

重要文化財(永代橋と清洲橋)の耐震補強に携わって

Seismic Strengthening for Important Cultural Properties (Eitai Bridge and Kiyosu Bridge)

Kimura 木村 Makoto 亮*

東京都が管理する永代橋・清洲橋は平成19年6月に重要文化財に指定され、国民の貴重な財産となった。両橋とも架橋後80年以上が経過しており、これまでは部分的な補修・補強を行い維持管理されてきた。これらの橋梁を健全な形で次世代に継承すべく長寿命化対策を実施するに当たり、構造・景観・歴史などを総合的に勘案し対策を検討することになった。東京都が「国指定重要文化財橋梁の長寿命化検討委員会」を設置し、筆者は基礎構造の専門家として委員会に参加した。本稿ではそのときに感じたことを記載したい。

京都まで来て肩透かし

鉛直支持力や水平支持力が不足する基礎の耐震補強は、大きく分けて2つの方法が考えられる。一つは基礎本体を強くする方法で、もう一つは基礎は補強しないものの周辺地盤を改良し補強する方法である。前者の基礎本体を補強する方法としては、基礎の周りに杭を打設する増杭による方法や、鋼管矢板で既設基礎を取り囲んで補強する方法などがある。

鋼管矢板基礎によるケーソン基礎の耐震補強について筆者らのグループで研究していた^{1),2)}こともあって、筆者は上記委員会の委員に選考されたわけである。委員会の事前説明としてわざわざ京都に東京から来られた東京都の職員の方々に向かって、「重要文化財として指定されている日本初のニューマチックケーソンを、鋼管矢板などで囲んで補強する方法は使いたくない」と宣言した。職員の方々は、筆者が鋼管矢板による耐震補強工法を当然提案すると思われていたであろう、いろいろな図面を用意されていた。肩透かし状態であった。筆者はそのとき、お金はかかるが周辺軟弱地盤の地盤改良や、河川の中にある2つの橋脚基礎や橋台を何らかの方法で繋ぐ方法などを考えていた。

鋼管矢板による既設基礎の補強

鋼管矢板などで既設基礎を補強する場合、図-1に示すように、以下の設計上の3つの問題点が指摘されている。

- (1) 既設基礎と新設基礎の荷重分担機構が不明
- (2) 頂版結合構造の施工手法などの整備が必要
- (3) 空頭制限下施工での既設基礎の先端支持力が不明

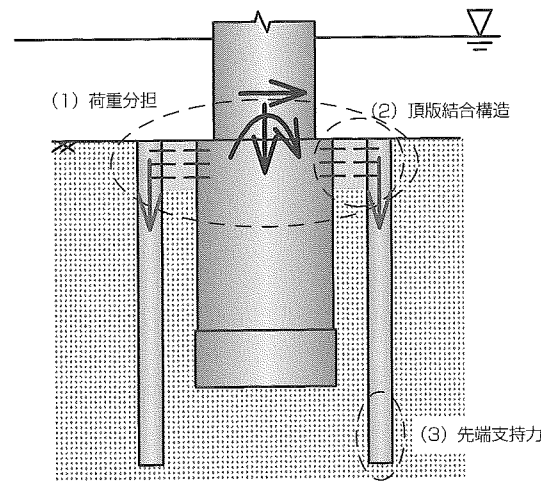


図-1 鋼管矢板基礎を用いた既設基礎の耐震補強法と設計上の3つの問題点

問題解決のための提案として、以下に示すような検討結果を提示してきた^{1),2)}が、なかなか実用化には至らなかった。なぜなら、基礎の補強はそれ相当の経費がかかり、上部工の補強の方が優先順位が高く、土の中にある基礎の耐震補強には積極的に目が向けられていなかったからである。

- (1) 簡便な補強構造の提案(頂版結合構造の簡略化や鋼管矢板の短縮)
- (2) 補強効果発現メカニズムの解明
- (3) 補強効果の定量的評価

委員会では防災計画の巨視的な観点、景観やデザイン・文化的価値を踏まえた画一的でない補強の考え方などについて議論がなされた。永代橋・清洲橋は、基礎(日本で初めて施工されたニューマチックケーソン)や橋台・橋脚(側面と頂部笠石に花崗岩(茨城県榎産)が貼られている)が一体となって重要文化財であることを考えると、この基礎を鋼管矢板で囲み基礎本体に手を加えて頂版を作製する勇気はなかった。そこまでやらずとも、何か解決策があるのではと考えた。基礎はそのまま手を加えず周辺地盤に対し広範囲に地盤改良を施す方法や、河川の中の橋脚基礎どうしや橋台をPC鋼棒や地中梁で結合するような新工法は、経済性、航路の利用、現在までの施工例の有無の観点で採用には至らなかった。

日本で初めて導入された基礎

委員会で耐震補強を考慮した永代橋と清洲橋の諸元構造形式と、ニューマチックケーソンを以下にまとめておく。

永代橋は図-2、写真-1、2に示すように、鋼3径間カンチレバー式タイドアーチ橋で橋台と橋脚は壁式RC構造で、ニューマチックケーソン(径20フィート、深さ100フィート)を基礎とする。大正13年12月に起工し2年の歳月を経て竣工した。清洲橋は図-3、写真-3、4に示すように、鋼3径間連続吊鎖自旋式補剛吊橋を上部構造形式とし、重力式橋台、壁式RC構造の橋脚とニューマチックケーソン(径20フィート、深さ100フィート)を基礎とする。大正14年3月に起工し3年の歳月を経て竣工した。

ニューマチックケーソンの施工方式には築島方式と鋼殻方式があり、本ニューマチックケーソンはアメリカから導入されたので、木製の鋼殻方式が採用され、木製鋼殻はコンクリートと地盤間に残置されている。木材の豊富なアメリカでは、経済上の理由から木製のケーソンがその当時多用されていた。その後、木材の乾燥により壁が湾曲して漏気する、沈下中に不均一な応力が作用する、火災の原因にもなることから次第に木製のものは使われなくなっている。

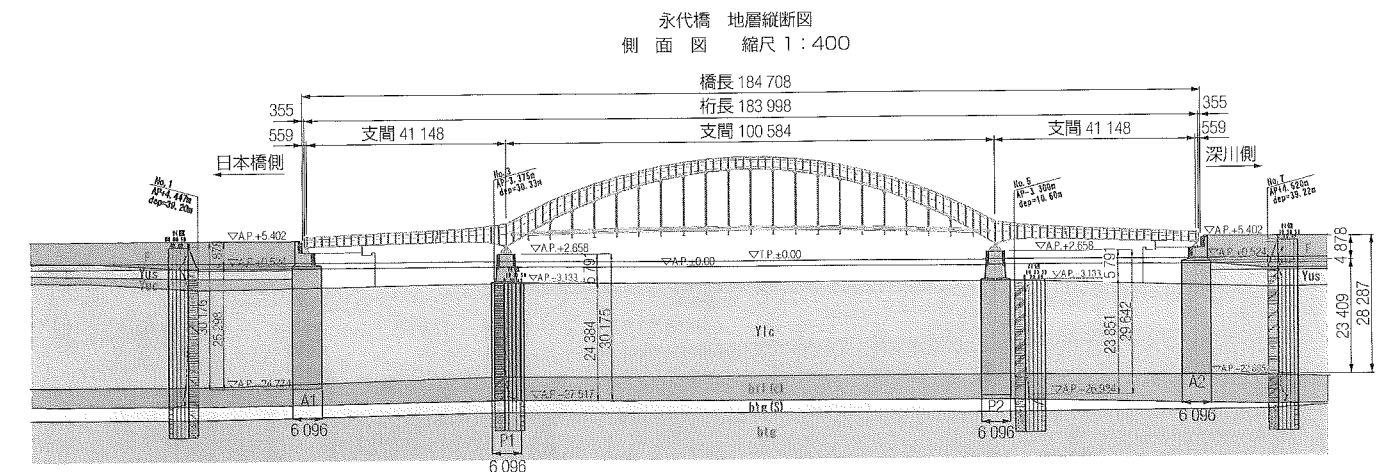


図-2 永代橋の縦断面³⁾

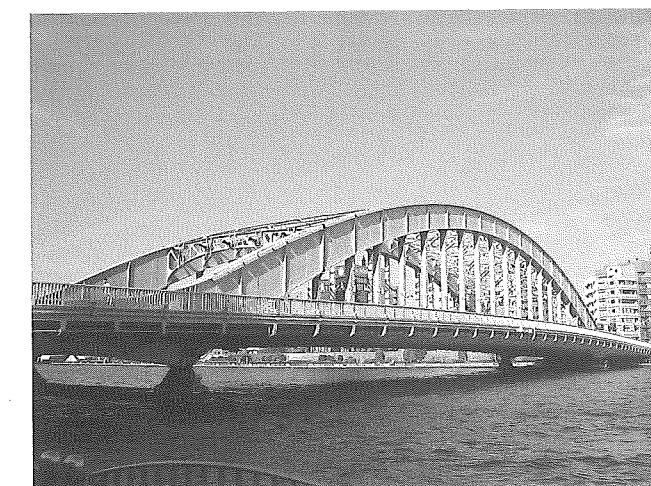


写真-1 永代橋全景

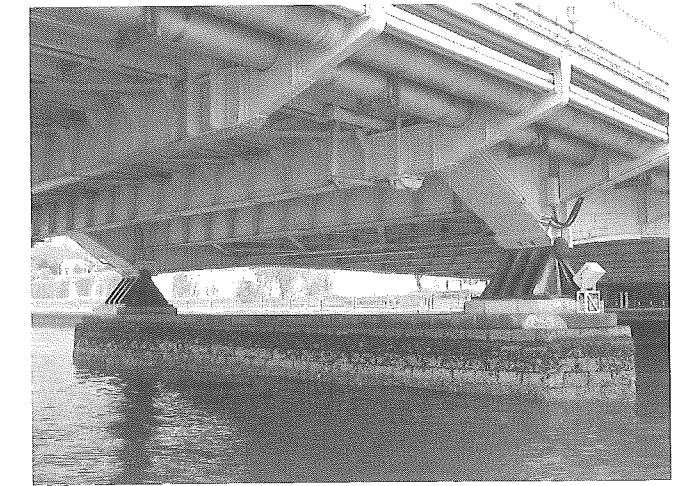


写真-2 永代橋の橋脚と基礎上部(上部工は造形的にも秀逸なピンローラー支承で支持されている)

ニューマチックケーソン基礎の耐震性能は、過去の地震の被災事例をもとにして、一般的に信頼できるものと評価されている。新潟市を流れる信濃川に架かる万代橋はニューマチックケーソンで施工された橋梁で、築35年後の1964年に発生した新潟地震において、付近の橋梁が倒壊し通行不能となったが、被害は軽微で唯一自動車の通行が可能であった。また、神戸港内の第7・8突堤の基礎はニューマチックケーソンであり、1995年の阪神・淡路大震災において、付近の岸壁が壊滅的な被害に遭ったにもかかわらず、この岸壁の被害は軽微で、ニューマチックケーソンの耐震性能が再評価された事例である。もちろん杭基礎などの他の基礎形式と直接耐震性能を比較したわけではないことに注意を要する。

無筋コンクリートが助けてくれた

永代橋・清洲橋の基礎の耐震設計を考えるに当たり、現在の設計の基本となる道路橋示方書では、無筋コンクリート構造を認めていないので、現行示方書の設計法をそのまま使うわけにはいかない。そこで、耐震性能照査方法は現行示方書が定義する「動的照査法により耐震性能を照査する橋」と位置付け、動的解析を用いた耐震性能照査を行うことにした。基礎の解析に関しては、まず静的な1サイク

* 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 博士(工学)

キーワード: 重要文化財, 耐震補強, ニューマチックケーソン, 無筋コンクリート, 永代橋, 清洲橋

ル载荷によって荷重～変位関係の履歴ループを求め、下部基礎～地盤の地震時性能を非線形ばねで評価した橋梁全体系動的解析を行った。続いて基礎に関しては、別途1方向载荷の静的解析（いわゆるプッシュオーバー解析）を実施し、変位～損傷状態の把握を行い、橋梁全体系動的解析の最大応答変位時の損傷状態の評価を行った。

その結果、永代橋は上部工に関して、アーチリブの局部座屈を防止することと水平反力負担用の支承を新設するにとどまり、橋台・橋脚とニューマチックケーソン基礎に関しては対策不要となった。清洲橋はダンパーの設置や橋台・橋脚と基礎の対策は不要であった。

基礎の対策が不要となった第1の理由として、基礎のコンクリート強度が当時の設計基準強度の 12.6 N/mm^2 に対して、現時点でのコンクリートコア試験による圧縮強度が 40 N/mm^2 以上あったことによる。丁寧に慎重な施工が行われ、当時の設計値に対して3倍にもなる品質の高いコンクリートを、80年後の現在に送り届けてくれたわけである。

第2の理由は、当時としては非常に大きな地震力（水平震度が0.33で鉛直震度も0.17考慮されていた）を想定していたことである。関東大震災で甚大な被害を受けた隅田川の橋梁群を復旧・復興するに当たり、再び落橋などの

被害は発生させないという、当時の技術者の気概が感じられる。第3の理由は、市電が通行していたものの当時の一般的な車両重量を超える重い車両を想定し、現設計と比較しても2倍の常時荷重で設計されていたことによる。結局、丈夫な基礎を丁寧に作り余裕のある設計を実施していたことにより、基礎の対策が不要になったわけである。

特に基礎の設計図（図-4）を見ると、当時の人々は異形鉄筋はなかったけれども、基礎上部にレールを2段入れ、段落とし部では1.5 mほどオーバーラップさせていることが分かる。構造の弱点がよく分かっており設計者の気概が感じられる。このレールの存在とオーバーラップがなければ、この基礎は後年になって鋼管矢板で巻かれ頭部を頂版で結合されていた可能性がある。

重要文化財の耐震補強の方法は

重要文化財の耐震補強に関して、現状の最高の補強法を考えることはもちろんだが、その補強法の賞味期限はいかほどか、将来お金をかけずもっと合理的で経済的な耐震補強が生まれてくるのではないかと、そのことを常に考えるべきであろう。現状では最高の手法であるが、それが将来にわたって最高であるとは限らない。謙虚で控えめな気持ちが重要となる。これからさらに100年間、永代橋と清洲橋を使おうというコンセプトは大切にしたい。平成24年

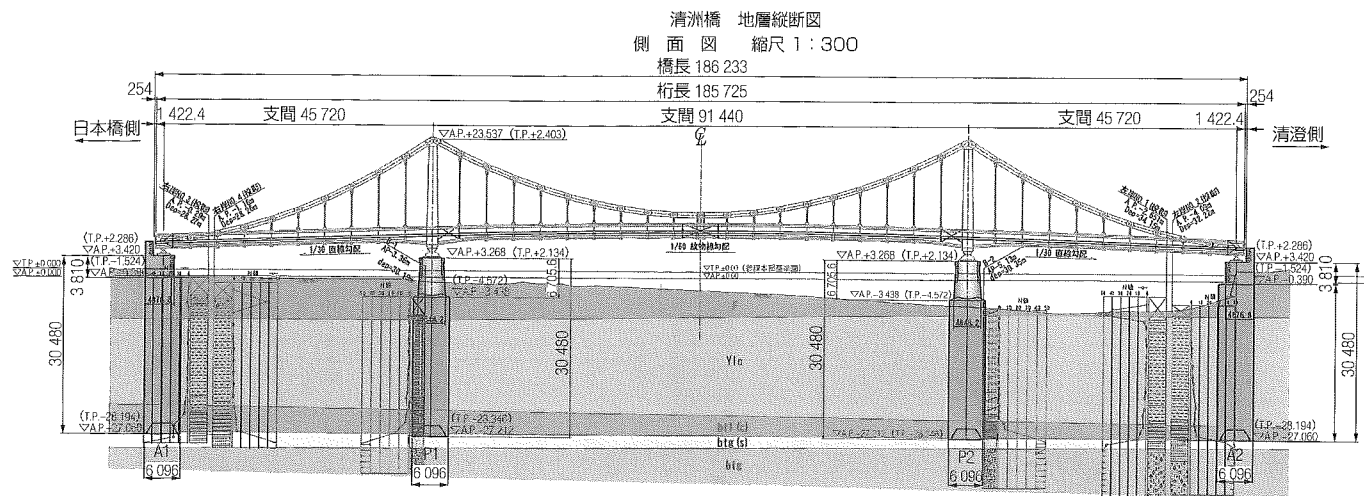


図-3 清洲橋の縦断面図³⁾

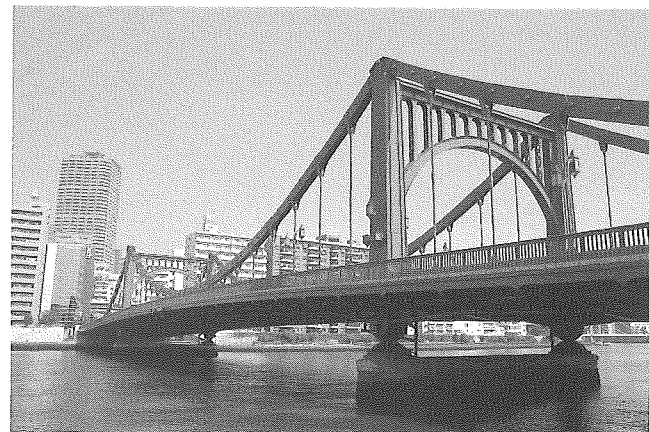


写真-3 清洲橋全景

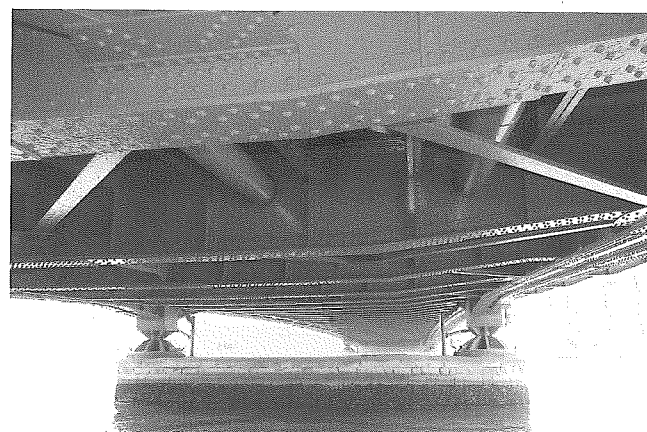


写真-4 清洲橋の橋脚と基礎上部（上部工は造形的にも秀逸な国内唯一の戦前の鋼製主塔のピボット支承で支持されている）

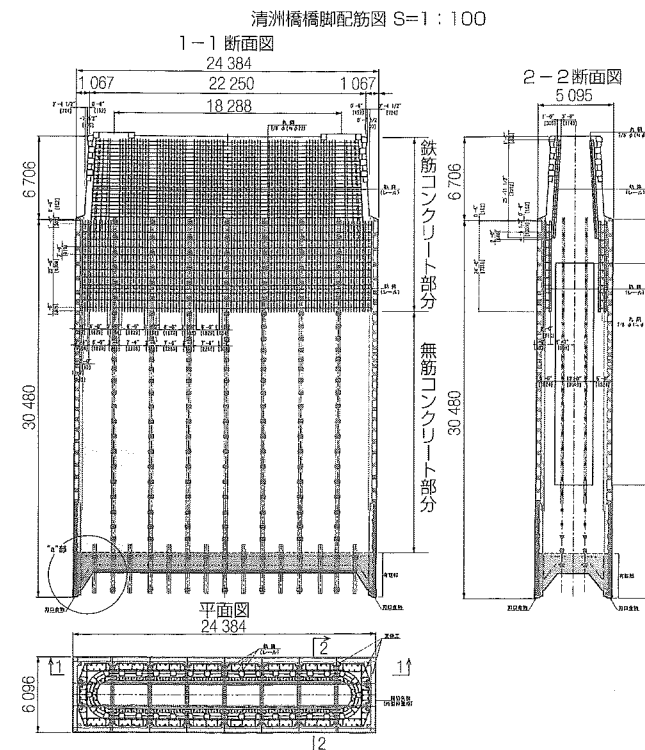


図-4 清洲橋橋脚配筋図³⁾（ニューマチックケーソン施工時に地盤との間に残された木製鋼殻や、ケーソン上部に設置された2段のレールの存在がよく分かる）

のレベルでその当時の技術者は何を考え、どのような方法をとったのか、きちんと記録を残し、後世に伝えなければならない。今回の検討委員会では多くの優秀な設計技術者と巡り会った。現在の設計技術者の精力的で献身的な仕事を、後世の技術者に伝えられることに誇りを感じた次第である。

今回2橋の検討機会を得たことで、過去の設計者の基本的な考え方を勉強しながら、色々な事柄が分からなかったための余裕度を多く持っている構造であることが分かった。細かい設計図面も多く見させていただいたが、計算手法や計算機などが発達していなかった80年前の構造は、非常に緻密に設計され施工されたと思われる。設計図はどれも非常に美しく、当時の設計者の思いが伝わってきた。成瀬勝武は昭和4年に刊行された「萬有科学大系 橋梁、復興橋梁の設計」の中で「未曾有の激震によって橋梁の小被害が生じて、それによる交通途絶が起らなければ差し支えない」という「橋梁機能が維持できる軽微な損傷は許容する」という概念を示している。80年前に現状の設計と同等の考え方を示していたことに、驚きを禁じえない。

橋の機能や美しさを伝えよう

永代橋と清洲橋は現在ライトアップされている。永代橋

のアーチリブ上部には初めからそこにあったかのようにライトアップ照明施設が付帯され、歩道と車道の間には照明設備に付随する箱が置かれている。筆者の提案としては、照明施設もLEDなどを使えば小さく目立たないようにできるであろう。構造的には関係ないであろうが、素敵なアーチリブ上部を復活させるため、何らかの工夫をしていただきたいと考える。

さらに隅田川にかかる勝鬨橋であるが、昭和45年11月29日まで1日1回、ハの字型に開閉されていた。現在橋脚内見学ツアーが実施され、橋や機械・電気に関する高度な技術的工夫が凝らされた開閉の仕組みを多くの方々に知っていただく活動が行われている。もっと多くの人々に橋の機能と美しさを理解してもらうために、1日に数回、開閉してはどうかであろうか。近年公開された映画ではCGで開閉の姿が見られるが、一時的に車をストップさせるのは重要交通路でまかりならぬと言われるであろう。筆者はオランダに1年住んでいたが、運河の上にかかる職場までの通勤路の橋は信号が赤になると跳ね上がり、車をすべてストップさせ、大きな船を通していった。何か余裕が感じられた。15年前の話であるが、今でも幹線の高速度道路でも橋が跳ねる光景が見られると思う。

永代橋と清洲橋、昔の人の緻密な施工と設計の判断と精度の高い計算によって、補強されることなく80年前のそのままの形を維持することができた。もともと基礎を耐震補強すべく見越していたお金を、勝鬨橋の機能復活（可動橋）に使えないであろうか。新たな観光の起爆剤と土木技術者の気概を示すモニュメントとなると筆者は考えるが。

佐賀県と福岡県を跨ぐ旧筑後川橋梁（筑後川昇開橋）は、国指定重要文化財で、鉄道橋から歩道橋に役目を変えた今でも、1日数回橋梁中間部分の約24メートルの可動橋が約23メートルの高さまで昇降し、美しい姿を我々に見せてくれている。愛媛県の肱川河口に架かる長浜大橋（赤橋）は、現役（昭和10年8月に完成）で動く我が国最古の道路可動橋（バスケット式鉄鋼開閉橋、開閉部分の長さ18mカウンターウェイトの重さ82トン）である。大都会東京の真ん中の隅田川の上でも、重要文化財に指定された橋梁がその昔の機能を遺憾なく発揮できる姿をいつか見てみたいものである。

参考文献

- 磯部公一、木村 亮、吉澤幸仁、河野謙治、原田典佳、横野 健：鋼管矢板基礎増設による既設橋ケーソン基礎の補強効果に関する実験的研究、土木学会論文集C, Vol. 62, No.1, pp. 191~200 (2006.3)
- 磯部公一、木村 亮、河野謙治、原田典佳、横野 健、桑嶋 健：既設渡河橋梁基礎を補強した鋼管矢板基礎の補強メカニズムに関する有限要素解析、土木学会論文集C, Vol. 63, No. 2, pp. 516~529 (2007.6)
- 東京都建設局道路管理部保全課、東京都第一建設事務所：国指定重要文化財橋梁の長寿命化検討委員会報告書、平成24年6月