

## 報告 エトリンガイト系混和材を用いた吹付けコンクリートの性状

藤田早利\*<sup>1</sup>・田中雅彦\*<sup>2</sup>・樋口哲\*<sup>3</sup>・木下昭治\*<sup>4</sup>

**要旨：**3車線大断面トンネル等の効率的施工を目的として高強度吹付けコンクリートの開発が行われている。筆者らは初期強度および長期強度の発現にすぐれたエトリンガイト系混和材の適用に着目し、エトリンガイト系混和材を混和した吹付けコンクリートの試験施工を実施した。強度試験の結果、材齢1日で圧縮強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$  から $28\text{N}/\text{mm}^2$  の値を得た。また長期強度については材齢28日で $44\text{N}/\text{mm}^2$  から $70\text{N}/\text{mm}^2$  程度の値を達成した。この値は従来の吹付けコンクリートの2倍に相当する。また、応力測定や内空変位測定の結果から支保性能にも優れていることを確認した。

**キーワード：**吹付けコンクリート、エトリンガイト系混和材、支保

### 1. はじめに

我が国において吹付けコンクリート工法はNATMの導入に伴って急速に普及し今日にいたっている。吹付けコンクリートは岩盤に密着して優れた支保機能を有するが、粉じん、はね返りの発生が欠点であった。導入当初は主として粉じん、はね返りの抑制について研究開発が進められた。しかし現在にいたるまで十分な効果的な対策は確立されていないのが現状である。

また施工方式、機械面については、当初の乾式工法から湿式工法に推移し、施工機械も吹付け機と吹付けロボットが一体化し急速かつ大容量吐出の施工ができるようになった。

一方、吹付けコンクリートの強度面について着目すると導入されて以来 $18\text{N}/\text{mm}^2$  のままであった。しかし最近、3車線大断面トンネルの効率的支保を目的として、またヨーロッパで盛んに行われているシングルシェルライニングの導入にそなえて高強度吹付けコンクリートの開発が行われるようになった。本報告ではエトリンガイト系混和材を添加した高強度吹付けコ

ンクリートについてフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状について報告するものである。

### 2. エトリンガイト系混和材

高強度吹付けコンクリートの配合上の特徴は単位セメント量を富配合とし、水セメント比を低くし、セメント量の10%程度をシリカフェームやメタカオリン等のポゾラン活性物質やエトリンガイト系混和材と置き換えて $40\text{N}/\text{mm}^2$  程度の値を達成しようとするものである。

これらの混和材のうち初期強度および長期強度ともに優れていると考えられるエトリンガイト系混和材に着目し現場実験を実施した。

セメント構成物質のうちカルシウムアルミネートが最初に水和反応を開始しエトリンガイトの針状結晶を析出する。エトリンガイト系混和材はこのエトリンガイトの生成を促進し多量のエトリンガイトの針状結晶によりコンクリート硬化体の空隙を埋め結晶水を固定して実質的な水セメント比を低下させることによりコンクリ

\*1 (株) 奥村組技術開発部係長 (正会員)

\*2 (株) 奥村組技術開発部係長

\*3 (株) 奥村組四国支店土木部課長

\*4 (株) 奥村組四国支店土木部副課長

ートを高強度化させる性質を有している。エトリンガイトの結晶構造を写真-1に示す。なおエトリンガイト系混和材はミキサーでセメント骨材とともに添加し、後述するカルシウムサルフォアルミネート急結剤は吹付けノズル近傍で圧縮空気とともに添加混合した。



写真-1 エトリンガイトの針状結晶

3. カルシウムサルフォアルミネート急結剤  
 一般に湿式工法に用いられる急結剤はカルシウムアルミネートを主成分とするものであるがこの急結剤は初期強度には優れるが長期強度の低下をもたらす傾向がある。

これに対してカルシウムサルフォアルミネート急結剤は初期強度の発現とともに長期強度の発現も優れており、高強度吹付けコンクリートの急結剤として適している。従って本試験施工ではカルシウムサルフォアルミネート急結剤を用いた。

#### 4. 配合

試験施工に用いた配合を普通強度吹付けコンクリートの配合と比較して 表-1 に示す。エ

トリンガイト系混和材はセメント量の約10%を添加し、急結剤にはカルシウムサルホアルミネート急結剤をセメント量に対して10%を添加した。いずれも高強度化を最大限に達成しうる量として設定した。

表-1 配合

種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			C	Σ	Ac	T10
高強度	4.0	6.0	450	50	—	CX10%
普通強度	6.2	6.0	360	—	CX6%	—

Σ : エトリンガイト系混和材

Ac : 通常急結剤

T10: カルシウムサルフォアルミネート系急結剤

#### 5. 練混ぜ方法

高強度配合では粉体量が多くミキサーに負荷がかかりやすい。またエトリンガイト系混和材には一定量の流動化成分が含まれている。この流動化成分は直接、砂と接触した場合スランプダウンを生じる性質を有している。これを回避するため図-1に示すような練混ぜ方法を試行的に実施した。

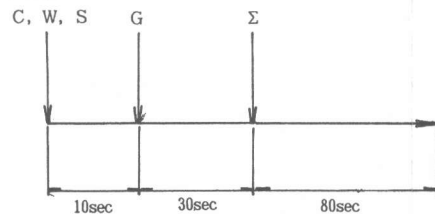


図-1 練混ぜ方法 (1)

この練混ぜ方法ではエトリンガイト系混和材を添加する前に富配合のモルタル分に粗骨材が投入されたためミキサーに大きな負荷がかかりミキサーの定格電流を大きく上回った。

このため図-2に示す方法に練混ぜ方法を変更した。この方法ではエトリンガイト系混和材に含まれる流動化成分により流動化したモルタル分に粗骨材が投入されるため、ミキサーの負荷も定格電流内におさまる、またスランプの経時変化を測定してもスランプダウンを90分程度防止できることが解った。図-3に示す。なお

この配合におけるスランプ値は20 cm程度であり、エアロータリー方式の吹付機には最適な値である。また、試験施工でもありミキサーには混和材の計量投入装置が設置されていないため人力でエトリンガイト系混和材を投入した。

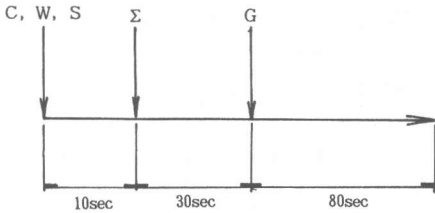


図-2 練混ぜ方法(2)

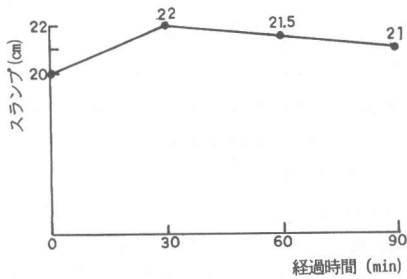


図-3 スランプの経時変化

## 6. 強度特性

強度試験については岩手トンネルおよび双海トンネルで実施した。その結果について以下に述べる。

### 6.1 岩手トンネルでの試験結果

圧縮強度試験は材齢1時間から24時間までについてはプルアウト試験によって行い、材齢7日から28日にかけてはコア供試体を用いて実施した。試料数については $n=3$ 個づつとし、材齢7, 28日については弾性係数も測定した。

強度試験の結果を表-2, 図-4, 図-5に示す。強度試験の結果、材齢1時間での強度発現は $4.6\text{ N/mm}^2$ に達し初期強度の発現が著しいことを示している。また、材齢1日ですでに $27\text{ N/mm}^2$ に達し普通強度吹付けコンクリートの設計基準強度である $18\text{ N/mm}^2$ を大きく

表-2 強度試験結果(岩手トンネル)

材齢	No1	No2	No3	平均値
$\sigma_{1\text{Hr}}$	5.1	4.1	4.6	4.6
$\sigma_{3\text{Hr}}$	6.1	6.7	6.7	6.5
$\sigma_{6\text{Hr}}$	9.2	9.2	8.2	8.9
$\sigma_{24\text{Hr}}$	28.7	25.8	破断	27.1
$\sigma_{7\text{d}}$	57.2	59.3	58.1	58.2
$\sigma_{28\text{d}}$	69.6	68.9	72.0	70.2

単位:  $\text{N/mm}^2$

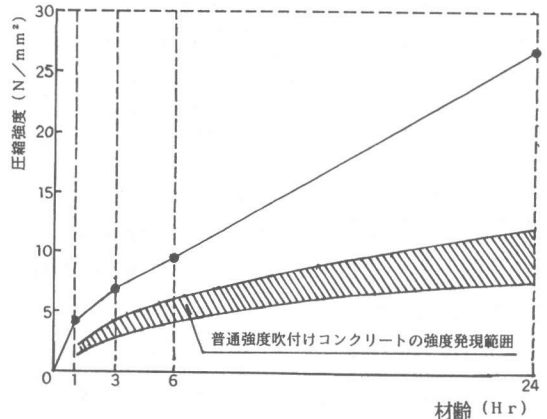


図-4 初期材齢強度

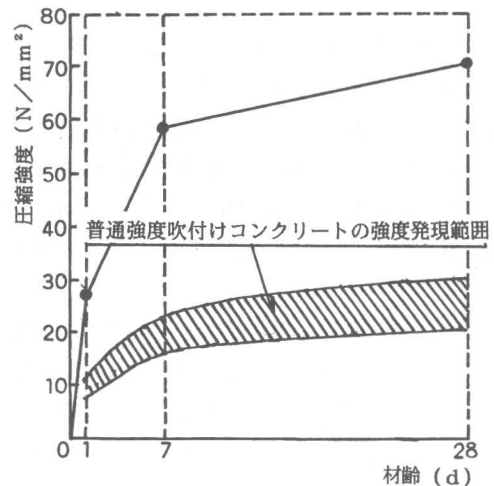


図-5 長期材齢強度

上回っている。また、長期強度の伸びは特に顕著であり、普通強度吹付けコンクリートの2倍を上回る $70\text{N/mm}^2$ の強度を達成した。

次に弾性係数について見れば、一般に強度が高くなる荷重に従って弾性係数も高くなるが、本試験結果においても材齢7日で測定した弾性計数は $2.9 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ の値を示し、普通強度吹付けコンクリートの材令28日の弾性係数をすでに上回っている。また、材令28日の弾性係数については $3.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ に達し普通強度吹付けコンクリートの一般的な値である $2.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ の1.5倍の高弾性となっている。弾性係数の測定結果を表-3に示す。

表-3 弾性係数

材令	No1	No2	No3	平均
7日	2.7	2.9	2.9	2.9
28日	3.0	3.3	2.9	3.0

$\times 10000 \text{N/mm}^2$

### 6.1.2 施工性

目視観察の範囲では、はね返り、粉じんともに普通強度吹付けコンクリートと同様であり特に相違はみられなかった。また、ノズル、ホースの閉塞、脈動もなく良好な施工性であった。

これはエアロータリー方式の吹付け機にスランプ値が適合していたことによると考えられる。

### 6.2 双海トンネルでの試験結果

双海トンネルでの強度試験は岩手トンネルの場合と同様の各材令について試験を実施した。高強度吹付けコンクリートの強度試験結果を表-4に、普通強度吹付けコンクリートの強度試験結果を表-5に示す。また、強度材齢曲線を図-6、図-7に示す。

図から明らかなように材令6時間までの初期強度は岩手トンネルの場合と同様に強度発現が顕著でありほぼ同様な値を得た。しかし材齢1日では普通強度吹付けコンクリートの倍の強度を得たものの岩手トンネルの1日強度に比べる

表-4 高強度吹付けコンクリートの強度

材齢	No1	No2	No3	平均値
$\sigma_{1\text{Hr}}$	4.8	5.4	4.2	4.8
$\sigma_{3\text{Hr}}$	6.0	5.4	5.4	5.4
$\sigma_{6\text{Hr}}$	7.9	8.4	7.2	7.8
$\sigma_{24\text{Hr}}$	18.0	18.0	19.2	18.4
$\sigma_{7\text{d}}$	28.9	30.4	29.7	29.6
$\sigma_{28\text{d}}$	37.7	48.5	43.7	43.3

単位:  $\text{N/mm}^2$

表-5 普通強度吹付けコンクリートの強度

材齢	No1	No2	No3	平均値
$\sigma_{24\text{Hr}}$	8.4	8.4	9.6	8.8
$\sigma_{28\text{d}}$	23.2	23.4	23.0	23.2

単位:  $\text{N/mm}^2$

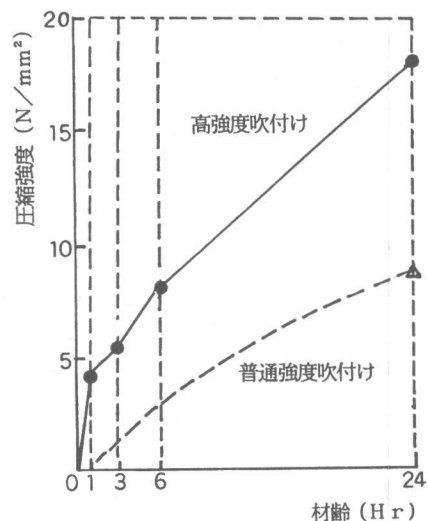


図-6 初期材齢強度 (双海トンネル)

と強度の伸びが低い結果となった。さらに1週

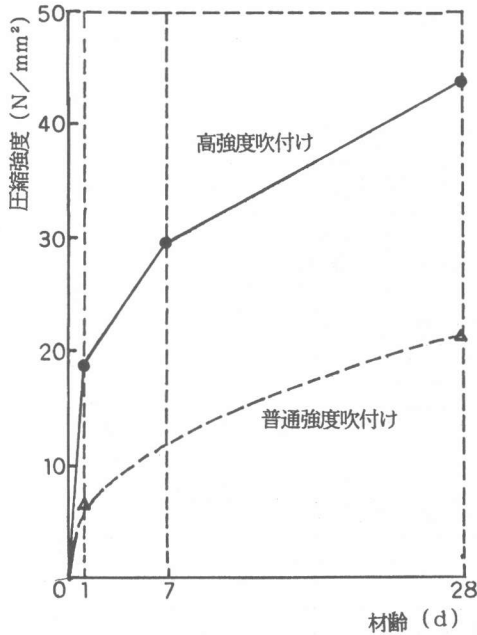


図-7 長期材齢強度

強度、4週強度では普通強度吹付けコンクリートの倍の強度を達成したものの岩手トンネルの場合に比べると強度の発現は低く、4週強度で  $43\text{N/mm}^2$  と岩手トンネルの4週強度の2/3程度の値であった。

長期強度のこのような相違について原因を検討すると以下の点が考えられる。

- ・骨材表面水の変動による単位水量の増加
- ・カルシウムサルフォアルミネート急結剤の添加量の誤差
- ・坑内温度の相違
- ・骨材強度の相違

これらが複合した原因によるものと考えられるが、高強度吹付けコンクリートの場合は、配合の管理、特に低W/Cであるため骨材の表面水の変動による単位水量への影響が大きくなる傾向があり、表面水の管理を厳密に行う必要があると思われる。

なお、施工性については岩手トンネルの場合と同様であり、特に相違は見られなかったが粉じんの発生が幾分多いように感じられた。これは急結剤とコンクリートとの混合管がノズル近

傍に設けられたためと思われる、その結果混合が不十分となり、そのため粉じんの発生が増加しまた強度面にも影響を与えたと考えられる。なお岩手トンネルではノズル手前5m付近に混合を設置しており、双海では2m手前であった。

## 7. 支保性能

双海トンネルではエトリンナイト系混和材を混和した高強度吹付けコンクリートの支保性能を評価するため、日本道路公団の地山分類によるC1パターンの地山で、ほぼ同一の土被りの同様な地山条件の場所に普通強度吹付けコンクリート区間と高強度吹付けコンクリート区間をそれぞれ20mづつ施工し、それぞれの中央にコンクリート有効応力計を埋設し吹付けコンクリートの発生応力を測定した。また、内空変位の計測も併せて行った。

コンクリート有効応力計および内空変位計測点の配置概要を図-8、図-9、図-10に示す。

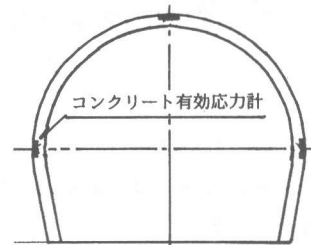


図-8 応力計配置断面

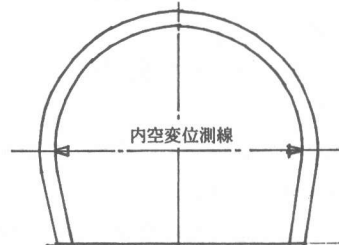


図-9 内空変位計測断面

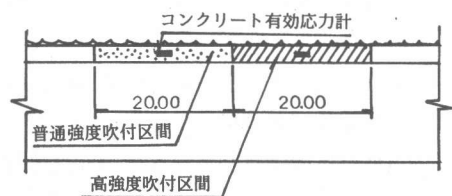
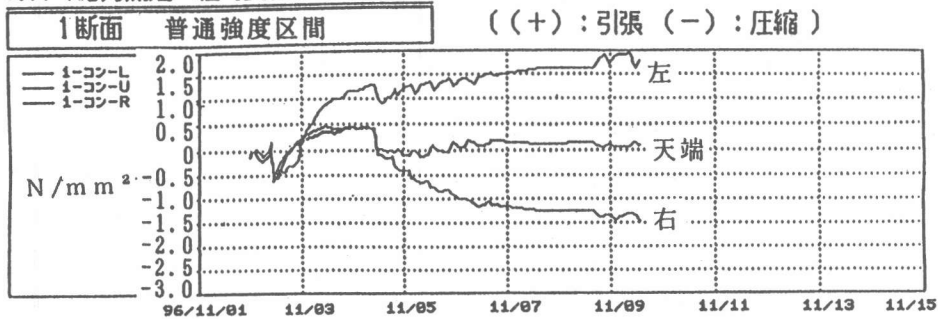


図-10 応力計配置縦断

## 7.1 計測結果

計測結果を図-11に示す。

### コンクリート応力測定 経時変化図



### コンクリート応力測定 経時変化図

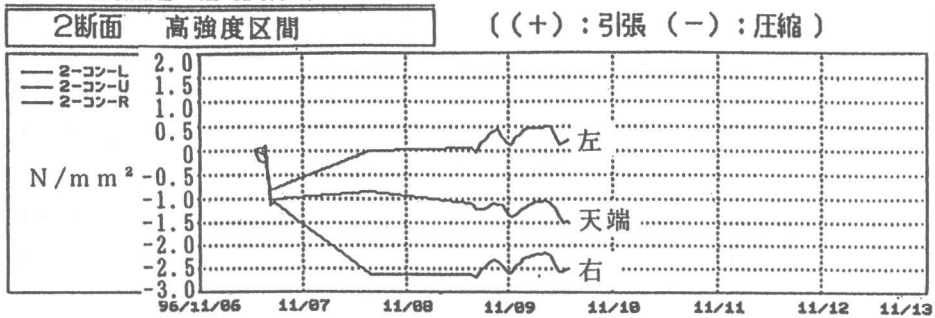


図-11 応力測定結果

結果の概要は次のとおりである。

- ・発生応力は左、天端、右の順に大きな圧縮応力となっている。
- ・普通強度区間の応力収束値は $1.5 N/mm^2$ であった。
- ・高強度区間の応力の収束値は $2.5 N/mm^2$ であった。
- ・普通強度区間の応力の収束までの所用時間は5日を要している。
- ・高強度区間の応力の収束までの所用時間は1.5日である。
- ・普通強度区間の内空変位は10mmで収束した。
- ・高強度区間の内空変位は7mmで収束した。

## 7.2 支保性能の考察

高強度吹付け区間では初期材令での強度の伸びが著しく、それに伴って弾性係数も急速に増大する。ここで吹付けコンクリートの剛性をEA

(弾性係数×吹付け厚)で表現するとすれば吹付け厚は高強度も普通強度も同じでありAは一定値であることから弾性係数Eの値により剛性が左右される。高強度吹付け区間では強度の増加に伴い剛性が急速に高くなるため早期に変位を拘束するため発生応力が大きくなる。

次に変位を一定にすると考えた場合、これは剛性を一定にすることを意味し高強度化に伴って弾性係数は大きくなり、それに反比例して吹付け厚を低減することができる。

## 8 まとめ

- ・エトリンガイト系混和材とカルシュームサルホアルミネート急結剤を併用した吹付けコンクリートは初期、長期強度にすぐれている。
- ・高強度吹付けコンクリートは吹付け厚を低減できる。