

SEC 吹付けコンクリートの配合設計方法に関する研究

奥村 忠彦	高崎 英邦
	(土木技術部)
石井 卓	宮崎 晃
(土木技術部)	(土木技術部)
小原 由幸	松本 茂美
(土木技術部)	(四国支店)

§ 1. まえがき

近年、鉄道および道路トンネル工事、地下発電所およびエネルギー貯蔵施設の地下大空洞掘削工事などに NATM (New Austrian Tunneling Method) が適用されることが多くなってきた。NATM では吹付けコンクリートを支保部材の一部として使うために、品質が良く、信頼性の高い吹付けコンクリートが必要になってきた。

吹付けコンクリートは、乾式および湿式工法の2工法で従来は施工されていたが、上述したニーズに対応するために種々の改善¹⁾がなされている。このような時期にコンクリートの新しい製造方法として SEC (Sand Enveloped with Cement) 工法²⁾が開発され、その特長を活かして SEC 吹付けコンクリート工法が東京大学樋口教授の指導を得て、日本鉄道建設公団とリブコンエンジニアリング³⁾によって開発された。この工法は、SEC 工法で練り混ぜたモルタルと骨材(急結剤も混合)を別々に圧送し、ノズル直前で合流させて吹付けるもので、はね返り率および粉じん量が少なく、強度が大きいという特長を有し³⁾、NATM の吹付けコンクリートに適した工法として注目をあびている。

SEC 吹付けコンクリートは、すでに2~3³⁾⁴⁾の施工実績があるが、いずれもレールマウント方式の吹付け機械で、配合もほぼ同一であって、SEC 吹付けコンクリート工法独特のモルタルと骨材の比、骨材側の細・粗骨材比などが吹付けコンクリートの性質に及ぼす影響については明らかにされていない。したがって、本工法の合理的な配合設計方法はなく、試的に配合を定めているのが現状である。

1981年に四国横断自動車道の明神トンネルが NATM で施工されることになり、タイヤマウント方式の SEC 吹付けコンクリートが採用されたので、配合設計を行わねばならなかった。

そこで、本研究では吹付けコンクリートも通常のコンクリートと同様に室内で配合設計もできるようになるこ

とを目的とし、その第一段階として SEC 吹付けコンクリートに関する室内および現場施工実験を行なった結果に基づいて、SEC 吹付けコンクリートの合理的な配合設計方法について検討を行なった。

§ 2. 既往の研究結果

吹付けコンクリートは、(1)型わくを用いずにコンクリートを施工できる、(2)斜面、張り出し部などにコンクリートが施工しやすい、などの特長を有するが、(1)品質が吹付け工法に左右される、(2)品質が作業を行なうノズルマンの技術に左右される、などの問題点がある。

(2)の問題点については、吹付け作業にロボットを導入することによって解決が図られており、(1)の問題点については § 1. にも示したように、品質の信頼性が高い吹付け工法を開発することによって解決を図ろうとされている。

従来の乾式および湿式吹付け工法、最近開発された SEC 吹付け工法の特徴および施工実績を比較すると表一1、2のようである。

乾式工法は、簡便に施工できる点に特長があるが、単位水量が管理しにくい、はね返り率および粉じん量が多く施工速度が遅いという問題点を有している。

湿式工法は、コンクリートの管理が確実にできるという特長があるが、ポンプ圧送性の面から単位セメント量が大きくなり、表一2に示す範囲では粉じん量が多く、施工速度が乾式工法程度であるという問題点を有している。

SEC 吹付け工法は、これらの中間的な工法として位置づけられ、表一2に示すように、強度がいくぶん大きく、はね返り率および粉じん量が少なく、施工速度が速いという特長を有し、3工法の中では最も優れている。しかし、吹付け機械が複雑であるという問題点を有している。

吹付け 工法	工法の概要	材 料 の 流 れ	特 徴	材料・配合 の 制 約	はね返り率	粉じん量	施工速度
乾 式 工 法	水を除いた材料をミキサで混合したものを圧送し、圧送の途中、またはノズル部で別系統によって水を加えて吹付ける方法。		1) 吹付け機が簡便である。 2) 長距離に圧送できる。 3) 単位水量の管理がむづかしい。 4) 品質がばらつきやすい。	◎	△	△	△
SEC 工 法	モルタルをモルタルポンプで圧送し、別系統で細・粗骨材と急結剤を混合したものを圧送して、圧送の途中で合流させて吹付ける方法。		1) 品質のばらつきが少ない。 2) コンクリートのコンシステンシーが容易に変えられるので、湧水に対処しやすい。 3) 施工速度が速いので、大量吹付けに適している。 4) 吹付け装置が複雑である。	○ *モルタルの圧送性に注意を要する。	◎	◎	◎
湿 式 工 法	急結剤を除く全材料をミキサで練り混ぜたコンクリートを圧送し、ノズル部で別系統によって急結剤を加えて吹付ける方法。		1) コンクリートの管理がしやすい。 2) 品質のばらつきが少ない。 3) 長距離に圧送しにくい。	△ *コンクリートの圧送性に注意を要する。	◎	◎	○

注) ◎：優良，○：良，△：普通

表一 吹付けコンクリート工法の比較

吹付け 工 法	配 合										圧 縮 強 度 σ_{28} (kg/cm ²)	はね返 り 率 (%)	粉じん 量 (mg/m ³)	施 工 速 度 (m ² /hr)	備 考
	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					スラン プ (cm)						
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	急結剤 Q		減水剤 AD					
乾 式 工 法	15	45.0	61	161	360	1130	758	14.4	—	—	202	32	—	—	Fトンネル施工値 ³⁾
	10	48.0	60	169	352	1138	775	22.2	—	—	249	35	—	—	Eトンネル施工値
	15	45.0	70	144	360	1140	573	18.0	—	—	288	23	23	3.8	Tトンネル施工値
	10	45.0	60	162	360	1119	749	18.0	—	—	259	25	24	—	Sトンネル施工値
	10	45.0	60	158	350	1104	750	10.5	—	—	277	20	20	4.1	Iトンネル実験値 ¹⁰⁾
	12	45.6	62.2	159	356	1126	721	16.6	—	—	255	27	22.3	3.95	平 均 値
SEC 工 法	15	49.4	69	173	350	1273	580	14.0	—	—	240	14	3.3	7~8	SKトンネル施工値 ⁶⁾
	15	49.5	69	173	350	1273	580	14.0	2.1	—	308	18	2.3	—	Nトンネル施工値 ⁴⁾
	10	45.0	60	144	320	1178	800	9.6	2.6	—	218	15	13	—	Iトンネル実験値 ¹⁰⁾
	10	44.0	60	154	350	1144	777	10.5	2.8	—	288	15	22	6.2	※
	10	43.0	60	163	380	1110	754	11.4	3.0	—	—	10	13	—	※
	12	46.2	63.6	161	350	1196	698	11.9	2.63	—	264	14.4	10.7	6.85	平 均 値
湿 式 工 法	13	55.0	65	205	380	1083	625	11.4	—	8	178	—	—	6~9	NKトンネル施工値 ⁷⁾
	15	52.0	65	195	380	1247	671	11.4	1.5	10±1	240	8~10	—	—	Oトンネル施工値 ⁸⁾
	15	45.0	70	168	373	1243	550	0	0.93	6~12	—	—	—	3~4	※ 実験値 ⁹⁾
	15	41.0	71	177	426	1188	509	12.8	—	9	234	21	—	—	OYトンネル実験値
	10	61.0	55	231	380	926	772	11.4	2.3	16	330	15	28	2.7	Iトンネル実験値 ¹⁰⁾
	13.6	50.8	65.2	195.2	388	1137	625	11.8	1.57	13	246	15	28	4.56	平 均 値

注 1) 配合：実験値は実施配合，施工値は示方配合。

2) 圧縮強度，はね返り率，粉じん量，吐出能力の値は測定例であり，実績の平均ではない。

表一 吹付けコンクリート配合例

また、SEC 吹付け工法の配合は、表—2に示すように本工事では1種類の配合しか用いられていない。

§ 3. 室内実験の結果

3.1 実験概要

SEC 吹付けコンクリート工法は、SEC 工法で練り混ぜたモルタル (SEC モルタルと呼ぶ) と骨材 (急結剤混合) を別々に圧送するので、配合設計を行なう場合、まずそれぞれを独立に配合設計し、その後、合流した後のコンクリートとしての配合設計を行なうのが合理的である。

そこで、本室内実験では吹付け施工実験の前段階として、(1) SEC モルタルの配合選定、(2) 細・粗骨材を混合した場合の空げき率、(3) コンクリートとしての物性、(4) 急結剤の効果、について実験を行なって、モルタル、骨材、コンクリートの性質について検討を行なった。

3.2 使用材料

後述する明神トンネルと同様の材料を用いた。

セメントは、日本セメント株式会社製の普通ポルトランドセメントを用いた。JIS R 5210 を満足していた。

細骨材は、仁淀川河口沖の天然砂を用いた。試験成績は比重 2.65、吸水率 0.82%、粗粒率 2.99 で、吹付けコンクリート用として適した細骨材である。

粗骨材も同じ産地の天然砂利を用いた。試験成績は比重 2.64、吸水率 0.78% で、10~5 mm の粒度とした。

減水剤は、SEC モルタル用に開発された日曹マスタービルダーズ特製高性能減水剤 S を用いた。使用量は、実験によってセメント量 $C \times 0.8\%$ と一定に定めた。

急結剤は使用実績が多く、タイプの異なるものを選定し 4 種用いた。すなわち、日曹マスタービルダーズ特製の P (主成分：特殊アルミン酸塩)、電気化学工業株式製の N (主成分：急結性セメント鉱物)、日本シーカ株式製の D (主成分炭酸ソーダおよびアルミン酸塩) および液体の L の 4 種である。

練り混ぜ水は東京都水道水とした。

3.3 SEC モルタルの配合選定

1) 練り混ぜ方法

モルタルの練り混ぜは、練り混ぜ容量 50 l のホバート型ミキサーを用いて、図—1に示すサイクルタイムで行なった。1 バッチは 20 l とした。

2) 試験方法

モルタルを練り混ぜ後、直ちに、(1) モルタル温度およびコンシステンシー試験、(2) 圧縮強度用供試体の作製を行なった。

モルタルのコンシステンシーは、(1) J ロートによる試験 (土木学会標準 H-III-2 による)、(2) 円筒貫入試験の 2 種によって試験した。

円筒貫入試験は、図—2に示すように直径 38 mm、重さ 350 g の塩ビ製貫入棒をモルタル中に貫入させて、その貫入深さ (円筒貫入値と呼ぶ) によって評価するものである。この試験方法は、リブコンエン지니어リングが考案したものであって、吹付けコンクリートに適したモルタルの円筒貫入値は 10~12.5 cm としている。

モルタルの圧縮強度は、主として直径 5 cm、高さ 10 cm の供試体で試験した。

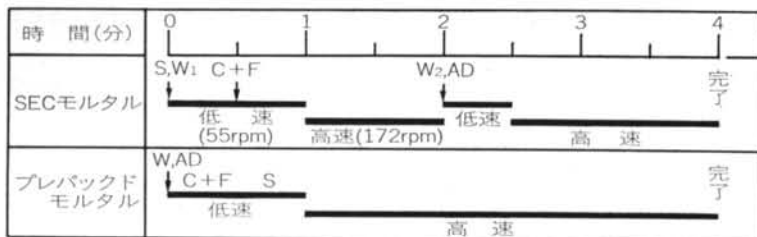
3) 水セメント比が SEC モルタルの性質に及ぼす影響

小断面のトンネルで予備実験を行なった結果、SEC モルタルの円筒貫入値が 11~13 cm で、はね返り率 10~15% と良好な結果を得たので円筒貫入値の目標を標準範囲の上限に近い 12 ± 0.5 cm として室内実験を行なった。

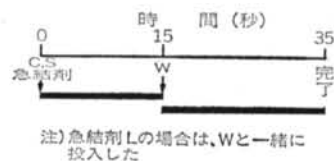
コンシステンシーを一定とした場合の水セメント比 W/C と砂セメント比 S/C の関係は、実用的な範囲では良好な相関が認められ、次式で回帰できることが示された。

$$S/C = 0.112 W/C - 2.90 \quad (r = 0.923) \quad \dots\dots(1)$$

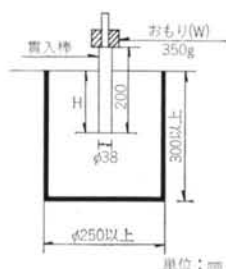
プレパックドコンクリート用モルタル (プレパックドモルタルと呼ぶ) のコンシステンシーの標準的な試験方法である J ロートの流下時間と円筒貫入値との関係は図—3に示すようであって、良好な相関が認められた。円



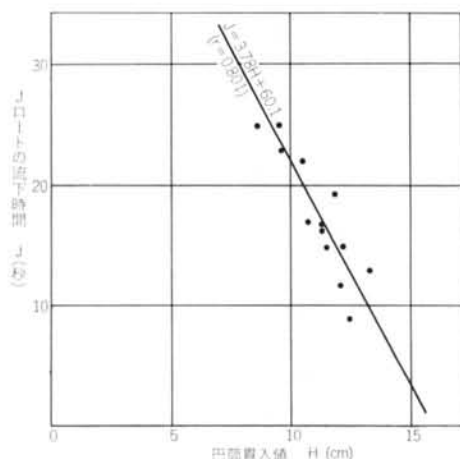
図—1 モルタルの練り混ぜ時間



図—2 円筒貫入試験器



図一3 円筒貫入値とJロートの流下時間との関係



図一4 SEC モルタルとプレパックドモルタルの比較
筒貫入値 12 cm は、J ロートの流下時間15秒程度に相当し、プレパックドモルタルの標準範囲 10 ± 2 秒より少し硬目の方が SEC 吹付けコンクリートに適していることが示された。

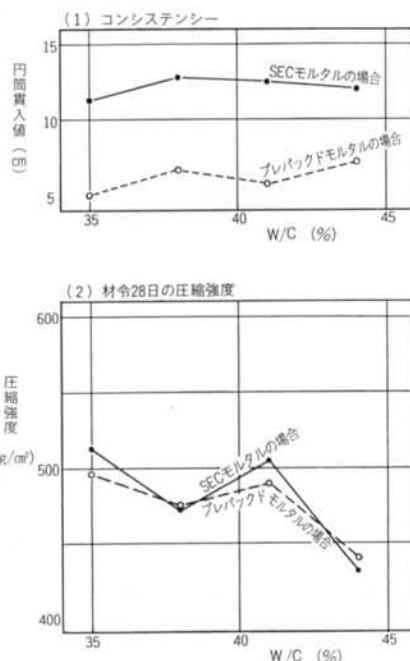
円筒貫入値を 12 ± 0.5 cm とし、W/C を 35~44% に変えた場合、材令 28 日のモルタル圧縮強度 (σ_m) と C/W の間に良好な相関がみられ、次式で回帰できることが示された。

$$\sigma_m = 220 C/W - 44.9 \quad (r = 0.970) \quad \dots\dots(2)$$

4) SEC 工法の効果

SEC 工法は、一定の表面水をもった砂とセメントをかくはんして砂の表面に富配合のセメントペーストの殻を造った後（造殻と呼ぶ）に、残りの水を加えてモルタルを製造する工法である。この SEC モルタルと同じ配合で、図一1に示す方法で練り混ぜたプレパックドモルタルの試験をして、SEC 工法の効果について検討を行った。

コンシステンシーの試験結果は、図一4に示すように SEC モルタルの円筒貫入値 12 ± 0.5 cm に対して、プレ



図一5 2次側骨材・粗骨材比と空隙率の関係

パックドモルタルは約 1/2 であって、SEC モルタルのコンシステンシーが優れていることが確かめられた¹¹⁾。

材令 28 日の圧縮強度（直径 10 cm、高さ 20 cm 供試体使用）は図一4に示すように、SEC モルタルとプレパックドモルタルの間に大差がなかった。したがって、SEC 工法を用いることによって、コンシステンシーが著しく改善されることが示された。

3.4 細・粗骨材を混合した場合の空隙率

2次側骨材の細・粗骨材比 $G/S+G$ と空隙率の関係を検討するために、 $G/S+G$ を変えて単位体積重量試験を行なった。

その試験結果は図一5に示すようであって、 $G/S+G$ が 0.62 の場合に空隙率が最小となった。細骨材と粗骨材を適切な割合で混合すると (binary mixtures¹²⁾) 空隙率が小さくなることが示された。 $G/S+G$ を 0.62 より大きくして粗骨材量を多くすると空隙率が急激に増大するが、 $G/S+G$ を 0.62 より小さくして粗骨材量を少なくしても、空隙率はあまり大きくならなかった。

したがって、モルタル量を少なくして経済的な配合にするためには、2次側骨材の空隙率が小さい範囲に $G/S+G$ を設定するのがよく、実用上は 0.4~0.6 程度にするのがよいものと考えられる。

3.5 コンクリートとしての物性

要 因	水 準
SECモルタルのW/C (%)	2 38, 44
1次側/2次側=x	3 0.7, 0.9, 1.1
2次側のG/S+G	3 0.42, 0.52, 0.62

表—3 コンクリート実験の要因と水準

次に、室内実験で SEC 吹付けコンクリートの物性を検討するために、急結剤を用いないで SEC モルタルと骨材をミキサで練り混ぜてコンクリートを製造して、そのコンシステンシーおよび圧縮強度を試験した。

1) 要因と水準

要因は、SEC 吹付けコンクリート 固有のものを 選定し、表—3 のようにした。G/S+G の水準は 3.4 を参考にし、1 次側/2 次側=x(重量比) の水準は既往の施工実績⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾を包含するように定めた。

2) 練り混ぜ方法

SEC モルタルは 図—1 に示す方法で練り混ぜた。また、現場の状態を想定して、予め表面水を 4 %とした細骨材と表乾状態の粗骨材を混合しておき、これと SEC モルタルをホバート型ミキサで 55 rpm (低速) の回転数で 90 秒間練り混ぜてコンクリートを製造した。

3) 実験結果

コンクリートのコンシステンシーはスランブ試験によって評価した。

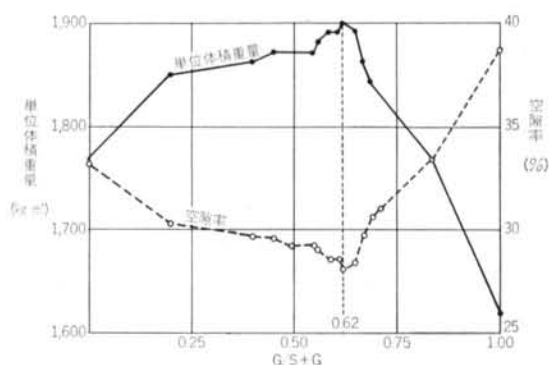
スランブ試験結果は 図—6 に示すようであり、G/S+G の影響はあまりなく、x およびモルタルの W/C の影響が大きく、分散分析の結果危険率 1 %で有意であった。すなわち、x が小さい方がコンクリートが硬くなり、W/C が大きい方がコンクリートが硬い傾向が示された。

材令 28 日の圧縮強度試験結果は 図—7 に示すようであって、x の影響が少なく、G/S+G およびモルタルの W/C の影響の方が大きかった。コンクリートのコンシステンシーが相違しても十分に締固めれば、圧縮強度は大差ないものと考えられる。

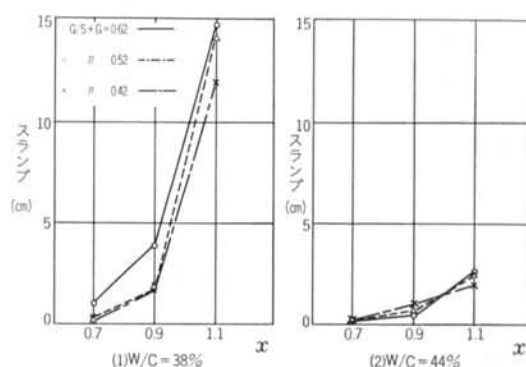
しかし、実際の吹付けコンクリートは圧縮空気によって地山に衝突させるのみなので、室内実験とは締固め方法が異なるため、圧縮強度は上述した傾向と異なるものと推察される。SEC モルタルと骨材を合流させて吹付ける直前のコンクリートのコンシステンシーは、室内実験によって推測することができると考えられる。

3.6 急結剤の効果

吹付けコンクリートの重要な品質である初期強度に急結剤が及ぼす影響について検討するために、急結剤の種類および混入率を変えて、モルタルの凝結硬化速度試験



図—6 1 次側/2 次側=x とスランブとの関係



図—7 1 次側/2 次側=x とコンクリート圧縮強度との関係

要 因	水 準
急結剤の種類	4 Q, N, D, L
混入率 Q/C (%)	3 3, 4, 5
SECモルタルのW/C (%)	2 38, 44

表—4 凝結硬化速度試験の要因と水準

を行なった。

1) 要因と水準

要因は急結剤の種類、混入率、W/C とし、表—4 に示す水準とした。

2) 試験方法

モルタルの練り混ぜは 10 l ポリバケツを用いて、ハンドミキサ (回転数 1,000 rpm, かくはん翼直径 15 cm) で 図—8 に示すサイクルタイムで行なった。1 バッチは 7 l とした。

練り混ぜ後、直ちに 20×20×h 10 cm の容器にモルタルを充填し、振動台を用いて締固め、ASTM C 403 に準じてプロクター貫入抵抗試験を行なった。

3) 実験結果

プロクター貫入抵抗試験結果は、 図—9 に示すようであった。急結剤混入率 Q/C が 3～5 % の範囲では急結剤 Q および D の場合は Q/C の影響が少なく、N および

Lの場合は Q/C の影響が大きかった。

本実験で用いた4種の急結剤の中では、急結剤Dを用いた場合が凝結硬化速度が最も速く、2～5分間で100 kg/cm²に達した。したがって、本実験の範囲では急結剤Dの効果が最も良いものと考えられる。

§ 4. 現場施工実験の結果

4.1 実験概要

SEC モルタルの配合、骨材の空隙率、急結剤の効果などを別々に試験したので、次に、それらを組合せたSEC 吹付けコンクリートとしての物性および施工性について検討するために、明神トンネルの坑内で現場施工実験を行なった。

SEC 吹付けコンクリートの品質と材料および配合との関係は図-10に示す連関図のようであるので、本実験では品質に及ぼす影響が大きいと考えられる次の3要因を主として変化させた。

- (1)モルタルの配合 S/C (W/C と1対1に対応)
- (2)1次側/2次側 = x (重量比)
- (3)2次側の細・粗骨材比 $G/S+G$

また、品質としては、

- (1)SEC モルタルの物性
- (2)SEC 吹付けコンクリートの圧縮強度
- (3)はね返り率
- (4)粉じん量

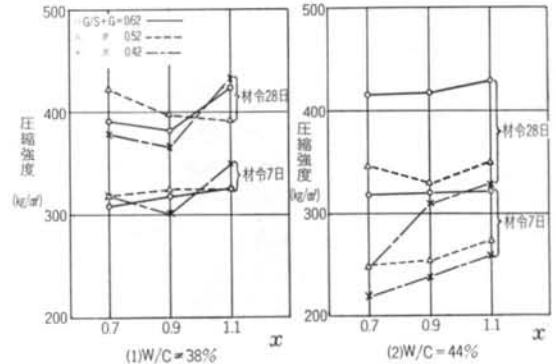


図-8 急結剤混入モルタルの練りませ時間

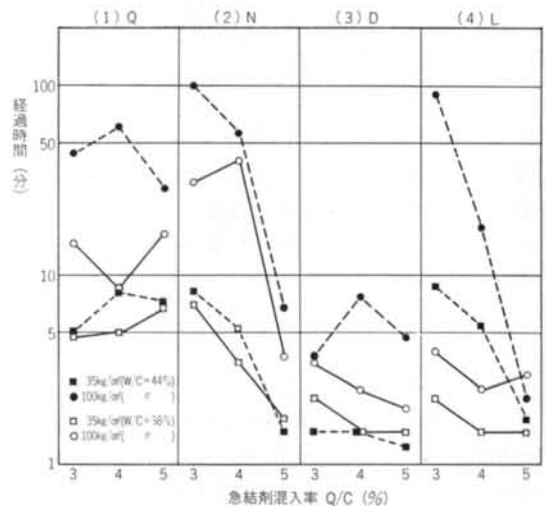


図-9 ブロクター貫入抵抗値と急結剤混入率の関係

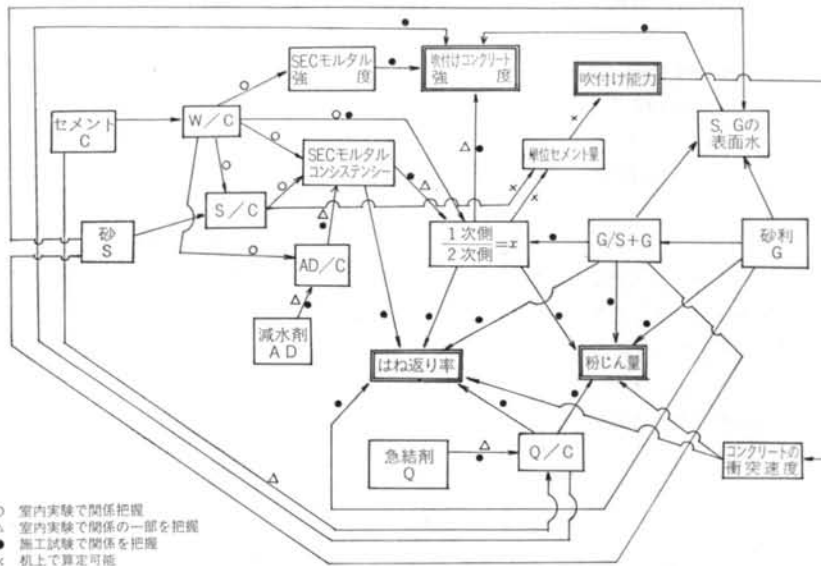


図-10 吹付けコンクリートの材料、配合および品質の連関図



wet 側 (1次側)



dry 側 (2次側)

写真-1 SEC 吹付け機械

(5)SEC 吹付けコンクリートの凝結硬化速度に着目して実験を行なった。

4.2 吹付けコンクリートの施工法

明神トンネルは四国横断自動車道(高松市～須崎市)の大豊～南国間に位置する延長3,727mの2車線道路トンネルである。トンネルの掘削は発破工法で行ない、上半ショートベンチ工法で施工した。

吹付けコンクリートにはトンネル掘削と同じタイマウント方式のSEC吹付けコンクリートが採用され、写真-1に示すような吹付け機械、および写真-2に示すようなブーム揺動方式の吹付けロボットを用いて吹付けた。

吹付け面には、1m間隔にU字型支保工および金網筋(150×150mm間隔、φ6mm)が設置されている。

吹付け作業は上半と下半に分けて行なった。また、吹付け作業中は約300m³/minの送風をして換気した。

4.3 使用材料

セメントは、日本セメント㈱高知工場製の普通ポルトランドセメントを用いたが、埼玉工場製のものと試験成績は大差なく、JIS R 5210を満足していた。



写真-2 吹付けロボット

細骨材は仁淀川河口沖の天然砂で、その試験成績は比重2.64、吸水率1.01%、粗粒率3.12であった。

粗骨材には仁淀川河口沖の天然砂利と碎石を用いた。天然砂利の試験成績は比重2.63、吸水率1.12%、粗粒率5.32(10mm以下)、実積率63.2%であった。碎石は比重2.60、吸水率1.59%、粗粒率6.21(15mm以下)、実積率68.1%であった。

減水剤は高性能減水剤SをC×0.3%使用した。

急結剤は3.6の結果から、急結効果の大きい日本シーカ㈱製Dを用いた。

練りまぜ水は河川水とした。

4.4 試験方法

1)試験の流れ

実際のトンネル工事中に本施工実験を行なった。その試験の流れを図-11に示す。

2)SECモルタルの品質管理試験方法

1次側の連続モルタルミキサで練りまぜられたSECモルタルを採取して、温度、円筒貫入値、圧縮強度(直径5cm、高さ10cm供試体)の試験を行なった。

3)SEC吹付けコンクリートの圧縮強度試験方法

トンネル坑内の側壁に40×70×h12cmの木製パネルを写真-3のように立て、これに吹付けた。所要の期間養生した後、直径5cmのコアボーリングを行ない、高さ10cm程度に整形し、両面をキャッピングして圧縮強度試験を行なった。

4)はね返り率試験方法

吹付け開始後5分程度経過し、吹付け作業が安定した状態で、吹付けノズル直下にビニールシートを敷き、約1分間はね返った材料を採取しその重量を測定した。上半の肩部を吹付け中に試験した。

実際に吹付けた量を算出し、はね返った量との比をとってはね返り率を求めた。

5)粉じん量試験方法

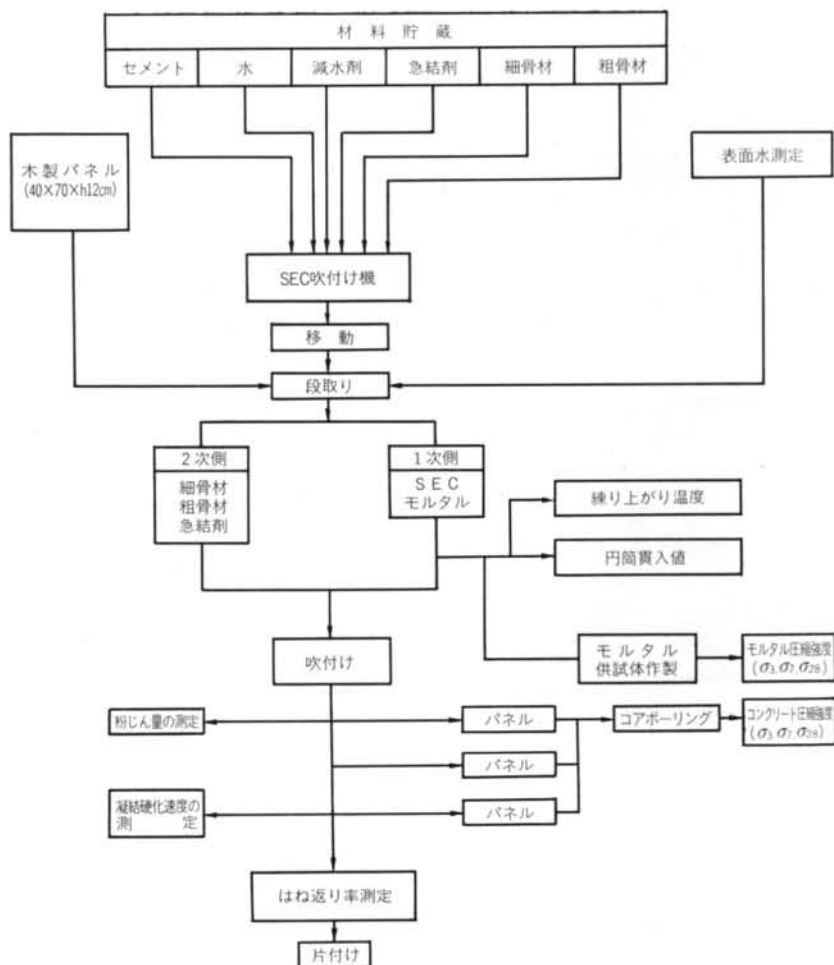


図-11 現場施工実験の試験の流れ



写真-3 圧縮強度試験用パネルへの吹付け

粉じん量は簡易測定法の光散乱濃度を求めるデジタル粉じん計で試験した。

実験の初期にローボリウムサンプラによって絶対的な質量濃度 $C(\text{mg}/\text{m}^3)$ とデジタルカウント数 $D(\text{cpm})$ の関係を求め、次式によって換算した。

$$C = 0.515 D^{0.657} \quad (r = 0.987) \quad \dots\dots(3)$$

粉じん量の試験は、はね返り率試験と同時にを行った。

6) SEC 吹付けコンクリートの凝結硬化速度試験

3.6で行なったモルタルの凝結硬化速度は地山に吹付けるコンクリートと異なると考えられたので、吹付けコンクリートの凝結硬化速度を手持式プロクター貫入抵抗試験器を用いて試験した。

4.5 SEC モルタルの品質

1) コンシステンシー

SEC モルタルのコンシステンシーは、円筒貫入値 $12 \pm 0.5 \text{ cm}$ と設定して室内実験を行なったが、その後、現場で予備実験を行なった結果、図-12に示すようにはね返り率を小さくするには $10 \sim 11 \text{ cm}$ 程度にした方がよいことが明らかになった。そこで、本現場施工実験では 10

±0.5 cm に設定した。

試験の時期が昭和57年3月で、早朝から夜にかけて試験したのでモルタル温度が8.5～20℃ とばらついたが、SEC モルタルの円筒貫入値の全平均は10.5cm であり、目標とする10±0.5 cm の範囲にほとんど入っていた。

コンシステンシーを一定にした場合の SEC モルタルの W/C と S/C の関係は図-13 に示すように、室内実験の円筒貫入値10.5 cm の場合に比べて、同一 S/C で現場施工実験の W/C が1.5% 程度大きかった。これは現場で使用した連続モルタルミキサが、室内で用いたホバート型ミキサより練りまぜ性能が劣ることを示している。

2) 圧縮強度

SEC モルタルの圧縮強度は図-14 に示すようであって、セメント水比 C/W とほぼ相関が認められた。

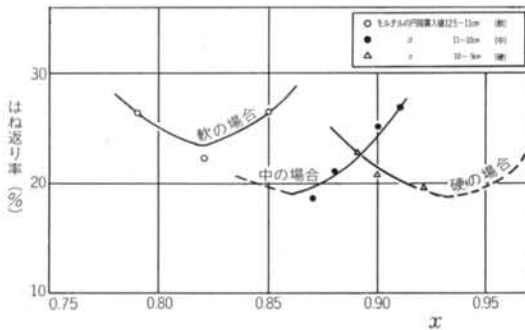


図-12 はね返り率と x およびモルタルのコンシステンシーとの関係

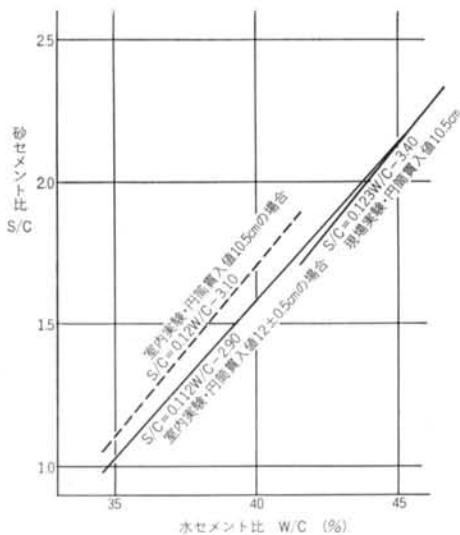


図-13 コンシステンシーを一定とした場合の W/C と S/C の関係

しかし、室内実験結果に比べてばらつきが大きく、かつ同一 C/W に対して現場施工実験の圧縮強度の方が20% 程度大きいことが示された。この原因は未解明であるが、主な原因として次のようなことが考えられる。

- (1) 同一 W/C で S/C が0.2 程度小さいので、モルタルの単位セメント量が多い。
- (2) モルタル温度が低く、初期養生温度が低い。

4.6 SEC 吹付けコンクリートの圧縮強度

1) SEC モルタルと SEC 吹付けコンクリートの関係

SEC 吹付けコンクリートの圧縮強度とコンクリートとしての C/W との間には良好な相関が認められなかった。しかし、SEC モルタルの圧縮強度と吹付けコンクリートの圧縮強度との関係は図-15 に示すように、粗骨材の種類にかかわらず良好な相関が認められ、次式で回帰できることが示された。

$$\sigma_c = 0.302 \sigma_m + 96.5 \quad (r=0.846) \quad \dots\dots(4)$$

したがって、SEC 吹付けコンクリートの圧縮強度の管理および配合設計は、SEC モルタルに支配されるものと考えられる。

2) x と SEC 吹付けコンクリートの圧縮強度との関係

1 次側と2 次側の重量比 x と、材令28 日のコンクリート圧縮強度との関係は図-16 に示すようであった。

圧縮強度は、x, G/S+G, モルタルの配合、粗骨材の種類によって異なるが、ほとんどが 250～300 kg/cm² の範囲であって、§2. に示した既往の実績と比較して妥



図-14 モルタルのセメント水比と圧縮強度の関係

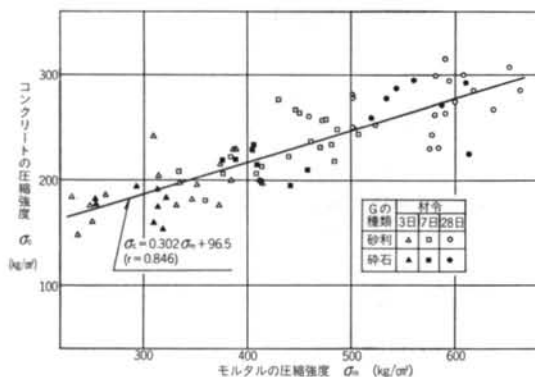


図-15 モルタルの圧縮強度とコンクリートの圧縮強度の関係

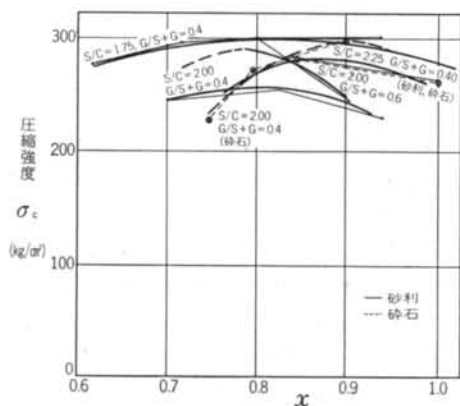


図-16 xとコンクリートの圧縮強度の関係

当な結果であると考えられる。本施工実験における単位セメント量は $282 \sim 361 \text{ kg/m}^3$ であり、単位セメント量と圧縮強度には相関はみられなかった。

ばらつきはあるが、全体的にみると上に凸の曲線を示し、 x が $0.79 \sim 0.90$ の範囲で圧縮強度が最大になる傾向を示した。これは、 x が大きくなると 3.5 に示したようにコンクリートが軟らかくなるためにモルタル分がはね返りやすいこと、逆に x が小さいとコンクリートが硬くなって全体としてはね返りやすいために強度が低下するものと考えられる。したがって、 x の適当な範囲で圧縮強度が最大になるという傾向は妥当な結果であると考えられる。

また、モルタルが富配合ほど、 $G/S+G$ が大きい方がコンクリートの圧縮強度が大きいこと、砕石の方が天然砂利を用いたものより圧縮強度が大きいことなども示された。

4.7 はね返り率

x とはね返り率との関係は、図-17 に示すようであっ

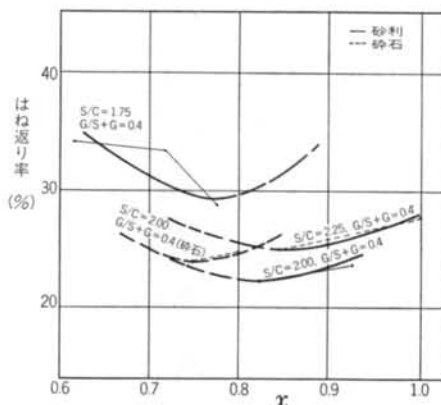


図-17 xとはね返り率の関係

た。

全体的に、圧縮強度とは逆に下に凸、すなわち x が $0.75 \sim 0.85$ ではね返り率が最小になる傾向を示した。この傾向は、4.6 に示したようにコンクリートのコンシステンシーから類推すると妥当なものと考えられる。

しかし、はね返り率を最小にする範囲は、圧縮強度を最大にする範囲よりいくぶん小さいようであった。

モルタルの W/C の影響も認められ、 S/C が 2.0 のとき、はね返り率が最小となった。

また、砕石の方が砂利よりはね返り率がいくぶん大きく、かつ、はね返り率を最小にする x の範囲が 0.5 程度小さいようであった。この原因として、砕石の方が 4.3 に示したように実積率が大きいので、所要のモルタル量が少ないことが挙げられる。

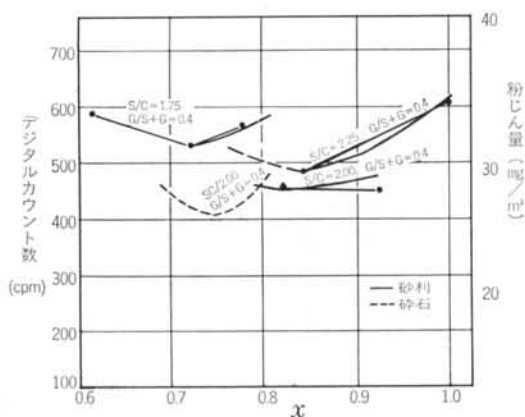
$G/S+G$ とはね返り率の関係は、圧縮強度の場合とは逆に、 $G/S+G$ が小さい方がはね返り率が小さい傾向を示した。

全体的に、はね返り率が § 2. に示した既往の実績と比較すると大きいようであった。これは、4.2 に示したように、本現場では U 字型支保工および金網筋を用いていること、上半の肩部を吹付けるのでノズルが上向きの状態で試験したことなどが主な原因と考えられる。

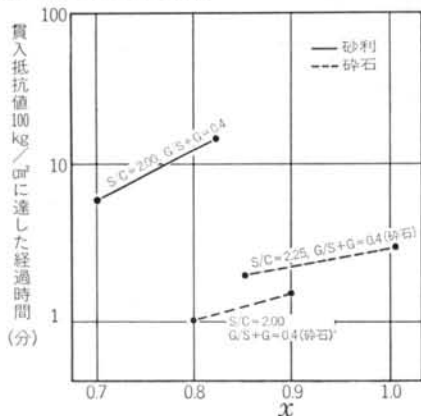
4.8 粉じん量

x と粉じん量との関係は図-18 に示すようであって、はね返り率と同様な傾向を示した。すなわち、 x が $0.72 \sim 0.85$ で粉じん量が最小となった。

粉じんの発生は、主としてはね返りの材料の影響が大きいと考えられるので、粉じん量と x の関係がはね返り率と同様な傾向を示したことは妥当な結果であると考えられる。 $G/S+G$ が小さい方が粉じん量が小さい傾向を示した。



図一18 x と粉じん量の関係



図一19 x と貫入抵抗値との関係

粉じん量はトンネル坑内の換気方法、はね返り率に左右される。本実験における粉じん量が § 2. に示した既往の実績より大きいのは、本実験中の換気が他と異なること、4.7 に示したようにはね返り率が大きかったこと、上向きに吹付けたことなどが原因と考えられる。

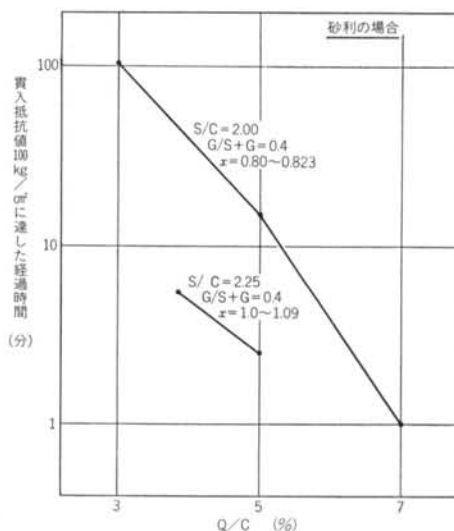
4.9 SEC 吹付けコンクリートの凝結硬化速度

1) x がコンクリートの凝結硬化速度に及ぼす影響

x とプロクター 貫入抵抗値 100 kg/cm^2 に達する時間（凝結硬化速度）との関係は図一19に示すようであって、 x が小さいほど凝結硬化速度が速い傾向を示した。

したがって、速く硬化させるためには、実用的な範囲内で x を小さく、すなわちコンクリートを硬くすればよいことが明らかになった。また、砕石の方が実積率が大きいので、凝結硬化速度が速い傾向を示した。

3.6 に示したモルタルの凝結硬化速度と比較すると、コンクリートを直接試験しても、モルタルの試験結果とほぼ同様な結果が得られた。換言すれば、室内でモルタルの実験を行なうことによって、実際に吹付けたコン



図一20 急結剤混入率と貫入抵抗値との関係

クリートの凝結硬化速度の目安が得られることが示されたのである。

2) 急結剤混入率が凝結硬化速度に及ぼす影響

急結剤混入率 Q/C と吹付けコンクリートの凝結硬化速度の関係は図一20に示すようであって、 Q/C が大きいほど凝結硬化速度が速いことが確かめられた。

Q/C を大きくすると、はね返り率は小さくなるが逆に粉じん量が大きくなること、圧縮強度が低下する傾向がみられるので、湧水量対策以外には Q/C を必要以上に大きくしない方がよいものと考えられる。

§ 5. SEC 吹付けコンクリートの配合設計方法の提案

5.1 配合設計方法の基本的な考え方

SEC 吹付けコンクリートも通常のコンクリートと同様に、試験室で試験練りによって配合を定めるのが望ましい。しかし、SEC モルタルの配合設計、2 次側の細・粗骨材比の検討は室内実験で容易にできるが、吹付けコンクリートの試験練りは困難である。

本実験では、§ 3. に示したように、SEC モルタルと現場と同じ状態の細・粗骨材を練りまぜてコンクリートを造ると、配合比によってコンクリートのコンシステンシーが異なることを明らかにした。

また、現場施工実験から、SEC 吹付けコンクリートの強度を最大にし、はね返り率および粉じん量を最小にするような x （1 次側と 2 次側の重量比）が存在するこ

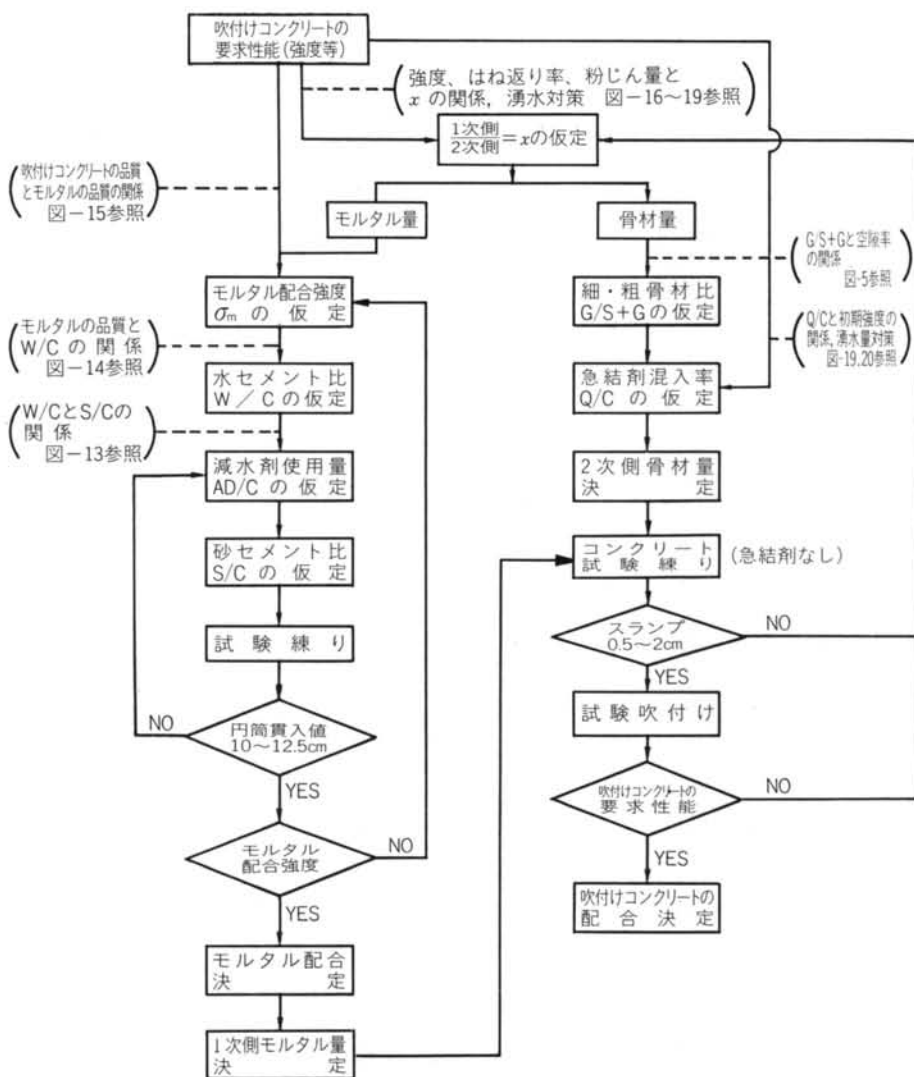


図-21 SEC 吹付けコンクリートの配合設計の手順

とを明らかにし、その範囲は0.75~0.85であることを示した。

このような x の範囲であれば、コンクリートのスランプは0.5~2cm程度に相当することが室内実験結果より分かる。したがって、SEC 吹付けコンクリートの配合と骨材の空隙率の試験を行なった後、コンクリートを練りまぜてコンシステンシー試験をすれば配合の目安が得られるものと考えられる。

5.2 SEC 吹付けコンクリートの配合設計方法

本実験で、吹付けコンクリートと SEC モルタルの品質の関係などを明らかにすることができたので、図-21に示す手順で SEC 吹付けコンクリートの配合設計ができるものと考えられる。

この配合設計方法は、吹付けコンクリートの強度に基

づいて SEC モルタルを配合設計した後に、SEC モルタルと2次側細・粗骨材を練りまぜてコンクリートを造る点に特徴がある。本方法を用いれば室内実験で配合の目安が得られ、合理的な方法といえる。

しかし、本実験では1種類の材料しか用いていないので、本方法を一般化するためには異なった材料を用いたデータを集める必要がある。

§ 6. まとめ

モルタルと骨材を別々に圧送し、ノズル直前で合流させて吹付ける SEC 吹付けコンクリートの合理的な配合設計方法について検討するために、室内実験および明神トンネルにおいて現場施工実験を行なった。

実験の範囲内で次のことがいえる。

(1)SEC モルタルのコンシステンシーは円筒貫入試験によって評価でき、吹付けコンクリートとしては10~11 cmの範囲が適している。SEC モルタルの圧縮強度は、セメント水比法則に従うことが確かめられた。

(2)細骨材と粗骨材を混合すると、空隙率を最小にする混合比が存在するが、吹付けコンクリートとしては細骨材をいくぶん多くした混合比を用いるとよい。

(3)SEC モルタルと骨材をミキサで練り混ぜてコンクリートを造ると、そのコンシステンシーは配合比によって著しく異なる。

(4)SEC 吹付けコンクリートの圧縮強度は、SEC モルタルの圧縮強度によって支配される。

(5)SEC 吹付けコンクリートの圧縮強度を最大にし、はね返り率および粉じん量を最小にする α （1次側と2次側の重量比）が存在し、本実験では0.75~0.85であった。

(6)吹付けコンクリートの凝結硬化速度は α を小さくす

ると速くなり、モルタルの試験によって目安が得られることが示された。

(7)以上の結果、室内で SEC モルタルの配合、2次側の細・粗骨材比を別々に試験した後、両者をミキサで練り混ぜたコンクリートについて試験することによって、SEC 吹付けコンクリートの配合の目安を得る方法を提案した。

(8)SEC 吹付けコンクリートの合理的な配合設計方法について提案したが、本実験結果は1種類の材料を用いた実験から導かれたものであるため、今後さらに異なった材料に関するデータを集めて一般化していく必要がある。

最後に、本研究を行なうに際してご指導いただいた東京大学樋口教授および小林教授、日本道路公団の関係者の方々、当社島田専右常務取締役および故堤仁取締役、またご助力いただいたリブコンエンジニアリング㈱、当社 NATM-1 プロジェクトおよび四国支店の関係者の方々に感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) 須藤・田沢・内藤：“新しい湿式吹付けコンクリートの施工性及び物性に関する基礎実験” 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集（1982年10月）
- 2) 原島・剣持・伊東：“高強度スラリーモルタルの特性について” 同上第33回概要集（1978年10月）
- 3) 持田豊：“青函トンネルにおけるコンクリート技術の進歩” セメント・コンクリート No. 396（1980年2月）
- 4) 加賀・山本・黒羽・早川：“S.E.C.方式による大容量自動吹付コンクリート工法” 大成建設技術研究所報 第13号（1981年）
- 5) 矢野・寺田：“片岩地帯における NATM” トンネルと地下 Vol. 12, No. 8（1981年8月）
- 6) 持田豊：“青函トンネルにおける新しい吹付コンクリート工法” コンクリート工学 Vol. 18, No. 9（1980年9月）
- 7) 日本鉄道建設公団：“NATM の設計と施工”（1980年）
- 8) 林・小林・北角：“吹付けコンクリートによるトンネル覆工” トンネルと地下 Vol. 8, No. 3（1977年3月）
- 9) 高木・福光・森山・奈良：“鋼繊維と超早強セメントを用いた湿式吹付けコンクリートの物性と施工性” 清水建設研究所報 第31号（1979年10月）
- 10) 高崎・奥村・石井：“乾式、湿式、S.E.C. 吹付けコンクリートの圧縮強度および静弾性係数の経時変化” 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集（1981年10月）
- 11) 奥村・伊勢・黒崎：“新しい練り混ぜ方式によるモルタルを用いた PIP ぐい” セメント・コンクリート No. 418（1981年12月）
- 12) T.C. Powers: “The Properties of Fresh Concrete”（1968）

