

# 超早強性コンクリートの強度発現性状

## CHARACTERISTICS OF ULTRA HIGH-EARLY-STRENGTH CONCRETE

戸田五郎\*・長谷川幸雄\*\*・三浦眞治\*\*\*

By Goro TODA, Sachio HASEGAWA and Shinji MIURA

In recent years, the constructions of concrete structures in the underground have been increasing in towns and cities. For these structures, it is required to develop such concrete that will gain sufficient strength within early stage to shorten the construction period with economically reasonable cost for construction.

Experimental tests were conducted to develop a new concrete which will obtain strength more than 60 kgf/cm<sup>2</sup> within 4 hours after placing and will be applied for the lining concrete of the shield construction method. The results of experiments were satisfactory and are reported in this paper. The acceleration of hardening was attained by means of a new type of admixture, regulation of curing temperature and pressure application to the form.

### 1. 緒 言

都市の過密化が進むにつれて、最近ではやむを得ず地下中構造物とするほか、美化の視野などから地上構造物を積極的に地下に移す施策がとられるようになった。しかし都市域では軟弱地盤地帯が多く、地下に構造物を造る場合、地上の交通に障害を与えたり地盤沈下などの公害を発生するおそれがあるだけでなく、巨額の建設投資を必要とするなど技術的な問題が非常に多い。またあまりにもコスト高になるという経済的要因もある。このような中で現在は地下工法の1つとして、セグメント覆工によるシールドトンネル工法が重視され広く用いられている。その一方で地上構造物に対してわずかの沈下や変位も与えないような施工法を開発することが求められている。

一般的に都市域の軟弱地盤での地下トンネル工は、山岳地の硬岩地質地帯でのトンネル工に比べて約3倍のコ

スト高になるばかりでなく、電力通信施設費などでは地上施設に比べて約15倍にもなる。これは都市域の地下工事では、圧気・凍結・薬液注入およびその他構造物防護工などの補助工法の併用を余儀なくさせられることにもよるが、シールドトンネルのセグメント覆工費用がトンネル工費中の約30%を占めていることにもよると考えられる。

このためまず沈下しないことを主目的とした公害防止のほか、経済性・安全性および工期短縮等が追求され、生コンクリートの場所打ちライニング工法<sup>1)</sup>が研究されてきた。HOCHTIEF社<sup>2)</sup>がフランクフルトの地下鉄工事でファイバーコンクリートによる場所打ちライニングを行った実施例はあるが、技術的な課題を残している。わが国では施工性や経済性が十分とはいえない。

これらの要因を取り除くためには、セグメント工法に代わる場所打ちライニング工法を確立することが必要である。このためには在来コンクリートの物性を一新して、セグメント組立てに要する数時間以内で硬化し外圧に耐えるような高強度コンクリートが必要である。

本稿では、材料の選択から品質管理までコンクリート製造にかかる諸事項について検討を加えたが、その結果ある混和材を用い、ある経済性を条件に養生時間3時間で150 kgf/cm<sup>2</sup> (14.7 MPa) 以上の超若材令高強度コン

\* 正会員 工博 日本技研(株)相談役  
(〒467/名古屋市瑞穂区高田町 3-15)

\*\* 正会員 中部電力(株)総合技術研究所 調査役  
(〒459/名古屋市緑区大高町北関山 20-1)

\*\*\* 正会員 中部電力(株)静岡支店工務部土木課 課長  
(〒420-91 静岡市本通 2-4-1)

クリートが得られた。この混和材は当然現場添加できるものであり、その施工範囲も明り工事に使用できることはもちろんである。これらをトンネルの場所打ちライニングに適用すれば大幅な経済性向上と工期短縮が可能であると思われるので、その特性と有用性について述べる。

## 2. 超早強性コンクリートに対する考え方

軟弱地盤の地下構造物における場所打ちコンクリートを対象として経済性と施工性を考慮しながら、材令4時間以内で60 kgf/cm<sup>2</sup>(5.88 MPa)以上の強度が得られ脱型が可能であることを当初の目標とした。従来から得られているこの種のコンクリートでは材令約24時間を要し、場所打ちライニングに適用することは不可能であったので、超早強性を得るために、材料と施工性に関する事項として次のような条件を設定した。

a) まず材料<sup>3)~6)</sup>に関して、普通のセメントはその性質上徐々に硬化が進行することは当然であるので、水硬性をより一層早くするため添加材として急硬材<sup>4)</sup>を使用することにした。ただし、その使用量は効果を発揮する最少使用量にできるよう検討する。この急硬材はコンクリート打設直後の早期に多くの混和水を取り込んで、微細なエトリンガイアの結晶<sup>4), 5)</sup> (3CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・3CaSO<sub>4</sub>・32H<sub>2</sub>O)を生成することに着目した。

b) この急硬材をコンクリート用として用いるためには急硬材の性質を究めることが必要である。しかも数時間である程度以上の高強度のものを得るために、強度発現時間と養生温度の関係を知らずして、諸材料の混合後は約1時間以内に場所打ちされることを想定する。

c) 異種材料により発熱温度<sup>4)</sup>が重複し、最高温度が高くなるように養生温度と発現強度<sup>4)</sup>との調和を図る必要があるので、トンネル内の実温より容易に与え得る温度として30°Cを定量とした積算温度での効果を期待し、さらに35°Cについても検討する。

d) セメントの品質は経済性と発現強度との関係から普通セメントと比表面積4200 cm<sup>2</sup>/gの早強セメントの二種類とし、ポンプ打設を考慮して単位セメント量は300 kgf/m<sup>3</sup>、s/a=46%の定量とする。

e) 施工に関する事項として、コンクリートのスラブは7cmを基準とする。これは従来のポンプ施工感からみれば困難と思われるが、流動化剤の適用等の検討を加え、別途に配管中の外部摩擦係数を減らすなど、ラビン抵抗値を最小にする方法でその見通しを得た。

f) トンネルに変形を生ぜずコスト高とならない範囲で、人為操作により内型枠に3 kgf/cm<sup>2</sup>(0.29 MPa)までの加圧装置を設け、まだ固まらないコンクリートを比較的低い加圧力下で定着させて硬化させることにする。

その際テールボイドに対しては別途に考慮する。

g) 型枠は前記の脱型強度を満足するものとして従来の進行を倍加して1日10m以上を目標とし、さらにコンクリートの硬化初期における脱型・移動・推進反力等の諸問題を解決し、早強コンクリートをより価値づけるものとする。

h) 比較のため従来からコンクリートの早期材令高強度化の研究に使われていた粒状塩化カルシウム使用の場合と同列にして比較試験を行う。

軟弱地盤地帯でコンクリートにより地中構造物を作る場合、たとえばシールド工事で超早強性コンクリートを用いた場所打ちライニングをする場合、掘削断面は従来のセグメント工に比べ、セグメントの厚さ分程度縮小されてセグメントの組立時間<sup>6)</sup>が省けることや二次覆工コンクリートが不要になるほか、清掃が重複しないこと、工程が大幅に短縮できること、沈下防止や周辺環境に与える影響が少ないことなどで大きな優位性が見込まれる。その反面、コンクリート単価と掘進機の反力機構が増加することになるが、特殊型枠の延長はコンクリート打設2スパン程度で対応でき組立労務費と相殺されるであろう。全体として現行セグメント式のトンネル工費に比べ、約2割の節減と約3割の工期短縮が見込まれ、その分野は上下水道を初め、鉄道・電力・通信から防災施設に至るまで広範囲に及ぶものと想定される。

## 3. 基本的な性状究明比較試験

### (1) 実験条件

単位セメント量：300 kgf/m<sup>3</sup>

目標スラブ：7±0.5 cm (ポンプ圧送できる限界)

細骨材率：46%

細骨材の粗粒率：FM=2.8±0.5

混和剤の使用量：減水剤 (単位セメント量×0.25%)

促進剤 (単位セメント量×2.0%)

急硬材 (単位セメント量×20%)

遅延剤 (単位セメント量+急硬材)  
×1.2%

練上り温度：20°±0.5°C, 30°±0.5°C, 35°±0.5°C

養生温度：20°±0.5°C, 30°±0.5°C, 35°±0.5°C

養生圧力：3 kgf/cm<sup>2</sup>

圧力保持時間：材令7時間の供試体は4時間

材令7時間未満のものは圧縮強度  
試験の40分前

### (2) 使用材料

a) セメント

- ① 秩父セメント（株）製普通ポルトランドセメント  
 $(\rho=3.16, \text{比表面積 } 3190 \text{ cm}^2/\text{g})$
- ② 秩父セメント（株）製早強ポルトランドセメント  
 $(\rho=3.14, \text{比表面積 } 4210 \text{ cm}^2/\text{g})$
- b) 骨材 粗骨材 最大寸法 20 mm, 青梅産碎石  
 細骨材 粗粒率 2.77, 木更津産山砂
- c) 混和材料
- ① 減水剤 花王石鹼（株）製 マイティ 150
- ② 促進剤 徳山ソーダ（株）製 粒状塩化カルシウム
- ③ 急硬材 電気化学工業（株）製 コスミック
- ④ 遅延剤 電気化学工業（株）製 セッター D2, D3

従来、モルタル・コンクリートの凝結時間を短縮するため用いられてきた急結剤は、漏水防止などの補修が主目的で、強度よりも瞬結性が要求されていた。しかし、今回われわれが用いた急硬材（コスミック）は1～2時間で凝結するとともに高強度も得られる複合特性を有しておりコンクリート用混和材としては今までにその例がない。特にメーカーでも解明していない事項を取り上げて試験を行った。なお、急硬材として今までにあったものは、吹付用・注入用・床モルタル用であって、大量に使用できる普通コンクリート用というのはなかった。

遅延剤はこの急硬材を使用する場合、作業時間調整のため必ず併用するもので、今回は 20°C 条件下の場合 D2, 30°C 条件下の場合 D3 を用いることとした。

d) 急硬材 早強性を得るためのセメント系急硬材<sup>4)</sup>は、カルシウム・アルミネート溶融体と特殊変成石こうから成る鉱物質で、真比重 2.91, 見掛比重 1 の灰白色粉末体であり、その基本成分は次のとおりである。

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	ig. loss (%)
1.0	10~20	38~43	35~40	0.9

これをセメントに混ぜて混練すると、コンクリート中の混合水と短時間で反応し、水和を開始してエトリングaitの水和物を生成して急激な硬化を生じ、また長期的にも安定した強度が維持され、低温でも実用的な強度が得られる。そのため特殊機器を必要としないので、施工場所を限定しないことが基礎研究により明らかとなっている。ただし、必ず乾燥した場所に保管しなければならない。

e) 凝結遅延剤 急硬材には超急硬性があるので要求強度に応じて硬化までの時間を調節することが必須条件であり、本急硬材専用のセメント凝結遅延剤<sup>4)</sup>を併用し通常 10～60 分の間でコントロールして実用する。この凝結遅延剤は水に溶けやすい粉末で、その水溶液は pH 9～11 のアルカリ性でセメント減水剤としての作用もする。しかし、一定以上使用しないと早強効果が得られないが、このことについては後で説明する。

### (3) 実験項目

まず基本的な性状を把握するため、セメントの種類・混和材料および養生温度のとり方で、全 7 ケースの組合せを考えたがその試験項目は次のとおりである。

- ① スランブ試験
- ② 練上りコンクリートの温度測定
- ③ 養生中のコンクリートの温度測定
- ④ 凝結試験（プロクター貫入抵抗試験）
- ⑤ 圧縮強度試験

### (4) 実験方法

a) 骨材の保存 骨材は試験日の数日前から恒温室内で保存し、骨材の温度が目標とする練上り温度に近くなるようにした。

b) コンクリートの練りませ コンクリートの練りませは恒温設備をもつ特殊混練室で行い、室内温度は実験の数日前から目標の練上り温度と同じに保ち、実験に使用する水やセメントもこの室内で保存した。

c) スランブ試験 スランブ試験は JIS A 1101 に準じて行った。

d) 温度測定 コンクリートの温度測定は、練上り時については棒状温度計を用い、養生中の供試体についてはその中央位置に埋設した Cu-Co 熱電対温度計を用いて行った。なお、この計測には東京測器社製のデジタル測定器 (TDS・256 DC), 同切換器 (ASW・32 T) および同タイマー (T・24 P) を用いて自動計測をした。

e) 凝結試験 練り上がったコンクリートは 5 mm 目角ふるいを用いてウェットスクリーニングし、試料を 15×15×15 (cm) 容器に詰めてプロクター貫入抵抗値による凝結時間の測定をした。測定方法は ASTM C 403 に準じて行い、抵抗値 500 psi (3.45 MPa) をもって始発 4 000 psi (27.58 MPa) をもって終結とした。

f) 圧縮強度試験 圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じて行い、供試体寸法は  $\phi 10 \times 20$  (cm) の円柱とした。材令 24 時間までのものは上下端面をジェットセメント (W/C=35%) を用いてキャッピングしたが、材令 7 日以降のものは普通セメントでキャッピングを行った。試験材令は 1.5, 2, 3, 4, 7, 10, 24 (時間), 7, 28, 91 (日) で各材令とも 3 本ずつとした。

g) 加圧 圧縮強度試験用供試体は、練上りから 20 分以内に型枠内に詰めて締固めを行い、練上り 20 分後から圧力 3 kgf/cm<sup>2</sup> (0.29 MPa) で加圧した。試験材令が 1.5～4 (時間) までの供試体は試験開始の 40 分前まで加圧し、この時点でキャッピングをして試験直前に脱型するようにした。試験材令が 7～24 (時間) のものは 4 時間加圧した後、試験直前まで型枠養生を行った。

また材令 7~91 (日) のものはただちに圧力 3 kgf/cm<sup>2</sup> (0.29 MPa) で加圧し圧力保持時間は 4 時間とした。その後材令 1 日でセメントキャッピングを行い、翌日脱型してその後 20°C 標準養生を行った。なお、加圧方式はテコ式としてテコ比は 1:10 とし、試験に用いた型枠は加圧による脱水が容易にわかるよう上下両面に有孔鉄板を設置したものをを用いた。

(5) 配合

コンクリートの配合は表-1 に示されるとおり、セメントの種類は普通および早強の 2 種類で、比較のため単位セメント量は 300 kgf/m<sup>3</sup>、細骨材率 46% の定率とし、スランプは 7 cm を目標とした。

表-1 配合表

Case	セメントの種類	養生温度	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kgf/m <sup>3</sup> )										
					水	セメント	細骨材	粗骨材	減粘剤	急硬材	遅延剤	急硬材	遅延剤		
1	普通	20°C	53.1	46.0	159.3	300	855	1,035	0.75	6	—	—	—	—	—
2	普通	20°C	46.3	46.0	139.0	300	849	1,028	0.75	—	60	4.32	—	—	
3	早強	20°C	50.0	46.0	150.0	300	866	1,049	0.75	6	—	—	—	—	
4	早強	20°C	45.6	46.0	136.3	300	850	1,029	0.75	—	60	4.32	—	—	
5	普通	30°C	50.0	46.0	150.0	300	866	1,049	0.75	6	—	—	—	—	
6	早強	30°C	49.5	46.0	143.5	300	862	1,043	0.75	6	—	—	—	—	
7	早強	30°C	45.6	46.0	136.3	300	850	1,029	0.75	—	60	4.32	—	—	

遅延剤について◎印は D 3、無印は D 2 を使用。

(6) 実験結果

実験結果の総括は表-2 に示す。圧縮強度の発現性状はセメントの種類、混和剤の種類、加温、加圧の程度によって変わってくるが、どのように変化するかを調べた。また、若材令時においては特に養生温度に左右されると考えられるので、積算温度と圧縮強度との関係について調べることにした。

たとえば塩化カルシウムを使用した場合は、凝結に数時間要するのに対し、急硬材を使用した場合は遅延剤の適正な使用によりきわめて短時間 (約 1 時間でも調整可能) で凝結が完了するという著しい特異性が認められたので、さらに養生温度の違いによる程度の差も調べた。それとともに急硬材を使用したコンクリートと使用しないコンクリートでは練上り後の温度性状にも特異性がみられたので両者の比較を試みた。これらの特異性は急硬材を使用したすべてのコンクリートに共通してみられ

た現象だったのでその一例だけを示した。

さらに温度については、養生温度を 20°C、30°C、35°C とした場合、圧縮強度に及ぼす影響の程度も調べた。

a) 凝結性状 コンクリートの凝結性状は図-1 に示すとおりである。急硬材を用いたものは、セメントの種類、コンクリートの練上り、養生温度にかかわらず材令約 1.5 時間で凝結が始まり 10 分程度で終結する。それに対し塩化カルシウムを用いたものは始発が養生温度 20°C の場合約 4.5 時間後、養生温度 30°C の場合約 3.5 時間以内であり、急硬材を用いた方が始発時間で約 1~1.5 時間早くすることができる。終結は養生温度 20°C では 5.5~6 時間、30°C では 4~5 時間であったが、ともにセメントの種類によって約 30~60 分の差が生じた。

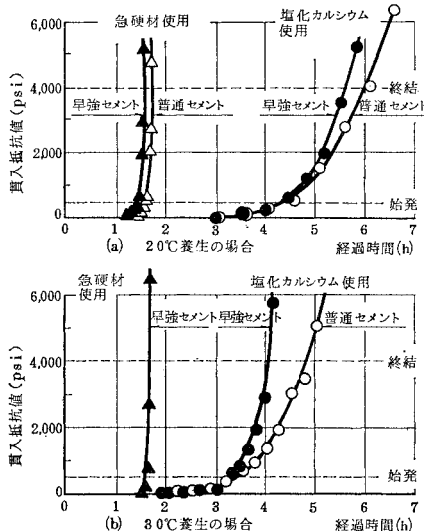


図-1 凝結性状の比較

b) 圧縮強度

① セメントの種類の影響

混和剤に塩化カルシウムを用いた場合の圧縮強度は、材令 10 時間で早強セメント使用の方が普通セメント使用より約 40 kgf/cm<sup>2</sup> (3.92 MPa) 大きく、材令 7 日で最大約 150 kgf/cm<sup>2</sup> (14.7 MPa) の差を生じたが、急硬材を用いた場合の差異は初期材令においてはほとんど変わ

表-2 実験結果の総括表

Case	セメントの種類	促進剤の種類	スランプ (cm)	凝結試験 (h-min)	養生温度 (°C)	練上り温度 (°C)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )														積算温度 (h°C)									
							1.5h	2h	3h	4h	7h	10h	24h	7日	28日	91日	1.5h	2h	3h	4h	7h	10h	24h	7日	28日	91日				
1	普通	CaCl <sub>2</sub>	7.5	4-35	6-5	20	2.0	—	—	3.0	22	50	149	388	486	572	45	61	92	122	219	317	757	5077	20197	65557				
							19.5	2.4	2.2	3.6	3.7	5.0	6.9	849	689	791	846	45	61	97	129	219	310	745	5065	20185	65545			
							20.5	0.2	0.3	0.9	2.3	3.5	8.9	266	517	597	613	46	61	92	123	220	319	762	5082	20202	65562			
3	早強	CaCl <sub>2</sub>	6.5	4-23	5-38	20	2.0	1.4	6.1	8.8	3.5	9.9	119	381	643	757	770	45	60	98	127	221	313	750	5070	20190	65550			
							30.5	0.6	0.9	2.8	1.2	6.1	108	208	406	494	594	59	7.8	117	157	280	404	971	5231	20411	65771			
							30.5	0.7	0.9	2.1	9.7	102	178	344	548	688	671	5.8	7.7	116	155	279	406	981	5301	20421	65781			
4	普通	CaCl <sub>2</sub>	6.5	8-23	4-53	30	30.5	0.6	0.9	2.8	1.2	6.1	108	208	406	494	594	59	7.8	117	157	280	404	971	5231	20411	65771			
							30.5	0.7	0.9	2.1	9.7	102	178	344	548	688	671	5.8	7.7	116	155	279	406	981	5301	20421	65781			
							29.5	1.15	1.49	2.05	2.20	2.45	3.02	506	744	821	828	4.8	9.8	126	169	230	410	987	5307	20427	65787			

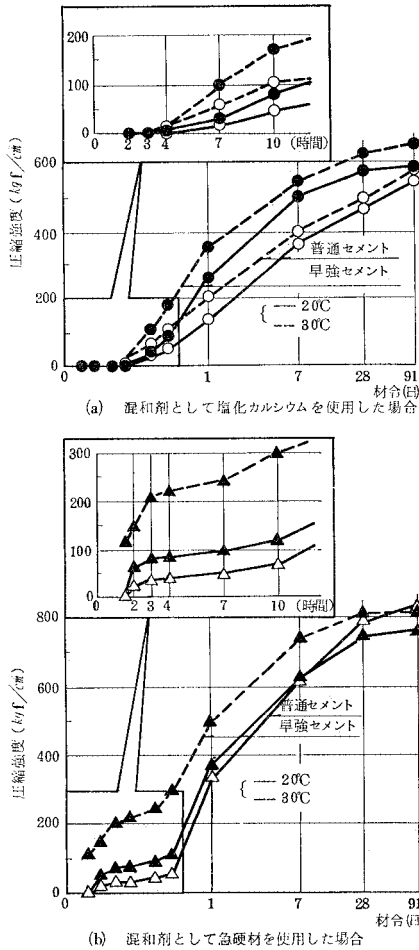


図-2 セメントの種類が圧縮強度に及ぼす影響

らず、材令2時間以上で約 50 kgf/cm<sup>2</sup> (4.9 MPa) の差を生じ、さらに 28 日以降も増加して材令 91 日 (以下  $\sigma_{91}$  で示す) で約 80 kgf/cm<sup>2</sup> (7.85 MPa) の差となった。その上急硬材使用の場合は  $\sigma_{91}$  = 700~800 kgf/cm<sup>2</sup> (68.6~78.5 MPa) の強度となるが、図-2 に 20°C 養生の場合を例示する。

② 混和剤の種類の影響

材令 10 時間以降で、急硬材を使用した場合と塩化カルシウムを使用した場合に圧縮強度は大きな差を生じている。図-3 に 20°C 養生の場合を示すが、普通セメントの場合その差は同じ材令で約 200~300 kgf/cm<sup>2</sup> (19.6~29.4 MPa) に及び、早強セメントの場合のそれは約 110~160 kgf/cm<sup>2</sup> (10.8~15.7 MPa) と小さくなっている。しかし、圧縮強度そのものの値は、急硬材を使用した場合普通セメントで  $\sigma_{28}$  = 791 kgf/cm<sup>2</sup> (77.6 MPa),  $\sigma_{91}$  = 846 kgf/cm<sup>2</sup> (83.0 MPa) に対し、早強セメントで  $\sigma_{28}$  = 757 kgf/cm<sup>2</sup> (74.2 MPa),  $\sigma_{91}$  = 770 kgf/cm<sup>2</sup> (75.5 MPa) といういずれの場合もかなりの高強度を示した。

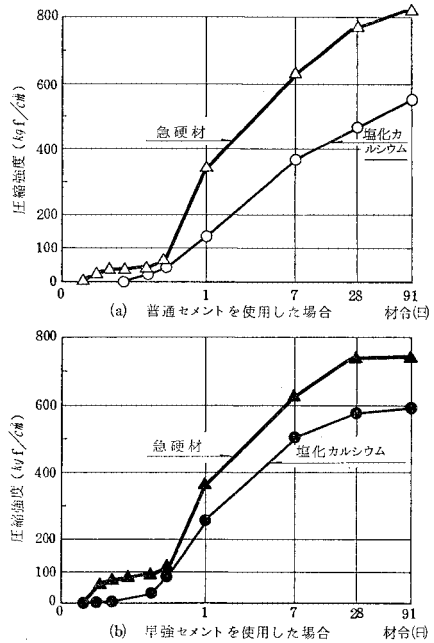


図-3 混和剤の種類が圧縮強度に及ぼす影響 (20°C)

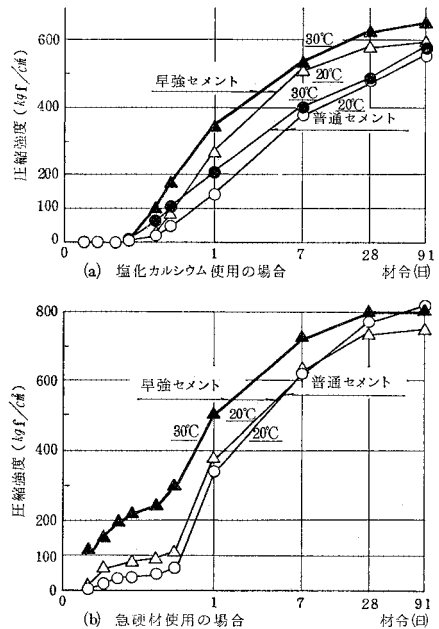


図-4 加温が圧縮強度に及ぼす影響

③ 微加温、微加圧の影響

コンクリートの練上り時、養生温度を常温より高めにしたたり、加圧することによって、コンクリートの強度促進上有効であることは知られている。

常温 (20°C) と 30°C で養生されたコンクリートが特に初期強度にどのような影響を与えるかについて、急硬材使用の場合と塩化カルシウム使用の場合との比較は

図-4 に示すとおりである。塩化カルシウム使用の場合は養生温度が 20°C と 30°C による違いは、最大でも約 90 kgf/cm<sup>2</sup> (8.8 MPa) となったのに対比、急硬材使用の場合は約 180 kgf/cm<sup>2</sup> (17.7 MPa) にも達し、いずれも初期材令 10 時間でその差が最大となった。しかも、急硬材使用の場合は  $\sigma_{91}$  が最大で 846 kgf/cm<sup>2</sup> (83.0 MPa) の圧縮強度となったのに対し、塩化カルシウムの場合は 671 kgf/cm<sup>2</sup> (65.8 MPa) であった。また、急硬材使用の場合は常温 (20°C) 養生でも材令 10 時間で 119 kgf/cm<sup>2</sup> (11.7 MPa) であったのに 30°C 養生では 302 kgf/cm<sup>2</sup> (29.6 MPa) という大きな値を示した。

次に積算温度と圧縮強度の関係を調べた結果が 図-5 に示してあるとおり、30°C 養生の場合初期において特に 20°C 養生との差が大きく、材令 10 時間で約 180 kgf/cm<sup>2</sup> (17.7 MPa) にも及んだが、その後は約 50~100 kgf/cm<sup>2</sup> (4.9~9.8 MPa) を推移した。

一般的にみて急硬材と塩化カルシウムを使用したコンクリートの練上り後の温度状況を調べた結果は 図-6 に示すとおり、塩化カルシウムの場合には温度の最高値が練上り後 7 時間近傍にあり以後漸減しているのに対し、急硬材使用の場合は練上り後 3 時間で最大となり、しかも以後急激に温度が低下している。この傾向は急硬材を使用したすべてのコンクリートにみられる共通の現象のようである。

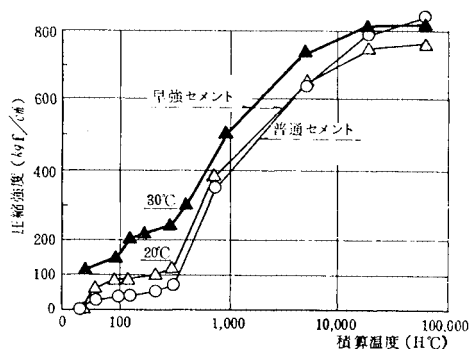


図-5 積算温度と圧縮強度 (急硬材使用)

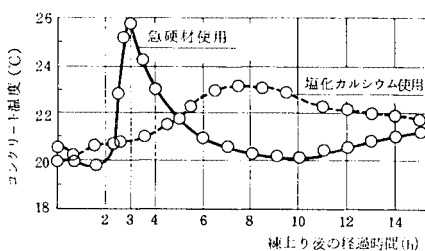


図-6 コンクリート発熱性状の比較

次に養生温度を 20°C, 30°C, 35°C と変えた場合で、加圧と非加圧コンクリートの性状を比較したものは 図-7 に示すとおりであり、加圧と非加圧では明らかに加圧

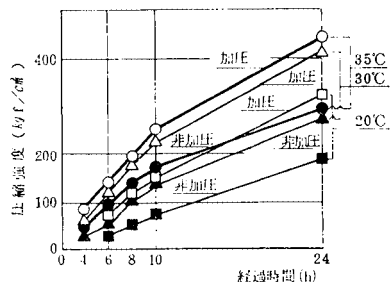


図-7 加温・加圧が早期強度に及ぼす影響

した方が強度が大きく、しかも養生温度の高い方が圧縮強度は大きくなっている。

### (7) 考 察

単位セメント量 300 kgf/m<sup>3</sup>, 急硬材添加量 20% としたコンクリートの実験結果から次のように考察することができる。

a) 普通セメントに急硬材を用いたコンクリートは、材令 2 時間ですでに 20 kgf/cm<sup>2</sup> (2.0 MPa) 以上の強度が得られ、また同一条件による早強セメントの場合には約 60 kgf/cm<sup>2</sup> (5.9 MPa) に達して急硬材の効果が顕著であった。それに対し塩化カルシウムを用いたコンクリートは材令 4 時間でも 3 kgf/cm<sup>2</sup> (0.3 MPa) に達していないことから、急硬材の効果を期待することはできないものといえる。

b) 急硬材のもつ特殊成分と水との水和反応が急速に行われ、短い時間でこのような硬化体を生成すると考えることができる。このことは 図-6 で材令 3 時間で練上り温度がピークに達していることから、この発熱がエトリングait水和物の生成によるものと判断される。

c) 急硬材使用コンクリートは、長期的にみても初期強度が上積みされた傾向で強度が増加していることから、従来の硬化材によくみられたような長期強度の低下がなく、安定した硬化体であることが判断される。

d) コンクリートの強度発現に対し、最も大きく影響するのは養生温度である。また早強セメントの方が普通セメントより若材令の超早期強度を大きくすることが確認された [2 時間値 149 kgf/cm<sup>2</sup> (14.6 MPa), 3 時間値 205 kgf/cm<sup>2</sup> (20.1 MPa)]。このことから強度発現をより効果的にするためには、養生温度はコンクリートに対する悪影響を見極めた範囲で高い方が望ましい。

e) 高強度発現に伴う発熱は、急硬材の凝結と通常セメントの凝結との間には相当の時差を生ずるので、発熱ピークが重ならない。むしろ早期の発熱を消散させないで積算温度に利用することが必要で、マスコンクリートなみに留意を要する。また、コンクリートの単価がかなり高くなることも懸念される [急硬材 (コスミック) の

単価 300~400 円/kg, 遅延剤 (セッター) の単価 1 000 ~1 200 円/kg] ので, 可使時間についてさらに急硬材の使用量と遅延剤使用量との関係を検討する必要が生じた。

f) コンクリートの圧縮強度は, 普通セメントで  $\sigma_1=340 \text{ kgf/cm}^2(33.3 \text{ MPa})$ ,  $\sigma_{28}=790 \text{ kgf/cm}^2(77.5 \text{ MPa})$ , 早強セメントで  $\sigma_1=500 \text{ kgf/cm}^2(49.0 \text{ MPa})$ ,  $\sigma_{28}=820 \text{ kgf/cm}^2(80.4 \text{ MPa})$  となっている。

#### 4. 急硬材の使用量を変化させた場合の コンクリートの物性比較試験

実験条件は基本的には前章 3. と同様であるが, 急硬材の添加量を単位セメント量に対して 0, 5, 10, 15% に変えて検討した。ただし, 遅延剤の使用量はすべて (セメント+急硬材)  $\times 1.2\%$  と一定にし, コンクリートの養生温度は  $20^\circ\text{C}$  と  $30^\circ\text{C}$  であるが, 加圧力は 0 にした。なお, 圧縮強度は超若材令 4, 6, 8, 12 (時間) と 1, 3, 7, 28 (日) を対象にした。

##### (1) 実験項目

本実験の組合せは全 12 ケースとし, 次の項目の試験を行った。

- ① スランプ試験            ④ 凝結試験
- ② 空気量試験            ⑤ 圧縮強度試験
- ③ コンクリートの練り上り温度測定

##### (2) 実験方法 (前章の場合と違うものだけを示す)

a) 空気量試験 JIS A 1128 の空気室圧力方法による。

b) 凝結試験 練り上がったコンクリートは, 5 mm ふるいを用いてウェットスクリーニングし,  $\phi 15 \times 15$  (cm) の容器に詰め, ASTM C 403 のプロクター貫入抵抗試験法に準じて凝結時間を測定した。

c) 圧縮強度試験 供試体は  $\phi 10 \times 20$  (cm) の円柱体とし, 材令 24 時間までのものは上面をジェットセメントまたは石こうでキャッピングし, それ以降の材令の供試体はセメントキャッピングを施し, 各材令とも 3 本ずつについて試験を行った。

##### (3) 実験結果

a) 凝結性状 普通セメント使用の場合の凝結性状は図-8 に示すとおりである。急硬材を使用しないコンクリートでは養生温度が  $30^\circ\text{C}$  の場合,  $20^\circ\text{C}$  より始発が約 1 時間, 終結が約 2 時間早い結果になったが, いずれの場合でも始発から終結まで 1~2 時間を要しているのに対し, 急硬材を 10%, 15% 添加した場合は始発が 1

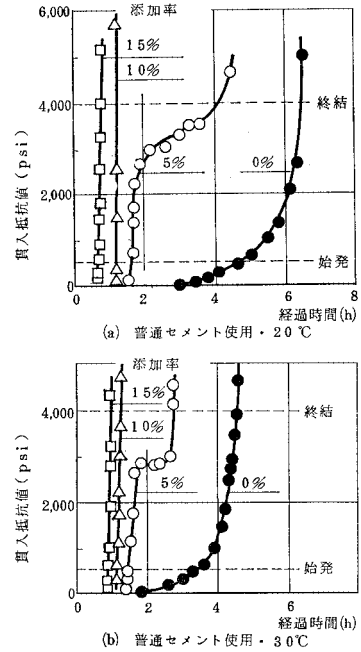


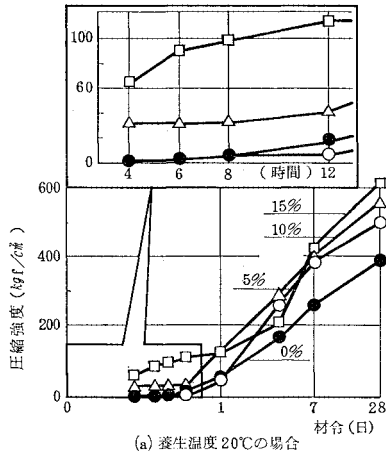
図-8 ウェットスクリーニングモルタルの凝結性状

時間前後で, 終結が始発から 5~10 分という短時間で終わる特長があり, 急硬材の特性を如実に示している。添加率が 5% のものは  $20^\circ\text{C}$  養生でも  $30^\circ\text{C}$  養生でも, 始発から約 1 時間後, 貫入抵抗値 3 000 psi (20.7 MPa) 付近に変曲点が生ずる凝結性状を示しているが, これは後述の圧縮強度の特異性とも共通する点がみられることから, 圧縮強度に影響を与える原因になっていると思われる。

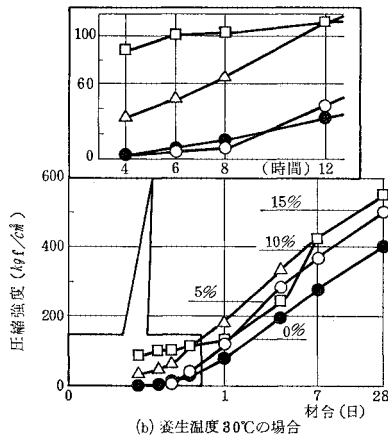
b) 圧縮強度の発現性状 普通ポルトランドセメントを使用した場合の圧縮強度の発現性状は図-9, 10 に示すとおりである。急硬材の添加率が多いほど圧縮強度は大きくなる傾向にあるが, 添加率 5% のものは無添加に比べ材令 24 時間未満では逆に小さくなることもあり, 養生温度のいかんにかかわらず若材令のコンクリートに対する急硬材の効率的な添加率には下限があることが認められた。標準養生の 4 時間強度は急硬材添加率が 15% の場合  $60 \text{ kgf/cm}^2(5.9 \text{ MPa})$  以上を得ている。また, 材令が 1~7 日の短期の場合は, 急硬材の添加率が 15% の場合, いずれも強度低下がみられたが, 材令 28 日ではいずれも  $550 \text{ kgf/cm}^2(53.9 \text{ MPa})$  以上の強度を示した。図示は省略したが, 早強ポルトランドセメントを使用した場合も同様な高強度の傾向を示している。

##### (4) 考察

超早強性コンクリートの材令数時間を対象にし, 養生温度  $20^\circ\text{C}$  と  $30^\circ\text{C}$  について強度特性を調べることに重点を置いて, 急硬材の最小使用量を決めるための実験を行



(a) 養生温度 20°C の場合



(b) 養生温度 30°C の場合

図-9 普通セメント使用・急硬材の添加率と圧縮強度

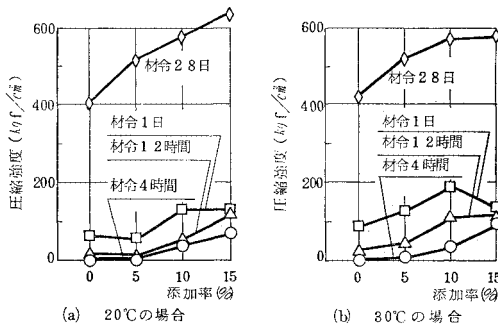


図-10 普通セメント使用・急硬材の添加率と圧縮強度

したが、その結果は次のように考察することができる。

**a)** 急硬材の添加率を変えて比較試験をした結果、使用量は施工時に必要な材令と所要強度に合わせて経済的に定めればよいが、急硬材の最低添加率としては8%程度が下限と考えられ、それ以下の5%程度では不安定であり、材令4~5時間における早強性を期待することができないものと判断される。

**b)** 急硬材の添加率を多くすると材令12時間未満での強度は高くなるが、その後材令7日程度までの強度の

伸びは若干小さくなる。

**c)** 普通セメントと早強セメントのいずれを用いても急硬材の添加率を10%以上とする場合  $\sigma_{28}=500\sim600$  kgf/cm<sup>2</sup> (49.0~58.8 MPa) になることから、通常のコンクリート工事では急硬材の添加率を10%以上とする必要がないと思われる。ただし、材令4時間以内では所要強度に応じた添加率を定めることが望ましい。

**d)** 普通セメントでも急硬材の添加率が15%の場合材令4時間で60 kgf/cm<sup>2</sup> (5.9 MPa) 以上、10%の場合  $\sigma_1=120$  kgf/cm<sup>2</sup> (11.8 MPa) 以上の強度が得られたことから急硬材には早強特性のあることが裏付けられた。

### 5. 急硬材の使用量を変化させた場合のモルタルの凝結性状

急硬材の使用量は単位セメント量に対して5, 10, 15%とするが、それに加える使用遅延剤量を(セメント+急硬材)に対して0.1~1.2%の範囲で変化させた場合のモルタルについての凝結性状を調べた。

#### (1) 実験項目

本実験では試験の組合せを全部で28ケースとし、次の項目の測定を行った。

- ① モルタルのフロー試験
- ② モルタルの練上り温度の測定
- ③ モルタルの凝結試験

#### (2) 実験方法 (前章の場合と違うものだけを示す)

**a)** 練りませ モルタルの練りませは、容量7lの強制攪拌式モルタルミキサを用いて行った。

**b)** フロー試験 モルタルのフロー試験は ASTM C 230 に準じて行った。

**c)** 凝結試験 モルタルは  $\phi 15 \times 15$ (cm) の鋼製容器に詰め、測定は ASTM C 403 のプロクター貫入抵抗試験法に準じて行った。

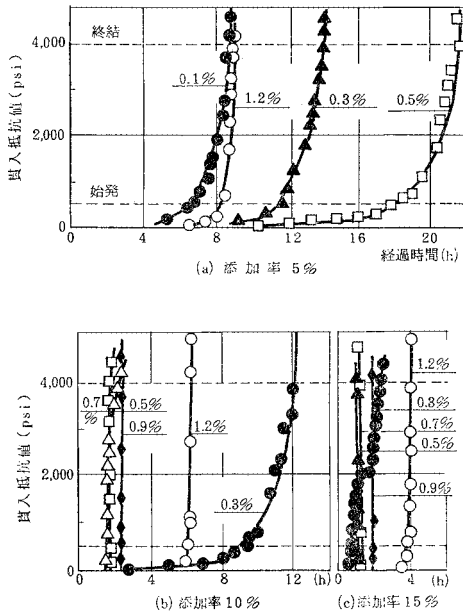
#### (3) 実験結果

図-11, 12 は同一配合で遅延剤の量を変えた場合の凝結試験結果を示している。

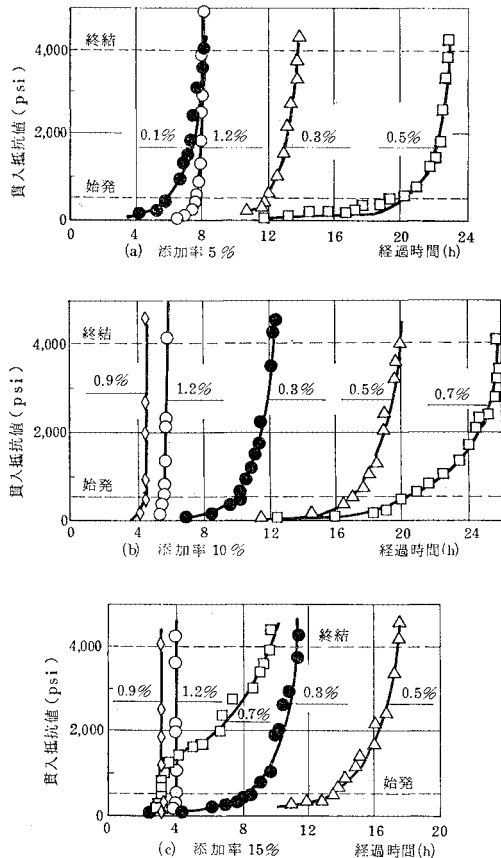
##### a) 普通ポルトランドセメントを用いた場合

急硬材を5%添加した場合は、遅延剤使用率をふやすと凝結時間が遅くなるが、1.2%加えると急硬性を發揮する。急硬材を10%加えた場合遅延剤使用率を0.3%としたモルタルは、遅延剤が急硬材の水和反応を抑えきれなかった感があり、フロー値も0.5%のものに比べて小さくなった。遅延剤を0.5%としたものの中には若干の凝結不良がみられ、硬化材を使った場合は、最低でも





図一十一 遅延剤使用率を変えた場合のモルタル凝結性状比較 (普通セメント使用)



図一十二 遅延剤使用率を変えた場合の凝結性状比較 (早強セメント使用)

0.5%以上の遅延剤が必要のようである。また、急硬材15%添加の場合はいずれも4時間以内で凝結が完了した。遅延剤の使用率が0.3%の場合、凝結過程で一時反応の停止が起こってくるが、これは遅延剤が急硬材の十分な水和反応を抑えることができなかったものと思われる。

**b) 早強ポルトランドセメントを用いた場合**

急硬材を5%とした場合の性状は、普通ポルトランドセメントを使った場合とほとんど同様である。急硬材を10%添加した場合は、遅延剤使用率が0.3~0.7%では凝結時間を遅くするが0.7~0.9%の間に必要最低の使用率があるのではないかとと思われる。また急硬材を15%添加した場合も、凝結性状が10%添加の場合にほぼ同様の傾向を示し、必要最低の遅延剤使用率は0.7~0.9%の間にあると思われる。

**(4) 考 察**

遅延剤は急硬材と密接な相関性があるので、その使用率を変えて特性を調べた以上の実験結果から次のように考察することができる。

**a)** 急硬材の反応時間は、遅延剤使用率がある一定値より少ない場合、急硬材による急硬性がなくなるが、これは混練中に急硬材が反応してしまうためその後のセメントによる水和反応が無使用のものより遅れてしまうものと思われる。遅延剤使用量が十分である場合に急硬材は急硬性を示す。

**b)** 混練中に反応を起こさないための必要最低限の遅延剤使用率は普通ポルトランドセメントで0.5~0.8%、早強ポルトランドセメントで0.8~0.9%の範囲と考えられるが、急硬材の量がふえるとこの値は若干小さくなる傾向にある。

**c)** 急硬材が同じ場合、適切な遅延剤量はセメントの種類によって異なり、普通セメントの方が早強セメントより早く反応し、早強セメントの方が遅延剤の使用量が若干多くなる。

**d)** 急硬材による凝結時間の設定は遅延剤使用量によるが、急硬材の添加率が少ないと遅延剤の使用率を加減しても凝結を早めることができない。すなわち、普通ポルトランドセメントの場合急硬材5%添加で8時間、10%で2時間、15%で1時間以上の時間設定しかできない。また早強ポルトランドセメントの場合急硬材5%添加で8時間、10%で4時間、15%で3時間以上の時間設定しかできない。したがって初期材令の必要強度だけで急硬材の添加率を決めると設定時間内に硬化しないおそれがある。

**e)** 使用する単位セメント量に応じて確認試験が必要であろうと思われる。

## 6. 超早強性コンクリートの適応性について

実施例として引用した軟弱地盤トンネルに場所打ちライニング工法が実用化に至っていない理由としては、従来は本稿のような超早強性コンクリートが開発されていなかったことのほかにさまざまな技術課題が未解決となっている。著者らが試みてきた超早強性コンクリートに関係すると思われる2点について、その考え方を述べる。

a) 硬練り、低スランプコンクリートの打設設備が大型・高圧になり、狭小なトンネル内では困難である。そのために、コンクリート輸送路における外部摩擦抵抗や圧力変動を伴う曲がり抵抗等を少なくするラビン抵抗値を低下させる工夫が必要である。

b) コンクリート硬化時型枠面に発生する付着力をなくしたり、型枠に強制微振動を与えてコンクリート中の粗粒ボイドを除くなど、コンクリートの品質を高めて施工性を増すことと、要望度の高いテールボイドをなくするコンクリート圧入と硬化度を測定する装置が必要であり、沈下公害を防がなければならない。これらの試みについての現地実証が望まれる。

超早強性コンクリートの適応場所については、地中・明りを問わず経済性より工期の短縮を選ぶ場所もかなり多くなってきたように思われる。いずれのコンクリートでも急硬材、遅延剤、微保温や微加圧、スランプなどを総合してその場所に応じた可能な施策を行い、高品質の早強性が切望され実施されなければならない。強いて挙げれば次の適用場所が考えられよう。

- 高速道路路面の補修、道路構造の改良
- 交通量の多い都市部道路路面の補修、改良
- 滑走路と周辺アプローチ道路
- 列車の運行制限を受ける鉄道関係工事
- 浸水、漏水等のおそれのある災害河川工事
- 緊急要請のある山腹防災工事
- 早期安全性と防錆を必要とする土留アンカー工事
- 干潮時施工等港湾海岸工事
- 構造上外力、振動、偏圧等を受けやすい橋梁床版等
- その他、工期短縮、経済性を得ようとする諸工事

## 7. 結 語

当面する地中構造物用コンクリートの打設初期における超若材令時の圧縮強度と凝結性状を中心に、経済・施工・工期などを重視して総合した研究を進めてきた。その一つにセメントの硬化性状を変えて、凝結時間と凝結速度を早めることのできる急硬材を使用すれば、微細形

のエトリンタイトの結晶の硬化物質が早期に生成して高強度のものが得られる。その添加量の下限はセメント使用量に対し10%程度でよいことがわかり、それ以上は目的と必要性から定められることと思われる。急硬材に付随して使用しなければならない遅延剤は、少なくともセメント使用量に対し0.8~0.9%程度とすることが好ましく、これは必要とする材令、所要強度に応じて調整できるが、実用的には混練後約1時間程度において打設され、ただちに凝結始発となることが理想と考えられる。また、セメントの種類にもよるが、前記より少ない遅延剤使用量では不安定となるので効果が少ない。さらに現地で水和熱を逃さぬための保温と施工目標とする加温の調整温度を+10°C程度と考えても、これらによる積算温度の効果は意外に大きく、また最小細孔空隙を求めて用いたコンクリートの低スランプ配合と輸送、微弱加圧の手法等の試みはすべて高品質コンクリートが得られ、混練後3~4時間、場所打ち後2~3時間で脱型でき、大幅な経済性と工期短縮が期待されよう。

本稿は実用に供し得ることを優先する枠内の考え方であり、決して最上特性を得たものではないので、今後さらに理想的な配合で高品質コンクリートが開発され、併行して優れた技術を結集して適切な実用化をはかることが望まれる。

おわりに本研究にあたり、実験を担当された(株)大林組技術研究所土木第三研究室、材料に関して協力をいただいた電気化学工業(株)研究所の関係各位に深甚の謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 松尾節夫・崎本純治・十河茂幸：場所打ちライニング工法によるシールドトンネル覆工工事，大林組技報，Vol. 19, No. 8, 1981年8月。
- 2) HOCHTIEF: Extruded Steel Fibre Concrete Lining, Metro Lot 36, Frankfurt, pp. 8, 川崎重工紹介文献, 1985年。
- 3) Neville, A.M.: Properties of Concrete, Reproduced and printed by photolithography and bound in Great Britain at The Pitman Press, Bath, pp. 1~521, 1979.
- 4) デンカマニアル：デンカの特殊混和材，急硬性セメント混和材，電気化学工業(株)。
- 5) KAO technical information：界面活性剤について，花王石鹼(株)，1983年5月。
- 6) 宇賀田俊一郎：コンクリート硬化体の組織，土木学会論文集，pp. 149~154, 1985年3月。
- 7) 中川晃次：セメント業界の研究動向——カルシウム・サルホアルミネートその水和物の工業的利用と将来，セラミックス，9 [10], 1974年。
- 8) 奥田 徹・石原義巳：石炭灰を利用した新種混合セメント，電力土木，No. 195, pp. 45~55, 1985年3月。
- 9) 中部電力(株)三浦真治ほか：金山橋東西洞道新設工事工事記録，pp. 1~282, 1983年6月。

(1985.11.29・受付)