

◆ 長大橋特集 ◆

オープングレーチングの走行特性に関する試験

常田賢一* 濱田俊一** 森山 彰*** 池原圭一****

奥田 基***** 山田和彦***** 杉町直明*****

はじめに

全国総合開発計画では、多軸型の国土構造の形成を目標にした「21世紀の国土のグランドデザイン」を提示しているが、その基盤となる新たな交通軸を形成するため、長期的視点で海峡横断道路プロジェクトが検討されている。海峡横断道路プロジェクトでは、明石海峡大橋(中央支間 1,991m)を超える規模の橋梁が必要になる可能性もあり、今後はさらに高度な超長大橋の建設技術の開発と実現のための大幅な建設コストの縮減策が求められている。

オープングレーチングは、強風時の安定性と死荷重の軽減によるコスト縮減を図る上部構造の一つの技術として検討されているものであり、I型鋼や平鋼などを格子状などに組んだ開床式の床版である。既に海外ではマキノ橋(アメリカ合衆国、ミシガン州)や4月25日橋(ポルトガル、リスボン市)のように長大吊橋の走行車線に適用されている事例¹⁾もあるが、国内では小規模なものを除くと明石海峡大橋等の路肩や中央分離帯に適用されるに止まっており、走行車線へは本格的に適用されていないのが現状である。

国内のオープングレーチングに関する検討は、耐風性に関するものを除くとこれまでにあまり行われておらず、走行車線への適用のためには構造形式、疲労耐久性、走行安全性等の様々な課題を解決していく必要がある²⁾。そのため、オープングレーチングの構造形式等を検討する基礎的研究として、土木研究所と本州四国連絡橋公団は、平成9年度から車両の走行安全性に着目したオープングレーチングの表面形状に関する共同研究を開始しているが、本文ではすべり摩擦特性試験³⁾及び実車両(四輪車、二輪車)による走行性評価試験の結果を報告する。

1. すべり摩擦特性試験

1.1 新たな表面形状の検討

走行安全上の観点からオープングレーチングに

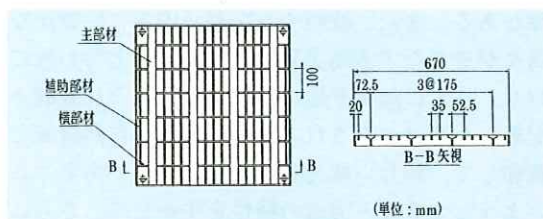


図-1 従来型オープングレーチング

求められる性能としては、

- ①雨天時であってもドライバーの持つ感覚に近い制動停止距離で安全に止まれること。
- ②雨天時であっても安定した車線変更ができること。
- ③制動時にあまりタイヤを傷めないこと。

が求められる。図-1は明石海峡大橋等で用いられている従来型のオープングレーチングであるが、走行方向の違い(図の上下方向と左右方向)によりすべり摩擦性能は変化すると考えられる。つまり、ブレーキをかけたときのすべり摩擦性能(縦すべり摩擦性能)は、図の左右方向に走行した方が補助部材が密に配置されているため、縦すべり面では左右方向の走行が適していると考えられる。それに対して、車線変更時のすべり摩擦性能(横すべり摩擦性能)は、図の上下方向に走行して車線変更した方が遠心力(横加速度)が働くタイヤに補助部材がかみ合うため、横すべり面では上下方向の走行が適していると考えられる。このように従来型は縦すべり及び横すべりの面で相反する優位性を示すと考えられるため、前述の①と②を両立させるためには、上下及び左右方向ともに同じ形状に改良するなどして必要な摩擦性能を確保することが必要になる。また、従来型であっても輪荷重を支える主部材が表面にある方が上部構造を一体型として成立させることができ、構造形式上は有利である。よって、従来型は主部材表面の加工や補助部材の配置を変える改良が必要になる。さらに、前述の③への対応としては、タイヤの進行に対して部材が常に斜めにあたるように斜材で構

成される構造や突起をあまり付けないような構造も考える必要がある。

また、一般的にタイヤの摩擦は、以下に起因していると言われ、乾燥路面では f_a が主体に働き、湿潤路面では f_b が主体で f_a も働くと言われている。また、 f_c については特定の条件にだけ働くと言われている⁴⁾。

f_a : 凝着によっておこるせん断の摩擦

f_b : ヒステリシス損失による摩擦

f_c : 突起への抵抗による摩擦

タイヤの摩擦機構の観点から、 f_a を向上させるためには、タイヤと接する面積を増やす必要があり、 f_b の場合はタイヤを削ることなくタイヤが種々に変形と復元を繰り返せるような工夫が必要であり、 f_c の場合は突起等を加工する必要がある。そのため、例えば部材間隔を変えるなどしてタイヤとの接地面積が増えることによる f_a への影響、斜材等を加えることによる f_b への影響、突起加工を変えることによる f_c への影響を確認する必要がある。

以上をもとに、すべり摩擦試験の実施に当たっては、すべり摩擦係数の大小を左右すると思われる表面形状や突起加工等を変えたオープングレーチングを試作した。試作品の主な概要は図-2 と以下に示すとおりである。

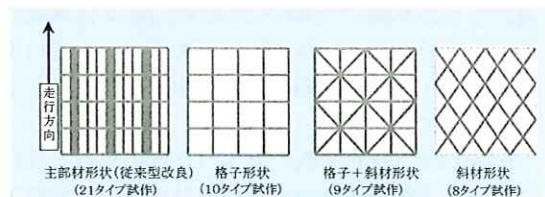


図-2 試作品の概要 (平面図)

- ・主部材形状：基本的に従来型を改良したものであるが、補助部材の配置や突起加工を変えた。また、主部材表面に模様を付けたり、主部材を 1cm 程度下げたりした。
- ・格子形状：格子間隔を 50mm, 75mm, 100mm とし、突起加工等を変えた。
- ・格子+斜材形状：格子間隔を 50mm, 75mm, 100mm とし、突起加工等を変えた。
- ・斜材形状：基本的に突起が少なく斜材のみで構成されるものであるが、斜材の組み方や部材間隔を変えた。

突起加工については、図-3 に示すものや突起をつけないものなどを試作した。なお、試作したオープングレーチングは 48 タイプであり、概ね

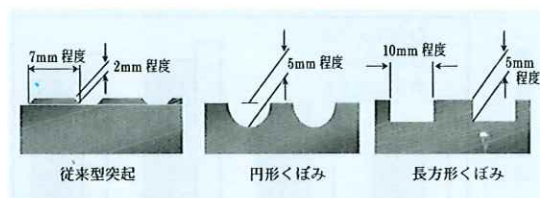


図-3 突起加工の例 (側面図)



写真-1 すべり摩擦測定車

70cmの正方形(高さ 44mm)のものを 3枚ずつ試作した。

1.2 試験概要

すべり摩擦試験は写真-1 に示すような第五輪を搭載したすべり摩擦測定車を用いて湿潤路面で行った。なお、第五輪の下にあるのが試作したオープングレーチングである。

すべり摩擦試験では、試験体延長 (3枚並べて約 2m) の制約から縦すべり摩擦抵抗力のみを測定したが、試験体の設置方向を変えてその違いを確認することでおおよその横すべり特性も判断した。すなわち、片方向の縦すべり摩擦係数が大きく、もう片方向の縦すべり摩擦係数が著しく低下する場合は、横すべり摩擦係数が小さくなる可能性があるかと判断した。また、測定速度についても試験体延長の制約から 20, 40, 60km/h の中低速度域で行った。

1.3 新たなオープングレーチングの基本的な摩擦特性

図-4 は同一の格子形状で突起の効果を比較したものであるが、突起により摩擦 (f_c) が大きく向上すること、従来型突起よりも円形や長方形くぼみの方が摩擦 (f_c) が大きくなることが確認できた。

図-5 は同一の格子間隔及び突起加工である格子形状と格子+斜材形状において、タイヤとの接地面積の違いによる影響を比較したものである。一般的にタイヤと接する面積が大きくなると摩擦 (f_a) も比例して大きくなるが、両者のオープングレーチングは同等の摩擦性能であった。また、同様に格子間隔を変えた条件 (50mm, 75mm, 100mm) でも

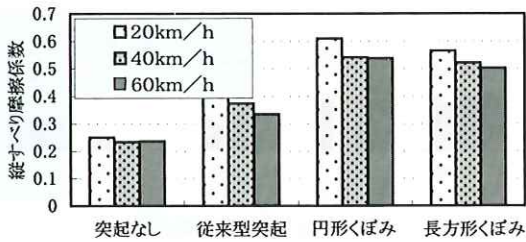


図-4 突起加工の比較 (格子形状, 格子間隔 75mm の場合)

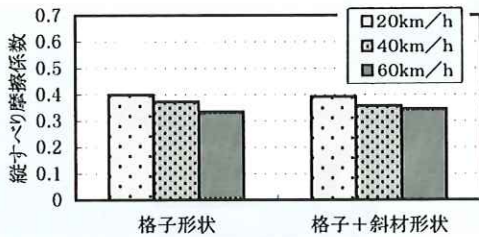


図-5 格子形状と格子+斜材形状の比較 (格子間隔 75mm, 従来型突起の場合)

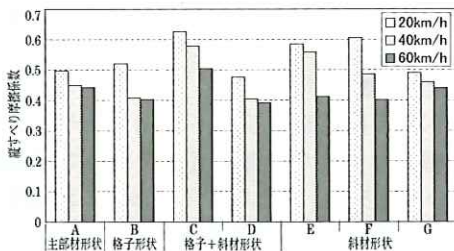


図-6 道路構造令の設計値を上回る摩擦性能のオープングレーティング

それぞれ同等の性能であった。よって、これらの格子を主体にした形状では、タイヤとの接地面積を増やしても摩擦 (fa) が向上しないことから、突起や横部材にタイヤが食い込む際に働く抵抗力が摩擦 (fc) の主体として働いていると考えられる。

この他にも、斜材形状はあまり突起を付けなくても比較的大きな摩擦が得られるケースがあることが確認された (図-6 の E, F, G)。この場合は斜材上をタイヤがスライドする際にタイヤが変形と復元を繰り返すことで発生するヒステリシス損失 (fb) が働いていると考えられる。また、主部材形状は全体的に摩擦が小さいが、主部材を 1cm 程度下げ、突起付きの補助部材を横や斜めに配置したケースで大きな摩擦が得られていた (図-6 の A)。

1.4 新たなオープングレーティングの摩擦性能

すべり摩擦試験の結果、試験体の設置方向を変えても両方向の縦すべり摩擦係数が道路構造令の設計値⁵⁾(制動停止視距を求める際に使われているすべり摩擦係数)を上回るものは、48 タイプ中 7 タイプであり、内訳は主部材形状が 1 タイプ、

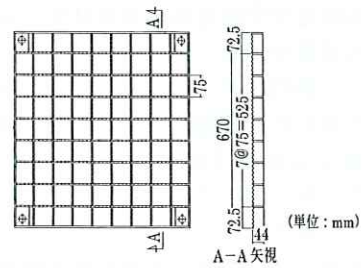


図-7 type14(図-6 の B)

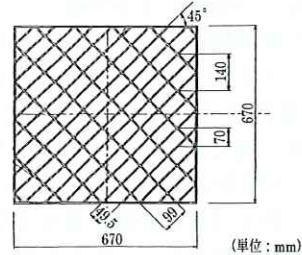


図-8 type27改 (図-6 の G)

格子形状が 1 タイプ、格子+斜材形状が 2 タイプ、斜材形状が 3 タイプであった (図-6)。それぞれの突起加工は A, B, C, D が円形くぼみで加工数が多く、E, F, G が長方形くぼみで加工数が少ない。よって、A, B, C, D は突起の作用 (fc)、E, F, G はヒステリシス損失 (fb) と突起 (fc) により高い摩擦が得られていると考えられる。図-6 のうち代表的なものを図-7 と図-8 に示す。図-7 は単純な格子構造であることから製作コストが最も安いタイプであり、図-8 は斜材形状の中で製作コストが安いタイプである。

type14 と type27 改の縦すべり摩擦係数と比較のために道路構造令の設計値及び平均的な密粒アスコンの値⁶⁾(文献 6) のバイアスタイヤの測定値をラジアルタイヤに補正した値)を図-9 に示す。

なお、type14 については 1.2 の試験後に、後述

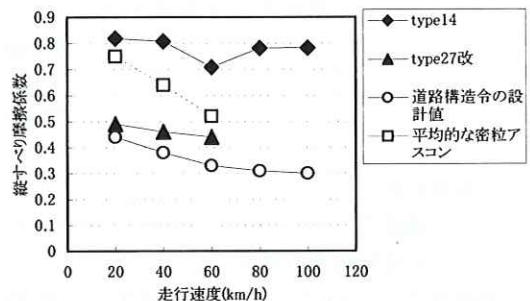


図-9 新たなオープングレーティングのすべり摩擦性能

の走行性評価試験用に幅 3.5m で延長 100m 長を用意したため、後に行った高速度域も含めたすべり摩擦試験の結果を示した。type14 は平均的な密粒アスコンよりも摩擦が大きく、乾燥状態の密粒アスコンのような摩擦が得られた。図-9 に示した縦すべり摩擦係数をもとに、初速度 60km/h からの制動停止距離を計算して比較すると、平均的な密粒アスコンが 23.5m であるのに対し、type14 は 18.1m、type27 改は 30.8m となるが、道路構造令では反応時間を除くと 34.8m で設計されており、設計値は満足している。また、type14 に関しては横すべり摩擦抵抗力も測定しているが、最大の横すべり摩擦係数も非常に大きく、全速度で 1.0 に近づく値が得られた。

図-9 に示した type14 は非常に大きな摩擦が得られたが、1.2 で行った事前調査では道路構造令の設計値をやや上回る程度の結果であった。事前調査の試験体は部材の交差部分が溶接により丸みを持っていたが、今回の試験体は交差部分にも突起がついていたため摩擦が大きくなったと思われる。このことから、部材の交差部分の突起は摩擦を大きく向上させる働きがあることがわかったが、理想としては平均的な密粒アスコン程度の摩擦が望ましいのではないかとと思われる。

2. テストドライバーによる走行性評価試験

2.1 試験概要

先の 1.4 で述べたように、type14(図-7) は縦及び横すべり摩擦係数が非常に大きいため、理論上は密粒アスコンよりも制動停止距離は短く、車線変更時にも大きな遠心力に耐えることができる。しかし、実際の走行では、車両に伝わる振動やハンドルから伝わる感覚などをドライバーがどのように感じ、また運転に支障があるかが問題になる。よって、走行時のフィーリング等を明らかにすることを目的に各種走行試験を行った。

写真-2 及び 3 は試験時の状況である。

2.2 試験条件

走行試験は以下の試験条件において、type14(Gr と略す) と密粒アスコン (As と略す) を対象に湿潤路面で行った

- ・試験車両：四輪車 (2500cc)、二輪車 (400cc)
- ・走行条件：直進、無理のない一般的な制動、車線変更
- ・速度条件：四輪車 40, 60, 80, 100km/h
二輪車 20, 40, 50km/h



写真-2 試験時の状況 (四輪車)



写真-3 試験時の状況 (二輪車)

- ・測定項目：上下・左右・前後加速度 (バネ上)
- ・ドライバー：テストドライバー 1 名
- ・フィーリング評価：以下のようなランク評価及びコメントを記入。

評価 3：走行上の問題なし

評価 2：多少気になるが、問題なし

評価 1：走行に注意が必要

評価 0：危険。何らかの規制が必要

なお、二輪車については type14 を事前に試走して走行安全上の限界となる速度を確認したところ、最大で 50km/h であった。

2.3 試験方法及び結果

2.3.1 直進走行試験

一定速度で直進走行し、上下加速度等を計測した。上下加速度の平均値 (絶対値になおして算出) を比較すると、四輪車及び二輪車ともに As よりも Gr の方が 1~2 割程度大きくなった。表-1 は Gr のフィーリング評価結果をまとめたものである。四輪車はハンドルの手応えやふらつきが多少気になる程度であり、評価は比較的高い。二輪車は振動が大きく、またタイヤの接地感がないことなどが影響していると思われ、評価は低い。

2.3.2 制動試験

一定速度で走行中にブレーキをかけ、停止距離

及び前後加速度等を計測した。制動方法は As 及び Gr ともに一般的なブレーキ操作を行うこととした。停止距離を比較した結果、As よりも Gr の方が四輪車で 1~2 割程度、二輪車で 2~3 割程度長くなった。これは、Gr の方が全体的に減加速度(前後加速度)が小さくなっていたことから、ブレーキ操作が若干ゆるくなっていたと思われる。表-2 は Gr のフィーリング評価結果をまとめたものであるが、四輪車の評価は高いが、二輪車の評価は低く、コメントから判断すると車両安定性の面で問題があると思われる。

2.3.3 車線変更試験

想定される車線変更の中から、最も厳しい条件である異種路面における車線変更試験を行った。試験では As から Gr 及び Gr から As への車線変更を行い、左右加速度等を計測した。四輪車の車線変更距離は、以下のように横すべり摩擦係数をもとに各速度毎に設定した。また、二輪車に関してはテストドライバーの試走により設定した。表-3 に各速度毎に設定した車線変更距離を示す。

- ・安全距離：横すべり摩擦係数 0.1 程度が得られると思われる距離
- ・中間距離：横すべり摩擦係数 0.2 程度が得られると思われる距離
- ・限界距離：横すべり摩擦係数 0.4 程度が得られると思われる距離

試験の結果、四輪車及び二輪車ともに全条件で車線変更することができ、As 区間と Gr 区間の横加速度(左右加速度)に大きな違いはなかった。表-4.1 及び 4.2 はフィーリング評価結果をまとめたものであるが、四輪車は安全距離及び中間距離での評価は比較的高くなったが、限界距離では評価が低く、ハンドル操作に伴う応答性の面で違和感があるようであった。二輪車は全体的に評価が低く、車両応答性や安定性の面で問題があると思われる。

2.3.4 走行性評価試験のまとめ

type14 において各種の走行試験を行った結果、計測された走行データ上は密粒アスコンと type14 に大きな違いはみられなかった。しかし、フィーリング評価に関しては、四輪車では限界距離の車線変更を除いた一般的な走行では比較的高い評価が得られたが、二輪車では全体的に低い評価が得られた。これは、タイヤの接地面積が影響し、二輪車は接地面積が小さく、タイヤも細いため、type14 のような格子形状では部材を連続して

表-1 直進走行試験の Gr のフィーリング評価結果(一部抜粋)

	四輪車	二輪車
評価値	全速度条件で概ね評価 2	全速度条件で評価 0
主なコメント	ハンドルの手応えが軽い	振動が大きい
	ややふらつきが大きいなど	タイヤの接地感が全くないなど

Gr：オーブングレーチング(type14)

表-2 制動試験の Gr のフィーリング評価結果(一部抜粋)

	四輪車	二輪車
評価値	全速度条件で評価 3	全速度条件で概ね評価 0
主なコメント	グリップ感が高く挙動は安定しているなど	ハンドルが取られやすい バランスを保ちにくい 急にすべるなど

Gr：オーブングレーチング(type14)

表-3 各速度毎の車線変更距離

四輪車			
速度(km/h)	安全距離(m)	中間距離(m)	限界距離(m)
40	40	30	20
60	60	50	30
80	80	60	40
100	100	70	50
二輪車			
速度(km/h)	安全距離(m)	中間距離(m)	限界距離(m)
20	20	15	10
40	40	35	30
50	80	70	60

表-4.1 車線変更試験のフィーリング評価結果(一部抜粋)

	四輪車	
	As→Gr	Gr→As
評価値	安全及び中間距離:全速度条件で概ね評価 2~3 限界距離:全速度条件で概ね評価 0~1	
主なコメント (限界距離のみ抜粋)	Gr 区間でハンドルの効きがわかりにくい	Gr 区間で応答性が低い
	Gr 区間でグリップ感がわかりにくいなど	Gr 区間で脱出が遅れる As 区間で急なハンドル戻し操作が必要になるなど

As→Gr:密粒アスコンからオーブングレーチングへの車線変更
Gr→As:オーブングレーチングから密粒アスコンへの車線変更

乗り越える際に小刻みに波打つような車両運動になると考えられる。そのため、細かくみるとタイヤのグリップが得られる瞬間と得られない瞬間が存在し、車両応答性や安定性に影響を与えていると思われる。よって、二輪車に関しては走行性を高めるための表面形状の改良等について検討する必要がある。改良に当たっては、タイヤの接地感を高め、部材を乗り越えるときの振動を和らげるためには斜材を配置するなどの方法が考えられるが、

表-4.2 車線変更試験のフィーリング評価結果 (一部抜粋)

	二輪車	
	As→Gr	Gr→As
評価値	20km/h:全車線変更距離条件で概ね評価1	
	40km/h以上:全車線変更距離条件で概ね評価1~2	40km/h以上:全車線変更距離条件で概ね評価0~1
主なコメント	車体を倒してGrに入ると起きあがりにくい	
	Gr区間で常に上下・左右の振動があり挙動が不安定	
	Gr区間でハンドルを大きく切らないと車線変更できない	
	Gr区間でハンドルの手応えが弱く、タイヤの接地感もわかりにくいなど	
As→Gr: 密粒アスコンからオアーブングレーチングへの車線変更 Gr→As: オアーブングレーチングから密粒アスコンへの車線変更		

今後は斜材配置の効果を検証する必要がある。

3. おわりに

本研究により以下のような成果が得られた。

- 1) 各種表面形状のオープングレーチングのすべり摩擦特性試験により、道路構造令の設計値を上回るすべり摩擦性能を有したオープングレーチングを抽出することができ、基本的な摩擦特性を明らかにすることができた。
- 2) 現状で最も低コストなオープングレーチング (type14) を対象に走行性評価試験を行い、四輪車は比較的高い評価が得られるが、二輪車

は評価が低いため、走行性を高めるための表面形状の改良等について検討する必要があることがわかった。

この type14 に関しては、すべり摩擦係数も非常に大きいことから、突起数を減らして一般的な密粒アスコン程度の摩擦係数に調整できれば、四輪車の走行安全性の面ではさらに性能が向上すると思われる。二輪車に関しては、部材間を渡すような斜材を組み入れることによる効果を検証し、走行性の向上を検討する必要がある。

今後は斜材を主体にした type27 改についても実車走行による走行性評価試験を行う予定である。

参考文献

- 1) (財) 海洋架橋調査会: オープングレーチング床版を用いた長大吊橋に関する調査報告書, 平成 10 年 3 月
- 2) 常田賢一、森山彰、池原圭一: オープングレーチング床版橋の技術研究開発の動向, 土木技術資料, Vol.42, No.4, 平成 12 年 4 月
- 3) 建設省土木研究所、本州四国連絡橋公団: グレーチングの走行安全性に関する共同研究報告書 (その 1), 共同研究報告書, 第 231 号, 平成 11 年 8 月
- 4) 市原薫、小野田光之: 路面のすべりとその対策, 技術書院, pp.12-15, 平成 9 年 3 月
- 5) (社) 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, p.256
- 6) 建設省土木研究所: 各種舗装のすべり摩擦係数と温度, 土木研究所資料, 第 1099 号, 昭和 51 年 2 月

常田賢一*



建設省土木研究所
耐震技術研究センター長
(前 道路部道路交通総
括研究官)
Ken-ichi TOKIDA

濱田俊一**



(財) 国土開発技術研究
センター調査第二部研究
主幹
(前 道路部道路研究室長)
Syun-ichi HAMADA

森山 彰***



建設省土木研究所企画部
橋梁計画官
Akira MORIYAMA

池原圭一****



同 道路部道路研究室
研究員
Keiichi IKEHARA

奥田 基*****



本州四国連絡橋公団長大橋
技術センター技術開発課長
Motoi OKUDA

山田和彦*****



(財) 道路新産業開発機構
ITS 総括研究部調査役
(前 長大橋技術センター
技術開発課長代理)
Kazuhiko YAMADA

杉町直明*****



本州四国連絡橋公団第一管理局
保全部橋梁維持課
(前 長大橋技術センター技術開
発課)
Naoaki SUGIMACHI