

参考資料

再建タコマ橋に就て

梗概

再建タコマ橋に就いて簡単に紹介し参考に資すると共に、一部筆者の所見を述べたものである。参考せる文献は Engineering News-Record, Nov., 29, 1945 及び May, 8, 1941 である。(平井敬記)

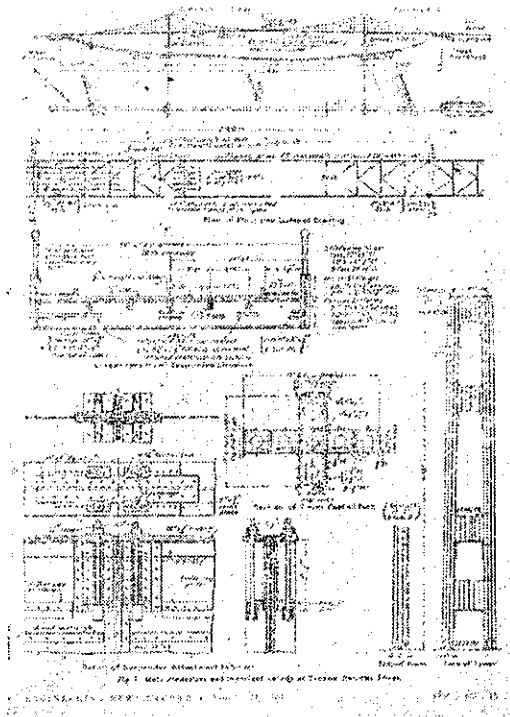
1. 序言

昭和 15 年 (1940) 11 月 7 日の Tacoma 橋破壊の報は今猶我々の記憶に新なる所で其再建が如何に行はれるかは橋梁技術者のみならず一般土木技術者にとつても関心の的であつたと申しても過言では無い様である。然るに最近一讀の機会を得た ENR (1945) の 11 月號に其の再建記事が載つて居るので、之を中心として其の概略をお傳へ申上ぐると共に、一二の所見をも附記させて頂く事とする。猶 ENR の記事の取扱方が學術的でなく所謂ニュース的である爲多少不明瞭の點が多い様に感ぜられ、遺憾であるが其點御諒承願ひたい。

2. タコマ舊橋に就いて

順序として、舊 Tacoma 橋につき一言すれば、同橋は 1940 年 7 月に完成せる世界第三位の吊橋で主徑間長 2800 呎の大橋梁である。(圖-1 参照) 開門吊橋(案)の主徑間長は 2362 呎 (800 米) である故其大きさの見當が付き得ると思ふ。Tacoma 橋の特長は補剛桁として桁高僅か 8 呎の鈹桁が用ひられて居つた事であるが之は在來の吊橋の設計と比較すれば直に思ひきつた設計と評し得られるのである。其他に注目すべき點としては幅員が 39 呎と云ふごく幅の狭い従つて自重も比較的軽い事である。徑間長 2800 呎に對し桁高 8 呎の鈹桁とは一見あまりにも剛性が小の様に見受けられるが、吊橋に關する所謂「撓度理論」に従へば之は當然この程度の剛性で充分との結論に導かれるのであつて、1937 年 Golden gate 橋が完成した以後は補剛桁の剛性を極度に小とする傾向に向つて居たのである。然るに Tacoma 橋は工事中より比較的振動が多い事が認められた爲其點數多の人々の注目を引き中にも Prof. Farquharson は 1/100 の模型及び小型風洞を用ひ實驗を進め其の防止策を研究中であつたが、同氏は主として撓み振動に注目した模様で其實験も惜しまらしくは立體的のものでなく平面的のものであつた。然し兎に角同氏は一二の改良試案を有して居つたのであるが之を實施するに至らぬ裡に同橋は開橋後僅か 4 ヶ月程で 42 哩/時 (19 米/秒) と稱せられる程度の風の日に墜落したのである。御參考迄に申上げると米國に於ける設計基準風壓は通常 30 封度/呎² であるが、之は風壓係数を 0.64 として逆算すると 96 哩/時、係数を 1.0 とすれば 77 哩/時の風速に相當する故、靜力學的には Tacoma 橋は少くとも 70 哩/時 位迄の風に對しては安全なる筈のものである。猶 Golden gate 橋は 1938 年夏に 78 哩/時の烈風の際に補剛桁が 8 呎程側方へ

圖-1.

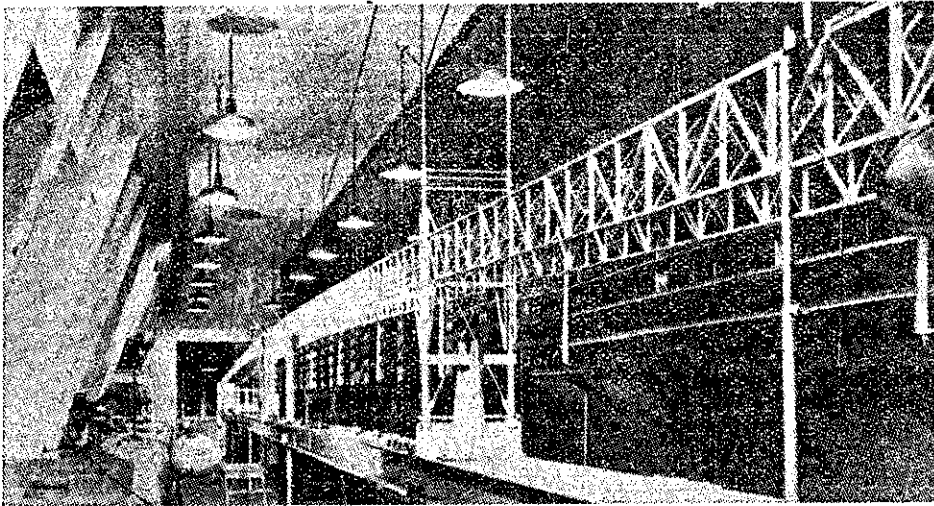


又筆者は揚力の発生は不利なりと考へ、可動橋等によく見受けられる如き Steel grating を車道部に採用する事をやはり一昨年提案致したのであるが、此の効果を實驗的に確かめ精しい寸法等を決定する迄には當時の事情として出来なかつたのである。結論的には大體前記の式に準據し大體に於てトラスの補剛構に steel grating の床を車道部に用ふると云ふ事を考へて居つたわけである。以上の他に補剛桁の局部的な捩屈と全體としての捩れ捩屈との關係をも考へて居る事を附記する。

4. 再建 Tacoma 橋

米國に於ては吹出孔 100 呎×10 呎、最高風速 120 哩/時なる特殊風洞(寫眞-1)を作り 4 年間に亘る入念な實驗的研究が行はれたのである。使用模型の縮尺は 1:50 である故、Tacoma 橋の場合には側徑間をも含めて全長約 100 呎の模型となるのであつて、之を 4 ヶの水壓機で支持し上下の移動を自由にしてあるのであつて、戰時中とは云へ扇風器程度の超小型風洞さへ作り得なかつた我々の場合に比し感慨なきを得ないのである。

寫眞-1.



この風洞の信頼性を檢する爲に一應 Tacoma 舊橋の模型に就いて實驗を行つた所満足すべき程度であつた事が記載せられて居るが精しい數字的報告には缺けて居るのは残念である。舊橋の模型の死荷重を 80% 増して實驗せるも其効果が現はれなかつた模様であるが筆者の計算に依れば之は限界風速を 16% 程度高めるだけである。

實驗を行ふ前迄は主として撓み振動が研究對照と豫見せられて居つた模様であるが、實驗の進行と共に豫期に反して捩り振動が支配的である事が認められた事は注目すべき點であらう。

新設計を得る爲に作られた立體的模型は縮尺 1:50 のものでトラス當りの慣性モーメント $0.5 \times I$ は $19 \times 10^6 \text{吋}^4$ から $140 \times 10^6 \text{吋}^4$ の値に相當する範圍の間に變化し得る様工夫せられ、補剛桁の撓み剛性 EI を色々變へて其の影響を實驗して居る模様である。死荷重の方は既存の橋脚を再使用する上から又經濟上からも限度があり、橋梁幅員も橋脚再使用上よりのみならず交通量の關係からも、むやみに大きくする事は出来ない爲比較的自由に撰定し得られるのは Tacoma 橋に關する限りは EI である。猶舊橋の $0.5 \times I$ は $1.85 \times 10^6 \text{吋}^4$ である故相當大幅の I の増大を考へて居るわけである。後で一括して申上げる如く再建築に於ては死荷重及幅員は夫々約 50% 増しとなつて居る。

この様な模型について實驗した結果トラス當りの慣性モーメントは一躍舊橋の 38 倍たる $68.5 \times 10^6 \text{吋}^4$ であるが、記載せられて居る實驗は 19×10^6 , 65×10^6 , 72×10^6 及び $120 \times 10^6 \text{吋}^4$ のものに就いてである。上記の數値中 19×10^6 は筆者が昭和 17 年に發表した最初の關係式より算出せる數値に偶然一致して居る事を附記したい。

實驗結果に依ると、 $65 \times 10^6 \text{吋}^4$ と云ふ慣性モーメントの模型は先づ水平方向の風ならば 120 哩/時迄の風速に

對しては安定である事が窺はれる。120哩/時なる風速は風洞の限界風速であるも、風壓係数を0.64と考へた時の風壓30封度/呎²に相當する風速は96哩/時なる事を御想起願ひたいのである。

所が風の補剛桁に對する迎角(風方向と橋床となす角)が安定性に重大なる影響ある事が實驗的に明かにせられた爲、架橋地點の風向を調べた所上向5~6度の風が豫期せられるので之ではかゝる方向の風に對してはまだ安全とは云へないのである。こゝに於て實用上安全風速範圍を0~100哩/時、迎角安定範圍を±15度と設計の目盛をきめて居る様である。

然る時、次に取り得る手段は一言で申せば更に強い構造とするか、又は振動の原因となるものを除去するかの何れかになるわけであるが、彼等は其後者を撰んだのである。實際慣性モーメントを約2倍の $120 \times 10^5 \text{吋}^4$ にしても安定性を改善するに至らなかつた模様であるが、計算上よりも之は限界風速を17%高める程度である。

其處で更に實驗を進め、所謂攪亂力が主として橋床にある事をつきとめ、橋床の一部にOpen gratingを挿入し攪亂力の減殺に成功したのであるが、本法は筆者の提案と其主旨に於て一致するのである。寫眞-2はSmoke testの狀況。實施設計は前掲の圖-2の如きスロットが各車線の間に橋面全長に亘り設けられ、必要にして充分なるスロットの幅は部分的な小型模型につき實驗的に決定した模様である。

又再建案ではトラスはボ-型であり下側對風構は設けられて無い模様であるが、上下兩面に對風構を設けると振れに對する安定性が増すことが實驗的に認められて居るが、之は振れ剛性の増減の他に弦材の局部挫屈の影響もあるものと推定せられるのである。

之を要するに實驗結果を要約すれば、一トラス當りの慣性モーメントが $65 \times 10^5 \text{吋}^4$ で橋床としてコンクリート・スラブの如き閉床構造のものは水平方向の風に関する限り120哩/時位迄の風速に對しては安全と認められるが、現場の狀況より要求せられる上下15度づゝの迎角の風に對しては未だ安全とは云へないのである。そこで更に構造強度を上げる事は經濟上制約せられる爲Open gratingを橋床に挿入し振動原因となる力を弱め好結果を得たわけである。

以上の如き實驗的検討を経て、實施設計として得られたものが圖-2である。要點を摘記すれば、

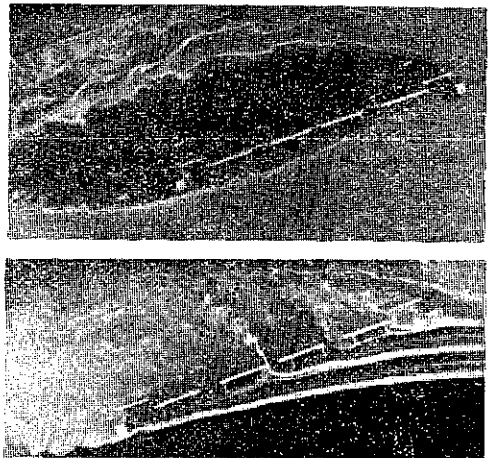
- 補剛鉸桁 → 補剛トラス
- 桁高 → 33呎
- EIの増大率 38倍
- 幅員 39呎 → 60呎(4車線)
- 死荷重の増大率 50%
- Open gratingの採用
- f/l 1/12 → 1/10

即ち補剛桁がトラス化せられ舊橋に於て8呎の鉸桁が一躍桁高33呎のトラスとなつた爲剛性の増大は實に38倍に達して居るのである。一トラス當りの慣性モーメントは $68.5 \times 10^5 \text{吋}^4$ であるが、今試みに筆者が昭和19年に一應實用的算式として提案した前掲の式に依り必要な慣性モーメントを算出すれば、

$$\frac{1}{2}I = 65.8 \times 10^5 \text{吋}^4$$

で偶然にも再建案の其に近似して居るを見る。(舊橋のは $1.85 \times 10^5 \text{吋}^4$)従つて筆者の式は少くともかゝる程度の吊橋については實用性あるものと認められるのである。猶試みに前掲の式の左邊の數値を算出致すと、

寫眞-2.



Tacoma 舊	Tacoma 新	Whitstone
0.36	52.1	13.3

次に再建築に於ては總ての部材の側方曝露面積を小にする様配慮せられたる由なるも、之も前記の式から要求せられる所である。f/l は 1/12 より 1/10 になつて居り拱矢 f としては多少増して居るが、之は多分死荷重の増大による水平張力の増加を防ぐ爲の措置と考へられるのである。

猶流體力學的モーメント係數の響影についても述べたいのであるが、之等の詳細は改めて論文集に於て述べる積りである。

フォンタナ・ダムの餘水路

序 言

フォンタナ・ダム (小 Tennessee 河 N. C.) の餘水路はバケツ型水叩の原理を應用して成功した一例である。E. N. R. Nov. 1945 の記事 Energy Dissipation at Fontana Spillway に基きその概要を説明する。

Fontana Dam (小 Tennessee 河) の余水吐隧道は、是まで大余水路に度々用ひられて成功を収めたバケツ型水叩の原理を應用したものであるが、第一に落差が 400 呎もあり、その爲に流速が毎秒 150 呎にも達すること、第二に流量が一時に集中すると云ふ點で Boulder Dam に次ぐものであること、第三に余水吐隧道の出口が自然流路の中心線の方角に向つてゐないことの爲、是までのものと趣を異にしてゐる。この余水路は、左岸に 1:1 勾配の傾斜隧道を二本掘り、その下部を二本の工専用假排水隧道に連絡させて是を利用してゐる。余水口は四箇のテンターゲート (35' × 35') で調節せられ、各隧道の上部は漏斗狀に開いてゐて、余水口並びにゲートの天端から 120 呎下にある水門から流入する水を受けてゐる。それから下は直徑 34 呎のコンクリート巻隧道である。隧道の終端で高速度の流水を自然流路にもどしてやるのであるが、此處に於て流水の有する非常に大きなエネルギーを放散させなくてはならない。余水路は 182,000 立方呎を放流出来る様に設計してあるが、25,000 立方呎以上を放流することは滅多にないであらう。設計に當つては、T. V. A. 所屬研究所で色々模型試験が行なはれた。最初隧道の出口が河岸線に斜に開いてゐて、直接自然流路に注ぐものに就て試験が行なはれたが、河水の停留部に大きな渦を生じ、是が隧道の出口の所まで非常な速度で歸つて來て、構造物の周圍に洗堀を生ぜしめる爲思はしい結果が得られなかつた。此の悪條件を克服する爲に、隧道の出口にバケツを取付けて射出する水流の方向を曲げ、噴射水を河水の停留部に幅廣く散布させる方法を考へた。そこで噴射水に上下左右の色々な角度を與へ、又色々な擴がりや與へる形のバケツに就て模型試験が行なはれた。そして放流量の總ての範圍に亘つて最も良い結果を與へる様なバケツの形と河水停留部の形が採用された。バケツの作用を正確に豫測するには、模型及び實物の速度を正確に知ることが必要である。此の問題に關し綿密な實驗が行はれた結果、最大放流量の時に長い方の隧道では毎秒 142 呎、短い方の隧道では毎秒 147 呎であると云ふことが分つた。噴射流による河床の洗堀に關しては、模型試験では單にその傾向を知ることしか出来なかつたが、各隧道の流量を 25,000 立方呎とすれば、河床が安定するまでに 35 呎掘下げられると云ふことが示された。

各バケツは長さ 82 呎、幅 65 呎、高さ 17 呎のコンクリート塊で、これに水路が刻込まれてゐる。その水路は隧道の出口で半圓形斷面を有し、下流端は幅の廣い水平な層狀となつてゐる。各コンクリート塊の大きさは夫々 2,300 立方碼及 4,500 立方碼である。このバケツは隧道から射出する水流を水平方向及鉛直方向に灣曲させ河水の停留部にエネルギーを放散させる範圍を擴げてゐる。放流量が最大の時、噴射水は空中に 150 呎吹 (14 頁へ續く)