

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04659

研究課題名（和文）強風時の橋梁上の車両安定性解析と合理的交通規制法の提案

研究課題名（英文）Study on Stability of Vehicles on Bridges under Strong Winds by Numerical Simulation

研究代表者

金 恵英（Kim, Haeyoung）

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・建設安全研究グループ・任期付研究員

研究者番号：80736439

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：車両の横滑りや横転事故を扱う上で横風による影響は重要な問題である。実際に強風時における橋梁上の車両横転事故は過去に多数報告されている。そこで本研究では、橋梁-車両まわりの流れ場を風洞実験と数値流体解析で再現し、横風により車両に働く空気力を求めることと、その空気力を外力として車両の動的運動モデルに入力し、車両が不安定となる時の風速を求めた。数値流体解析によって得られた車両に作用する空気力係数を、車両の動的運動方程式モデルに外力として入力することで、車両の安定解析を行い、対象の橋梁上の車両において、不安定現象が発現する限界風速を車線、車両重量、路面状態ごとに求めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、世界で多くの長大橋が建設され、海峡部における長大橋では横風の影響を受けやすいため、車両の走行安全性が風工学分野で重要な問題になっている。アメリカやイギリスでもある橋梁に対して、風速で一律で規制する日本よりは車種の規制などの細かな規制がなされているものの、日本と同様に規制基準が経験的に決められたものである。風工学分野では地面上の車両あるいは橋桁-車両まわりの流れ場を再現することで、車両に働く空気力だけに注目している。本研究では、乱流流入下での橋桁-車両まわりの流れ場を再現したことで、強風時の橋梁上の車両が不安定になる車両の動的な運動を考えた点に学術的な意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study describes a study on vehicle stability when crossing the bridges of Tokyo Aqua-line Expressway under strong crosswind. CFD was carried out to obtain the aerodynamic coefficients of vehicle on various lane position of bridge deck. Wind forces on the vehicle are computed based on aerodynamics coefficients for various wind speed. Using a 7-degree-of-freedom vehicle model, normal forces on the wheels are quantified. Two vehicle stability conditions were defined: critical rollover and critical rotation. The former is when one of the wheels lose contact force, while the latter is when lateral forces on one axle exceeds the rotation resistance provided by friction between wheel and road pavement. Wind speed limit associated with each critical condition is determined. Results show the windward lane has the smallest wind speed limit and critical rotation occurs earlier than rollover in any lane.

研究分野：風工学，構造工学

キーワード：横風 橋梁 車両不安定 空気力 数値流体解析 風洞実験 車両運動 横転

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2018年の台風20号、21号では関西地区で43件の横転事故が報告されている。また、2019年の台風15号でも横転事故が数多く起きていることから、強風時の車両の安全性の確保が重要な課題となっている。国内および海外では、風洞実験や数値流体解析により、ある橋梁に着目して車両の空気力係数を算出する研究がなされている。しかしながら、これらの研究では、空気力係数のみに着目しており、それが車両の運動にどう作用されるかなどの車両の不安定現象の系統的な研究はされていない。なお、東京アクアライン橋梁部で強風時に撮ったビデオ画像から、車線位置で挙動が異なることや耐風工学的に風の乱れによって橋桁断面周りの流れが大きく影響を受けることに着目する点が既往の研究とは異なり、また学術的にも特筆すべき点である。本研究では、橋梁上の車両に作用する横風の影響を分析し、横転メカニズムの分析、車種や車線の違いによる横転への影響の分析、さらには、それらの分析結果に基づく通行規制・解除の合理的な運用方法の提案を行う。

2. 研究の目的

1年間に平均6日、計50時間以上が強風のため閉鎖されている東京湾アクアラインを対象とした。アクアラインを主なる対象にしているが、方法や成果などは他の橋梁にも適用可能である。東京湾アクアラインは1997年に開通した川崎-木更津間を結ぶ東京湾を横断する道路である。その利用台数は一日約5万台と大きい重要な路線であり、首都圏で閉鎖がたびたび発生し、その社会-経済的影響が大きい。東京湾アクアラインの橋梁部は、海上にあるため強い横風を受ける環境にある。そのため橋梁部を走行中の車両の蛇行が頻繁に確認されるとともに、横風を原因とするトラックの横転事故が過去2件報告されている。このため、安全を考慮して東京湾アクアラインでは、1分間の風速の最大値を10分間記録し、その10個の値の平均値が20m/sを超える場合には通行止め規制を行っている。しかしながら、20m/sという規制値は経験的に決められた数値であり、また、普通車、大型車といった車種によらず一律となっているなど、真に走行車両の安全性に基づいた規制基準とは言い難い状況にある。以上の点から、強風時の橋梁上の車両周りの流れ解析とそれをもとにした車両横転の詳細な解析を行うことで、車両の横風安定性を定量的に評価し、合理的、客観的な規制基準を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究はⅠ.数値流体解析を用いて橋桁と車両周りの流れを再現し、車両に対する空力係数を計測するステップとその空力係数を用いてⅡ.車両の安定解析を行い、横転現象発生の限界風速を求めるステップにわかれる。なお、橋桁と車両まわりの流れ場を考慮し、Ⅲ.防風柵の設置などの空気力学的な対策を検討する。まず、空気力係数を算出するステップでは、東京アクアライン橋梁部の橋桁と中型のトラックのモデルを対象にLES(Large Eddy Simulation)解析を行う。その際に、車種、走行車線、風の迎角、風の乱れの影響などをパラメータとし、車両の空気力係数を算出する。次に、車両安定解析では、5質点7自由度の車両モデルに算出した空気力係数から風荷重を求め、外力として入力して車両安定解析を行う。

Ⅰ.数値流体解析 (LES 解析)

橋梁上の車両は橋桁の高欄から剥離したせん断流の影響を受け、車両回りは非定常性が強く乱れが大きい。この流れ場を再現するため、既存の研究(Binら³⁾)では、主にURANS(Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equation)で解析されているが、RANSの計算では風の乱れ成分が時間平均化されるため、剥離の影響を受け乱れ安い車両周りの流れ場を解析するには適していない

い。また、流入風の乱れは、橋桁からの剥離状況を変化させることから、乱流入力を用いることでより実橋に近い現象の再現を行う。流入風の非定常性、乱れの影響を考慮できる橋桁-車両モデルの LES 解析を行う。躯体的な研究スケジュールは以下のように実施する予定である。

1) 一様流入下での LES 解析 (2020 年度, 金担当): 車両まわりの流れ場は橋桁の流れに影響を受け、非定常性が強く乱れが大きくなっているため、3次元非定常 LES 解析を行う。流れの支配方程式は非圧縮性の Navier-Stokes 方程式と連続式であり、計算アルゴリズムは PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators)を用いる。乱流モデルは LES の標準 Smagorinsky モデルで一様流の流入し、解析を行う。その際に、車線、車高、風の迎角をパラメータとして、各ケースの車両の空気力係数を求める。

2) 検証: 風洞実験により、数値流体解析結果と比較し検証を行う。風洞実験では、橋桁上の車両回りの鉛直方向流測定、車両表面圧力測定試験および流れ場の可視化試験を行う。

II. 車両安定解析

従来の研究では、車両の不安定条件などを検討した事例がないことから、車両の安定解析により、車両が不安定になる横転と横滑りになる限界風速を求める。5 質点 7 自由の車両モデル(図 1)の運動方程式から得た垂直抗力に対して不安定条件を設定することで、横転、ヨーイング(横滑り)の発生を検証する。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。次に、ヨーイングは車輪が横方向に滑ることで車体が回転して発生するため、各車輪の摩擦力に注目する。摩擦力の合力が最大静止摩擦力を越えた場合にヨーイングが発生するとみなす。この不安定状態を図 2 に示す。

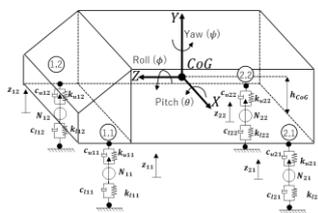


図 1 車両モデル

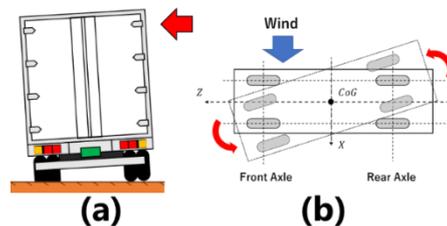


図 2 不安定状態 (a)横転 (b)ヨーイング

III. 車両種別ごとの安定解析と空気力学的な対策

対象になる車両は過去の車両横転事例から最も多かった空荷の中型トラックであるが、加えて乗用車、バスと大型トラックなども対象とし、車両種別ごとに安定解析を行う。橋桁上の車両回りの鉛直方向流分布と橋桁-車両まわりの流れ場を考慮した上での、防風柵の設置などの空気力学的な対策を検討する。

4. 研究成果

強風時の東京湾アクアライン橋梁部上の車両まわりの流れの再現と、車両に作用する空気力を求めるために、風洞実験と数値流体解析を行った。そして3次元数値流体解析によって得られたバス全体に作用する空気力を、車両の動的な安定問題に関する運動方程式モデルに外力として入力することで、車両の安定解析を行い、東京湾アクアライン上のバスにおいて、不安定現象である横転とヨーイングが発現する限界風速を求めた。次に、橋桁上の車両回りの鉛直方向流分布と橋桁-車両まわりの流れ場を考慮した上での、防風柵の設置などの空気力学的な対策を検討した。以下に得られた結論を延べる。

風洞実験

本研究では、風洞実験を行い、東京湾アクアライン上の様々なケースにおける車両に作用する圧力係数及び空気力係数を求め、車種、車線、相対角度(走行速度)、気流の違いから評価した。以下に風洞実験によって得られた結論を述べる。圧力測定の結果より、バスにおいては Lane1 で、(1) 中型・大型トラックでは Lane1 と Lane2 で橋桁高欄部からの剥離流の車両風上面への再付着が生じたと考えられる。また軽トラックにおいては低車高であるため、全車線で剥離流の下側に位置したと考えられる。

(2) Lane1 では剥離流の再付着による影響を受け、各空気力係数で概ね最大の平均値を示した。一方で後流側の車線になると、車両は剥離流の下方に位置すると考えられ、平均値は減少傾向を示した。また変動値は、Lane1 と比べ Lane2, 3, 4 で大きくなったが、これは後流側車線になるにつれ流れの乱れ成分が強くなることと、剥離流の下方に車両が位置するためであると考えられる。

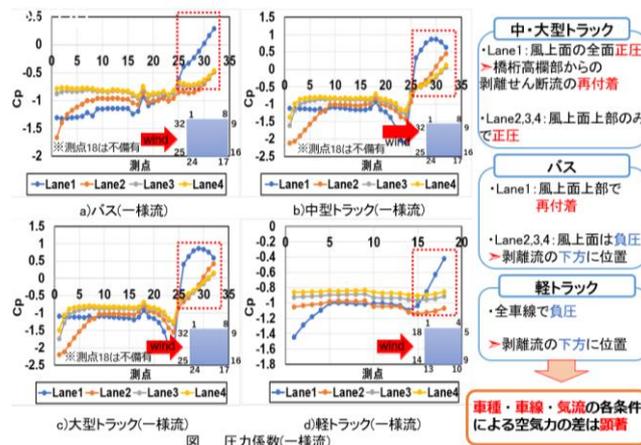
(3) 相対角度が小さくなる、すなわち車両の速度が増加するにしたがって、特に風下側車線で変化が見られ、どの車両においても Lane3, 4 において各空気力係数の絶対値は上昇した。

(4) 大型車両においては、車高が高い車両ほど剥離流の再付着による影響を強く受け、どの空気力係数においても平均値は一般に大きくなった。

(5) 乱流下では、橋梁端部からの剥離せん断流の高さが低くなる影響を受け、特に後流側車線の Lane3, 4 で各空気力係数の平均値が上昇し、一様流とは違う傾向を示した。

(6) 上記の (1) から (5) のように、風特性、車種、車線、相対角度(走行速度)ごとに圧力分布・各空気力係数の差は顕著であり、現行の様な規制基準に代わる車種別、車線別の合理的な通行規制基準を適用できる可能性が示されたといえる。風洞実験結果を以下の図表で示す。

圧力係数(車種・車線比較)



数値流体解析・車両の安定解析

本研究では、3次元数値流体解析によって、東京湾アクアライン橋梁上におけるトラックおよびバス周りの流れ場を再現し、バスモデルに作用する空気力特性を求めた。そしてその結果を用いて車両の安定解析を行い、横転及びヨーイングの発現する限界風速を求めた。以下に数値流体解析と車両の安定解析によって得られた結論を述べる。

(1) トラックとバスを対象とした橋桁一車両モデル数値流体解析の結果、最も風上側の Lane1 において、橋桁からの加速された剥離せん断流の再付着が風上面に生じた。一方で後流側車線である Lane2, 3, 4 では、剥離せん断流の下方に車両が位置する時間がほとんどであり、各車線で風洞実験と同様の結果を得た。

(2) 車線位置について比較すると、車両に作用する空気力係数は剥離流の再付着により Lane1 で最大の絶対値を示した。一方で風下側車線である Lane2, 3, 4 では大きな変動を示したが、流れ場を確認すると車両は剥離流の下方に位置しており、乱れの強い環境下にある事が分かった。

(3) 車両の安定解析によって得られた横転の限界風速は、最も風上側の車線の Lane1 で限界風速が最も低く

横転が起りやすい結果となった。また車両の重量が小さければ小さいほど限界風速は低くなり、横転が生じやすくなった。タイヤの垂直抗力の時刻歴を見ると、Lane1 では比較の変動は小さかったが、Lane2, 3, 4 の後流側車線では大きく変動し、この傾向は車線位置が風下側に向かうほど強くなった。これより横転に関して限界風速の値としては、Lane1 が最も危険側であるが、運転のしにくさを考慮すると変動の大きい Lane4 も危険であると考えられる。

(4)ヨーイングの限界風速においても、最も風上側の車線の Lane1 で限界風速が最も低い結果となった。また横転の限界風速と比較すると、湿潤、氷雪、凍結路面においては全車線でヨーイングの方が低い値となった。実際の状況を想定すると、台風などの路面の濡れと強風が同時に起こるような場合はヨーイングの方が起りやすいと考えられる。以下の図表に車両不安定解析結果を示す。

安定解析結果

> 限界風速(横転)

| 乗車率 | 0%(ドライパーのみ) | 50% | 100% | 中型T |
|--------------|-------------|-------|-------|------|
| 車両重量(kg) | 10420 | 12812 | 15205 | 3500 |
| 横転限界風速 (m/s) | | | | |
| Lane1 | 31.7 | 35.3 | 38.8 | 22.0 |
| Lane2 | 34.5 | 38.3 | 41.3 | 25.8 |
| Lane3 | 35.9 | 39.3 | 42.6 | 30.8 |
| Lane4 | 35.9 | 39.9 | 43.7 | 28.8 |

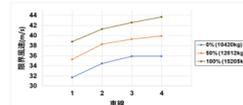


図 横転限界風速(バス)

- どの重量でもLane1で最も危険側の値
- 重量が低くなると横転のリスクは大

> 限界風速(ヨーイング)

| 静止摩擦係数 μ | 0.8 (乾燥) | 0.4 (湿潤) | 0.3 (氷雪) | 0.1 (凍結) | 0.4 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|------|
| ヨーイング限界風速 (m/s) | | | | | |
| Lane1 | 31.6 | 24.6 | 21.8 | 13.1 | 18.4 |
| Lane2 | 34.4 | 27.6 | 24.9 | 15.6 | 23.7 |
| Lane3 | 37.7 | 29.7 | 26.5 | 16.4 | 26.9 |
| Lane4 | 37.6 | 28.9 | 25.6 | 15.4 | 26.1 |

- どの路面状態でもLane1で最も危険側の値
- 路面状態が悪くなると…
- 横転よりもヨーイングが先に発生

> まとめ

台風等の強風・荒天時には、ヨーイングの方が横転よりも発生しやすい

台風時のバスの最低の限界風速は24.6m/s
→現行の通行止め(20m/s)よりも高い風速
→より高い風速での規制適用の可能性

中型トラックと比べ、全ケースで安全側の限界風速を示した

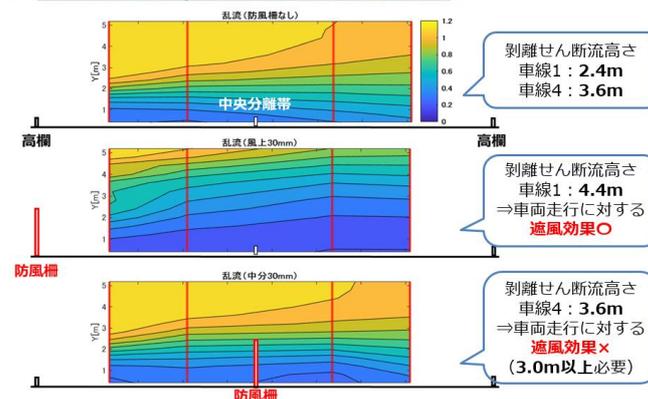
→車種別の交通規制を適用できる可能性

防風柵の検討：二次元部分模型による風洞実験

二次元橋桁模型実験により、防風柵の設置効果について検討した。その結果、風上側高欄に実寸で2.4mの防風柵を設置した際に、十分な効果が得られることを示した。乱流下で防風柵を設置しない場合の剥離せん断流の高さは、車線1で約2.4mであったのに対して、風上側高欄に実寸で2.4mの防風柵を設置した場合の剥離せん断流の高さは約4.4mであった。したがって、防風柵の設置により、車両高さにおける剥離せん断流外側の高風速の出現と、それに伴う風速変動が解消され、車両走行安全性を確保するうえで十分な遮風効果が得られることを示した。また、中央分離帯に防風柵を設置する場合、十分な遮風効果を得るためには、防風柵の高さを剥離せん断流よりも高い3.0m以上にする必要があり、景観等の観点から現実的ではないという結論に至った。以下に防風柵検討の結果を示す。

研究結果 (二次元模型による風洞実験)

> 風速比(平均風速/流入風速) : 乱流 ($I_u=7.8\%$)



剥離せん断流高さ
車線1 : 2.4m
車線4 : 3.6m

剥離せん断流高さ
車線1 : 4.4m
⇒車両走行に対する
遮風効果○

剥離せん断流高さ
車線4 : 3.6m
⇒車両走行に対する
遮風効果×
(3.0m以上必要)

防風柵の設置効果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 金 恵英, 村田 龍平, 金子 玲衣, 木村 吉郎, 勝地 弘 | 4. 巻 175 |
| 2. 論文標題 変断面箱桁橋梁上における横風特性の分析 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 日本風工学会誌 | 6. 最初と最後の頁 199, 120 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 山口 拓巳, 金 恵英, 木村 吉郎, 勝地 弘, 藤野 陽三 | 4. 巻 68A 巻 |
| 2. 論文標題 強風時の箱桁橋梁部上の各種車両に作用する空気力に関する研究 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 構造工学論文集 A | 6. 最初と最後の頁 263-274 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.68A.263 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 金 恵英 |
| 2. 発表標題 変断面箱桁橋梁上における横風特性の分析 |
| 3. 学会等名 日本風工学会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 金 恵英 |
| 2. 発表標題 強風時の箱桁橋梁部上の各種車両に作用する空気力に関する研究 |
| 3. 学会等名 構造工学シンポジウム |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 金 恵英 |
| 2. 発表標題 強風時における箱桁橋梁部での車両に作用する空気力に関する風洞実験 |
| 3. 学会等名 土木学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 勝地 弘 (Katsuchi Hiroshi) (80303080) | 横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・教授 (12701) | |
| 研究分担者 | 藤野 陽三 (Fujino Yozo) (20111560) | 横浜国立大学・先端科学高等研究院・名誉教授 (12701) | |
| 研究分担者 | シリングリンゴ ディオン (Siringoringo Dionysius) (60649507) | 横浜国立大学・先端科学高等研究院・特任教員(准教授) (12701) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|