

旧Tacoma橋桁断面における異種空力振動間の干渉効果に関する研究

京都大学工学研究科
京都大学工学研究科
京都大学大学院

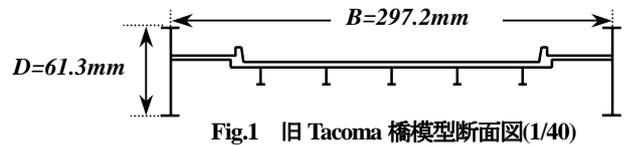
正会員 ○八木 知己
正会員 白土 博通
学生員 江口 陽紀

京都大学工学研究科
三菱重工業(株)
京都大学工学部

フェロー 松本 勝
正会員 四條 利久磨¹⁾
学生員 玉置 斉
1)研究当時京都大学大学院

1. 序論 1940年11月7日、当時世界第3位の支間長であった旧Tacoma橋は風速19m/sで落橋し、その直接の原因はねじれフラッターであるとされている。Farquharsonの文献¹⁾には、ねじれ振動の開始5分前には風速18.7m/sで、振動数0.6Hzの対称5次鉛直たわみ振動が発生しており、その後突然、振動数0.23Hzの逆対称1次のねじれフラッターへと移行し、落橋に至ったと記されている。落橋事故後のFarquharson等による一連の風洞実験による調査結果では、構造減衰 $\delta=0.034$ においてフラッター限界風速は無次元風速で2.34とされており、これを実風速に換算すると6m/s強となり、旧Tacoma橋は19m/sよりはるかに低い風速域において落橋するのが当然であったことになる。これは当時の実橋の構造減衰にもよるが、なぜ旧Tacoma橋は19m/sの風速にまで耐えることが出来たのか、疑問が生じる。当時の状況を考慮すると、鉛直たわみ振動とねじれ振動の間に空力的干渉が生じ、その結果として旧Tacoma橋のフラッター限界風速が大幅に引き上げられたという可能性が考えられる。

本研究では、上記の観点より旧Tacoma橋が落橋に至った経緯を改めて検証し、異種モード振動間における空力干渉機構を明らかにすることを目的としている。そこで旧Tacoma橋の2次元剛体模型（Fig.1参照）を対象に、バネ支持自由振動状態風洞実験を行い、鉛直たわみ振動とねじれ振動間の空力干渉現象の把握を試みた。



2. 異種空力振動の干渉効果

Fig.2にスクルートン数による応答変化特性を示す。なお、a)及びb)には、本研究におけるたわみ1自由度及びねじれ1自由度自由振動実験結果に加えて、F.B.Farquharson, Karman&Dunn等による過去の実験結果も併せて示す。また、c)には本研究におけるたわみ・ねじれ各1自由度の自由振動実験結果を重ねてプロットしたものを示している。更にd)にはたわみの対称5次モード及びねじれの逆対称1次モードを対象とし振動数比を $f_n/f_\phi \cong 2.5$ とした2自由度自由振動実験結果を示している。

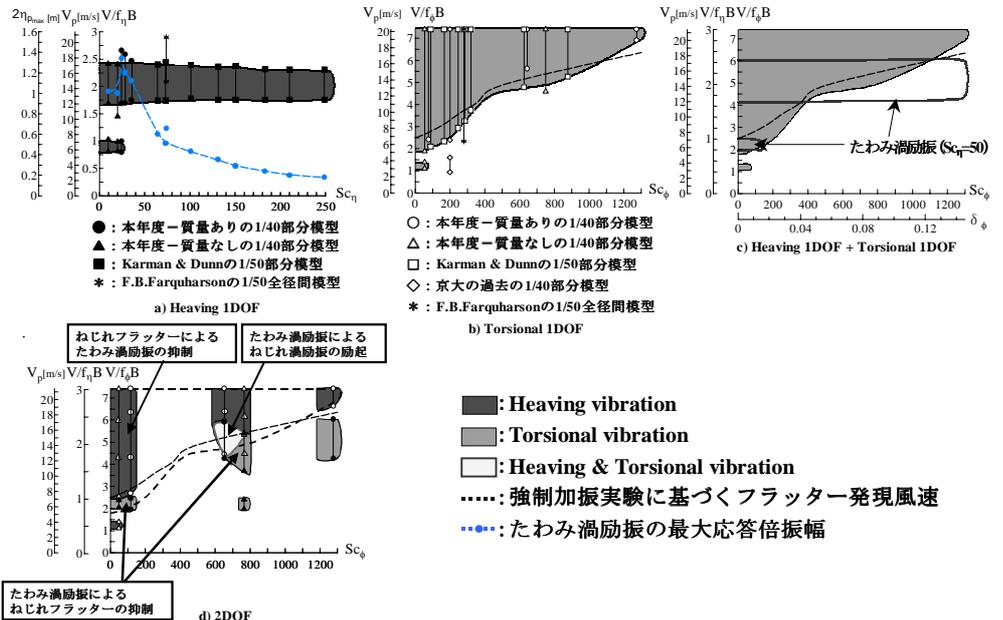


Fig.2 スクルートン数による応答変化特性

c)において鉛直たわみ振動とねじれ振動の発現風速域が大きく重なっている部分があるが、この部分においてたわみ振動とねじれ振動間における、異種空力干渉現象が起こる可能性が高いと考えられる。本研究においては、d)に示すような3つの大きな干渉が起こっている。以下2.1及び2.2において、たわみ渦励振によりねじれ渦励振が励起される干渉、及びたわみ渦励振とねじれフラッター間の干渉に関する考察について示す。

キーワード：旧 Tacoma 橋, 空力干渉, 渦励振, ねじれフラッター
連絡先：京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻気圏工学講座
〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL：075-753-5093 FAX：075-761-0646

2.1 たわみ渦励振によりねじれ渦励振が励起される干渉 $Sc_\phi=650$ のときに、ねじれ1自由度では発現しなかったねじれ振動が、たわみ・ねじれ2自由度系では、たわみ渦励振との干渉により励起されるという、これまでに例を見ない空力振動干渉が確認された。そのときの波形をFig.3に示す。Fig.3のようにたわみの下向き最大とねじれの頭上げ最大がほぼ一致し、これからねじれの1周期後には、たわみの上向き最大とねじれの頭上げ最大がほぼ一致する。つまり、鉛直たわみ振動5周期とねじれ振動2周期で元の状態に戻り、この間に鉛直たわみ振動の励振力となっている前縁剥離渦及び後縁剥離渦が、ねじれ振動の励起力にもなっていると類推される。

2.2 たわみ渦励振とねじれフラッター間の干渉 たわみ渦励振は、その発現開始風速より1せん断層不安定性による渦励振と考えられる。一方Fig.4にねじれ1自由度系におけるV-A- δ 特性を示すが、Fig.4より $V/f_\phi B=5.0\sim 5.3$ において渦の影響と考えられる低減領域が確認できる。これより、ねじれフラッターのうち低風速域は渦主導による低風速ねじれフラッターで、高風速域は剥離バブル主導による高風速ねじれフラッターであると考えられる。ここでFig.2 d)に示した、たわみ渦励振とねじれフラッター間の干渉について考えると、たわみ渦励振及び渦に起因した低風速ねじれフラッターの発生風速域が重なる場合には、ねじれフラッターがたわみ渦励振により抑制されていると考えられる。一方、たわみ渦励振と剥離バブルに起因した高風速ねじれフラッターが干渉する場合には、たわみ渦励振がねじれフラッターによって抑制されると考えられる。

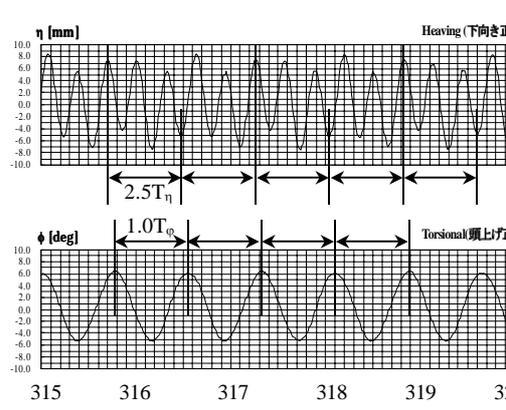


Fig.3 たわみ・ねじれ同時振動時の波形

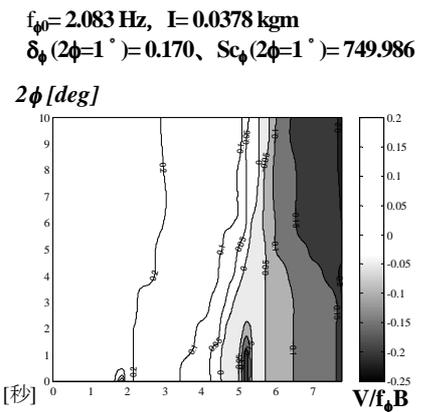


Fig.4 ねじれ1自由度系のV-A- δ 特性

3.実橋の落橋時の応答

旧Tacoma橋は落橋時に、ねじれフラッターの発現前にたわみ渦励振が発現していたことから、Fig.2 c)よりねじれの構造減衰は0.045～0.122であったと考えられる。落橋時の経緯は、最初にたわみ渦励振が発現し、その後風速が高くなりねじれフラッターの発現風速域に達したが、このときはたわみ渦励振が卓越しており、またねじれフラッターも低風速ねじれフラッターであったために、たわみ渦励振に抑制されたと考えられる。そして、さらに風速が上がりたわみ渦励振の発現域を越えたためにねじれフラッターが発現した、もしくはねじれフラッターが渦によるものから剥離バブルによるものに変化したために、ねじれフラッターが発現し落橋したと考えられるが、いずれにせよねじれフラッターの発現開始風速は17m/s前後であったと推測される。これは落橋時の風速である19m/sと多少異なっているが、当時の報告書には風向についての正確なデータは残っておらず、落橋時の風速は疑問視される。更に旧Tacoma橋はタコマ海峡に対し20°程度の角度で架橋されていたことから、風速を橋軸直角方向に直すと17.5m/s程度となり本研究の結果とほぼ一致することが判明した。これは仮説ではあるが、落橋と風洞実験結果を結びつけることが可能であると思われる。

4.結論 本研究で対象とした旧Tacoma橋桁断面において以下の3つの空力干渉現象が存在した。

- 1) たわみ渦励振がねじれ渦励振を励起する空力干渉
- 2) たわみ渦励振がねじれフラッターを抑制する空力干渉
- 3) ねじれフラッターがたわみ渦励振を抑制する空力干渉

現在の二次元剛体模型実験による耐風安定性評価は、同次モードの鉛直たわみ振動及びねじれ振動を対象に検討されており、明石海峡大橋やメッシナ橋等のように渦励振の発現がみられない場合には、鉛直たわみ振動とねじれ振動間の異種空力干渉現象は問題にならないと考えられる。しかし近年、経済性から注目されている少数桁断面等、渦励振の発現が危険視される桁断面では、耐風安定性検討において同次モードのみならず、異種モードの振動を対象に検討が行われる必要性が示唆される。

参考文献

- 1) F.B.Farquharson(1949):"Aerodynamic Stability of Suspension Bridges, Part I～IV".