

白鳥大橋主塔の面内方向振動に関する風洞実験と数値流体解析の適用

東京大学 学生員
東京大学 正会員

小林 寿彦
ムハマド・サーワー

東京大学 フェロー
東京大学 正会員

○ 藤野陽三
水谷 司

1. まえがき

北海道室蘭市に位置する白鳥大橋では、1998年の開通以来常時モニタリングが行われている。そこで得られた強風時のデータを解析したところ、主塔の塔面内方向の振動に関して、図1に示すように、特定の風速域において、加速度振幅が大きい調和的な振動(図2)が見出された¹⁾。ここでは、0.6Hzと0.8Hzの2種類の振動モードがあり、それぞれの卓越する風速域は13～18m/s、20～25m/s、風向帯は振動モードに関わらず、橋軸直角方向からおおよそ $\pm 8^\circ \sim 30^\circ$ となる。完成系の吊橋主塔において、このような振動が観測されるのは初めてであり、橋梁の空力振動という点から大変興味深いデータであると言える。本稿では、風洞実験と数値流体解析を用いて、白鳥大橋主塔での風方向振動の原因と特性について検討する。

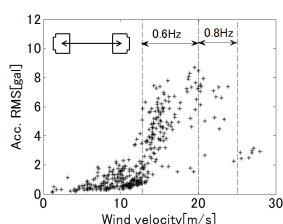


図-1 現地での風速と加速度応答

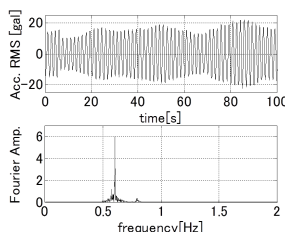


図-2 代表的な時刻歴応答とパワースペクトル

2. 風洞実験

(1) 実験概要

実験は東京大学風工学実験室の境界層風洞にて行った。図3は使用した供試模型である。スケール比1/30、代表長さとして実主塔の7割の高さにあたる部分の長さを採用し、鉛直方向に一様断面をもつ2次元角柱模型とした。また、流れ方向にのみ振動するように弾性支持とした。模型の変位と、下流柱前面での気流の計測を行い、キーエンス社のレーザ変位計 IL-300、DNATEC社の熱線風速計を用いた。サンプリング周波数は1000Hzである。

(2) 実験結果

各風向における、風速と振幅の関係を図4にまとめた。ただし、風速と変位ともに無次元で表わしており、振幅は計測した60秒間のRMS値である。迎角0度においては、振幅が顕著になる風速域がほぼ確認できないが、迎角9度より無次元風速9.0付近で振幅が大きくなっていることが確認できる。それ以降の風向帯においても、10度～20度にお

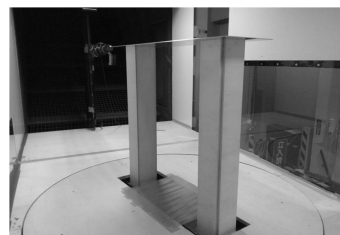


図-3 風洞実験にて使用した模型 (1:30)

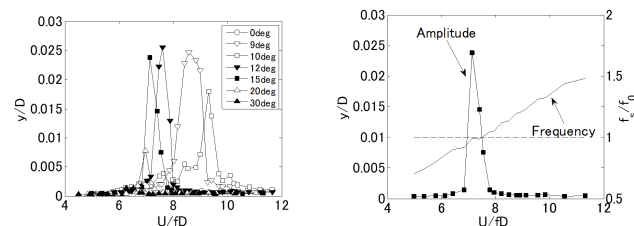


図-4 実験結果での各風向における風速と振幅の関係
図-5 迎角15°での振幅と気流の卓越振動数の関係

いて振幅が増大している風速域がある。しかし、迎角30度に達すると、振幅の増大する風速域が顕著でなくなる。また、振幅が増大する風速域については、迎角が10度より大きくなると、無次元風速で7.0～8.0に収まっていることが確認できる。図5より、振幅が大きくなる風速域においては、渦の卓越振動数と模型の固有振動数が一致していることが確認できる(ロックイン)。したがって、着目している風方向振動の原因として、上流柱で剥離した渦が下流中に衝突していることが推測される。

(3) 考察

得られた風洞実験結果においては、振幅の増大する風向帯が限定的である点に関しては、実験においても再現されている。限定的な風速域については、St数がおおよそ0.14に落ち着くことから、この値を用いて、風方向振動が卓越する実風速を求める。なお、St数については、実主塔と供試模型で以下の関係が成り立つ。

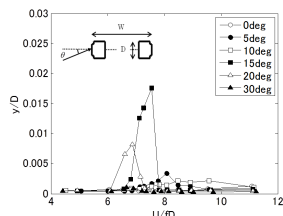
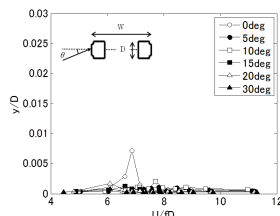
$$St = \frac{f_{\text{real}} D_{\text{real}}}{U_{\text{real}}} = \frac{f_{\text{model}} D_{\text{model}}}{U_{\text{model}}} \quad (1)$$

すると、0.6Hzが卓越する風速は、16.4m/s、0.8Hzが卓越する風速は21.9m/sと求まり、実現象との対応が見て取れる。しかし、応答については、実測の加速度より得られ

Key Words: 面内方向振動, 風洞実験, 渦励振, 数値流体解析

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 TEL 03(5841)6099

る最大の無次元振幅がおおよそ 0.003 であるのに対し、実験結果では 0.03 となっており実測よりも 1 桁大きい。実際には主塔の挙動に影響を与えるであろうケーブルや桁を考慮していないためであると思われる。また、図 6, 7 には、角柱間隔比 $W/D = 5.43, 5.10$ の結果を示した。特定の角柱間隔比においてのみ面内方向振動が生じることが示唆できる。

図-6 $W/D=5.43$ の実験結果図-7 $W/D=5.10$ の実験結果

3. 数値流体解析

(1) 数値解析モデル

本研究における解析領域を図 8 に示した。中央に並列角柱を配置し、風洞実験の特性を再現するために $100D \times 90D$ の 2 次元の解析領域とした。なお、ムービングメッシュを用いることで、図中の四角で囲まれた部分が移動可能領域となっている。両側面において周期境界条件を用いており、常に一定の風向、風速が並列角柱に作用している。その上で、文献²⁾を参考に、次式の振動方程式を Newmark- β 法を用いて角柱の変位等を求めている。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = Fd(t) \quad (2)$$

ここで、 m は質量、 c は粘性係数、 k はバネ定数、 $Fd(t)$ はモデルに生じる力である。なお、乱流モデルにはせん断応力輸送モデル (SST) モデル³⁾を用いた。

(2) 解析結果

図 9 には、迎角 0, 9 度の解析結果を示した。まず、9 度については、振幅こそ実験値より小さい値を示すものの、振幅の大きくなる風速域をとらえることができている。また、0 度においても、風洞実験とほぼ一致していることが確認できる。さらに、2 つの角度の解析結果を比較しても、迎角の変化に伴う、振動の発生の特性おおよそ同じ傾向を確認できる。

図 10 には、迎角 9 度、無次元風速 $V_r = 8.6$ における瞬間の渦度分布を示した。図においては、上流柱より剥離して下流柱に衝突するであろう渦を確認できる。これは、風洞実験結果より推測された点である。また、同様に上流柱後方にも渦の存在も確認できる。上流柱前面にはほぼ一定の風圧が作用していると考えられ、後方の渦と合わせて考えれば、上流柱においても振動を励起させる力が発生して

いると思われる。そこで、上流柱、下流柱に作用する力のうち、その変動成分の時刻歴応答を図 11 に示した。図 11 より、下流柱だけでなく上流柱においても振動を引き起こす力が発生していることが分かる。したがって、風洞実験結果と共に考慮すれば、面内方向振動のメカニズムとして、下流柱の位置によってフローパターンが決定し、両角柱において振動を励起させる力が発生していると考えられる。

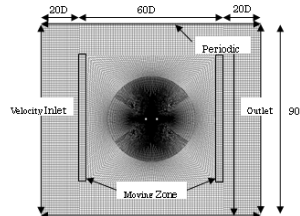


図-8 計算領域と境界条件

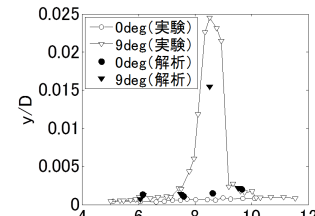


図-9 解析結果と風洞実験の比較

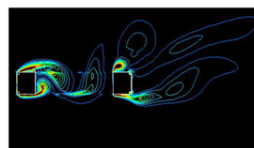


図-10 瞬間の渦度分布

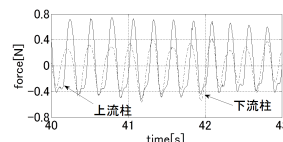


図-11 両角柱に作用する力の応答

4. 結論

白鳥大橋主塔での面内方向振動に関して風洞実験と数値流体解析を用いて検討を行い、以下の結論を得た。

- 風洞実験より、限定的な風速域、風向帯に関して実データとの整合性を示した。
- 模型の振幅が大きくなる際には、ロックイン状態にあることを示した。
- 2 次元の数値流体解析を用いて、風洞実験の一部を再現し、流れの構造の可視化を行い、上流柱においても振動を励起させる力が発生していることを示した。

謝辞: 本研究における数値流体解析においては、東京大学工学系研究科石原孟教授に貴重なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Dionysius M. Siringoringo and Yozo Fujino.: Observed along-wind vibration of a suspension bridge tower, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.103, pp.107-121, 2012.
- 2) M. W. Sarwar and T. Ishihara: Numerical study on suppression of vortex-induced vibrations of box girder bridge-section by aerodynamic counter measures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.98, pp.701-711, 2010.
- 3) F. R. Menter: Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA-Journal*, Vol.32(8), pp.269-289, 1994.