技術・研究ノート

剥離干渉法によるトラックの抗力低減法に関する研究

Study on Reduction Method of Drag Force of a Truck Due to SIM

野田辰徳^{*1}

久保喜延^{*2}

木村吉郎^{*3}

加藤九州男^{*4}

Tatsunori NODA, Yoshinobu KUBO, Kichiro KIMURA, Kusuo KATO

key words: trailer truck, drag force, SIM(Separation Interference Method)

1. はじめに

現在、様々な物流を行うにあたってトラックによる輸送は欠かせないものであるが、トラックが排出するCO₂による地球温暖化の問題が懸念されている。またトラックの燃料となる石油は有限であり、燃料削減の面からも燃費の向上が求められている。トラックが走る際に受ける抗力を低減させることができれば、トラックがよりスムーズに走ることができ、燃費の向上につながる。

そこで、トラックが受ける抗力の低減手法として、剥離干渉法に着目した。剥離干渉法は橋梁の耐風性向上に用いられており¹⁾、正方形断面柱($B/D=1.0$, B : 断面幅, D : 断面高さ)および扁平矩形断面柱($B/D=8.0$)において抗力の低減が確認されている²⁾³⁾⁴⁾。本稿では、トラックを対象として、剥離干渉法による抗力低減効果およびその適用可能性について検討することを目的としている。

2. 既往の研究

2. 1 ドラッグフォイル

トラックが受ける抗力を低減させる手法として、実際に用いられている手法は、図1に示すドラッグフォイルと呼ばれるルーフ上のパーツをトラックの運転席上部に取り付ける方法である。ドラッグフォイルには

図1に示したように様々な形状のものがあ、ドラッグフォイルを取り付けないものと比較して、ドラッグフォイルがどの程度の抗力低減効果をもたらしているかということを確認しておく必要がある。

2. 2 剥離干渉法²⁾³⁾⁴⁾

本稿では、抗力を低減させる手法として剥離干渉法(SIM: Separation Interference Method)を用いる。剥離干渉法による効果は、静的な空気力(定常空気力)による静的現象においても、動的な空気力(非定常空気力)による動的現象においても確認されている。ここでは、静的な空気力である抗力に着目する。

(a)ドラッグフォイル A (b)ドラッグフォイル B

図1 ドラッグフォイル

*1 九州工業大学大学院工学府建設社会工学専攻 大学院生

Graduate Student, Department of Civil Engineering, Kyusyu Institute of Technology

*2 九州工業大学大学院工学府建設社会工学系 教授

Professor, Department of Civil Engineering, Kyusyu Institute of Technology

*3 九州工業大学大学院工学府建設社会工学系 准教授

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kyusyu Institute of Technology

*4 九州工業大学大学院工学府建設社会工学系 助教

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kyusyu Institute of Technology

(原稿受理年月日: 2009年11月2日, 採用決定: 2010年2月2日)

既往の研究²⁾³⁾⁴⁾により、正方形断面柱($B/D=1.0$)および扁平矩形断面柱($B/D=8.0$)において、剥離干渉法を適用した場合の抗力低減効果および耐風安定性向上メカニズムに関して、以下に示す知見が得られている。

(1) 抗力低減効果

辺長比 $B/D=1.0$ (B :断面幅, D :断面高さ, $B=D=50\text{mm}$) の正方形断面柱および $B/D=8.0$ の扁平矩形断面柱を基本断面として、断面の上下面にそれぞれ $0.2D$ の高さの鉛直板を設置し、基本断面の隅角部を1次剥離点、鉛直板端部を2次剥離点とし、剥離点間を結ぶ直線と断面上面からなる角度 θ を剥離干渉角と呼ぶ(図2参照)。

鉛直板の設置位置によって剥離干渉角 θ を 0° (基本断面:鉛直板なし)、 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° と変化させ、一様流中において三分力測定実験が行われた。また、風洞風速は $5.0\sim 9.0\text{m/s}$ の範囲において測定された。

辺長比 $B/D=1.0$ の正方形断面柱における抗力係数 C_D と気流迎角 α の関係を図3に示す。正方形断面柱である基本断面($\theta=0^\circ$)では、迎角 $\alpha=0^\circ$ において $C_D=2.30$ と

図2 剥離干渉法(SIM)の適用イメージ

図3 抗力係数特性($B/D=1.0$)³⁾

図4 抗力係数特性($B/D=8.0$)²⁾

なっているのに対し、 $\theta=40^\circ$ では $C_D=2.46$ と増加している。 $\theta=20^\circ\sim 35^\circ$ の範囲では θ が小さくなるに従って C_D は減少しており、 $\theta=20^\circ$ では $C_D=1.51$ と、基本断面($\theta=0^\circ$)の66%程度の値を示している。

辺長比 $B/D=8.0$ の扁平矩形断面柱の迎角 $\alpha=0^\circ$ における抗力係数 C_D と剥離干渉角 θ の関係を図4に示す。扁平矩形断面柱である基本断面($\theta=0^\circ$)では、 $C_D=1.29$ となっているのに対し、鉛直板を設置すると θ が小さくなるに従って C_D は減少しており、 $\theta=20^\circ$ では $C_D=1.10$ と、基本断面($\theta=0^\circ$)の85%程度の値を示している。

以上より、正方形および扁平矩形断面柱において、気流迎角 $\alpha=0^\circ$ における抗力係数 C_D は、剥離干渉角 θ が $20^\circ < \theta < 40^\circ$ の範囲においては、 θ が小さくなるに従い C_D も小さくなるという傾向が明らかにされている。

(2) 耐風安定性向上に関するメカニズム

剥離干渉法が有効に機能した場合(図5参照)、剥離点間において定常的な循環流が発生する。この循環流で発生する負圧によって、1次剥離点から発生した剥離流が引き寄せられ、剥離点間における剥離流が増速される。そして、増速された剥離流は2次剥離点に沿うように干渉し、剥離が小さく抑えられた状態で流下する。

このように剥離干渉法を用いることによって、完全剥離型断面柱では基本断面柱の場合よりも広い後流域を形成し、再付着型断面柱では流れの再付着化が促進された流れ場を形成する。また、剥離点間に発生する循環流によって鉛直板に負圧が作用することで、断面柱全体に作用する抗力を低減させる効果を発揮する。

3. 抗力測定実験

3.1 実験概要

抗力測定実験で用いたトラック模型の形状を図6に示す。模型の縮尺は1/12程度であり、模型はトラックの荷台長 L が短い場合(以後 Short type と呼ぶ: $L=518.0\text{mm}$)と長い場合(以後 Long type と呼ぶ: $L=775.0\text{mm}$)の2種類を用意した。また本稿では、上面剥離干渉角を θ_U 、側面剥離干渉角を θ_S とする。

図5 剥離干渉法(SIM)による効果のイメージ³⁾

実験は、図 6 に示す斜線部を脱着可能な部材とし、上面のみに剥離干渉法を適用したもの(図 7(a)), 既往の研究より循環流の発生が重要と考え、上面のみに剥離干渉法を適用し、さらに循環流の発生を促すために側板を設置したもの(図 7(b), (c)), 上面および側面に剥離干渉法を適用したもの($\theta_U=\theta_S$)(図 7(d))について、角度 θ_U , θ_S を 17.7° (基本形状: 脱着部材なし), 20.0° , 25.0° , 30.0° , 35.0° , 40.0° と変化させて行った。また、既に導入されているドラッグフォイルについて、図 1(a), (b) に示す形状をドラッグフォイル A, B(図 7(e), (f)) とし、どの程度の抗力低減効果をもたらしているかの確認を行った。風洞風速は $2.0\sim 10.0\text{m/s}$ の範囲において測定し、気流迎角は 0° とした。

図 6 抗力測定実験用模型形状(単位: mm)

図 7 実験ケース概略図

3. 2 実験結果および考察

図 8, 9 に Short type および Long type の抗力測定結果を、それぞれ縦軸に抗力係数 C_D , 横軸に上面剥離干渉角 θ_U (上面および側面に剥離干渉法を適用した場合は $\theta_U=\theta_S$) として示す。

図 8, 9 より、脱着部材や側板を設置しない最も基本的な形状(上面剥離干渉法 $\theta_U=17.7^\circ$)の場合、Short type で $C_D=1.00$, Long type で $C_D=1.01$ という値を示した。

上面のみに剥離干渉法を適用し、側板を設置しない場合と、四角形および三角形の側板を設置した場合とを比較すると、側板の形状に関わらず、側板を設置した場合の方が、抗力係数が大きくなっている。これは、側板を設置したことにより、トラック上面において側面方向への流れが遮られたためであると考えられる。上面のみに剥離干渉法を適用した場合においては、上面剥離干渉角が $\theta_U=20.0^\circ$ であり側板を設置しないケースにおいて、Short type で $C_D=0.98$ と最も抗力係数が小さい値を示した。

また、実際に導入されているドラッグフォイルについては、ドラッグフォイル A の方が抗力係数は小さい値を示す傾向にあり、Short type で $C_D=0.95$, Long type で $C_D=0.97$ という値を示した。最も基本的な形状(上

図 8 抗力係数と $\theta_U (= \theta_S)$ の関係(Short type)

図 9 抗力係数と $\theta_U (= \theta_S)$ の関係(Long type)

面剥離干渉法($\theta_L=17.7^\circ$)の場合と比較すると, Short type で 5%程度, Long type で 4%程度の抗力低減効果が得られていることが確認できた。

上面および側面に剥離干渉法を適用した場合においては, $\theta_L=\theta_S=30.0^\circ$ のケースで最も抗力係数の値が小さく, Short type で $C_D=0.83$, Long type で $C_D=0.81$ という値を示した。最も基本的な形状(上面剥離干渉法 $\theta_L=17.7^\circ$)の場合と比較すると, Short type で 17%程度, Long type で 20%程度の抗力低減効果が得られ, ドラッグフォイルよりも大きな抗力低減効果が得られている。

なお, 三角形側板を設置するケースについては, Short type の上面剥離干渉角 $\theta_L=20.0^\circ$ の実験結果より, 四角形の側板を設置する場合と抗力係数の値にさほど差がないことがわかる。また, 最も基本的な形状(上面剥離干渉法 $\theta_L=17.7^\circ$)の場合と比較して, 抗力が低減しなかった。Long type の上面のみに剥離干渉法を適用し, 側板を設置しないケースについては, Short type の実験結果より, 上面のみに剥離干渉法を適用した場合よりも, 上面および側面に適用した場合の方が抗力低減効果は得られた。このことは, Long type の場合も同様の傾向があると考えられる。以上より, 図 8, 9 において, プロットされていないケースは測定していない。

図 10 可視化実験撮影方向概略図

図 11 上面剥離干渉法 $\theta_L=17.7^\circ$ (基本形状)

図 12 上面剥離干渉法(四角形側板付) $\theta_L=17.7^\circ$

4. スモークワイヤー法による可視化実験

4. 1 実験概要

実験には, 縮尺が 1/30 程度の模型を用い, 可視化手法としてはスモークワイヤー法を用いた。実験時の風洞内風速は, 可視化映像が良好であった 0.6m/s とした。

実験ケースについては, 図 7 で示した中から, 最も基本的な形状である上面剥離干渉法 $\theta_L=17.7^\circ$, 上面剥離干渉法(四角形側板付) $\theta_L=17.7^\circ$ および $\theta_L=40.0^\circ$, 上面剥離干渉法(三角形側板付) $\theta_L=20.0^\circ$, 上面および側面剥離干渉法 $\theta_L=\theta_S=30.0^\circ$ について Short type, Long type を含めた計 9 ケースとし, それぞれ, 上流側と下流側に分けて可視化映像の撮影を行った。なお, 上面剥離干渉法(三角形側板付) $\theta_L=20.0^\circ$ については Short type の場合についてのみ実験を行った。

図 10 に可視化映像の撮影方向を示し, さらに破線でスリット光の照射位置を示す。本稿では, 流れの 3 次元性が考えられるため, トラック上面および側面の流れ特性をそれぞれ把握できるように側面側(図 10(a))からの撮影と, 上面側(図 10(b))からの撮影を行った。さらに上面側からの撮影については, 図 10(b)に示すように, 高さ方向について 3 つの異なる位置にスリット光を照射して撮影を行った。

4. 2 実験結果および考察

Short type と Long type の実験結果は同様の傾向を示したため, Short type の実験結果について示す。

図 13 上面剥離干渉法(三角形側板付) $\theta_L=20.0^\circ$

図 14 上面および側面剥離干渉法 $\theta_L=\theta_S=30.0^\circ$

図 15 上面剥離干渉法(四角形側板付) $\theta_L=40.0^\circ$

(1) 上面の流れ特性

図 11～15 に、トラック上面の流れ特性が把握できるように、側面側から撮影して得られた静止画を示す。

図 11 と図 12 より、最も基本的な形状(上面剥離干渉法 $\theta_U=17.7^\circ$)の場合(図 11)と、これに四角形の側板を設置した場合(図 12)とを比較すると、上面や模型後流の流れに明確な違いは見られない。つまり、今回撮影した位置においては、実験結果に側板の影響は見られないと考えられる。よって、ここでは側板の有無に関わらず、上面剥離干渉角 θ_U についての考察を行う。

図 11～15 のトラックの上面における流れに着目すると、 $\theta_U=20.0^\circ$ の場合(図 13)が最も剥離が小さく、滑らかに流下しており、 $\theta_U=40.0^\circ$ の場合(図 15)が最も剥離が大きく、乱れも大きいことがわかる。つまり、 $\theta_U=20.0^\circ$ の場合において、剥離点間において最も強い循環流が生じており、剥離流が増速されているということが考えられる。

以上の結果について、抗力測定結果と比較して考察すると、上面のみに剥離干渉法を適用した場合は、 $\theta_U=20.0^\circ$ のケースで最も抗力係数が小さく、 $\theta_U=40.0^\circ$ のケースで最も抗力係数が大きくなっている。つまり、 $\theta_U=20.0^\circ$ の場合において、最も強い循環流が生じており、この循環流によってトラックの荷台前面に大きな負圧が作用するため、抗力の低減効果が最も大きくなったことが推察される。

(a)照射位置① (b)照射位置② (c)照射位置③

図 16 スリット光照射位置の違いによる流れの違い
(上面剥離干渉法(四角形側板付) $\theta_U=17.7^\circ$)

(a)上流側 (b)下流側

図 17 上面剥離干渉法 $\theta_U=17.7^\circ$ (基本形状)

(a)上流側 (b)下流側

図 18 上面剥離干渉法(四角形側板付) $\theta_U=17.7^\circ$

また、図 11～15(b)のトラック背面における下面からの流れの巻き込みに着目すると、 $\theta_U=20.0^\circ$ の場合(図 13(b))が最もトラックから遠い位置で巻き込みが生じている。このことから、トラック下面側からの流れの巻き込み位置がトラックから離れることにより、背面に作用する負圧が回復し、抗力が小さくなったという可能性も考えられる。

(2) 側面の流れ特性

最も基本的な形状(上面剥離干渉法 $\theta_U=17.7^\circ$)に四角形の側板を設置した場合において、高さ方向について 3 つの異なる位置にスリット光を照射し、撮影して得られた静止画を図 16 に示す。これらより図 16 (c)の照射位置③では、トラック前面から側面への流れの様子を見ることができるが、照射位置①(図 16(a))および②(図 16(b))では、流れがトラックの上面方向へ流れており、照射位置における側面方向への流れの様子は撮影できず、側板周辺の流れの様子を見ることができなかった。よって本稿の実験方法では、側板の有無と抗力係数の関係について検討することができなかった。

図 17～20 に、トラック側面の流れ特性が把握できるように、スリット光を照射位置③にあてて、上面側から撮影して得られた静止画を示す。

図 17～19 より、上面のみに剥離干渉法を適用した場合においては、上面剥離干渉角 θ_U の違いに関わらず、側面における剥離の大きさや、流れの乱れにさほど差は見られない。一方、上面および側面に剥離干渉法を適用し、上面剥離干渉角 θ_U および側面剥離干渉角 θ_S を $\theta_U=\theta_S=30.0^\circ$ とした場合(図 20)に着目すると、上面のみに剥離干渉法を適用した場合よりも側面における流れの剥離が小さく、滑らかに流下していることがわかる。つまり、側面にも剥離干渉法を適用することにより、側面においても剥離点間に循環流が生じ、剥離流

(a)上流側 (b)下流側

図 19 上面剥離干渉法(四角形側板付) $\theta_U=40.0^\circ$

(a)上流側 (b)下流側

図 20 上面および側面剥離干渉法 $\theta_U=\theta_S=30.0^\circ$

が増速されていると考えられる。

以上より、上面および側面に剥離干渉法を適用した場合、上面のみだけではなく側面においても循環流が生じる。つまり、上面のみに剥離干渉法を適用した場合よりも側面にも剥離干渉法を適用した方が、循環流による負圧が作用する面積が広くなり、抗力係数がより小さい値を示したということが推察される。

また、図 17～20(b)のトラック背面における側面からの流れの巻き込みに着目すると、上面のみに剥離干渉法を適用した場合(図 17～19(b))よりも、上面および側面に剥離干渉法を適用した場合(図 20(b))の方がトラックから遠い位置で巻き込みが生じている。このことから、トラック側面からの流れの巻き込み位置がトラックから離れることにより、背面に作用する負圧が回復し、抗力が小さくなったという可能性も考えられる。

5. まとめ

本稿では、トラックが受ける抗力の低減手法として剥離干渉法に着目し、剥離干渉法による抗力低減効果およびその適用可能性に関して、抗力測定実験および可視化実験により検討した結果、以下のような結論を得た。

(1) 抗力特性

抗力測定実験では、上面のみに剥離干渉法を適用した場合においては、上面剥離干渉角が $\theta_U=20.0^\circ$ のケースにおいて、最も抗力低減効果を得ることができた。しかし、上面のみに剥離干渉法を適用しただけでは、ドラッグフォイル程の効果は得られなかった。

上面および側面に剥離干渉法を適用した結果、トラックの基本の形状より Short type で約 17%、Long type で約 20%の抗力低減効果を得た。これは、ドラッグフォイルの抗力低減率が約 5%であることと比較すると、その効果の大きさは明らかである。

(2) 流れ特性

可視化実験より、上面のみに剥離干渉法を適用し、上面剥離干渉角 θ_U を有効な角度にすることで、上面における剥離が小さくなることが確認された。これにより、剥離点間において循環流が生じているということが考えられ、この循環流によってトラックの荷台前面に大きな負圧が作用するために、抗力の低減効果が得られたと考えられる。さらに、上面および側面に剥離干渉法を適用した場合、側面剥離干渉角 θ_S を有効な角度にすることで、上面のみに剥離干渉法を適用した場合よりも、側面における剥離が小さくなることが確認

された。これにより、側面においても循環流が生じているということが考えられ、上面のみに剥離干渉法を適用した場合よりも側面にも剥離干渉法を適用した方が、負圧が作用する面積が広くなり、さらに抗力の低減効果が得られたと考えられる。また剥離干渉法を適用し、有効な剥離干渉角にすることで、後流における流れの巻き込み位置がより下流側となることが確認された。これにより、背面に作用する負圧が回復し、抗力が小さくなったという可能性も考えられる。

6. 導入するにあたっての課題

本稿で最も抗力係数の小さかった、上面と側面の両方において剥離干渉法を適用し、 $\theta_U=\theta_S=30.0^\circ$ にしたものを実際に導入するにあたり、現在のトラックで適用させることを考えると、トラックの側面に剥離干渉法に有効な大きさのパーツを取り付けなければならない。しかし、法律により車両の幅は 2.5m 以下と制限されているため、現在のトラックの幅をさらに広げることとは不可能である。また、運転席部の幅を狭くして剥離干渉法を適用させる方法では、トラック自体の設計・製造を改良する必要があるため、本研究の成果を実用化させるには、さらに時間を要すると考えられる。

尚、本稿の内容に関して、文献 5)に示すように特許申請されている。

参考文献

- 1) 久保喜延, 本多健二, 田崎賢治, 「剥離干渉効果による PC 斜張橋開断面桁の耐風性能改善法」, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp. 399-404, (1992)
- 2) 池田隼人, 久保喜延, 木村吉郎, 林田宏二, 「PIV による矩形柱の剥離干渉効果に関する研究」, 日本流体力学会年会 2006, AM06-02-0111, pp. 1-2, (2006)
- 3) 林田宏二, 久保喜延, 池田隼人, 野田辰徳, 「剥離干渉法による空力振動制振メカニズムに関する研究」, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp. 429-434, (2006)
- 4) 林田宏二, 久保喜延, 大窪一正, 池田隼人, 「各種矩形断面を対象とした剥離干渉法による空力弾性振動の制振メカニズム」, 日本風工学会論文集, vol.32, No. 4(No. 113), pp. 127-138, (2007)
- 5) 久保喜延, 「車両用の抗力低減装置及びこれを備えるトラック」, 特願 2007-336162