

シナリオデザインのすすめ



講演者

京都大学大学院工学研究科 教授
宮川 豊章（みやがわ・とよあき）氏

プロフィール

1950年生まれ。京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了。工学博士。道路橋の予防保全に向けた有識者会議委員、土木学会理事、プレストレストコンクリート工学会会長、日本材料学会会長、日本塗料検査協会理事長などの要職を歴任。日本コンクリート工学協会論文賞（2000）、土木学会論文賞（2001、2007）、日本材料学会論文賞（2007）など、多数の表彰を受けている。

土木技術者は、土木構造物の生涯を見通したシナリオを考えるべき

本日の講演タイトル「シナリオデザインのすすめ」に妙な印象を感じられるかもしれません。『広辞苑』でのシナリオの定義は「映画・放送などで、場面の順序、俳優の台詞・動作などを記した台本。脚本」です。これを私は「市民生活などで、土木施設管理の順序、土木施設・土木技術者の台詞・動作などを記した台本。脚本」と置き換えて、よく使っています。この場合の「管理」には、土木施設の計画、設計、施工、維持管理などの全てを含みます。ちなみにオックスフォードの一番簡単な辞書によるシナリオの定義は、「a description of how things might happen in the future」、要するにシナリオとは「物事がどのように起こっていくのかを記述したもの」となっています。

土木構造物・土木施設が市民社会に必要不可欠であることは、皆さまもよくご存じでしょう。その土木施設とは、本来どのような生涯を送るべきか。どのような形で生まれ、育ち、市民に愛され、大切にされ、管理されるべきか。そのス

トーリーがシナリオなのだとは私は考えません。単に「そこに構造物があるから」「つくる必要があるから」ではなく、「土木施設とは本来どうあるべきか」「どう使うべきか」を考えるのが大切です。これ考えるのが本来の技術者だと思います。

おそらく世界で最も有名なシナリオライターはシェイクスピアだと思います。彼は芝居のシナリオを考えたとわけて、同様に、土木技術者は土木構造物が、この地球上、この国土で、どう活躍するかを考えなければいけません。よい「人生」を送った土木構造物やコンクリート構造物は数多くありますが、それらは当初から暗黙のうちに、シナリオが考えられていたはずで、

例えば信楽高原鐵道の第一大戸川橋梁^(注1)は50年以上前に建設されましたが、将来を考えてつくられたおかげで、いまだに非常にきれいな状態で、適切に使われています。すべての土木施設、コンクリート構造物がこのような「人生」を送るべきだと思います。

さて、『広辞苑』にもあるように、シナリオと言えば映画を思い浮かべます

が、『東京物語』などの作品で有名な映画監督の小津安二郎さんは「人間50年」という言葉をよく使いました。主人公も今どきの映画とは異なり、50歳以上、60歳以上の方がよく出てこられます。

この50年という年月はしばしば、一つの区切りとされます。「人間50年」とは、「人間の生涯は50年」の意味に取られがちですが、本来は「天上界の1日は人間界の50年に当たる。人間の生活リズムは、天上とは全く異なるものだ」との意味で使うそうです。

人間界のリズムと天上界のリズムが異なるとしても、人間界の50年は構造物に非常に大きな影響を与えます。

(注1) 第一大戸川橋梁

1954年に建設された本格的プレストレストコンクリート造橋梁。国の登録有形文化財。



適切な設計・施工と維持管理が できなければ落橋事故に至る危険も

例えば、アメリカのミネアポリス高速道路崩落事故（2007年）は有名です。この橋はコンクリート構造でなく、鋼構造物の上にコンクリートスラブを載せた形でしたが、適切な維持管理ができていないと、落橋という最悪の事故が起こる事実を示しました。一方、この橋梁の場合、維持管理の前に、建設当初の配慮、すなわちシナリオから悪かったのでは、との指摘もあります。橋梁をつくる際には、「橋とは本来どうあるべきで、その効果・恩恵をどう市民に与え続けるか」を明確にする必要があり、そのうえで適切な維持管理をしていかななくてはなりません。

コンクリート構造物も同様です。例えばイギリスのヤンシーグアス（Ynys-y-Gwas）橋の落橋（1985年）は、PCグラウト^{（注2）}の充填不良を起因としたPC鋼材の破断が要因であると考えられています。そのためイギリスでは、1992年から1996年までの足かけ5年間、PCグラウト充填を行うポストテンション方式^{（注3）}のプレストレストコンクリート^{（注4）}が禁止されました。

グラウト充填はイギリスばかりか日本でも、いろいろな構造物で問題視されています。プレストレストコンクリート工学会では、この問題を何らかの形で明確にするべく、大規模な委員会をつくり、その成果をまとめようとしています。

コンクリート構造物は、適切に設計、施工、維持管理をすれば、非常に長持ちしますが、しかしそれでも劣化は起こり得るのです。

日本では、供用中の橋が落橋に至ったケースは少ないと思います。最も有名なものは、江戸時代、1807（文化4）年

の永代橋の落橋事故でしょうか。当時の永代橋は隅田川に架かる木橋で、コンクリート橋とは異なりますが、非常に大きな教訓を残しました。

この落橋事故は、富岡八幡宮（通称・深川八幡、現在の江東区）の例祭で大勢の人や神輿が渡ったことが原因と考えられています。しかしこれは、間接的な原因を結果に直接つなげて批判する「春秋の筆法」ではありません。私は、幕府が橋の維持管理を民間委託したことが本当の原因であると思います。永代橋は幕府によって架けられ、少なくとも新設時には立派だったはずですが、ところが幕府に資金がなくなり、民間に維持管理を押しつけてしまったのです。

しかし、このような公共的な構造物を民間が維持管理するのは、非常に困難です。技術者がいるかどうかの問題もありますが、儲けに走り「橋は渡れさえすればいい」となりかねないからです。構造物の維持管理には当然お金がかかります。問題がある部分の修復等に適切に投資するべきなのに、永代橋はそれをしなかった。今の日本でこのようなことが起こらないよう、私は祈るばかりです。

（注2）PCグラウト

プレストレストコンクリート部材において、腐食防止や一体化をはかるために、シーースとPC鋼材の間に注入充填する材料。

（注3）ポストテンション方式

PC鋼材を定着してからコンクリートを打込み、硬化後にPC鋼材を緊張してコンクリートにプレストレスを与える方法。

（注4）プレストレストコンクリート

あらかじめ圧縮力を与えて、曲げ抵抗の増大やひび割れ防止をはかったコンクリート。

建設時に技術的な無理をすると 数十年後に問題が生じることも

「永代橋は少なくとも新設時には立派だったはず」と前述しましたが、その当時では、という意味です。技術には時代の制約があります。前述のグラウト充填もその一つです。

その時代の新しい知識、工法、材料を使って構造物をつくるのはよいわけですが、10年、20年、30年後に問題が生じるような無理をしているときがあります。例えば現在、山陽新幹線の高架橋では中性化と塩害の複合劣化が非常に問題になり、今その対応に技術者は最大限の努力を注いでいます。この複合劣化も、建設当時の時代の制約があって、結果として、問題のあるコンクリートになってしまったわけです。

ある文献に、「ゴジラ手のり型」という記載がありました。皆さん、ビーカーに入る大きさの手のりゴジラをご想像ください。このコンパクトなゴジラは、ゴジラの遺伝子とネズミの遺伝子をかけ合せるという最先端の技術が生んだことになっています。火を吐くのでライター代わりになるし、ハエやゴキブリも退治してくれて非常に役立ちます。ところが、一つ欠点がありました。短命なのです。

技術的に無理をすると、当時はわからなくても、将来的に問題が生じかねません。手のりゴジラはその典型的な例です。社会を支えるコンクリート構造物を、手のりゴジラにしてはならない。これが私の信念です。

例えば、和歌山県の橋本道路垂井高架橋でいろいろな問題が生じたことは、皆さんもご存じでしょう。0.9 mm幅ほどの大きなひび割れが橋の全体にわたって生じ、橋桁が垂れ下がってしまったのです。鉛直変位を測定すると、橋脚の間

に架かるすべての橋桁が 10～34 mm 程度たわんでいました。なぜ、こうなったのでしょうか。

橋本道路垂井高架橋は、設計そのものにいろいろな配慮がなされていました。南海地震に対応できるよう多くの鉄筋が使われ、耐震性は高いようでした。また連続橋で段差や継ぎ目の欠陥が生じないように工夫されていました。それでもひび割れ、たわんでしまった主な原因は、コンクリートの乾燥収縮が非常に大きかったからと思われます。

コンクリートの乾燥収縮はどの程度生じるものなのか。コンクリート標準示方書や道路橋示方書などには、目安となる数字が書かれています。しかしそれらはあくまで標準であって、示方書の作成時に記載された数字です。当時は時代の先端だったかもしれませんが、今やそれが当てはまらないコンクリートもあるわけです。

乾燥収縮の実測値は、示方書の標準値を大きく上回ることが増えた

同じような骨材を使ったひび割れの事例に、大阪府阪南市に建設された第二阪和国道の橋梁があります。供用開始の4年後にひび割れ等変状の発生が確認され、一つ一つのひび割れ自体は、橋本道路垂井高架橋ほど深刻ではなく、せいぜい 0.2～0.3mm でした。しかし、第二阪和国道の場合、山中川東高架橋、自然田（じねんだ）高架橋、菟砥川（うどがわ）高架橋、金熊寺川（きんゆうじがわ）高架橋、石田高架橋といった複数の高架橋で、非常に多くのひび割れが生じたのです。これも、コンクリートの乾燥収縮の大きさが原因のようです。

そこで、コアを抜いて供試体の長さ変化測定をしました。コアを抜いた理由は、断面が大きい橋脚の場合、表面のコンク

リートは乾燥収縮していても、内部のコンクリートは 1～2 年経っても完全には乾燥収縮していないからです。そのためコアを抜いて、内部の乾燥収縮を測ることができます。

道路橋示方書では、設計上は 150 μ （マイクロ）を使うことになっています。しかし、実測してみると、乾燥収縮は極めて大きいことが判明しました。双曲線で回帰した最終予想値のひずみは、第二阪和国道に架かる自然田高架橋で 1,090 μ 、石田高架橋で 1,172 μ 、菟砥川高架橋で 782 μ 、金熊寺川高架橋で 789 μ でした。クリープ^(注5)やリラクゼーション^(注6)の関係があるので、乾燥収縮の絶対値を設計に使う必要はありません。実際にはそれよりはるかに小さくても大丈夫です。しかし極めて大きな乾燥収縮が生じるのは確かです。

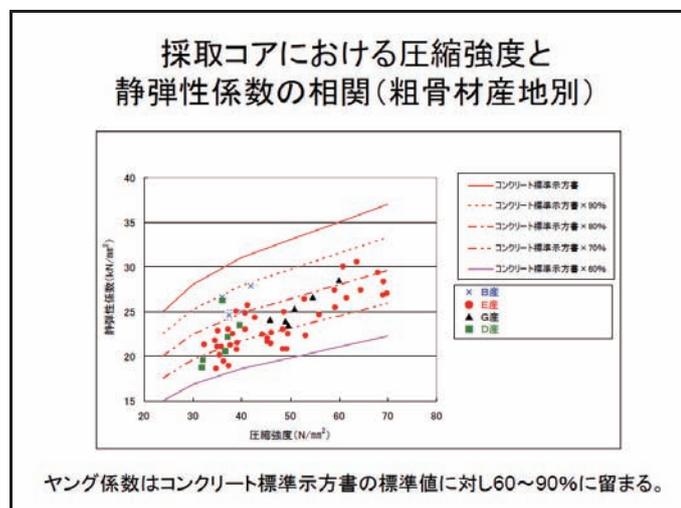
この採取コアにおける、圧縮強度と静弾性係数を求めた結果が、資料 1 です。赤い実線が、コンクリート標準示方書の標準値です。しかし実測してみると、どの産地の骨材も、静弾性係数は示方書の標準値を下回り、60～90%程度でした。90%はまだしも、60%となると、コンクリートは極めてたわみやすい状態と言えます。乾燥収縮などにより生じた

細かなひび割れが、静弾性係数に影響していると考えられます。

そこで、1979 年と 2007 年の、乾燥収縮実測データを紹介します。さまざまな場所で測定したコンクリートの乾燥収縮の平均値は、1979 年が 672 μ 、2007 年が 729 μ でした。50 μ 程度しか変化が見られず、大した違いはないとも思えます。しかし問題は、平均値ではなく、個体差の広がりにあります。1979 年は、ほとんどのコンクリートの乾燥収縮が平均値に近かったのに対し、2007 年には平均値を大きく上回るコンクリートが増えました。1979 年なら、実測値 600 μ 程度に対して、設計上は示方書通りの 150 μ にしても、クリープやリラクゼーションがあるため問題ありませんでした。ところが 2007 年の実測値 900～1000 μ ともなると、示方書の数値通りにしてはカバーできません。

このように、構造物に新しい材料を使うのはいいのですが、少し時間が経つと、乾燥収縮のひび割れなど、さまざまな問題が生じる可能性があるわけです。さらに 50 年、100 年と経てば、どんな構造物にもトラブルは生じがちです。

落語「寿限無」に「五劫のすり切れ」



資料 1 採取コアにおける圧縮強度と静弾性係数の相関（粗骨材産地別）

という言葉が出てきます。この「劫」は、時間の単位です。大きな岩を3000年ごとに羽衣で撫で、その岩がすり切れてなくなるのが一劫で、五劫はその5倍。つまり想像もつかない長期間を意味します。そんなレベルの時間が経てば、いくら適切に設計、施工、維持管理をしようが、さまざまな問題が生じるはずで、時代の制約に基づく技術の未熟さによって劣化が生じたら、いろいろな手当てをするのは当然です。また、優れた技術でどんなに素晴らしい構造物をつくったとしても、やはりいつかはいろいろ手当てが必要なわけです。

(注5) クリープ

一定の応力のもとで、時間の経過により変形が増加する現象。

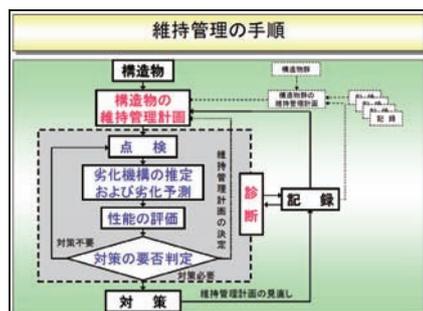
(注6) リラクゼーション

与えていた応力が、時間の経過により減少する現象。

構造物の維持管理の手順で最も重要なのは点検

維持管理の手順について考えるにあたり、資料2を参照ください。構造物に対して、維持管理計画をつくり、点検し、劣化機構の推定および劣化予測を行い、性能を評価し、対策の要否判定をする。これが一連の流れです。ここでは点検が基礎であり、最も重要です。点検をしない構造物など、本来あってはならないわけです。

点検は必ずしも毎年必要なわけでは



資料2 維持管理の手順

ありませんが、定期的にせよ臨時にせよ、点検の結果から劣化などの原因を推定し、今後どうするかを決めます。例えばある橋について、「現時点で使えるか」「50年後は使えるか」などを評価します。そしてその結果から、いつ対策を実施するかを検討します。将来の激しい劣化を防ぐ予防保全的な対策にすぐに取り組むか、もう少し後にするかなどの要否判定をするわけです。

対策が必要であれば実施し、それにより構造が少し変わりますから、維持管理計画を見直します。また、対策が不要であれば、また点検に戻ります。これらをすべて記録に残します。

この、点検から対策の要否判定までを、土木学会では診断と呼びます。さらに土木学会は多数の構造物を診断し、その記録をデータベース化することをすすめています。

構造物の定期点検は人間の定期健診のようなもの

土木構造物やコンクリート構造物は、しばしば人間に例えられます。生まれたばかりの赤ちゃんは健全性 (probability of being alive) が高く、加齢によって劣化していきます。同様に構造物も時間の経過と共に劣化するわけですが、そのスピードには当然ばらつきがあります。

コンクリート標準示方書や道路橋示方書の劣化概念に疑問を抱く人は少なくありません。特に管理者側に多く、「どうも示方書と中性化深さが違う」などと指摘します。しかしそれは当然の話です。どんなコンクリートも一定ではなく、中性化の深いのもあれば浅いのもあり、中性化の速度も微妙にばらついています。それが10～20倍も違えば問題ですが、1.1～1.2倍のレベルであれば、気にする必要はありません。定期点検によっ

て把握し、示方書の式をもとに、劣化の予測を随時修正すればいいのです。

この定期点検は人間に例えれば定期健康診断です。人間でも、何歳なら血圧はいくつ、血糖値はいくつと、政府の統計による平均値がありますが、その数字が完璧に当てはまる人は稀で、ほとんどの人が微妙にずれているはずで、

コンクリート構造物も同様で、そのズレの確認のために行うのが、定期点検なのです。標準示方書はあくまで標準で、実際とは違って当然です。完全に一致するのはむしろおかしいと私は考えています。

ところが人間でも、定期健康診断をさぼる人が多くいます。そのため、病気を早期に発見できず、病気が悪化してから病院に行くことになり、治療にお金や時間がかかる結果になります。定期健康診断でチェックして予防対策を講じていれば、病気の悪化を防いだり遅らせたりすることができ、使うお金や時間を減らせるのです。

これと同様のことが、コンクリート構造物の定期点検にも言えます。しかし、コンクリート構造物には人間と同様の経年変化だけではなく、前述の「時代の制約」があります。そのため、定期点検には、専門の資格を持った人が構造物をきっちりとチェックすることが望まれます。そこで現在、プレストレストコンクリート工学会の「コンクリート構造診断士」と、日本コンクリート工学会の「コンクリート診断士」の資格が注目されています。



失われたコンクリート構造物への信頼感を取り戻すために

「コンクリートから人へ」との、ひどく常識外れなスローガン、キャッチコピーがもてはやされた時代がありました。こうした言葉が受け入れられた背景には、コンクリートのイメージによくない部分があったからです。

しかし、コンクリート関係者以外の民間の人に尋ねると、コンクリートやコンクリート構造物のイメージはさほど悪くありません。コンクリート構造物が市民社会を支えていることは、よく理解されています。となると、イメージが問題なのは、コンクリートやその構造物ではなく、手続きなのです。その一つが「談合」でしょう。また、早期劣化が非常に問題になったときに、それを隠していたなどの隠ぺいのイメージが付いてまわっている気がします。

こうしたイメージ先行の例として、私にとって平知盛（平清盛の四男）がいます。平知盛は歌舞伎の「義経千本桜」の二段目「渡海屋」「大物浦」の段に登場し、大きな碇を背負って海に飛び込んだことから、「碇知盛」と呼ばれています。私はこのシーンに大変感動し、知盛は私のヒーローになりました。しかし『平家物語』では、碇とともに入水するのは清盛の異母弟の経盛・教盛などです。知盛はよろいを3重に着て、一番の親友とともに海に沈むのです。これで私の知盛のイメージは崩れましたが、もちろん知盛に責任はなく、私が勘違いしていたにすぎません。

コンクリート構造物も同様です。今日の市民社会を支え、丈夫で美しく長持ちするのがコンクリート構造物とされています。しかし、それが剥落したり、いろいろな欠陥が生じたりすると、その落

差によってコンクリートのイメージが悪くなるのです。とはいえ、失った市民の信頼は、取り戻す必要があります。

そのために考えておくべきこととしてよく言われるのが、「初めから傷のある自動車を買う人がいないように、当初から傷のある橋梁は誰も買わない」、という例えです。しかし私は、自動車と橋梁では性質が若干違うと思います。自動車は、購入する時点で完成品です。しかしコンクリート構造物は、施工も込みで購入するのです。いわば将来を買うわけで、自動車と同じ購入システムではないかと私は考えます。

ですから、コンクリート構造物や土木構造物に対して現在の会計法を適用するのは、明らかに間違っています。品確法^(注7)が、自動車購入とコンクリート構造物購入の違いをアピールするきっかけになればと期待しています。

(注7) 品確法

「公共工事の品質確保の促進に関する法律」。
2005年4月施行。

コンクリート構造物の維持管理には劣化メカニズムの把握が必要

コンクリート構造物は本来、丈夫で美しく長持ちするはずですが、それを維持管理するには、いろいろな場合に応じてさまざまな診断をくだす必要があります。そして、その診断に合わせて対策、つまり補修・補強などを考えることになります。

コンクリート構造物の劣化メカニズムには、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応、疲労、すり減りなどがあります。それぞれ劣化の変状の外観も中身も異なるため、これらの劣化メカニズムを把握する必要があります。これが、前述の資料2で示した維持管理の「劣化機構の推定」に当たります。

コンクリート構造物で最も起こりやすいのは中性化です。これによって鉄筋の腐食や、壁のコンクリートの剥落などが生じます。続いて塩害。ひどい場合には鋼材がブチブチと切れてしまいます。中性化も塩害も腐食ですが、塩害のほうがより厳しい腐食形態になります。

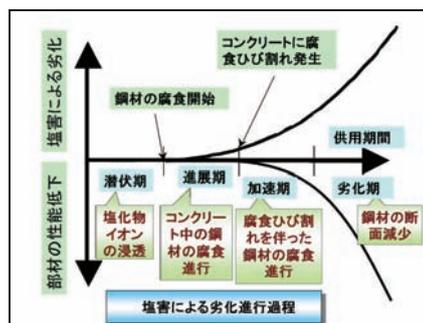
それからアルカリ骨材反応。今はアルカリシリカ反応と呼ばれることも多いですが、より広い意味ではアルカリ骨材反応と呼ばれます。これが起きると、ひび割れが生じます。場合によっては、鉄筋がきれいにすっぱり切れてしまう鉄筋破断もあります。この鉄筋破断にまで至っているのが発見されたのは、近畿、九州、北陸、四国の辺りと思われます。

アルカリ骨材反応は北陸地方だけで生じていると思っている人も多いようですが、実は日本全国で起きています。「うちではないだろう」と思っていると、発見した際にすいぶん慌てるようです。しかし、慌てる必要はありません。鉄筋破断に至るまでには時間がかかりますし、鉄筋破断がなければ耐荷力的にはほとんど問題ないと考えられるからです。逆に言えば、鉄筋破断をどう見つけ、そしてどう補強するかが重要なのです。

塩害は調査によって劣化進行の段階を把握すれば対応できる

中性化、塩害、アルカリ骨材反応の中でも、特に塩害とアルカリ骨材反応は厄介で、しっかり対応する必要があります。中性化により塩害が加速する、複合劣化で非常に困っている場合が多いのですが、これも塩害の一つかもしれません。

塩害による劣化の進行過程は、資料3をご参照ください。縦軸の上が塩害による劣化、下が部材の性能低下です。そして供用期間が長くなるに従い、潜伏期、進展期、加速期、劣化期と変わっていき



資料 3 塩害による劣化進行過程

ます。

塩化物イオンが次第に浸透し、鋼材の腐食が始まるまでが潜伏期です。そこから、コンクリートに腐食ひび割れが発生するまでが進展期。腐食ひび割れを伴った鋼材の腐食が進行するのが加速期で、この図では劣化が急激に進んでいます。さらに鋼材の断面の減少がはっきりとわかるのが劣化期です。部材の性能低下は、この劣化期で極めて厳しく速くなります。

塩害による劣化進行が、現在どの段階にあるのかを把握していれば、対応できます。

塩害の例として、国道7号の暮坪陸橋（山形県）があります。1965年に建設され、波による塩分で腐食が生じ、いろいろな手当てを施してもどうにもならず、架け替えられました。撤去跡近くに取り残されている他の橋を見ると、腐食による大きなひび割れがあり、とりあえずの補強目的で鋼板が張られています。

こうした塩害の調査方法は、最初に目視調査、打音調査によって定性的な評価を得ます。その後、塩化物イオン濃度を調査し、腐食環境を評価するのが一般的です。さらに、自然電位法でどの程度の腐食可能性があるかを調べます。分極抵抗法で腐食速度を測るケースもあります。

塩害による劣化は、鉄筋の周りのコン

クリートに塩分が浸入・蓄積することから始まります。その後、腐食により内部からひび割れし、それが表面へ広がってコンクリートの剥離が起こります。

鉄筋の腐食状況の非破壊評価方法としては、前述の自然電位法がありますが、これは腐食そのものの状況しかわかりません。腐食に伴う鉄筋周りの変状は調べられません。コンクリートの浮きや剥離などの状態を知りたくても、その変化を評価する方法がまだ少ないのは確かですが、現在ではサーモグラフィや衝撃弾性波法で剥離の可能性を調べる試みが多く行われています。

以上、塩害対策についてはこのようないろいろなテクニックがあり、塩害が生じても恐れる必要はなくなっています。

アルカリシリカ反応による鋼材破断のメカニズムとは

次にアルカリシリカ反応への対応について述べます。資料4のひび割れの写真を見てください。3本の鉄筋がすべて破断しています。その上のコンクリート表面に見られる白い部分がアルカリシリカゲルです。これが吸水することで膨張し、コンクリートにひび割れをもたらします。その結果として、このように鉄筋がすっぱりと破断するケースがあります。この鉄筋は、端部から割れが進み、ある箇所で一挙に破断した、脆性的に切れたと考えられます。

ではなぜ、このようなことが起こるの



資料 4 鉄筋の割れとゲル

でしょう。

鉄筋に曲げ加工を施すと、当然、大きなひずみが生じます。外側には圧縮、内側には引張の残留応力が生じ、内側のリブの根本辺りに、亀裂が発生することがあります。さらに、曲げ加工、つまり塑性変形をさせた鋼材は、時間の経過とともに脆性化します。要するに破壊感受性が増加するのです。

そして、アルカリシリカ反応によるひび割れがコンクリート中で進行し、水分などの腐食環境が入ると、水素が発生します。コンクリート内の鉄筋に水素は発生しないと思っていた人も多いのですが、破断直後の鉄筋を調査したところ、拡散性水素が多く含まれていました。

続いて、アルカリシリカ反応による膨張力で曲げ戻し力が生じ、亀裂の近くで応力の集中が起こります。さらに水素による鋼材の脆化も進んだために、破断してしまった。これが、私が推定している鋼材破断のメカニズムです。

曲げ加工した鋼材は、非常に高強度です。800～1,000MPa（メガパスカル）以上で、我々が考えている許容値、設計上の基準値をはるかに上回ります。しかし塑性加工した後なので、破壊靱性は半分以下と、極めてもろくなっています。そして、アルカリシリカ反応によるひずみは鋼材の降伏レベルに達します。腐食による拡散性水素は0.1ppm、場合によっては0.3ppm以上になります。極めて脆性で、破断しやすい状態と言えます。

厄介なのは、こうした破断が報告されているのが、我が国のみであることです。そのためアルカリシリカ反応の国際会議や国際委員会で、これを話題にすると、「日本のコンクリートや鉄筋の質が悪いのでは」と言われてしまうのです。

しかし、私はそうは思いません。アルカリシリカ反応を起こす日本の骨材は、

確かに膨張速度や膨張能力が大きく、それが影響していることは否めません。しかしほかの部分は、コンクリートも鉄筋も、海外と同じかそれ以上です。そのため私は、海外でもこの問題が生じることを祈っています（笑）。世界中の問題になるべきだと思いますから。

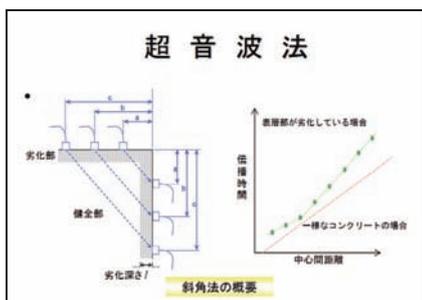


アルカリシリカ反応の劣化深さと鉄筋破断の点検方法

アルカリシリカ反応の点検方法の一つは超音波法です。斜角法を用い、一定の角度でコンクリート内部への超音波の伝播速度を測ると、劣化部を多く含む部分では遅く、健全部を多く含む部分では速くなります。すると、資料5の右側グラフが得られます。縦軸が伝播時間で、横軸が中心間距離です。一樣なコンクリートであればグラフは直線になりますが、表層部が劣化しているコンクリートの場合、グラフがある部分で曲がります。そこが、劣化深さと考えられます。

まだ課題は残っていますが、こういったアプローチでの調査が可能であることが、実証されています。

しかし、劣化深さはそれほど大きな問

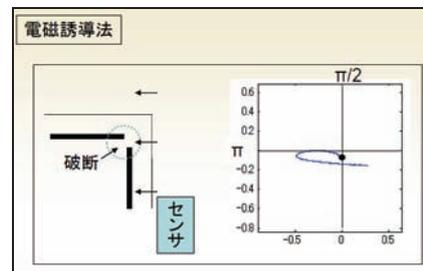


資料5 超音波法

題ではありません。コンクリートが少々割れていても、構造物としての耐荷力はほとんど落ちないからです。むしろ問題となるのは、鉄筋破断の有無です。

この調査には現在2種類の方法が考えられています。その一つが、電磁誘導法で、センサを走査させて鉄筋に基準波形を当てて、破断の有無による違いを明確にしていく方法です。

資料6の右図のように、入射波と反射波の位相のズレを角度で、振幅の増減を原点からの距離で表し、リサーチ波形(注8)を描きます。センサの走査区間に破断などの不連続部があると、位相のズレ・振幅の変化も不連続となり、リサーチ波形も不連続（角ばった形）になります。リサーチ波形が曲がる部分から、破断を評価できると考えられています。



資料6 電磁誘導法

もう一つの方法が磁束密度測定です。鉄筋は磁性体ですから、必ずS極とN極を持っています。あるいは人工的に与えることができます。鉄筋が破断すると破断面で新たなS極とN極が生じるので、それを探知すれば破断の推定ができます。

具体的には、磁石を走査させて鉄筋に着磁し、センサにより鉄筋直上の磁束密度を測定します。測定した磁束密度分布波形から、鉄筋破断箇所付近に発生する漏洩磁束の有無を判定するのです。

(注8) リサーチ波形

二つの単振動を合成するときに描かれる曲線。

コンクリート構造物のあるべき姿は「丈夫で美しく長持ち」すること

ここまで、塩害とアルカリシリカ反応について話しましたが、細かいことを覚えていただきたいわけではありません。私が言いたいのは、それぞれに対応手段はあり、それに従っていれば対策は可能だということです。

逆に言えば、塩害なのにアルカリシリカ反応の対応手段をとっても無意味です。すなわち、劣化メカニズムの推定、劣化機構の推定が、極めて重要になります。その結果として「丈夫で美しく長持ちするコンクリート構造物」を得ることができ、それによって「丈夫で美しく長持ちする市民社会」を支えられるわけです。この「丈夫で美しく長持ち」こそが、本来あるべき姿だと考えています。

「不易流行」という言葉があります。最先端のバリエーションが「流行」で、それに対して本質、本当に重要なものが「不易」です。「丈夫で美しく長持ち」こそが、不易であるべきでしょう。

構造物は、「丈夫で長持ち」だけでは足りません。誇りを持てる「美しさ」が必要です。その美しさとは、概念的なものではなく、機能美です。絶対に壊れない構造物はあり得ませんが、台風、地震、津波が来ても簡単には壊れない丈夫さを持ち、いろいろな役割を果たす。それが、地域の人や訪れた人の誇りとなるような美しさを備え、かつ、子ども、孫、ひ孫の時代まで使えるほど長持ちすること。これが重要なのです。

災害時に被害が生じるかどうかは、作用と保有性能との関係で決まります。東日本大震災での一つの例として、ほぼ同じ場所にあるにもかかわらず、東北新幹線は被害を受け、東北本線は無事という高架がありました。東北新幹線の設計法

が古かったのに対し、東北本線の設計法は新しく、耐震性能があったからです。

問題は、材料劣化が生じて、部材の耐震・耐荷性能が低下していたらどうなっていたかです。劣化構造物の場合、地震による被害は極めて大きくなる可能性があります。そうならないようにしなければいけません。

構造物はただつくればよいものではなく、震災という非常時にも耐えられるよう、平時の維持管理を忘れてはなりません。地震や津波が発生すると、それに心を奪われ、平時の行為・行動への見直しが疎かになりがちですが、非常事態への対応は、平時の維持管理でまかなわなければなりません。当初から維持管理そのものを設計し、正しく工事し、適切な維持管理を実施する。これが極めて重要です。つまり「時空間シナリオ」が必要なのです。

従来は、「地震が起きたらどう壊れるか」が盛んに検討されていました。これは空間だけで考え、時間軸を考慮していないこととなります。つくられた当初の、初期の力学を偏重していたわけで、これから先、それではだめだと私は思います。当初の性能がどう変わっていくか。それを含めて、地震や津波、台風や洪水に対応しなくてはなりません。

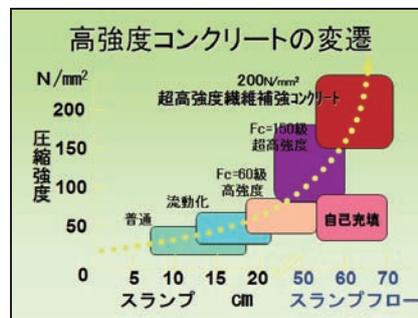
東日本大震災の大きな被害の教訓を、我々は生かす必要があります。南海や東南海地震の被災対象地域には、東日本大震災の被災地以上に古いコンクリート構造物が多くあります。東日本大震災よりも被害が大きくなりかねません。今こそ維持管理できっちり対応すべきです。

丈夫で美しく長持ちするコンクリート構造物を得るための三本柱とは

コンクリートのこれからを考えるうえで重要な三本柱を提案します。

1 本目の柱が「高強度・高耐久性・高靱性」。これは、コンクリート構造物についても、市民社会についても言えます。

資料7は、高強度コンクリートの変遷です。普通、流動化、高強度、自己充填、超高強度、超高強度繊維補強コンクリートと、強度が上がってきました。



資料7 高強度コンクリートの変遷

通常のセメントペーストと比べると、高強度セメントペーストはセメント粒子のすき間が少なく、密集しています。超高強度セメントペーストになると、超微粒子がすき間を埋めています。さらに強度を上げるには、短繊維なども含めて最密充填をします。

超高強度繊維補強コンクリートの材料構成は、マトリクス、補強用繊維、水、高性能減水剤です。最近では高性能 AE 減水剤なども使い、断面を小さくしています。

例えば曲げ荷重 150kNm (キロニュートンメートル) の場合、単位長さ当たりの質量は、通常のコンクリート PC 梁では 210 kg/m になりますが、超高強度繊維補強コンクリート梁であれば、H 鋼梁と同じ 50 kg/m でつくれます。要するにコンクリート製とスチール製がほぼ同じ重さでつくれるのです。

これより少し強度が低くてもよいのであれば、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料もあります。これは、ひび割れが多く入っても破断しないコンクリートです。さらに剥落防止を目的とした有機系の短繊維補強コンクリートが使われる場合も多いようです。

高強度化とは、強度を高めるだけでなく、耐久性を高めることも意味します。つくった当初の強さも重要ですが、長持ちもしなければいけません。これらの高強度コンクリートは、その点についても優れています。

次に、2 本目の柱が「環境・廃棄物」です。高炉スラグ^(注9)、フライアッシュ^(注10)、副産セッコウ、汚泥、非鉄鉱滓^(注11)、ボタ^(注12)、焼却灰など、セメントにはいろいろな廃棄物が原料として使われており、廃棄物の減少・削減に役立っています。

それらをさらに積極的に使ったエコセメントも登場しています。焼却灰や下水汚泥はエコセメントの主たる材料です。製造には、焼却灰中に含まれる金属くずを除去したり、塩素および重金属類をキルン(炉)内で塩化物として除去したりする必要があります。そうしないと多量の塩化物が入ってしまいます。さらに重金属類を、付設の装置で回収リサイクルします。このようにして、ごみを資源として活用できます。

また、ほとんどモルタル状の再生骨材もありますし、スラグを大量に使ったスラグ固化体が使われることもあります。これもコンクリートの延長線上にあると考えています。

最後の3本目の柱は「補修・補強」です。「造りこなす」から「使いこなす」へと、我々の要求は変わってきています。そのニーズに応えるために、例えば表面保護工を使うことがあります。これには、基

本的な性能のほか、劣化の抑制、施工のしやすさ、維持管理のしやすさ、環境的な側面など、さまざまな性能が要求されます。現在、いろいろと検討が重ねられ、随時新しい提案がなされています。

塩害への対応としては、現在は電気化学的防食工法がずいぶん採用されています。電気防食工法は、実際に腐食が生じた場合には極めて有効です。しかしこれ以外にも、塩害に対しては脱塩工法があり、中性化に対しては再アルカリ化工法があります。

あるいは、問題のあるコンクリートをはつり取るウォータージェットロボットもあります。先端がおわん型になっていて、その中からウォータージェットが吹き出て、コンクリートや鉄筋のさびをきれいに除去できます。

この方法が適用できないケースも多々ありますが、そのときには電気化学的防食工法が有効です。また、アルカリシリカ反応であれば、亜硝酸リチウムやプロピオン酸カルシウムを圧入することで、膨張をかなり抑制できます。撥水剤を用いて抑制する工法よりも効果が高いと考えています。ただしコストは少し高くなります。

このようなさまざまなテクニックを駆使し、「高強度・高耐久性・高靱性」「環境・廃棄物」「補修・補強」の三本柱を実現することで、丈夫で美しく長持ちするコンクリート構造物が得られると考えています。

(注9) 高炉スラグ

高炉で銑鉄をつくるときに、副産物として生成されたもの。

(注10) フライアッシュ

火力発電所などのボイラーから排出される塵ガス中に含有される灰の微粉粒子を集めたもの。

(注11) 非鉄鉱滓(こうさい)

金属の製錬のときに、炉中の熔融金属の上に浮かぶ。主に非金属の珪酸塩の酸化物からなる。

(注12) ボタ

石炭を掘り出し選炭した後に残る岩石や商品にならない粗悪な石炭。

本来どうあるべきかを考えたうえでのストックマネジメントを

「造りこなす」から「使いこなす」への転換について、2011年3月、内閣府の総合科学技術会議ストックマネジメント技術に関する勉強会から、提言がありました。要するに、「これからのストックマネジメントはこんな形で進めよう」との内容です。

人口減少、国際競争、環境問題、高齢化社会、生活水準の向上などの課題に対し、国家的戦略をもとに、社会資本ストックの将来像、社会資本ストックのマネジメントの方向性を考えていく。そのために「社会資本の選択と集中」が必要であり、「戦略的維持管理シナリオのデザイン」が欠かせない、としています。

ここで重要なのは「本来こうあるべきだから、こうしよう」との考え方です。「今こうだから、こうしよう」ではいけないのです。我々が住み、愛する国土はどうあるべきなのか、どうすべきなのかを、まず考えないといけません。それに基づいて、インフラの生涯をどのようにするか決めるのです。

並行して、リスク管理や、社会資本のリノベーションなども提案されています。こうした提案に基づいて、ストックマネジメント技術をかなり進化させる必要があると思います。



しかし、このようなストックマネジメント、あるいはインフラマネジメント、アセットマネジメントは、予算削減の根拠になることがあります。つまり、「予算を1～2割減らすためには、このようなマネジメントをすればいい」という、逆方向の話になることが多々あります。これはおかしいのです。

2012年1月に、「老朽化した首都高の大規模改修に1兆円が必要」と報道されました。これは首都高から出た数字ではなく、首都高側は慌てたと聞いていますが、ほかの団体は非常に喜んでいました。首都高で1兆円が必要となれば、ほかでも同様の形で改修費用が認められやすい風土ができたわけです。

2012年6月には、「EUが12兆円を超えるインフラ投資をしようとしている」とのニュースがテレビで報道されました。社会を支える社会基盤に適切なお金をかけねばならないのは当然です。

市民が国土に誇りを持って暮らしていくためにも、必要なお金はかけて、社会基盤施設、私にとってはコンクリート構造物をしっかり守っていくべきです。「今こうだからどうしようか」ではなく、「本来どうあるべきか」を考えなくてはなりません。そのためにストックマネジメントをうまく使う必要があります。「予算が減ったから、こんなマネジメントにして安く上げよう」では、やる気も失せてしまいます。

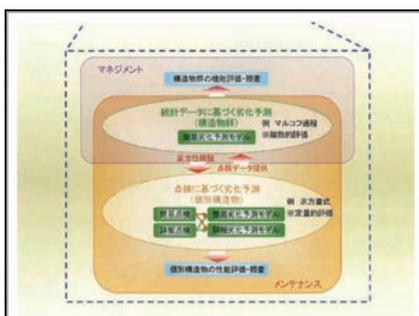
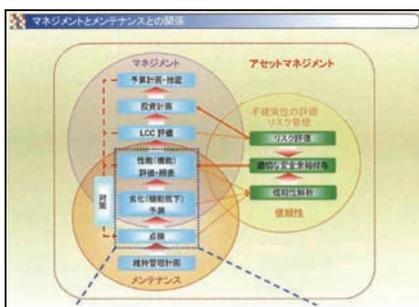
さまざまな「知識」が集まって初めて、我々が得るべき「知恵」になる

具体的なストックマネジメントとして、橋梁の例を挙げます。

各橋梁に映像センサやひずみセンサ、変位センサ、振動センサなどを設置してモニタリングし、それを高速伝送して情報センターで統合します。そこから、自動情報収集・管理や高速画像表示、計測、診断、業務情報作成などが行われます。

このときデータベースを適切に規格化しないと、厄介なことになります。細かい情報をただ集めるだけでは、データベースは「大きなごみ箱」になります。そうならないシナリオを考えなくてはなりません。

ストックマネジメントでは、確率数理モデル、投資判断の指標、劣化予測などをどうするかも考えなければなりません。そのためにはマネジメント、メンテナンス、リスク管理の関係をうまく生かし、その境界領域でそれぞれが不満足にならないようにするにはいけません（資料8参照）。



資料8 マネジメントとメンテナンスとの関係

また、統計データや点検に基づく劣化予測も駆使する必要があります。統計データに基づく劣化予測はどんびり勘定なので私はあまり好みませんが、現場では役立つかと思います。これに対し、点検による劣化予測は、しっかりした裏づけがなければいけません。そのために、劣化メカニズムをはじめいろいろな知識が必要とされます。

話は変わりますが、奈良・東大寺の大仏が座る蓮座、その花びらの裏側には、資料9のような絵が描かれています。中央の大仏の周りに、たくさんの仏がいます。その大仏が座る蓮座の裏側にもまた、大仏がいます。さらにその蓮座の裏にも。つまり、入れ子構造になっているのです。



資料9 華厳経の総合知

これは華厳経において、「総合知」をどうやって得るかを表現しています。例えば、私はもともと塩害が専門ですが、塩害だけを勉強していればよいわけではなく、構造物全体や、構造物が支える市民社会も見なければいけません。そうして得た「知識」が集まって初めて、我々が得るべき「知恵」になります。未熟ではありますがこれが私の考える華厳経の世界であり、総合知だと思っています。

なお、毎年秋、2012年は11月2日（金）、京都で「補修、補強、アップグレード シンポジウム」を開催しています。また、2013年8月19日（月）～21日（水）には「SCMT3（第3

回持続可能な社会を目指す建設材料技術に関する国際会議）」が京都リサーチパークで開催されます。どちらも私は実行委員長を務めています。是非ご参加ください。

繰り返しますが、我々は「今こうだからどうしようか」ではなく、「本来どうあるべきか」「これからどうするべきか」を考えなくてはなりません。

私としては、コンクリート構造物や土木施設の構造物がどのような生涯を送り、それに対し技術者がどうかかわるかのシナリオを明確にする。そこで初めて、「造り、使いこなす」が実現すると考えています。

講演は以上です。どうもありがとうございました。

質疑応答

質問者1 講演を非常に興味深く聞かせていただき、お話の通りこれからは、特に管理が重要と感じました。

管理の中でも、コンクリートの劣化現象が単体として起こるケースではなく、例えば塩害とアルカリシリカ反応など複合劣化が生じるケースが、現実問題としてネックかなと思います。そういった複合劣化の場合の劣化予測モデルあるいはシミュレーションが、我々管理する側としては気になります。それらは実用できるレベルになっているのでしょうか。

宮川 複合劣化は、まだまだ研究途上だと考えています。現状では、どちらの現象がメインで、どちらが付随的なのかを判断して対応しています。例えば塩害をメイン、アルカリシリカ反応をプラスαと考える……現状ではこのようなア

アプローチしかありません。

つまり標準的な方法、あるいは「これで絶対大丈夫」といったマニュアルはないのです。しかし、その両方に対して配慮することは、私は可能だと考えています。

質問者 2 現在、財政は厳しいですが、確実な品質の確保、向上および維持をしなければいけません。その上でポイントとなるのは、ライフサイクルコストの評価ではないでしょうか。ライフサイクルコストをなるべく削減しながら、効率的に維持管理していく必要があるかと思います。中でも最も重要なのは初期品質でしょう。

ご講演の通り、強度のみならず耐久性が高いものを当初から配置することが、本来一番大事だと思います。とはいえ実際にはなかなか、そういったシステムにならないのが現実かと。

ではそれを進めるに当たっては、どうすればよいとお考えでしょうか。あるいは、この件についての研究が行われているようでしたら、お教えいただければと思います。

宮川 しっかり初期コストをかければ、それに足るだけのライフサイクルの削減ができる。これをアピールしていく以外に、アプローチはないかと思っています。

ライフサイクルコストの計算は多様であり、つまりどれも絶対的、確実ではありません。しかし同じ土俵に乗せて比較すれば、少なくとも相対比較はある程度できるでしょう。

ライフサイクルコストの計算を、発注者側がどんどん活用する姿勢を示し、しっかり評価することがポイントだと思います。そうでないと受注者側は使わないでしょう。

十分な初期投資があれば、寿命が延び、ライフサイクルコストが低くなる可能性が高まります。そして私は、そうあるべきだと考えています。しかし既存の構造物についてはそうはいかず、補修補強対策が必要になります。その際さまざまなライフサイクルコストの計算ができるはずで、どんどん活用していくべきでしょう。



本内容は、2012年7月11日に開催された、第26回技術研究発表会における特別講演によるものです。