

「橋梁のアセットマネジメントとレトロフィット」



講演者

東京工業大学 教授
三木 千壽 氏

プロフィール

1947年、徳島県生まれ。1972年、東京工業大学大学院博士課程を退学後、東京工業大学土木工学科助手、1979年、東京大学専任講師、1980年、同助教授、1981年、東京工業大学助教授、1990年同教授、2003～05年、工学部長兼理工学研究科長、2005～07年、理事・副学長を務める。土木学会、溶接学会、鋼構造協会などの理事、国際溶接協会疲労部門委員会副委員長などを歴任。土木学会論文賞、田中賞(論文部門4回)、溶接学会業績賞、日本鋼構造協会賞などを受賞。鋼構造、橋梁工学、破壊力学などを専門分野とし、本州四国連絡橋の疲労設計・製作管理、羽田のスカイアーチ等の橋梁の意匠設計、首都高速や新幹線などの橋梁のリハビリテーションなど、実務の現場をベースとした研究を進めている。

戦略的な維持管理を進め、社会資本の寿命を延ばす

本日は「橋梁のアセットマネジメントとレトロフィット」と題して話をします。実は、この分野は、ムード先行で実体が伴っていないことを私は心配しています。ここで少し問題提起をさせていただき、実際にこれからどうしていくのかを考えたいと思います。

ムード先行と言うのは、例えば土木学会の年次大会等において、構造系、コンクリート系などで、メンテナンス絡みの研究発表がこの数年激増していますが、課題の設定が現場で問題となっていることと乖離していることや、成果の実務への適用性などの面で疑問を感じる事がしばしばあります。

現状の認識として、2010年6月16日付けの日経新聞を見てみましょう。高度成長期に集中的に整備した橋やダムなどの社会資本の多くが、今後20年間のうちに、建設から50年を経過し、それらが老朽化して維持管理・更新が大変になります。国土交通

省の試算では、2060年までの50年間で更新費は190兆円に達し、このままいくと2037年度には新規事業の財源がゼロになる。そして「戦略的な維持管理を進め、社会資本の寿命を延ばす必要がある」としています。これが本日の主題であり、我々の課題です。これを実現するにはどうすればいいでしょうか。

図-1は現在国土技術政策総合研究所長の西川さん作成の資料ですが、日本の道路橋の建設時期をまとめたものです。1971～75年の間に建設された橋は2万を超えています。私自身もこの間に大学を卒業して、もう40年になりますから、自分のことを言われているような感じですが、これらが建設から50年を超えていきます。

しかし、50年を超えてなぜ悪いのか。これが重要な課題です。多くの橋梁はそれほど老朽化しているわけではありません。鋼橋の取り替え理由に関する国土交通省の資料(図-2)によると、本体の物理的な損傷による取り替えはほとんどありません。幅が狭い

とか交通混雑など機能上の問題や、他の改良工事に起因するものばかりです。

物理的な劣化現象としては、鋼構造では疲労、コンクリート構造ではひび割れを起こすアルカリ骨材反応が大変問題視されています。確かにかなりひどい状況の構造物もありますが、これから頑張れば危機的な状況は逃れられると私は考えています。

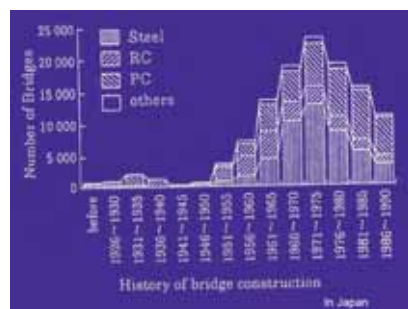


図-1 日本の道路橋の建設時期

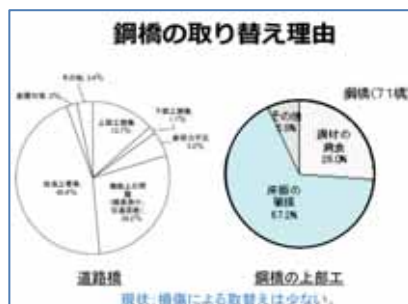


図-2 鋼橋の取り替え理由

the Content of a Lecture

しかし、今のやり方のままでは、おそらくうまくいきません。現行の点検、診断、補修・補強には、技術面、運用面とも課題が多いのが実情です。最近よく言われる言葉が、「対症療法型から予防保全型への転換」です。今までのような、壊れたら直すという場当たり的な対処を改め、もう少し計画的にやりましょうということです。これがアセットマネジメントという言葉で表現されています。

そこでこれから、以下のようなテーマで順に話をしていきます。

- 1 日本の橋梁の現状、特に鋼橋の疲労とその原因
- 2 America in Ruins
- 3 アセットマネジメントの導入
- 4 具体的な取り組みの例：東京都
- 5 これからの取り組み
- 6 橋梁の真の性能は
- 7 モニタリング
- 8 アメリカでの研究開発
- 9 今後の展開

溶接は品質管理が大切 あまりに多い施工不良

まずは日本の橋梁の現状、特に疲労問題についてです。

需要の高い順に整備をするのは、社会資本整備の宿命です。これは、技術的な経験の乏しい順であり、使用条件の厳しい順とも言えます。日本の社会資本整備は、1960~70年に集中しました。鋼橋は、この時期にリベット構造から溶接構造へ変化しています。

鉄道では東海道新幹線が、溶接構造にした最初の大規模プロジェクトです。

溶接の技術開発がかなり進んだこともあり、限られた時間と予算の中での効率的な整備を考えると、溶接構造の採用は当然でした。溶接が構造物の軽量化と優れた経済性を実現したのです。これは世界中で同様でした。しかし、そのころに建設した構造物の疲労は世界中で大問題となっています。

溶接が抱える問題は、溶接による構造物がつくられた当初から知られていました。写真-1は1938年、ベルギーでの事故です。



写真-1 橋梁における疲労による事故

建設後3カ月程度しか経っていないHasselt Bridgeが突然落ちました。建造時に残った溶接割れを起点として、ドン、と脆性破壊したわけです。同時期に複数の橋が同様の原因で落ちています。私の尊敬する奥村先生が1960年代から指摘され続けたように、溶接において、品質管理がいかに大切かということです。

日本でも、実は疲労による事故はたくさん起きています。ただ、後述するアメリカの事故に比べて、それほど大規模ではありません。例えば1988年に東京のある幹線道路の橋で、写真-2のように下フランジ（※1）が溶接部で全幅に渡り切れているのが見つかりました。

たまたまウェブ（※2）に使っている材料と隅肉溶接金属の伸び能力がよく、亀裂が止まりましたが、脆性破壊に移行してもおかしくありませんでした。このようにラッキーとしか言いようのない状況に助けられているために、このような恐ろしい事故でもあまりシリアスにとらえられていないのです。



写真-2 鋼橋に生じた疲労事例

テレビ等でも紹介された事例では、首都高速の鋼製ピア（橋脚）があります。首都高速では約2,000基の鋼製ピアがありますが、そのうちの700基に何らかの異常が見つかっています。これらのほとんど全部、99.9%が施工不良によります。おそらく、同種の構造物は全国では5,000基ほどあるのではないかと思います。今後とも注意の必要な現象です。

私が1998年に最初に相談を受けた首都高速3号線池尻ランプのピアでは、本来、断面全部に溶接されているはずの継手（フルペネ溶接）が実際はされておらず、板の内部に残されていた未溶接部から疲労亀裂が広がっていました。現在、首都高速のピアを見ると、添接板がたくさん貼ってあります。予防を目的にしている箇所もありますが、放っておくと危ないから貼ってい

るわけで、深刻な状況です。

赤坂から永田町にかけての国道246号沿いの首都高速には、丸いピアがボックス桁にすぽんと入っています。大変きれいな造形設計なのですが、残念ながらそこにも亀裂が入っています。丸い柱に沿った接合部分が連続的に切れた状態です。写真-3は補修後の姿です。こういう事態がたくさん起きています。しかし、ある時期は皆が鋼製ピアの疲労について問題意識を持ちましたが、もう何となく冷め気味なところを心配しています。



写真-3 補修補強されたピア

- ※1 フランジ=H型やI型の断面の梁の上下に付けた板
- ※2 ウェブ=H型やI型の断面の梁において上下のフランジをつなぐ板

点検してもクラックを見つけれない現状

それから、鋼床版の亀裂も大きな問題です。鋼床版は薄い鋼板を縦横に組み合わせてつくる床版です。橋を渡る自動車を直接支える部材ですが、荷重が大きいと、一気にたくさんの疲労亀裂が発生します。ドイツで提案された床版形式ですが、世界で一番使っているのは日本です。アメリカには鋼床

版を使った橋はおそらく30ぐらいしかありません。ジョージワシントンやゴールデンゲートなどの長大吊り橋のRC床版を取り替えるために使ったのが最初だと思います。ヨーロッパではセバーン橋での鋼床版の疲労損傷が有名ですが、鋼床版の橋梁は長大吊橋をのぞくとそれほど例がありません。日本は首都高速や阪神高速で軽量化のために鋼床版をたくさん使っており、日本は鋼床版の使用とその疲労問題については大変な先進国です。

図-3は、千葉県舞浜にある鋼床版構造の橋の疲労亀裂箇所を記したものです。ある会社が点検して、「損傷なし」と判定した橋に対して、構造特性を検討する目的でひずみゲージ(※3)を貼る準備に橋の中に入ったところ、疲労亀裂だらけだと分かったのです。ボックス桁の内部からの検査結果だけです。すごい数のクラックが入っています。これを点検で見逃がしているのが現状です。

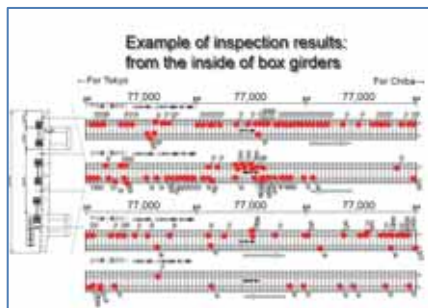


図-3 疲労亀裂箇所

要するに、これまでの鋼桁や鋼製橋脚や鋼床版の点検と疲労損傷の実態を見ると、アセットマネージメントの原点となる現状を正確に把握することからできていないといわざるを得ません。

アセットは資産という意味ですが、自分の財布にいくら入っているかも知らずにマネージメントなどできません。自分の資産がどれくらいなのかを知るところから始めなければいけません。

他にも、いろいろなクラックの例を挙げてみましょう。デッキプレートで隠されて見えない場合もあります。縦割れしたアスファルトを何回直しても、また割れる。めくってみたら、本体にクラックが入っている、というわけです。

首都高速3号線の渋谷で標識柱が折れて国道246号線に落ち、高級車を1台つぶした例もありました。事故後に、同じ時期に設置された標識柱を調べたところ、かなりの数のクラックが見つかりました。きれいに疲労亀裂が進展し(※4)と脆性破壊(※5)していました。

対策に疑問を持つような事例もあります。2002年11月に名阪国道の山添橋に亀裂が発生しました。主桁ウェブにスリットを入れて板を挿入させ、その部分を溶接した箇所から、上方向に約1mのクラックが見つかったのです。公表資料によると復旧工事でその部分に板を当ててふさいでいるようです。すなわち破面を観察したような痕跡がありません。きちんとした原因究明がなされたかが疑問であり、原因を特定せずにふたをただけのように見えます。

それから写真-4は、木曽川大橋のトラスの斜材がコンクリート床版に埋め込まれる境界部の腐食による切断です。

the Content of a Lecture



写真-4 木曾川大橋の斜材切断

以前、土木研究所では腐食マップをつくっていたと記憶していますが、そこで典型的な腐食損傷とされているのと全く同じです。埋め込み部、特に斜めに埋め込まれた裏側は腐食の最も進行しやすい部位です。結露して、すべての水滴がそこへ落ちていくのです。木曾川の場合、潮風が吹いているでしょうから最悪です。土木研究所の腐食マップだけでなく、道路保全技術センターから出されている資料などにも同様な図があったと記憶しています。いくら答申やガイドラインを出しても、それらが実務で使われていない。私としてはこれを大変心配しています。

※3 ひずみゲージ=微小なひずみを測定できる力学的センサ

※4 疲労破壊=繰り返しかかる応力によって、材料に亀裂が発生し進展して破壊にいたる現象

※5 脆性破壊=亀裂などを起点とし、伸びのない状況で急激に亀裂が進展し破壊する現象

鋼橋の疲労損傷の原因を分析する

私は国際溶接協会 (IIW) の疲労部門委員会で永年活動してきました。イギリスの溶接研究所 (TWI) のスティーブ・マードクス氏が委員長、私が副

委員長といった関係です。特に溶接構造物の疲労損傷と補修については私が主査を務めています。そこで世界中のいろいろな橋被害のデータを集め、鋼橋の疲労損傷の原因を以下のように分類しています。

- 1) 溶接時に残された欠陥
- 2) 疲労強度の低いディテール (部材) の採用
- 3) 設計では想定していない力の発生
- 4) 部材の継手部
- 5) 構造物の想定外の挙動

1)の「溶接時に残された欠陥」とは、不溶着部や割れなどです。

2)の「疲労強度の低いディテール (部材) の採用」とは、はっきり言えば、疲労設計の誤りです。日本の道路橋は2002年まで疲労設計をしていません。ですからどこに何が入っているか分からない状態です。実際、とんでもないディテールがあります。山添橋の亀裂発生部もそれに当たります。

3)の「設計では想定していない力の発生」について説明すると、支承部 (※6) などには、設計仮定と異なる挙動による力がかかります。例えば、プレートガーダで単純支持の支承部については、設計では、片側は回転を、片側はスライディングと回転の両方をフリーにしています。しかし実際の橋では腐食や磨耗などで、スライディングと回転の両方の機能をきちんと果たし続けている支承部はあまりありません。

4)の「部材の継手部」とは、直交する部材です。先述の山添橋では、おそらく設計上、横桁は主桁に対して単純支持で計算しています。実際は部材同士の交差部はリベットかボルトで閉

じていますから、実現象的には固定端 (※7) になっているわけです。そうすると、固定端には固定端モーメント (※8) が発生します。その場合、固定端モーメントに耐えられるディテールを取っていないと、壊れて当然となります。こうした情報はデータベース化されて公開されていますが、残念ながら、なかなか現場に反映されていきません。メンテナンスの研究は現状の把握からですが、学会等の発表でも、このような認識を欠いた研究が多いことを、私は危惧しています。

5)の「構造物の想定外の挙動」とは、風や列車・自動車による振動などです。先述の標識柱の落下原因は、車が通ったときの路面の揺れでした。路面振動を拾って標識柱が動くわけです。いろいろなモードがありますが、標識柱を短く太くしたら、振動は止まってセーフとなります。カルマン・ボルテックス (カルマン渦※9) によって斜張橋 (※10) のワイヤが揺れるという現象もあります。1960年代、当時はスレンダーな橋をたくさん建設しましたが、ランガー形式のアーチ橋にすごく細い吊材、垂直資材を使い、そのかなりの数が風で揺れて切れてしまいました。こんな事例がたくさんあります。

この数年間、道路橋を見ていると、これらの分類の中でも1)の「溶接時に残された欠陥」と2)の「疲労強度の低いディテールの採用」が多いのに驚きます。道路橋示方書の品質規定を知らないのか、と言いたくなります。道路橋示方書の品質規定をキチンと守っていればいまのような状況にはなっ

ていません。今年の春、新聞で騒がれた広島県呉市のマリノ大橋の非破壊検査の問題にしても、誰が自動超音波AUTを使っていいと言ったのか。AUTを使う場合には審査が要るはずで、いつの間にか、道路橋示方書での約束事を無視しても何となく済まされているのが現状です。アセットとかレトロフィットとか言う前に、示方書のルールをきちんと守る、管理者側は守らせるという段階から始める必要があると、私は考えています。2)についてはそもそも疲労設計していないのですから当然の結果でしょう。

※6 支承部＝橋台または橋脚上に上部構造の荷重を伝達する部材

※7 固定端＝水平移動を固定して外力に抵抗できるようにした支承部。回転は自由。水平変位も回転も自由な支承部を自由端と呼ぶ

※8 モーメント＝物体を回転させる力の量

※9 カルマン渦＝空気が物体の周りがある速度で流れるとき、風下方向に発生する渦。横揺れの振動を引き起こし、騒音や金属疲労の原因となる

※10 斜張橋＝橋脚上に設けた塔から斜めにケーブルを張って橋げたを吊る形式の橋

過積載のトラックがノーコントロールで通行

次に疲労を引き起こす荷重について少し話をします。疲労の一番の原因は活荷重(※11)です。通行車両の重さです。トラックが1台走ると、応力(※12)が大きな範囲で働きます(図-4)。

乗用車の重量なら1トンくらいですが、トラックは自重で10トンくらい、たくさん荷物を載せると40トンくら

いにはすぐになります。ですから、トラックの通行台数が一番の問題です。どれだけ重たいトラックが、どれだけ通っているか。これをコントロールしないでアセットマネジメントはあり得ません。ところが現状はノーコントロール状態といえます。

我々は、建設省との共同研究として自動車荷重のモニタリングシステムを持っています。残念ながらこのシステムはいまは停止しているようですが、タイプや重量別にトラックの通行量をリアルタイムで記録できます。それを使い、2002年から翌年にかけて、50トン以上のトラックの通行量を調べたのが図-5です。グラフは左から国道246号の大坂橋(山手通りとの交差点)、二子玉川の高架橋(玉川高島屋近辺)、国道357号の荒川河口橋です。もう少し新しいデータもありますが、結果の傾向は変わりません。

大坂橋と二子玉川を比較すると、神奈川方面から入ってきた重量トラックは、環状八号線や環状七号線へとかなり分散しているようですが、それでも渋谷のそばの246号を50トンを超えるトラックが相当の数走っています。荒川河口橋の状況はもっとすごく、重たいトラックが頻繁に走っています。これが日本の実態です。法治国家のはずですが。

B活荷重(※13)を規定した際、行政的に過積載のトラックをコントロールしました。確かに瞬間的には過積載が減りました。しかし、もとに戻っています。これに対して何かしないとイケません。アセットマネジメント

やリスク管理と言っている中で、過積載の違反車両をノーコントロールで走らせることに対する管理責任はあると思います。



図-4 疲労における支配的因子

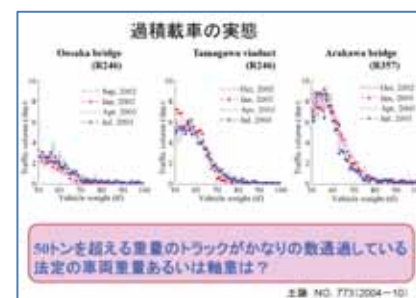


図-5 過積載車の実態

※11 活荷重＝大きさが一定しない荷重

※12 応力＝外力に抵抗する材料内部の力

※13 B活荷重＝道路橋示方書に規定された設計荷重。大型トラックの通行を想定し、重要な路線、大型車交通量の多い路線を対象とする

「America in Ruins」に記されたアメリカの荒廃

次に、「America in Ruins」の話をして。これは、1981年にパット・チョート(Pat Choate)氏が出した論文で、日本でも『荒廃するアメリカ』というタイトルで翻訳されました。おかげで橋梁の老朽化への関心が日本でも高まりましたが、アメリカと日本では、かなり状況が違います。ア

the Content of a Lecture

アメリカでは以前から疲労設計もしているし、車重計測ステーションがあって、過積載のトラックは排除しています。

日本は残念ながら管理側と国民のいずれにも、この種の問題に対する認識がまだまだ低いといわざるを得ません。しかし、日本の現状は、「America in Ruins」が発表された当時のアメリカよりひどいのではないかと思います。

建設後50年を経た橋梁が老朽化を懸念される理由の一つは、昔の大蔵省の管理基準で、財産としての扱い年数が50年くらいと決められているからです。「America in Ruins」にも50年という言葉が出てきます。しかし、私は本当に構造物の寿命は50年ですか、50年経ったら取替えですか、との問題提起をさせていただきます。

「America in Ruins」の原点となった事故が、1967年12月15日のポイント・プレザント橋（Point-Pleasant Bridge）の落橋です。クリスマス休暇の前で、たくさんの車が載っているときに、橋を吊っているアイバーチェーンが切れました。ケーブルではなくてチェーンを用いた吊り橋で、東京では清洲橋など、いくつか存在します。片側のチェーンが切れ、橋全体が落ちました。当初は疲労が原因と思われましたが、調査の結果、応力腐食割れとされました。力が入り続けている状態で、電気化学的な反応でクラックが生じ、それを起点として脆性破壊したのです。ボルトの遅れ破壊に近い現象です。

注目すべきは、この後、アメリカが何をやったかです。まず、全国調査をしています。それから点検マニュアルと、点検員の資格を出しています。そして疲労設計の全面見直しと材料規格の見直しです。ここまでを3年でやっています。

1981年、アメリカのFHWA（連邦高速道路局）は、次のような発表をしました。

「52万4,966橋のうち5分の2が大幅な補修あるいは架け替えが必要。9万8,000橋は構造上の強度不足。橋梁の寿命は50年程度、アメリカの橋梁の4分の3は使用開始後45年以上、1900年以前に竣工した2万5,000橋がいまだに使われている。1935年までは材料、設計、製作などの標準化はされていなかった」

ここに50年という数字が出てきます。この内容が今の日本の報道に非常に近く、ひょっとしたら管理者側もこういう認識があるのかもしれませんが。

実はAmerica in Ruinsに対して建設省道路局はすぐに反応しています。確か「健全な経済は健全な道路から」といった内容であったと思います。私は雑誌『道路』の1980年11月号に、「荒廃する道路」という特集で道路局から執筆を依頼されました。そこに、重量制限のために橋の手前で子どもを下ろし、スクールバスだけが先に橋を渡っていく写真を掲載しました。「ニューヨーク・タイムズ」に載った有名な写真です。しかし、そのときはこの

件は盛り上がり無く終焉してしまいました。

調査、研究を重ねても止まらないアメリカの落橋

私がアメリカに滞在中だった1981年には、ニューヨークのブルックリン橋（Brooklyn Bridge, 1883年完成）で事故が起きました。斜めのケーブルが腐食して歩道橋の上に落ち、日本人カメラマンに当たり、亡くなりました。ケーブルは腐食するのです。このときは、リン酸を含んだハトの糞がたまり、さびて切れました。事故後、大リハビリテーション工事が行われました。

1984年に私がアメリカに滞在中の際には、ブルックリン橋の隣のウィリアムズバーグ橋（Williamsburg Bridge, 1903年完成）のケーブルが、次々と切れ始めていました。ウィリアムズバーグ橋は、建設費を低くするため、ワイヤを亜鉛メッキしていなかったのが原因ということです。

ところが、その後、亜鉛メッキしているワイヤーも切れ始めて、大変な問題になっています。日本でも吊り橋のワイヤをめくり、「さびている」と言って、また閉じる、それを定期的に繰り返すようなことを検討しているようですが、本当はあまり開けないほうがいいのです。切れているとまずいですが、開けると酸素を供給しますから。私は、日本の吊橋のワイヤーについては断線が起きるとは考えていません。

ウィリアムズバーグ橋については主ケーブルのワイヤーの断線以外にも様々な損傷が発見されています。そのため管理者と有識者による委員会が設置され、「リハビリテーションか取替えか」かについて検討されました。その間、エクspansion (expansion ※14) が損傷したために通行止めにしたら、市民による強い抗議運動が起き、市長が臨時のフェリーを用意した等のことが起きています。委員会は「リハビリテーション」を結論とし、大規模なプログラムがスタートし、4~5年前に全部終わりました。その報告書にも記述されていますが、橋は都市のリンクを構成していることから、長期間の通行止は不可能に近いことが強く作用しています。この件を報じたニューヨーク・タイムズの見出しが、「A Bridge Dilemma : Patch It or Scrap It」です。直すか、捨てるか。結局、捨てられなかったということです。

1984年には、マイノス橋 (Mianus Bridge) の落橋事故が起きました。日本では、ゲルバー桁 (※15) の吊桁は支持桁の端部に設けたあごの上に支承を乗せますが、アメリカでは吊桁はピンで支持桁から吊り下げます。ピンのハンガープレートに水が入り、腐食生成物が出てピンプレートを押出し、片がかりになって、疲労破壊を起こしたのです。

アメリカではインフラのメンテナンスやインフラの品質向上、安全確保について、たくさんの研究費を投入しています。それでも、落橋は止まりませ

ん。2000年にはホーアン橋 (Hoan Bridge) の主桁が破断しました (写真-5)。



写真-5 ホーアン橋

これはディテールが悪い。写真の左下のように、垂直補剛材とラテラルガセットの間にごく狭い空間があり、そこに溶接割れが入ったわけです。世界中の専門家の中で、このディテールは有名になりました。同じようなディテールは日本にもたくさんあります。しかも疲労亀裂はたくさん発見されています。しかし落橋には至っていません。脆性破壊に至る前に発見し、補修しているからです。ギリギリと思われる亀裂もあります。まさに寸止め状態です。関心や認識が低いのは落橋がないからだと思いますので、寸止め状態で橋を助けるのも考えものかもしれませんね。

2007年のミネアポリスの落橋事故は設計ミスとされ、原因調査では部材を腑分けし、すべての構成要素の状況を調べました。その結果、ガセット (※16) の板厚がなぜか所定の半分だったと分かりました。このとき、私は感心しました。事故が起きて数日後にはウェブ上に、同形式のトラスの一覧がすべて公開されたからです。それから事故を起こした橋の設計図も全部

出ました。また、数年前に私の友人のミネソタ大学のデクスター教授により実施された調査報告も全文が出ました。このように早く、しかも多くの情報が公開される点は、我々としては反省し、見習わなければいけない気がしました。

- ※14 エクspansion=部材同士の間で、膨張や収縮、振動、沈下などの影響を防ぐために分離させた接合部
- ※15 ゲルバー=単純梁をピンで接合した静定の連続梁
- ※16 ガセット=鉄骨の柱・梁接合部などで、部材を接合するために用いるプレート

アセットマネジメントの導入をどうするか

ここまで事例を挙げてきました。次に、3つ目のテーマ、橋梁のメンテナンス計画へのアセットマネジメントの導入について話をします。これから建設後50年を超える橋梁が増えることを考えると、今のままではどんどん架け替えるようなシナリオに入り込み、対応できないと考えています。そもそも架け替えに伴う社会的なロスをどのように考えるのでしょうか。アメリカと日本では事情が違いますから、我々としてのブリッジマネジメントを確立する必要があります。では、誰がやるのでしょうか。誰もできていない現状を打破すべき、誰かがやり始めなければなりません。

現状のメンテナンスの課題を挙げていくと、まず、ハード面の技術がありません。具体的には検査も診断もできていません。財源は制約され、重要性

the Content of a Lecture

を指摘しても増えるわけではありません。でも、本当は増やさなければいけません。

橋の安全性を確保するのは当たり前ですが、社会的な役割や機能も発揮し続けなければいけません。町の中だと通行止めにもできません。例えば、首都高速3号線の池尻辺りのピアが1個崩れたら、復旧に3カ月くらいはかかります。3カ月間も首都高速3号線を止めると、並行する一般道の国道246号も大渋滞になり、東海道方面からの物流機能は停止状態になるでしょう。

橋梁の管理にアセットマネジメント的な考え方が必要ですが、そもそもアセットとは何か。これも言葉が先行していて、よく分からないのです。フリー百科事典の『Wikipedia』では、投資用資産、株式・債券・不動産といった金融資産の管理を代行する業務一般とあります。

亡くなられた東京大学の上田孝行教授は、アセット（資産）をマネジメント（運用・管理）することとは、資産や負債を全部分析して、純資産を増やすことと定義しています。証券会社や不動産会社であれば利潤の追求になりますが、公共事業が目指すのはVFM（Value For Money）、国民の税金の使用価値の増大です。サービス水準が一定であれば公共の負担するコストを低減し、コストが一定であればサービス水準を上げます。どちらかと言えば前者が、アセットマネジメント、ブリッジマネジメント導入の目的になります。

これをもう少しブレークダウンして議論していくと、社会資本における純資産の増加とは何か、となります。これは、利用者ニーズに最大に応えることであり、総合的な費用をミニマムにすることです。

現状で橋が劣化していないかと問われれば、確かに劣化はしています。しかし、具体的にどのような劣化があり、どの程度構造物の性能に影響するかについては、正確にはとらえられていません。今のままでは、劣化進行でメンテナンス費用が膨大に増え、予算制約を受けてサービスが低下します。例えば、まず大型車の通行規制から始めて、最終的には乗用車を含めての全面的な通行止めになるのでしょうか。

今の技術であれば、通過する車の重量を量り、その先で車をストップさせることは、すぐにできます。でも、そのようなことは出来ないし、やるべきではないが現在の行政的な判断です。でも其れでよしでしょうか。

従来のメンテナンスでは劣化・損傷に対して対症療法的に補修補強計画が策定されてきました。利用者のニーズは把握して事業に反映してきましたが、システムの中に定量的指標としては組み込まれてはいません。ニーズを定量的な指標としてしっかりと見ていくのが、アセットマネジメントです。例えるなら医療分野での生活習慣病である成人病への対応と同じです。少しずつ出てくる体の不具合に対して適切な健康チェックし、場当たりの対応から予防保全型メンテナンスへ移行するのです。

具体的なシステムやソフトは、今はありません。しかし、ユビキタス社会と言われるように、今は情報化が進んでいますから、新しい技術をうまく組み合わせればメンテナンス分野も高度化できると私は考えています。今はなぜかアメリカのブリッジマネジメントシステムであるPONTISを導入するような動きもありますが、アメリカと日本では随分違うと私は思っています。日本に適したブリッジマネジメントシステムを構築しなければなりません。

2回に渡る提案は具体的に進行せず

これまで日本が何もしてこなかったわけではありません。2002年に、疲労設計をする場合にはこれを使いなさいという形で疲労設計指針が発行されました。しかし、道路橋示方書の本文にはまだ入っていません。2003年4月には「道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会」から「道路を資産としてとらえ、道路構造物の状態を客観的に把握・評価し、中長期的な資産の状態を予測するとともに、予算制約の下で、いつどのような対策をどこが行うのが最適であるかを決定できる総合的なマネジメントシステムの構築が必要である」という最終答申が出されています。アセットマネジメントの導入を、当時の道路局長宛に答申しているのです。しかし、現在までに具体的な形は見えていません。

もう一つが、2007年10月から翌

2008年5月にかけての、「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」です。ここで、国レベルでの基本方針を出しました。2003年の答申を前提として、下記のように具体的なアクションを記述しています。

- 1) 点検の制度化：すべての道路橋で点検を実施
- 2) 保全の制度化：技術基準、資格制度、人材育成を充実
- 3) 技術開発の推進：信頼性を高め、負担（労力、コスト）を軽減する技術開発を推進
- 4) 技術拠点の整備：損傷事例の集積と発信、高度な専門技術者の育成
- 5) データベースの構築と活用：効率的な維持管理とマネージメントサイクルの確立

最後の「データベースの構築と活用」とは、すべてのデータの電子データとしての集積と可視化です。医療分野での電子カルテのようなイメージです。点検記録、診断記録などが全て電子情報化され、必要な場合にはどこからでも見るようにすべきでしょう。日本中で高度の橋梁のメンテナンスを実現するが目標です。有識者会議の答申の4) 技術拠点の整備とはその実現のための組織作りです。

このように2回に渡って道路橋のマネージメントに関する大きな方針が出されているわけですが、その後、少しずつは動いているものの、なかなか大きな流れとしては見えてきません。しかし、これらの提言に従って道路橋の維持管理体制を構築することは、道路管理者のみならず、すべての関係者、

すべての土木技術者の義務であると考えています。

最近、国の補助事業として、全国で橋梁の長寿命化のためのプログラムが実施されました。私もいくつかお付き合いしましたが、これらの報告もデータベース化と可視化をすべきでしょう。国総研が出した統一したマニュアルに従い、自治体が点検、診断、長寿命化対策の計画が行われました。その結果は今後のメンテナンス技術や体制を考える上で大変貴重なモノと考えています。一方、少し冷めた言い方をすると、担当した管理者、コンサルタントや有識者の实力を見る上でも非常によかったと思います。

点検の判断基準は「健全」、「ほぼ健全」、「やや注意」、「注意」、「危険」の5段階とされています。鋼の橋もコンクリートの橋も全部含めて、部材単位、径間・橋梁単位で判断します。しかし、総合評価はなかなか難しいものです。いろいろな方法がとられたようですが、多いのは各項目毎に点数を付けていき、それを総合して橋梁単位の判断をするやり方です。しかし、通常のやり方で集計すると、橋梁の重要な個所に1個の疲労亀裂を見つけたとしても、評点個所が1,000あったなら、総合評価では1,000分の1に消えてしまう恐れがあります。この段階でアウトです。1個の亀裂でも橋は落ちます。プログラムとしては非常によかったのですが、それをどう分析するか、そして今後のメンテナンスにどのように利用するかが問題です。内容についての適切な分析こそが今必要な

ことであると考えます。繰り返しになりますが橋梁の初期値を取る意味と、システムを検証する上では非常に有効だったと思います。

予防保全による経済効果は大きい

具体的な取り組みの事例として、東京都の「橋梁長寿命化プログラム」があります。アセットマネージメントを導入し、対症療法から予防保全へと移行しました。

東京都は同じ点検マニュアルで4回ほどの点検を行っています。同じ点検マニュアルで定期的に点検を続けていくと、一つの橋梁がどう変わるかが分かります。点数を付けることには問題もありますが、それを見ますと、年ごとに「健全」な部分が減って「注意」や「危険」が増え、橋が傷んでくる様子が分かるわけです。

図-6は、そのような評価とこの橋梁に対する補修補強の試設計から積み上げた橋梁関連経費の試算結果です。予防保全型管理の効果が見事に現れています。左が対症療法型管理で、右が予算保全型管理です。東京都が管理しているすべての橋梁について、対症療法型管理で直していくと、架け替えのピーク（2032年）には約940億円かかります。30年間での総事業費は1兆6,000億円。予防保全型管理ではそれが6,000億円で、1兆円を減らせるわけです。このようになった理由は簡単です。「やや注意」に至る前に直してしまえば、架け替えがなくなり、10年間の先行投資の後にはピー

the Content of a Lecture

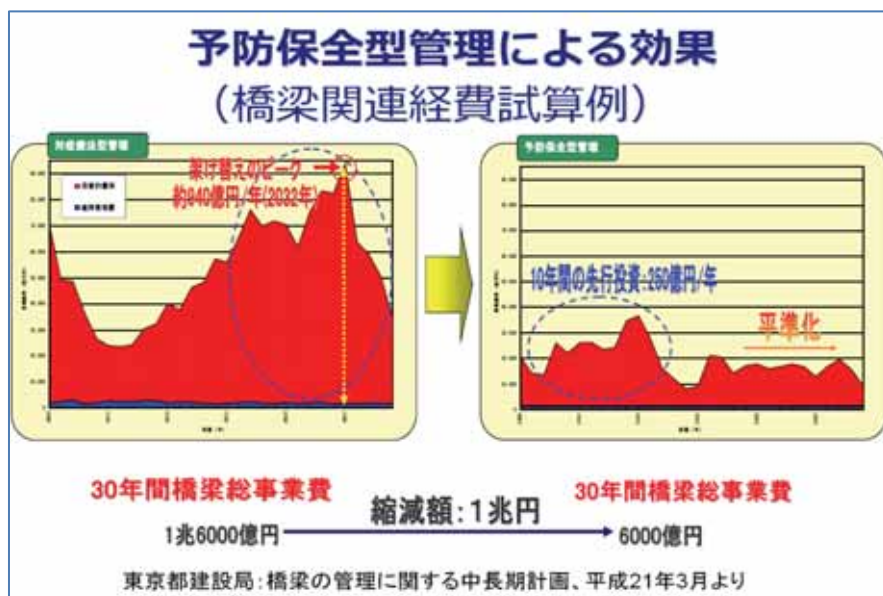


図-6 橋梁関連経費の試算例

クがなくなって平準化します。「適切な段階で直せば事業費は減らせる」という説明には、かなりいいデータです。この金額は今の橋梁技術をもとにしているの、技術が進めばもっとドラスティックに減らせるはずです。

構造物の寿命を プラス100年で考える

続いて、これからの取り組みについて、少し提案します。まず、くどいようですが、構造物の寿命をどのように考えるかから始めます。財産管理上の寿命とされるのは50年程度ですが、この期間を過ぎたら本当に取り替えるのでしょうか。寿命を100年としたらシナリオは全部変わり、建設後40年の橋はまだ青年期になります。

取り替えるにしても、例えば、鋼1トン当たりの製造にCO₂がどれくらい出るか。廃材を処理し、新規材料を使えば、新たな環境問題を招くことは

目に見えています。工事のための通行止めもすごいことになります。そのため費用もきちんと算出し、判断材料とすべきです。

そもそも50年で取り替えなければいけないような橋を、先輩たちがつくってきたのでしょうか。私は違うと断言します。50年ならもうすぐに名神も東名も首都高速も新幹線も総取り替えです。そんなはずはありません。メンテナンスの発想を転換し、プラス100年を考えて全体を見直す時期が来ているのではないのでしょうか。これが私からの提案です。

日本とアメリカでは状況が異なり、「America in Ruins」のシナリオを日本がまねする必要はありません。ただ、アメリカは公的機関による道路資産のメンテナンスに関連した研究や技術開発に対する投資額が膨大であり、この点は日本ももう少し考えたほうがいいと思います。

プラス100年プロジェクトを立ち上げるとすれば、何をしなければいけないのでしょうか。橋梁の真の耐力を知るための技術、劣化を予測する技術が必要です。

鋼橋の疲労対策や長寿命化策定プロジェクトで見えてきたことを挙げてみましょう。まずは点検と診断についてです。老朽化した、荒廃したと報告された内容を詳細に見てみると大変面白いものです。自治体や担当コンサルタントによって、何もかも老朽化と診断したケースもあれば、ほとんどがセーフと診断したケースもあります。実際の耐力がきちんと把握されているのか疑問です。先ほど提案しましたデータの可視化が実現できれば、ある規模の橋についてたとえば「注意」と判断された橋を横並びにしてみることができます。

感覚的な言い方ですが、老朽化、荒廃とは何かについて、責任を持って答えられる技術者が足りません。真の点検、評価のできる技術者の育成は火急の課題です。管理者やコンサルタント、橋梁会社に、疲労を知っている技術者がどのくらいいるのか。これは難しい問題です。疲労についてはほとんど勉強されていません。教科書を読んだ程度の人が多く、知識や経験は驚くほど低い。生の疲労亀裂を見たことのない人が疲労亀裂を点検し、原因の特定をした上で補修補強対策をしているのが現状といえるのではないのでしょうか。まさに無認可医師に身を任せているようなものです。ですから資格制度は必須です。

それから、点検結果から劣化曲線を設定するというソフトの存在です。Googleで「劣化」を検索すると、いろいろなプログラムが出てきて、「劣化曲線が引けます」とうたっています。本当でしょうか。私にはそんなことはできません。

現在の点検と診断では、疲労による破壊を防止できません。管理する側にも実際に点検や診断を請け負う技術者にも、新しい技術、理解できないことに対する拒絶反応があることも問題です。それで仕事が出来てしまっているのが実態でしょう。これは言いにくいですが、管理者側への強いメッセージです。自分が分からないことは聞くべきで、拒絶するのはいけません。これは技術者の倫理そのものです。

もう一つ、橋梁の診断は、人間の診断と同じレベル、あるいはそれ以上に重要性が高いことの認識が希薄です。言い方は難しいですが、橋が落ちたらたくさんの人が死ぬわけですから、もっとシリアスにとらえるべきです。

そして問題なのは、点検、診断の関連技術に対する開発意欲が民間にないことです。ビジネスモデルが成立しないのです。技術を評価し、それに対して正当な対価を払う仕組みにすることです。亀裂を見て放置すること、あるいは先端に孔を空けることがベストという措置に対して、大規模な補修補強工事をする以上の対価を払うことです。なぜなら、無駄な工事をしただけでなく橋を傷つけるのですから。民間にモチベーションがない状況をどうするか、ぜひ考えていただきたいと思います。

設計計算と異なる 橋梁の真の性能

6つ目のテーマ、橋梁の真の性能について話をします。図-7は橋梁のパフォーマンスの経年劣化です。前にチョット触れましたが、コンサルタントやソフト会社は、この劣化曲線を描けると言っていますが、単純にはいきません。個々の橋ごとに、原点が違ってくるからです。東京都の例は同じマニュアルによって4回の点検を行った蓄積があるから、各橋梁ごとに劣化曲線が描けたのです。こうした胡散臭いソフトがちまたにあふれ、たくさんの自治体が橋梁の余寿命評価に用い、補修計画を出していることに、私は愕然としました。

ではどうすればよいかを、まじめに考えなければいけません。構造物の現在の耐力は測れるとしても、最初で

き方が違うのです。同じ要求に対して出来上がった構造物の性能はちがいます。最初にどの要求レベルでつくったのかを測ることはできません。前回の道路橋示方書で、私は箱書きに「100年」と入れてほしかったのですが、箱の中ではなくて、「想定する供用期間が100年程度」という言葉が解説に入っています。設計にあたって想定する寿命が書いていないスペックはおそらく日本だけでしょう。想定する期間を決めなくて耐久性を要求しても意味がありません。そのために50年としてしまうのですが、世界的には100年ぐらいが常識的です。100年経てば使い方が変わりますから。しかし、ここで言う設計寿命は100年後に壊れていいのではなくて、適切なメンテナンスをすることで、100年後に要求値を満すということです。

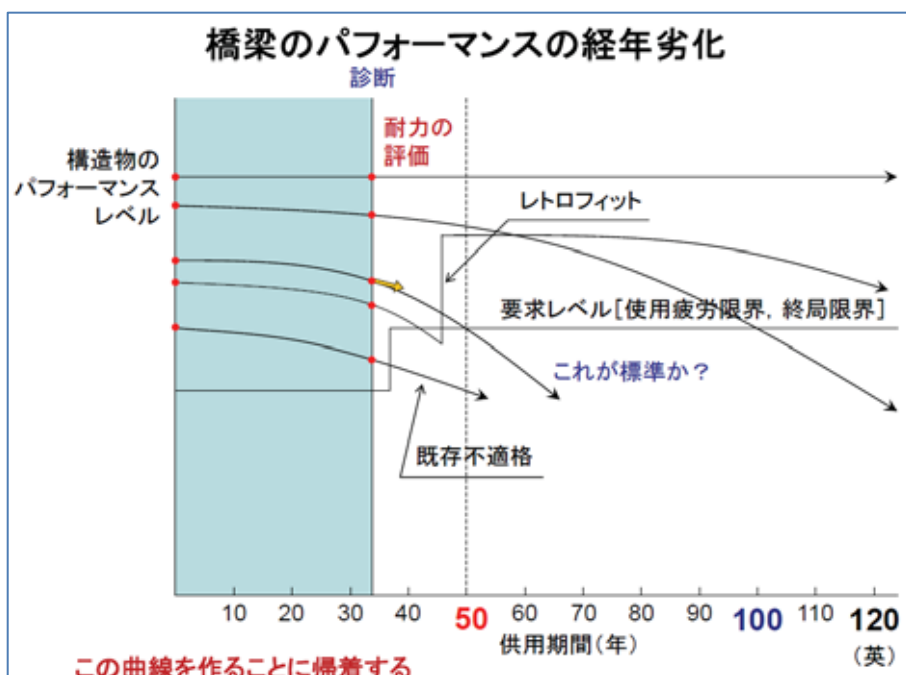


図-7 橋梁のパフォーマンスの経年劣化

the Content of a Lecture

図-7の一番下の曲線は、既存不適格です。地震に対する耐震性能など要求レベルが変わったものが該当します。B活荷重のときに既存不適格が随分出るということでチェックしましたが、現在の耐荷力を疲労を含めて評価した結果、実際は私が関係したものは何も手を入れていないものが多かったと記憶しています。

今、やらなければいけないのは、曲線上の赤い丸で示した耐力を測る事です。それから、曲線の落ち方を見なければいけません。これをどうやるかがこれからの研究テーマであり、これがなければマネージメントはできないと思います。結果的にはこの曲線をつくることに帰着します。

古い実験ですが、東名高速の橋梁で60トンのトラックを4台乗せ、どれくらい応力が出るかを調べました。ほぼB活荷重に相当します。その結果が図-8です。設計計算が黒いラインで、非合成桁ではこれくらいの応力が出ます。ところが実測は青いラインで、応力が全然出ませんから、主構造の部分は壊れません。このようにまず実測と、FEMという道具を使うことで、かなりのものが分かります。

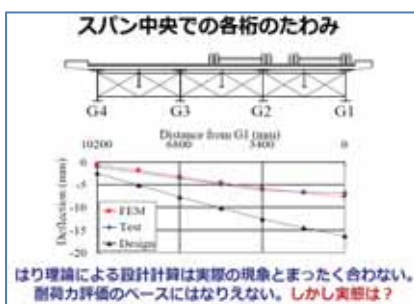


図-8 スパン中央断面でのG1桁内の応力分布

図-9はたわみで見た特徴です。黒いラインがデザイン、予想のたわみで、赤がFEM、青が実測です。この結果は恥ずかしいですね。設計計算と実際とが半分しか合わない設計になっています。こんな構造物はないですよ。

私は溶接の関係で船や飛行機関係の研究者とも付き合いがあります。船や飛行機は、性能と安全性を保証した上で自重をミニマムにします。当たり前ですよ。自重が大きいとそれだけお客さんや荷物を乗せられないですよ。もしも予想より重たくつくと、積載能力が変わってきます。失敗作ということです。ボーイング777のボディを作っている川崎重工や三菱に行くときに見せてもらえますが、最終試験では機体1機の実物をジャッキにかけて壊します。そのときの条件は、安全率は1.5から1.6。安全率の上限も下限も決められています。記録映像が提供されていますが、見事に1.55近辺で、バン、と主翼が折れます。技術者冥利でしょうね。この映像の一部はウェブでも見ることができると思います。

橋梁の世界での、はり理論による設計計算は、実際の現象とまったく合いません。耐荷力評価のベースにはなり

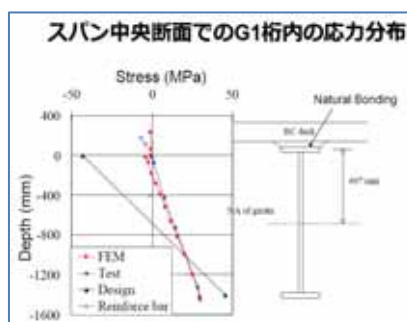


図-9 スパン中央での各桁のたわみ

得ないのです。この、はり理論ベースの設計計算から別れましょう。合い方が50%の設計をやめれば、構造設計の世界が変わります。疲労に対する補修・補強には、実際の応力を正確に把握することが必須であり、FEMなどを使えば、精度よく予測が可能です。

橋梁の疲労を対象とした点検をする場合、非破壊検査の業者に検査を丸投げしているように見えます。しかし彼らに橋の点検はできません。彼らは非破壊検査のプロではありますが、疲労については素人です。疲労亀裂を見たことがない、どこを見ればいいのか分からないような人間を現場に行かせて、疲労亀裂が見つかるわけがありません。超音波探傷をしたけれども見つかりませんでした、は最も多い返事です。そこに見えているのです。

やみくもに超音波を当ててみてもダメなことは人間ドックで内臓の検査をした人ならすぐに理解できるでしょう。どこにどのような臓器があって、そこにどのような障害がでるかを知って超音波を当てているから的確に障害を見つけることができるのです。構造物についても、どの位置からどの方向に超音波をいれ、欠陥からのエコーをどのように受けるかを指示して初めてどうにか意味のある非破壊検査になるのです。私は時々非破壊検査技師がかわいそうになります。

どこに何が起きるかですが、それを知るためには過去の事例が参考になります。報告書や資料がたくさんありますし、私もウェブ上でいろいろなデータを公開していますが、残念ながら

あまり見られていないようです。海外からはよく問い合わせが来ますが、残念ながら日本からの問い合わせはゼロです。

最近では超音波深傷試験でもフェーズドアレイであるとか、サーモグラフィのように新しいテクニックがたくさん出てきますから、点検に当たる技術者はもっと関心を持ったほうがいいですね。例えば、超音波です。私の研究室でもやっています。昔の超音波探傷試験はマニュアルが中心であり、しかも使用する探触子の種類は限られていましたが、今はいろいろな種類のものでたくさんあります。また、周辺の機器類や制御システムとの組み合わせで角度を変えられたり、探傷結果を画像に再構成したりできます。昔の手探傷の機械は20~30万円でしたが、今のプレーンフェーズドアレイ探触子による非破壊検査装置なら500万円くらいでしょうか。でも、橋が落ちることを考えたら安いものです。

大阪大学の阪上教授は、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労亀裂の検出を研究しています。サーモグラフィで、遠くから鋼床版のデッキプレートの裏側にある亀裂や、溶接部にある亀裂を見つけられます。このように結構面白い方法が出てきています。サーモグラフィの装置は昔高かったですね。いまは驚くような低価格で手に入ります。

疲労の原因の特定には、今までは応力測定とFEMが用いられていました。私の最近の関心は、ワイヤレス・センサ・ネットワーク（WSN）です。

通信機能とセンサを内蔵した装置をばらまくと、それぞれがベースステーションと通信してセンシングします。私の研究室でWSNの研究を始めた理由は、家庭用ゲーム機のWiiにあります。4年生になった学生が研究室に入ってくると、卒業研究の前にミニプロジェクトをやらせます。ある学生に対して、2万円の予算内で歩道橋の振動を測るというテーマを出しました。そのとき、1個3,800円のWiiのコントローラーが使えるのではということになりました。すると、動的なレスポンスが少し遅く多少の改善が必要ではありますが、安価で振動が測れたのです。

加速度計の単価を比較すると、土木分野で使われる一般的な有線の加速度計は、3軸だと1個15万円です。MEMSの加速度センサは1個5万円。3軸加速度計を内蔵したWiiリモコン（3,800円）と、ジャイロセンサを内蔵したWiiモーションプラス（1,500円）は1セットで合計5,300円。MEMSセンサは非常に低コストです。WSNはMEMSセンサがベースです。

ちなみに自動車には、50~100個のマイクロコンピュータが搭載されています。embedded systemと呼ばれていますが、姿勢制御や障害物探知などに使われます。これらは1個100円以下とのことでした。

さて、先ほどのWSN装置を、首都高速5号線の板橋での現場測定に使ってみました。（図-10）

それぞれの部材がどう動くかを測るのが目的です。疲労亀裂が出た位置に一つだけゲージを張っておいて、他はWSNを配置しました。車の通行と同期して測定し、加速度からどの部分がどう動いたかを調べることで、疲労の原因を特定できました。今これを画像化しようとしています。

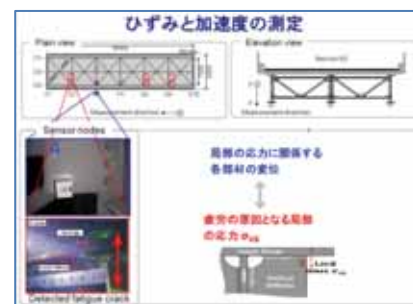


図-10 ひずみと加速度の測定

このシステムとこのあとにお話します活荷重モニタリングシステムを組み合わせれば、何トンの車が通過して、橋の部材がどのように動くかがリアルタイムで分かり、疲労などの対策をする際には、どの部材をどうすればよいかすぐわかります。この程度のシステムなら、すぐにでも実現できます。おそらくその費用は従来の現場計測に比較してオーダーがちがうほど安く、しかも有用な情報が得られます。残念なことは、そのような新しい技術を提案しても関心を持っていただけないことです。

モニタリングを続け 長期傾向と異常を把握

7つ目のテーマがモニタリングです。モニタリングの目的は、リアルタイムかつ継続的な橋の状況の把握、重大な

the Content of a Lecture

損傷の早期発見と予知、地震のような異常時における橋の状況の瞬時判断です。課題は橋の劣化をどう予測するのですが、これは難しい。

我々のトライを少しご紹介します。先述した図-5の過積載車両を検出するシステムは、2000年から建設省との共同研究として東京国道工事事務所の橋梁を舞台として始めたものです。このシステムにより、通過する車両の型式や重さと通行量のデータがリアルタイムで出て、画像も見られます。また、荒川河口橋では温度による橋の変形も分かるようになっています。日照の影響で、晴れた日は上にはね上がり、曇天の日は橋軸方向へ延びる挙動が、画像で分かります。これを日照データなどと組み合わせて応用すれば、健全性の評価になります。

荒川河口橋でのモニタリング中に地震が発生し、地震に対する橋の応答も記録できました。2005年7月23日16時35分発生、マグニチュード6.0、震源地は千葉県北西部の深さ73km。この地震で首都高速は止まり、東京湾アクアラインの照明具が落ちるなどの事故が起きています。荒川河口橋でも100galを超える加速度を記録しました。橋も地震と一緒に動いているのです。支承部の変位も10mmを超えました。ひずみの記録を見ると、面白いことに、最初は上下フランジで逆位相で動きます。鉛直方向の振動が30秒以上継続しました。初期は、東西で異なる動きを記録しました。地震後は、地震前と同じ挙動に戻り、健全度の問題なしと瞬時に判定されました。この

ようなシステムを導入していれば、地震が起きてもすぐに通行開始できます。

これをもう一段進化したシステムを、今、首都高速に設置しています。ひずみデータをもとに通過した重量車両をリストアップし、路線ごとに長期的傾向を把握できる統計情報になります(図-11)。



図-11 通過車両重量情報の統計情報

また、過去の計測データに比べて異常な動きをした瞬間に、自動判定で警報を出すような仕組みになっています(図-12)。



図-12 異常検知機能

この研究のスポンサーは(財)科学技術振興機構(JST)と(株)NTTデータであり、NTTデータ、東工大、横浜国大との共同研究です。こういったシステムをもっと積極的に導入することも、やればできます。橋梁のメンテナンスの世界は確実に変わります。

多大な費用をかけている アメリカの研究開発

次のテーマに移ります。アメリカはどのような研究開発を進めているのでしょうか。今日の講演の準備のために、先日、「健全度評価」などのキーワードで検索したところ、NIST(National Institute of Standards and Technology, アメリカ国立標準技術研究所)のプロジェクトがヒットしました。TIP (Technology Innovation Program) というプロジェクトで、橋、道路、水道などインフラに関して20を超えるプログラムが出ています。2008年に9つ、2009年に8つのプロジェクトが採択されています。約73億円がTIPのファンドで、約77億円が民間のカウンターバジェット。これがアメリカのやり方です。100円あげるから、あなたも100円出なさいということです。大学としてはこの条件は厳しく、パートナーと財源の確保が必要です。しかし、プロジェクトの実施について真剣になります。TIPはトータルで150億円のR&D(研究開発活動)、テクノロジーイノベーションとして動いています。

その他にNSF (National Science Foundation, アメリカ国立科学財団)で行っている新材料の応用など、いろいろありますから、金額は相当になります。

アメリカの「Innovative technology on maintenance of civil infrastructure」のキーワード

は以下の通りです。

- Wireless sensor and Wireless network
- Self-powered (solar, wind, vibrations in bridge)
- Non destructive evaluation
- Data integration and visualization
- Robot technology
- New material

TIPで採択されているプロジェクトで、これまでの話に関連しているものを以下に集めました。

- Development of Rapid, Reliable, and Economical Methods for Inspection and Monitoring of Highway Bridges (道路橋に対する高速で信頼性が高く経済性に優れた点検・モニタリング手法の開発)
- Self Powered Wireless Sensor Network For Structural Bridge Health Prognosis (橋梁の構造健全性を予知診断する電源内蔵型無線センサネットワーク)
- VOTERS: Versatile Onboard Traffic Embedded Roaming Sensors (橋や道路の状態を観測・評価する自動車搭載型システムVOTERSの開発)
- Cyber-Enabled Wireless Monitoring Systems for the Protection of Deteriorating National Infrastructure Systems (国家インフラシステムの劣化を防ぐためのコンピュータネットワークを利用した無線監視システム)
- Microwave Thermoelectric Imager for Corrosion Detection and Monitoring

in Reinforced Concrete (鉄筋コンクリート腐食検知・モニタリング用マイクロ波熱電画像装置)

米国ではこれ以外にも様々な財源でインフラのメンテナンスに関する研究や技術開発が行われています。

このような技術開発屋そのための基礎研究の促進に対する経済的な支援はぜひいろいろな方法で、アメリカのまねをしてほしいと思います。適格な研究にはカウンターバジェットを付けるのも一つの手という気がしています。しくじると痛い目に遭うとか、民間とのリンクを考えると、研究の真剣度が上がりますからね。

日本における今後の展開

最後に、今後の展開について考えていきます。

今の日本には、この分野の研究や技術開発について大きなファンディング(財政的支援)もプロジェクトもありません。小規模な研究のみです。個別の研究については、文部科学省の科学研究費が取れます。科研費はピアレビュー(peer review,※17)ですから、大学の研究者の間で「この研究はいいね」と点数を付ければ予算は取れます。しかしこれも難しく、そのとき、その分野の研究に対して意義を感じない人が増えてきたら、研究費は獲得できなくなります。したがってこのような文科省の科研費に頼るのではなく、ポイントとなるファンディング(funding, 財政的支援)は、管理者であり、国民を代行している国土交通省なりがやる

べきです。

それから、メンテナンスのビジネスモデルが見えません。例えば100を投資して、どのくらいリターンを得られるかは大切な問題です。やはりビジネスとしては投資額の10倍を超えるリターンが見込めないと踏み切れないのではないのでしょうか。しかしメンテナンスの分野では、5年や10年ではその効果がはっきりとはせず、したがってアイデアに対するリターンが見えません。リターンを受けるのは30年先、50年先の国民です。これをどこの機関で、誰が、どの予算で推進するのでしょうか。民間の活力を入れようとするなら、民間が十分にリターンを得られるようなビジネスモデルを考えないと、うまくいかないと思います。今のままでは何も進みません。何らかの形で、知識、技術にふさわしい対価を払う仕組みの実現が必要です。

もう一段難しいのが、診断です。医療の世界なら腕のいい医師がいますが、土木分野では腕のよさすなわち技術レベルの高さを評価するような習慣やそれに対する対価はありません。しかも資格も要らない状態です。技術の質を測れないから、コンクリートが何トン、鋼が何トンと、工事に必要なモノにのみ対価を支払います。しかし、工事自体が不要なこともあります。私はときどき、疲労亀裂を見て、「ここに穴を開ければ済むじゃないか」と指摘することがあります。例えばある橋で、補修のために大々的に足場を組んでいることがありました。私はその写真を見て変に思い、現場を検査し、グ

the Content of a Lecture

ラインダーで削ってもらいました。すると、亀裂は全部消えてしまい、補修の必要がなくなりました。こういうことがたくさんあります。やはり技術を評価し、それに対して正当な対価を支払えるような仕組みは必須です。以前、土木学会から2000年レポートとして技術者のあり方についての提言をしましたが、そこでは弁護士のようなフィージビリティを提案しています。

※17 ピアレビュー＝専門家の仲間同士が研究内容を吟味すること

すべての橋で最高レベルのメンテナンスの実現を

図-13をご覧ください。橋のレトロフィットは人間の成人医療と一緒です。点検と診断と措置。措置という言葉を使うことを提案した理由は、補修、補強に加えて、前述のように穴を開ければ済むとか、放置でいいこともあるからです。リペア (repair) とレトロフ

ィッティング (retrofitting) の違いとは、もとに戻すのがリペア、ある種の機能を付加し、アップグレードするのがレトロフィッティングと言えます。

図中のWhoの個所をよく見てください。点検をするのは検査技師です。現状の仕組みでは、彼らに診断や措置まで、資格もなしでやらせているように見えます。点検と診断は、そもそも職種がちがうのであり、それぞれの専門家同士がお互いの責任を果たしながら、やりとりをしないとイケません。

評判のよい病院に勤める医者から聞いた話ですが、その病院が誇りとするのはカンファレンス (conference, 会議) だそうです。例えば、心臓がおかしい、脳がおかしいと言うと、外科医も、内科医も、神経科医も、麻酔科医も、検査技師も、看護師もみんなが一堂に集まって何回も議論するそうです。決して医師単独で治療法や手術を決定しないとのことです。

くどいようですが、橋においても、点検する検査技師と診断をする専門家との階層化が必要です。診断をする人は、人間ドックの医者に当たります。

「もう少し検査したほうがよいかな」、「特別点検が必要かな」などと判断します。措置を考えるには、内科医、外科医などみんなでもらなければだめです。現状では、点検の発注先に補修や補強の方法まで決めさせてるようですが、それが正しい、適切な措置になっているのか、あるいは間違いの対策か、無駄な対策かどうか分かりません。少しえぐい話をすれば、業者は点検や診断で金を取れないから、補修や補強でその分を回収しているかも知れません。もしも点検や診断をする人と補修業者とが繋がっていたら、どうなるのでしょうか。ちょっとした傷でも大規模な補修工事になってしまうのではないのでしょうか。

今後、必要なことを図-13の下半分にまとめてみました。まずは、「点検・計測技術の開発」と、すべての情報の「データベース化」です。大規模過ぎて動かないものではなく、パソコンですぐに使えるようなデータベースにしなければいけません。Googleを使って何もかも検索できるような時代に、これができないのは変です。

そして、「劣化進行のモニタリング」は、難しくてもやらなければいけません。さらに「限界状態の防止のためのモニタリング」や「補修・補強技術」は、パッケージでどうにかしないと、数え方によって15万とか40万とか言われる膨大な橋の数に措置が追

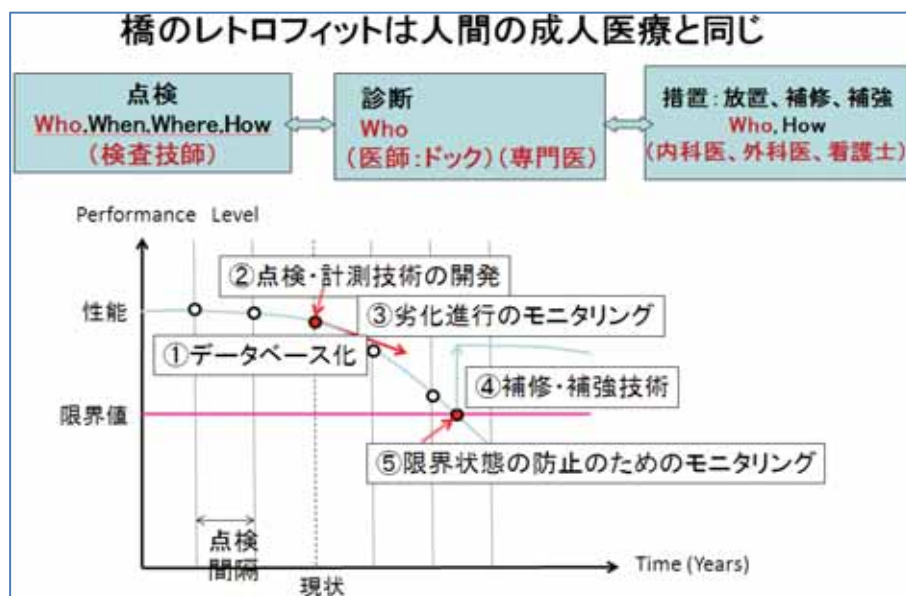


図-13 橋のレトロフィット

いつかないでしょう。

言い方を変えてみたのが図-14です。スマートグリッド（次世代送電網）は、すべてのエネルギーを一括でコントロールしようというものです。これで、エネルギーの世界は随分変わるでしょう。トータルボリュームは変わらず、配分がよくなるわけです。

スマーター・プラネットとは、全世界の社会インフラをITによって進化させようという、IBMの戦略です。スマートシティ（次世代都市）は、先日、日立が新聞に大きく広告を出しました。スマートグリッドはエネルギーだけではなく、スマーター・プラネットやスマートシティの対象には、橋も道路も全部入っています。これらが目指すのは、インフラのマネジメントの効率化です。すべての情報をデジタル化し、インターネットに相互接続して集約します。これは可視化です。そして集まったデータを分析します。このように一つのシステムで点検、診断、措置を一括でき、それをそれぞれの管理者が的確にマネージできれば、ある意味でのアセットマネジメントを含んだブリッジマネジメントになってくるでしょう。

くどいようですが、「情報の見える化」が必要です。可視化できると、い

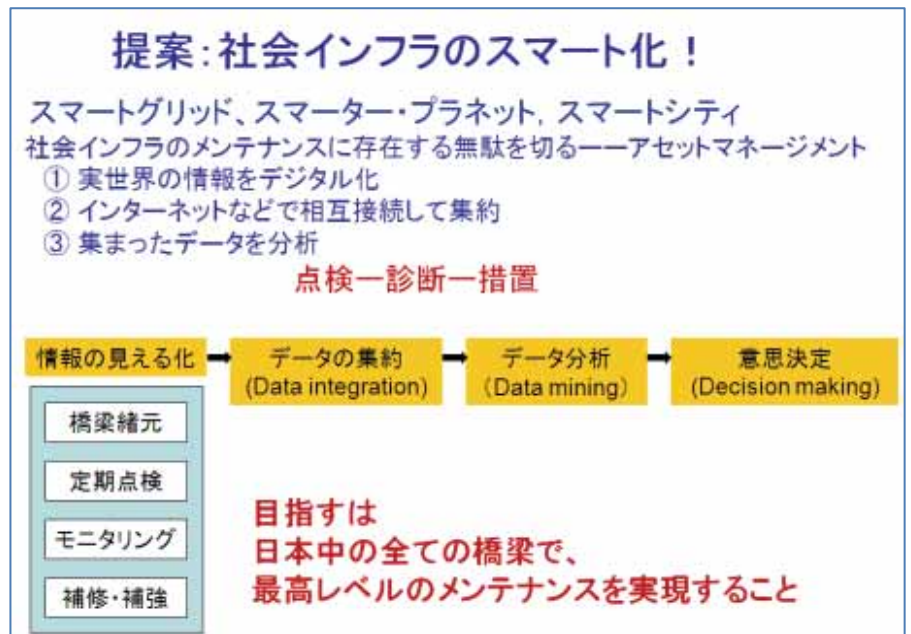


図-14 社会インフラのスマート化

ろいろなデータが集約できます。可視化して、データを集積し、分析します。図中の「データ分析（Data mining）」とは、データの中から必要なものを的確に引っ張り出してくることで、それから、「意思決定（Decision making）」です。情報分野の最新技術を駆使することが求められます。この辺りがアセットマネジメントとなります。絶対数はそれほど多くありませんから、これらの実行はそんなに難しいことはありません。こういう機会にいつも話をしていますが、目指すのは、日本中のすべての橋

梁で最高レベルのメンテナンスを実現することです。誰ができるかという話はさておき、これができるような仕組みを構築し実現させることは、我々のように、こういう分野で仕事をしている人間の責任であると考えています。

少し乱暴なことも言いましたが、これで私の話を終わりにさせていただきます。どうもありがとうございました。

本内容は2010年7月9日に開催された第24回技術研究発表会における特別講演によるものです。