3 液体急結剤の混合状況

表-4 測定項目

対象	試験項目
ハココン	スラフ <sup>o</sup> 、空気量、コンクリート温度
急硬性 コン	洗出し試験*、圧縮強度 化学分析

\*脱型後、水道水により未硬化部を洗い流し、液体急結剤の混合されている範囲を確認する試験

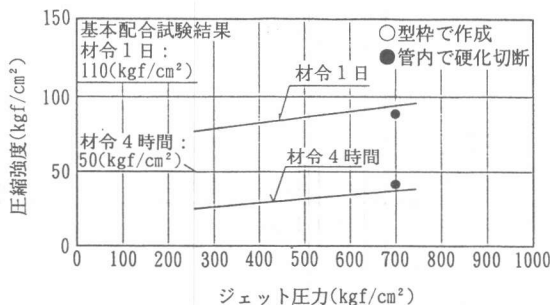


図-4 圧縮強度試験結果

表-5 化学分析結果

No	ジェット圧 (kgf/cm <sup>2</sup> )	試料の タイプ*	液体急結剤 の推定量
1	300	全面	1.2~1.3 6.0~6.4
		半面	約4.5 0.7~0.8
2	700	全面	約0.8 約2.5
		半面	1.9~2.4 2.5~2.6

\*輪切りにした供試体の全面(半面)を用いて化学分析用試料を作成、各ケース2試料実施

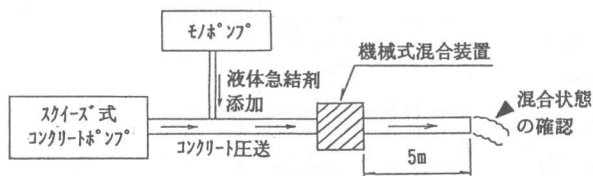


図-6 実験概要

剤混合量は、いずれの場合にも平均2~3%程度と吐出量の1/2以下であり、残りの液体急結剤はコンクリート中には混合されずコンクリートと管の境界に沿って流れたものと考えられる。以上より、今回適用した条件の範囲では、WJ単独で液体急結剤を十分に混合する事は困難であると考えられる。

### 3.2 機械式混合装置性能実験

#### (1) 実験概要

本実験に用いた2種類の機械式混合装置を図-5に、実験概要を図-6に示す。なお、この実験では急硬材は使用せず、レデーミクストコンクリート(270-18-20-N)を使用した。測定項目は3.1と同様である。

#### (2) 実験結果および考察

液体急結剤の混合状況を図-7に示す。クランクシャフト型の場合は、表面から5mm程度の範囲しか液体急結剤が混合されていないのに対し、ロッド型の場合は25~30mm程度の範囲まで混合されており、クランクシャフト型と比較して混合性能が優れている。これはロッド型の管内に突出した攪拌棒の効果であると考えられる。しかし、攪拌棒の増加あるいは突出長の延長はコンクリートの閉塞原因となる危険性もあり、今回の適用条件の範囲ではロッド型混合装置でも完全な混合は困難であると考えられる。

### 3.3 WJおよび機械式混合装置の併用実験

#### (1) 実験概要

上記の結果を考慮して、WJと機械式混合装置の併用による液体急結剤の混合性状の改善効果を検討した。なお、WJはジェット圧を700kgf/cm<sup>2</sup>とし、液体急結剤の混合域を拡大させる目的で図-8に示すようにベンド型とした。実験概要を図-9に示す。なお、使用材料、配合および測定項目は3.2と同様である。

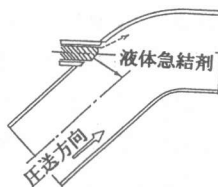


図-8 ベント型WJ混合装置

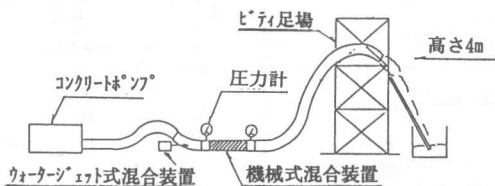


図-9 実験概要

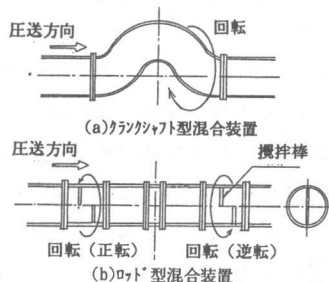


図-5 機械式混合装置

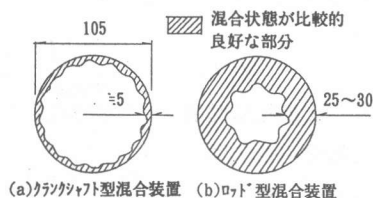


図-7 液体急結剤の混合状況

表-6 実験結果

No	混合装置	30分後 洗出し		圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	
		30分	1時間	30分	1時間
1	WJ	×		0.2	0.2
2	WJ+クランク	△		0.4	0.5
3	WJ+ロッド	△~○		0.4	0.8

\*表-4の洗出し試験を供試体作成後30分で実施  
○: 急結剤が完全に混合 △: 混合が一部不十分  
×: 混合が不十分

(2) 実験結果および考察

実験結果を表-6に示す。目視による液体急結剤の混合状況および洗出し試験の結果、WJに機械式混合装置を併用することにより液体急結剤の混合性状は改善され、ロッド型混合装置を用いた場合にはその効果も大きい。これは、既にWJにより管の2/3程度まで液体急結剤が混入したコンクリートをロッド型混合装置で混合するために、コンクリート全体に液体急結剤を混合できるためであると考えられる。

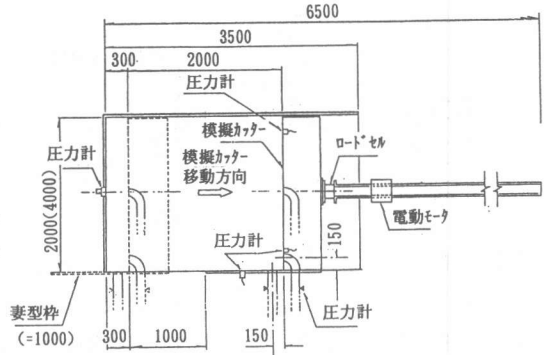


図-10 充填性実験概要

表-7 実験要因

実験要因	水準
充填位置	カッター中央部、妻型枠
スリット長	2m、4m
ロッド型混合装置	有、無

表-8 測定項目

	測定項目
ヘースコン	スランプ <sup>®</sup> 、空気量、コンクリート温度、圧縮強度
急硬コン	圧縮強度、CT強度、化学分析
施工	流動性、充填性、端面自立性 管内圧、妻枠・模擬カッター圧 模擬カッター移動速度、液体急結剤添加量

4. 大型試験装置による充填性実験

充填性実験は、先受け工法の切削スリットを模擬した大型型枠を使用して急硬性コンクリートの施工性およびコンクリートの特性について検討した。

4.1 実験概要

充填性実験の概要を図-10に示す。模擬カッターの移動速度は実施工を考慮して20cm/minとした。供試体は配管途中の試料採取口から採取し、その後コンクリートを型枠内に打設した。凝結調整剤はプラントからの運搬時間および気温を考慮して、1.0%と増量使用すると共に、液体急結剤は急結性の高い(B)を使用した。液体急結剤の混合方法は3.の試験結果よりWJ(ノズル回転数500rpm、ジェット圧700kgf/cm<sup>2</sup>)およびロッド型混合装置を使用した。実験要因を表-7に、測定項目を表-8に示す。

4.2 実験結果および考察

代表的な実験ケースの充填状

表-9 充填状況

No.	流動状況および充填状況	No.	流動状況および充填状況
1		4	
2		5	
3			

表-10 実験結果一覧表

No	実験条件			ヘーコン スラブ エー量 温度	カッター 移動 速度 cm/min (平均)	コンクリート 注入圧 kgf/cm <sup>2</sup> (平均)	急結剤量 g/min (平均)	コンクリート圧 kgf/cm <sup>2</sup> (a)カッター奥側 (b)カッター手前側 (c)妻枠部 (平均)	端面 の 自立性	充填状況	圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>			
	充填 位置	スリット 長	混合 装置								4 時間	1 日	7 日	28 日
1	模擬 カッター 中央	2m	WJ + ロット	23.0cm 3.0% 23.0°C	31~12 (19.8)	1.3~0.9 (1.1)	1.8~1.5 (1.7)	(a)1.0-0.6 (0.7) (b)0.9-0.6 (0.7) (c)1.5-0.7 (0.7)	良好	良好	32	54	228	288
2	模擬 カッター 中央	2m	WJ	21.5cm 2.7% 23.5°C	26~12 (19.1)	1.5~0.5 (1.0)	1.8~1.4 (1.7)	(a)0.8-0.6 (0.8) (b)1.0-0.6 (0.8) (c)1.0-0.1 (0.9)	ほぼ良好 軟らかい 部分在り	良好	26	51	228	267
3	妻枠	2m	WJ + ロット	21.5cm 2.7% 21.5°C	26~11 (19.2)	2.0~0.1 (1.5)	2.4~1.6 (1.8)	(a)1.2-0.1 (0.7) (b)1.4-0.2 (1.0) (c)1.2-0.2 (1.2)	妻枠解放 部分より 流出	スリット先端 で、やや 充填不良	30	56	263	296
4	妻枠 50cm 突出	2m	WJ + ロット	22.5cm 2.9% 23.0°C	26~10 (20.4)	15.0~ 1.0 (1.7)	2.0~1.5 (1.7)	(a)1.0-0.1 (0.4) (b)1.4-0.5 (1.0) (c)1.8-0.4 (1.2)	ほぼ良好 クラック 発生 箇所在り	充填不良 部分在り 空洞発生	26	46	252	299
5	模擬 カッター 中央	4m	WJ + ロット	22.5cm 3.5% 22.0°C	26~11 (17.6)	1.6~0.4 (1.4)	3.2~2.6 (3.1)	(a)1.0-0.1 (0.5) (b)0.8-0.1 (0.6) (c)0.9-0.1 (0.7)	良好	スリット先端 で、やや 充填不良	32	44	298	361

況および試験結果を表-9および10に示す。また、打設したコンクリートのコア採取位置および試験結果を図-11、表-11および12に示す。

(1) コンクリートの充填位置

模擬カッターから充填した場合 (No. 1, 2, 5) は、コンクリートが模擬カッターに沿って流動し、妻部コンクリートも自立した。特に、スリット長が2mの場合 (No. 1, 2) は、良好な流動性と充填状況を示した。スリット長が4mの場合 (No. 5) は、端部で流動性および充填性が若干劣る状況が認められた。

一方、妻型枠部から充填した場合 (No. 3) は、コンクリートが妻型枠に沿って流動することから妻枠解放面でコンクリートが流出した。また、妻型枠に沿ったコンクリートの流動を避ける目的で妻型枠からコンクリートの充填口を突出させた場合 (No. 4) は、充填口周辺コンクリートの硬化などにより流動性および充填性が劣ると共に、コンクリート閉塞の危険性が確認された。

以上の結果から、コンクリートの充填位置は模擬カッター部とし、スリット長はコンクリートの流動距離が1.5m程度となるように選定することが望ましいと言える。

(2) 機械式混合装置の効果

ロッド型混合装置の有無がコンクリートの流動性および充填性に及ぼす顕著な影響は認められなかったが、ロッド型混合装置を用いない場合 (No. 2) は、妻部コンクリートの表面に軟らかい部分 (液体急結剤が混合されていない部分) が各所に認められた。一方、ロッド型混合装置を用いた場合 (No. 1) は、液体急結剤が十分に混合されており、妻部コンクリート全面が硬化していた。また、コアの化学分析でも測定したすべての箇所を設定量の80%以上の液体急結剤が混合されていることが推定されている。以上の結果より、WJとロッド型混合装置を併用する

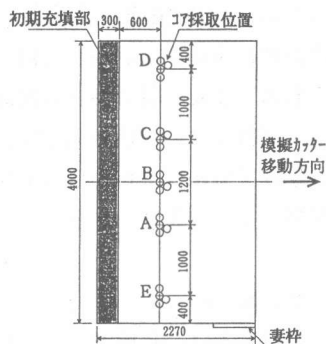


図-11 コアの採取位置

表-11 コアの試験結果 (材令28日)

実験 No	採取 位置	圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>	静弾性係数 ×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	単位容積重量 t/m <sup>3</sup>
1	A	242	2.420	2.28
	B	230	-	2.31
	C	253	2.259	2.29
5	A	249	2.487	2.25
	B	253	2.596	2.27
	C	279	2.631	2.27
	D	241	1.954	2.25
	E	231	2.189	2.25

表-12 化学分析結果 (実験No. 1)

採取 位置	液体急結剤の推定量(%)			
	上部	中部	下部	平均
A	4.5	5.7	4.3	4.8
B	4.2	6.1	5.9	5.4
C	6.5	4.7	6.7	6.0

ことにより施工上必要な液体急結剤の混合性能が得られると考えられる。

### (3) コンクリートの管内圧および模擬カッター圧

順調にコンクリートが充填されている場合のコンクリートの管内圧は約 $1.0\sim 2.0\text{kgf/cm}^2$ 、模擬カッター圧は約 $0.6\sim 0.7\text{kgf/cm}^2$ となり、コンクリートが閉塞の兆候を示す場合にはコンクリートの管内圧が上昇し、スリット内の充填が不十分な場合には模擬カッター圧が低下するなどの異常値を示すことが明らかとなった。以上の結果から、カッターの移動速度およびコンクリートの打設量を管理する上で、これらを管理値とすることが有効であると考えられる。

### (4) 強度特性

コンクリートの材令5分強度は、妻部コンクリートが自立したのものに関しては、要求性能を満足していると考えられる。供試体による材令4時間強度は、室内でミキサを使用して液体急結剤を完全に混合した場合の80～90%程度であり、目標強度( $30\text{kgf/cm}^2$ )を若干下回っているものも認められた。4時間強度は、主にベースコンクリート中の急硬材使用量に依存していることから、4時間強度に余裕がない場合には、急硬材の使用量を増大させるなどの対策をとる必要があると考えられる。また、材令28日強度はいずれの場合も目標強度を満足していた。一方、材令28日におけるコア供試体の試験結果では、スリット長が4mの場合に端部(採取位置DおよびE)のコンクリート強度および単位容積重量が小さくなる傾向が認められており、流動性および充填性の低下の影響により硬化コンクリートの品質が低下する傾向が認められた。

## 5. まとめ

本研究では、急硬性コンクリートを用いた先受け工法を確立することを目的として、急硬性コンクリートの施工方法に関する実験的検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 液体急結剤の混合は、WJ(ノズル回転数500rpm、ジェット圧 $700\text{kgf/cm}^2$ )とロッド型混合装置を併用した場合が最も効果的である。
- (2) 今回適用した急硬性コンクリートの場合、コンクリートの充填位置を模擬スリットの中央とし、スリット長を3m程度以下にすることにより、切削スリット内にコンクリートを十分に充填することが可能である。
- (3) コンクリートの打設管理として、コンクリートの管内圧およびカッター圧の測定が有効である。
- (4) 本システムで液体急結剤を混合した急硬性コンクリートの材令4時間強度は、ミキサを使用して液体急結剤を完全に混合した場合の80～90%程度となる。

以上のことを考慮することにより、今回検討した先受け工法に急硬性コンクリートを適用できることが明らかとなった。

## 6. あとがき

現在、本工法の設計・施工システムについても検討中である。なお、本研究はNew PLS工法研究会(建設機械化研究所、大林組、五洋建設、東急建設、日本国土開発、ハザマおよび三井三池製作所)の研究活動の一環として、電気化学工業の協力を得て実施したものであり、関係者各位に感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) 亀岡美友・指田健次: New PLS工法の開発、土木学会誌、Vol. 77、pp. 20～22、1992. 9