

日本技術士会 中部本部 岐阜県支部

令和3年1月講演会メモ

日時：令和3年1月9日（土） 13:00～17:00

場所：Zoom システムによるウェブ講演会

後援：岐阜大学工学部、岐阜工業高等専門学校

ウェブ参加者：講演会申込者36名、講師2名、事務局1名 計39名

司会：藤橋 健次（建設）・森川 英憲（建設・総技監）

メモ作成：田島 暎久（航空・宇宙）

会員講演

演題：「コンクリート製品の設計・施工」

講師：丸栄コンクリート工業（株） 河村 栄一 氏（建設部門）

講師紹介：1978年 岐阜県本巣郡本巣町生まれ。1997年 岐阜県立本巣高等学校卒業、2001年 岐阜大学工学部土木工学科卒業、2003年 岐阜大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程修了。2003年4月～2015年1月 若鈴コンサルタンツ（株）等、計3社の建設コンサルタント会社にて、農業用排水路の設計、施工管理及び補修設計、下水道の設計、携帯電話基地局基礎の設計などの土木設計に従事。2015年2月から丸栄コンクリート工業（株）にて、コンクリート製品の設計業務に従事。専門分野は鉄筋コンクリート構造の設計。

趣味；スノーボード、サーフィン、旅行

講演概要：建設現場の生産性向上が要求される中、コンクリート製品の需要が高まっている。その中、今まで開発されてきたコンクリート製品や施工方法の紹介を中心に述べる。

講演内容：

建設業界を取り巻く現状

- 4つの課題とその対策が次のように考えられる。①ゲリラ豪雨や巨大地震など自然災害の激甚化に対して、倒壊するまでの時間をできるだけ長くする構造 ②高度経済成長期に大量に建設された土木構造物の老朽化に対して、軽微な劣化の時に修復して長寿命化させる資産管理 ③地球温暖化や野生動植物の絶滅など環境負荷の増大に対して、野生動植物の生息環境を確保する構造 ④少子高齢化による若手技術者不足に起因する建設生産体制の在り方に対し、ICTを活用した設計・施工・維持管理。
- 現場でコンクリート工事を行う「現場打ち」が現在、主流となっており、それは「型枠を組む」→「鉄筋を組む」→「コンクリートを流し込む」→「コンクリートが固まるのを待つ」という一連の工程からなる。しかし、型枠と鉄筋の工程では少子高齢化による熟練技能者の不足が課題となり、コンクリートの流し込みと固まるまでの待ち工程は天候に影響されることと交通規制の長期化が課題になっている。
- これらの課題の解決法の一つとして、工場で製造されたコンクリート製品を活用すれば、コンクリート製品を現場に運搬し、据え付けて、継手処理をするだけの工程になる。2019年3月に改定された国土省の「土木構造物設計ガイドライン」では、設計段階でコンクリート製品の積極的活用が明記された。
- コンクリート製品を使う場合のメリットとして、①工場の品質管理による安定した品質の確保 ②工期短縮と現場作業の省力化・省人化 ③劣化部の補修・交換工事の容易化 ④残コンや型枠など産業廃棄物の削減、等がある。デメリットとしては、①15tトラックなどによる運搬経路の計画が必要 ②クレーンの配置箇所の計画が必要 ③規格外の形状には新しい型枠製造が必要のため高価で対応しづらい ④コンクリート製品間の接合（継手処理）が現場対応のため止水処理等の管理が必要、等がある。
- 世界各国のコンクリート製品の利用率（2016年）は、第1位デンマーク（49%）、第2位オランダ（48%）、第3位フィンランド（42%）など上位が北ヨーロッパで占められ、日本は13位（13%）。日本で利用率が低



い理由は建設する構造物だけの工事費で現場打ちと比較して高価と判断される場合が多いためだが、工期短縮も含めた工事費全体で比較すると必ずしも高価にはならない。

コンクリート製品の紹介

- **小型汎用製品**：歩車道境界ブロック、道路の端のU形側溝。
- **通常型製品**：道路下を横断する道路や水路に使うカルバート。カルバートには長方形断面のボックスカルバートと円弧形断面のアーチカルバートがある。
- **擁壁**：宅地、道路及び河川等で土を留める構造物で、L型擁壁や河川に使う大型ブロック積み擁壁がある。擁壁にはガードレールやフェンスも取り付け可能。
- **水路**：三面水路や可変側溝。三面水路は農地や市街地に多く設置され、道路の下に設置する場合は蓋を付ける。可変側溝は、設置する際に製品の中に入れるコンクリートの量を調整して水路敷高を自由に換えることができる。
- **雨水貯留**：ゲリラ豪雨対策の遊水池で地下埋設型もある。災害用トイレの便槽として避難場所となる防災公園等に設置できる。
- **地震対策**：耐震用ボックスカルバート、耐震用三面水路。継手に特殊ゴムを装着することによって周囲の地盤の動きに追従する「不同沈下」や「浮き上がり」を防止。
- **護岸**：笠コンクリートブロック、係船用ブロック、高潮堤防護岸。基礎部、その上の被覆部、波返し部は全てコンクリート製。

コンクリート製品の施工方法

- **新設の場合**：最も一般的な方法は工場から運搬してきた製品をクレーンで吊って設置する「トラッククレーン工法」。しかし道路の高架下など上部に障害物がある場合はクレーンを使えないため「製品搬送据付(リフトローラー)工法」になり、リフトローラーと呼ぶ特殊運搬機械を使って製品を据え付ける。軟弱地盤では「不同沈下」や「浮き上がり」を防止するために、「PC縦締め緊結工法」によってボックスカルバートの四隅に設けた貫通穴にPC鋼材を通して縦方向に緊結する。交通量の多い市街地で掘削し据付後直ちに埋戻して交通遮断を早く解放したい場合には「管渠埋設工法」を採用する。
- **補修の場合**：水、塩分、二酸化炭素など劣化因子の侵入を抑制するために、「表面被覆工法」でひび割れ箇所にもルタル等を塗ったり吹き付けたりする。

建設工事への携わり方

- **公共事業の流れ**：ボックスカルバートによる道路横断用水路の場合、次のような流れになる。①行政がボックスカルバートの水路計画を策定 ②その計画に従って建設コンサルタント会社が測量・地質調査を行って施工方法検討と設計 ③その設計図面に従って建設会社が施工 ④工事が完了し水路が使用され始めてからは行政が定期的に点検して補修補強の必要を判断 ⑤補修補強の必要が判断された場合、建設コンサルタント会社が工事の実施時期や工法、材料等を検討して補修補強設計 ⑥建設会社が補修補強設計に従って施工。以後、周期的に④～⑥の流れが繰り返される。このような公共事業の流れの中で、コンクリート製品メーカーは ②の設計段階、③の施工段階、⑤の補修段階に各々携わって貢献する。
- **設計段階からの携わり方**：建設コンサルタント会社からの様々な相談に応じることによって設計段階の初期から携わる。例えばボックスカルバートを使う場合、埋設深度に合った強度のボックスカルバート断面寸法、「現場打ち」と比較した場合の施工単価、住宅密集地など施行スペースに制限がある場合の施工方法などについて相談に応じる。
- **施行段階からの携わり方**：建設会社から「現場打ち」をコンクリート製品へ変更する相談に応じる。先ず、建設コンサルタント会社が作成した地質調査報告書、設計図面、構造計算書等により現場の設計条件を確認して設計条件の変更箇所を把握する、例えばボックスカルバートに変更する場合、通常ボックスカルバートの部材厚が「現場打ち」よりも薄くなって上部の「土かぶり」が増すため、設計条件の変更箇所をよく把握してボックスカルバートの構造計算書を作成する。このようにしてボックスカルバートの断面寸法、使用する鉄筋の直径、配置間隔、継手の仕様を定める。更に、現場で安全に施工するためにクレーンの配置や交通規制の有無、製品の運搬経路を決めるための施工計画・検討も行う。ボックスカルバートの重量でクレーン脚部の張出長と作業半径が決まり、交通規制の範囲も定まる。

割付図・詳細図を作成して、ボックスカルバートの延長を製品長(2m)で割付け、必要に応じて既設水路との接続部の詳細を規定する。同時に製品の全体数量、斜め切断や開口部などの特殊加工が必要な製品の位置・寸法・数量も定める。

それらの割付図・詳細図が建設コンサルタントと行政の点検・修正・承認を得た後に、行政から工事が発注される。発注後に特殊加工製品図を作成して補強鉄筋の本数・形状・寸法を規定する。

割付図・詳細図および特殊加工製品図に従って、工場で製品を製造し、出荷前検査を行って、運搬し、所定の位置に製品を据え付ける。

- **補修設計段階からの携わり方**：まず、建設コンサルタント会社から、既存水路等の健全度の調査・診断及び補修工法の相談を受け、工法の提案や予算を検討する。健全度調査によって鉄筋やコンクリートが劣化している箇所・程度・範囲・原因を調査する。劣化の原因には凍結防止剤による塩分、二酸化炭素、水、などがある。また、壁面のひび割れ長さ・深さの測定、壁面をハンマーでたたいて反響音で空洞の有無を調査する。これらの調査結果を整理して構造物の健全度診断を行う。

行政が要求する補修周期に基づいて補修材料を決める。例えば農業用水路で二酸化炭素などの劣化因子がコンクリート表面から侵入している場合には、韌性モルタル材料による表面被覆工法が採用され、コテで塗る左官タイプか吹付タイプを使う。農業水路を管理する農水省は補修周期を 20 年にしている場合が多い。

今まで開発してきた商品

- **残存型枠ブロック**：東日本大震災の復旧工事として宮城県の港湾岸壁復旧に使用。2011 年 3 月 11 日の東日本大震災によって漁港荷揚場が沈下して方塊ブロックケーソン式壁が傾いたため早期の復旧が望まれたが、東北・関東地方は広範囲な復旧工事で資材や技能労働者が不足して、「現場打ち」の従来工法では工事期間の遅延が懸念された。従来工法は、大型鋼製型枠の設置→コンクリートの打設→型枠の撤去、という工程になって、多くの資材や潜水夫等の技能労働者が必要になり間に合わなかった。困った施工会社から省人化・工期短縮を図る新コンクリート製品が要求されて、施工会社と共同開発した残存型枠ブロックを宮城県へ提案して採用された。

開発コンセプトは、①生コン量の低減と使用重機の小型化による現場資材の低減 ②水中で型枠を組む技能労働者などが不要になる省人化 ③傾いて倒壊しやすい岸壁に対する閉塞環境下での水中作業時の安全性向上 ④新規に型枠を作るとコストがかかるため型枠費用等を抑えるため現存する型枠を使用するなどの生産性向上・納期短縮・原価低減、の 4 項目とした。この開発コンセプトに基づいて水中で型枠を残置する新工法を確立した。

施工順序は、①傾いた既設岸壁の前の海底に敷きパネル(土台)を設置 ②残存型枠ブロックを吊上げて敷きパネルの上に積み重ねて据え付ける ③残存型枠ブロックと既設岸壁の間に水中コンクリートを打設して完成。

この新工法では次のような効果があった。既設岸壁とブロックの間の閉塞環境での潜水作業がブロックを据え付ける時だけの必要最低限となって水中作業時の安全性が確保され、腹付け幅の縮小によってコンクリート量が削減された。また、型枠の残置によって型枠を外して転用することが不要になって技能労働者の削減と工期短縮が成された。例えば、ある現場では従来工法で 175 日の工期が残存型枠ブロックによって 125 日に約 30%短縮された。この実績が宮城県から高評価を得て 2015 年度から宮城県の標準仕様(製品発注)に採用された。

- **オーバーラップ式ベースブロック**：東日本大震災の復旧工事として福島県の海岸堤防復旧に使用。東日本大震災の巨大津波によって海岸堤防が崩壊し、避難し遅れた多数の人々が犠牲になった。設計条件を超えた津波(想定外外力)によって海岸堤防が陸部から持ち上げられて盛土が洗掘され短時間で倒壊したため住民の避難が間に合わなかった。

復旧工事に当たって国交省は防災・減災対策を検討して次のような方針を打ち出した。即ち、避難時間を少しでも多く確保できれば多数の人々が助かるため、設計条件を超えた想定外外力が発生しても崩壊するまでの時間を延ばす構造(=粘り強い構造)が要求された。

その要求を満たすために弊社を含むコンクリート製品メーカー 3 社で次のような新しい海岸堤防構造を共同開発した。転倒(洗掘)しないように法尻部が強化され、津波が浸入しないように「かみ合わせ構

造」で連結され、浮かないように堤防内の空気抜き孔が設けられた。施工は、弊社が基礎部を、他の2社が法面被覆部と天端部を分担した。

基礎部には弊社が開発した「オーバーラップ式ベースブロック」を用いて、基礎と法面被覆との間に可動領域が設置された。この可動領域によって法面被覆が盛土の変位に追従して崩壊することが妨げられて崩壊しにくい構造になった。可動領域は100~1300 mm程度。

施工順序は、①基礎ブロックを据付後に可動領域を設置 ②基礎ブロックにコンクリートを投入 ③基礎天端面の均し ④法面被覆工の設置。

- **2連開水路**：愛知県における用排水分離型水路への改修で使用した大型構造物。都市化に伴う流出量の増大による湛水被害を防ぐ目的で水路を改修することになり、用排水分離型水路(2連開水路)の構造を設計した。断面寸法が大き過ぎて1塊で製造できないため3分割して製造し現場で接合する構造にした。右L型ブロック、逆T型ブロック、左L型ブロックに3分割された製品は現場において鉄筋の機械式継手で接合され、更に「現場打ち」の底板が接合された。現場ではクレーン使用に十分なスペースがなかったため、各ブロックの据え付けにはリフトローラーが活躍した。
- **生態系保全型排水路**：岐阜県で二枚貝の生息・生育環境に配慮した排水路の改修工事に使用。絶滅危惧種・準絶滅危惧種に指定されているオバエボシガイ、カタハガイ、マツカサガイ、トンガリササノハガイなどの淡水二枚貝の生息・生育環境保護地において排水路を改修することになり、これら二枚貝の生息・生育環境に適した流れが緩やかで水量が多い砂泥底にする必要があった。三面水路ではコンクリートの水路底が閉鎖空間を形成して水質が悪化して適さない。そこで、左右のL形擁壁で挟む込む構造にして改修前のような砂泥の水路底にした。水路底には粘性土の上に二枚貝の生育に適した砂礫土を敷いた。また、水路壁面には水路に出入りする昆虫などが上り下りし易いように凹凸のある表面加工を施した。大きな管路から流入する大量の水が排水路の緩やかな流れを乱さないように調整池も設置するとともに、地下水位の上昇・下降によって水質を維持するために調整池の底に直径50mmの穴を16カ所に設けた。調整池と排水路の合流部には玉石を配置して魚類などの生息・生育に適した環境も確保した。水路を横断する農道横断橋にはボックスカルバートを使い、他にスラブ掛け簡易橋、水路に降りる階段なども必要箇所に設置した。

Q&A

Q：オーバーラップ式ベースブロックの海岸堤防では設計時に崩壊するまでの時間を数値解析したり、縮尺模型などの実験で確認したりするのですか？

A：全てではないが解析して実験で確認する場合もある。

Q：このような海岸堤防の特性と安全性について根拠を示して住民に説明し納得してもらいましたか？

A：住民に説明して納得していただきました。

Q：リフトローラーの改良型とも言えるアームローラーは移動式クレーンの登録部類に入りますか？

A：移動式クレーンの部類に入ります。社外秘のため詳しい説明はできませんが、左右両側に障害物がある現場で製品を吊り上げたまま搬送するために開発されました。(後からメールでの回答)

Q：PC縦締め緊張工法における緊張力は、橋げたようなフルプレストレスではないため、ボックスカルバートの沈下に対して重量を支えることはできないと思います。沈下の恐れがある箇所に縦締め緊張工法は不適ではないでしょうか？緊張しないでジョイント結合とし、自由に沈下できるようにした方が、ボックス単体ではなく、構造物としては安定するのではないのでしょうか？

A：そのような方法もあると思いますので、参考にさせていただきます。

Q：2連水路では設置するブロックと基礎(現場打ち)の接続は特に無く、基礎に乗せているだけでしょうか？耐震は大丈夫でしょうか？

A：基礎コンクリートの上に厚さ20mm程度のモルタルを敷いて高さ調整を行い、その上に製品を据え付けていますが、特に接着剤は使っていません。耐震については製品間の継手に特殊ゴムを入れて柔軟性を持たせ、不同沈下や浮き上がりに対処しています。また、ボックスカルバートや擁壁は基本的に固い地盤に据え付けていますが、地震に弱い軟弱地盤の場合は杭を打つことがあります

Q：生態系保全型排水路では、生物学、生態学の専門家も入って連携しますか？その場合、立場の違う方々の意見をまとめるのは大変ですか？

A : 大学の先生など専門家に入っていました。この案件は円滑にまとまりましたが、愛知県の案件では行ったり来たりと、まとまるまでに随分時間がかかったことを経験いたしました。

来賓講演

演題 : 「寛解技術を用いた維持管理を目指してー考え方と試験施工・研究事例紹介ー、アフリカに思いを馳せてーはるか遠い国ではないザンビアでのプロジェクト紹介ー」

講師 : 岐阜大学工学部 社会基盤学科 准教授 木下 幸治 氏

講師紹介 : 1979 年生まれ。2000 年 木更津工業高等専門学校卒業、2002 年宇都宮大学工学部建設学科卒業、2004 年東京工業大学大学院土木工学専攻修士課程修了、2007 年東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻博士課程 単位修得満了。2007 年岐阜大学工学部社会基盤工学科助教。2009 年博士学位取得。2015 年岐阜大学工学部社会基盤工学科准教授。



2012 年 4 月～2013 年 3 月 ネバタ大学・リノ校客員研究員

2017 年 10 月 グリフィス大学ゴールドコーストキャンパス客員准教授

平成 22 年 5 月土木学会論文奨励賞、平成 25 年 6 月土木学会吉田研究奨励賞、平成 30 年 6 月環境賞「環境大臣賞」、平成 31 年 9 月第 23 回工学教育賞「業績部門」、令和 2 年 5 月土木学会中部支部技術賞、令和 2 年 6 月土木学会環境賞など。

専門分野は、橋梁構造物の疲労と耐震、先進インフラ維持管理、工学教育、本邦技術の国際展開など。

講演概要 : 完全な治癒ではないが、橋梁の残存寿命を考えた場合に、補修後に有害とはならない状態（寛解の状態として定義）を保つことができる「寛解技術」を加味した新しい維持管理の考え方について紹介するとともに、岐阜大学における JICA 技術プロジェクトとの取り組みであるザンビアでのプロジェクト等について紹介する。

講演内容 :

寛解技術を用いた維持管理の考え方

- **寛解とは** : 医療用語の寛解とは、例えば癌治療の場合、一時的あるいは永続的に、癌（腫瘍）が縮小または消失している状態のこと。寛解に至っても癌細胞が再び増殖したり残っていた癌細胞が別の部位に転移したりする可能性があるため寛解の状態が続くように更に治療を継続することもある。同様に構造物についても損傷を許容しながら寿命まで維持管理するという考え方ができる。鋼構造物の 2 大損傷である疲労と腐食に対して寛解の考え方を当てはめると次のようになる。疲労に対しては、完全な治癒ではないが残存寿命を考慮して補修後に有害とならない状態（寛解の状態）を保って維持管理していくという考え方。即ち「疲労亀裂の存在を許しながら」維持管理を進めていく。腐食に対しては、腐食の発生自体が許容されているため耐候性鋼のように使用期間中に問題とならないような進展の遅い腐食は許容できる。腐食の進展を抑制しながら維持管理を進めていく。疲労亀裂と腐食の発生・進展メカニズムを把握した上で、それらの発生を許容しながら維持管理していく方法が今後必要になる。
- **アイアンブリッジを例にした寛解の考え方** : 世界最初の鉄の橋はイギリスの「アイアンブリッジ」で、241 年前の 1779 年に完成した長さ 30.5m、高さ 12m の鑄鉄製アーチ橋。世界遺産に登録された現在も人道橋として使用されている。昨年 2 月に現地を訪問して損傷・補修状況の詳細を視察（部材の破断や補修の詳細写真を紹介）。部材が破断した原因はアーチ形状が不揃いであることから腐食と不同沈下が推察される。結果として、破断・腐食などの発生・進展を把握して、それらを許容しながら 240 年以上も維持管理されている。240 年以上も経つと技術者達の色々な思いもあって場合によっては原点回帰もあるのではないかと。

鋼橋の損傷について

- **鋼橋の損傷** : 国交省の資料によれば鋼橋の損傷事例には、腐食、亀裂、ボルトの緩み・脱落、部材破断、などがあるが、中でも「腐食」と「疲労亀裂」が 2 大損傷になっている。この地域を含む中部地方整備局管内には、2013 年時点で 3982 箇所橋梁があり、その 42% を占める 1695 箇所が鋼橋。岐阜県においては、2001 年～2006 年に実施された橋梁点検データによれば、河川が

多いために 51%が鋼橋で、しかも多くが橋長 100m以上の橋梁で全体的に大規模。また建設から 30 年以上経過したものが多い。

- **鋼橋の金属疲労の概要**：疲労とは鋼部材が繰り返し荷重を受けて亀裂が発生、進展する現象。縦軸を応力範囲、横軸を疲労寿命（対数）にして表す。機械系では 10 億回程度の寿命を議論することが多いが、土木では 1000 万回程度の寿命が対象。10 万回以上の疲労現象を高サイクル疲労、1 万回以下の疲労現象を低サイクル疲労と呼ぶ。特に大地震などによる 10 サイクル以下のものは極低サイクル疲労と言われ、大きな塑性変形を伴って破壊する。

疲労損傷の要因は、①通行する車両の活荷重や風による部材の振動荷重などの作用外力 ②応力集中や二次応力が発生する不適切な設計 ③製作不良や製造誤差。

疲労損傷は初期段階の微小な亀裂がある程度大きくなると加速度的に進展して、突然ガラスのように割れる脆性破壊を引き起こす。このため早期発見が重要だが、目視による発見は非常に困難。

道路の橋梁は 2002 年に道路橋示方書が改定されるまで設計で疲労が考慮されていなかった。鋼床版は疲労設計されていたが、阪神大震災の後、阪神高速で橋梁を軽くするために使った鋼床版が数十年間でぼろぼろに破損して大改修が行われている。新幹線などの鉄道橋梁は以前から疲労設計されていたので維持管理に効果を上げている。

1993 年に日本鋼構造協会から刊行された「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」が現在の疲労設計法の基になった。

岐阜県では交通量が少なく疲労損傷がようやく出始めたレベルで、想定寿命の 100 年は耐え得るだろう。2013 年に発表された資料によると橋梁の疲労損傷の 94%が主桁と横桁・対傾接合部で発生した。このような箇所は通常の構造力学による応力計算では分からない応力集中が非常に高い箇所である。例えば、典型的な「面外ガセット溶接継手」に相当する鋼床版デッキプレートと垂直補鋼材の溶接部は、溶接中央部から発生した亀裂が溶接に沿って両側へ進展する。亀裂は表面だけではなく板厚方向にも進展して板の破断に至るため疲労亀裂の挙動を把握することが非常に重要になる。

当研究室では偏心モーターを使った疲労試験機によって「面外ガセット溶接継手」の亀裂発生から進展を再現して研究している。有限要素法で応力集中解析を行うと溶接部分の舌状部で公称応力の 5～7 倍の応力、即ち応力集中係数 5～7 の箇所が見つかる。亀裂はこのような応力集中の箇所から発生する。疲労亀裂は 1 回の応力範囲の繰り返しによって少しずつ進展する。疲労破壊した破面を走査型光学顕微鏡で 5000 倍程度に拡大して観察すると、繰り返し応力 1 回毎に波状文様となって亀裂が進展した跡（ビーチマーク）が見られ、破断までの繰り返し回数が分る。このような方法をフラクトグラフィ解析（破面解析 Fractography）という。

例えば、遊園地でジェットコースターのボルトが破断して死亡事故になった時、ボルトの破断の原因を究明するためにフラクトグラフィ解析が行われた。フラクトグラフィ解析によって亀裂の進展方向が分り、進展方向から亀裂発生源が分り、亀裂発生源の応力集中が分れば、その応力集中の原因が分り、その原因が施工不良や欠陥に起因することまで究明できる。

亀裂進展の理論は破壊力学のパリス則に従う。横軸を応力拡大係数、縦軸を亀裂進展速度で表すと、ある所までは亀裂が安定的に進展して線形破壊力学の理論に合致するが、そこを過ぎると不安定になって突然破壊する。従って、学問的観点から、維持管理は亀裂が安定的に進展している時を対象にしなければならない。

実際の点検では表面の亀裂長さは何mmまで許容されるのか。溶接学会誌によれば、最初は長さ 1 mm程度までの亀裂が潜伏している「潜伏期」、そこから 10 mmまでが安定的に進展する「進展期」、その後加速度的に 30 mm程度まで進展する「加速期」になり、ここを超えると構造物は一気に破断する。この時の亀裂長さを限界亀裂長さという。実際には部材の特性にもよるが亀裂が 30 mm以上になるとほとんどが破断する。しかし、寛解技術の観点からは、30 mmになったら絶対に駄目ということではなく部材毎の特性によって限界亀裂長さ設定する必要がある。。

実際の橋梁では、塗膜の上から亀裂を見つけねばならない難しさがある。塗膜割れがあっても亀裂が発生していない場合が多く、塗膜割れ箇所で亀裂があるのは 1 割弱というデータもある。塗膜割れが見つかって磁気探傷試験や浸透探傷試験などで亀裂の有無を詳細調査する場合には多くの費用がかかり、今、問題になっている。亀裂のある「1 割」をいかに精度よく求めることが研究者に求められている。

試験施行・研究事例の紹介（予防保全を踏まえて）

- **寛解技術としての亀裂閉口処理手法**：亀裂の補修法には大規模に補強材を当てる方法もあるが、多くの箇所を効率的に処理する手法として寛解技術が生まれた。ピーニング装置、つまりエア工具に着けたタガネで亀裂と周囲の表面をたたいて変形させることによって亀裂を閉じる、という亀裂閉口処理技術が開発された。この手法はICR処理（Impack Crack Closure Retrofit Treatment）と名付けられた。ただし、この手法は亀裂が深いと内部に開口したままの亀裂が残り、この残存亀裂が再進展して閉じた箇所を再開口する可能性がある。

破壊力学的には表面を閉口することで応力拡大係数が非常に小さくなる。また閉口することによる塑性変形で周囲に圧縮残留応力を導入できる。この圧縮残留応力によって荷重の応力が相殺され、亀裂が残っていても寿命が延びることが疲労試験で検証されている。

例えば50年使って亀裂が発生した橋梁でも閉口処理してあと50年使うことができれば100年の寿命を全うできる。これが寛解技術の考え方である。

ICR処理は日本発の技術で、単純に亀裂をつぶす方法は今までにもあったが、このように内部亀裂を残留させつつ表面を潰す手法はなかった。しかし、溶接の上のように曲面の表面をたたこうとするとICR処理では難しいため、それに適した先端形状のツールに変えたものがPPP処理（Portable Pneumatic needle-Peening Treatment 可搬形エア式ニードルピーニング処理）になる。どちらも亀裂上またはその近傍を打撃することによって局部的に圧縮残留応力を発生させ、負荷応力範囲の引っ張り領域を相殺して低下させることで疲労寿命が延びる。

我が国との共同研究を通じて中国でも亀裂閉口処理技術に基づく寛解技術に関心を示している。欧米では残留亀裂の再進展への懸念が根強くあるため、このような寛解技術はほとんど認められていない。

今後は、残留亀裂の進展に関する「品質管理」と再開口した場合の「再閉口処理技術」の確立が必要。

- **開口した亀裂の再閉口技術の研究例**：橋梁の溶接部を模した供試体に偏心モーターで繰り返し荷重を負荷して次のように疲労試験を実施した。亀裂が発生して、それがある程度の長さになったところで、PPP処理を施して亀裂を閉口した後、また繰り返し荷重を負荷する。これを10回繰り返し行ってPPP処理の効果を検証した結果、1回のPPP処理によって元の寿命以上になることが確認された。尚、PPP処理した箇所の亀裂閉口は浸透探傷試験で確認した。磁粉探傷試験は、PPP処理で閉口できない深部の残存亀裂にも反応するため使えない。再度、しっかりした手順と施工方法で同じ疲労試験を行った結果、元の疲労強度と同等以上の疲労強度を得られることが改めて確認された。

橋の寿命は60年以上と言われているが、60年以上経っても亀裂のない溶接部を元の強度に戻すことができれば、プラス60年で120年の寿命になる。これを2回やればプラス120年となり、このような寛解技術で寿命を100年以上も伸ばすことができる。現在、5年毎に法定点検されるが、再開口した場合に閉口処理を繰り返せば10回で50年維持できる。これは大した作業量ではないので現実的な解になる。

- **閉口した亀裂の品質管理手法の研究例**：もし施行不良があったとしても、しっかりと品質管理の下で補修すれば、確実に強度が保証できる。しかし内部に残った残留亀裂の品質管理についてはどうか。残留亀裂が進展しているか否かを何らかの方法で判断せねばならない。

2002年頃から使われ始めた超音波探傷は、亀裂先端に投射した超音波の反射波を受信することで亀裂の進展を判断できる。超音波探傷によって残存亀裂が進展していないことを確認できれば、そのまま問題ないことが判る。

先ほど説明した試験と同じ方法で、超音波探傷を使って残存亀裂先端部の挙動を研究した。ここで使ったフェイズドアレイ超音波探傷は産婦人科医が胎児の様子を検診する時に使うエコー検査と同じもので自動的に様々な角度で超音波を送ってスキャンニングできる。その結果、残存亀裂先端部は公称応力が10MPa程度の小さな荷重に対しても微妙に動いていることが判った。荷重の増大に伴って亀裂の下側先端の動きが上側に拡大していき、最後に表面に達して開口する。このことから残存亀裂があっても微小な応力レベルで進展がなければ問題にならない。

超音波探傷は現場でも可能だが、もっと簡易的な方法として亀裂近傍の応力を歪ゲージで計測する方法を試行してみた。その結果、超音波探傷の精度には及ばないが、再開口してくる場所の応力変化が歪の履歴から検知できることが判った。このような技術を使って、再開口しても再閉口するという維持管理方法を検討している。

- **疲労亀裂閉口技術の試験施行例**：以上のような研究成果を実際に現場で試行してみた。大阪にある京阪電鉄の寝屋川橋梁は昭和 45 年に建設された経年 47 年の橋梁で、ゲルバー支点上の桁端切り欠き部に亀裂が発生していた。この型式の橋梁は構造的に良くなく、この箇所からの亀裂発生が従来から報告されている。亀裂は溶接部の応力集中箇所が発生した疲労亀裂で、溶接の根底部から発生して表面まで進展しており、表面で限界亀裂 30 mm を超えて 70~80 mm にも達していたが未だ破断には至っていなかった。結局、亀裂箇所に ICR・PPP 処理を施し、その効果を歪ゲージによる応力測定で確認して品質管理を行った。

鉄道総研が発刊した鋼構造物の補修・補強・改造の手引きでは、亀裂をガウジング処理で削り取り、溶け込み溶接や板で補強したりすることになっているが、板で補強し、かつ亀裂の存在を許容しながら使っていくと言う新しい考え方に基づいて閉口技術を使った。

電車の走行に合わせて応力測定を行い、ICR・PPP 処理前の開口した状態と処理後の閉口した後の応力状態の変化を見た。その結果、ICR/PPP 処理によって応力が 30MPa ほど低下していることが確認された。当て板で補強した後は、更に応力が低下して最終的に補修前の半分以下になった。また、破壊力学の理論を使って計算した予想亀裂進展量 (mm/年) も約 70% 以上も低下した。

- **予防保全的な亀裂閉口処理の試験施行例**：腐食を防ぐ塗装の維持管理も重要だと認識で塗装の塗り替えが必要が多くなり、塗装を効率的に剥がすブラスト技術の改良も進んだ。このブラスト技術にスティールショット (鋼球) を用いたショットピーニング機能を加えて、塗装を剥ぎながら疲労強度も向上させる「エコグリーンハイブリッド工法」が開発されて、国交省の NETIS に登録された。ショットピーニングによって目には見えない微小な亀裂も全てつぶされて予防的な亀裂閉口処理が施される。

アメリカでは 1990 年代に橋梁の一部にスティールショットを用いたピーニングが行われたが大々的に施行されたことはなかった。従ってこれも日本発の技術として世界に売り出せる。ショットピーニングはスティールショットを高圧空気でぶつけるため、タガネでたたくピーニングに比べて衝撃力は小さい。40 年経って亀裂がほとんど発生していない橋梁に、この処理をすれば更に 40 年加算されて寿命が 80 年、或いは 50 年加算されて 100 年近くにもなる。亀裂が完全に閉じてしまって疲労フリーのような状態にできれば点検がより効率的にできる。

実際に名古屋の高架道路橋梁で溶接部にこのショットピーニング工法を試行した結果、鋼の降伏点近い圧縮残留応力が計測された。圧縮の降伏強度近くまで残留応力があって大丈夫かという疑問が出るが、疲労が問題になるのは引っ張り応力であり、圧縮で座屈する部材とは異なり非常に局部的な圧縮応力なので全く問題にならない。そもそも溶接によって生成した引っ張り残留応力を圧縮に変えるだけでも疲労強度に有利になる。

残留応力の計測はポータブルの X 線装置を現場に持ち込んで行った。非破壊検査ではなく、板の表面を 0.1~0.2mm ほど削って計測するため微破壊検査になる。この方法によって現場で残留応力を正確に計測できるようになり、この技術を用いて微破壊的に品質管理を行うことを提案している。

このショットピーニング処理の効果を試験で確認するために、先ず、現場と同じ継手形状の供試体を製作してショットピーニング処理して残留応力を計測した結果、現場と同様の残留圧縮応力の分布が認められた。従って、この供試体の疲労試験によって補修した橋の疲労寿命も保証できることになる。疲労試験の結果、大幅な疲労強度の向上が確認された。車の走行によって問題の継手付近では 80MPa 程度の応力が想定され、この応力に対しては 200 万回以下で疲労破壊したが、ショットピーニング処理した供試体は 1000 万回でも破壊しなかった。

基本的にこのような処理によって寿命 100 年まで亀裂がほとんど発生しないことが実現可能になる。

- **凍結防止剤への非塩化物・防錆剤活用と評価**：冬季に散布される凍結防止剤が腐食の大きな要因になっている。腐食に対する寛解技術として、塩化物系や非塩化物系の凍結防止剤に防錆剤を添加してさびの進行を抑制する技術開発が推し進められている。

最近、中日本高速道路で散布する凍結防止剤を塩化物系から非塩化物系に変えることによって鋼材がさびにくくなることが判ってきた。しかし、実際にさびている橋梁などで腐食の進行が遅くなるのか、それをどのようにして検証するのか、が課題になった。そこで、さびの組成を詳しく調べて、活性化しているのか、不活性になっているのか、を分析した。

さびの生成サイクルにおいて活性化しているさびと熟成して全く進行しない不活性のさびがある。塩化物系凍結防止剤を散布している間は活性化され、非塩化物系凍結防止剤に変えたことで徐々に不活性化されれば一つの解決法になるのではないかと考えた。

現場で採取したさびの組成をフーリエ赤外分光法 (FT-IR) で観察したり腐食実験をした。塩化物系凍結防止剤で生成した錆びを、塩化物系凍結防止剤と非塩化物系凍結防止剤に浸漬して比較した結果、非塩化物系凍結防止剤に浸漬したさびが不活性になっていくことが実証できた。

さびの断面を観察すると、不活性なさびが層状に生成している。層状になったさびの亀裂から侵入した水が地鉄に到達して地鉄がさびていく。凍結防止剤を塩化物系から非塩化物系に変えることで、非塩化物系凍結防止剤が亀裂を通して地鉄付近まで到達し、地鉄付近のさびが不活性な組成に変化する。この時、塩素の分布状態を見ると、地鉄付近で塩素が消滅している。

名古屋高速道路では数年に渡って塩化物系凍結防止剤に防錆剤を添加して散布していたが、その効果は不明であった。そこで、現場のさびを地鉄付近まで採取して分析した結果、さびの組成が不活性化していることが明らかになり、凍結防止剤への防錆剤添加の効果が確認された。

アフリカに思いを馳せて — はるか遠い国ではないザンビア —

- 岐阜からザンビアまで、北回りでは羽田か関空からエミレット航空に乗って中東ドバイ経由でザンビアの首都トサカまで 24 時間。南周りだとキャセイパシフィック航空に乗って香港・南アフリカ経由で 32 時間の長旅になる。
- 岐阜大学のインフラマネジメント技術研究センターで運営されているメンテナンス・エキスパート制度をジャイカ (JICA) のザンビア・プロジェクトとして国際展開している。ザンビア大学 (University of Zambia) に岐阜大学と同様な技術センターを設置してメンテナンス・エキスパート育成講座を元にした橋梁維持管理技術者育成講座を創設することを目的に 2019 年 1 月に岐阜大学とザンビア大学が協定に調印した。

在日ザンビア大使館に挨拶に伺って、岐阜特産品のお土産を渡して岐阜をアピール。大使は在ザンビア日本大使から、「このプロジェクトの推進支援をよろしく」と聞いているとのことだった。

これまでに様々な技術研修を進めてきたが、コロナ禍で現在は中断。3 月にコロナが収まりそうでジャイカからゴーサインが出そうになったが、緊急事態宣言が発布されて、いつ戻れるのか分からない状況になっている。

新たに岡本客員教授と蓮池特任助教を岐阜大学のメンバーに迎えて一緒にこのプロジェクトを推進している。

- ザンビア大学の先生方と若手の学生を岐阜大学博士課程の学生として受け入れる計画だ。彼等が 3 年後に博士号を取得して帰国し、ザンビア大学の先生になれば、その後 20 年以上に亘って持続的に運営できる。ザンビア大学に実験室も設けて試験機などをこれから導入する。

岐阜大学インフラミュージアムの第 2 号をザンビア大学に作る計画も検討している。また最先端のドローン点検技術をザンビア大学と共同研究する案もある。ザンビアではドローンなどを頻繁に使うことができるので、成功すれば日本に逆移入することも考えられる。

- ザンビアには日本の ODA で建設した耐候性鋼橋がある。そこに使われた新日鉄の耐候性鋼材は、もっとさびが出ているはずなのだが、良好な環境のせいなのか、25 年以上経っているにもかかわらず、さびが全く発生していない。岐阜県をはじめ日本では耐候性鋼材でも端部が腐食してしまう。ザンビアの鋼橋では端部でもさびがあるレベルまでコントロールできていることが判ったので、耐候性鋼橋の需要ニーズ拡大のためにザンビア大学と共同研究を進めている。

この橋は交通量が多く、銅を運搬する大重量の大型トラックが頻繁に通る。非常に大きな交通荷重のために、遅かれ早かれ疲労が問題になると思って、ザンビアの技術者に鋼橋の疲労を教えている。

ちなみに、この耐候性橋梁にはガードレールや照明灯があるが、ここ以外は暗闇。下の川にはワニや蛇が多くいて危険なので、下へは行かないようにと現地の人から忠告された。

その他

- **耐候性鋼溶接継手試験体 100 年暴露試験** : 名古屋大学の山田先生が 1977 年から 40 年に亘って続けてきた暴露試験を 2018 年に引き継いだ。100 年まではあと 60 年続けねばならず、私が 99 歳になる 2077 年

に終わる。試験は施工技術総合研究所の瀧上工業で実施している。長生きして試験結果を一緒にみましよう。

- **インフラ・マネジメント技術研究センター**：ジャイカのプロジェクトを基に2020年11月1日付で組織改編が行われ、新たに国際展開領域が設けられた。この国際展開領域長を拝命して、ME（メンテナンス・エキスパート）などインフラ管理に関する国際展開を行っていくことになった。先ずザンビアを足掛かりに、隣国のモザンビークにも展開できないか、と考えている。

Q&A

Q：鋼橋の主要部材の何%が破断すれば、寛解を無視できない維持管理限界を迎えるといった指標がありますか？

A：鋼桁だと高さが2mあって限界亀裂長を30mmとすれば、1%です。ただし、それがクリチカルな部材なのか、否かが重要です。例えば、アメリカのホーン橋はクリチカルな部材が一気に破断して崩落したが、やはり1%以下です。このように金属疲労は脆性破壊に直結する恐ろしい破壊だが、部材によっては、ほっておいても壊れない。従って明確に答えることができません。

Q：1%以下で脆性破壊することですが、粘り強く壊れないようにする技術は研究されていますか？

A：ショットピーニングは正に亀裂を発生させないようにする技術です。そもそも1%以下で壊れてしまう危険な箇所は、ショットピーニングによって予め疲労強度を上げています。寛解技術は、ほっておいてもいいような箇所や、ある程度冗長性のある個所を巧みに使って維持管理コストを下げる手法です。

Q：もしある部材が破断しても残りの部材でもたせる、というフェールセーフ設計とか、部材毎に重要度をランク付けして重要部材を特に多頻度で点検する、などの手法は取り入れていますか？

A：実は今日のような話を機械系の方にするのは、おはずかしい限りです。まさに土木は、破壊力学自体も機械系からかなり遅れて導入した経緯があり、フールセーフ性の検討で、どこがクリチカル部材になって、どこがほっておいてよいのかという議論がようやく始まったばかりの感じです。例えば、トラス橋の木曾川大橋はトラス部材が破断したら構造力学的に落橋することになるが、実際には周辺の部材が荷重を再分担して冗長性があるということが判ってきたところです。

岐阜県支部例会 連絡事項など 安田支部長

- ・前回11月講演会のアンケート結果：会員講演は「良かった」72%、「まあ良かった」28%。来賓講演は「良かった」82%、「まあ良かった」18%、「聴講者参加で柔軟な発想方法が大変参考になった」等の感想。
- ・今後の講演会テーマ：今までのアンケートから、「技術者と縁遠い分野」「新型コロナの正しい恐れ方、ワクチン」「SDGs 関連」「発達障害等人事関係」「インフラ関連」「建設・地震・災害」などの要望があるので、その方向で企画していく。
- ・今後の講演会予定：3月は三菱電機の熊澤氏と名古屋工業大学の伊藤教授、5月は愛知淑徳学園長の小林氏、7月は岐阜大学の神谷教授に決定。5月と7月の会員講演者が未定で探しており、応募を歓迎。
- ・会報について（高木幹事）：第4ステージは11月に終了、21名が参加。2004年に始まったステージ1から回ごとに参加者が減少。来年も継続するか、参加者をどう増やすか、について幹事会で検討する。

ウェブ懇親会（今回は中止）

次回の講演会

3月13日（土） 場所 ウェブ講演会（Zoom）

会員講演：三菱電機（株）名古屋製作所 熊澤 貴弘 氏（経営工学部門）

「インド文化を踏まえたインド製造業の状況考察について」

来賓講演：京都大学 大学院 情報学研究科 教授 伊藤 孝行 氏

「AI で創造する未来社会」

以上