

# 論文 鋼繊維を混入した高流動コンクリートの配合特性

野村朋宏\*<sup>1</sup>・栗田守朗\*<sup>2</sup>

要旨：シールド工法の一つであるECL工法の覆工コンクリートへの適用を目的として鋼繊維を混入した高流動コンクリートを研究開発を行っている。本研究では、通年施工を念頭に置き、温度条件がフレッシュおよび硬化コンクリートに及ぼす影響を把握するため、実験的な検討を行った。その結果、練上り温度条件が異なる場合におけるコンクリートの配合を選定し、また、初期材齢における圧縮強度は積算温度と良い相関があるとの結論を得た。  
キーワード：高流動コンクリート、鋼繊維、ECL工法、練上り温度、積算温度

## 1. はじめに

シールド工法の一つにセグメントを用いず、直接コンクリートを打ち込み、連続した覆工体を構築するECL工法(Extruded Concrete Lining)がある。本工法に用いられる覆工コンクリートにはその工法特性から、①流動性の経時保持性能、②初期強度発現性、という相反する性能が要求される。さらに本工法の覆工コンクリートは無筋コンクリートであるため、乾燥収縮や温度収縮によるひび割れに対する抵抗性を高める目的で、鋼繊維の使用が考えられている。

筆者らはこれまでに鋼繊維を混入した高流動コンクリートの特性を把握するために各種の検討を行ってきた[1][2]。その結果、コンクリートの練上り温度および経時変化試験の環境温度がともに20℃という条件下で、所要の品質を満足する配合を得た。しかし、高流動コンクリートの流動性や初期強度の発現性は環境温度に大きな影響を受けると考えられるため、施工が年間を通して行われる場合には、コンクリートの性状に及ぼす温度の影響を把握することが施工性や品質管理面から重要な課題となる。

本論文では、このような通年施工を念頭に置き、ECL工法に適した鋼繊維を混入した高流動コンクリートの各温度環境下における性状を把握するとともに、各温度環境下における配合選定を目的として行った実験結果について報告するものである。

## 2. 一次覆工コンクリート

一次覆工コンクリートに要求される性能は以下のようなものである。

### ①流動性の経時保持性能

一次覆工コンクリートはコンクリートポンプを用いて施工するが、内型枠の組み替え作業中は圧送が中断する。また施工中に生ずる各種トラブルによる圧送中断も考慮に入れ、コンクリートは製造から約3時間程度経過しても再圧送、再充てんが可能な流動性を有していることが必要となる。

### ②初期強度発現性

内型枠を早期に脱型するために初期強度の発現性が必要となる。ここでは、材齢1日の設計基準強度17.7(N/mm<sup>2</sup>)を満足することを条件とする。

### ③ひび割れ抵抗性

無筋コンクリート構造では、乾燥収縮や水和熱に起因するひび割れに対する抵抗性が小さい。この

\*1 清水建設(株) 土木本部技術第一部、工修(正会員)

\*2 清水建設(株) 技術研究所 主任研究員、工修(正会員)

ため、その抵抗性を向上させる目的で鋼繊維をコンクリートの体積比で1%混入する。上述した性能をもとに目標とするコンクリートの品質を以下のように設定した。

- ・練上り直後のスランプフロー：65 ± 5cm
- ・練上り3時間後のスランプフロー：55cm 以上
- ・空気量：2 ± 1.5%
- ・材齢1日の設計基準強度：17.7 (N/mm<sup>2</sup>) (=180kgf/cm<sup>2</sup>) (30℃水中養生)

これまでの検討を通して、練上り温度20℃、経時変化試験の温度環境20℃という条件下(以下、標準条件)において上記性能を満足する配合を選定している。しかし、通年施工の場合には外気温の影響を受け、コンクリートの練上り温度は10℃程度から35℃程度まで変化すると考えられる。また、コンクリートが打ち込まれるのはシールドの坑内であるため、約30℃程度のほぼ一定の温度環境下に置かれると考えられる。このような施工条件を考慮し、コンクリート練上り温度を10℃～35℃の範囲で変化させ、また、経時変化試験の温度環境を30℃とした条件下において実験を行った。

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。

表-1 使用材料

材 料	仕 様
セメント	早強ポルトランドセメント 比重：3.13、比表面積：4390cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	関電化工高砂工場製 比重：2.29、比表面積：3860cm <sup>2</sup> /g
細骨材	硬質砂岩砕砂 比重：2.80、FM：2.73
粗骨材	硬質砂岩砕石、MS：15mm 比重：2.73、FM：6.42
鋼繊維	両端フック付き結束型ファイバー φ0.6mm×L30mm
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
増粘剤	メチルセルロース系

#### 3.2 練混ぜ方法

練混ぜは二軸強制練りミキサ(容量：100ℓ)を用いて行った。練混ぜ方法を図-1に示す。

#### 3.3 基本配合

標準条件において選定した配合を表-2に示す。本配合の特徴としては、鋼繊維を混入しているため、粗骨材の最大寸法が小さくなっていること、細骨材率がかなり大きな値となっていること、さらに高性能AE減水剤と増粘剤を組み合わせ使用すること等があげられる。

#### 3.4 試験の組合せ

フレッシュコンクリートの試験の組合せを表-3に、圧縮強度試験の組合せを、表-4に示す。

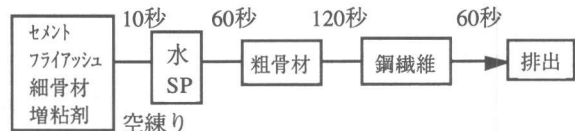


図-1 練混ぜ方法

表-2 基本配合

鋼繊維 混入率 (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水結合材比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ 置換率 F/(C+F) (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤	
					鋼繊維 SF	水 W	セメント C	フライアッシュ F	高性能AE減 水剤(SP) (C+F)×%	増粘剤 (g/m <sup>3</sup> )
1.0	15	38	20	68	78.5	190	400	100	1.8	1050

### 3. 5 試験項目

試験項目はフレッシュコンクリートに関してはスランプフロー試験 (JSCE F 503による)、空気量 (JIS A 1128による) とし、練上り後3時間まで1時間毎に行った。また、硬化コンクリートに関しては圧縮強度試験 (JIS A 1108による) を実施した。

表-3 フレッシュコンクリートの試験の組合せ

環境温度 (°C)	目標とした練上り温度 (°C)		
	10	20	35
20		○	
30	○	○	○

表-4 圧縮強度試験の組合せ

練上り温度 (°C)	養生温度 (°C)	材齢				
		24h	30h	42h	7日	28日
10	20	○			○	○
	30	○			○	○
20	20	○			○	○
	30	○			○	○
35	20	○	○	○	○	○
	25	○	○	○		
	30	○	○	○		

## 4. 実験結果および考察

### 4. 1 練上り温度 20°C 条件

練上り温度 20°C、経時変化環境温度 20°C および 30°C 条件におけるコンクリートのスランプフローの経時変化特性を図-2 に示す。環境温度が 20°C から 30°C に変化することによりスランプフローの経時保持性は劣り、3 時間後にその差が顕著になるようである。また、表-2 に示した配合を用いた場合、練上り温度が 20°C であれば、環境温度に関わらず、スランプフローの目標値を満足していることがわかる。

圧縮強度の発現状況を図-3 に示す。材齢 1 日の圧縮強度は、養生温度に大きな影響を受け、養生温度 30°C の強度は 20°C の強度より 10N/mm<sup>2</sup> 程度上回っている。しかし、材齢 7 日以後では顕著な差異は認められず、材齢 28 日で両者とも約 70N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度が得られている。

以上の結果から、基本配合は 30°C の温度環境下において要求性能を満たすことが確認された。

### 4. 2 低温時における特性

#### (1) フレッシュコンクリートの性状

図-4 に、基本配合における練上り温度とスランプフローの関係を示す。練上り温度が 15°C 付近を境界としてスランプフローに著しい差が認められた。練上り温度が 15°C から 10°C まで低下するとスランプフローが 10cm 程度小さくなった。また、粘性を簡易に表す指標として測定した 50cm フロー到達時間 (スランプコーンを引き上げてか

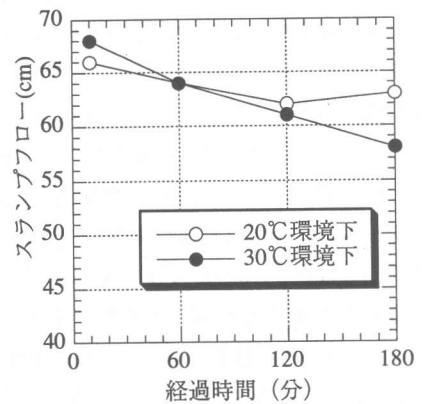


図-2 基本配合のスランプフローの経時変化の状況

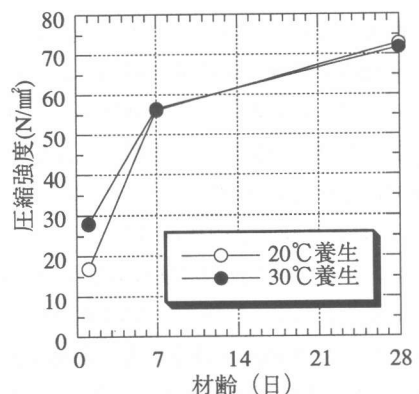


図-3 基本配合の圧縮強度発現状況

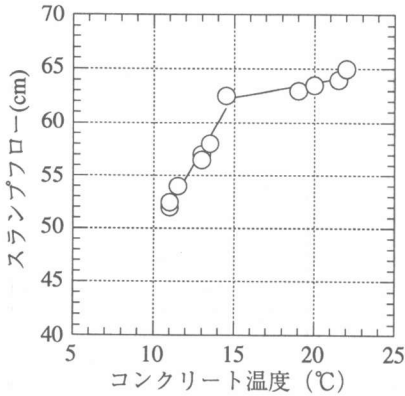


図-4 コンクリート温度とスランプフローとの関係

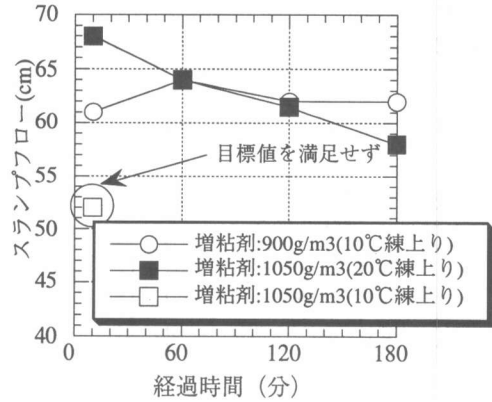


図-5 スランプフローの経時変化の状況

らスランプフローが50cmまで拡がるのに要する時間)にも差が認められ、15秒程度長くなった。すなわち、本配合の場合、練上り温度15℃程度を境界とし、温度が低くなるにしたがい、スランプフローが小さくなるとともに50cmフロー到達時間が長くなる特性を有していると判断した。これは、コンクリート温度が低くなるにしたがい、高性能AE減水剤の分散効果が発揮されにくくなり、増粘剤の増粘効果が卓越することに起因していると考えられる。したがって、練上り温度が低い場合は、高性能AE減水剤の使用量の増加あるいは増粘剤の使用量を低減することにより所要の流動性を確保できると考えられる。高性能AE減水剤の使用量を増加すると、凝結が遅延し、初期強度の発現が遅れる可能性があるため、増粘剤の使用量を低減することで配合の修正を行うこととした。

図-5に、増粘剤の使用量を900g/m<sup>3</sup>としたときのスランプフローの経時変化特性を示す。図には練上り温度が10℃および20℃における基本配合の試験結果も併記している。基本配合は、練上り温度が20℃であれば、スランプフローの目標値を満足したが、10℃では、練上り直後のスランプフローが52cm程度となり、目標値を満足しなかった。そこで、増粘剤の使用量を150g/m<sup>3</sup>減じ、900g/m<sup>3</sup>とすることで配合の修正を行った。この結果、スランプフローの目標値を満足した。

また、練上り温度20℃と比較するとその経時変化量は小さくなっている。さらに練上り温度が20℃の場合には、練上り直後でスランプフローの最大値を示しているのに対して、10℃の場合には、1時間後で最大となっている。これは、低温時には、高性能AE減水剤の分散効果が時間の経過とともに徐々に現れるためと考えられる。以上の結果から、練上り温度がスランプフローの経時変化量だけではなく、その変化の経緯にも影響を及ぼすことがわかる。

## (2) コンクリートの強度特性

コンクリートの圧縮強度の発現状況を図-6に示す。30℃養生の場合、材齢1日で24N/m<sup>2</sup>程度の強度発現が見られ、目標強度を満足した。材齢28日の強度は約70N/m<sup>2</sup>程度で、練上り温度20℃の結果とほぼ同等であった。

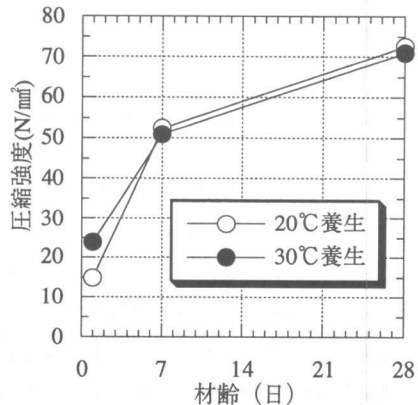


図-6 圧縮強度の発現状況 (練上り温度:10℃)

#### 4. 3 高温時における特性

##### (1) フレッシュコンクリートの性状

低温時の試験から練上り温度がスランプフローの経時変化特性に大きな影響を及ぼすことが認められた。高温下では、特にこの影響が大きいと判断し、練上り温度 35℃ の試験は高性能 AE 減水剤と増粘剤の使用量の組合せを変更するだけでなく、高性能 AE 減水剤の組成を変更することを前提とした。具体的には、初期分散成分を少なくし、経時保持成分を増加させたもの（以下、SP (1) と呼ぶ）を用いて試験を実施した。

SP (1) の量を変えたときのスランプフローの経時変化の状況を図-7 に示す。0.2% 程度の使用量の増減で練上り直後のスランプフローに 3cm 程度の差が生じている。2.2% と 2.4% を比較すると、3 時間後には 7cm 程度の差となっており、SP (1) の使用量の増減に伴って、経時変化量も大きく変動する事がわかる。今回の試験では、使用量が 2.2% の場合には、3 時間後のスランプフローの目標値を下回った。2.4% 以上であれば、3 時間後のスランプフローは目標を満足するが、2.6% 使用したものは、練上り直後でフロー先端にモルタルが先走るといった材料分離の現象が認められた。練上り温度が高温の場合には、低温時とは逆に練上り後の極めて早い時期に、高性能 AE 減水剤の分散効果が大きく発揮されるためにこのような材料分離が生じたものと考えられる。

図-8 は、SP (1) の使用量を一定にし、増粘剤量を変化させた場合の結果である。150g/ m<sup>3</sup> 程度の増粘剤量の変動で練上り直後およびスランプフローの経時変化の状況に差が認められる。これは、高性能 AE 減水剤の分散効果を増粘剤の増粘効果が抑制しているためと考えられる。また、増粘剤の使用量が 1050g/ m<sup>3</sup> の場合には、練上り直後で材料分離が生じた。

以上のことより、高温時においては、スランプフローの経時保持性のみではなく、練上り直後の材料分離に関しても配慮しなければいけないことがわかった。  
(2) コンクリートの強度特性

SP (1) の使用量を (C+F) × 2.4%、増粘剤の使用量を 1200g/ m<sup>3</sup> としたときの初期材齢における養生温度別の圧縮強度の発現状況を図-9 に示す。材齢 24 時間では 20℃ 養生で約 5N/ mm<sup>2</sup>、25℃ 養生で約 15N/ mm<sup>2</sup>、30℃ 養生で約 22N/ mm<sup>2</sup> の強度発現がみられた。また材齢 42 時間までは、養生温度の差によってその強度発現に差

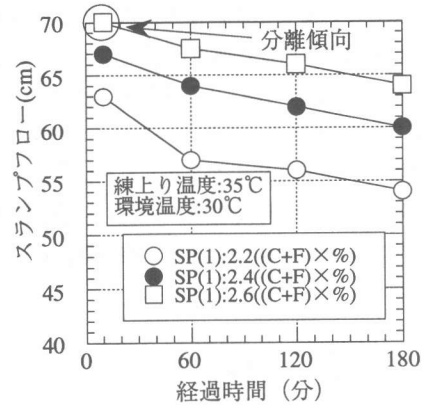


図-7 高性能AE減水剤の使用量がスランプフローに与える影響

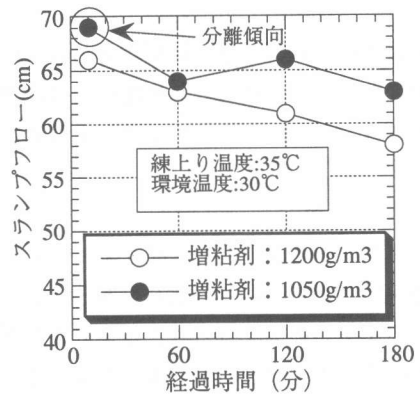


図-8 増粘剤の使用量がスランプフローに与える影響

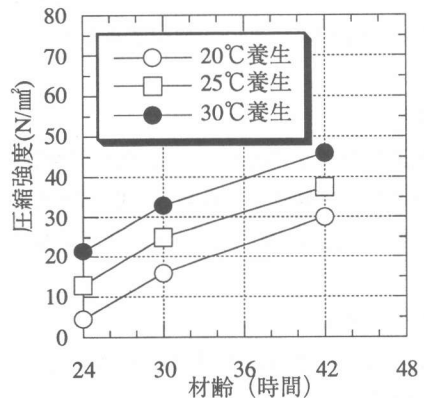


図-9 初期圧縮強度の発現状況

が生じていることがわかる。以上のことより、養生温度が初期材齢の圧縮強度の発現に大きく影響を及ぼすことが認められた。20℃養生に関しては、材齢7日、28日で試験を行っており、それぞれ約63N/mm<sup>2</sup>、75N/mm<sup>2</sup>程度の強度の発現が認められた。

初期材齢(42時間まで)における圧縮強度と積算温度の関係を図-10に示す。積算温度は式(1)で算定した。

$$M = \sum_{t=0}^t (T+10) \quad (1)$$

ここに、M：積算温度(°T・T)

T：平均養生温度(°C)

t：Tで養生される時間(hr.)

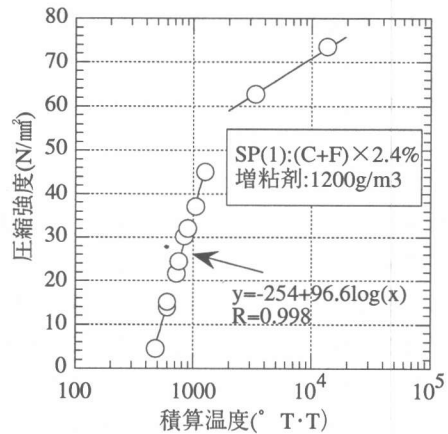


図-10 積算温度と圧縮強度との関係

圧縮強度と積算温度の関係は材齢42時間までと材齢7日以降とは異なっている。また材齢42時間までの圧縮強度と積算温度には高い相関が認められ、積算温度を用いることにより、圧縮強度を推定することが可能であり、実施工における圧縮強度の管理に適用できると考えられる。

## 5. まとめ

鋼繊維を混入した高流動コンクリートの配合について、各種温度環境下における性状を把握し、各温度条件下における配合を選定することを目的に実験を行った。

本実験の範囲で得られた結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 練上り温度がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響は大きく、低温時の場合は増粘剤の使用量を調整し、高温時には高性能AE減水剤の組成を変更すること等で、コンクリートの練上り温度が変動してもほぼ一定のフレッシュな性状を有するコンクリートの配合選定が可能である。
- (2) 積算温度とコンクリートとの関係は材齢42時間までと材齢7日以降では異なり、材齢42時間までは両者に良い相関が認められる。

## 謝辞

本試験を行うにあたり、「岡南共同溝管理技術検討委員会(委員長：東京都立大学今田教授)」の委員各氏に貴重なご助言、ご指導を賜りましたことを深く感謝いたします。また試験の実施にあたりご協力頂いた(株)ポゾリス物産殿に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 原田、渋谷、栗田：鋼繊維を混入した高流動コンクリートを用いたECL工法、土木技術、1996,12
- [2] 田中、寺坂、山本、栗田、田野：鋼繊維を混入した高流動コンクリートのポンプ圧送特性、土木学会51回年次学術講演会、平成8年9月
- [3] 併進工法設計施工研究会編：併進工法設計施工法(都市トンネル編)、1992