

ハイブリッド有機繊維コンクリートによる 道路橋床版補強工法

HFRC による橋梁床版補強工法

中村好伸・岡部次美・荒井明夫

橋梁の床版補強工法である床版上面増厚工法や鋼床版補強工法に用いられる繊維補強コンクリートには、鋼繊維を使用するのが一般的である。これは、他の繊維では、重要な特性である曲げ強度や曲げ靱性において十分な機能が発揮しえないとされていたことも要因の一つであった。一方、最近の有機繊維の中には高機能・高性能が付与された繊維が開発されており、この中の一つで、従来のアラミド繊維の高強度、高弾性率を維持しつつ、耐アルカリ性を高めたパラ系アラミド繊維が市場に出回り始めた。

今回、従来の鋼繊維補強コンクリートを橋梁床版補強に適用した場合に発生するメンテナンス上の課題を解決すべく、新たな繊維を用いたハイブリッド有機繊維補強コンクリートを開発した。本稿では、開発経緯、室内実験、疲労試験を経て本施工に至るまでを紹介する。

キーワード：橋梁、床版補強、鋼繊維補強コンクリート、有機繊維、アラミド繊維

1. はじめに

橋梁の床版はコンクリート床版（以下 RC 床版と称す）と鋼床版に大別される。これらの床版は架橋からの供用年数の経過とともに老朽化が進行し、各種の補強工法による延命化が図られつつある。このうち RC 床版では、設計耐荷重増への対応、床版貫通ひび割れが発生した床版の押抜きせん断に対する上面からの補強として、既設床版上面に繊維補強コンクリートを打ち継ぐ上面増厚工法¹⁾が1980年代から採用されている。

一方、鋼床版では、近年、デッキプレートと閉断面リブの溶接部に疲労亀裂が発見され、この対策として鋼繊維補強コンクリート（以下 SFRC と称す）による上面補強工法²⁾が採用されている。

この両者の補強工法では、補強コンクリート中に繊維を混入しており、使用される繊維としては鋼繊維（以下 SF と称す）が一般的に使用されている。これは、繊維補強がひび割れに対応するだけでなく、ひび割れ後でも靱性を高めることで、破壊に至るまでのエネルギーを増やすことも必要条件であることによる。

この SF を用いて補強した補強層の上にはアスファルト舗装が設けられ、交通荷重を直接受ける構造となっているが、その舗装は、一般的には10年程度で補修時期を迎え、舗装の剥ぎ取りが必要となる。この表層の補修に際し、SFRC 中に混入した SF の露出が

再舗装の耐久性や施工性を阻害する要因となる可能性があることから、SF に代わる新たな複合有機繊維を見出し、ハイブリッド有機繊維補強コンクリートを開発した。

2. アスファルト舗装改修時の課題

(1) 現行の施工方法

アスファルト舗装を撤去する際に使用されるのは路面切削機（写真—1）であり、ビットを取り付けた切削ドラムを高速で回転させ、路面を目標深さに削り、それをバルコンで廃材ダンプに積み込む機械である。現在の首都高の夜間工事における1日当たりの施工量は1,500 m²程度である。この路面切削機はオペレーターが切削深をセットして切削するが、切削深さとし



写真—1 路面切削機



写真一2 路面ヒーター



写真一3 搭乗式剥離機

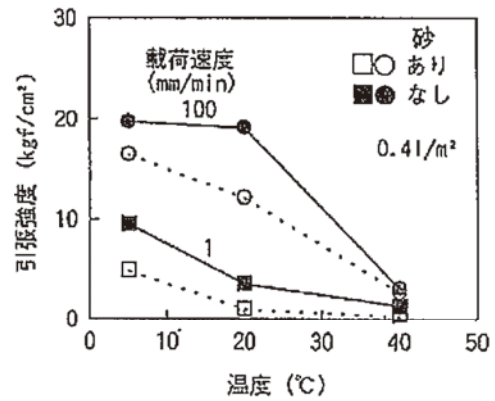
て± 3 mm 程度の変動がある。これに SFRC の出来形精度が± 5 mm 程度あることを考え合わせると、切削作業で注意を払わないと SFRC 面の一部が切削され、SFRC 中に混入した SF が表面に露出する可能性がある。切削機以外の既設舗装撤去方法としては、路面ヒーター（写真一2）による舗装加熱とバックホウによる剥ぎ取りも可能であるが、夜間工事では 400 m² が限界である。また搭乗式剥離機（写真一3）は補強コンクリート面を痛めることがないが、施工能力が格段に落ちる。

(2) 露出した繊維の影響

路面切削機で削られた面は切削ビットの当たる面は凹部となり、補強コンクリート中に混入された鋼繊維



写真一4 露出した SF



図一1 舗装界面に砂が付着した場合の引張強度の違い

がこの凹部にあることから繊維が露出（写真一4）する。この露出した繊維は、上層に塗膜防水層を施工する場合は連続した防水膜を構築する障害となり、またアスファルト舗装と路面切削面には、切削粉が残存するだけで付着強度が低下³⁾（図一1）することから、露出繊維の処理が必要となる。

(3) 露出した繊維の処理方法

鋼繊維の場合の処理方法としては、凹部より飛び出したものは水平回転式の研磨機により切断する。しかしながら凹部内の繊維は切断できない。このため凹部を埋め、防水層の連続性を確保するために速硬性ポリマーセメントモルタルを敷きならし、硬化後、施工に支障のない水分量となるのを待って防水層を施工している。

(4) 課題

鋼繊維が露出した場合の課題としては、処理費用が増えること、さらに処理に要する時間から1日当たりの施工量が減り、コスト増となる。また施工量の低下は規制回数の増となり道路利用者への負担増となる。

3. 鋼繊維に代わる繊維の選定

(1) 有機繊維の検討




有機繊維は材料物性として柔らかいことが SF との違いであり、露出した場合の処理方法の選択肢が種々考えられ、また、軽量であるという特長もあるが、曲げ靱性が低いという欠点を有している。従来から、軽量 RC 床版などでポリビニルアルコール（以下ビニロン繊維、図表中では PVA と称す）やポリプロピレン（以下ポリプロピレン繊維、図表中では PP と称す）の繊維が使用されている例があるが、床版補強という観点からは使用箇所は限定的であったといえる。一方、

表一 各種繊維の特性比較概要

	耐アルカリ性	取扱い性	界面接着	弾性率	耐クリープ
共重合パラ型アラミド※ (AM)	○	○	○	○	○
パラ型アラミド (PPTA)	×	○	○	○	○
ポリビニールアルコール (PVA)	△	○	△	△	△~○
ポリプロピレン (PP)	○	○	×~△	×~△	×~△
ポリエチレン	○	○	×~△	○	×~△
ポリエステル	×	○	×~△	×~△	×~△
炭素繊維	○	×~△	△	◎	○
ガラス繊維	×	×~△	△	△	○
鋼繊維 (SF)	○	○	○	○	△

※正式名称は コポリパラフェニレン・3,4'オキシジフェニルエーテル・テレフタラミド繊維 (帝人製) 商品名: テクノーラ

表二 検討した繊維の概要

繊維種	ビニロン繊維	アラミド繊維	鋼繊維
密度 (g/cm ³)	1.30	1.39	7.85
単価	2,000 円 /kg	5,000 円 /kg	320 円 /kg
形状	 引張強度 90 kg/mm ² φ 0.66 × 30 mm	 引張強度 350 kg/mm ² φ 0.50 × 20 mm	 φ 0.62 × 30 mm

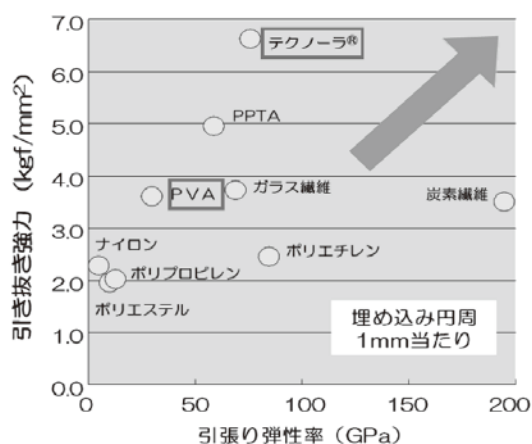
高強度繊維としては炭素繊維やアラミド繊維もあるが、これらは基本的には織物状の補強材として使用されることが多く、ファイバーとしての適用例は未だ少ないと言える。

このような中で、新たに土木資材の分野で短繊維として開発されたアラミド繊維に着目し、検討を行うこととした。アラミド繊維は多用途で使用されているが、いくつかの種類に分けられ、引張強度や引張弾性率に優れたものは、パラ型アラミド繊維とされ、さらに汎用型アラミド繊維と共重合アラミド繊維に分類される。汎用型アラミド繊維は様々な特性を持つが、耐アルカリ性に課題があり、コンクリート中への混入による補強材としての適用は見送られていた。そのような中で、新たに耐アルカリ性能を有する共重合パラ型アラミド繊維 (以下アラミド繊維、図表中では AM) が市場に投入されたことから、アラミド繊維の適用について可能性を探ることとした。また、従来から使用されているビニロン繊維やポリプロピレン繊維も併せて検討し、SFRC との比較検討を行うこととした。表一、二に各種繊維の特性比較概要を示す。

4. ハイブリッド有機繊維補強コンクリートの配合検討

(1) 予備検討

前項の表一より、繊維特性と過去の使用実績をもとに、アラミド繊維、ビニロン繊維、ポリプロピレン繊維を選定 (表二、図一) し、予備検討として繊維補強コンクリートとしてのフレッシュ性状、硬化コンクリート性状を確認した。その結果を表三に示す。



図一 各種繊維のセメントとの接着性

表一三 予備検討におけるフレッシュ・硬化性状

	繊維種と添加量	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C × %)		スランプ (cm)	3H 圧縮強度 (N/mm ²)	3H 曲げ強度 (N/mm ²)
				W	C	S	G	繊維	MT	JS			
①	SF1.3%	38.8	52.5	165	425	885	841	100	0.8	1.0	5.5	34.2	5.80
②	PVA1.5%		53.5	168	433	891	813	19.5	1.3	1.0	5.0	33.6	4.66
③	PP1.5%		53.5	165	425	899	820	13.65	0.7	1.0	7.5	32.5	4.43
④	AM0.8%		57.5	175	451	949	737	11.12	1.0	1.0	3.0	33.4	5.18

表一三より、ビニロン繊維とポリプロピレン繊維は繊維混入量をコスト面での最大値である1.5%まで混入しても曲げ強度はSFに及ばないこと、アラミド繊維は他の有機繊維よりも曲げ強度増に寄与するものの、スランプが満足せず、コスト面も含めてこれ以上の添加はできないと判断された。このスランプが低下した理由は、今回のアラミド繊維は極細繊維の収束体を水溶性樹脂で固めたものであり、混練りに繊維がほぐれることによりワーカビリティが低下したものと考えられた。しかし、逆にこのほぐれにより繊維間にセメントペーストが入り込み、結果として引き抜き抵抗性に優れ曲げ強度が増加したと考えられた。

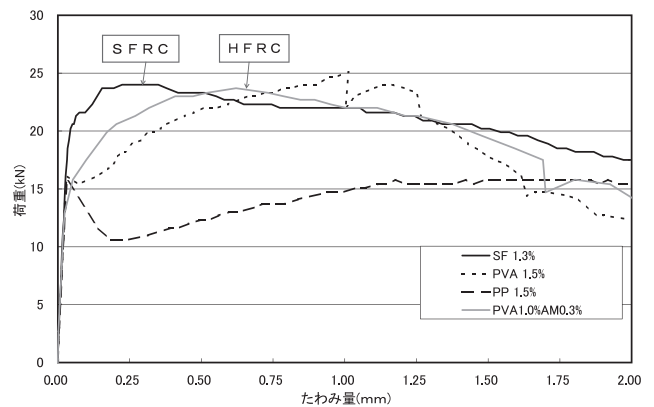
(2) 本検討

前項の予備検討をもとに、性能面とコスト面を勘案し、ひび割れに対応する働きと曲げ靱性を高める働きを複数の繊維に分担させることを考え、コンクリート中に混入する有機繊維としては最も実績の多いビニロン繊維とアラミド繊維を混用することとした。予備実験により、ビニロン繊維1.0%、アラミド繊維0.3%の繊維量にてコンクリート性状を確認した。その結果を表一四に示す。

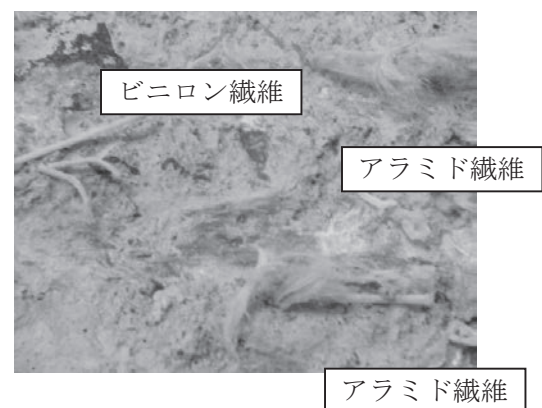
この結果をもとに各繊維配合における曲げ特性を求めた。その結果を表一五、図一三に示す。この結果から、ビニロン繊維1.0 vol%とアラミド繊維0.3% vol%の配合において、目標のワーカビリティ（スランプ6.5 ± 1 cm）と目標の圧縮強度（3 hrで24 N/mm²）が得られ、曲げ強度、曲げ靱性もSFRCに近似した値が得られた。曲げ靱性は、水溶性樹脂で収束したアラミド繊維の極細繊維がほぐれ、この空間にセメントペーストが入り込み固結することで、SFRCに近い値

表一五 各繊維配合における曲げ特性

	繊維種と添加量	曲げ強度 (N/mm ²) ・ 曲げ靱性 (N/mm ²)	
		3 h	1 d
①	SF1.3%	5.80	6.81 【6.07】
②	PVA1.5%	4.66	6.67 【5.42】
③	PP1.5%	4.43	4.88 【4.25】
⑤	PVA1.0% AM0.3%	5.03 【4.18】	7.08 【5.78】



図一三 各繊維配合における曲げ靱性 (1d養生)



写真一五 アラミド繊維が混合によりほぐれている状態

表一四 本検討（ビニロン繊維とアラミド繊維を併用）における配合表

	繊維種と添加量	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C × %)		スランプ (cm)	3H 圧縮強度 (N/mm ²)	3H 曲げ強度 (N/mm ²)
				W	C	S	G	繊維	MT	JS			
⑤	PVA1.0% AM0.3%	38.8	53.5	175	451	876	800	PVA13.0 AM4.17	1.3	0.8	6.5	34.8	5.03

を示すものと考えられた(写真—5)。このことから、曲げ靱性を向上させるためにアラミド繊維と、一般的なひび割れ抑制のためにビニロン繊維を併用した複合繊維補強コンクリートとしたことから、このコンクリートを HFRC (Hybrid Fiber Reinforced Concrete) と称することにした。

5. 実物大実証実験による検証

(1) アラミド繊維の分散性

首都高で計画される補強工事では、早期の交通解放が絶対条件であることから超速硬セメントを使用して現場でコンクリートを製造する。その際は専用のバッチャミキサ車を用いることになり、ミキサ容量 200 ~ 300 L/バッチの中に計量した繊維を投入混合する。バッチ計量式であることから、バッチとしての繊維混合量は問題ないが、選定配合では、曲げ靱性に寄与するアラミド繊維が 0.3% と少量であることから、バッチ内での分散性(練り混ぜ性能)と変動を考慮した強度特性を確認することとした。

試験は実際のバッチャミキサ車を使用し、製造したバッチの前半、中間、後半で排出された HFRC から繊維を抽出し、ビニロン繊維、アラミド繊維それぞれの混合%を確認した。その結果、実機による混合では設計アラミド繊維量 0.3% に対し、平均で 0.298%、変動は 0.03% であることが確認された。さらに、その変動を念頭に曲げ強度特性を求めたところ、アラミド繊維が 2σ 変動しても 90% 程度の曲げ強度特性を維持することが確認された。

(2) 疲労試験

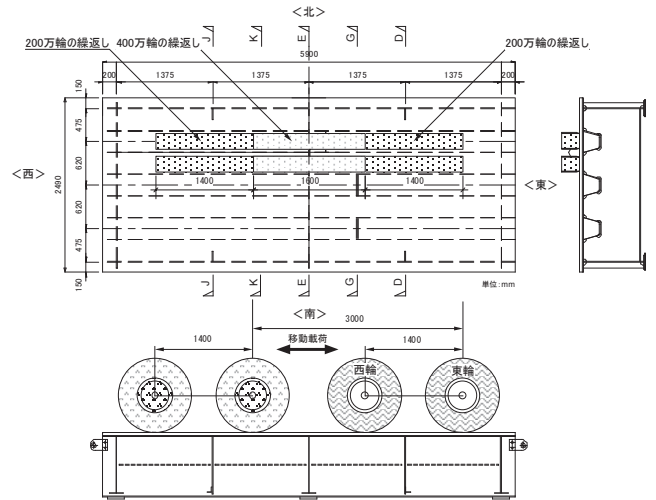
配合試験の結果、HFRC と SFRC はほぼ同等の補強効果、耐久性を有していることが確認できたことから、実舗装を想定した疲労試験により、補強効果を確認することとした。

(a) 試験概要

試験装置は、(社)日本建設機械化協会施工技術総合研究所が所有する屋外輪荷重疲労試験機を用いた。

疲労試験の試験条件を以下に示す。

- ① 載荷荷重：載荷荷重 137 kN (14 tf) (軸重：49 kN (5 tf) × 1.4 (衝撃係数))
- ② 載荷位置：図—4 に示すように、トラフリブの溶接部をダブルタイヤで跨ぐ位置
- ③ 載荷回数：100 万回往復 (ドライ (自然環境下) 50 万往復 + 水浸 50 万往復)
- ④ 試験環境：自然環境下 → 水浸 (写真—6)



図—4 載荷位置



写真—6 輪荷重疲労試験状況

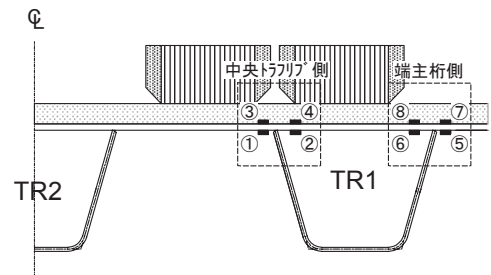
写真—6 輪荷重疲労試験状況

⑤ 試験体支持：支持桁全面固定

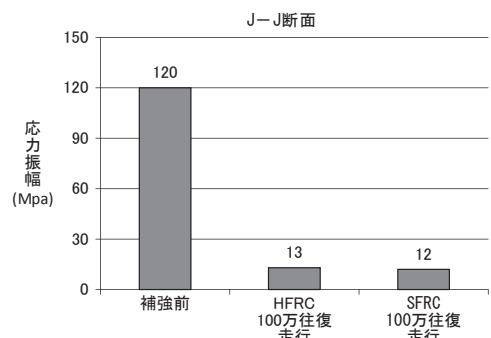
(b) 試験結果

① デッキプレート—溶接リブ近傍応力

補強前後の発生応力について、過年度に実施した SFRC 試験の結果と比較し、補強効果について検証し



図—5 載荷試験時のタイヤ位置



図—6 デッキプレート—トラフリブ溶接部近傍応力

た。デッキプレートトラフリブ溶接部近傍応力を図一5, 6に示す。疲労試験開始前および試験終了後ともに、HFRCとSFRCの応力に大きな差は見られず同等レベルであると判断された。

②ひび割れ発生状況

ひび割れは輪通過位置を中心に発生し、中央横リブ上を除いてはほとんどが輪通過位置内に収まっており、その多くが橋軸直角方向のひび割れであった。ひび割れの発生・進展は= 50万往復時（ドライ試験終了時）にほぼ収束に向かい、水浸試験後におけるひび割れの発生・進展は僅かであった。また、HFRCはSFRCに比べ、ひび割れ本数は多いものの、ひび割れ幅は狭いことが特徴であり、荷重分散効果に優れると推定された。

③付着強度試験結果

疲労試験終了後の付着強度試験結果を、表一6に示す。付着強度は1 N/mm²を確保しており、破断面も全て補強材内であった。ひび割れがデッキプレート界面付近にまで到達している箇所があるが、破断面が補強材内であることから付着性状に問題ないと判断された。

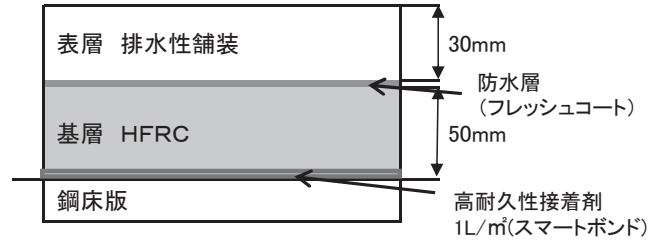
表一6 付着強度試験結果

位置	通過輪数	平均付着強度 (N/mm ²)	剥離位置	ひび割れ深さ最大 (cm)
中央横リブ近傍	4輪	2.2	母材	4.2
垂直補剛材上	-	2.0	母材	3.3
トラフリブ上	4輪	2.6	母材	4.2
トラフリブ上	2輪	2.5	母材	4.2
載荷部	-	2.5	母材	-

6. 本工事における施工状況

平成23年10月、首都高速道路湾岸線羽田空港付近の京浜大橋において、鋼床版補強工法として、従来の

SFRCに替えて今回検討したHFRCを施工した。施工断面を図一7に示す。基層となるHFRC打設1パーティ当りの機械の編成は、HFRCの練混ぜを行うための移動式のバッチャミキサ車、HFRC材料供給台車、



図一7 鋼床版上での施工断面



写真一7 移動式バッチャミキサ車への材料追加搬入



写真一8 HFRC 打設状況

表一7 コンクリート混合時間と性状の関係

混練時間 (min)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (× 10 ⁴ /mm ²)		曲げ強度 (N/mm ²)		曲げ靱性係数 (N/mm ²)	
3	7	2.9	2.39	58.6	58.9	3.54	3.63	7.50	8.03	5.77	5.99
				58.9		3.7		7.97		6.22	
				59.3		3.64		8.61		5.98	
4	3.2	2.1	2.41	60.4	60.8	3.77	3.67	8.55	8.48	6.3	6.31
				60.7		3.63		7.91		6.07	
				61.3		3.62		8.97		6.56	
5	1.9	3	2.40	62.1	62.1	3.64	3.66	7.26	7.23	5.11	4.83
				62.1		3.68		8.00		5.38	
				62.0		3.67		6.42		4.01	

コンパクトコンクリートフィニッシャ、養生台車の構成にて施工した（写真—7, 8）。

HFRC 施工時の品質確認項目として、練り混ぜ時間、配合確認、フレッシュ性状、硬化性状、施工性等を確認した。この中で、使用しているアラミド繊維が極細繊維を束ねて水溶性樹脂により固めた繊維形態であるため、特にコンクリート中での練り混ぜ時間の影響を把握した。結果は表—7に示すとおりであり、練り混ぜ時間が増すにつれ、スランプが低下し、曲げタフネスも変化してくることが確認された。したがって、混合時間は3分間を守ることが重要であると判断された。

また、ビニロン繊維はファイバーボールがしやすいことから、ファイバー分散装置の使用と繊維投入時期について、平成24年10月に施工した2回目の工事において、ファイバー分散装置とファイバー投入タイミングの検討を行い改善が図られた。

7. おわりに

本工法の開発にあたっては、室内配合試験、模擬フィールドでの試験施工、各種試験を実施し、施工性・性能の検証を行った。その結果、HFRCはSFRCと同等の曲げ靱性や疲労特性、施工性を有していることが確認された。HFRC上の表層打替え時においては、仮にHFが切削により露出しても繊維処理は容易であることから、一般的な改修施工量を維持でき、メンテナンス業務に効果があると考えられる。

謝 辞

なお、本工法のコンクリート配合並びに製造に関しては太平洋セメント(株)、小野田ケミコ(株)の関係者の多大なる協力のもと開発されており、ここに謝意を表します。

JICMA

《参考文献》

- 1) 財高速道路調査会：上面増厚工法設計マニュアル，1995.11
- 2) 首都高速道路(株)：鋼構造物疲労対策技術資料，既設鋼床版の疲労対策技術資料（SFRC舗装），2008.1
- 3) 八谷，梅野，今井，中村，室園：空港アスファルト舗装の新しいタックコート材料の開発，港湾技術研究所資料0885，1997.12

【筆者紹介】



中村 好伸（なかむら よしのぶ）
首都高速道路(株)
保全・交通部 保全企画課
課長代理



岡部 次美（おかべ つぐみ）
首都高メンテナンス東京(株)
技術部
技術担当部長



荒井 明夫（あらい あきお）
(株)NIPPO
関東第一支店 技術センター
技術センター長