

## コンクリート高構造物の保全作業における接近装置の開発 ～真空吸着車輪ゴンドラ～

八 杉 行 治・三 谷 宣 博・中 村 修

本州四国連絡橋には、海峡部に建設された吊橋やこれに接続する高架橋などのコンクリート製の高構造物が多数ある。コンクリート構造物の保全では、中性化や塩化物イオンの浸入による内部鋼材の腐食防止対策として、点検調査結果データによる劣化予測と劣化防止対策及び修復等の保全作業が重要となる。これらの作業には、作業対象部位への接近が必要となるため、既往の接近手段より、安全、確実、短時間で安価な接近手段である真空吸着車輪ゴンドラを新たに考案・開発し、実構造物のコンクリート壁面で実用化に向けての試験施工を実施した。

本報文では、開発にあたっての技術的課題とその解決方法、および実際の構造物での基本性能確認や壁面劣化調査、断面補修等に適用した場合の施工性について紹介する。

キーワード：真空吸着車輪、ゴンドラ、コンクリート構造物

### 1. はじめに

本州四国連絡橋には、海峡部に建設された吊橋やこれに接続する高架橋などの鋼製及びコンクリート製の高層構造物が多数ある。このうち、主塔等の鋼構造物の保全には、塗膜診断、タッチアップ塗装及び塗替塗装作業が重要となる。また、アンカレイジ、高架橋脚等のコンクリート構造物の保全には、中性化や塩化物イオンの浸入による内部鋼材の腐食防止対策として、点検調査結果データによる劣化予測と劣化防止対策及び修復等の保全作業が重要となる。これらの作業には、いずれも作業対象部位への接近が必要になり、既往の接近手段としては、

- ①汎用ゴンドラによる方法
- ②橋脚等に設置している既往管理路による方法
- ③橋梁点検車、高所作業車等の特殊車両による方法
- ④枠組足場による方法

がある。しかし、これらの方法には、それぞれ

- ①ゴンドラは、風によって揺れやすく、ドリル作業等の作業反力の確保が困難なため、作業性が低下する。
  - ②接近可能範囲が既往管理路の近傍に限られる。
  - ③橋梁点検車は路面上の規制が必要となり、高速道路上での長期規制は好ましくない。また、高所作業車は橋脚基部にスペースを要し、さらに進入路が必要である。
  - ④枠組足場の設置・撤去に期間と費用がかさむ。
- の課題があり、より安全、確実、容易に接近できる手

段が必要となった。

このため、本四高速株では高層鋼構造物の安全、確実、容易な接近手段として、強力な永久磁石（希土類ネオジウム）を内蔵した車輪を既往のゴンドラに装着し、壁面に吸着しながら自由に移動できる磁石車輪ゴンドラを開発した<sup>1,2)</sup>（写真—1，表—1）。

磁石車輪ゴンドラは、前述の汎用ゴンドラでの作業における課題を解決するものであり、実構造物での主塔塗替試験施工において、従来のゴンドラに比べ次の有効性が確認された。

- ①磁石車輪により壁面に連続吸着するため、風によって揺れず、作業風速は従来の5～6 m/秒から13 m/秒まで可能となった。
- ②磁石車輪により壁面に吸着するため、地上作業と同様の作業反力の確保ができた。
- ③磁石車輪とステアリング機構により任意の位置に安



写真—1 磁石車輪ゴンドラ

表一 磁石車輪ゴンドラの仕様

項目	性能
吸着力	平滑部 2.45 kN/輪×4輪で連続吸着
	添接部 0.83 kN/輪
横抵抗力	1.96 kN/輪×4輪
昇降速度	7.2 m/min
積載量	300 kg 以上
作業エリア	ステアリング機構により横行，斜行動作が簡単にできる
安全性	風速 10 m/s 以上でも揺れない
段差走行性	高さ 40 mm の添接板乗越

定して広範囲の横行や昇降の移動ができた。

- ④風等により揺れないため安定性が向上し，稼働率は従来の 50% から 80% に向上した。
- ⑤移動しながら作業反力が確保できるため，ゴンドラが揺れず自動塗装装置による素地調整と塗替塗装の機械化が可能となった。

以上の結果を基に，コンクリート構造物においても壁面に吸着して移動する機構を備えた汎用ゴンドラを用いれば，安全・確実・容易に接近することが期待できる。そこで，汎用ゴンドラにコンクリート壁面に真空中で吸着し移動する機構を搭載した真空吸着車輪ゴンドラ（以下，「本ゴンドラ」という。写真一2）を考案・開発した<sup>3)</sup>。



写真一2 真空吸着車輪ゴンドラ

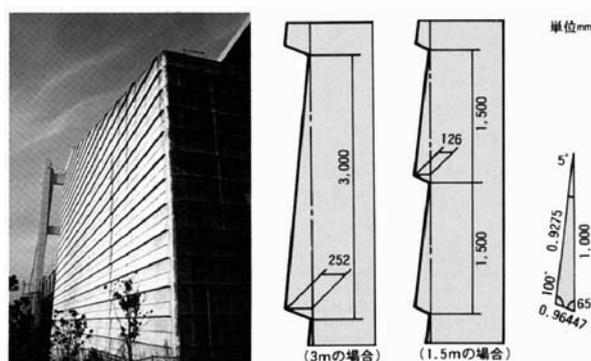
以下に，本ゴンドラの開発に当たっての解決すべき課題と対応及び実構造物における実用化を目指した試験施工結果について，その概要を述べる。

## 2. 真空吸着車輪の開発

### (1) 要求性能

真空によりコンクリート壁面に吸着して移動する機構を備えたゴンドラに必要な性能は次のとおりである。

- ①作業時，風に揺れず，かつ作業反力をとるためにコンクリート壁面に常時吸着できること。
- ②作業に必要な資機材を搭載し，広い作業エリアで高速移動できること。
- ③瀬戸大橋のアンカレイジ壁面には，船舶のレーダー偽像対策として 5° の反射角を持たせた段差高 252 mm のテクスチャー（図一1）を配しているため，それらを乗り越えて移動できること。  
これらを含め，要求性能をまとめると表一2のとおりである。



図一1 吊橋アンカレイジのテクスチャー

表一2 真空吸着車輪の要求性能

項目	要求性能
所用吸着力	490 N/輪×4輪で連続吸着
横抵抗力	245 N/輪×4輪
移動速度	昇降速度 7.2 m/min
大重量搭載	積載 300 kg 以上
作業エリア	50 m × 50 m で安定した自在移動
安全性	耐風速 16 m/s で揺れない
段差走行性	高さ 252 mm のテクスチャー乗越

### (2) 技術的課題と対応

前述の要求性能を踏まえ，試作車輪により技術的課題を抽出した。また，その対策は，簡易な構造で製作コストを低減するため一般的に入手できる製品を応用することを基本とした。

#### (a) 技術的課題

真空吸着機構の技術的課題を整理したものを次に示す。

##### ①凹凸面への密着性確保と耐久性

コンクリート壁面は打継目，不陸など凹凸面があるため，吸着パッド内の真空を保つには凹凸面の密着性を確保する必要がある。一般に流通している吸着パッドは硬質ゴム製であり，凹凸に対する密着性は劣る。また端部が薄く比較的柔軟性を有する円形パッドで

も、車輪の回転によりパッド端部に巻き込みを生じやすく、真空破壊を起こしやすい。このため、凹凸面へ確実に密着する柔軟なパッドが必要になる。

また、吸着パッドは壁面に吸着して回転しながら移動するため、耐久性も併せて必要となる。

②吸着パッドへの吸気機構

吸着パッドは車輪周りに回転するため、壁面に接触していないパッドからエアを吸い込むと真空は形成されない。この対策として、各パッドへの吸気配管を独立させると真空形成は可能になるが、機器構成が煩雑になり現実的ではない。このため、簡素な機構で壁面方向のみに真空が形成できる吸気機構が必要になる。

③真空発生機構の選択

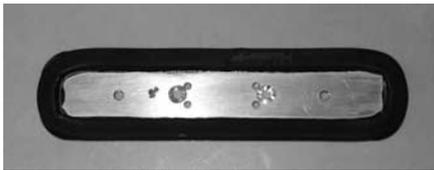
メンテナンス上からは特殊品ではなく小型軽量で汎用性のある真空発生機構が必要である。

(b) 技術課題の対策への対応

各課題に対して、次のような対応を行った。

①密着性が確保できる吸着パッド

吸着パッドは、鋼板に内部が空洞で柔軟性が富み耐久性が期待できるスポンジパッドを貼り付け、凹凸面の密着性と耐摩耗性を確保した(写真—3)。



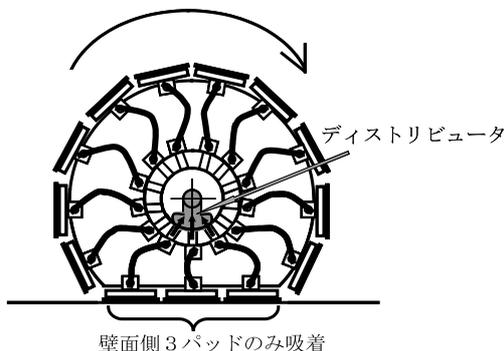
写真—3 吸着パッド

②吸気機構

車輪の回転中心にディストリビュータハブを組み込み、壁面に接しているパッドのみを吸気する簡素な機構とした。さらに、安定した吸着力を得るために、常に複数の吸着パッドが壁面に接するようにした。具体的には、図—2のような構造とした。

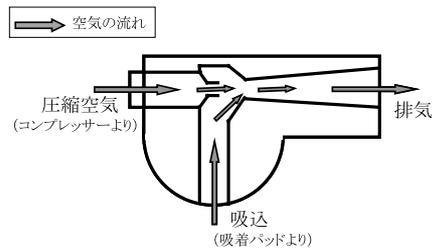
③真空発生機構

真空発生機構には、真空ポンプ方式とコンプレッ



図—2 ディストリビュータハブ

ー方式がある。前者は、概ね 300 kg と大型であるのに対して、後者は、小型軽量のため人力で容易に可搬でき、市場に多く出回っているため汎用性に優れ、不具合時の代替品も容易に確保可能であることから、コンプレッサー方式を採用した。コンプレッサーから供給される圧縮空気でエジェクタ(図—3)のノズル部の空気を高速に通過させることにより、のど部の圧力が低下するものであり、連続で真空を発生することができる。また、今回 0.5 MPa, 0.38 m<sup>3</sup>/min (1車輪当たり)の真空が必要なのでエジェクタの大きさは 120 mm × 60 mm × 40 mm, 900 g 程度となり、ゴンドラ上に搭載できる。



図—3 エジェクタの構造

3. 真空吸着車輪ゴンドラの概要

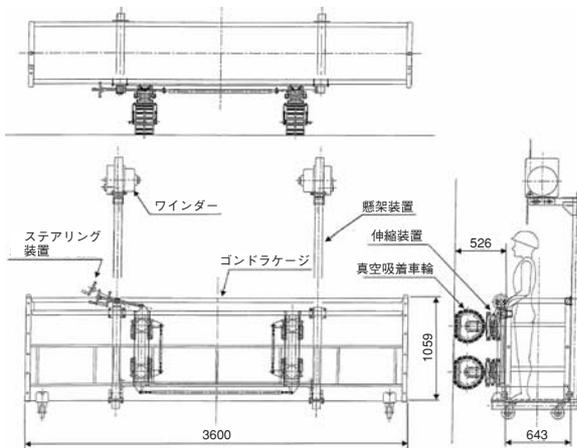
真空吸着車輪を装着したゴンドラの概要は、次のとおりである。

(1) 真空吸着車輪ゴンドラの構成

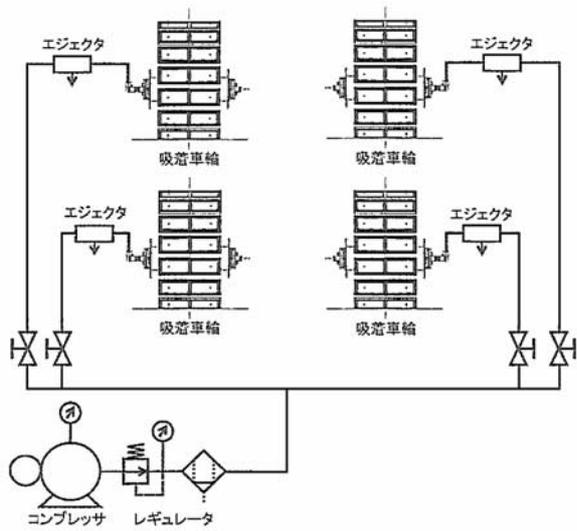
本ゴンドラは、真空吸着車輪、伸縮装置、懸架装置(支持フレーム)、ステアリング装置、制御盤、ゴンドラケージ、ワインダーより構成される。本ゴンドラの仕様を表—3、概略図を図—4、エアシステム構成図を図—5、真空車輪の詳細を写真—4に示す。

表—3 真空吸着車輪ゴンドラ主要諸元

項目	仕様
昇降速度	7.2 m/min
積載荷重	400 kg
吸着保持性	耐風速 16 m/s ・設計真空吸着力 490 N 以上 × 4 輪 = 1960 N ・設計横抵抗力 245 N 以上 × 4 輪 = 980 N
不陸走行性	伸縮装置により、最大段差 252 mm のテクスチャーを乗り越えることが可能
電源	三相 200/220 V 50/60 Hz 11 KVA (工具用動力含む)
圧縮空気	0.7 MPa 2.5 m <sup>3</sup> /min (汎用品) (送気距離: 50 m)



図一四 真空吸着車輪ゴンドラの概略図



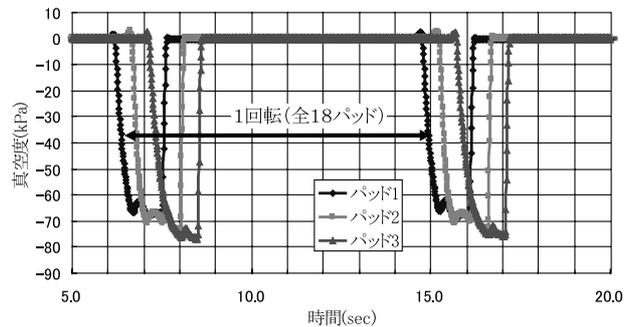
図一五 エアシステム構成図

で壁面から離れないため、風により揺れず、かつ作業反力を確保できる。

ゴンドラケーシングとワインダーはレンタル品でも取り付け可能であり、安価に装置を構成できる。また、ワインダーを制御してゴンドラケーシングを常に自動的に水平に保つ水平維持装置を装備している。

(2) 連続吸着性

本ゴンドラの最大の特徴は、ディストリビュータハブにより壁面に連続して吸着する機構にある。即ち、車輪を一定速度で回転させればパッドの真空度で連続吸着する。実験時の一般的な測定データを図一六に示す。これは、連続した3パッドに圧力計を取り付け、ゴンドラの昇降速度7.2 m/minで車輪を回転移動させた時の圧力変化を測定したものである。計測装置の関係で全18パッドのうち3パッドのデータであるが、グラフの重なりから3パッドが同時に、車輪の回転に合わせて等間隔で吸着していることが判る。



図一六 連続吸着性

また、1回転後も同様の傾向を示していることから、吸着の切替は等間隔で連続性を持って円滑にできている。

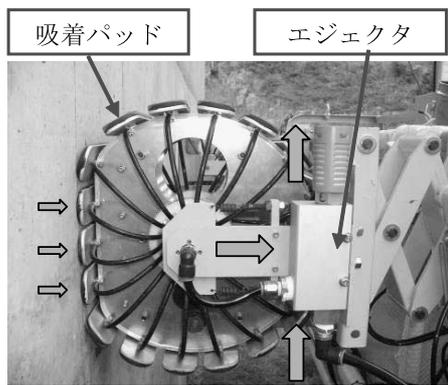
(3) 段差乗越えのための伸縮装置

懸架装置（支持フレーム）と真空吸着車輪は、2本のエアシリンダで伸縮するリンクにより連結されており、アンカレイジのテクスチャー等の壁面段差を円滑に乗越えることが可能である（図一七）。

乗り越え時には、上部2輪若しくは下部2輪が吸着しており、全車輪が壁面から同時に離れることがないため、安定性が確保できる。

4. 実用化実験

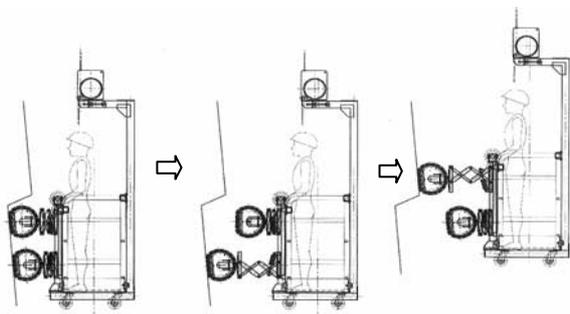
神戸淡路鳴門自動車道の亀浦高架橋7P橋脚（桁下高34mのコンクリート製橋脚）において、基本性能



(⇒: 空気の流れ)

写真一四 真空吸着車輪の詳細

本ゴンドラは、通常のゴンドラに空気圧縮機（今回は、0.7 MPa、2.5 m<sup>3</sup>/min）を動力源としたエジェクタで発生した真空度-70 kPa以下の圧力により、1輪当たり490 Nの吸着力を発生する真空吸着車輪を4輪装着したものである。吸着時の横抵抗力は4輪で980 Nであり、これによりゴンドラは風速16 m/秒ま



図一七 テクスチャーの乗越え方法

と耐久性の確認及び実際の保全作業（点検調査，補修）に供して施工性の検証を行う実用化実験を行った。

(1) 基本性能

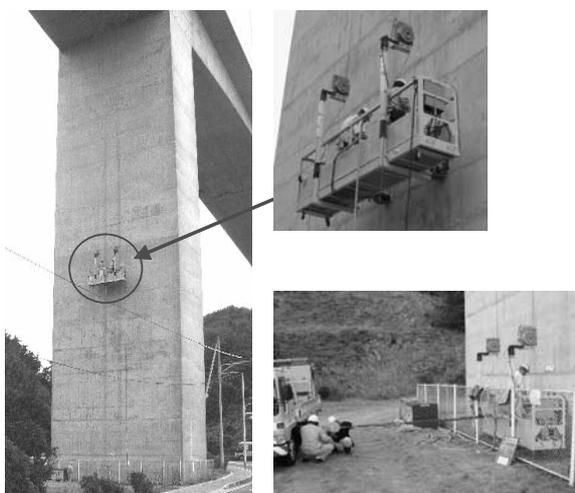
基本性能の確認として，以下の3項目について実験を行った。

- ①真空吸着車輪の吸着力（真空吸着力，横抵抗力）
- ②ゴンドラの昇降能力（昇降速度，昇降安定性）
- ③吸着パッドの耐久性

真空吸着力はゴンドラケージ正面中央部を，横抵抗力は車輪吸着面の近傍とケージ側面中央部を水平方向に引っ張り，車輪が離壁した時の荷重を確認した。

昇降速度は橋脚壁面 20 m 区間を昇降する時間を計測し，昇降安定性は昇降時のゴンドラの挙動（揺れ，車輪の剥がれ）を観察した。

吸着パッドの耐久性は，移動距離によるパッドの損傷状況（ゴムの剥がれ，変形，切れ等）で確認した。実験状況を写真一5に示す。



昇降能力

真空吸着力測定

写真一5 実験状況

基本性能の試験結果は以下のとおりであり，要求性能を十分満足するものであった。

①吸着力

真空吸着力は 2000 N（4 輪）以上で，横抵抗力は 1000 N（4 輪）以上でともに要求性能（真空吸着力 1960 N，横抵抗力 980 N）を満足した。

②昇降能力

昇降速度は 7.2 ~ 7.7 m/min であり，風速 10 m/秒においても昇降時のゴンドラの揺れを感じることはなく，安定して昇降できた。

なお，3 mm 以上の段差を有する打継目や表面欠陥（あばた，砂すじ等）がある箇所では，車輪が吸着困難になることがあったが，離壁は 1 輪ずつ発生し，残り 3 輪が吸着した状態で昇降でき，昇降中は作業しないため 3 輪での吸着力は十分であった。また，真空度制御による伸縮装置の再吸着機構により自動でスムーズに再吸着できた。

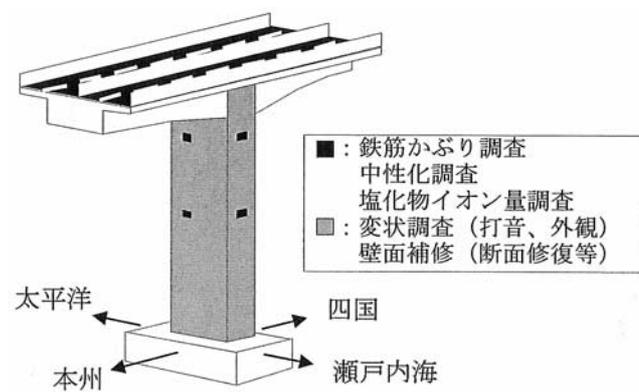
③耐久性

吸着パッドの耐久性は，移動距離 1.5 km までは吸着パッドの交換を要する損傷（切れ）はなかった。また，補修作業を含めた移動距離 10.3 km 後のパッド交換は全数の約 10 %程度で，いずれも外側端部に切れが発生したものであった。

(2) 使用性

本ゴンドラを用いて，図一8に示す範囲のコンクリートの壁面変状調査，コンクリート非破壊検査，変状箇所の補修作業，壁面清掃を実施した。

調査面積は，本州側 440 m<sup>2</sup>，瀬戸内海側 236 m<sup>2</sup> であり，コンクリート非破壊検査は，橋脚中間及び上部で実施した。



図一8 施工箇所図

①壁面変状調査

コンクリート壁面の変状図（マップ）を作成するため，たたき点検により，ひび割れ，浮き，セパレータ変状，鉄筋露出等を調査した（写真一6）。点検時にはゴンドラが揺れず安定しているため，良好な作業性

が確認できた。

### ②非破壊検査

コンクリート非破壊検査として、鉄筋かぶり調査、コンクリート中性化深さ調査及び塩化物イオン量の測定のためのコア採取（4箇所）、ドリル粉末採取（12箇所）を実施した。ドリル等を壁面に押し付けても車輪が壁面から離れることなく反力が確保でき、地上作業と同様に安定して穿孔作業等ができることが確認できた（写真—6）。



打音調査



コア採取



ドリル粉末採取

写真—6 点検・検査作業

### (3) 変状箇所の補修作業

壁面変状調査結果に基づく変状箇所を対象に、総延長29mのひび割れ補修、205箇所のセパレータ補修、点在した27箇所の断面補修を施工した。補修作業では、サンダー、電動ハンマ等の工具による補修が主となるが、作業反力も十分確保でき、地上作業と同様な作業性が確認できた（写真—7）。



はつり作業



清掃作業

写真—7 維持・補修作業

### (4) 壁面清掃

ウォータージェット高圧洗浄機によるコンクリート壁面の水洗い清掃を実施した。19.6MPaの高圧水を吹きつけても作業反力が十分確保でき、ゴンドラの揺れもなく作業性に問題がないことが確認できた（写真—7）。

### (5) 試験施工のまとめ

本ゴンドラを用いて、実コンクリート構造物において壁面変状調査、非破壊検査、変状箇所の補修作業、壁面清掃等の保全作業を実施し、実用上問題のないことが確認できた。予め吊元さえ設置しておけば、汎用ゴンドラと同様に容易に使用できるため、枠組足場を設置する場合と比較すると格段に機動力に優れる。

このため、これまで高橋脚の中間部や上部において変状等が発見されても、アプローチが大変であった調査等が本ゴンドラにより速やかに対応できることになり、コンクリート構造物の保全に威力を発揮することになると思われる。

## 5. まとめ

本ゴンドラでの実構造物における試験施工を通して、枠組足場と変わらない作業性、安全性の確保が確認できた。

今後は、従来の枠組足場や高所作業車等の使用が難しい、岩礁地帯に位置する高架橋橋脚や海上部に位置する吊橋の橋台等（アンカレイジ構造物）の大型コンクリート構造物の補修工事に積極的に活用し、必要な改良を加えさらなる使用性の向上を図り、管理の高度化に繋げて行きたいと考えている。

J[C]MA

#### 《参考文献》

- 1) 坂本, 政田, 広田: 磁石車輪を用いたゴンドラの開発, 建設の機械化, No.545 (1995.7)
- 2) 土山, 坂本: 磁石車輪ゴンドラの開発, 本四技報, 22 [88] pp.2-11 (1998.10)
- 3) 中村 修: 真空吸着車輪ゴンドラの開発, 平成16年度国土交通省国土技術研究会 自由課題 (新技術活用部門) No.30 (www.mlit.go.jp/chosahokoku/h16giken/), (2004).

#### 【筆者紹介】

八杉 行治 (やすぎ ゆきはる)  
本州四国連絡高速道路株  
岡山管理センター  
施設課長代理



三谷 宣博 (みたに のぶひろ)  
本州四国連絡高速道路株  
鳴門管理センター  
専門役



中村 修 (なかむら おさむ)  
本州四国連絡高速道路株  
神戸管理センター  
施設課

