

(論文)

新形式の2層オープングレーチングを利用した軽量橋梁

Lightweight Bridges Utilizing a New Type of Two-layer Open Grid Deck



広沢正雄*
Masao Hiroswawa



窪田 晃*
Akira Kubota



内藤純也**
Junya Naito



本家浩一*(工博)
Dr. Koichi Honke



岡田 徹*(工博)
Dr. Toru Okada

Open grid deck lattice-like floor structures are very light. They are becoming increasingly popular in Japan as a way to reduce bridge construction costs. Kobe Steel developed a new type of lightweight bridge which utilizes open grid decks for the bridge flooring. This paper introduces a number of existing bridge types which use open grid deck floors, and describes the various characteristics of open grid decks. In addition, design examples for a girder bridge and a medium-span suspension bridge using open grid decks are given.

まえがき = オープングレーチングは、開口を有する格子状の床構造で、軽量であることを第一の特徴とする。身近な例としては、溝蓋などに利用されているが、これを大型化し、橋梁の床版として利用するケースが多々ある。本四連絡橋のような長大吊橋では、開口構造であることを利用して、耐風安定性を増すための風抜きとして利用されている¹⁾。また最近では、雪のつもりにくい床版あるいは除雪の容易な床版として活用しようとする試みもなされている²⁾。除雪の容易な床版とは、一般自動車の走行により積雪を踏抜き落とすことが可能な床版という意味である。一方、ニューヨークやシカゴに数多く見受けられる可動橋では、軽量床版として利用されている例が多々ある³⁾。

上述のように、オープングレーチングは開口床版・軽量床版として特殊な橋梁で活用されているが、国策としてコスト縮減が求められるなか、当社はオープングレーチングをより積極的に活用した軽量橋梁の検討を行ってきた。

本稿では、まずオープングレーチングが橋梁の床版に適用された例を概観し、次いで各種特性について述べる。さらに、オープングレーチングを有する桁橋と中小吊橋について設計例を示しながら、その有用性を論じる。

1. オープングレーチングが橋梁に適用された例

オープングレーチング床版は、可動橋の木製床版を交換するために1920年代にアメリカで開発された。ニューヨークには80年ほど前に架設された25橋の可動橋があり、そのほとんどがオープングレーチングに交換されている。シカゴ市内でも37橋の可動橋があり、その75%に使用されている。その目的は、軽量化、車両の大型化に対する耐久性の向上、不燃性化にある。オープングレーチングが開口部を有することから、吊橋の耐風安定性の

向上を目的として、1950年に完成した新タコマ橋で、車線境界線に用いられた。1957年に完成したマキナック橋(写真1)では、4車線のうち中央2車線に用いられ、本格的な走行路面として採用されている。

わが国では、当社が1960年に開発した「アマグレート(溝蓋用オープングレーチング)」の製造技術を基にして、1968年に鋼道路橋示方書に準じた設計荷重に耐える対象支間0.5~2.0mのI形鋼を用いたオープン型I-B GRATEが開発された⁴⁾。1969年3月に苫小牧港棧橋橋に採用され、著者らが知る限りではこれが国内はじめてのオープングレーチング橋である。

わが国で本格的にオープングレーチングが採用されたのは、1973年に完成した関門橋で、明石海峡大橋にいたるまで補剛桁形式の吊橋で、路肩及び中央分離帯に用いられている。このほか表1に示すように、棧橋・可動橋・小規模吊橋の走行路面に用いられており、近年では積雪対策として、無雪橋梁の実現に向けての適用検討が行われている。



写真1 マキナック橋
Photo 1 The Mackinac Bridge

*都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部 **技術開発本部 機械研究所

表 1 オープングレーチング床版を使用した主な橋梁
Table 1 Bridges using open grid deck

| Bridge name | Location | Bridge type | Year completed | Position applied |
|------------------------------------|-------------------|-------------|----------------|---------------------|
| Willis Avenue Br. and other 25 Br. | U.S.A. New York | Movable | 1920s | Traffic lane |
| La Salle BR. and other 25 Br. | U.S.A. Chicago | Movable | 1920s | Traffic lane |
| Tacoma Narrows Br. | U.S.A. | Suspension | 1950 | Shoulder, Separator |
| Mackinac Br. | U.S.A. | Suspension | 1957 | Traffic lane |
| April 25th Br. | Portugal | Suspension | 1966 | Traffic lane |
| Tomakomai Br. | Hokkaido | Pier | 1969 | Traffic lane |
| Kanmon Br. | Fukuoka Yamaguchi | Suspension | 1973 | Shoulder, Separator |
| Nirogawa Br. | Kochi | Suspension | 1973 | Traffic lane |
| Kaminirogawa Br. | Kochi | Suspension | 1974 | Traffic lane |
| Yamasaki Br. | Kochi | Suspension | 1976 | Traffic lane |
| Marushima. Br | Hyogo | Movable | 1977 | Traffic lane |
| Innoshima Br. | Hiroshima | Suspension | 1983 | Shoulder, Separator |
| Onaruto Br. | Tokushima | Suspension | 1985 | Shoulder, Separator |
| Shimotsuiseito Br. | Okayama | Suspension | 1988 | Shoulder, Separator |
| Kitabisanseto Br. | Okayama | Suspension | 1988 | Shoulder, Separator |
| Minamibisanseto Br. | Kagawa | Suspension | 1988 | Shoulder, Separator |
| Akashikaikyo Br. | Hyogo | Suspension | 1998 | Shoulder, Separator |
| Nagasutahira Br. | Kumamoto | Movable | 1999 | Traffic lane |

2. 新形式オープングレーチングの特性

2.1 オープングレーチングの2層構造化

オープングレーチングを本格的な走行路面に用いることに対し、従来の形式(図1)ではすべり摩擦係数・走行特性の向上と疲労耐久性を同時に満足させることは困難と判断し、図2に示すような舗装に相当する表面グレーチングと通常の床版に相当する構造グレーチングの上下2層構造が提案された⁵⁾。2層構造にすることにより、表面グレーチングは摩擦・走行特性がよく、容易に交換できる。また、使用目的に応じて、自動車専用道路の長大吊橋には開口率が高く摩擦特性の良いもの、一般道路

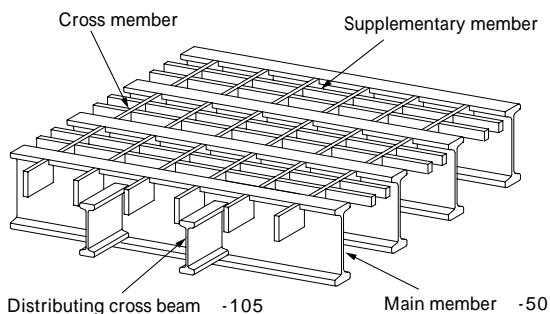


図1 従来型グレーチング構造
Fig. 1 Structure of conventional open grid deck

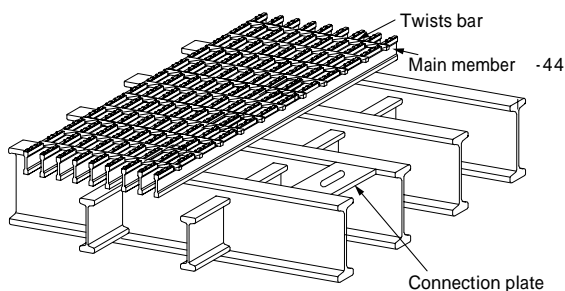


図2 2層グレーチング構造
Fig. 2 Structure of two-layer open grid deck

には2輪車などの走行を重視し部材間隔が密で走行特性の良いもの、歩道部には歩行者なども安心して歩行できるように透水性の充填材を埋めたものなど、さまざまなバリエーションが可能となった。

2.2 表面グレーチングの走行特性

2.2.1 表面グレーチングの改良と走行試験

オープングレーチングの走行特性は、当初、自動車専用道路への適用を目的として、すべり摩擦係数の改良が行われていたが⁶⁾、2輪車走行の不安が指摘され⁷⁾、自転車走行もある一般道路橋へ適用するための検討が始まった。

オープングレーチングを一般道路橋の床版に適用するためには、道路構造令の設計値を上回るすべり摩擦係数が確保できること、自転車などを含む2輪車走行に不安がないこと、疲労耐久性が高いことが条件である。このため、溶接でなく圧接接合で疲労耐久性を高め、すべり摩擦特性の良い部材を密に配置した圧接型グレーチングに着目し、制動試験と簡易動摩擦係数の測定を行った。

実験に用いたオープングレーチングは、突起のある形鋼を主部材として3cm間隔に配置し、6mmのスクリュバーを10cm間隔に圧接した形鋼タイプと、平鋼にパンチ穴による突起を設けた主部材を、形鋼タイプ同様にスクリュバーで圧接したパンチタイプの、2種類とした。そして、おのおのを延長60m区間配置し、湿潤走行状態において、主部材方向を車両進行方向(縦配置)及び車両進行直角方向(横配置)とした走行試験を実施した。

試験の結果、制動停止距離は湿潤状態で60km/hのとき、アスファルトは21m、パンチタイプの縦配置で22m、パンチタイプの横配置及び形鋼タイプの横配置は25m、形鋼タイプ縦配置で34mであった。制動距離はアスファルトにくらべるとやや長くなるが、形鋼タイプ縦配置を除けばほぼ同程度であり、いずれも道路構造令の設計値

45m を満足している。また、タイヤロック時の動摩擦係数は、両タイプとも目標値0.4が確保されることが確認された。400cc 自動2 輪車、50cc 自動2 輪車、自転車の制動停止確認と車線変更試験では問題なく、アンケートによるフィーリング調査でもおおむね良好な結果が得られた。

2.2.2 実橋での走行試験

圧接タイプのオープングレーチングを使用した一般道路橋（今別橋）が、2002年7月に青森県で完成した（写真2）。今別橋に用いたのは形鋼タイプとパンチタイプの2種類である。主部材間隔は3cmで、自転車走行を考慮して、横部材であるスクリュバーの間隔は5cmとした。完成後の共用開始前に普通乗用車、400cc 自動2 輪車、50cc 原付バイクの走行試験を行い、タイヤロック時の動摩擦係数0.4を確保していることが確認された⁸⁾。

なお、今別橋では2003年2月に試験走行車による冬期走行試験が実施され、良好な結果が得られた。

2.3 腐食耐久性

オープングレーチングは、マキナック橋のように塗装仕様の場合もあるが、一般的には溶融亜鉛めっき仕様である。塗装仕様のマキナック橋の場合45年経過しているが、大きな腐食損傷は見られない。また、めっき仕様の4月25日橋は36年経過しているが、同様に健全と報告されている³⁾。日本でも、関門橋の中央分離帯と路肩部分にめっき仕様で使用されており、30年経過しているが健全な状態である。

溶融亜鉛めっきを施したオープングレーチングの健全度評価は、17年間経過した因島大橋で劣化度評価が行われている⁹⁾。一部純亜鉛層が残存している部位もあるが、ほとんどの部位で合金層が露出している。しかし、合金層に赤錆が発生している部位であっても素地鋼板の腐食は認められていない。また、残存めっき厚も平均で100 μ m程度あり合金層による防食性能が保たれていると報告されている。純亜鉛層が自然消滅した場合、合金層の鉄部分が赤錆となるが、通風・通水が良好なことから比較的緩やかに錆が進行しているものと考えられる。

また、溶融亜鉛めっきを施したオープングレーチングは再めっきも可能であることから、交換が容易な構造にすることにより、ほぼ永久的な腐食耐久性が確保できる。

2.4 疲労耐久性

表面グレーチングに形鋼圧接タイプを用いた2層構造



写真2 今別橋の車両走行
Photo 2 Vehicles running over the Imabetu Bridge

オープングレーチングの構造特性を明らかにするため、2001年大阪工業大学で多点移動式静的載荷試験と定点疲労試験を行なった¹⁰⁾。

多点移動式静的載荷実験では、構造グレーチングの主部材と横主部材の交差点2次応力や、構造グレーチングと表面グレーチングの接触状態の影響などが明らかになった。また、疲労試験は多点移動式載荷実験結果から、構造グレーチングに疲労上最も厳しい位置で繰返し載荷を行い、最大荷重140kNを200万回、及び210kNを2万回、さらに280kNを2万回の繰返し載荷を行ったが、疲労亀裂は確認されなかった。

また、旧土木研究所と本四公団の共同研究で行われた輪荷重移動載荷実験では¹¹⁾、階段載荷280kNで構造グレーチングに亀裂が発生し、圧接タイプの表面グレーチングには亀裂は確認されていない。

従って、2層構造グレーチングは、構造グレーチングでRC床版（道路橋示方書H8年対応）程度の疲労耐久性と、圧接タイプの表面グレーチングはそれ以上の耐久性があるものと考えられる。

2.5 騒音

オープングレーチングの騒音特性は、現時点では十分に解明されていないが、海外調査団の報告³⁾によるとマキナック橋でオープングレーチング部は約90dB、舗装部で約80dBである。

今別橋では、普通乗用車を用いて、走行速度60km/h・30km/h・30km/h（惰性走行）時の騒音測定を行った⁹⁾。測定位置を図3に示す。

オープングレーチング部での騒音レベルは、60km/h走行時にアスファルト舗装部に比べ15dB大きく、その近傍では90dBを超える。しかし、オープングレーチング部から25mはなれた民家前地点での測定では70dBまで減少し、車両が民家前を通行するときの騒音75dBに比べて十分小さい。

また、急ブレーキによる音はアスファルト舗装に比べかなり音色が低いことが確認されている。

3. 一般橋梁への適用性に関する検討

3.1 橋梁主構造との関係

床版にオープングレーチングを用いた橋梁（以下オープングフロアブリッジと呼ぶ）の標準的な断面を図4に示す。また、図5のような下路桁も可能である。下路桁は

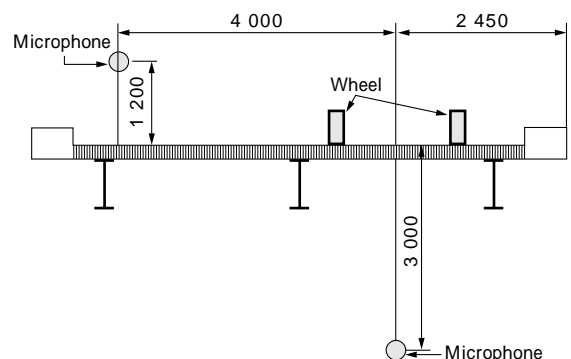


図3 今別橋における騒音計測位置
Fig. 3 Noise measuring position in the Imabetu Bridge

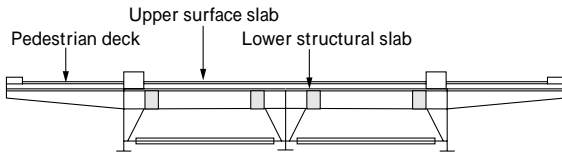


図4 上路式オープンフロアブリッジの構造
Fig. 4 Structure of deck-style bridge using open grid deck

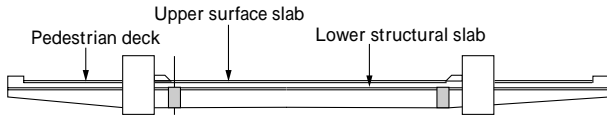


図5 下路式オープンフロアブリッジの構造
Fig. 5 Structure of through-style bridge using open grid deck



写真3 今別橋架設状況
Photo 3 Construction of open grid deck (The Imabetu Bridge)

河川上の橋梁で桁下空間が十分に確保できない場合などに有効である。

オープングレーティング床版は、その床版としての特性から、主部材を橋軸方向に平行とすることが合理的な配置となる。橋梁主構造は、橋軸方向に配置された主桁に、横桁あるいはブラケットを橋軸直角方向に設置し、床版は横桁及びブラケットに支持されることになる。床版支間はグレーティング主部材の断面剛性から決定されるが、一般的に防護柵の支柱間隔が2mであることから、ブラケット及び横桁間隔は2mとして、床版支間は2mを標準とすることにした。

オープンフロアブリッジは床版形式としては、鋼床版の一種と考えられるが、床版の主桁作用がないため、桁形式としては非合成鋼床版桁である。

また、オープングレーティング床版は、地震や風などの横荷重による水平力に抵抗する部材として考慮していない。従って、横荷重に対しては横構で抵抗させることにしている。今別橋は桁支間12m単純桁であり、一般的な橋梁としては横構を省略できるが、水平抵抗力が未検証であることから、パイプ断面の横構を設置した。横構をパイプ断面としたのは、圧縮部材として全断面を有効に活用できることと、雪やゴミなどが堆積しにくいことを目的としている。

3.2 オープンフロアブリッジの特徴

1) 軽量で低コスト化が可能

オープングレーティングの重量は150kg/m²程度であり、これは70mm厚のアスファルト舗装に相当する。床版が非常に軽量であるため、主構造である主桁の軽量化も図ることができ、RC床版の合成桁に比べ、上部工全体重量は半分程度となる。このため、合成桁だけでなく、PC桁に比べてもコストが安くなり、かつ、橋梁の長支間化が可能となる。軽量で長支間化が可能なることから中間橋脚を省略し、コンパクトな下部構造とすることができ、橋梁全体のコスト削減が可能となる。

2) 施工が早く簡単で低コスト化が可能

写真3に示すように、桁仮設後直ちに床版の設置ができ、床版上を重機が自走しながら架設が可能である。またコンクリート打設や鋼床版のように現場溶接もないことから、特殊な技能も必要とせず、現場工期が大幅に短

縮でき、コスト削減が可能となる。

3) 維持管理が容易でコスト削減が可能

開口部を有する床版であるため、排水設備が不要で地覆や伸縮装置なども簡素化できる。このため付属物に関するメンテナンスが大幅に省略できることや、橋梁内面の外観観察や堆積物の除去も橋面上から簡単にでき、検査路も不要で維持管理が容易である。

4) 雪や火山灰などの堆積対策に有効

オープンフロアブリッジは、雪や火山灰などが橋面上に積もりにくく、除去し易いことから注目されている。日本道路公団北陸支社で、1998年に糸魚川付近の工専用棧橋と、翌年、親知らず付近のパーキングエリア内で確認実験が行われ、オープングレーティングの積雪対策に対する有効性が確認されている³⁾。また、オープンフロアブリッジは、雪や火山灰対策だけでなく、棧橋などの波圧対策や光漏れ効果による橋面下の植生に対する環境負荷低減などが期待されている。

4. 中小吊橋への適用性の検討

4.1 耐風安定性の検討

オープングレーティングを採用することにより、橋梁の耐風安定性の面についてもその有効性が期待される。

床版にオープングレーティングを、補剛桁にパイプトラスを用いた吊橋の耐風安定性に関する検討を行った¹²⁾。検討時の風洞実験で用いた床版タイプを図6に示す。

風洞実験では、床版がない場合は、仰角3°0' - 3°のいずれの場合も不安定振動は発生していない。全床版の場合は仰角3°(風洞風速4.0m/s)でねじれフラッタが発生し、-3°(風洞風速8.5m/s)で連成フラッタが発生している。オープングレーティングの場合は、仰角3°(風洞風速16m/s)でねじれフラッタが発生するが、-3°(風洞風速18m/s)及び0°(風洞風速20m/s)で不安定な振動は発生していない。ただし、仰角0°では風洞風速3m/s時、限定振動が発生している。これらの実験結果を中央径間長600mの吊橋に換算して検討すると、以下ようになる。

オープングレーティングの有風時の特性は、床版のない場合に近く、仰角3°(風洞風速16m/s)で発生するねじ

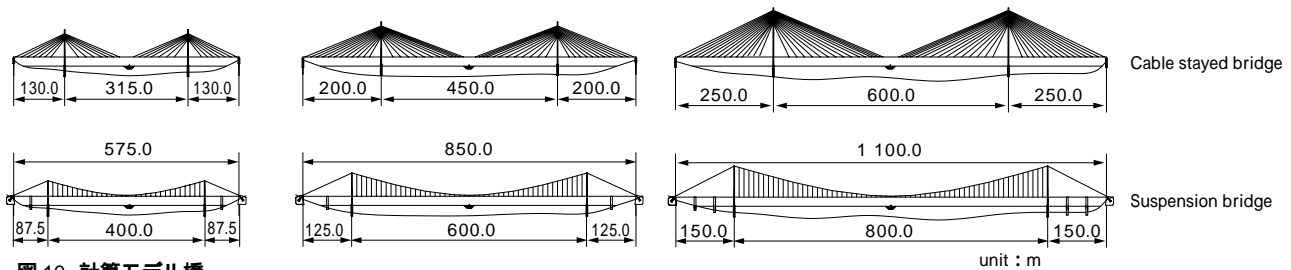


図 10 計算モデル橋
Fig.10 Calculated model bridges

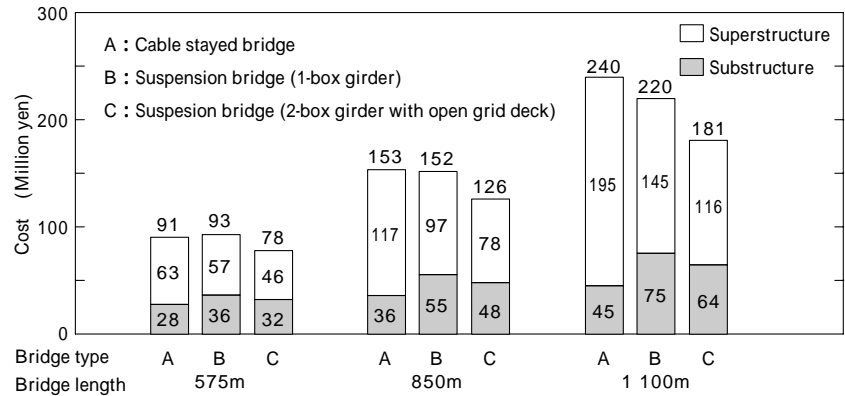


図 11 各種橋の建設コスト比較
Fig.11 Comparison of construction costs on various bridge types

りである。

- 1) オープングレーチングを床版として利用した橋梁は、欧米において多数の実績を有しており、現在も供用されている。
- 2) 改良型オープングレーチングの走行性、防食性能、疲労耐久性について各種実験を実施し、橋梁用床版として十分な機能を発揮することを示した。
- 3) 一般橋への適用性を検討し、2層構造のオープングレーチング床版を有する軽量のオープンフロアブリッジを提案した。
- 4) 中小吊橋への適用性を検討し、耐風安定性にすぐれ、軽量かつ経済的な吊橋が実現できることを示した。

最後に、国土技術政策研究所道路研究室、土木研究所構造物研究グループ、青森県土整備部道路課、本州四国連絡橋公団長大橋技術センター、(財)海洋架橋調査会からご指導と貴重な資料提供をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 米田昌弘ほか：構造工学論文集，Vol.44A（1998），p.917.
- 2) 広沢正雄ほか：土木学会第54回年次学術講演会（1999）.
- 3) 海洋架橋調査会：海峽横断，Vol.17（1998），p.59.
- 4) 桑原重雄ほか：R&D 神戸製鋼所技報，Vol.18，No.2（1968），p.144.
- 5) 中島英輔：海峽横断，Vol.17（2001），p.59.
- 6) 土木研究所・本四公団：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）（2000）.
- 7) 常田賢一ほか：土木技術資料 Vol.42，No.8（2000）p.20.
- 8) 青森県・海洋架橋調査会：今別橋オープングレーチングの走行特性調査に関する共同研究資料（2002）.
- 9) 有馬敬育ほか：第24回道路会議（2001），p.284.
- 10) 広沢正雄ほか：土木学会第57回年次学術講演会（2002）.
- 11) 高橋 実ほか：土木学会第57回年次学術講演会（2002）.
- 12) 岡田 徹ほか：構造工学論文集 Vol.46A（2000），p.1115.