

東京湾アクアライン橋梁部における車両の強風時安定性に関する数値シミュレーション

横浜国立大学

学生会員 ○武藤 秀人

正会員 金 恵英

フェロー 藤野 陽三

正会員 シリンゴリンゴ ディオン

フェロー 勝地 弘

フェロー 山田 均

1. 研究目的

車両の走行を阻害する要因として横風があげられる。橋梁上では横風の影響を受けやすく、強風時に横転事故が発生している。東京湾アクアラインでは過去 2 件強風により横転事故が発生しており、10 分間平均風速 20m/s 以上の場合に通行規制が行なわれている。そこで本研究では東京湾アクアラインの桁上に車両が載った状態に対し数値流体解析を行い、桁上の車両に対する空力係数を算出する。次に車両の安定解析モデルにその結果を外力として入力し、不安定現象である横転、ヨーイングの発生風速を求める。以上のプロセスを通して強風時の東京湾アクアライン上での車両の不安定現象について議論する。

2. 数値流体解析

本研究では橋桁に車両を載せた複合モデルを対象と

して 3 次元非定常流体解析を行った。乱流モデルは $k-\omega$ SST モデルを使用した。Re 数は 28000 で、メッシュの数は約 1000 万とした。本研究ではアクアラインの橋桁モデル上に空荷の中型トラックを想定したモデルを載せて数値流体解析を行う。本研究では桁高、車線位置、車高が桁上の車両の空力係数に与える影響を調査する。数値流体解析を行うケース一覧を図 1 に示す。なお本研究では車線位置の名称を風上側から順に Lane1 から Lane4 と定義する。桁高を 2 種類行う理由はアクアラインは変断面であるので、スパン中央部（桁高 6.2m、辺長比 $B/D=3.7$ ）と橋脚付近（桁高 10.7m、辺長比 $B/D=2.1$ ）の比較を行うためである。また車高は法律で限界とされている 3.8m と 3.5m を比較する。解析の結果を示すにあたり車両に対する空力係数を定義する。各空力係数、空力モーメント係数は以下の式(1)の通りに定義する。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_F}, C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_S}, C_S = \frac{F_S}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_S}, C_{MR} = \frac{M_R}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_S h}, C_{MY} = \frac{M_Y}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_S h}, C_{MP} = \frac{M_P}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_S h} \quad (1)$$

$F_D, F_L, F_S, M_R, M_Y, M_P$ は抗力、揚力、横力、ローリングモーメント、ヨーイングモーメント、ピッチングモーメント、 $C_D, C_L, C_S, C_{MR}, C_{MY}, C_{MP}$ は各空気力とモーメントを無次元化した係数である。 ρ は空気密度、 U は風速、 A_S, A_F は車両の側面積と正面積、 h は荷台高さである。

桁高について比較を行う。薄桁高と厚桁高モデル周辺の流れ場の様子を図 2 に示す。薄桁高モデルでは風上側高欄部にて流れが加速されて発生したせん断層が車両側面に衝突しているのに対して、厚桁高モデルではせん断層の位置が高く車両上部を通過しているのが確認できる。そのため空力係数は薄桁高モデルの方が不安定現象に対して不利な状態を示した。よって東京湾アクアラインではスパン中央部が危険であることが分かった。以降の解析では薄桁高モデルを基本とする。

次に車線位置について空力係数を比較する。図 3 は横軸に時刻、縦

キーワード 横風, 限界風速, 橋桁-車両モデル, CFD, 車両安定性

連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL 045-339-4243 FAX 045-348-4565

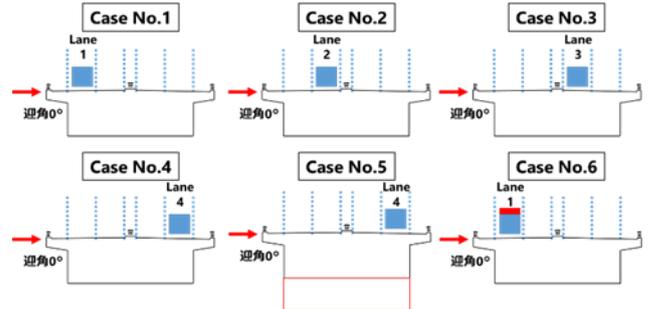


図 1 解析ケース一覧

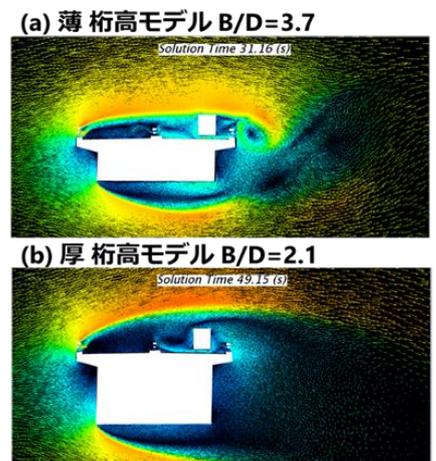


図 2 桁高の違いと流れ場

軸に C_S, C_{MR}, C_{MY} を示したものである。図3を見るとどの係数についても風上側 Lane1 の値が最も不利な値を示しており、値がほぼ一定値に推移している。対して他の風下側の車線では値の変動がみられ、その振幅は Lane4 に向かうほど大きくなっている。

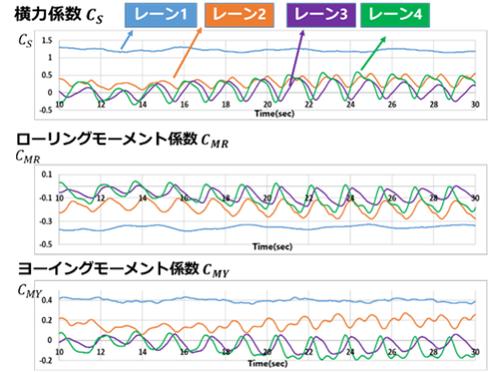


図3 各車線の空力係数の比較

3. 車両の安定解析

次に車両の安定解析を行い、車両が不安定状態になる時の風速を求める。本研究では不安定状態として横転と車両が平面内で回転するヨーイングを扱う。本研究では Dionysius ら^[1]の車両モデルを用いて車両の安定解析を行う。このモデルは車体と各車輪の5質点7自由度運動方程式を解き、各車輪に働く垂直抗力を求める。数値流体解析で得た空力係数から風荷重を求め、車両の重心部分(C_oG)に载荷することで東京湾アクアライン上での車両の運動を検証する。横転は車輪が浮き上がることで発生する。そのため垂直抗力のいずれかが0以下となった場合に車輪が浮き上がり、横転が発生するとみなす。

$$N_{ij} < 0 \tag{2}$$

ここで N は垂直抗力を表す。添え字の $i(i = 1, 2)$ は車両の前後を意味し、1は前輪、2は後輪を表す。同様に $j(j = 1, 2)$ は車両の左右を意味し、1は左、2は右を表す。式(2)を満たす時の風速の最小値が横転発生の限界風速である。ヨーイングは車輪が滑ることによって発生するので、車輪に働く摩擦力に注目する。摩擦力と外力の関係を整理すると不安定条件は式で次のように表せる。

$$\begin{aligned} \mu(N_{11} + N_{12}) &< F_{x11} + F_{x12}, \\ \mu(N_{21} + N_{22}) &< F_{x21} + F_{x22} \end{aligned} \tag{3}$$

μ は静止摩擦係数で、本研究では台風時の濡れた路面を想定して0.4とした。 F_{xij} は各車輪に対して働く横方向の力である。式(3)を満たす時の風速の最小値がヨーイング発生の限界風速である。

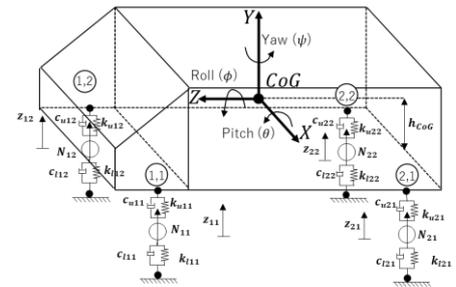


図4 車両安定解析モデル

表1 不安定現象限界風速

| Case No. | 車線位置 | 桁高 | 車高 (m) | 迎角 | 横転限界風速 (m/s) | ヨーイング限界風速 (m/s) |
|----------|------|----|--------|----|--------------|-----------------|
| 1 | レーン1 | 薄 | 3.5 | 0° | 23.9 | 19.9 |
| 2 | レーン2 | 薄 | 3.5 | 0° | 28.6 | 26.1 |
| 3 | レーン3 | 薄 | 3.5 | 0° | 37.9 | 32.8 |
| 4 | レーン4 | 薄 | 3.5 | 0° | 35.0 | 29.2 |
| 5 | レーン4 | 厚 | 3.5 | 0° | 43.8 | 84.4 |
| 6 | レーン1 | 薄 | 3.8 | 0° | 21.6 | 18.1 |

表1に車両の安定解析から求めた横転とヨーイング発生の限界風速を示す。表1から薄桁高モデルではどの車線においてもヨーイングの限界風速の方が横転の限界風速よりも低く、不安定状態は先にヨーイングが発現すると言える。車高が高い場合は風を受ける面積が大きくなるため限界風速が低下した。車線位置で比較すると限界風速は風上側の Lane1 で最も低く、Lane3 を最大として、風下側に向かうにつれて大きくなる傾向がある。よって上り線、下り線での実際の走行を考えると桁の内側の車線（追い越し車線）が安全と言える。

4. 結論

本研究では数値流体解析により、東京湾アクアライン桁上の車両に対する空力係数を算出した。その結果を用いて車両の安定解析を行い、アクアライン上での車両の運動を記述し、横転、ヨーイングが発生する時の限界風速を求めた。両解析において桁高、車線位置、車高を変えることで各諸元が車両の安定性に与える影響を示した。その結果、横転よりもヨーイングの限界風速の方が低く起こりやすいことが分かった。また、限界風速は風上側の車線に向かうほど小さくなり、危険性が高いことが分かった。

参考文献

[1] Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino: Lateral Stability of Vehicles Crossing a Bridge during an Earthquake, Journal of Bridge Engineering, Vol.23, No.4, pp1-22, 2018