

繊維補強ポリマーセメントコンクリートの開発

— 新設歩道橋 鋼床版舗装コンクリートへの適用 —

伊藤 正憲* 早川 健司* 玉井 真一** 前田 欣昌**

要約: 歩道橋の鋼床版上に打設する舗装コンクリートに乾燥収縮等を原因とするひび割れの発生によって歩道橋としての要求性能である歩行性、美観、および耐久性等に影響を及ぼすことが考えられた。そこで、ひび割れの低減と分散、曲げ靱性、防水性等の向上を目的として各種の材料評価試験を実施した。その結果、ネット状のポリプロピレン繊維は、施工性、分散性が良好であり、収縮低減剤との併用によりひび割れ発生日数が無添加の2~3倍程度遅延させることができ、また、ひび割れ幅の進展も約20%程度抑制できることが分かった。また、ポリマーとしてアクリル樹脂エマルジョンを使用した場合(P/C=6%)、吸水・透水性能を改善できることが分かった。そして、これらの材料を選定した配合条件で新設の歩道橋鋼床版上舗装コンクリートに適用した結果、良好な施工性を確保して打設することができた。

キーワード: ひび割れ, ポリプロピレン繊維, ポリマー, 収縮低減剤, 鋼床版

- 目次:**
- | | |
|--------------|-------------|
| 1. はじめに | 4. 実構造物への適用 |
| 2. 検討概要 | 5. まとめ |
| 3. 試験結果および考察 | |

1. はじめに

コンクリートに混入する短繊維、特に有機合成繊維はひび割れ分散や進展の抑制、耐衝撃性の向上等が期待でき、さらに、最近では、高架橋等のコンクリート構造物の剥離・剥落防止を期待できる材料として注目されてきている。有機合成繊維をコンクリートやモルタルへ混入する場合、一様に分散せずファイバーボールと言われる繊維の固まりができることがあり、これを防ぐために特殊な分散機を使用することがある。しかし、なるべくであればミキサやアジテータ車等へ直接投入することによって均一に分散することが望ましい。

一方、コンクリートの材料としてポリマーを使用することにより曲げ強度、接着強度、防水性、耐薬品性、耐衝撃性等が向上すると言われており、有機合成繊維と同様に最近では、薄層舗装やコンクリート構造物の補修・補強材料として盛んに使用されている。

本研究で検討対象としたのは、新設の歩道橋の鋼床版上に適用するコンクリートであり、鋼床版上に厚さ30~100mmのコンクリートを打設し、橋面に300×300×20mmの磁器質タイルを貼り付ける設計とした。しかし、鋼床版上に一般的なコンクリートを打設した場合、主に乾燥収縮に起因するひび割れに伴い、橋面に貼り付けたタイルにひび割れが発生し、美観、歩行性を低下させるだけでなく、雨水等の浸透により鋼床版自体の耐久性も低下させることが考えられた。

そこで、本研究では、ミキサやアジテータ車に直接投入することができる有機合成繊維とポリマーおよびコンクリートの収縮を低減する収縮低減剤の使用を検討し、これらの材料が主に硬化後の物性にどのような影響を及ぼすかを検討することによって、新設の歩道橋に適用する舗装コンクリートの最適な使用材料、配合条件等について検討したものである。

また、本報では、実際に新設の歩道橋の鋼床版上舗装コンクリートに選定した繊維補強ポリマーセメントコンクリートを適用した結果についてもあわせて報告する。

2. 検討概要

2.1 使用材料

本検討で使用した材料を表1に示す。繊維は、一般的な有機合成繊維と異なり、写真1に示すポリプロピレン繊維をネット状に結合加工したものを使用した。この繊維は表面に特殊な親水処理を施すことにより、従来の有機合成繊維で問題となっていた分散性と付着性を改善した繊維であり、特殊な分散機等は使用せず、現場においてアジテータ車に直接投入することが可能であり、施工性を改善させた繊維である。なお、本検討では繊維長19mmのものを使用した。

ポリマーは全固形分濃度45%のアクリル樹脂エマルジョンを使用した。このポリマーは、セメント混和用開発されたものであり、コンクリートに混和した場合もゲル化しにく

く、混和性が良好であり、さらに、あらかじめ消泡剤が調合されていることなどを特徴とするポリマーである。

さらに、本検討においては、コンクリート組織自体の毛細管空隙中の液相における表面張力を大幅に低減することによりコンクリートの収縮を抑制する収縮低減剤の使用を検討した。なお、粗骨材は、検討対象とした鋼床版上の舗装厚が30～100mmであったため、最大寸法13mmの粗骨材を使用した。

表1 使用材料

項目	記号	種類/諸元	
セメント	C	普通 ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
細骨材	S	細目:君津産 粗目:八王子産	密度2.64g/cm ³ 細粗=3:7
粗骨材	G	八王子産碎石	密度2.64g/cm ³ G _{max} 13mm
ポリマー ディスパージョン	P	アクリルエマルジョン	全固形分45.0%
繊維	PPF	ポリプロピレン ネット状繊維	L=19mm
収縮低減剤	SRA	低級アルコールのアルキルオキド付加物	
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系	
消泡剤	MA	ポリアルキレングリコール誘導体	

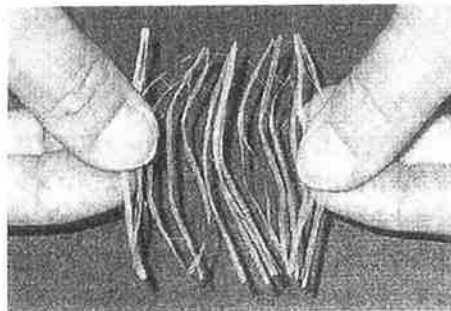


写真1 ネット状ポリプロピレン繊維

2.2 配合

本検討で変化させた要因と水準を表2に、配合表を表3に示す。検討した配合要因は、ポリマーセメント比(P/C)、繊維混入率、収縮低減剤添加率であり、それぞれ標準添加量と材料コストを考慮して3水準に設定した。配合は、一般的な鋼床版上に打設するコンクリートの配合条件等を参考にして水セメント比(W/C)を40%、細骨材率(s/a)を65%、単位セメント量を450kg/m³とした。目標としたコンクリートのコンシステンシーは、施工性を考慮してスランプ18±2.5cm、空気量5±1.5%とし、高性能減水剤および消泡剤の使用量で調整した。なお、液体である収縮低減剤は、単位水量の一部として配合計算した。

2.3 練混ぜ方法および試験体採取

本検討では、新設の歩道橋に適用することを目的としたため、開発段階においては現場での打設状況を考慮して練混ぜと試験体採取および各種試験を実施した。

試験で想定したコンクリートの出荷と打設の状況は、生コンプラントで繊維以外の材料で練混ぜたベースコンクリート、および現着時にアジテータトラックに所要量の繊維を直接投入した繊維混入コンクリートの2つの状態である。従って、図1に示すフローで練混ぜおよび試験体の採取を実施し、各種材料の影響を検討した。なお、使用したミキサは50リットルの強制練りパン型ミキサである。

表2 検討要因と水準

要因	水準
P/C(%)	0, 3.0, 6.0
PPF混入率(vol%)	0, 0.15, 0.3
SRA添加量(kg/m ³)	0, 3.0, 6.0

表3 示方配合表(W/C=40%, s/a=65%)

No.	P/C (%)	PPF (vol%)	SRA (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)					SP (C×%)	MA (C×%)
				W	C	S	G	P*		
1	0	0	0	180	450	1077	582	0	1.2	0.02
2	3	0	0	180	450	1054	570	13.5	0.6	0.02
3	6	0	0	180	450	1030	555	27	0.5	0.02
4	0	0.30	3	177	450	1077	582	0	0.8	0.04
5	3	0.30	3	177	450	1054	570	13.5	0.6	0.06
6	6	0.30	3	177	450	1030	555	27	0.9	0.06
7	0	0.15	6	174	450	1077	582	0	0.6	0.06
8	3	0.15	6	174	450	1054	570	13.5	0.6	0.06
9	6	0.15	6	174	450	1030	555	27	0.6	0.04

*: 全固形分の質量

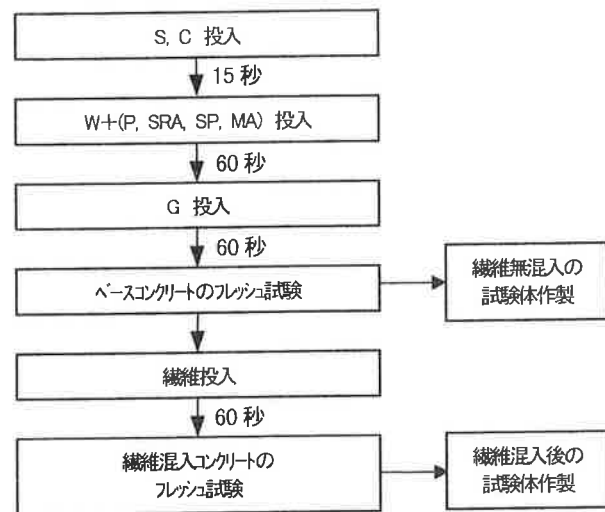


図1 練混ぜ方法と試験体採取のフロー

2.4 試験項目および方法

実施した試験項目および方法を表4に示す。なお、試験の項目は使用材料の特徴を評価できる試験を選定した。ポリマーを混和することによる影響を評価するために吸水、透水試験を、繊維および収縮低減剤の影響を評価するために曲げタフネス試験、長さ変化率試験、ひび割れ拘束試験等を実施した。

表4 試験項目と方法

試験項目	準拠/条件	材齢・試験体・養生等	
スランプ	JIS A 1101		
空気量	JIS A 1128		
吸水率	全浸吸水 24時間まで	材齢28日 φ10×5cm	所定材齢 まで 20℃,60%RH の室内で封 緘養生
透水	加水圧力 0.3N/mm ² 1時間	材齢28日 φ10×5cm	
圧縮強度	JIS A 1108	材齢7, 28日	
ヤング係数	JSCE G502	φ10×20cm	
曲げ たわみ	JSCE G552	材齢28日 □10×10×40cm	
ひび割れ 拘束	JIS 原案「コン クリートの乾燥収 縮ひび割れ 試験方法」	コンタクトゲージ法に より測定	材齢7日 まで 湿布養生 以後、20℃ 60%RHの 室内に暴露
長さ 変化率	JIS A 1129	□10×10×40cm	

3. 試験結果および考察

3.1 繊維を混入した場合のスランプの変化

試験練りの段階で、高性能減水剤の使用量を一定とし、繊維を混入していないベースコンクリートのスランプと、続けて繊維を投入した後のスランプを測定した結果、Vf=0.15%で2.5~4.5cm、Vf=0.30%で4.0~4.5cmのスランプ低下となり、繊維混入率が高くなるに従い投入前後のスランプロスが大きくなった。

3.2 吸水・透水性能

ポリマー混和の影響を評価するためNo.1~3の配合を対象として材齢28日において吸水率試験および透水試験を実施した。図2に各コンクリートの24時間までの吸水率を示す。P/C=3%とした場合の吸水率はP/C=0%とほぼ同等の吸水率となった。一方、P/C=6%とすると吸水特性が改善される傾向にあった。

図3にP/Cと透水性を評価できる初期拡散係数を示す。ここで、初期拡散係数とは村田ら²⁾が提案している式(1)により算出したものである。その結果、P/Cが大きくなるほど初期拡散係数は小さくなる傾向、すなわち水が通りにくくなる傾向にあった。このようにポリマーの混和によって吸水・透水性能が改善されたことは、一般的に言われているようにコンクリートの内部に存在する比較的大きな細孔がポリマーで充填または連続ポリマーフィルムでシールされた組織構造になったことが影響しているものと考えられた。

$$\beta \sigma^2 = \alpha \frac{Dm^2}{4t\xi^2} \quad (1)$$

ここに、 $\beta \sigma^2$: 初期拡散係数(m²/sec)
 Dm : 平均浸透深さ(mm)
 t : 水圧を加えた時間(sec)
 α : t に関する補正係数
 ξ : 水圧に関する係数

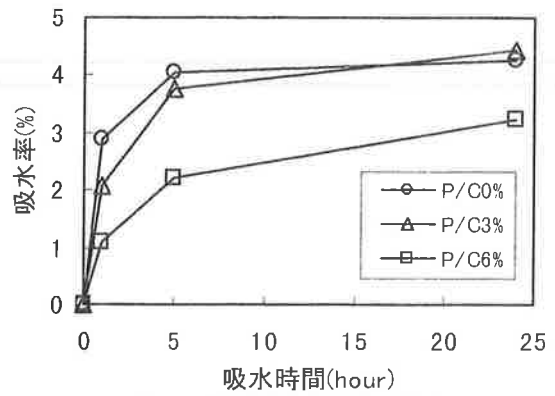


図2 吸水時間と吸水率の関係

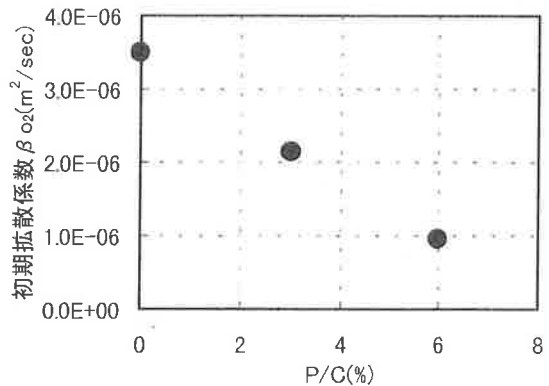


図3 P/Cと初期拡散係数の関係

3.3 強度、ヤング係数

図4に各配合の材齢7日、28日の圧縮強度を示す。繊維、ポリマー、収縮低減剤を使用していないNo.1の材齢28日の圧縮強度は58.5N/mm²であった。これに繊維、ポリマー、収縮低減剤を混和した場合、圧縮強度は若干低下する傾向にあった。特に、図5に示すようにP/Cが高くなるほど、材齢28日で40N/mm²以上の強度が得られているが、若干圧縮強度は低下する傾向にあった。

図6に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。圧縮強度に対するヤング係数の比はRC示方書の値³⁾よりも若干低くなる傾向にあった。しかし、RC示方書に示されている値は、単位容積質量を考慮することができない。そこで、図7に示すようにヤング係数の推定において単位容積質量を考慮することができるNewRC式⁴⁾を適用した。

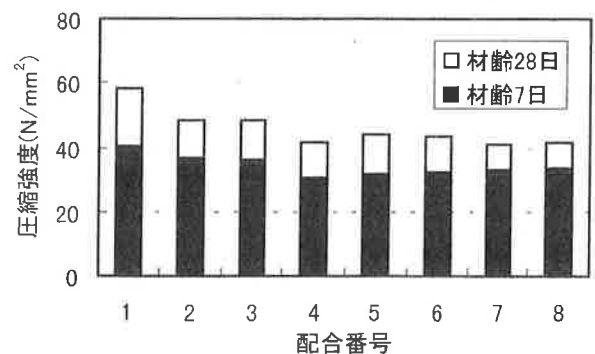


図4 材齢7日、28日圧縮強度

この場合、実測のヤング係数は推定したそれとほぼ同等となった。このことによりいずれの配合においてもヤング係数の低下には s/a や G_{max} 等が影響しているものと考えられた。しかしながら、本検討の対象構造物が鋼床版上のコンクリートであるため、ヤング係数が小さくなることにより曲げ剛性が低くなり、たわみ追従性がより期待できるようになるとも考えられた。

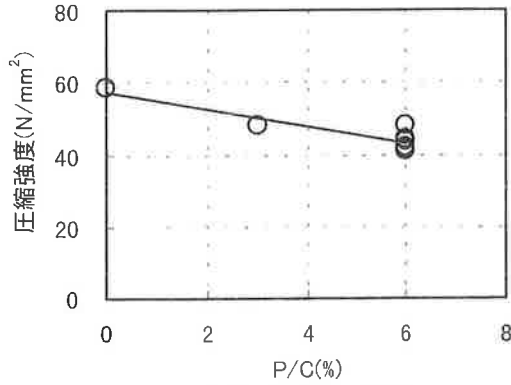


図5 P/Cと圧縮強度の関係

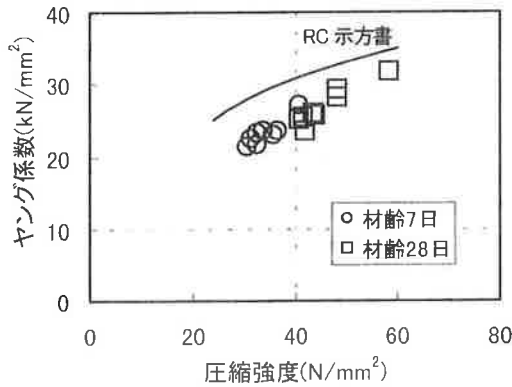


図6 圧縮強度とヤング係数の関係

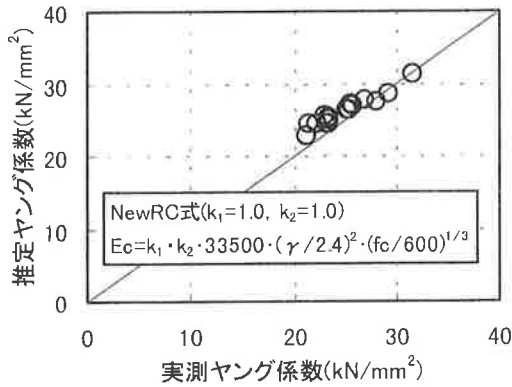


図7 実測と推定ヤング係数の関係

34 曲げ強度、曲げタフネス

材齢 28 日における曲げ強度は、繊維混入率、収縮低減剤添加量の違いによる明確な影響は無く $4.6 \sim 5.5 \text{ N/mm}^2$ 程度であった。図 8 に曲げタフネス試験結果である荷重—たわみ曲

線を、図中に各コンクリートの曲げ靱性係数を示す。試験の結果、繊維を混入したものは、最大荷重に達した後もある程度の耐荷力を残し、その程度は繊維混入率が高くなるほど大きかった。従って、曲げ靱性係数は、 $V_f=0.15\%$ としたもの (No.7, 8)が平均 0.12 N/mm^2 程度、 $V_f=0.3\%$ としたもの (No.4, 6)が平均 0.18 N/mm^2 程度となり、混入率が高くなるに従い、曲げ靱性が改善される傾向にあった。しかし、鋼繊維を使用した一般的なコンクリートと比較した場合には、ポリプロピレン繊維のヤング係数が鋼繊維の $1/40$ 程度と小さいため曲げ靱性の改善効果は比較的小さいものとなった。

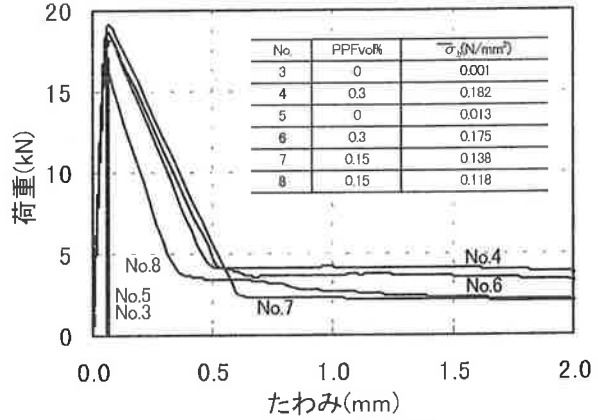


図8 荷重—たわみ曲線

35 長さ変化

図 9 に乾燥期間と自由収縮ひずみの関係を示す。乾燥期間 180 日までの自由収縮ひずみは収縮低減剤を添加することにより小さくなり、無添加のものと比較した場合、 6 kg/m^3 の添加で約 $10 \sim 15\%$ 収縮が抑制される傾向にあった。一般的には収縮低減剤の使用により $20 \sim 40\%$ の抑制効果が期待できると言われているが、長さ変化率試験で対象とした配合がポリマーを混和したもののみであったため、基準としている No.3 のコンクリートもポリマーの効果によりある程度収縮量が抑制されていたことにより一般的な抑制効果と比較してその程度が小さくなったものと考えられた¹⁵⁾。

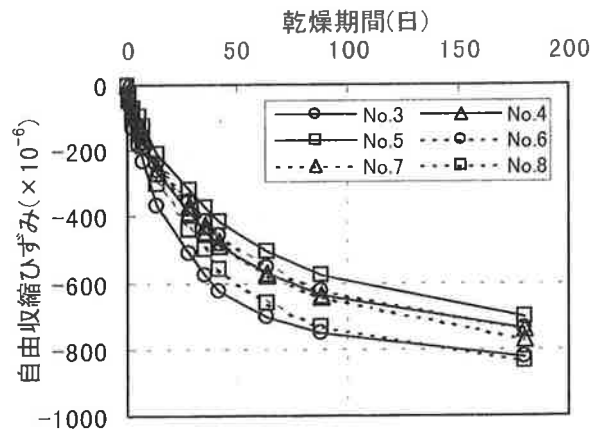


図9 乾燥期間と自由収縮ひずみの関係

3.6 ひび割れ

図 10 にひび割れ拘束試験の結果である乾燥期間と拘束鋼材のひずみの関係を、表 5 には各コンクリートのひび割れ発生日数の平均値を示す。ただし、図 10 には、ひび割れ発生材齢にばらつきがあるため、安全側である最も早くひび割れが発生した試験体のデータを示した。ひび割れが発生するまでの日数は、収縮低減剤の添加量が多くなるほど長くなる傾向にあり、約 2~3 倍程度長くなる傾向にあった。

図 11 にひび割れ幅の経時変化を示す。なお、ひび割れ幅は自由収縮ひずみを差し引いたものである。また、No.5 は試験体 3 体ともに計測した区間以外にひび割れが発生したため、データから除外した。

ひび割れが発生した時点でのひび割れ幅はいずれも約 0.1mm 程度であった。ひび割れ発生後のひび割れ幅の進展は収縮低減剤の添加量が多いほど、また、繊維混入率が大きくなるほど抑制される傾向にあり、SRA=6kg/m³、Vf=0.3%とした No.6 は無添加の No.3 と比較して約 20%程度ひび割れ幅の進展が抑制されていた。

しかし、図 11 中の長期乾燥期間における傾きに繊維混入率による影響がほとんど見られなかった。これは一般的な鋼繊維と比較した場合、ポリプロピレン繊維自体のヤング係数が小さいことに起因するためと考えられた⁹⁾。

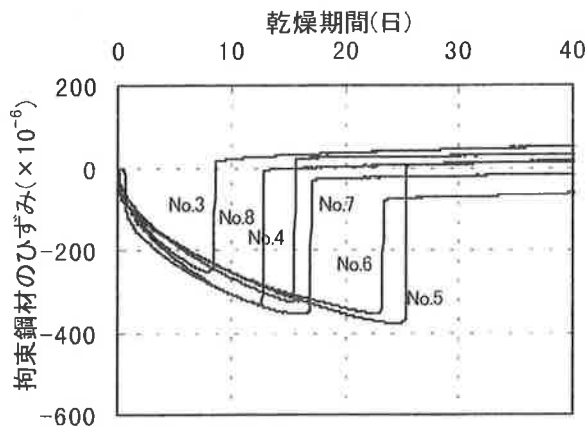


図 10 乾燥期間と拘束鋼材ひずみの関係

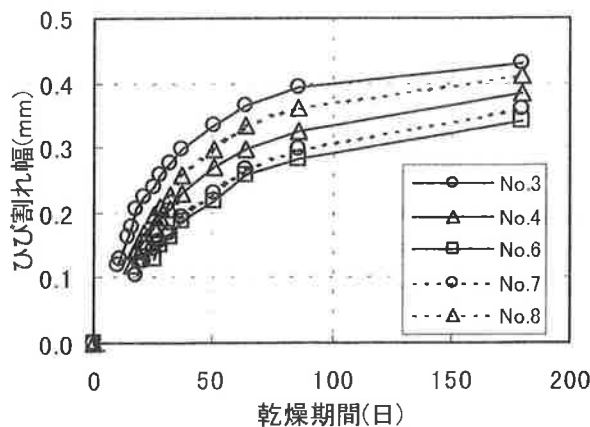


図 11 乾燥期間とひび割れ幅の関係

表 5 ひび割れ発生日数の平均

No.	3	4	5	6	7	8
SRA(kg/m ³)	0	3	6	6	6	3
繊維(vol%)	0	0.3	0	0.3	0.15	0.15
ひび割れ発生日数(日)	9.5	15.6	26.5	26.7	18.7	15.1

3.7 繊維の分散性

今回検討した繊維を混入したコンクリートの打設は、現着時のアジテータ車に所要量の繊維を直接投入することを想定した。この場合、何分の攪拌時間で繊維が均一に分散するかを確認しておくことが必要である。そこで、積載量 2m³で運搬したスランプ 22cm のコンクリートに直接投入口から繊維を手投入し、一定の排出量毎(0.3m³毎)に試料を採取し繊維の分散性を洗い試験により評価した。なお、分散性の評価では Vf=0.3%とし、ポリマー、収縮低減剤等は使用しなかった。

表 6 に繊維の洗い試験の結果を示す。なお、このデータは繊維投入後の攪拌時間を高速 5 分とした場合の結果である。アジテータ車から 6 回の試料を採取し、各繊維混入率を測定した結果、繊維の開繊状態も良好であり、変動係数 3.5%と良好な分散性が確保できることが確認できた。従って、実際の打設では、繊維投入後 5 分以上の高速攪拌が必要であることが確認できた。

表 6 繊維洗い試験結果

採取 No.	1	2	3	4	5	6
繊維(vol%)	0.29	0.30	0.29	0.29	0.32	0.29

設計 Vf=0.30%、採取平均:0.30%、変動係数:3.5%

4. 実構造物への適用

4.1 構造物概要

対象とした構造物は、国道上下 6 車線および高速道路上下 4 車線の合計 10 車線を横断する新設の歩道橋であり、フィレンデール形式の橋桁である。橋長は 49.5m、主構幅は 4.5m、主構高は 3.5m であり、歩道橋の橋面には鋼床版上のタイル舗装とし、橋軸直角方向に排水勾配を確保するために厚さ 30~100mm のコンクリートを打設するように設計したものである。歩道橋の主桁構造図を図 12 に示す。

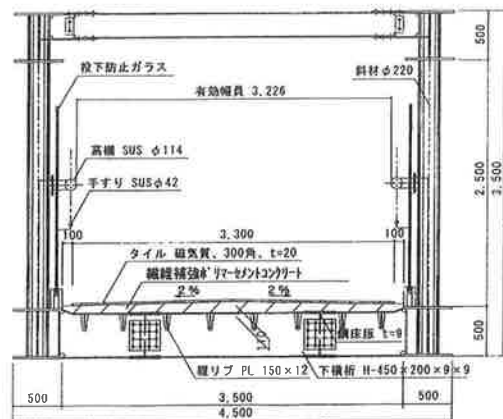


図 12 歩道橋の主桁構造図

4.2 打設状況

実際の打設には、配合 No.6 を適用し、設計打設数量は約 16m³であった。従って、4m³積みで 4 車のアジテータ車で運搬し、現着時に各車 12kg の繊維を投入して攪拌した後、ポンプ圧送(配管約 80m)して打設した。表 7 に品質管理項目とその結果をまとめて示す。実際の打設では、平均運搬時間約 55 分、繊維投入後も開発段階で想定したスランプロスと同じ 4.5cm となり、想定していたコンシステンシーを確保することができた。

表 7 品質管理項目と結果

項目	時期	基準	1 車目	3 車目
スランプ試験	出荷時	23~24cm	23.5	23.5
	現着時	22~23cm	22.5	-
	繊維	18±2.5cm	18.0	19.5
空気量試験	投入後	5±1.5%	6.5%	6.5%

4.3 硬化物性の確認

表 8 に打設時に採取した試料の圧縮、曲げ強度試験結果を示す。圧縮強度は開発段階での結果よりも若干大きくなり、曲げ強度は同等となった。また、曲げ靱性係数は若干低くなった。しかし、最大荷重に達した後の耐荷力が開発段階での試験の結果と等しくなった。

以上のことより、実際に打設したコンクリートは目的としたものが良好な状態で打設できたものと考えられた。

謝 辞

本検討を実施するにあたり三菱化学産資(株)手塚氏、武田薬品工業(株)南田氏、(株)ジェフエック山代氏ほか、関係各位のご協力に感謝致します。

参考文献

- 1) ポリマーセメントモルタル技術資料, 情報開発, 1988.1
- 2) 村田二郎他: コンクリートにおける加圧浸透流に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.1, pp.61-74, 2000.1
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編)
- 4) コンクリート便覧, 技報堂出版, p.242, 1996.2
- 5) コンクリート用混和材料の規格と性能評価, 日本コンクリート工学協会九州支部, pp.78-79, 1999.11
- 6) 原田用久他: 新交通システム走行路のひび割れ対策に関する実験的研究, 土木学会第 49 回年次講演概要集, V-501, pp.1002-1003, 1994.9

The APPLICATION OF FIBER REINFORCEMENT POLYMER CEMENT CONCRETE TO THE STEEL PLATE FLOOR PAVEMENT CONCRETE.

M.Ito, K.Hayakawa, S.Tamai
And Y.Maeda

The pavement concrete placed in the steel floor version thought the occurrence of the crack, which originated in dry shrinkage. It was thought to be an occurrence of the crack to influence walking, the fine sight, and durability. In this report, various material evaluation examinations were executed aiming at the improvement of decrease of the crack, decentralization, bend, and the waterproof. The targeted material is Polymer, and a shrinkage reduction agent for the cement mixture. In addition, the use for a polypropylene fiber net, which could be constructed reasonable, was examined.

In this report, the fiber reinforcement polymer cement concrete is applied on a result of the indoor examination by which the material is selected and an actual pedestrian bridge steel floor version. It reports on the result of executing the quality control examination.

表 8 実施工打設コンクリートの試験結果(N/mm²)

項目		室内(No.6)	実施工
圧縮強度	28d	43.6	49.4
曲げ強度		5.3	5.3
曲げ靱性係数		0.18	0.15

5. まとめ

適用対象を鋼床版上に打設する舗装コンクリートとして、繊維補強ポリマーセメントコンクリートについて、主に、吸水・透水性、ひび割れ、曲げ靱性等について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) ネット状に加工されたポリプロピレン繊維は、施工性が優れており、また、分散性も良好であった。
- 2) ポリマーの混和により吸水・透水性が大きく改善される傾向にあったが、圧縮強度は、P/C が大きくなるほど低下する傾向にあった。
- 3) 繊維の混入により、曲げ靱性が改善され、その程度は繊維の混入率が高いほど大きかった。
- 4) 繊維の混入によるひび割れ発生までの期間に及ぼす影響は見られなかった。しかし、収縮低減剤の使用によりその期間が 2~3 倍程度遅れる傾向にあった。
- 5) ひび割れ発生後のひび割れ幅の進展は、収縮低減剤、繊維の添加量が多いほど抑制される傾向にあり、SRA=6kg/m³、Vf=0.3%で 20%程度の抑制効果があった。