

コンクリート舗装したRC床版の耐疲労性の評価および 建研式引張試験による界面の付着強度

日大生産工(院) ○小林稔 日大生産工 阿部忠
鹿島道路(株) 児玉孝喜 住友大阪セメント(株) 小林哲夫

1. はじめに

近年、道路橋の橋面舗装はアスファルト舗装から耐久性の向上が図れるコンクリート舗装が進められている¹⁾。そこで本研究は、材齢 1 日（24 時間）で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 以上となる舗装材として早強セメントに超早強性低収縮型混和材および有機繊維を配合した特殊セメントを提案した。また、コンクリート舗装においては接着剤を塗布した舗装技術も提案し、コンクリート舗装した RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性の評価、付着面の引張強度を検証し、実用性を評価した。

2. コンクリート舗装材および材料特性値

2.1 コンクリート舗装材料

(1) 超速硬セメントを用いた舗装材

高速道路や一般国道、交通量の多い地方道では、8 時間の交通規制の中で施工が行われることから、超速硬セメント系コンクリートが用いられている。ここで、既往の研究²⁾で報告されている超速硬セメントを用いた鋼繊維補強コンクリート（SFRC）舗装材の配合を表-1示す。また、超速硬セメントを用いた SFRC の発現強度を表-2に示す。

表-1より、鋼繊維には $\phi 0.6\text{mm}$ 、長さ 30mm の鋼繊維を $1.27\text{Vol.}\%$ (100kg/m^3) で混入した。水セメント比は 39.5% である。次に、表-2より凝結始発時間は 17 分、終結時間が 25 分程度であり、表面仕上げに要する時間が短いことから、熟練した技能者の確保も必要となる。材料特性値である圧縮強度は材齢 3 時間で 26.9N/mm^2 である。よって、施工時間 8 時間内施工に適した材料である。また、材齢 28 日の圧縮強度は 62.3N/mm^2 であり、割裂試験による引張強度および一面せん断試験によるせん断強度はそれぞれ 6.95N/mm^2 、 13.21N/mm^2 である。

(2) 特殊セメントを用いた舗装・基層材

一般的な橋面コンクリート舗装は、施工量ならびにコスト面から 1.5 日から 2 日間程度での施工

表-1 コンクリート舗装材の配合条件

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
			C	W	G	S	F		
超速硬セメント	39.5	51.2	430	170	851	858	100.0	2	0.003
特殊セメント	38	55	434	165	919	789	3.64	2	0.003

表-2 コンクリート舗装材の強度発現

試験項目		超速硬セメント	特殊セメント
凝結時間	始発	17min.	33min.
	終結	25min.	40min.
圧縮強度	2時間	19.2N/mm^2	
	3時間	26.9N/mm^2	
	4時間	33.6N/mm^2	
	1日	—	37.8N/mm^2
	7日	—	59.2N/mm^2
	28日	62.3N/mm^2	64.2N/mm^2

事例が多い。そこで、特殊セメントを用いたコンクリート舗装材・基層の要求性能は、1.5 日から 2 日間程度の連続施工を想定して材齢 24 時間で圧縮強度が 24N/mm^2 以上となる配合条件とした。ここで、配合条件を表-1に併記した。また、発現強度を表-2に併記した。

表-1に示す配合条件は、早強セメントに超早強性低収縮型混和材を配合した特殊セメントに有機繊維を $1.27\text{Vol.}\%$ で混入し、水セメント比は 38% にして、36 時間以内に交通開放が可能な材料とした。この材料を PFRC とする。

表-2より、PFRC の凝結始発時間は 33 分、終結時間が 40 分程度であり、表面仕上げに要する時間が超速硬セメントを用いたコンクリート舗装材に比べて 2 倍程度長いことから、施工性が良い材料であると言える。材齢 24 時間の圧縮強度は 37.8N/mm^2 となり、要求性能である 24N/mm^2 を満足している。材齢 28 日では 64.2N/mm^2 である。

2.2 2種類の接着剤の特性

(1) コンクリート表面補修用浸透性接着剤³⁾

従来のコンクリート舗装および SFRC 上面増厚

Evaluation of Fatigue Durability of Concrete Paving RC Slab and Bond Strength of Interface by Adhesion Test

Minoru KOBAYASHI, Tadashi ABE, Takayoshi KODAMA and Tetsuo KOBAYASHI

表-3 接着剤の特性値

項目	浸透性接着剤	付着用接着剤
外観	主剤 硬化剤	無色液状 無色液状 白色ペースト状 青色液状
混合比	10 : 3	5 : 1
硬化物比重	1.2	1.42
圧縮強度	104.4N/mm ²	102.9N/mm ²
圧縮弾性係数	3,172N/mm ²	3,976N/mm ²
曲げ強さ	92.8N/mm ²	41.6N/mm ²
引張せん断強さ	58.2N/mm ²	14.9N/mm ²
コンクリート 付着強さ	2.6N/mm ²	3.7N/mm ² 以上 または母材破壊

表-4 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	使用鉄筋 (SD295A D13)		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
RC床版	35	384	526	200

補強においては大型の専用機械で衝撃を与えながら切削作業が行われている。しかし、この施工法は、削り面に微細なクラックの発生や RC 床版上面コンクリートの脆弱化による早期のはく離が懸念される。そこで、既設 RC 床版上面の微細なクラックや脆弱化したコンクリート表面を強固にするために浸透性接着剤を塗布する。ここで、浸透性接着剤の特性値を表-3に示す。表-3より、圧縮強度も高く、付着強度は 2.6N/mm² 以上確保されている。よって、既設 RC 床版コンクリート表面を強固にする接着剤である。

(2) 付着用接着剤³⁾

SFRC 上面増厚補強法においては、輪荷重走行によるのはく離が発生し、再補修が施されている。これらのことから PFRC を用いたコンクリート舗装においてははく離を抑制し、耐疲労性の向上を図るためにエポキシ系の接着剤（付着用接着剤）を塗布する。ここで、付着用接着剤の材料特性値を表-3に示す。表-3より、コンクリートとの付着強度は 3.7N/mm² 以上確保され、引張試験においては母材コンクリートで破壊している。本接着剤は既設コンクリート床版上面を研掃した後、平均 1.0mm 厚で塗布するが、硬化時間は常温で 120 分程であることから塗布後直ちにコンクリート舗装材を打ち込む必要がある。

3. 使用材料および供試体寸法

3.1 使用材料

RC 床版に使用するコンクリートには、普通ポルトランドセメントと細骨材として砕砂、粗骨材として最大寸法 20mm の砕石を使用した。また、鉄筋は SD295A, D13 を用いた。RC 床版の材料特性値を表-4に示す。

3.2 供試体寸法

(1) RC床版供試体

供試体の床版厚は、大型車両の 1 日 1 方向の計

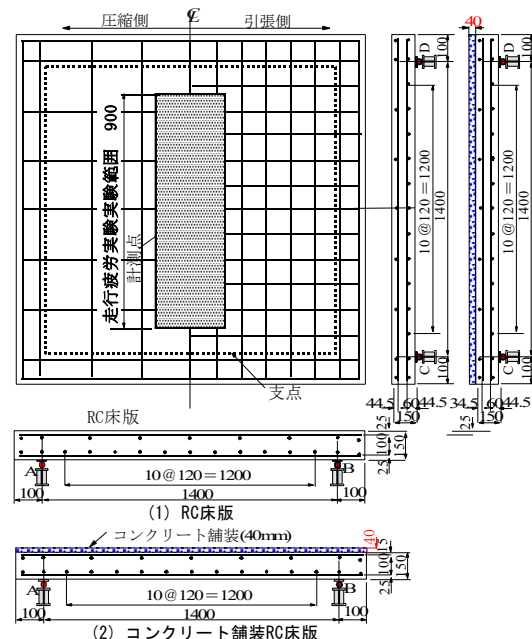


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

画交通量から算出して、その 3/5 モデルとする⁴⁾。供試体寸法および鉄筋の配置を図-1に示す。RC 床版供試体の寸法は図-1 (1)に示すように、全長は 1,600mm、支間 1,400mm、床版厚 150mm の等方性版である。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置した。その有効高さは、それぞれ 125mm, 115mm である。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。この供試体名称を RC 床版とする。

(3) コンクリート舗装用供試体

コンクリート舗装用の供試体の寸法は、図-1に示す RC 床版と同様である。コンクリート舗装の断面寸法を図-1 (2)に示す。RC 床版の厚さは 150mm であり、これを 10mm 切削し、その上に 40mm 厚でコンクリート舗装を施すものであり、全厚は 180mm である。なお、本論文では老朽化した RC 床版の補強も兼ねたコンクリート舗装であることから 10mm 切削したが、新設橋梁床版において、表面を研掃するのみとする。

4. 輪荷重走行疲労実験方法および等価走行回数

4.1 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、RC 床版、コンクリート舗装床版ともに幅 300mm の輪荷重を軸方向に 900mm の範囲を繰り返し走行させる実験である。輪荷重走行疲労実験における初期荷重は、RC 床版供試体およびコンクリート舗装供試体ともに 100kN から走行を開始し、20,000 回走行ごとに荷重を増加する段階荷重載荷とする。各実験において輪荷重走行 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとにたわみを計測する。

表-5 実験走行回数・等価走行回数および等価走行回数比

供試体名称	走行回数	荷重				等価走行回数 合計 (回)	等価走行回数比
		100 kN	120 kN	140 kN	160 kN		
RC床版	実験走行回数	190,300				12,339,978	—
	等価走行回数	12,339,978					
RC-PFRC	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	4,931	232,553,017	18.8
	等価走行回数	1,296,905	13,137,392	93,053,636	125,065,084		
RC-PFRC.A	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	19,500	602,066,948	48.8
	等価走行回数	1,296,905	13,137,392	93,053,636	494,579,015		

4.2 走行疲労実験における等価走行回数

本実験における輪荷重走行疲労実験は、20,000回ごとに荷重を増加する段階荷重載荷としたことから等価走行回数 N_{eq} を算出して耐疲労性を評価する。等価走行回数の算定式は式(1)として与えられる。なお、式(1)における基準荷重 P は設計活荷重の3/5に安全率1.2を考慮した72kNとして等価走行回数を算出する。S-N曲線の傾きの逆数 m の絶対値には松井らが提案する12.7を適用する⁵⁾。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad (1)$$

ただし、 P_i ：載荷荷重 (kN)、 P ：基準荷重 (= 72kN)、 n_i ：実験走行回数 (回)、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 (= 12.7)

5. 実験結果および考察

5.1 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における走行回数および等価走行回数を表-5に示す。

(1) RC床版

RC 床版供試体の輪荷重走行疲労実験における等価走行回数は 12.339×10^6 回である。この等価走行回数を基準に、コンクリート舗装した供試体の舗装効果および耐疲労性を評価する。

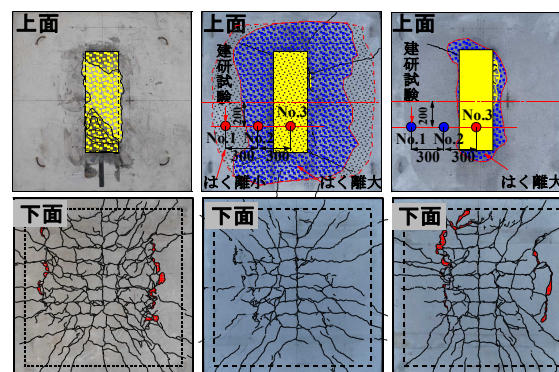
(2) 直接舗装した供試体 (RC-PFRC)

直接コンクリート舗装した供試体 RC-PFRC の等価走行回数は 232.533×10^6 回である。RC 床版供試体と比較すると18.8倍の等価走行回数を得られた。

(3) 2種類の接着剤を塗布した供試体 (RC-PFRC.A)

2種類の接着剤を塗布した後、コンクリート舗装した供試体 RC-PFRC.A の等価走行回数は 602.066×10^6 回である。RC 床版供試体の等価走行回数に比して48.8倍の等価走行回数を得られている。また、RC 床版に直接コンクリート舗装した供試体 RC-PFRC に対して2.6倍の等価走行回数を得られている。

以上より、本提案する PFRC で舗装することで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。



(1) RC床版 (2) RC-PFRC (3) RC-PFRC.A

図-2 上面および下面の損傷状況

5.2 舗装面および下面の損傷状況

コンクリート舗装面および下面の損傷状況を図-2に示す。なお、図-2には建研引張試験およびはく離の範囲を併記した。

(1) RC床版

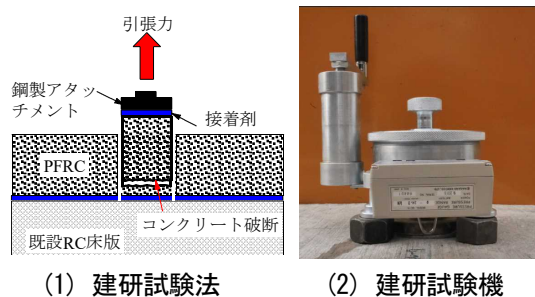
RC 床版の上面損傷は図-2(1)より、輪荷重の走行により走行面が摩耗による凹凸が著しい。下面は輪荷重走行範囲から45度底面はダウエルの影響によるはく離が見られる。破壊は輪荷重走行中に床版中央で押抜きせん断破壊となった。

(2) 供試体 (RC-PFRC)

供試体 RC-PFRC は図-2(2)より、上面は輪荷重走行によるひび割れが発生している。走行面の圧縮強度が高いことから凹凸は見られない。打音法によるはく離の範囲を検証した結果、舗装界面でほとんどの範囲ではく離している。図-2(2)には、建研試験箇所を示しているが、φ100mmの削孔中にはく離が確認された。下面は2方向ひび割れが発生するもののRC 床版下面に比してダウエルの影響によるはく離の範囲が狭い。破壊は界面のはく離と押抜きせん断破壊と複合している。

(3) 供試体 (RC-PFRC.A)

2種類の接着剤を塗布した供試体 RC-PFRC.A の上面は図-2(3)より、摩耗による凹凸や打音法によるはく離は走行面に見られるものの供試体 RC-PFRC と比較してはく離の範囲が狭い。これは、2種類の接着剤の効果であると考えられる。下面



(1) 建研試験法 (2) 建研試験機
図-3 建研式引張試験方法
表-6 建研式引張試験方法による付着強度

供試体名称	採取位置	直径 D(mm)	断面積 A(mm ²)	最大荷重 P(N)	引張強度 f _t (N/mm ²)
RC-PFRC	No.1	99.00	7698	0.0 (界面はく離)	0.00
	No.2	99.00	7698	0.0 (界面はく離)	0.00
	No.3	99.00	7698	0.0 (界面はく離)	0.00
RC-PFRC.A	No.1	99.00	7698	18.2	2.36
	No.2	99.00	7698	15.3	1.99
	No.3	99.00	7698	0.0 (界面はく離)	0.00

は 2 方向ひび割れとダウエルの影響を受ける範囲ではく離が見られる。破壊は押抜きせん断破壊である。

以上より、RC 床版に直接コンクリート舗装した場合は、疲労が進むにつれ舗装界面ではく離が進行した。一方、既設 RC 床版上面に接着剤を塗布した場合は一体性が確保され耐疲労性が更に向上する結果となった。

5.3 建研式引張試験による界面の付着性能

(1) 建研式引張試験による付着強度

疲労実験終了後にコンクリート舗装を施した供試体界面の付着性能を確認するために、建研式引張試験を行い、引張付着強度を計測する。ここで、建研式引張試験の概略を図-3に示す。なお、建研試験の位置は図-2(2)、(3)に示した。試験方法はコンクリート舗装面に電動ドリルを設置し、直径100mmで既設 RC 床版の位置まで切り込みを入れる。次に、コアの上面に接着剤を塗布し、鋼製治具を圧着し、養生を行う。接着剤が硬化した後、油圧式接着力試験機を用いて載荷速度 1.0N/cm²/sec で引張付着強度試験を実施する(図-3)。引張付着試験方法における強度の算定は式(2)として与えられている。

$$f_t = P/A \quad (2)$$

ただし、 f_t ：引張付着強度 (N/mm²)、 P ：接着荷重 (N)、 A ：接着面積 (mm²)

(2) 付着強度および破壊状況

建研式引張試験により得られた界面の引張付着強度を表-6に示す。

直接コンクリート舗装を施した供試体 RC-PFRC は、No.1, 2, 3 においてコア削孔中に界面ではく離したことから、引張付着強度は 0.0N/mm² であ

る。一方、2 種類の接着剤を塗布した供試体 RC-PFRC.A の No.1, 2 の引張付着強度はそれぞれ 2.36N/mm², 1.99N/mm² であり、上面増厚補強法における付着強度 1.0N/mm² を上回っている。No.3 はコア削孔中にはく離したことから 0.0N/mm² となり、はく離している。

以上より、接着剤を塗布しないコンクリート舗装は破壊時には界面の付着強度はほとんど確認されないものの、接着剤塗布した供試体は、ほとんどの領域で付着強度が確認された。

6. まとめ

- (1) 本提案する特殊セメントを用いた繊維補強コンクリートは要求性能である材齢 1 日で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm² 以上確保できる材料である。
- (2) RC 床版に直接本提案した繊維補強コンクリートで舗装することで未舗装供試体の 18.8 倍、2 種類の接着剤を塗布し、繊維補強コンクリートで舗装した供試体は 48.8 倍の等価走行回数が得られ、両舗装法ともに耐疲労性は評価できる。
- (3) 直接コンクリート舗装した供試体は広範囲にわたってはく離が見られた。界面の引張強度も確認されない。一方、2 種類の接着剤を塗布したコンクリート舗装は、走行面のみはく離が見られるがそれ以外の領域ではく離は見られない。走行面から中央から 30cm の位置の引張強度の 1.99N/mm² を確保され、終局時においても一体化していた。よって、重交通や交通量の多い床版の舗装においては接着剤の塗布が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の橋面コンクリート舗装、鋼構造委員会道路橋床版の複合劣化に関する調査研究小委員会、2016.11
- 2) 阿部忠・伊藤清志・大野晃・山下雄史：RC 床版上面損傷に用いる補修材の提案およびサイクル補修における耐疲労性の評価、構造工学論文集, Vol.60A, pp.1122-1133, 2014.3
- 3) 伊藤清志, 阿部忠：2 タイプの接着剤を塗布した RC 床版の上面補修法の耐疲労性の評価および施工技術、コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2131-2136, 2017.7
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, 2002
- 5) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.10