

(論説)

## ハードとソフトの連携

Construction Related Developments Resultant from Cooperation between Business Division and Research Laboratory at Kobe Steel



杉井謙一\*(工博)  
Dr. Kenichi Sugii



中川知和\*\*(工博)  
Dr. Tomokazu Nakagawa

In response to the demand for severe cost curtailment in the public works related construction field, performance specified orders, which increase the degree of freedom in designing rational structures, tend to replace conventional specification orders. Consequently, the importance of rational (high-performance and low-cost) structures is increasing. From this point of view, cooperation between the business division and the research lab is becoming essential. This report summarizes Kobe Steel's activities regarding the development of various new technologies for steel and composite structures that were created through the above-mentioned type of collaboration.

まえがき = 当社の土木鋼構造分野の歴史は、1965年ごろに吊橋用平行線ケーブルの製作架設技術の開発に着手したときに端を発し、以降、橋梁、鋼製砂防堰堤、港湾海岸構造物、防音設備などを手がけてきた。いずれの商品も研究開発的要素が強く、実務を担当する事業部（カンパニー）と要素技術を保有する研究所とが強く連携しながら商品開発を行ってきた。本稿では、当社商品群の開発の過程を振り返りながら、両者の連携プレイについて述べてみたい。特に、最近の複雑化している課題に対して、異分野の要素技術を活用しつつ問題解決を図っている事例について詳しく紹介したい。

### 1. 吊橋ケーブル架設

平行線ケーブルによる我が国の本格的吊橋の歴史は関門橋に始まる。関門橋のケーブルはPrefabricated Parallel Wire Strand (PWS) 工法<sup>1)2)</sup>で架設された。当社の場合、PWS 製作技術は1965年から1970年ごろにかけてほぼ完成させたが、PWS 架設技術については解決すべき課題が多く、1970年に設立した構造研究所と実務部隊とが一丸となって研究開発を進めた。1998年に供用が開始された明石海峡大橋（写真1）のケーブル架設は、この技術開発の集大成と言える。

当時の主要課題は、キャットウォーク（ケーブルトラスを基本構造系とするケーブル架設用空中足場）を如何にして設計、架設、調整するか、架設途中のPWS群に外気温が如何なる影響を及ぼすか、などであった。

キャットウォークは非抗圧縮材であるロープで構成されるため、所用の形状を現出させるための調整が困難な構造物である。特に、温度変化により張力が抜けてしまう部材が出現する可能性があるため、プレストレス量の

決定には細心の注意が必要である。実務部隊は海外の工事誌の調査や過去の経験を武器に現象を整理し、研究所はキャットウォーク模型による実験、解析プログラムの開発を実施した<sup>3)</sup>。

ケーブルの温度応答は、ケーブルの架設精度を管理する上で重要である。ケーブルの架設精度は、一般に、サグ（たるみ量）によって管理されるが、長支間の吊橋ではわずかの温度差がサグに大きな影響を及ぼすことになる。実務部隊はやはり現象を整理し、研究所は実物大ケーブル模型を用いたステップ温度応答実験によりケーブルの熱物性値を明らかにするとともに、ケーブル断面温度の推定を行う計算プログラムを開発した<sup>4)</sup>。

いずれの場合も、研究途上で実務部隊が頻繁に研究所を訪れ、議論を重ねた。また、得られた成果の検証は、両者が架設現場で行った。

1980年以降、コンピュータが目覚ましい発達を遂げ、関門橋時代とは情勢が一変したが、実務部隊と研究所とは今も議論を交わしながら、環境の変化に応じてソフトウ



写真1 明石海峡大橋  
Photo 1 The Akashi Kaikyo Bridge

\*都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部 \*\*技術開発本部 機械研究所

エアの改良を継続実施している。

## 2. ケーブルの張力同定

前節で紹介したように、当社は古くからケーブルの素材、架設に関わる技術を開発しており、本四連絡橋を中心に多くの架設実績もある。この技術開発の中で、とくにソフト技術が効果を発揮したもののひとつに「ケーブルの張力同定」が挙げられる。

斜張橋やニールセン橋などのケーブル系橋梁においては、完成時の形状と応力を設計許容値内に収めて安全かつ精度良く架設するために、ケーブルの張力を精度良く測定し、架設途中または完成直前に張力を調整する作業が不可欠となる。ところが、張力の測定をロードセルなどで直接行うと多大なコストと時間を要するため、簡便に精度良く測定できる新技術が望まれていた。

そこで当社では、ケーブルの固有振動数が張力の大きさによって相違するという物理現象を応用した、いわゆる振動法による張力同定の手法を世界で初めて実用化した<sup>5)</sup>。この手法は、風や強制加振などによって揺らされているケーブルの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から張力を導くというものであり、従来の直接測定法に比べて画期的に簡便で低コストなものである。現在、この手法は標準的なものとして業界で定着している。

最近では、さらにこの振動法を改良して、より簡便にした新手法も開発した<sup>6)</sup>。この新手法は、従来の振動法で必要であった事前の曲げ剛性の測定が不要であり、何の事前準備もなしに、ケーブル振動時の加速度を測定するだけで、瞬時に張力が算定できるというものである(写真2に測定風景を示す)。この新技術は、従来は看過されていた高次の固有振動数にまで着目した点がユニークであり、張力同定の決定版として評価され、鋼構造協会の論文賞を受賞した。この新技術のアイデアは、高次モードの波動現象に馴染みの深い音響の研究者から出たものであり、異分野の発想が活かされた例である。

## 3. 制振技術

橋梁における重要技術のひとつに、風や交通による振動の抑制(制振技術)が挙げられる。特に、吊橋では、桁がハンガで吊るされているため、たわみやすい構造と



写真2 振動法によるケーブル張力測定  
Photo 2 Measurement of cable tension by vibration method

なっており、ある限界風速になると、桁の上下・ねじれの揺れが急激に増大して、場合によっては落橋に至る「フラッタ」と呼ばれる極めて危険な現象が発生する。このため、桁を骨組(トラス)構造にして剛性を上げたり、流線形の箱桁にするなどの設計がなされているが、主塔間隔(スパン)が2500m超級の超長大吊橋になると、さらなる工夫が必要とされている。このため、当社では動吸振器を利用した機械的制振技術を、風洞実験装置とシミュレーションを駆使して開発している<sup>7)</sup>。この動吸振器は、横風によって桁が揺れだすと同時に、桁の内部に収められた振子がレール上を動き、レールと振子の間に設置されたダンパによって減衰が付与されて、桁の揺れを押えるという方式であり、駆動エネルギーが不要でロバストなものである。

また、高速道路などの高架橋においても、交通振動低減のために様々な対策が講じられているが、当社では、そのための新技術として「キールダンパ」(図1)と称する装置を開発した<sup>8)</sup>。この装置は、ヨットのキールのように桁の下に突出した鋼板を付け、鋼板先端を樹脂で囲むことにより減衰を付与するものである。桁の端部にキールダンパを付けると、桁がたわんだときに桁端部の回転角変位がキールにより大きな変位に拡大され、キール先端部の樹脂が変形して減衰効果を発揮する仕組みである。本装置は日本道路公団殿の南阪奈道路/當麻第1橋(仮称)に採用された。

以上のような、制振技術のアイデアは、機械の振動・音響の研究者から生れたものであり、やはり異分野の知恵が活用された例と言える。

## 4. 鋼製橋脚の座屈解析

1995年の阪神・淡路大震災によって、橋梁にも甚大な被害が生じたが、その損傷を調べてみると、ほとんどが橋脚に集中していた(写真3)。そこで震災直後から、土木研究所主導のもとに、橋脚の耐震設計指針の見直しを開始された。当社も、鋼構造物メーカーの立場でこのプロジェクトに参加し、鋼製橋脚の新設計指針策定に協力した。

鋼製橋脚は、大震災によって2基が完全崩壊したほか、多数が局部座屈やクラック発生などの損傷を受けた。耐震設計指針を見直すには、まずこれら損傷(特に座屈)の発生メカニズムを解明したうえで、巨大な地震力が作

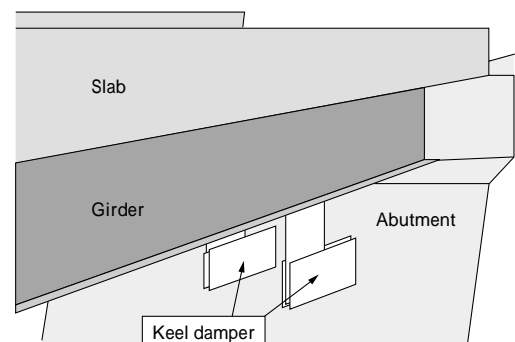


図1 キールダンパ概念図  
Fig. 1 Schematic diagram of keel damper



写真3 阪神・淡路大震災による鋼製橋脚の座屈  
Photo 3 Buckling of steel pier by Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster

用しても崩壊に至らない、強くて粘りのある構造を見出さねばならない。このため、地震を模擬した大型の繰返し載荷実験が多くの研究機関で実施されたが、多種類の形状の橋脚を網羅して実験することは不可能であり、数値シミュレーションの活用が期待された。しかし、局所的な板の塑性変形が急激に伝播し、全体の崩壊に至るといふ、極めて複雑な座屈過程を数値計算で追跡することは容易ではなく、当時は解析事例が存在していなかった。

そこで当社では、得意分野とする数値シミュレーション技術を活用して、典型的な箱型断面の鋼製橋脚の弾塑性大変形解析をいち早く実施し、載荷履歴曲線が実験と非常に良く一致することを確認したうえで、耐震性能を上げ得る断面形状を提案した<sup>9)</sup>。

このような、極めて複雑な変形と応力の履歴を受ける大型構造物の構造解析は、当時一般的には、コスト・精度の両面で困難であるとの認識であったが、今では、数値シミュレーションは耐震性能評価に広く応用されている。

## 5. 合成床版

道路橋の床版は、RC（鉄筋コンクリート）床版やPC（プレストレストコンクリート）床版が一般的であるが、最近では、鋼板とコンクリートをずれ止めで締結した合成床版が第3のタイプとして普及しつつある。この合成床版は、RC床版に比べて耐久性が高いことが最大の長特であり、橋梁の寿命延長に大きく寄与できる。しかしながら、合成床版はRC床版よりもコストが高いことが普及の妨げになっている。

そこで当社では、施工性が良く低コストで、かつ十分な耐久性を有する合成床版を開発した<sup>10)</sup>。この新しい合成床版は「U-Bolt床版」(図2)と名づけているが、その構造の特徴は、底鋼板とコンクリートの剥離防止にUボルトを用い、底鋼板に縞鋼板を用いてずれ止め効果を期待している点、Uボルトを介して底鋼板と鉄筋とを一体化（剛性を確保）させ、コンクリート打設時の型枠を兼務させている点である。結果として、構造は極めてシンプルになり、材料・施工の両面で低コストが実現される。

一方、耐久性に関しても、自動車の輪荷重を想定した

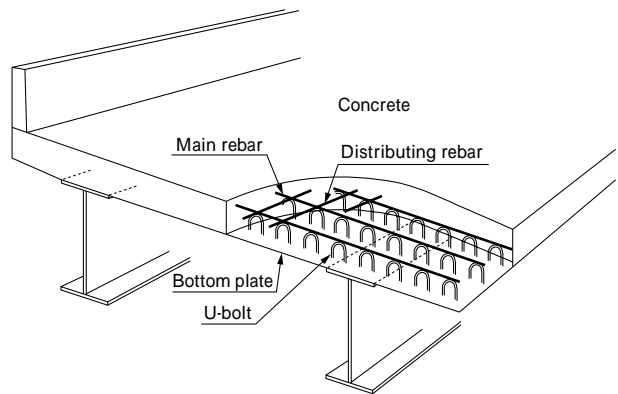


図2 U-bolt床版  
Fig. 2 U-bolt slab

繰返し載荷に対して十分な寿命を有していることが、実験により明らかになっている。耐久性を確保するためには、最適設計を行わねばならないが、合成構造の場合、コンクリートがひび割れる現象を考慮せねばならないことが設計を困難にしている。特に新しい構造の場合には過去のデータの蓄積が無いため、数値シミュレーションの利用が不可欠である。そこで、ひび割れによるコンクリートの急激な剛性低下を考慮した非線形解析を実施して詳細な検討を行い、これをもとに簡易設計式を誘導して設計を標準化している。

当社は、これまで鋼製の構造物が中心メニューであったが、いまはコンクリートの長所（安価で圧縮に強い）を活かしたハイブリッドタイプの構造物にも力を注いでいる。上記の合成床版以外にも、RC橋脚と鋼製の桁を剛結合した橋梁<sup>11)</sup>なども手がけている。これらの開発には、研究所の数値シミュレーション技術と実務部隊の設計ノウハウが直接活かされている。

## 6. 鋼製堰堤の数値シミュレーション

我が国には、土石流の発生が懸念される危険箇所が多くあり、下流への被害伝播を阻止するために、狭隘な谷間に堰堤と呼ぶ砂防ダムが多数設置されている。

堰堤の多くは非透過型のコンクリート製であるが、当社では、鋼製の格子型堰堤（写真4）をメニューとしている。前者は初期コストが低いものの、一定期間経過すると堰堤上流側に土砂が堆積して土石流の補足能力が著しく低下するという欠点がある。一方、後者は鋼管を立



写真4 格子型鋼製堰堤  
Photo 4 Steel grid sabo dam

体的な格子に組んだ構造物であり、土石流が衝突したときには粒径の大きな岩石を補足して下流への被害を防止するとともに、平常時には土砂を流下（透過）させるので、堆積の問題がほとんど無い。

鋼製堰堤の設計においては、靱性が高いという鋼材の長所を活かして、土石流のエネルギーを効率的に吸収できるように構造を決定する必要がある。そのために、当社では数値シミュレーションを有効に活用した。すなわち、岩石の衝突による衝撃力が鋼管に作用したときの動的弾塑性構造解析を実施して、変形と応力を求め、鋼材の塑性変形による吸収エネルギーを定量的に把握し、適性な板厚や直径、格子間隔などを決定している。

さらに、一度土石流の被害を受けて損傷した鋼管が、再度の土石流に耐えられるか否かを判定するためにも、同様の数値シミュレーションを利用している。

このような高度な数値シミュレーションに基づいた設計は、土石流のメカニズムに対する知見が豊富な実務者と、計算力学の専門家との連携無くしては実現し得ないものである。

## 7. 鋼製人工リーフ

当社では、合成ケーソンや沈埋函など、海洋鋼構造物でも実績があり、新メニューも開発している。これまで、フレア護岸<sup>12)</sup>と称する低越波で景観にも優れた合成構造の護岸を提案しているが、さらに、鋼製の人工リーフ<sup>13)</sup>も開発中である。

人工リーフは沿岸部に設置され、沖合からの波浪を押えて海面を静穏化するための構造物であり、親水性向上と海岸浸食防止に大きな効果がある。当社では、新しい形式の鋼製人工リーフを開発しており、基礎実験によって、従来の消波ブロックに比べて2倍程度の消波性能を有することを確認している。この新形式人工リーフは、複数の多孔板を組合わせた構造になっており、おのおの多孔板の空隙率を、沖側から岸側に向かって徐々に小さくしたことが最大の特徴となっている(図3)。この構造によって、広範囲にわたる周波数を持つ波のエネルギーを、効率良く吸収することができる。いわばブロードバンドな消波構造と言える。この結果、従来の人工リーフに比べて構造がコンパクトになり、場合によっては構造全体を海面下に沈めて、景観上の問題を解消することも可能である。



図3 空隙率傾斜型人工リーフ  
Fig. 3 Artificial reef with varied opening rate

この構造のアイデアは、波動現象の研究者と港湾構造の研究者から出たものであり、現在、設計部門の実務者とともに実用化に向けての検討を実施しているところである。

## 8. 遮音壁の上端に設ける山形消音装置

新幹線や高速道路などの沿線における交通騒音の低減は、各種の環境対策事業の中でもとくに重要な位置付けとなっており、新しい騒音低減技術の開発が各機関で精力的に進められている。

当社でも、本技術に着手してからすでに20年以上を経過し、多くの騒音低減装置・防音構造を開発するとともに、それらを実用化してきた。とくに、これらの技術開発においては、大型無響室（高さ8×19×15m）などの充実した実験設備とともに、独自に開発した数値シミュレーション技術を活用して、性能予測精度を高め、高性能で合理的な消音・防音装置を短期間で開発できる体勢を整えている。以下では、ユニークな消音・防音装置の開発事例として、山形消音装置を紹介する<sup>14)</sup>。

鉄道や道路の防音壁の性能を向上するには、単純にはその高さを延伸すればよいが、この場合、車窓の景色が遮断される、沿線に新たな日影帯が生ずる、風荷重が増加する、といった問題が発生する。これらの解決策として、当社ではスリット型遮音壁<sup>15)</sup>や張出し型遮音壁<sup>16)</sup>を開発しているが、さらに効果の高いものとして、遮音壁の上端に設置する山形消音装置を開発した。本装置は、多数の三角形の吸音板を、頂点を上にして横に並べた壁構造になっており、側面から見て山が連なったように見える(写真5)。この形状によって、車窓からの視界性が格段に向上する(残像効果によって透明板と同等になる)とともに、風荷重も大きく低下する(受圧面積が小さくなる)。

また、通常の直壁型遮音壁に比べて面積が小さいので、遮音性能が低下すると思われがちであるが、実際には、山形形状による音波干渉作用と吸音面の効果的な配置とにより、従来と同等もしくはそれ以上の遮音性能を実現している。このような設計最適化には、独自開発の音場シミュレーションが極めて有用であった。現在、本装置は、東北新幹線、東海道新幹線、名古屋高速道路におい



写真5 山形消音装置  
Photo 5 Mountain-shaped sound barrier

て採用されている。

以上のような消音・防音分野の製品群も、研究所で長年にわたって培ってきた音響技術と、橋梁技術が結びついて初めて実用化が可能となった。

むすび = 最近の複雑化する課題を解決するための技術開発には、幅広い視点、現象に対する洞察力、さらには一見無関係と思われる異分野の要素技術を適用する試みが欠かせない。本稿ではそのような事例の一端を紹介したが、重要なのは、実務を担当する事業部（カンパニー）がしっかりと現象把握を行うことと、要素技術を保有する研究所が幅広い視野をもって適切な要素技術を選定し、適用を試みることである。現在、両者の関係は良好に機能していると自負しているが、このような関係を継続発展させ、鋼構造・合成構造分野での魅力ある製品を今後も生み出していきたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 三田村武ほか：橋梁と基礎，1998年12月，p.33.
- 2) 杉井謙一：R&D 神戸製鋼技報：Vol.50，No.3，(2000) p.82.
- 3) 波田凱夫ほか：R&D 神戸製鋼技報：Vol.23，No.1，(1973) p.94.
- 4) 新家 徹ほか：土木学会論文報告集，第302号，1980年10月，

- p.15.
- 5) 新家 徹ほか：土木学会論文報告集，第287号，1979年7月，p.26.
- 6) 極伊知郎ほか：構造工学論文集，Vol.42A，(1996) p.547.
- 7) 岡田 徹ほか：風工学シンポジウム論文集，(1998)，Vol.15th，p.341.
- 8) 本家浩一ほか：土木学会第57回年次学術講演会，(2002) I-596.
- 9) 中川知和ほか：阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，1996年1月，p.599.
- 10) 山田岳史ほか：第57回年次学術講演概要集，土木学会，2002年9月，CS4-051.
- 11) 山田岳史ほか：構造工学論文集，土木学会，2002年4月，p.1327.
- 12) 片岡保人ほか：海洋開発論文集，第17巻(2001) p.61.
- 13) 宇津野秀夫ほか：海洋開発論文集，第18巻(2002) p.317.
- 14) 田中俊光ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49，No.2(1999) p.74.
- 15) 林 信輝ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.40，No.2(1990) p.49.
- 16) 田中俊光ほか：日本騒音制御工学会講演論文集，1990年10月，p.57.