

(解説)

## 超長大橋の実現に向けて

### Technology for Super-long Suspension Bridges



杉井謙一\*(工博)  
Dr. Kenichi Sugii



中川知和\*\*\*(工博)  
Dr. Tomokazu Nakagawa

Kobe Steel has been involved with many suspension bridges, including the Akashi Kaikyo Bridge which has a main span of 1991 meters the longest in the world through the manufacture and erection of cable. Currently, Kobe Steel is involved in the research and development of cables for super-long suspension bridges : high strength wires, an air-spinning method with a 7 mm diameter wire, and measures to increase aerodynamic stability. This paper outlines these new technologies for super-long suspension bridges.

まえばき = 当社は、ケーブルの製作・架設技術を通じて、長大吊橋の建設に関与してきた。その歴史は、1962年に完成した我国初の本格的吊橋である若戸大橋のメインケーブル(より線ロープ)への材料供給に始まる<sup>1)</sup>。その後、材料品質の向上活動を推進する一方、1965年にはケーブル架設工法の研究開発に着手し、解析的・実験的研究のほか、山間部の中小吊橋案件などで現場架設の経験を蓄積していった。

我国の長大吊橋建設は、関門橋を皮切りに、本州四国連絡橋プロジェクトで全盛期を迎えたが、それらを支えた技術のうち、ケーブル分野では平行線ケーブルが特徴的である。欧米の吊橋で平行線ケーブルを架設する伝統的方法はAS(Air Spinning)工法であった。この方法は、亜鉛めっき鋼線をコイル巻きにして現場に持込み、空中(Air)で糸を紡ぐ(Spinning)要領で、亜鉛めっき鋼線を1本ずつ架線していく方法である。当社の研究開発も、当初、このAS工法を研究することからスタートした。しかし、圧倒的なケーブル重量を要求する本州四国連絡橋プロジェクトを想定すると、工場である程度までプレファブ化したケーブル部材を現場で引出す方法の方が得策であると考え、PWS(Prefabricated Parallel Wire Strand)工法の開発に着手した<sup>1)2)</sup>。このPWS工法では、100本程度の亜鉛めっき鋼線を工場に束ね、大型リールに巻取って、現地に搬入する。そして、キャットウォークと呼ばれる工専用足場の上を引出していく方法である。本四架橋の吊橋のうち、ほとんどがPWS工法により架設され、AS工法が適用されたのは、環境保全の目的でトンネルアンカが採用された下津井瀬戸大橋のみであった<sup>3)</sup>。

現在、我国は長大吊橋プロジェクトの端境期にあるが、一方で、次期プロジェクトと呼ばれる超長大吊橋の計画が進展している。当社はこれらのプロジェクトに貢

献できることを目指して、ここ10年ほど、ケーブルのみならず、超長大吊橋全体系に関連する技術開発を行ってきた。

本稿では、超長大吊橋の設計、製作、架設、維持管理に関わる技術で、当社が取り組んでいるものをいくつか紹介する。具体的には、設計に関わるものとして、耐風安定性向上装置である動吸振器やジャイロダンパの活用法、風抜き効果のあるオープングレーチング床版上の車両走行性について述べる。製作に関わるものとして、明石海峡大橋などに用いられた180kgf/mm<sup>2</sup>級亜鉛めっき鋼線を上回る強度の超高強度亜鉛めっき鋼線について述べる。架設に関わる技術として、吊橋プロジェクトが単発的な時代背景に適したAS(Air Spinning)工法に対して、従来の5mm亜鉛めっき鋼線ではなく、より太径の7mm亜鉛めっき鋼線を用いることによる工期短縮について述べる。最後に、維持管理面として、メインケーブルの送気乾燥技術と、簡便かつ高精度のロープ張力検出技術について述べる。

#### 1. 設計に関わる技術

吊橋はハンガロープで桁を吊っているため、たわみやすい構造となっている。このため、風速がある限界値に達すると、桁の上下・ねじれの揺れが急激に増大して、場合によってはフラッタと呼ばれる極めて危険な振動現象が生じ、最悪の場合には落橋に至ることもある。これに対応するため、桁をトラス構造にして剛性を上げたり、流線形の箱桁にして空力特性を向上するなどの設計がなされる。しかし、中央支間が2500mを超えるような超長大吊橋になると、さらなる工夫が必要であるといわれている。

##### 1.1 振り型動吸振器による耐風安定性の向上<sup>4)</sup>

振り型動吸振器は、松久ら<sup>5)</sup>によってゴンドラリフト

\*機械エンジニアリングカンパニー 鋼構造本部 \*\*技術開発本部 機械研究所

の制振装置として研究されている。この動吸振器を超長大吊橋の補剛桁内部に、図1 a)のように設置し、吊橋の連成フラッタを制御することを試みた。装置は、橋軸直角方向の円軌道架台と、その上を走行する台車から成っている。円軌道型動吸振器は、等しい曲率半径を有する振り型動吸振器と力学的に等価であり、図1 b)のようにモデル化できる。図1 b)は、橋梁をねじり1自由度系のモデルで表現し、ねじれ中心をGとする補剛桁に高さ $l_1$ の支柱GPを立て、P点に長さ $l_2$ 、質量 $m_d$ の振子を取付けたものである。 $I$ は補剛桁の極慣性モーメント、 $k$ はねじれ方向の等価なばね定数、 $c_d$ は動吸振器に付加する減衰係数、 $\theta$ は補剛桁のねじれ角、 $\varphi$ は動吸振器の相対回転角である。

中央支間長2500mの超長大吊橋を想定し、図1 b)のような2次元モデルを用いた数値解析と、図2のような2自由度ばね支持模型を用いた風洞実験とを実施し、この制振装置の効果を調べた結果、以下の結論を得た。

- 1) 数値解析により、吊橋中央支間の補剛桁質量の5%に相当する質量を有する台車を搭載した動吸振器を支間中央に配置することにより、フラッタ限界風速が対策前の65m/sから84m/sまで向上することを確認した。
- 2) 同様の条件に基づいた風洞実験により、フラッタ限界風速を26%改善できることを確認した。

これまで、質量付加による吊橋の耐風安定性向上策には補剛桁質量の数%の質量が必要であるといわれていたが、振り型の動吸振器を採用することで、付加質量を大幅に低減できることがわかった。実際の吊橋に適用するには、さらなる検討が必要であるが、一応の見通しを得ることができたと考えている。

### 1.2 ジャイロダンパによる耐風安定性の向上<sup>6)</sup>

ジャイロダンパは、独楽のようにロータを高速回転させることにより生じるジャイロモーメントを利用した振

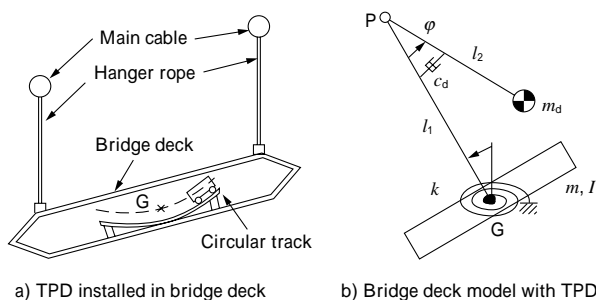


図1 振り型動吸振器 (TPD)  
Fig. 1 Tuned pendulum damper (TPD)

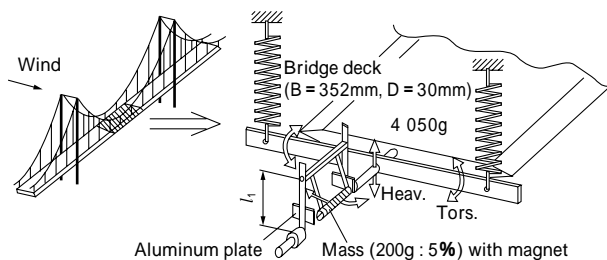


図2 橋桁実験模型と振り型動吸振器  
Fig. 2 Schematic model of TPD unit and bridge deck model

動安定化装置の一種である。ロータを回転させるためのエネルギーを必要とするため、電力の安定供給や長期使用の信頼性などが懸念されるが、動吸振器などのパッシブな制振装置に比べて、大幅に軽量の構造となるのが大きな利点である。

箱桁内へのジャイロダンパの設置例を図3に示す。ジャイロダンパは、ロータとそれを1自由度回転支持で支えるジンバルとから構成され、桁のねじれ振動に対して制振効果がある。図中、 $y$ は桁の鉛直たわみ変位、 $\theta$ は桁のねじれ変位、 $I_r$ はそれぞれロータの $y$ 軸回りの極慣性モーメントと回転角速度、 $I_G$ はロータを含むジンバルの極慣性モーメント、 $\psi$ はその回転角である。

図4に示すような2自由度ばね支持剛体模型を用いた風洞実験を実施し、ロータ回転数の増加とともにフラッタ制御性能が大幅に向上すること、高風速域での桁のねじれ振動が抑制されることがわかった。

また、上記1.1と同様に、中央支間長2500m、フラッタ限界風速65m/sのモデルを用いて、フラッタ数値解析を実施した。中央支間中の7箇所にジャイロダンパ装置を設置し、その効果を試算したところ、7箇所分のジャイロダンパ総質量を中央支間の桁質量の0.27%とし、おのおののロータを600rpmで回転させることにより、フラッタ限界風速を80m/sにまで向上できることがわかった。

### 1.3 オープングレーチング床版上の車両走行性

オープングレーチングは、開口を有する格子状の床構造で、吊橋の耐風安定性を向上させるための風抜きとして路肩部などに多数採用されてきている。特に、アメリカのミシガン州のマキナック吊橋では、オープングレー

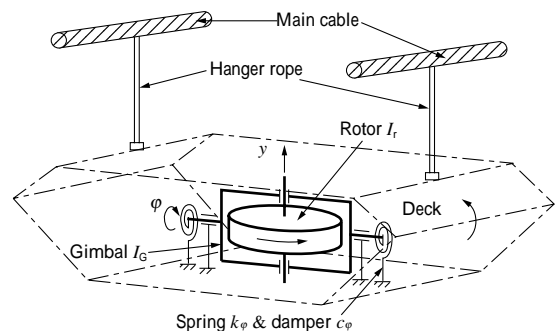


図3 橋桁内に設置したジャイロダンパ<sup>6)</sup>  
Fig. 3 Gyroscopic damper (GD) installed inside deck box<sup>6)</sup>

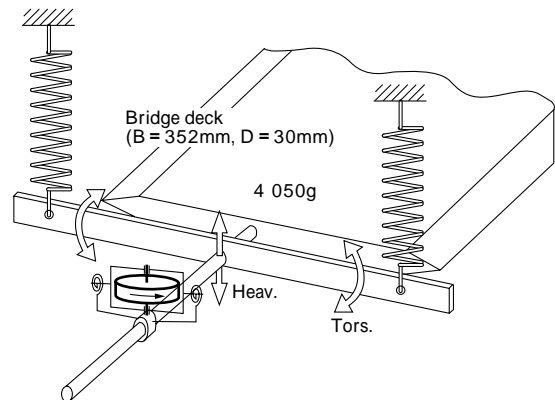


図4 ジャイロダンパを搭載したばね支持模型<sup>6)</sup>  
Fig. 4 Spring supported bridge deck model with GD unit<sup>6)</sup>

チングが走行路面としても使用されており、今後の超長大橋建設においては、オープングレーチング床版を全面採用することが耐風安定性策以外にも死荷重軽減策として効果的であると期待されている。

我国でオープングレーチング床版を本格的な走行路面として適用するには、道路構造令の設計値を上回るすべり摩擦係数(0.4)が確保できること、二輪車の走行に不安がないこと、疲労耐久性が確保できることが条件となる。そこで、各種のオープングレーチングを試作し、土木研究所、本四公団、海洋架橋調査会などとの共同研究活動を通じて、上記の条件を満足する構造を見出した。そして、このオープングレーチング床版を使用した一般道路橋が、青森県で2002年7月に完成し、実橋での各種走行試験を実施することができた<sup>7)8)</sup>。写真1にオープングレーチングの架設状況を、写真2に降雪時の路面状況を示す。降雪時にもオープングレーチング部には積雪せず、降雪地域の床版としても有効であることがわかる。

走行試験は、夏季と冬季とで実施した。夏季のすべり摩擦係数測定は、普通乗用車を時速35kmで急ブレーキをかけ、車輪がロックした時点の車両速度と制動距離から計算した。試験の結果、降雨時でも目標値0.4以上を確保できることが確認された。冬季のすべり摩擦係数測定は、国土交通省東北技術事務所所有の測定車を用いて、スタッドレスタイヤ装着状態で実施した。試験の結



写真1 今別橋架設状況  
Photo 1 Construction of open grid deck (Imabetsu Bridge)



写真2 降雪時の路面状況  
Photo 2 Bridge deck surface after snowfall

果、0.5 ~ 0.6 程度のすべり摩擦係数を確保できることがわかった。

オープングレーチング上を歩行、走行する際の心理面については、住民アンケート調査を実施し、良好な結果が得られた<sup>8)</sup>。また、疲労耐久性については、疲労実験を実施し、十分な疲労耐久性を有していることを確認した<sup>9)10)</sup>。

なお、2層タイプのオープングレーチング床版を用いた橋梁については、国土交通省の技術情報提供システム(NETIS)に「オープンフロアブリッジ工法(登録番号TH-030012)」として新技術登録されている。

## 2. 製作に関わる技術(超高強度亜鉛めっき鋼線<sup>11)</sup>)

長大吊橋のメインケーブルには、長年にわたり160kgf/mm<sup>2</sup>級亜鉛めっき鋼線が用いられてきた。仮に中央支間長1991mの明石海峡大橋にこの160kgf/mm<sup>2</sup>級亜鉛めっき鋼線を用いると、片側で2本、両側合計で4本のケーブルが必要となり、桁部のハンガロブ定着幅が広がることや、ケーブルサグを大きくとらざるを得ないため、主塔高さが大きくなるという問題が生じた。このため、180kgf/mm<sup>2</sup>級亜鉛めっき鋼線が採用され、ケーブル重量の軽減、主塔高さの低減、さらには工期短縮に大きく貢献した。今後、明石海峡大橋を上回る規模の超長大吊橋を架設するとなると、例えば200kgf/mm<sup>2</sup>級の超高強度めっき鋼線が要求される。

亜鉛めっき鋼線を高強度化しようとする、と、靱性および延性が劣化するの一般的な傾向である。靱性および延性を確保しつつ、亜鉛めっき鋼線の高強度化をはかるための方策として、以下の4点があげられる。

鉛パテティング材の強度向上

伸線加工率の増加

伸線中の歪時効の抑制

亜鉛めっき処理中の強度低下の防止

180kgf/mm<sup>2</sup>級亜鉛めっき鋼線では、上記4点に対し、以下に示す3つの対策を施した。

C, Siの添加量を増加する。

対応せず。

冷却伸線技術を適用する。

Siの添加量を増加する。

また、200kgf/mm<sup>2</sup>級亜鉛めっき鋼線では、さらに2点について追加対策を施した。

C, Siの添加量を増加するとともに、Crを添加する。

Siの添加量を増加する。

表1に3種類の亜鉛めっき鋼線の材料特性(引張強さ、耐力、伸び)を示す。

表1 亜鉛めっき鋼線の材料特性  
Table 1 Mechanical properties of zinc-galvanized wire

		160kgf/mm <sup>2</sup> grade	180kgf/mm <sup>2</sup> grade	200kgf/mm <sup>2</sup> grade
Tensile strength	kgf/mm <sup>2</sup>	169	188	214
	N/mm <sup>2</sup>	1 653	1 839	2 097
Proof strength	kgf/mm <sup>2</sup>	137	153	189
	N/mm <sup>2</sup>	1 338	1 495	1 852
Elongation	%	6.6	6.5	6.1

### 3. 架設に関わる技術(高強度 7mm 亜鉛めっき鋼線を用いた Air Spinning<sup>12)</sup>)

平行線ケーブルを架設する工法のひとつである Air Spinning は、亜鉛めっき鋼線をコイル巻きにして現場に持込み、空中 (Air) で糸を紡ぐ (Spinning) 要領で、亜鉛めっき鋼線を 1 本ずつ架線していく方法である。これまで、吊橋のメインケーブルに用いる亜鉛めっき鋼線の直径は 5mm が一般的であった。一方、斜張橋のケーブルには 7mm のものが用いられてきている。Air Spinning の際の取扱い性さえ満足できれば、7mm 亜鉛めっき鋼線では断面積が約 2 倍となるため、Spinning 回数を半減することができる。また、高強度の亜鉛めっき鋼線を活用すれば、さらに Spinning 回数を低減することが可能となり、工期短縮に貢献することができる。

当社では、7mm の 180kgf/mm<sup>2</sup> 級亜鉛めっき鋼線を用いて、その取扱い性試験を実施した。これは、スピニングホイールやストランドシューに見立てた木製ドラムに人力で亜鉛めっき鋼線を巻きつけるというものである。試験状況を写真 3 に示す。試験結果は、特に無理な力を要することなく屈曲させることができ、作業性も良好であった。さらに、亜鉛めっき鋼線を繋ぐための継手 (ワイヤスリーブ) についても、7mm の 180kgf/mm<sup>2</sup> 級亜鉛めっき鋼線に対応できるものを試作し、静的強度試験と疲労強度試験を実施し、良好な結果を得ている。

広島県道路公社の豊島大橋では、160kgf/mm<sup>2</sup> 級ではあるが、7mm の亜鉛めっき鋼線を用いた Air Spinning



写真 3 太径ワイヤ取扱い試験  
Photo 3 Treatment test of 7mm wire

が実施される予定である。

### 4. 維持管理に関わる技術

#### 4.1 メインケーブルの送気乾燥

吊橋のメインケーブルの防錆は、ケーブル (亜鉛めっき鋼線の束) の外周に防錆ペーストを塗布し、丸鋼線でラッピングした上で外面塗装するという方法が長年用いられてきた。しかしこの方法では、塔頂部やケーブルバンド部からの雨水の浸入を完全に防止することは困難で、高温多湿地域の吊橋においてはメインケーブルの腐食問題が生じていた。

メインケーブルの送気乾燥システム<sup>13),14)</sup> は、ケーブル内に乾燥空気を強制的に送り込み、蒸気圧差によってケーブル内部の湿潤環境を順次改善するものである。また、建設中および建設後に浸入・帯水した雨水を、外気との気圧差により強制的に排出する効果も期待できる。本システムは、明石海峡大橋、来島海峡大橋に適用されたが、海外でも、当社がケーブル架設の技術支援を行った韓国永宗大橋 (2000 年 11 月 20 日開通) にも適用された。以下、永宗大橋の例を用いて送気システムの構成を説明する。

送気システムの全体配置図を図 5 に示す。送気機器 (海塩粒子除去フィルタ、除湿機、ブロウなど) は主塔部の桁内に設置される。ここで除湿された空気はパイプを通じてケーブル部の送気ユニットに送られ、ここからケーブルに送り込まれる。送り込まれた除湿空気は、側径間では橋台部と塔頂部へ、中央径間では径間中央部と塔頂部へと、ケーブル内を移動する。そして、排気口からの自然排気および排気ユニットによる強制排気により大気中に放出される。

永宗大橋は完成後 4 年以上を経過するが、装置は順調に稼働している。

#### 4.2 ロープ張力と曲げ剛性の同時推定法

吊橋のハンガロープ張力は、経時的に観察することにより、吊橋の健全性を評価する一指標となりうる。ケーブルやロープの張力を振動法で測定する技術は、1970 年代に新家<sup>15)</sup> により開発され、以来、我国の斜張橋やニールセン橋に広く活用されてきた。この手法は、風や強制加振などによって揺らされたケーブルの 1 次または 2 次の固有振動数を測定して、独自に誘導した算定式を用

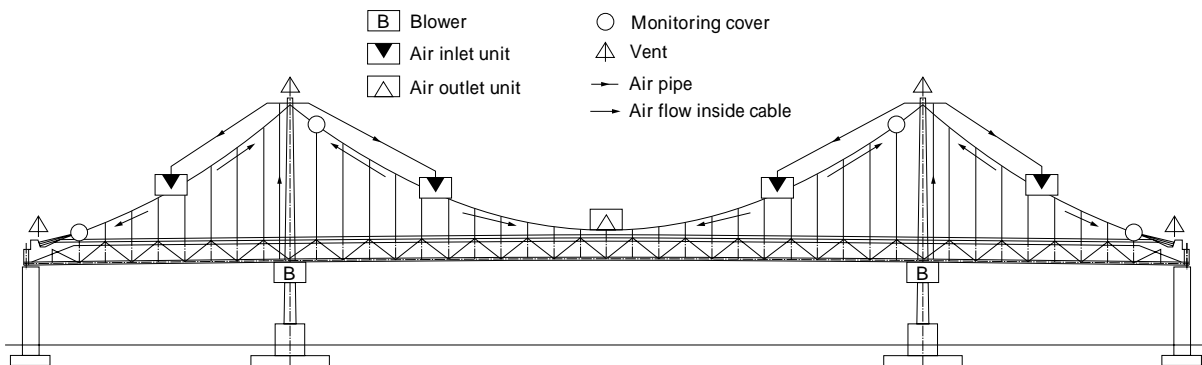


図 5 送気システム全体配置図 (韓国永宗大橋)  
Fig. 5 Ventilation system for Yongjong Bridge



写真4 ケーブル打撃  
Photo 4 Hammering

いて張力を導くというものであり、それまでのジャッキやロードセルによる方法に比して、画期的なものであった。

しかし、新家らの方法では、ケーブルの曲げ剛性を実験などにより事前に求めておく必要があること、曲げ剛性は張力や境界条件により異なるため、全ての条件を網羅して曲げ剛性を正確に求めておくことは困難であることなどの問題があった。

この問題を解決するために考案された方法が「ロープ張力と曲げ剛性の同時推定法<sup>16)</sup>」である。この方法は、複数の高次の固有振動数とモード次数の関係式を導き、張力と曲げ剛性を同時に求めるものであり、曲げ剛性を事前に求めておく必要がない。具体的作業としては、振動センサを取付けたケーブルをハンマ打撃し(写真4)、ケーブルの振動応答を周波数分析することにより、高次までの固有振動数を求める。そして、上記の関係式の2つの係数を同定することにより、ロープ張力と曲げ剛性とを同時に推定できる。運用は簡便で、かつ高精度の結果を得られる手法である。

むすび=ケーブル製作架設技術を通じて長大吊橋建設に果たした当社の役割を概観し、明石海峡大橋の規模を上回る超長大吊橋の建設に関わる課題と、それらに対する当社の取組みとを紹介した。本稿で述べた内容を要約すると、以下のとおりである。

超長大吊橋を設計する上で最大の課題は耐風安定性の確保である。耐風安定性を確保するための装置として、動吸振器による方法、ジャイロダンパによる方法が実現可能性を秘めた技術であることを示した。ま

た、風抜きとして有効なオープングレーチングを全面的に床版として活用することを想定し、そのオープングレーチング上の車両走行安全性について述べた。

超長大橋のケーブルに超高強度ワイヤを用いることは、設計・架設の両面で有効である。ここでは、明石海峡大橋などの本四架橋プロジェクト後期に用いられた180kgf/mm<sup>2</sup>級ワイヤを上回る強度の超高強度ワイヤについて、実現可能性とその材料特性とを示した。

PWS (Prefabricated Parallel Wire Strand) 工法は、輸送上、明石海峡大橋(橋長4km)がほぼ適用限界であることから、それを上回る規模の吊橋ではAS (Air Spinning) 工法によらざるを得ない。その際、従来の5mmワイヤではなく7mmワイヤを用いることにより工期短縮が図れる。ここでは、7mmワイヤの取扱い実験、7mmワイヤ用継手(スリーブ)の強度試験結果が良好であったことを示した。

維持管理に関わる技術として、メインケーブルの送気乾燥技術の適用例と、簡便かつ高精度のロープ張力検出技術の概要とを紹介した。

一企業の研究開発活動として課題のすべてに対応することはなかなか難しく、本稿も隔靴搔痒の感も否めないが、ここに紹介した技術群が次期超長大吊橋建設にとって有用となる日が来ることを願ってやまない。なお、ここに紹介した技術の多くは「R&D 神戸製鋼技報」にもかつて紹介したものであり、参考文献には「R&D 神戸製鋼技報」のものを極力引用するようにした。ホームページを開いていただければPDF形式で出力可能となっているので、ご利用いただければ幸いです。

#### 参 考 文 献

- 1) 杉井謙一: R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.3 (2000) p.82.
- 2) 三田村武ほか: 橋梁と基礎, 1998年12月, p.33.
- 3) 穂山正幸ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.2 (1999) p.2.
- 4) 岡田 徹ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.2 (1999) p.16.
- 5) 松久 寛ほか: 日本機械学会論文集 C, 59-562 (1993) p.1717.
- 6) 岡田 徹ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.53, No.1 (2003) p.59.
- 7) 広沢正雄ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.53, No.1 (2003) p.53.
- 8) 葛西憲之ほか: 海峡横断, Vol.19 (2003.11) p.43.
- 9) 広沢正雄ほか: 土木学会57回年次学術講演会CD ROM(2002)
- 10) 高橋 実ほか: 土木学会57回年次学術講演会CD ROM(2002)
- 11) 隠岐保博ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.2, (1999) p.8.
- 12) 峰地慎一ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.53, No.1, (2003) p.69.
- 13) 岡野 哲: 橋梁と基礎, 1998年8月, p.107.
- 14) 峰地慎一ほか: 土木施工, 42巻12号(2001) p.30.
- 15) 新家 徹ほか: 土木学会論文報告集, 第287号(1979) p.26.
- 16) 山極伊知郎ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.49, No.2 (1999) p.12.