

「コンクリート構造物の耐久性を巡る課題と今後の方向」

－ 学から官に望むこと －

講演者

京都大学大学院工学研究科 教授
JICE 研究顧問
宮川 豊章氏



プロフィール

1950年生。1975年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。工学博士。京都大学助手、講師、助教授を経て1998年に京都大学教授。2005年より土木学会関西支部幹事長を務めるとともに、土木学会、日本コンクリート工学協会、日本材料学会、PC技術協会の理事、日本塗料検査協会理事長などの要職を歴任。材料学、特にコンクリート工学を専門とし、“丈夫で美しく長持ち”する土木構造物ならびに市民社会を目指し、各種委員会で活動している。現在、土木学会コンクリート委員会委員長。著書には、コンクリートのはなし(1)、(2)などがある。

コンクリート構造物を 造り、使いこなす

「コンクリート構造物の耐久性を巡る課題と今後の方向～学から官に望むこと～」というタイトルでお話をさせていただきます。このタイトルに関して、第一に申し上げたいことは、コンクリート構造物を造るだけの時代ではなくなったということです。すなわち、コンクリート構造物を造り、使いこなす、この2つが重要であり、コンクリート構造物の生涯をどのように送らせてやるのかというシナリオをお考えいただきたいということです。本来的にコンクリート構造物は丈夫で美しく、長持ちしなければいけない。少なくとも、台風が来ても、あるいは地震が来ても壊れないほど丈夫で、そして、子供や孫の時代でも使えるように長持ちして、しかも、市民あるいは国民の誇りとなるような美しさを持っている、この三つが要求されると考えています。そして、

それは本来できるはずだと考えています。

土木構造物の今

土木構造物に関して、現在では多くの課題があります。まず、「不満解消の土木から満足拡大の土木に」と変わってきた。つまり、ここに橋がないから橋が欲しい、ここに道路がないから道路が欲しい、ここにダムがないからダムが欲しいというような時代ではなくなってきた。例えば、どこそくに快適に行きたい、あるいは速く行きたい、そのような質が要求される。つまり、単に不満を解消するだけではなくて、機能というものの質を上げて、満足を拡大するような土木になってきたということです。

しかも、造るだけの時代から使いこなす時代に変わってきた。高度成長期では、たくさんの構造物をできるだけ早く造らなければならなかつ

たが、21世紀ではそこで蓄えた構造物をいかにうまく使いこなしていくかということが要求されます。延喜式の祝詞の中に「罪は風により、川、海、地底へと祓われる」とあります。そのような「祓え」の思想が日本の古い思想の中には眠っているように思います。しかし、適切にうまく造ったものは、当然ながら残っているわけですし、高速道路、ダムなどの土木構造物はなかなか取り替えのきかないものです。単に造るだけでなくて使いこなすということが非常にクローズアップされるということになろうかと思います。

永代橋はなぜ落ちたか

文化4年(江戸時代)、隅田川に架かっていた永代橋が落ちたというのは有名な事件です。永代橋は、幕府の費用、すなわちその当時の政府の費用で造ったわけです。ところが、政

the Content of Lecture

府にお金がなくなって、管理にお金を使えなくなった。だから、民間に管理を任せた。江戸時代もやっぱり一緒だったわけです。実は点検、補修、補強に関してはほとんどお金を掛けなかった。そのために永代橋は落ちたと言われています。

ミネアポリスの落橋

2年前ほど前にミネアポリスの落橋という事故がありました（図－1）。この落橋については、当初設計がおかしかったようなところもあったようですが、当初設計がおかしくても、それまで安全に使われていたわけですから、うまく使いこなしていれば落ちるようなことはなかったと思われる。つまり、使いこなし方が不十分であったと言ってもいいと考えています。

先ほどの永代橋の話は江戸時代の話、このミネアポリスの落橋の話は海外の話です。さて、現在の我が国ではどうかというと、いろいろな、例えば鋼橋における鋼材の破断等が報告されております。少し前の『日経コンストラクション』の記事によると、現在だと30から40歳ぐらいの橋梁が多いのに対して、20年後は50歳を超える橋梁が多くなっていくということだったと思います。50歳を超えても適切に設計、施工、維持管理してあれば、橋梁というのは安全安心に使えるものであると思います。

垂井高架橋のひび割れ

和歌山県の垂井高架橋では、コンクリートの乾燥収縮の影響により、至るところに0.3mm、0.4mmというようなひび割れが存在し、たわみも数10mmのオーダーになったと考えています（図－2）。新しいコンクリート標準示方書²⁾にはコンクリートの乾燥収縮というものをきっちりと考えなさいということで、数値も示

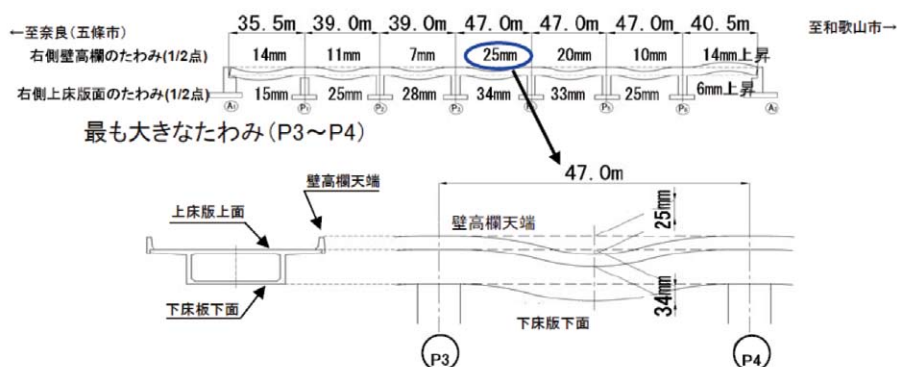
されております。そのほか、乾燥収縮というものはやはり構造形式によって随分その結果が変わってきます。なお、この橋では、構造形式および、鉄筋あるいは鋼材が多いために、拘束が非常に大きく、ひび割れ幅が大きくなったという面もあります。

インハウスエンジニアの重要性

このようなものを造ってはならない



図－1 ミネアポリスの落橋事故



図－2 垂井高架橋のたわみ¹⁾

のは当然で、しかも、現在いろいろなところで、いわゆる低入とかの問題が発注関係で指摘されております。このような背景の下、品確法ができ、これに関連していろいろな評価を行っておられるところかと思えます。この法律の背景としては、品質低下への懸念というものがあるわけですが、厳しい財政状況、民間技術力の向上、発注者の能力差等がその背景にあったと言えます。この法律を読みますと、インハウスエンジニアの重要性、例えば国土交通省の技術者、それに関連するいろいろな組織の技術者、あるいは鉄道会社、あるいは高速道路会社における技術者が発注に係わるわけですから、いかにその技術を把握し、発注に反映させなければならぬかということの重要性を表していると考えております。言い換えますと、重要性が高いということは、責任が非常に重いということだと私は思います。責任が重いということは、その背中合わせに誇りを持ってやりなさいという言葉が、隠れているように思います。責任を持った方が誇りを持って技術を正しく使う。これが、私としては最も皆さんにお願いしたいところです。

コンクリート構造物の生涯シナリオ

コンクリート構造物が設計、施工されてからある程度の時間が経ちますと、必ず劣化します。ということは、その劣化が進むということに対

して、我々は意識して何らかの形の対応をしなければならない。しかも、これからは少子高齢化社会となり、税金を出す人が少なく、汗をかいて、いろいろな点検等の対策をする人が少なくなるということです。これが、インドとか中国などの多くの人がいるところであれば、橋守制度で一つの橋に5、6人の人を張りつけるというのも一つの手でしょう。しかし、日本ではそういうわけにはいかない。コンクリート構造物をどのレベルで供用するか。どのように供用させて、何年間もたせるかという、コンクリート構造物の一生のシナリオの充実を図る必要があります。

信長の怒り

土木学会のコンクリート標準示方書で代表的に取り扱われている劣化として、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応、疲労、すり減りがあります。例えば、山陽新幹線では、水セメント比70%というような数値が推定される部分もあります。非常に悪いコンクリートで、中性化の速度が速くて、更に海砂の塩分があると、これはダブルパンチで非常におかしくなってしまいます。

さて、織田信長が都に上がった時に都で一番の料理人に料理をつくらせて食べたという話があります。織田信長は、その料理がまずくてその料理人を殺そうとしたらしいのです。料理人は、「1日だけお待ちくださ

い。明日、あらためて料理をご賞味下さい。」と言いました。翌日になって、信長は「これはうまい。おまえは日本一だ。」と褒めたそうです。前日は怒って、その次の日は褒めちぎった。信長は田舎者です。油濃くて、しょっぱくて、要するに重いものが好みです。それに対して都の貴族は薄味で軽いものを好む。貴族用の料理を信長に食べさせても、満足しないのは当然なわけです。

実は劣化対策も一緒なのです。中性化に対してアルカリ骨材反応の対策を採ってもだめなわけで、劣化機構に対応した対策をとらないと、それに対する対策とはならない。これを頭に入れておく必要があります。

劣化対策

<注> 紙面の都合上、講演者の了解のもと、主な内容を以下に要約させていただきました。

- 中性化は、塩害との複合がなければ、激しい腐食とならない。
- 構造物の維持管理では、「美観・景観」に着目するのか、あるいは「安全性」に着目するのかで、性能低下の変化点が異なるので、着目点が重要である（塩害の例：図－3参照）。
- アルカリ骨材反応は塩害、中性化ほど学問的に進歩しておらず、定量的な評価が難しい。
- アルカリ骨材反応（アルカリシリカ反応）には、鋼材腐食の発生、鉄筋の破断などが生じる膨張性が大きい

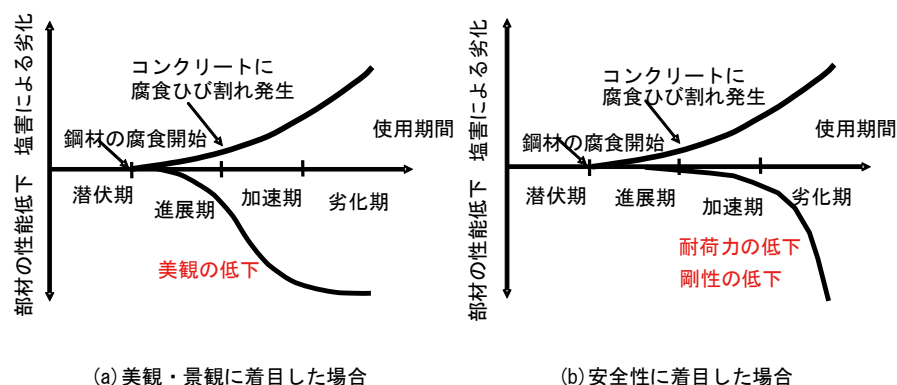
the Content of Lecture

場合と小さい場合がある（図－４参照）。

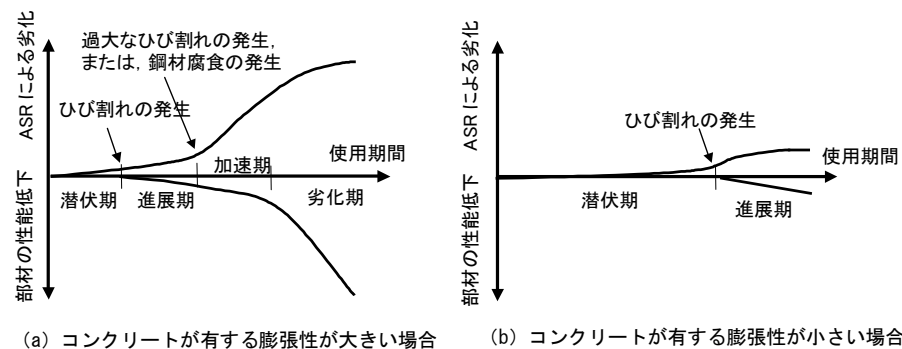
- ・アルカリ骨材反応は丁寧な維持管理をすることで十分に対応できる。

- ・アルカリ骨材反応性岩体はほぼ全国に分布する。
- ・生コン骨材に関しては、関東、北陸、北海道が多い。

- ・アルカリ骨材反応による鉄筋の破断は、鉄筋曲げ加工をした隅角部に多い（図－５参照）。
- ・「アルカリ骨材反応橋脚等に関する対策検討委員会」（委員長：宮川豊章）が近畿地方整備局に設置され、「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）（平成 15 年）」^③が作成された。
- ・引き続き、「ASRに関する対策検討委員会」において、上記要領による対策を検討する際の指針として「アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚、橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案）（平成 20 年 3 月）」^④を作成した。



図－３ 塩害による劣化進行過程の概念



図－４ ASR による劣化進行過程の概念



図－５ 鉄筋の破断状況

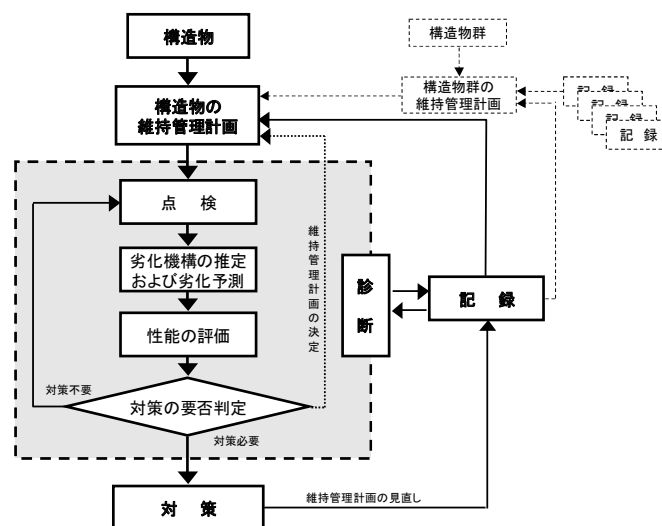
維持管理の手順

一般的な維持管理の手順を図－６に示します。点検から対策の要否判定までを診断と呼んでいます。図中、破線で示している構造物群に対しては、どの構造物からやりましょうというような話が出てきます。そのような場合には、構造物群の維持管理計画というものが別途必要になってきます。

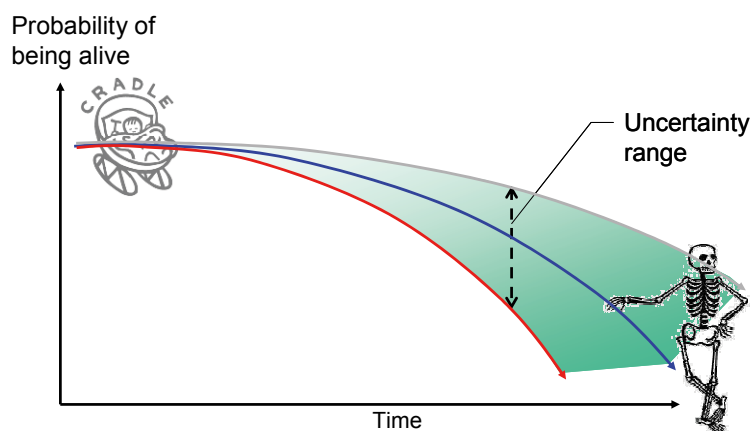
ここで重要なのは、劣化機構の推定及び劣化予測を行い、性能を評価するには、きっちりとした点検が必要であるということです。このためには、やはり技術者はきっちり状態を見なければならぬ。コンクリート構造物を人間になぞらえたのが図－７です。横軸が時間、例えば供用

期間だと考えてください。縦軸が性能、健全性だと考えてください。赤ちゃんの頃は、100%の可能性のある、非常に健全な時ですね。それが、最後には、人間ですからお亡くなりになります。揺りかごから墓場までという曲線です。示方書等には書いてるのは、大体は平均的なこの青い線ですね。ところが、実際の構造物は随分ばらつきがあります。この赤い線である場合もあれば、この灰色の線である場合もあります。

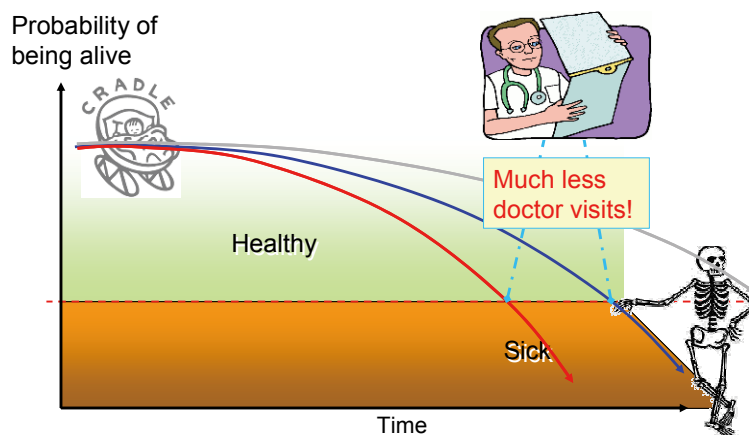
悪い構造物というものは、やはりばらつきが大きい。例えば近畿地方の山陽新幹線並みに悪い高速道路、あるいは国道があるのですが、中性化がすごく早いところとそうではないところがある。つまり、全部が全部悪ければ話は早いのですが、そうではなく、悪いところと良いところ、両方あるのです。このようなばらつきをきっちり捕まえてやる必要がある。そのためには、定期健康診断が人間にとっては有効であるように、定期点検が有効です。今、どの状態にあるのかということを適切に見てやる必要がある。



図－6 一般的な維持管理の手順



図－7 人の生存確率（予測）



図－8 現実の対応（事後保全）

予防保全

ところが現実には、医者に行くのは定期健康診断を利用した形で行くのではなく、悪くなったときに行くというのが多いわけです。これが、構造物でのいわゆる事後保全です（図－8）。しかし、事後保全は既に悪く

the Content of Lecture

なってからですから、当然ながら対策費は高くなり、いろいろ厄介なことも多くなります。それよりは先ほどの定期健康診断等をうまく利用して、予防保全的にした方が、トータルとしてはうまく予算を使いこなすことになると思っています。

点検、評価、判定で本当は何を知りたいのかというと、構造物の性能のレベルを知りたいわけですね。我々は鋼橋が欲しいわけではない。コンクリート橋が欲しいわけではない。ましてやコンクリート道路が欲しいわけではない。橋を渡れる、車を通すという機能が欲しいわけです。その機能を工学的にブレイクダウンしたものを我々は性能と呼んでいます。だから、工学的には性能を知りたいわけです。

モニタリングとか非破壊検査というのは、今いろいろなところで注目されているのですが、診断技術なのか、あるいは定期点検として使うのかという位置づけによって変わりますね。つまり、定期点検的に使うということはずっとそこに設置して置かなければならない。それに対して、診断技術であれば、いざという時にそこに行って何かを調べるという形になる。知りたいことを知りたい水準で知る、これが重要です。

精度を高めたいということで一生懸命やるわけですが、いたずらに精度を高めようとするのは、私は本末転倒だと思っています。特に、非破壊検査あるいはモニタリングは、それで100%わかるような手法は、今

のところありません。しかし、8割わかれば、これは随分大きな武器になりますね。先ほどの鉄筋破断でも、実は精度的には8割ちょっと程度です。しかし、それで安全側に評価ができれば、これは非常にいい方法だと思います。

補修・補強

補修・補強には、まだまだ開発途上の工法が多いわけです。特に補修はそうです。中で妙な反応を起こしたり、妙なものが妙なところにたまったりする。

図-9は、毎年、京都で秋に日本で唯一最先端の補修・補強工法の発表が行われている「補修・補強アップグレードシンポジウム」⁵⁾で発表された工法の例です。右側が補強、左側が補修です。補強ではFRP接着、FRP巻立て、外ケーブル、鋼線巻立て、鋼板接着、FRP埋め込み、増厚、PCコンファインドなどがあります。鋼板巻立てがないじゃないかと言われる方

がいるかもしれません。鋼板巻立ては、ある程度性能がわかっているから、シンポジウムではもうあまり発表されないということでしょう。

それに対して補修は、表面被覆、表面含浸、断面修復という、いわゆる表面保護工法が6、7割を占めています。電気防食、脱塩、再アルカリ化、電着が3割ぐらいを占めている。残りがひび割れ注入です。今使っている工法であっても、まだまだ開発しなければならないところ、あるいは開発した方がいいところが多く出てきているということです。補修の方はまだまだいろいろ考えなければならないということです。

補修においては悪いところを取り去ってしまうということが非常に重要です。私はウォータージェットシステムに期待しています。それから、アルカリ骨材反応については、例えば亜硝酸リチウムの圧入であるとか、このような新しい工法が、今いろいろなところで試験施工的に行われ始めています。最近ではプロピオン酸カルシウムを使う例もあるようです。

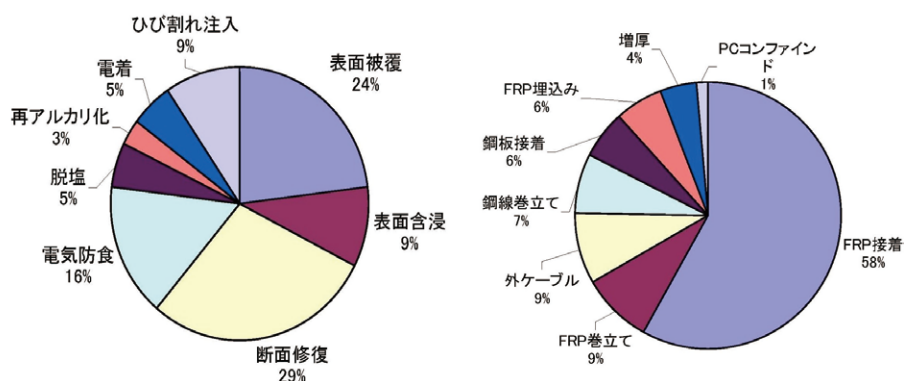


図-9 補修・補強アップグレードシンポジウムでの発表事例

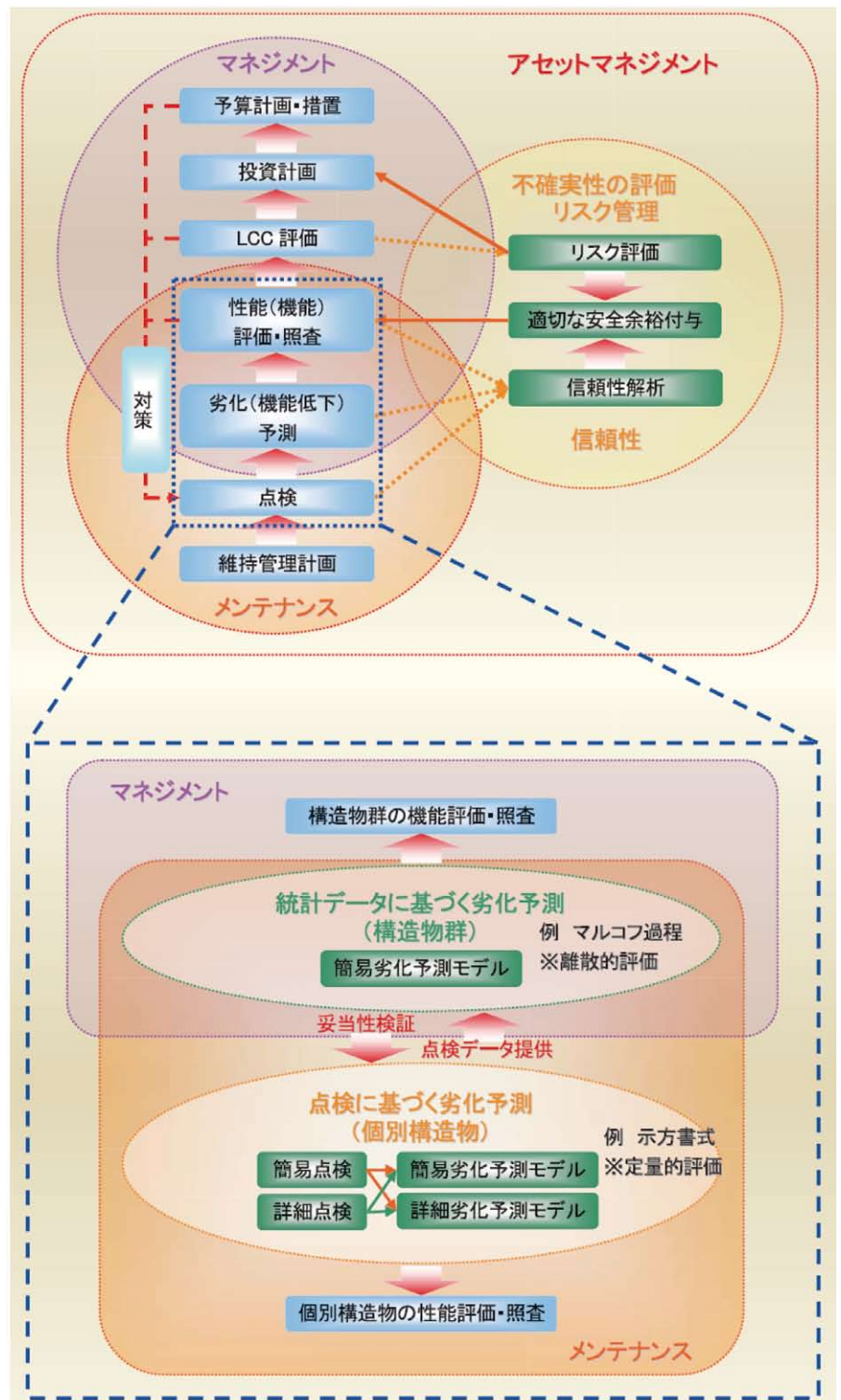
アセットマネジメント

さて、ここまではハードのところ
です。実は、構造物群、特に皆さんの
ように非常にたくさんの構造物を
扱わなければならないという話にな
りますと、構造物群でいろいろとア
プローチしてやる必要がある。アセ
ットマネジメントそのものについて
は、例えば小林潔司先生の論文等を
参考にいただければと思いますが、
図－10 は日本コンクリート工
学協会において、「技術者向けのよく
わかるアセットマネジメント」6) と
いう委員会を立ち上げ、まとめた簡
単な資料です。

そこでは、例えば、図－11 のよ
うなものがあります。学問分野とし
て一番よくやっているのは性能の予測、
評価、点検と言う部分です。しかし、
このような部分をうまく生かすため
には、マネジメントに目に向けなけ



図－10 よくわかるアセットマネジメント
(日本コンクリート工学協会)



図－11 マネジメントとメンテナンスの関係

the Content of Lecture

ればいけないということが、最終的にわかったのです。わからされたといったほうがいいのかもかもしれません。実はマネジメントとメンテナンスの両方合わせて維持管理になるわけです。土木学会のコンクリート委員会のコンクリート標準示方書の維持管理編は、維持と管理が両方入っているように見えて、実はどちらかというと維持が中心です。ですから、これから管理の方を充実させようとしています。その維持と管理の、特に境界部分が重要です。例えばメンテナンス側からすると、点検に基づく劣化予測とか、簡易劣化予測モデル、こういうものが極めて重要です。それに対して、マネジメント側からは、

統計データに基づく劣化予測、例えばマルコフ過程であるようなもの。上の方は極端に言えば、100 あって10 おかしくなった、そんな感じですね。下の方は、なぜおかしくなったかというメカニズムをきっちり追うということです。これをうまくすり合わせてやらないと、アセットマネジメントは多分無意味になるだろうと考えます。しかも、そのようなアセットマネジメントは非常にたくさんの方の構造物を扱うわけですから、市民とコンクリート技術者と管理者、この三者がうまく共同歩調をとる必要がある。このトライアングルが極めて重要だと考えます。

3つの環境と3本の柱

このように市民までを視野の中に入れて、私は3つの環境と、それを支える3本柱という言い方をしています。自然環境、これは要するに、例えば地震であるとか、台風であるとか、CO₂などのいわゆる環境からの作用、そういうような外力の話ですね。これは空間にかかわるものです。2番目が時間にかかわる歴史環境、歴史的な価値も当然ですが、それから、その構造物がどうなっていくのかというような話も含めての、時間にかかわる歴史環境。もう一つが人間にかかわる社会環境。この3つの環境を我々は同時に考



写真－1 講演会の様子（国土技術研究センター会議室にて）

えなければならない。

これらを支えるためには、やはり責務というものがあって、それから、それに係わることに名誉というものも当然なければならない。それから、それに対する対価もなければならない。この対価の話は私がしてもあまり意味がないのかもしれませんが、少なくとも評価、判定、補修、補強のところでは、予算の余った時にやるというようなスタンスが非常に多かったのではないのでしょうか。この対価をちゃんと考えなかったことも結構多かったの、入札不調ということになったりするのでしょう。大手は補修、補強の方には手を挙げないという話が出たりしていましたが、やはりこの3つがないと、正しいマーケットとして存在しない。そのために、この3本柱というものが重要だと考えています。

今まで、造るという部分においては責務、名誉、対価があったかもしれない。使いこなすという部分においても責務と名誉と対価がないとよ

くない。これは皆さんにとってもそうですし、業者の方々にとってもそうですと考えます。

おわりに

話が一巡しました。皆様方にはぜひ誇りを持っていただきたい。私もぜひ応援したいと考えています。誇りを持って、使いこなして、丈夫で美しく長持ちするコンクリート構造物にしていきたい。それによって、この社会を、この地球を丈夫で美しく長持ちしていただくことが私の願いです。ですから、最初に、「学から官に望むこと」とありましたが、というよりはむしろ、私が皆さんにお願いしたいことと言い換えた方がいいのだと思います。

皆さんが、構造物にどのような生涯を送らせるかというシナリオをきっちり考えていただきたい。要するに使いこなすということをきっちり考えた上での設計、施工、維持管理

をしていただくとありがたいと思います。元禄時代の浪華のシェイクスピアと呼ばれた近松門左衛門になぞらえ、皆さんが第2、第3、第4、第5の近松門左衛門になっていただくことを願いまして、私からの話を終わらせていただきたいと思います。どうもご清聴ありがとうございました。

(文責：技術・調達政策グループ

山田 武正)

参考資料

- 1) 土木学会：垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書、2005.9
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、〔施工編〕、〔維持管理編〕、2007.12
- 3) 国土交通省：道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）、2003.3
- 4) 国土交通省：アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案）、2008.3
- 5) コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム <http://conresin.jsms.jp/>
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のアセットマネジメント研究委員会