

論文 鋼繊維を用いた New PLS 工法用急硬性コンクリートの開発

谷口 裕史*1・荒木田 憲*2・長沢 教夫*3・喜多 達夫*4

要旨: これまでに New PLS 工法を適用したトンネルの掘削断面はいずれも単心円であり, 適用した急硬性コンクリートも無筋コンクリートであった。しかし, 本工法を大断面トンネルあるいは多心円断面トンネルに適用するためには, 急硬性コンクリート自身の曲げおよび引張荷重に対する耐力向上および変形性能の改善が必要である。

以上の観点から, 本研究では, 鋼繊維を混入することにより従来の急硬性コンクリートの特性に加え, 変形性能を改善できるコンクリートの開発を行った。

キーワード: New PLS 工法, 急硬性コンクリート, 都市トンネル, 鋼繊維, 靱性

1. はじめに

New PLS 工法は, 掘削に先立ち切羽前方に連続したコンクリートシェル(プレライニング)を構築し, その後内部を掘削するため, 地表面沈下を抑制できるなどの特徴を有している(図-1参照)。本工法に用いる急硬性コンクリート(以下, スリットコンクリートと称す)は, 切削したスリット(例えば, 幅 40cm, 奥行き 3m)内に隙間なく充填できる充填性, 妻型枠の移動に伴いコンクリート端面を崩壊させない自立性, さらにスリット構築後の掘削時に支保工としての性能を確保するための初期強度発現性が要求される。これらの条件を満足させるために 3

種類の特殊混和材(急硬材, 凝結調整剤および液体急結剤)を使用した特殊なコンクリートを開発した。また, 通年にわたる温度変化に対しても, 要求性能を満足させるスリットコンクリートを製造させるための配合設計手法を確立し, 保土ヶ谷トンネルおよび吉井トンネルでの実施工に適用してきた。¹⁾

一方, これまで New PLS 工法で施工したトンネルの掘削断面はいずれも単心円であり, 適用したスリットコンクリートも無筋コンクリートである。しかし, 本工法を大断面トンネルあるいは多心円断面トンネルに適用するためには, 支保部材の曲げあるいは引張荷重に対する十分な耐力あるいは変形性能を付与することが重要となる。これに対し, 鋼製支保工を併用するなどの施工方法で対処する方法が行われている。一方, スリットコンクリート自身の性能改善により対処する方法として, 鋼繊維に代表されるような短繊維を使用し, 鋼繊維補強スリットコンクリートとする方法が考えられる。

以上のような観点から, 本論文では, 鋼繊維補強スリットコンクリートを開発する目的で実施した実験的検討について報告する。

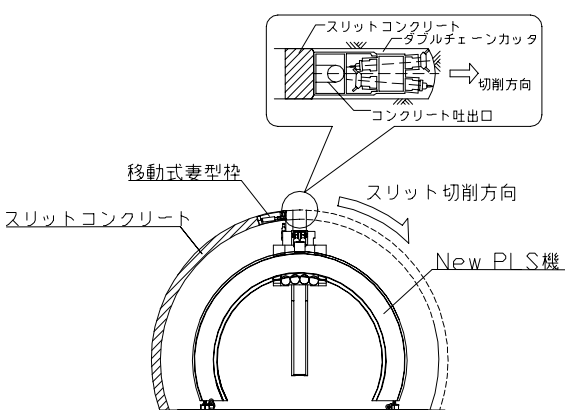


図-1 New PLS 工法の施工概要図

*1 ハザマ 技術研究所 技術研究部 土木研究室 主任研究員 博士(工学)(正会員)
 *2 ハザマ 土木事業総本部 トンネル統括部 係長
 *3 ハザマ 土木事業総本部 トンネル統括部 課長
 *4 ハザマ 技術研究所 技術研究部 部長 工修 (正会員)

表-1 使用材料

使用材料	種類	基本特性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm ³ 、比表面積:3360cm ² /g
急硬材	PLS-P	密度:2.92g/cm ³ 、カルシウムサルホアルミネート系化合物
凝結調整剤	D-300	密度:2.19g/cm ³ 、有機酸とアルカリ炭酸塩の複合体
急結剤	PLS-L	密度:1.50g/cm ³ 、特殊無機アルミン酸化合物
細骨材	田川産	密度:2.56g/cm ³ 、吸水率:1.97%、F.M.:2.34
粗骨材	足柄産	密度:2.58g/cm ³ 、吸水率:2.97%、Gmax=15mm
鋼繊維	両端フック型	長さ30mm、公称直径0.75mm、アスペクト比40
水	水道水	東京都町田市

表-2 目標品質

項目	目標品質
ベースコンクリートのスランプ	20+2.5cm
鋼繊維混入後のスランプ	17cm以上(スリット内での充填性を確保)、90分保持(施工サイクルを考慮)
急結剤混入後の自立時間	12分以内(横行速度100mm/min、妻型枠長1.2mより)
材齢6時間強度	3.0N/mm ² (掘削時に支保工としての強度を確保)
材齢28日強度	18N/mm ² (支保工として従来の吹付けコンクリートと同等)
材齢28日曲げ靱性	高強度・鋼繊維吹付けコンクリート ²⁾ と同等

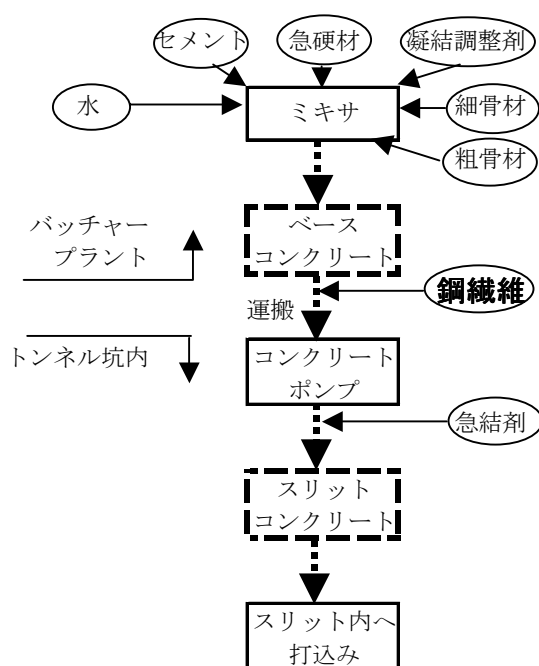


図-2 鋼繊維スリットコンクリートの製造システム

2. 試験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。従来のスリットコンクリートは、Gmax=20mmの粗骨材を使用している。これに対し、繊維長40~50mmの鋼繊維を使用した場合、配管途中に設置した急結剤混入・混合装置部で閉塞の危険性が高まると考

え、吹付けコンクリートでも実績のある繊維長30mmの鋼繊維（両端フック付き、結束タイプ）を適用することとし、粗骨材もGmax=15mmとした。なお、鋼繊維混入率は0.5Vol%および0.75Vol%（容積比）とした。

2.2 製造システムおよび目標品質

鋼繊維スリットコンクリートの製造システムを図-2に、目標品質を表-2に示す。製造システムは従来のスリットコンクリートと同様に、現場バッチャープラントでベースコンクリート（急結剤を混入する前のコンクリート）を製造し、切羽でNew PLS機に設置した急結剤混入・混合装置部分で急結剤を混入する。鋼繊維はベースコンクリート製造直後あるいは切羽で混入する方法とした。このことから、New PLS工法の施工特性から要求されるコンクリート性能、すなわち充填性、自立性および初期強度発現性は、従来のスリットコンクリートと同様であり、従来の目標品質を開発目標とした。ただし、鋼繊維混入によるスランプの低下を考慮して、ベースコンクリートの目標スランプを従来の20±2.5cmの+側（20+2.5cm）のみとした。

一方、曲げ靱性に関する開発目標は、日本道路公団で定めている、高強度・鋼繊維吹付けコンクリートの要求性能²⁾と同等とした。これは、スリットコンクリートの支保効果は、高強度・

表-3 スリットコンクリートの配合

配合種類	粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	水結合材比 W/(C+P) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
				水 W	セメント C	急硬材 P	細骨材 S	粗骨材 G	凝結調整剤	急結剤 L	鋼繊維 SF
①	20	50	45				762	942			—
②	15	50	47	200	344	56	796	905	4.8	16	—
③											40
④											
⑤			54	211	363	59	890	764	5.1	17	60

注)急硬材:P/(C+P)=14%、急結剤:(C+P)×4%、凝結調整剤:(C+P)×1.2%

鋼繊維吹付けコンクリートと同程度の性能が必要と考えたからである。

2.3 スリットコンクリートの配合

試験に用いた配合を表-3に示す。配合①はGmax=20mmの従来のスリットコンクリート配合、配合②は特殊混和材使用量を変化させずに所定の目標品質を満足するGmax=15mmとした配合、配合③は配合②に鋼繊維を0.5Vol%混入した配合、配合④および⑤は、鋼繊維混入に対し、細骨材率および単位水量を修正し、鋼繊維を0.5および0.75Vol%混入した配合である。

2.4 試験項目および方法

ベースコンクリートは、コンクリート温度が20±3℃となるように、温度20℃、湿度60%の室内で、セメント、急硬材、細・粗骨材を空練りした後、水および凝結調整剤を添加して練り混ぜた。鋼繊維は、ベースコンクリート練混ぜ後10分で添加し、スランプの経時変化を測定した。自立試験および試験体の採取は、鋼繊維混入後スランプの確認を行った後に液体急結剤を添加してスリットコンクリートを製造し、自立試験（スランプ試験）および所定の時間（材齢）で圧縮強度（JIS A 1108, φ10×20cm, 各材齢3体）および曲げ靱性試験（JSCE-G552, 10×10×40cm, 各材齢2体）を実施した。また、曲げ靱性試験は、開発目標とした日本道路公団の試験方法に準拠し、たわみ量が5mmになるまで载荷を行った。なお、試験体は材齢6時間で脱型し、所定の材齢まで20℃封緘養生とした。

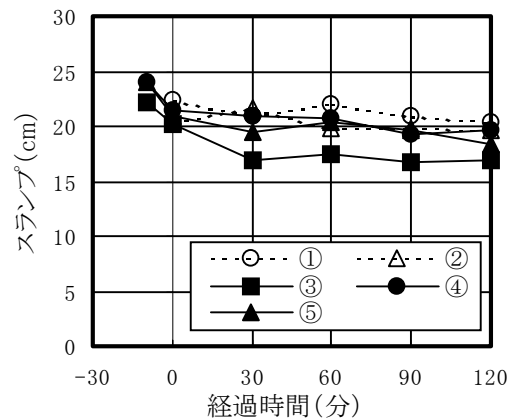


図-3 スランプ経時変化

3. 試験結果

3.1 フレッシュコンクリートの性状

ベースコンクリートのスランプ経時変化の測定結果を図-3に示す。なお、鋼繊維を混入したものは、鋼繊維混入直後のスランプ値を0分として示しており、-10分はベースコンクリートの練上がり直後の試験結果である。

鋼繊維混入によるベースコンクリートのスランプ低下は、いずれの配合においても2~3cm程度であり、本試験の範囲では配合および鋼繊維混入量による影響は小さかった。なお、鋼繊維混入に伴う空気量の変動は、鋼繊維混入量0.5Vol%（配合④）で+0.7%、0.75Vol%（配合⑤）で+1.0%であった。

スランプ保持効果は、鋼繊維混入に対する配合修正を行っていない配合③が、鋼繊維混入後30分で目標スランプの下限値である17cm程度となった。一方、配合④および⑤は鋼繊維混入

表-4 圧縮強度試験結果

配合種類	圧縮強度 (N/mm ²)			
	6時間	1日	7日	28日
①	6.6	12.9	31.7	40.6
②	6.9	12.9	33.0	41.2
④	7.0	11.1	31.6	39.1
⑤	7.2	10.7	28.6	36.4

にも拘わらず、従来のスリットコンクリートと同添加率 ((C+P) × 1.2%) の凝結調整剤を使用することにより 90 分でもスランプ保持が可能であることが確認できた。このことより、配合④あるいは⑤であれば、ベースコンクリート製造直後に鋼繊維を混入して切羽に運搬し、数十分待機した後の打込みサイクルでも施工可能であることが確認できた。この結果を受け、以降の鋼繊維補強スリットコンクリートの試験では配合④あるいは⑤について検討した。

自立試験の試験結果を図-4に示す。従来のスリットコンクリートは、ベースコンクリートに液体急結剤を混入した直後2分間程度は所定の充填性を確保するためにスランプは 20 ± 2.5cm 程度を保持し、その後、液体急結剤の効果によりスランプが低下し、12分以内に自立する(スランプ 0cm)。鋼繊維を用いた配合④においても、従来のスリットコンクリートと同添加量 ((C+P) × 4%) の急結剤を添加することにより、目標とする自立性能を有することが確認できた。

3.2 圧縮強度特性

圧縮強度試験結果を表-4に示す。いずれの配合においても、材齢6時間および28日強度は、目標強度である 6N/mm² および 18N/mm² を満足することが確認できた。しかし、材齢6時間強度は鋼繊維混入配合の方が高い圧縮強度を示すが、材齢1日以降は鋼繊維混入率が高くなるに従い圧縮強度が低くなる傾向を示した。なお、

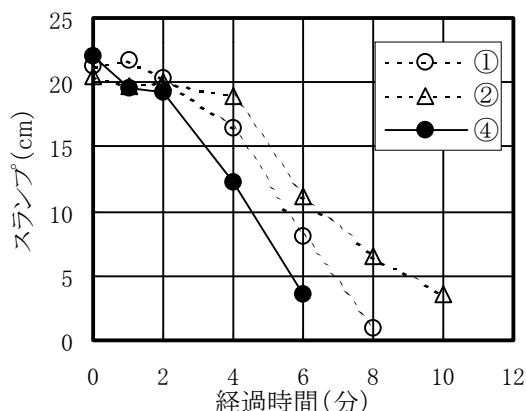


図-4 自立試験結果

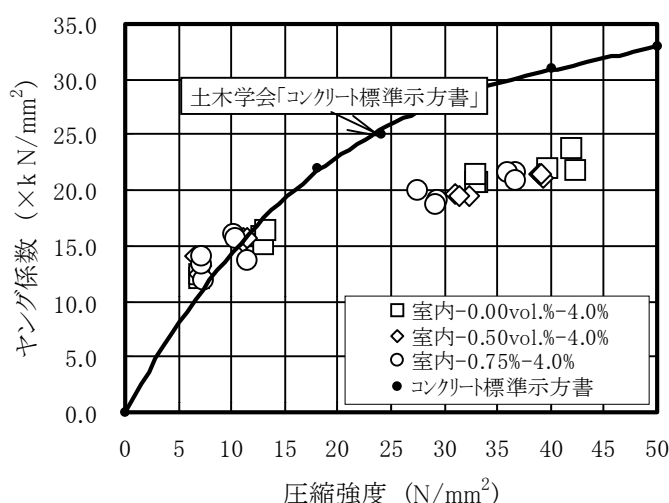


図-5 圧縮強度とヤング係数の関係

室内試験における材齢6時間強度は目標強度の2倍の強度を設定している。これは、実施工で用いる急結剤混入・混合装置による混合性能は、室内ミキサと比較して混合性能が劣ること。さらには保土ヶ谷トンネルでの施工管理試験結果³⁾も参考にして定めた。

鋼繊維補強スリットコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を図-5に示す。材齢6時間および1日(20N/mm²程度以下の範囲)では、コンクリート標準示方書に示された値よりもヤング係数が大きくなる傾向を示すが、材齢7日以降(20N/mm²程度以上の範囲)では、逆にヤング係数が小さくなる傾向を示した。この傾向は、鋼繊維混入の有無には関係ないことから、粗骨材の最大寸法が小さいことおよび細骨材率

表-5 曲げ強度および曲げ靱性試験結果

配合種類	上段: 曲げ強度 (N/mm ²)		
	中段: 曲げ靱性係数 (N/mm ² ・たわみ2mm)		
	下段: 曲げ靱性係数 (N/mm ² ・たわみ5mm)		
	材齢6時間	材齢1日	材齢28日
④	1.82	3.18	5.16
	1.43	1.68	3.69
	1.33	1.35	2.72
⑤	2.36	3.03	4.53 *
	2.05	2.60	3.87 *
	1.54	2.14	3.29 *

*1本はスパン外での破断のため1本のデータ

が高いことなどが影響していると考えられる。

3.3 曲げ強度および曲げ靱性特性

曲げ強度および曲げ靱性試験結果を表-5 および図-6~11に示す。なお、曲げ靱性係数は以下の式により求めた。

$$f_b = T_b / \delta_{tb} \cdot l / bh^2 \quad (1)$$

ここに、 f_b : 曲げ靱性係数 (N/mm²)

T_b : δ_{tb} までの荷重-たわみ曲線に
囲まれる面積 (N・mm)

δ_{tb} : 2mm および 5mm のときのたわ
み量

l : スパン (mm)

b : 破断面の幅 (mm)

h : 破断面の高さ (mm)

いずれの鋼繊維混入率においても、曲げ強度は材齢1日までの初期の伸びが大きく、材齢1日において材齢28日の約6割にあたる曲げ強度の発現が得られた。鋼繊維混入に伴う曲げ靱性の改善効果は、図-6および7に示されるように、材齢6時間より顕著であり、鋼繊維混入率0.75Vol%では、ひび割れ発生後も荷重が増大していく傾向が認められた。また、いずれの材齢においても曲げ靱性係数は鋼繊維混入率の高いものほど大きくなる傾向を示しており、この傾向は材齢初期の方が顕著であった。

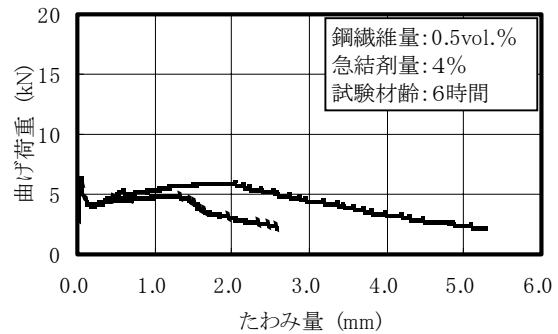


図-6 曲げ荷重-たわみ曲線
(材齢6時間-0.5Vol%)

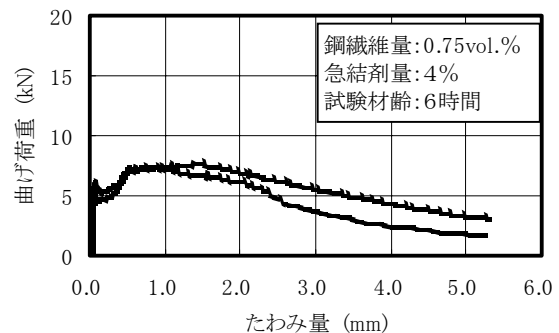


図-7 曲げ荷重-たわみ曲線
(材齢6時間-0.75Vol%)

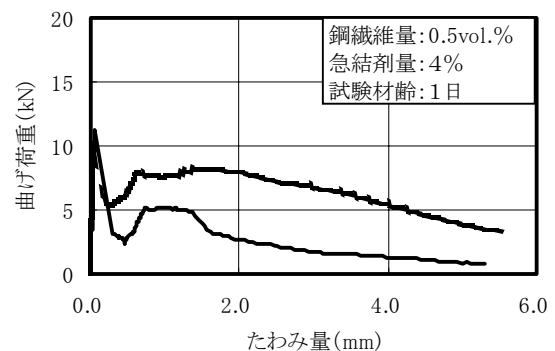


図-8 曲げ荷重-たわみ曲線
(材齢1日-0.5Vol%)

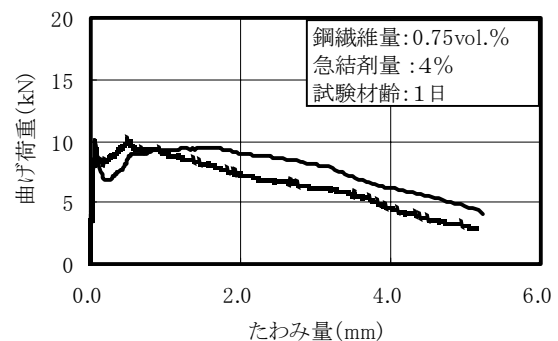


図-9 曲げ荷重-たわみ曲線
(材齢1日-0.75Vol%)

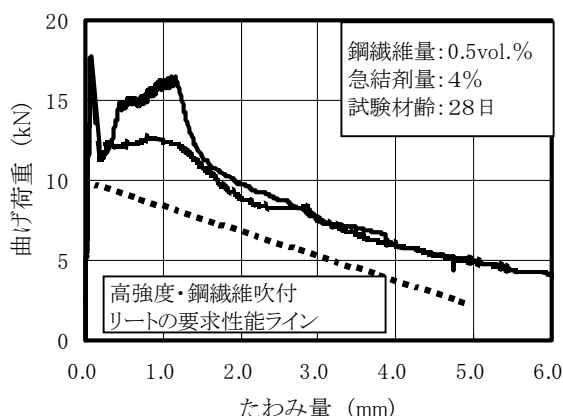


図-10 曲げ荷重-たわみ曲線
(材齢28日-0.5Vol%)

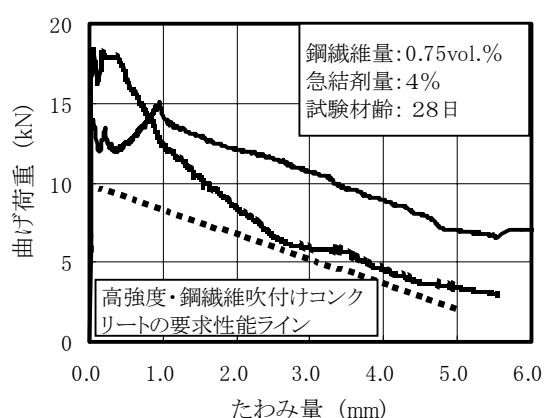


図-11 曲げ荷重-たわみ曲線
(材齢28日-0.75Vol%)

図-10および11には材齢28日の曲げ靱性試験結果に開発目標とした高強度・鋼繊維吹付けコンクリートの要求性能ラインを比較として示した。

これらの結果より、鋼繊維混入率0.5Vol%でも目標品質を十分に満足できる曲げ靱性特性を有していることが確認できた。一般的に、高強度・鋼繊維吹付けコンクリートでは繊維混入率0.75Vol%~1.0Vol%程度の鋼繊維補強コンクリートが使用されている。しかし、鋼繊維補強コンクリートを吹付け施工した場合、鋼繊維のリバウンド(はね返り)率が他の材料、例えばセメント、粗骨材よりも高いため、硬化後の(付着した)鋼繊維補強コンクリートの鋼繊維混入率が吹付け施工前の混入率と比較して低下する。これに対し、鋼繊維補強スリットコンクリート

の場合、充填施工となるために鋼繊維のリバウンド(はね返り)による減少がないことが影響していると言える。

以上のことから、急硬性コンクリートにおいても鋼繊維混入により曲げ靱性は大きく改善され、その効果は繊維混入率の増大に伴い大きくなることが確認された。また、開発目標とした曲げ靱性は、鋼繊維混入率0.5Vol%で満足することも確認できた。

4. まとめ

本研究では、New PLS工法を大断面あるいは多心円断面トンネルに適用することを目的に急硬性コンクリート(スリットコンクリート)への鋼繊維の適用を検討した。本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 鋼繊維を用いた場合にも、従来のスリットコンクリートと同様のスランブ保持性能、自立性能および初期強度発現性を有する鋼繊維補強スリットコンクリートの製造が可能である。
- (2) 鋼繊維補強スリットコンクリートの曲げ靱性性能は、開発目標とした高強度・鋼繊維吹付けコンクリートの要求性能を満足する性能を有している。

参考文献

- 1) 例えば、谷口裕史、荒木田憲、長沢教夫、青山昌二：切削即時充填式プレライニング工法用コンクリートの配合選定、コンクリート工学年次論文集、第23巻、第2号、pp.1177-1182、2001.6
- 2) 日本道路公団：第二東名・名神高速道路トンネル施工管理基準、1999.7
- 3) 本村均、篠崎秀敏、谷口裕史：New PLS工法による大断面トンネル拡幅工事-横浜新道(拡幅)保土ヶ谷トンネル-、コンクリート工学、Vol.34、No.9、pp.21~30、1996