

流体-構造物連成解析による上下線分離桁の空力特性評価の試み

阪神高速道路 正会員 ○川田 歩美, 正会員 杉山 裕樹, 正会員 伊佐 政晃
近畿大学 野田 博, 風工学研究所 大坪 和広, 立花 卓巳
名古屋工業大学 正会員 野中 哲也, 地震工学研究開発センター 正会員 坂本 佳子

1. はじめに

大阪湾岸道路西伸部に計画している世界最大規模の多径間連続斜張橋(図-1)は、主桁形式として鋼1箱桁の上下線分離構造を想定している。本形式は国内外において事例が少なく、別途実施した風洞試験¹⁾においてたわみ1自由度の渦励振を確認したものの、その発生メカニズムや主桁周りの流れ場は未解明な部分が多い。本論文では流体-構造物連成解析により主桁に生じる渦励振を再現し、上下線分離構造の空力特性の評価を試みる。

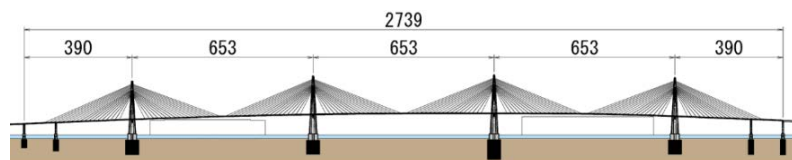


図-1 対象橋梁一般図

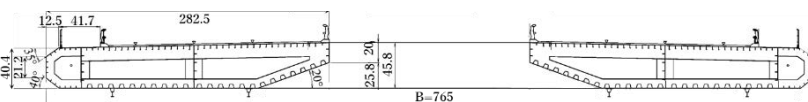


図-2 模型断面（スパン長 1354, 単位:mm, 縮尺 1/60）

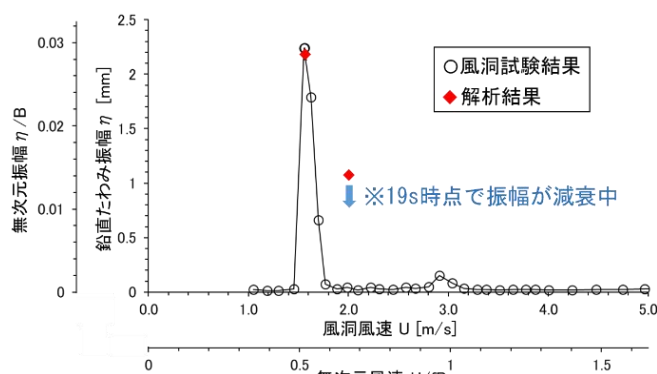


図-3 たわみ1自由度試験 V-A 図

2. 検討対象の主桁に生じる渦励振

開回路式風洞（閉塞型）において、図-2 に示す橋梁断面模型を用いて、鉛直1自由度バネ支持自由振動実験を行った¹⁾。耐風安定性向上のため、箱桁内側（主塔側）は下面を切り欠く形とし、外側は台形のフェアリングを設けている。試験により得られた自由振動応答（一様流、迎角 0° ）を図-3に示す。風洞風速 1.6m/s 付近で振幅のピークを有する渦励振振動が見られた。以降ではこの渦励振について、解析上で再現を試みる。

3. 流体-構造物連成解析の実施条件

数値流体計算は有限体積法とし計算コードは OpenFOAM (V2106) を使用した。乱流モデルは標準 Smagorinsky モデルによる LES とした²⁾。対流項の離散化は TVD スキーム (limitedLinearV), 時間進行は 2 次精度後退差分 (backward) を用いた³⁾。解析領域と解析モデルの概要を図-4に示す。解析モデルには風洞模型と同様、車両用防護柵や管理用高欄、検査車レール等の付属物も再現する。計算格子は対象構造物に近づくに従って 4 段階の 8 分木法により細分化し、桁周りの格子解像度は 2mm（桁高 D に対し 20 分割）に設定した。高欄等の付属物周りには更にもう 1 段階細分化し、付属物周りの格子解像度は 1mm とした。解析格子数は約 5900 万となった。時間刻みは 1.0×10^{-4} とし、初期振幅として与えた 3mm の振動振幅が収束するまで自由振動計算を実施する。入力風速は渦励振発現風速の 1.6m/s に加え、高風速側の 2.0m/s を設定した。流体と構造物の連成計算は、数値流体計算コード (OpenFOAM-V2106) と筆者らが開発した弾塑性有限変位解析コード

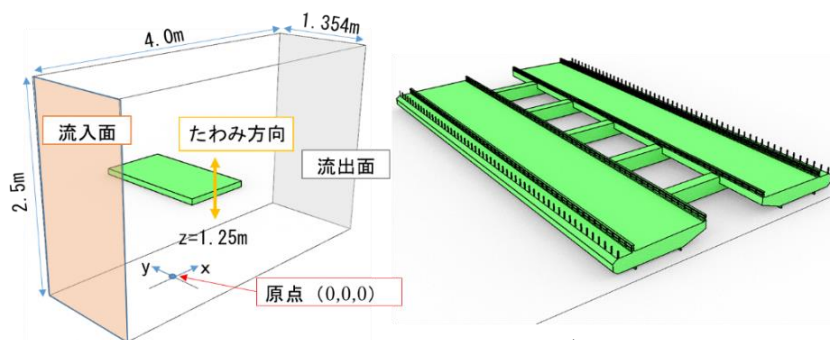


図-4 解析領域と解析モデル

キーワード 耐風設計, 数値流体解析, 上下線分離桁, 主桁風洞試験, 渦励振

連絡先 〒650-0023 神戸市中央区栄町通一丁目 2-10 阪神高速道路(株) 神戸建設部 TEL 078-331-9831

(Sean-FEM)を連成させて行った。数値流体計算の計算格子変形は、計算格子の変位ベクトルのラプラス方程式を解いて変形させた。

4. 解析結果と渦励振発生メカニズムの考察

解析結果による風洞風速 1.6m/s, 2.0m/s の振動振幅を図-3 中に赤プロットで示す。風速 1.6m/s の結果において振幅は 2.2mm に収束しており、実験結果のピーク振幅値と整合する結果である。風速 2.0m/s は風洞時間 19 秒時点で振幅値が収束しきっていないものの、風速 1.6m/s の結果と比べ振幅が急速に減衰し、振幅値も小さいため、実験と整合した傾向を示すと予想される。

渦励振起振源の特定を目的とし、主桁を部位ごとに分割して、仕事量の算出を行う。

$$W(t) = C_y(t)\dot{y}(t)dt \quad (1)$$

ここで、 W :仕事量、 C_y :鉛直方向風力、 $\dot{y}$:鉛直方向速度、 dt :時間刻み、である。図-5 上に番号で示す分離桁端部に着目した仕事量を、渦励振の無次元振幅とともに図-5 下に示す。主桁の上向きの変位に伴い、下流側箱桁の内側端部(③)に他部位と比較して大きな仕事量が発生している。位相も渦励振振幅と概ね合致するため、③が渦励振の励振力に大きく寄与していることがわかる。

分離桁周りの流れ場を可視化するため、次式により無次元化した圧力係数 C_p を算出する。

$$C_p = p/(0.5\rho u^2) \quad (2)$$

ここで、 C_p :圧力係数、 p :圧力、 ρ :空気密度、 u :流入風速、である。③で最大の仕事量を記録する時点(16.09 秒)と、その前後(16.05 秒, 16.13 秒)の圧力場を図-6 に示す。16.05 秒では③の下面で正圧、上面で負圧が発生している。上面の負圧は、上流側箱桁の内側端部の車両用防護柵から発生した渦が、下流側箱桁の内側端部の車両用防護柵に衝突し、③上面で渦がさらに発達するため発生していると推察される。主桁の上向きの変位に伴い、16.09 秒では③上面の渦が発達し負圧が大きくなり、これに伴って③下面での正圧も大きくなる。③で仕事量の低下が見られる 16.13 秒では、③上面の渦が端部から下流側に移流している。これらの結果から、分離桁の振動応答は渦の発生周期、桁の固有周期に加え、分離桁間の距離、分離桁間での渦の剥離、付着状況が風力特性に影響すると予想される。

5. まとめ

風洞試験で確認された上下線分離構造の連続斜張橋主桁の渦励振を流体-構造物連成解析で再現した。渦励振の発生メカニズムの考察として主桁の部位ごとの仕事量の算出を行った結果、下流側箱桁の内側端部が渦励振の励振力に大きく寄与することを示唆した。また主桁周りの圧力場の可視化より、上流側箱桁の内側端部から生じた渦は下流側箱桁の内側端部に衝突し、下流側箱桁上面に強い負圧を引き起こすことが分かった。

参考文献

- 1) 杉山他：多径間連続斜張橋における分離二箱桁断面の耐風性検討，風工学シンポジウム講演梗概集 No.27, 2022.
- 2) 土木学会：橋梁の耐風設計における数値流体解析ガイドライン，2023.
- 3) 株式会社テラバイト：OpenFOAM ライブラリーリファレンス，2020.

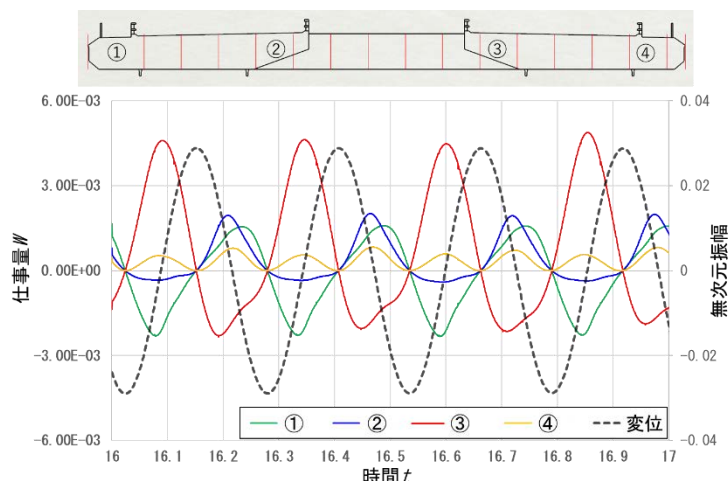


図-5 主桁の部位ごとの仕事量算出

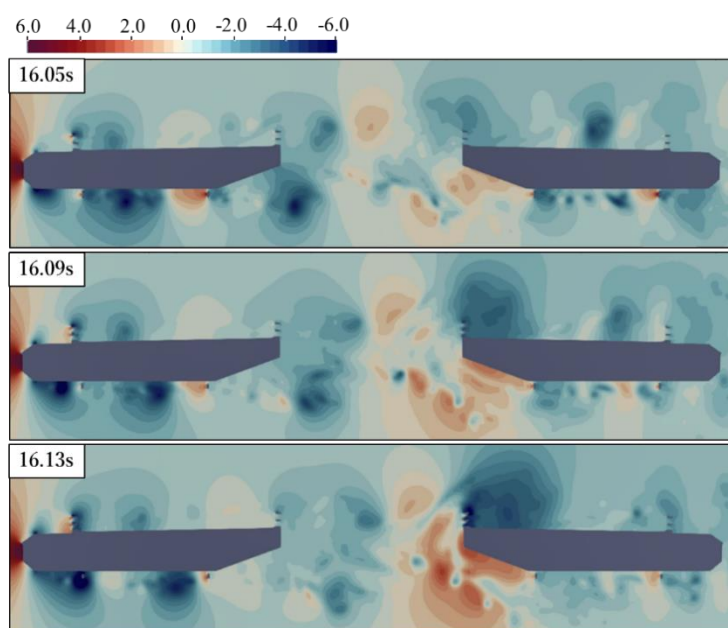


図-6 主桁周りの圧力場（圧力係数 C_p ）