

私のプロジェクト X

池田 憲二

白鳥大橋の耐震設計と主塔基礎形式の選定

1. はじめに

私は昭和 56 年、旧北海道開発庁に採用され、即日、室蘭開発建設部道路第 1 課に配属となり、その翌年には室蘭道路事務所に異動、それからの 4 年間は白鳥大橋の調査設計のみが私の仕事であった。白鳥大橋は私の仕事における青春そのものだった。

私の担当は下部工の設計で、海上ボーリングによる地盤調査、岩盤分類と岩盤支持力の決定、入力地震動の設定、耐震設計手法の決定、基礎形式の選定などだった。

一般国道 37 号室蘭市白鳥大橋(写真-1)は昭和 56 年に事業化され、平成 10 年に完成した東日本最大の吊橋である。白鳥大橋の名前は、昔はここに白鳥が飛来していたことから、ここが白鳥湾と呼ばれていたことに由来する。



写真-1 白鳥大橋¹⁾

橋の構想は古く、昭和 30 年にさかのぼる。以前の市中心部は鍵状の半島部にあり、半島先端と対岸の連絡は夢であった。過去にはゲルバートラス案や沈埋トンネル案もあったが、港の航路幅 300m を跨ぐ斜張橋案を中心に調査が開始された。

本格的に海上ボーリングが始まると、室蘭港の海底には厚い沖積層と洪積層の下に新第三紀鮮新世の岩盤が、湾の中央に行くほど深く、すなわち、すり

鉢状に分布していることが判明した。そのため、中央支間をもっと長くとったほうが有利となり、昭和 58 年に斜張橋案から吊橋案へと変更になった。

橋梁諸元を以下に、側面図を図-1 に示す。

主要諸元²⁾

橋長	1,380m(吊橋部のみ)
径間割	330+720+330=1,380 m
幅員	2.5+3.5+(2.25)+3.5+2.5=14.25 m
形式	3 径間 2 ヒンジ補剛吊橋(側塔付)
補剛桁	鋼床版箱桁
ケーブル	PPWS-127×52st(φ 5.20mm)
ザク比	1/10
設計荷重	TL-20、TT-43(B 活荷重)
路線名	一般国道 37 号
道路規格	第 1 種第 3 級(自動車専用道路)
車線数	2 車線
航路限界	TP+54.45m
航路幅	300 m

2. 海上ボーリング

海上ボーリングでは室蘭港内の想定架橋位置付近に檣や台船を固定し、延長 100 m クラスのボーリングが何本も行なわれた。液状化の検討や地盤応答解析のモデル化のための不攪乱試料を採取、振動三軸圧縮試験や円筒中空供試体の動的ねじりせん断試験などを行って、過剰間隙水圧の発生消散に関するパラメータやせん断剛性率と減衰定数のひずみ依存性について詳細に検討した。おかげでボーリング、サンプリング、PS 検層、孔内水平載荷試験、土質試験、液状化、地盤応答解析などについてとても勉強になり、のちの技術士試験へとつながっていく。

海上ボーリングでは忘れられない思い出がある。室蘭港は戦時中、米軍による艦砲射撃を受け、また、終戦直後には旧日本軍が砲弾等の爆発物を海中投棄

したとの記録がある。作業の安全確保のため、ボーリングに先立ち、必ず海底でダイバーによる磁気探査が行われる。ところが海底は障害物でびっしりと覆われていた。ホタテだ。昔、室蘭港ではホタテの養殖がおこなわれていたようで、それが自然に繁殖したものなのだろう。室蘭港は工業港であるが、管理された工場からの排水はあるものの、製紙工場の廃液や漁港のように水産加工場からの排水はなく、意外かもしれないが水質は大変良好だ。港内には既に漁業権はなく、採っても密漁にならない。

港則法に基づく海上保安部からの港内作業許可書には生物を採取してはならないことになっていたが、これは障害物の除去だ。寮のおばさんが料理してくれたホタテのクリーム煮、あれはうまかった。

3. 耐震設計手法の策定

(1) 基盤入力地震動の設定

橋の耐震設計は、通常、道路橋示方書耐震設計編により行われるが、示方書が適用対象とする橋は支間長 200m 以下。白鳥大橋の中央支間はこれをはるかに超える 720m。これは関門橋の 712m を意識し、ちょっと超えてやろうとして決めた数字(当時の関係者しか知らない裏話)だ。

200m を少しくらいのオーバーなら示方書を準用する手もあるが、さすがにそうはいかない。なお、当時の耐震設計に L1、L2 の概念はなく、今でいう L1 相当の許容応力度法による設計である。

まずは入力地震動の決定から始めなければならない。示方書(当時)では固有周期に応じて基本震度を求め、それに地域別や地盤別の補正係数を掛けて地表付近の設計地盤面における設計水平震度とする。ところが当時の長大橋等の耐震設計においては地中深く、基礎底面付近の工学的基盤における再現期間

100 年(設計耐用年数 50 年、非超過確率 0.6)に相当する入力地震動を定義することが一般的であった。もちろん、これを求める順序統計解析を行うための相当期間にわたる統計量(基盤地震動データ)など、あるわけがない。ひと工夫もふた工夫も必要だった。

幸いなことに架橋地点直近に室蘭港湾建設事務所があり、構内の地表に自記式(アナログ)の SMAC-B2 型強震計が設置されていた。そのデータはサンプリング間隔 0.05 秒でデジタル化され、運輸省港湾技術研究所(当時)から入手できた。でっかいリールに巻かれた磁気テープだった。

このデータを片っ端から地盤応答解析で基盤に戻す計算を行った。SHAKE という次元重複反射理論による全応力解析である。

ところが記録された地震データはおよそ 20 年分。これで 100 年再現期待値を求めるわけにはいかない。しかも大地震はせいぜい 3 つ、ほとんどはちっこい地震のデータばかり。

そこで今度は理科年表にある大地震を使うことにした。もちろん、これら地震の地表または基盤の波形データや加速度記録などない。わかるのは地震の震源位置とマグニチュードである。

震源距離とマグニチュードから地震動の大きさを推定する距離減衰式は多くの学者らが提案している。提案された距離減衰式の中で約 20 年間の観測データから SHAKE で計算して求めた基盤加速度と一番よい相関を示したのは金井の速度振幅式であった。金井式による値と SHAKE の値の相関から金井式を補正したものを室蘭基盤加速度予測公式とし、理科年表にある何百年分の大地震について、室蘭における基盤加速度を推定することができた。

これを確率紙上にプロットしてみると、面白いこ

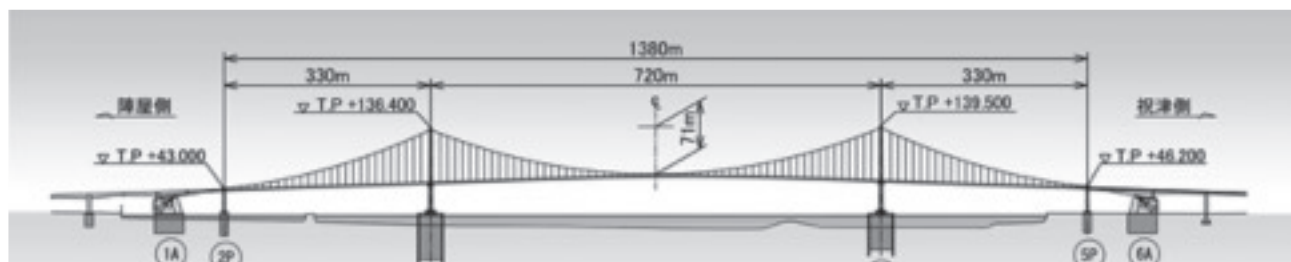


図-1 白鳥大橋側面図³⁾

とが分かった。1本の直線にならず、折れ線になるのである。どうやら明治以降と江戸時代、それ以前の3期間に分かれるのだ。記録の精度の問題だろう。当然使ったのは明治以降の記録のみ。これだけで100年以上の期間があるので、100年確率統計量を求めてもよいだろう。得られた100年再現期待値は100gal強であった。

本州四国連絡橋、横浜ベイブリッジや名港西大橋などの長大橋の設計基盤加速度は150gal以上であったこと、1968年十勝沖地震の室蘭港における計算基盤加速度が106gal(データのある既往最大)であったことから、工学的判断という名のもとに、「えい、やー!」と120galを白鳥大橋の設計用基盤入力加速度とした。

SHAKEによる地盤応答解析は外注したコンサルによるもの、金井式との相関が一番良いことを見つけ出したのもコンサルであるが、大学の水文学で習った順序統計解析を使って100年期待値を出すというのは私のアイディアであり、実際に確率紙上にデータをプロットし、定規で線を引いたのも私である。使ったのはトマスプロットだったかヘーゼンプロットだったかは忘れてたが。

なお、土木学会北海道支部に委託した白鳥大橋技術調査委員会では、委員から加速度-加速度の相関ならわかるが、速度と加速度の相関を取ることに疑問があると指摘された。でも、これが一番相関しているのだからしょうがない、押し切っちゃった。

また、アナログ波形を0.05秒間隔でデジタル化したため、実際はもっと大きな加速度であった可能性がある。しかし、このような高周波成分のスパイクは構造物の応答に影響はないだろうと無視した。

これで基盤入力加速度120galが決まった。

(2) 設計用基盤加速度応答スペクトルの作成

設計用応答スペクトルの作成に当たっては、特定の地震波の振動特性のみが反映されないよう、複数の地震波の応答スペクトルを重ね書きし、その包絡線とするのが一般的である。白鳥大橋では室蘭港地表のSMAC-B2型強震計で150gal以上が観測された3つの地震、すなわち、1968.5.16十勝沖地

震M7.5、1981.1.23日高西部地震M6.9、1982.3.21浦河沖地震M7.1のデータをSHAKEで基盤に戻し、最大加速度を120galに拡大して応答スペクトルを計算した(地震名は当時のもの)。

計算に当たっては、SHAKEを実行したコンサルから基盤加速度データをもらい、大崎順彦著「地震動のスペクトル解析入門」にあったFORTRANのプログラムを参考に自分でアレンジし、室蘭道路事務所で導入したばかりのPC-9801(MS-DOS Ver. 2.11)を使って自分で計算した。当時のフロッピーディスクは8インチ、暑いときにはうちわになった。

FORTRANそのものは得意だった。大学の卒論でFORTRANを使って中路ソリッドリブアーチ橋の設計を行ったからだ。しかし、PC-9801でMS-FORTRANを走らせるには苦労した。日本語版マニュアルは英語版をカタカナで書き直しただけのようなものだった。例えば、ソースコードをコンパイラを用いてオブジェクトコードに変換し、リンカによって実行可能なファイルを作成する…てな具合。何のことだかさっぱり理解できず、試行錯誤の連続だった。

ようやくFORTRANが走るようになり、目標周期ごとに何度も計算し、結果をプロッターで図化する。プリンターではない、プロッターである。機械がいちいちペンを取りに行き、点と線と文字を書くのである。図-2に私がプロッターで書いた応答スペクトル(包絡後)を示したが、漢字は書けず、ローマ字と英語表記のちゃんぽんになっている。曲げモーメント図なんかは*****で表現するのだ。

そういえばこんなことがあった。隣の苫小牧道路事務所に出張し、向かいのそば屋で昼食を待っていた時のことだ。白鳥大橋の設計は太平洋側の地震のみを考慮しているが、日本海側の地震を考慮しなくてもいいのかという話題になった。私が室蘭に大きな揺れをもたらす地震は太平洋側のものばかりだから、考慮しなくていいと発言した途端、グラグラと強い揺れを感じた。昭和58年5月26日正午に発生した日本海中部地震であった。自信過剰で驕れる私への神様の警告だったかもしれない。

なお、そのそば屋、小さなせいり 2 段が 1 人前、大盛は 3 段だったが、お前なら 10 段いけると先輩にそそのかされ、10 段やつけた。あとでその先輩からは、まさか本当に食べ切れるとは思わなかったと言われ、腹は夕方まで苦しかった。

(3) 設計用基盤時刻歴加速度波形の作成

元にしたのは地表で 200 gal を超えた十勝沖地震の基盤地震動を最大加速度 120 gal に拡大したものである。これの応答スペクトルが(2)で定義した設計用基盤応答スペクトルに合うように周波数領域において位相は変えず、振幅を調整したものである。出来上がった時刻歴波形は地盤応答解析により基礎の重心位置や設計地盤面における入力地震動(図-2)の定義や液状化の検討に使われることになる。

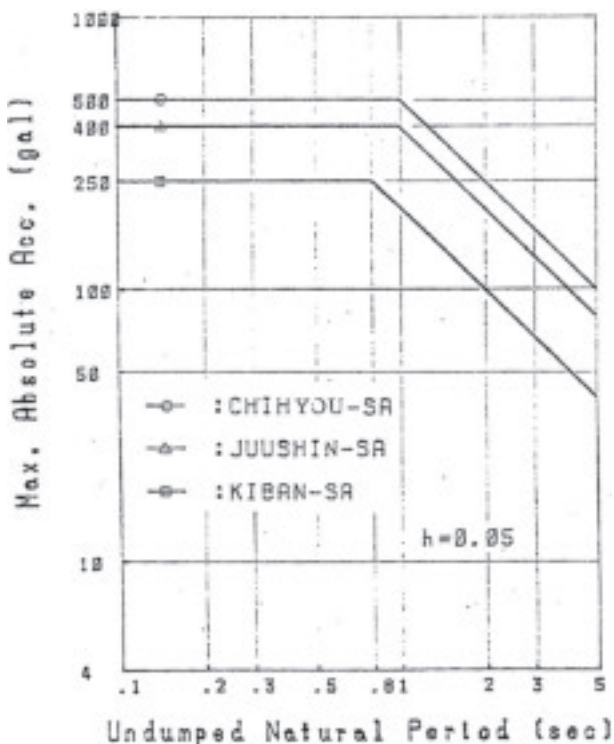


図-2 設計用加速度応答スペクトル⁴⁾

(4) 耐震設計手法の決定

入力が決まれば、今度は応答の計算法、すなわち、耐震設計法そのものの策定である。主塔の基礎はおそらく世界一深い基礎である。基礎形式が杭基礎であれば杭を弾性床上の梁として、すなわち、地中部 β^{-1} の範囲の地盤反力係数を用いた変位法で解ける。また、ケーソン基礎(深い剛体基礎)であれば設計地盤面より上の質量に対して設計震度を掛け、軀

体の安定は前面と底面の地盤反力により照査できる。

ところが白鳥大橋の主塔基礎は、4. で選定経緯を述べるが地中連続壁併用逆巻剛体基礎というもの。世界で初めて橋梁基礎に採用した。基礎底面は起点側で TP-73 m である。こんなに深いのに、基礎をケーソンのような剛体と仮定して、設計地盤面以下には何も作用させないで設計してよいのだろうか。本当に設計地盤面より上の慣性力のみで設計していいのだろうか。

基礎と地盤の相互作用を考慮した動的応答解析を実施してみると、基礎の挙動は地盤の 1 次モードの変形とほぼ一致していた。そこで採用した設計法は、応答変位法を併用した修正震度法というべきものである。設計地盤面から下の部分に対しては地盤の 1 次モードの変位を地盤反力係数を介して作用させ、設計地盤面から上の質量に対しては固有周期に見合った震度を掛けて構造諸元を決定し、その結果を上部工、下部工および地盤の全体系モデルで時刻歴応答解析を行い、照査するというものである。

ここで問題が一つあった。仮設として施工された地中連続壁の設計上の扱いである。あまり深く考えなかった。仮設なので外力には抵抗しないものとした。すなわち、躯体の応力度照査においては、逆巻で施工される本体のみで行うものとした。

一方、安定計算としては、地中連続壁は現に存在するので、下部工の幅は地中連続壁の外径とし、周面摩擦力は前面の地盤ばねの 4 割を考慮した。これも私が決めた。矩形のケーソンであれば、前面ばねを 2 割増しにして設計するが、地中連続壁は場所打ち杭のように地盤との密着、摩擦が期待できるし、円周方向に発生する周面摩擦力の前面成分を中心から $\pi/2$ の範囲で積分し、2 倍した。当時の私はこんな算数もできたようだ。

ただし、底面の地盤反力に対する照査は本体幅(面積)のみで行っている。基礎底面よりさらに深く根入れされている地中連続壁先端の鉛直支持力は余裕代になっている。

こうして設計された下部工の諸元に対し、全体系の時刻歴応答計算で照査を行った。ところが地盤を

モデル化する際にそのマス(質量)も考慮したため、それがあまりにも巨大で、上部工のケーブルだったか桁だったか、面内方向だったか面外だったか、忘れてしまったが、解析上、上部工の高次モードと共振し、主塔基部の設計が不可能であった。

土木研究所の偉い耐震設計の権威と相談し、それは解析上の現象で、実際は起こらないだろうから、モデルから地盤のマスを切り離し、その位置に地盤の応答加速度を入れて照査することにした。

これが正しかったことを願っている。正しくなければ、大地震時に上部工が主塔の根元から吹っ飛んでしまいかねない。今のところは大丈夫みたいだ。

4. 主塔基礎形式の選定³⁾

(1) 形式選定の過程

順序が逆になったが、主塔基礎が地中連続壁併用逆巻剛体基礎になった経緯を紹介する。

起点側主塔基礎の底面は TP-73m であり、また、支持岩盤の上には洪積世の砂礫層が約 10m と厚く堆積している。砂礫層の中からはボーリングで最大礫径 50 cm の安山岩がいくつも確認されたことから、実際はその 3 倍の巨礫の存在が懸念され、そのことが基礎形式の選定を困難にしていた。

主塔基礎工選定における課題は、支持基盤が深いことと中間層に巨礫の存在が懸念されること、この 2 点に集約される。

橋梁形式が吊橋に決定してから、主塔基礎工の有効候補として検討されたのは、

- ①オープンケーソン基礎
- ②多柱式基礎
- ③大口径鋼管杭基礎

の 3 案である。

事業主体である北海道開発局室蘭開発建設部(以下、開発建設部)はスーパーゼネコン 4 社に対して、これら 3 案の施工検討業務を依頼した。その結果、いずれの 4 社も上記 3 案はすべて施工可能とした上で、第 1 案として 2 社が①を、残り 2 社がそれぞれ②と③を選ぶという結果になった。②は工種が多く経済性で一番不利であるが、横浜ベイブリッジに

おける実績から最も確実であるとして 1 社が選定した。③は経済性では最も有利であるが、巨礫の存在により 4 社中 1 社しかこれを選ばなかった。しかもその社は選定の前提として試験杭による施工性の確認という条件付きであった。

①を提案したある社から画期的な施工法の提案があった。それはケーソンの沈設に先立ち、刃口周りを地中連続壁の掘削機により支持岩盤まで掘削し、その後、孔壁内にコンクリートを打設するのではなく、自硬性安定液が硬化した後、刃口を設置し、オープンケーソンを施工するというものである。程よい硬さで均質な連続壁がガイドとなるこの工法であれば、地中連続壁施工の段階で巨礫の事前除去が可能であり、その際に孔壁が崩れ、壁の厚さがばらついても何の問題もないとのことであった。

この提案を受け、開発建設部は白鳥大橋の下部構造に関する技術検討委員会に対し、①を第 1 案として提案した。同委員会はこの提案を基本的に了承するとしつつも、①は支持岩盤を直接目で見て確認できないことや設計におけるケーソン壁面と硬化後の自硬性安定液との関係が不明であることなどから、引き続き②との十分な比較を行うよう答申した。

私たちは引き続き検討を継続することとなったが、今度は①を第 1 案に選定した別の社から、地中連続壁の掘削機を使用するなら、円形に連続壁を構築し、その内部を上からドライで掘削しながら連続壁の内側に本体工を構築(逆巻)してはどうかとの提案があった。この工法が橋梁基礎に用いられたことはないが、LNG などの地下タンクでは多くの実績があり、確実な施工が期待できた。この提案により主塔基礎工の形式選定に終止符が打たれた。

「地中連続壁併用逆巻剛体基礎」、この形式が橋梁基礎に採用されたのは世界で初めてである。

(2) 築島工中詰材の検討

この基礎形式は陸上施工が前提である。そのため、海上に鋼管矢板で締め切られた築島工を施工する必要があった。この中詰材に通常の土砂や浚渫土を用いると、海底地盤に対する大がかりな地盤改良と鋼管矢板 2 重締め切りまたは杭径 2m 前後の超

大口径鋼管矢板 1 重締め切りが必要になるなど、設計と経済性に大きな問題があった。そこで先ほどの 4 社のうち、③を提案した社から、中詰材として石炭灰スラリーの提案があった。

石炭灰スラリーとは、石炭火力発電所から廃棄物として排出される石炭の燃えかすに火山灰を概ね 7 : 3 の割合で混ぜ、強度調整のために数%のセメントを加え、海水で含水比 50%程度に練ったものである。性質は石炭灰中の石灰分により自硬性があり、石炭灰の粒子は球形に近いのでスラリーの流動性がよい。また、軽いことから海底面に作用する上載圧と締め切りに作用する側圧が小さい。さらに硬化後は側圧 0 が期待でき、地盤改良範囲の縮小と通常径の鋼管杭を用いた 1 重締め切りが可能になる。

石炭灰スラリーの性質については、試験工事等により確認され、築島工の設計を行った。

(3) スーパーゼネコンとのおつき合い

基礎工の形式選定にあたって、私はゼネコン各社の本社や技術研究所から颯爽とやって来る技術者らと議論する機会を得た。これまでも一流のコンサルや地質調査会社の技術者たち、本州四国連絡橋公団の職員や土木研究所の権威らと何度も会い、教を請い、議論してきた。しかし、ゼネコンの彼らはこれまで出会った人たち以上に自信に満ち溢れ、颯爽としていた。様々な現場で多くの場数を踏んできたからであろう。私には彼らがまぶしかった。

また、彼らのお陰で横浜ベイブリッジ基礎工の工事現場や東京都下水道の発進立坑、技術研究所などを訪問させてもらった。

発進立坑(ニューマチックケーソン)の中では沈下の瞬間も経験した。圧気下の内部を見学中に、刃先の状態から沈下の兆候があるので、案内者が見学者は退避させた方がいいと言われたようだ。私は梯子でマンロックに向かって登っている最中であった。突然、目や耳、鼻などから頭の中身が飛び出したかのような衝撃を受けた。沈下により、一気に内部気圧が上昇したのだ。次の瞬間、あたりが白くなってきた。減圧操作が行われたため、霧が発生したのだ。

私には何も知らされておらず、何も知らなかった

ため、これは事故に違いないと勘違いし、潜函病の恐怖に襲われた。こんな経験をした役人なんて、そうざらにいないだろう。

5. むすびに

あの頃は楽しかった。大学を卒業したばかり、気分は柔道部の延長。体型は逆三角形(今は正三角形)、文句があるなら実力で来いが口癖。独身寮に私より酒の強い奴はいなかった。私より腕相撲の強い奴もいなかった。入局 2 年目にして寮長として君臨していた。実際は祭り上げられ、仕事を押し付けられただけだったけど。

昭和 61 年春、私は建設省土木研究所に異動となった。配属先は構造橋梁部基礎研究室である。それからは白鳥大橋の建設には全く携わらなかった。携わったのはこの時代の下部工の調査設計のみであるが、その思い出は尽きない。新米の役人であった私にここまで技術的なことばかりに専念させてもらったことには大いに感謝している。この時の経験が技術士に結びついている。土質および基礎の問題を解くのに、地質調査の知識が大いに役立った。経験論文は白鳥大橋の入力地震動の設定について書いた。

そして何よりも人生の師、大橋猛氏(故人)の下で仕事をしたかけがえのない時代だった。

参考文献

- 1) <https://www.facebook.com/muroranyakei>
- 2) ウィキペディア(Wikipedia), 白鳥大橋
- 3) 池田憲二: 白鳥大橋 世界初の地中連続壁併用逆巻剛体基礎の採用, 橋梁と基礎, 2016 年 8 月号, pp.112-113, 2016
- 4) 池田憲二, *et al.*: 白鳥大橋下部工の計画と設計について, 昭和 59 年度北海道開発局技術研究発表会, pp.83-88, 1985

池田 憲二 (いけだ けんじ)

技術士(建設部門)

株式会社 構研エンジニアリング
代表取締役社長

