

論文 PS アンカーの急速施工に適した早強性グラウトの実験的研究

川島宏幸*¹・平田隆祥*²・十河茂幸*³

要旨：大規模な岩盤内空洞を建設する際には、空洞の安定を確保するために適切な支保工を施工する必要がある。空洞規模が大きいためにその作業量が膨大となり、支保工の施工は経済性或全体工程を大きく左右する。そこで、PSアンカーの急速施工を目的として、汎用の材料を用いた早強性グラウトの検討を行った。その結果、従来3日程度養生期間を必要としていたが、早強ボルトランドセメント、ポリカルボン酸系高性能減水剤、アルミニウム粉末を適切に組み合わせることにより、ハンドリングタイムを2時間確保し、かつ15℃の条件下で24時間保証強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ が達成できることを明らかとした。
キーワード：PSアンカー、グラウト、急速施工、早強性、岩盤内空洞、地下発電所

1. はじめに

大規模な岩盤内空洞の利用は、土木構造物としては昭和40年代の揚水式地下発電所に端を発している[1]。空洞を掘削する際には、空洞周辺の岩盤内に、掘削に伴う応力集中や変形が生じ、周辺にゆるみ領域が形成されるとともに応力の再分配が行われる。そのため、過度の応力集中や変形を生じさせない適切な支保工を施工することが求められる。主な支保工としては、グラウンドアンカーに総称されるPSアンカー（プレストレスアンカー）、ケーブルボルトやアーチコンクリート、吹付けコンクリート、ロックボルトなどが上げられるが、これらの施工では、空洞規模が大きいためにその作業量が膨大となり、掘削作業を上回る作業時間が必要となる。したがって、経済性或工期短縮を考える上で、支保工の施工が大きなウエイトを占めることとなる。

地下発電所を例に考えると、空洞の主体をなす側壁岩盤部の支保工の主たるものはPSアンカーである[1]。その施工は、削孔からストランド挿入、グラウト注入、緊張と作業が多岐にわたるために、PSアンカー1本の施工が完了するまでには数日の期間を要し、またその施工本数は膨大な数に上る。したがって、ここではPSアンカー工の工種のうち、注入から緊張までの養生期間に着目し、従来3日程度必要としていた養生期間を1日に短くすることにより、全体工程の短縮を図ることを主眼として、グラウトの早強化を目指した研究を行った。

2. 従来のグラウト技術

JISでは、グラウトは、細かい隙間を充てんするために注入材料として用いるセメントペーストまたはモルタルと定義されている[2]。現在、グラウトは土木や建築工事をはじめ鉱山における工事など、表-1に示すように極めて広範な用途に使用されている。しかし、これらのグラウトは各々の用途別に研究開発され、また、利用されてきたため、統一された規準はなく、土木学会のプレストレスコンクリートやブレパックドコンクリートに定められている規準を準用して、品質管理等を実施しているのが実状である。そのため、PSアンカー用グラウトの品質管理基

* 1 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室、研究員（正会員）

* 2 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室、研究員（正会員）

* 3 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室、室長、工博（正会員）

も明確に定まっていない。そこで、P Sアンカー用グラウトの品質仕様を、土木学会のP Cグラウトの規準に照らして検討を行うこととした。

3. P Sアンカー用グラウトの仕様

P Sアンカーに適した早強性グラウトの品質仕様として、練混ぜから注入完了までの間の、グラウトの良好な作業性、岩盤内温度約15℃の養生条件下での24時間強度の発現性など、これらの条件を満足するグラウトの材料・配合の検討を行った。グラウトの設計強度及び施工条件を考慮して、早強性グラウトの品質目標を表-2に示すように定めた。

4. 実験方法

4.1 使用材料

グラウトの使用材料を表-3に示す。コンシステンシーや強度発現性などへの影響を把握するために、トリアジン系とポリカルボン酸系の2種類の高性能減水剤を用いた。また膨張剤として、膨張の開始時期が異なる遅延型と標準型のアルミニウム粉末（以下、アルミ粉末と呼称）を用いた。

4.2 配合および実験の組合せ

試験に供したグラウトの配合を表-5に示す。シリーズIでは水セメント比と圧縮強度の関係を把握することを目的とした。シリーズIIでは目標のハンドリングタイムが確保できる高性能減水剤の種類と添加量を選定することを目的とした。シリーズIII

表-1 グラウトの主な種類

注入対象		グラウトの種類
地盤・地山	岩盤	岩盤注入用グラウト
	弱い岩・砂礫層	沖積層注入用グラウト
	グラウンドアンカー	グラウンドアンカー用グラウト
コンクリート構造物	プレストレストコンクリート	P Cグラウト
	プレパックドコンクリート	注入モルタル
	プレキャストコンクリート	接合用グラウト
	ひび割れ	補修・補強用グラウト
トンネル・シールド		裏込めグラウト
鉄筋		鉄筋継手グラウト
その他		支承下、機械台座下グラウト

表-2 P Sアンカー用早強性グラウトの品質目標

品質	品質目標	P Cグラウトの土木学会規準(参考)
コンシステンシー	P漏斗 : 18秒以下 J A漏斗 : 30秒以下	施工に適した値 参考: J A漏斗15~30秒 通常の減水剤を用いた時
膨張率	ブリーディング率以上	10%以上
ブリーディング率	3%以下	3%以下
圧縮強度	28 N/mm ² (15℃, 24時間後)	20 N/mm ² (材齢28日)
水セメント比	—	45%以下
ハンドリングタイム	120分	—

表-3 使用材料

材料	記号	種類	比重	性質・成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.13	表-4 参照
混和剤	A1	高性能減水剤	1.13	高縮合トリアジン系化合物
	A2		1.05	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
	AQ1	膨張剤	—	膨張抑制特殊処理アルミニウム微粉末
	AQ2			
水	W	地下水	1.00	—

表-4 セメントの物性

種類	比重	比表面積 (m ² /kg)	凝結時間 (h-min)		化学成分 (%)										鉱物組成 (%)			
			始発	終結	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
早強	3.13	446	2-10	3-20	1.0	20.2	5.2	2.8	65.0	1.4	3.1	0.21	0.54	63.2	10.3	9.0	8.5	

では、シリーズⅠ、Ⅱにおいて水セメント比と高性能減水剤の添加量の標準値を決定した上で、目標の膨張率が得られるアルミ粉末の添加量の選定を目的とした。

4.3 グラウトの製造方法および養生方法

グラウトの製造では、容量30ℓのペーストミキサ(図-1)を使用した。この機種は対流型スクリー羽根で中央に運ばれたグラウトを上方に跳ね上げ、V型鋼板にぶつけてセメント粒子を分散させる

ミキサである。グラウトの練混ぜは、まず高性能減水剤の混入された練混ぜ水を投入したのちに、低速回転(290rpm)しながら粉体材料を上部ホッパーより60秒間で徐々に投入する。つづいて全材料投入後、高速(580rpm)で60秒間練混ぜを行った。供試体の作製は温度 20 ± 2 ℃の実験室内で行った。なお、採取した供試体は、強度試験直前まで型枠に存置し、岩盤内温度を考慮して 15 ± 2 ℃で湿布養生を行った。

4.4 試験項目

試験項目及び方法を表-6に示す。

5. 実験結果および考察

5.1 コンシステンシーの管理方法の検討

一般に、P Cグラウトのコンシステンシーの管理はJ A漏斗を用い、分離低減剤などを使用して粘性を高めた場合はJ₁₄漏斗を用いることが土木学会規準で示されている[4]。一方、P Sアンカーのグラウト施工では、これまでの実績から、コンシステンシーの管理にP漏斗が用いられている場合が多い。その管理上限値は、経験からP漏斗流下時間18秒程度を目安にしている場合が多い[5][6]。このP漏斗は、プレバックドコンクリート用注入モルタルのコンシステンシーの管理用として使用されるもので、P Sアンカーのグラウト用に流用されている。しかし、P漏斗はJ A漏斗より吐出口の径が大きいため、練混ぜ終了時にセメントの固まりが残っている場合などでも、漏斗流下時間に大きく影響することは少ない。そのため、グラウトのコンシステンシーの管理にはJ A漏斗の方が適している

表-5 グラウトの配合および実験の組合せ

シリーズ	No	シリーズの目的	W/C (%)	C×%				備考
				A1	A2	A11	A12	
Ⅰ	1	水セメント比と圧縮強度の関係を把握	45	3.5	—	0.005	—	強度レベルの確認
	2		43					
	3		41					
	4		39					
Ⅱ	5	高性能減水剤の種類, 添加量の選定	41	3.75	—	0.005	—	フレッシュ性状の確認
	6		4.5					
	7		39	1.5	—	0.005		
	8			1.0				
	9			0.6				
	10		35	0.5	—	0.005		
11	0.4	—		0.005				
Ⅲ	12	アルミニウム粉末の添加量の選定	39	—	0.6	—	0	膨張率の確認
	13						0.001	
	14						0.002	
	15						0.004	
	16						0.006	
	17						0.008	

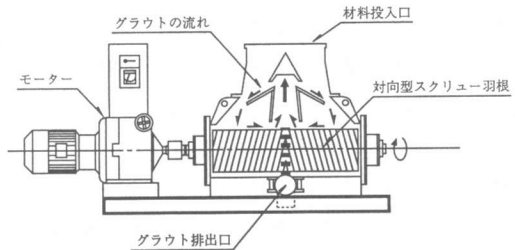


図-1 ペーストミキサ[3]

表-6 試験項目および方法

試験項目	試験方法
流下時間	JSCE-F 531-1994 に準拠 J A漏斗による測定: 0, 45, 90, 120分後
練上り温度	デジタル温度計による測定
ブリーディング率	JSCE-F 532-1994 に準拠
膨張率	同上
圧縮強度	JSCE-G 531-1994 に準拠 φ50×100, 3本の平均値 試験材齢: 18, 24, 48時間, 28日
単位容積質量	供試体質量・寸法より算定

と考えられる。

そこで、最初にP漏斗とJA漏斗の流下時間の関係について検討した。図-2にP漏斗とJA漏斗の流下時間の関係を示す。

本実験で検討した結果、図-2に示すようにP漏斗の経験上の管理値であるP漏斗流下時間18秒は、PCグラウトの土木学会基準でJA漏斗の参考管理上限値であるJA漏斗流下時間30秒とほぼ同等のコンシステンシーであることが明らかとなった。

また、この上限値前後のグラウトのコンシステンシーを目視で観察したところ、液状から塑性状態に変化するポイントであり、グラウトのコンシステンシーの管理値として適切であると考えられたため、本実験では、PSアンカーのグラウトのコンシステンシーの管理にJA漏斗を用いることとし、その管理値は30秒とすることとした。

5.2 グラウトのレオロジー定数

既往の文献[7][8]により、セメントペーストのJA漏斗流下時間と、二重円筒型回転粘度計のレオロジー定数の関係は、式(1)、式(2)と算出できる。

$$\eta = 0.015X - 0.089 \quad (1)$$

$$\tau = 0.764X - 6.069 \quad (2)$$

ここで、 η ：塑性粘度(Pa·s)、 τ ：降伏値(Pa)、 X ：JA漏斗流下時間(sec)

これによると、土木学会におけるPCグラウトのコンシステンシーの上限管理値であるJA漏斗流下時間30秒は、塑性粘度0.4Pa·s、降伏値17Pa程度に相当すると考えられる。

5.3 水セメント比の違いによる圧縮強度への影響（シリーズI）

配合No.1~4の結果より、セメント水比と圧縮強度の関係を図-3に示す。

配合No.1~4の圧縮強度は、水セメント比の減少に伴って増加した。品質目標である24時間後の圧縮強度が28N/mm²以上となるのは、水セメント比43%であった。しかし、配合No.1~4は、アルミ粉末の反応が遅くほとんど膨張が生じない結果であり、適切な膨張率が得られた場合はこれより低い値になると推察される。これまでの実績より1%程度の膨張に対して圧縮強度は2割程度低下する[9]ため、品質目標を満足する水セメント比を39%程度と判断した。

5.4 高性能減水剤の種類・添加率のコンシステンシーへの影響（シリーズII）

配合No.5~11の結果より、高性能減水剤の種類、添加率とJA漏斗流下時間の関係を図-4、図-5に示す。

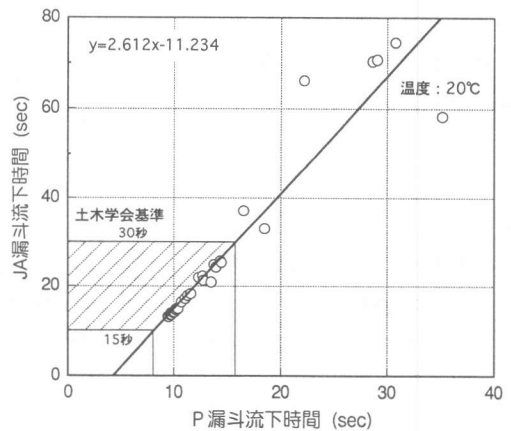


図-2 PとJA漏斗の流下時間の関係

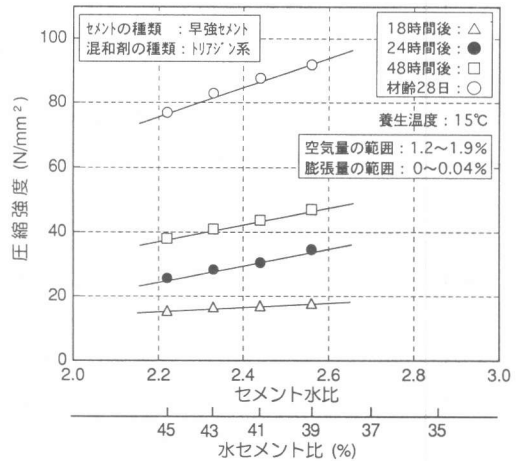


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係

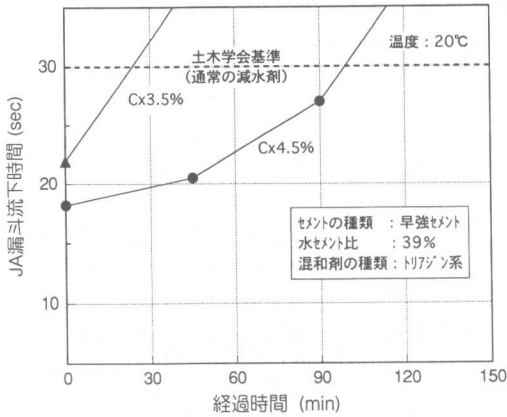


図-4 トリアジン系高性能減水剤を使用した場合の J A 漏斗流下時間の経時変化

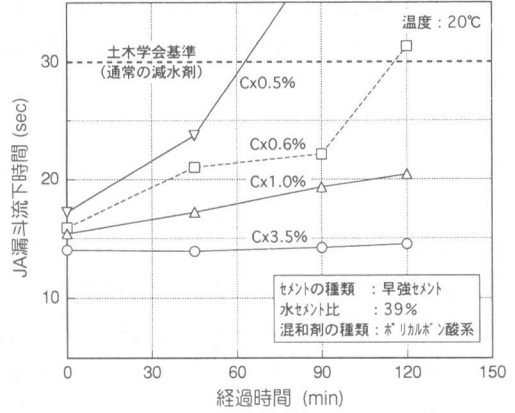


図-5 ポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した場合の J A 漏斗流下時間の経時変化

図-4に示すようにトリアジン系の高性能減水剤を用いた場合、グラウトのハンドリングタイムを120分以上とするためには、混和剤の添加率をこの混和剤の標準添加量の上限值である4.5%よりさらに増加させる必要があり、初期強度の発現性や経済性の面で好ましくない。

一方、図-5に示すようにポリカルボン酸系の高性能減水剤を用いた場合、グラウトのハンドリングタイムを120分確保できる混和剤添加量は0.6%程度となった。従って、高性能減水剤にはポリカルボン酸系のものを選定し、実験結果から計算で20℃の条件下では添加量は0.65%を標準とすることが望ましいと考えられる。

5.5 膨張剤の添加率の影響 (シリーズⅢ)

配合No.12~17の結果より、膨張剤の添加率と膨張率の関係を図-6に、膨張率と圧縮強度の関係を図-7に示す。

グラウトの膨張率は図-6に示すように、膨張剤の添加率の増加に伴って増加した。また、配合No.12~17のブリーディング率は3時間後に0.2%程度であり、膨張率の品質目標はブリーディング率以上としているため、膨張率は1.0%程度であれば十分安全であると判断した。一方、グラウトの膨張率と圧縮強度の関係は、図-7に示すように膨張率の増加に伴って圧縮強度は減少する傾向であった。品質

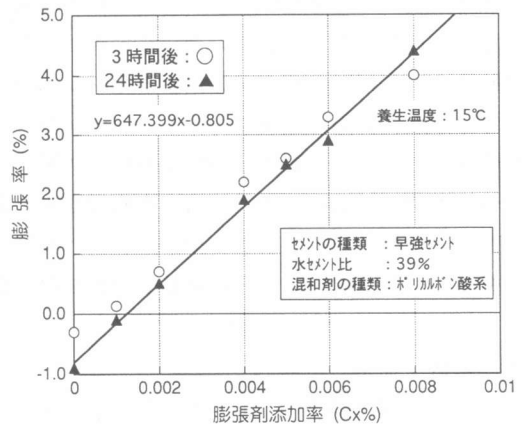


図-6 膨張剤添加率と膨張率の関係

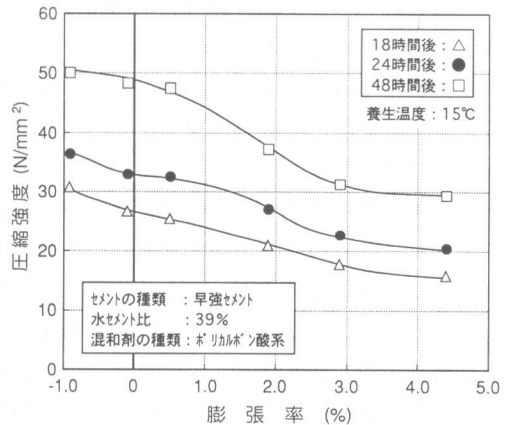


図-7 膨張率と圧縮強度の関係

目標である24時間後の圧縮強度 28N/mm^2 を満足するためには、膨張率を2.0%程度以下に設定する必要がある。以上の結果より、膨張剤の添加率は、0.003%が適切と考えられる。

6. まとめ

PSアンカーの急速施工に適した早強性グラウトの配合選定を目的とし、グラウトの材料・配合の検討を行った。

その結果、グラウトのコンシステンシーの管理基準として、今まで明確でなかった経験上の上限管理値であるP漏斗流下時間18秒は、PCグラウトの土木学会基準でJA漏斗の参考管理上限値であるJA漏斗流下時間30秒とほぼ同等であることが明らかとなった。また、グラウトの品質目標として、ハンドリングタイムが2時間確保できる作業性と、岩盤内温度約 15°C の養生条件下での24時間強度の発現性が良好で、充てん性の良い早強性グラウトの推奨配合は、表-7に示す結果となった。

なお、早強性グラウト中のアルミ粉末は、アルカリ水と接触することにより水素ガスを発生する化学反応であるため、その反応は温度やアルカリ度に対する依存性が高い。したがって、グラウトの練上がり温度や、環境温度の影響により、膨張の開始や完了時間が変化したり、同一膨張量を得るのに必要なアルミ粉末の添加率が変化するため、グラウト時期、材料の変動、ミキサの練混ぜ能力などを考慮しなければならない。

表-7 推奨配合と品質

配合および品質		品質仕様
セメントの種類		早強ボルト
水セメント比		39%
混和剤 添加率 (%)	高性能減水剤 ¹⁾	0.65%
	膨張剤	0.003%
ハンドリングタイム		120分
ブリーディング率		0.2%
膨張率		1.0%
圧縮強度 (N/mm^2)	18時間後	21以上
	24時間後	28以上
	48時間後	38以上
	材齢28日	61以上

1) ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体

* 製造条件：ベーストミキサ(容量30ℓ) 前練り60sec, 本練り60sec

* 養生温度： $15 \pm 2^\circ\text{C}$

参考文献

- [1] 土木学会：第四版 土木工学ハンドブック，pp.1211-1221，1989.11
- [2] 日本規格協会：JISハンドブック 土木，pp.30，1995.4
- [3] 十河茂幸，玉田信二：材料分離のない高品質PCグラウトに関する研究，土木学会論文集，No.414，V-12，pp.145-153，1990.2
- [4] 土木学会：平成8年度制定 コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.290-324，1996.3
- [5] 土質工学会：グラウンドアンカー設計・施工例，pp.140-141，1991.11
- [6] 国土開発技術研究センター：グラウンドアンカー設計・施工一引書（案）pp.7-7-7-11，1992.3
- [7] 村田二郎，鈴木一雄：傾斜管試験法によるグラウトの粘度測定，土木学会 フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集，pp.1-8，1983.3
- [8] 石橋忠良，中原繁則，西山佳伸：PCグラウトの配合および注入方法に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.27，No.6，pp.58-69，1985.11
- [9] 西崎丈能，岡井大八，平田隆祥，鎌田文男：分離低減剤によるPCグラウトの加圧ブリーディング抑制効果，土木学会第46回年次学術講演会概要集，V-318，pp.652-653，1991.9
- [10] 日本コンクリート工学協会：充填材の品質評価研究委員会 中間報告書，1992.12