

新材料を用いた 防風柵の開発



佐藤 大輔*



神谷 弘志**



秋山 保行*



小関 昌信*

強風による輸送影響を緩和するため、首都圏の風規制多発区間に防風柵の設置を推進しているが、設置延長が長いことからコストダウンなどを検討していく必要がある。そこで、近年高欄などに用いられ注目されていたFRPを使用し、軽量かつ部材を一体化することで施工性を向上させた防風柵の開発に取り組んだ。試作品（高欄一体型、嵩上型）を製作し、静的載荷試験、現地試験施工および設置後の挙動計測を行い、耐力、変位、疲労などが問題ないことを確認した。また、嵩上型については施工性を考慮し更なる軽量化を行った結果、初期の嵩上型から47%の軽量化が図られた。なお、高架橋区間では、本開発品を用いると従来の防風柵を使用した場合と比較して、約2割以上のコストダウンができる見込みとなった。

●キーワード：防風柵、GFRP、静的載荷試験、振動測定、応力測定

1. はじめに

強風による輸送障害対策として、これまで強風警報システムの導入や防風柵の設置を実施してきたが、依然として強風による輸送影響は少なくない。その輸送影響を緩和するため、首都圏の風規制多発区間に、車両に作用する風の力を低減する防風柵の設置を推進しているが、設置延長が長いことからコストダウンなどを検討していかなければならない。そこで、軽量かつ部材を一体化することで施工性を向上させた防風柵の開発に取り組んだ。本稿では、開発した試作品（高欄一体型、嵩上型）の静的載荷試験、現地試験施工、設置後の挙動計測結果について報告する。また、静的載荷試験、試験施工結果を踏まえて取り組んだ嵩上型の改良についても報告する。

2. 新型防風柵の概要

2.1 使用する材料

炭素繊維やガラス繊維などの強化繊維を樹脂で固めた材料を、繊維強化プラスチック（FRP：Fiber Reinforced Plastics）という。防風柵に要求される耐力とコストなどを勘案し、今回はGFRP（ガラス繊維強化プラスチック：Glass Fiber Reinforced Plastics）を採用することとした。なお、これまでの防風柵で使用されている鋼材と比べ、FRPは優れた耐食性を有しており、塩害や種々の酸などにも強い材料である¹⁾。また、今回の防風柵には耐候性を向上させる目的でゲルコートと呼ばれる保護層が約300～500μm施工されており、紫外線に対する耐久性は十分に有している。なお、FRPは東北本線長町駅付近の新設高架橋の高欄などにも使用され実績が増えている。

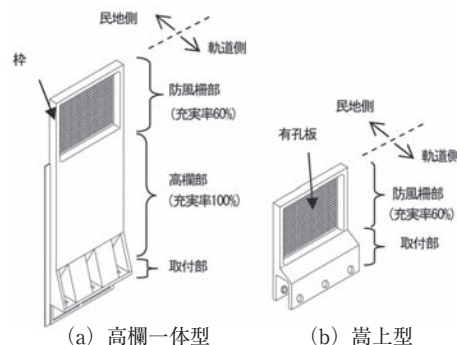


図1 新型防風柵の形状

2.2 形状

今回、高架橋区間において既設の高欄を撤去して新たに設置する高欄一体型と、高欄の上部に設置する嵩上型の2タイプを試作した（図1）。それぞれ上部は防風柵部でありこれまで施工してきた防風柵と同様に充実率（＝防風柵の風を通さない部分の面積／防風柵の総面積）が60%を満たすように孔が開いている。高欄一体型の下部は高欄部であり中空ボックス構造となっている。これにより、これまではH型钢支柱を設置してからその間に有孔折板を取り付けていた（図2）が、これを軽量かつ部材を一体化させることで施工性を向上させることができる。

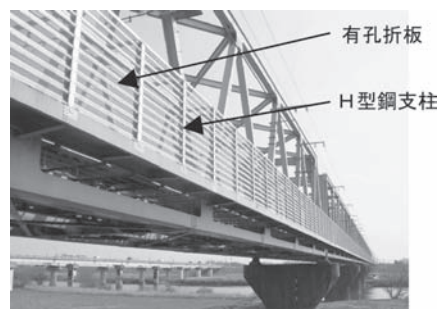


図2 これまで施工してきた防風柵

3. 静的載荷試験

GFRP製防風柵の要求性能を、①風荷重 3.0kN/m^2 （橋梁上に列車がない場合）が作用した時に、曲げモーメント、せん断力が許容値以内であること、②風荷重 1.5kN/m^2 （橋梁上に列車がある場合）が作用したときに、変位が指標以内であることとした。これらの要求性能を設計で照査した後、実物大の防風柵を用いて載荷試験を実施し、①、②を確認することとした。なお、水平方向の変位の指標は施工基面を侵さない程度とすることとし、高さの $1/100$ を目安とした。また、防音壁の設計に用いられる圧力変動値 1.0kN/m^2 ²⁾が作用した時に、断面変更箇所が発生する応力が疲労限度以下であることを確認する。なお文献¹⁾ではFRPに明確な疲労限度はないことが報告されているが、ここでは文献³⁾よりGFRPの 2×10^6 回の曲げ疲労強度（両振幅）に、応力集中による強度低下に関する安全率 1.32 を考慮し、疲労限度を 106N/mm^2 （ $=140\text{N/mm}^2 \div 1.32$ ）と考えた。

3.1 試験方法

変位および取付部や枠の耐力の確認試験では、風荷重が防風柵に一樣に作用するように、油圧ジャッキによりH型钢を介して集中荷重を載荷した（図3）。また、有孔板の耐力の確認には、防風柵部全体に作用する風荷重と大きさの等しい集中荷重を有孔板の中央に治具を介して載荷した。そして、変位は防風柵の変位が最も大きくなる頂部で、ひずみは弱点部となる有孔部周りや有孔板と枠の境界などで測定した。なお、試験体数は3体とした。

3.2 試験結果

高欄一体型の変位および取付部の耐力を確認する試験で、軌道側から載荷した際の荷重と変位の関係を図4に示す。風荷重 1.5kN/m^2 相当時の変位は指標（ 26mm ）より小さい約 18mm 以下であった。また、破壊モードの確認のために風荷重 3.0kN/m^2 の3倍に相当する荷重まで載荷したところ、変位は 60mm 以上と指標を大きく超えたものの破壊には至らないことを確認した。また、枠の耐力を確認する試験もしたが破壊には至らなかった。なお、嵩上型も同様に変位および取付部の耐力を確認したが問題ないことを確認した。

高欄一体型の有孔板部を、軌道側から載荷した際に最も大きな応力が発生した有孔部周りの応力と荷重の関係を図5に示す。 1.0kN/m^2 相当時の発生応力は 20N/mm^2 程度以下であり、疲労限度 106N/mm^2 の $1/5$ 程度にしか達していないので、疲労は特に問題とならないと判断した。

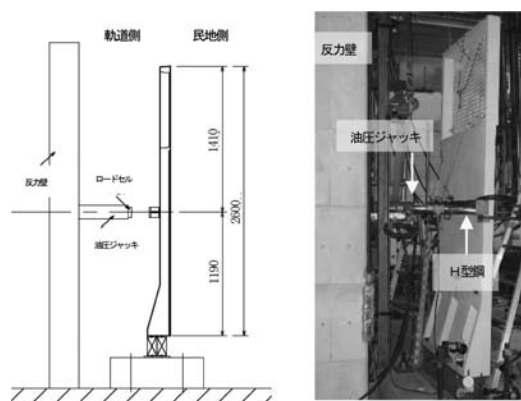


図3 静的載荷試験（変位および取付部の耐力確認）

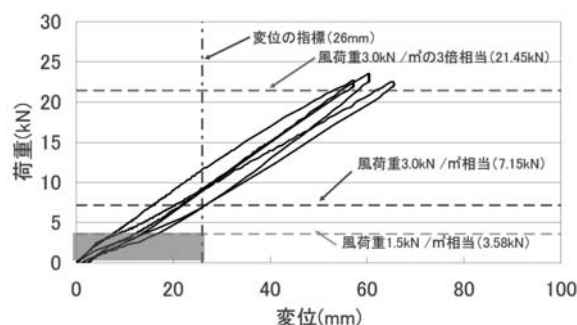


図4 荷重－変位曲線

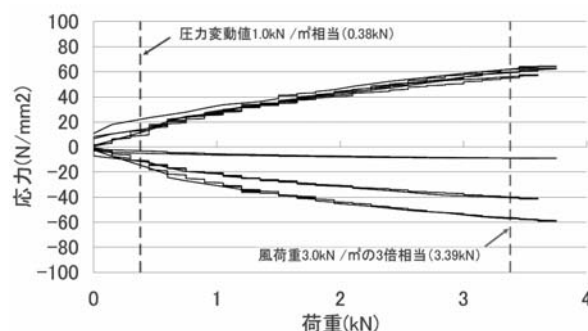


図5 応力－荷重曲線

4. 現地測定

静的載荷試験により要求性能を確認した後、施工性を確認することと既設構造物への影響評価を目的に京葉線で試験施工を行った。防風柵の設置状況を図6に示す。なお、防風柵の重量は高欄一体型が約 80kg/m 、嵩上型が約 30kg/m であった。

ここで、防風柵設置後に列車通過時の構造物の振動が変化して振幅が増大した場合、既設構造物の耐力などに影響を及ぼすことが懸念される。そこで、試験施工完了後、列車通過時の構造物および防風柵の振動を測定し、構造物の振幅増加や共振などが発生しないことを確認することとした。なお、防風柵設置前に構造物（張出スラブ、高欄）



(a) 高欄一体型 (b) 嵩上型

図6 防風柵の設置状況

の振動を測定しており、これらと設置後の値を比較することにより、防風柵が構造物に与える影響を考察することとした。また併せて、列車通過時の防風柵本体の応力を測定し、発生応力が疲労限度以下になることを確認することとした。

4.1 振動

測定には非接触振動測定システム「Uドップラー」⁴⁾を用いた。振動測定の状況を図7に示す。列車通過時における構造物および防風柵の変位時刻歴として高欄一体型設置箇所を図8に、嵩上型設置箇所を図9に示す。ここで、張出スラブとは張出スラブ先端の鉛直方向の振動を表しており、本体とは高欄もしくは防風柵頂部の水平方向の振動を表している。

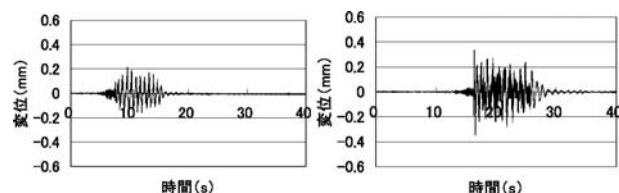
図8 (a) より、高欄一体型設置箇所の本体の振動振幅はGFRP製防風柵の方が0.1mmほど大きくなっている。また、GFRP製防風柵には列車通過後に自由振動が認められる。これらは、GFRP製防風柵は高欄 (PC板) よりも軽く、剛性が低いいため減衰が少ないためと考えられる。なお図8 (b) より、設置後の張出スラブの振動に、列車通過後の自由振動が認められるようになっているが、これはGFRP製防風柵の自由振動の影響を受けているためと考えられる。しかし、振幅は防風柵設置前後で0.1mm以下で、ほとんど変化していないため問題はないと判断した。

図9 (a) より、嵩上型設置箇所の本体の振動振幅はGFRP製防風柵が1mm程度に達し、自由振動が認められる。これもGFRP製防風柵は高欄 (場所打ちコンクリート) よりも軽く、剛性が低いためと考えられる。しかし、張出スラブの振動は、振幅・波形ともに変化していないため、問題はないと判断した。

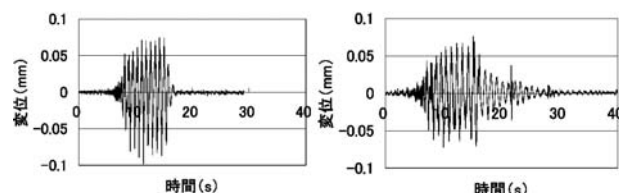
なお、測定した列車速度の中では、振幅が特異的に大きくなる共振現象は認められなかった。以上より、防風柵の設置が既設構造物へ与える影響は少ないと判断した。



図7 Uドップラーによる振動測定状況

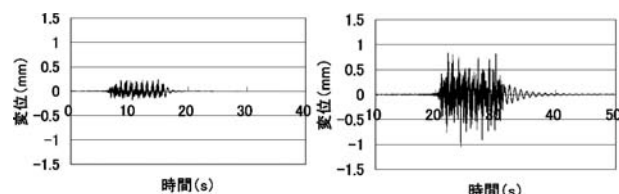


(a) 本体 (左: 高欄、右: GFRP 製防風柵)

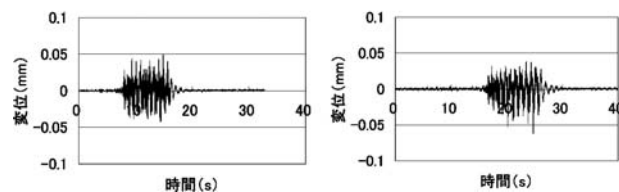


(b) 張出スラブ (左: 設置前、右: 設置後)

図8 列車通過時の変位時刻歴 (高欄一体型設置箇所)



(a) 本体 (左: 高欄、右: GFRP 製防風柵)



(b) 張出スラブ (左: 設置前、右: 設置後)

図9 列車通過時の変位時刻歴 (嵩上型設置箇所)

4.2 応力

静的載荷試験時にひずみを測定した位置にひずみゲージを貼付け、列車通過時に発生するひずみを測定した。

列車通過時のひずみを数回測定したが、発生応力が最も大きかった205系が109km/hで通過した際の嵩上型有孔部周りの応力時刻歴を図10に示す。応力振幅は10N/mm²以下であり、曲げ疲労強度106N/mm²の1/10よりも小さい応力しか発生しなかったので疲労は問題とならないと判断した。

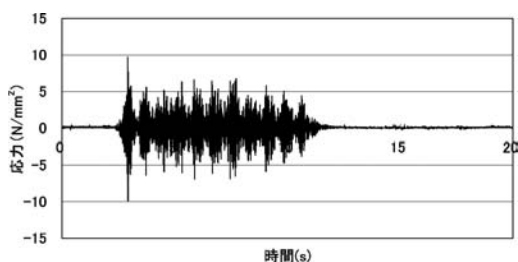


図10 列車通過時の応力時刻歴

5. 新型防風柵の改良

室内試験および試験施工の結果から、嵩上型の施工性を考慮し、さらなる軽量化のための改良を行った。

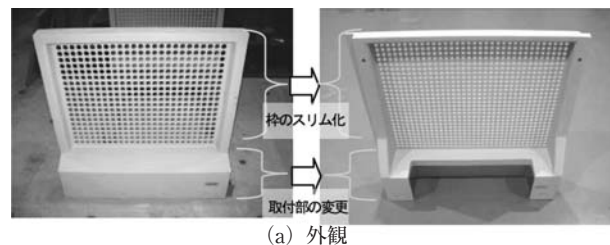
主な改良点は、①取付部の変更（4穴から2穴へ、穴の形状を円から楕円にして埋め込みナットを廃止、取付部材の削減）、②枠のスリム化、③有孔部の変更（円型から角型へ）である。これらにより、既設高欄の鉄筋を避けて防風柵を取り付けられ施工性が向上する、材料が削減され軽量化・コストダウンが図れる、繊維の配置が容易となり製作方法が簡略化されるといった効果が期待できる。改良前後の形状の比較を図11に示す。改良後の重量は約16kg/mとなり初期型から47%の軽量化に成功した。

なお、改良した防風柵を3と同様に試験を行った。変位および取付部の耐力を確認する試験で、軌道側から载荷した際の荷重と変位の関係を図12に示す。初期型と比較すると剛性が低くなり変位が大きくなったが、風荷重1.5kN/m²相当時の変位は指標（9.5mm）以下であった。また、破壊モードの確認のため風荷重3.0kN/m²の3倍に相当する荷重まで载荷したが破壊には至らないことを確認した。有孔板部を軌道側から载荷した際の有孔部周りの応力と荷重の関係を図13に示す。初期型と比較すると改良型の発生応力が小さくなっているが、これは孔の形状の変更によりガラス繊維の含有率を1.5倍程度にしたためである。1.0kN/m²相当時の発生応力は10N/mm²程度以下であり、疲労限度106N/mm²の1/10程度にしか達していないので、疲労は特に問題とならないと判断した。以上より、変位、耐力、疲労に関して問題ないことを確認した。

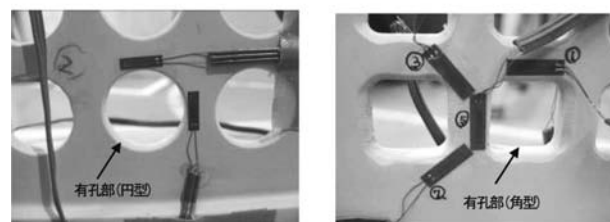
6. まとめ

GFRPを用いた防風柵を試作し、静的载荷試験により、変位、耐力などの要求性能を確認した。また、現地測定により、列車通過時の構造物の振動、防風柵の応力はともに問題とならないと判断した。さらに、嵩上型を改良して軽量化が可能となった。なお、高架橋区間での防風柵設置を計画している京葉線では、本開発品を用いると従来の防風柵

を使用した場合と比較して、取付に要する費用が減少することにより、約2割以上のコストダウンができる見込みとなり、京葉線に導入予定となっている。



(a) 外観



(b) 有孔部

図11 形状の比較（左：初期型、右：改良型）

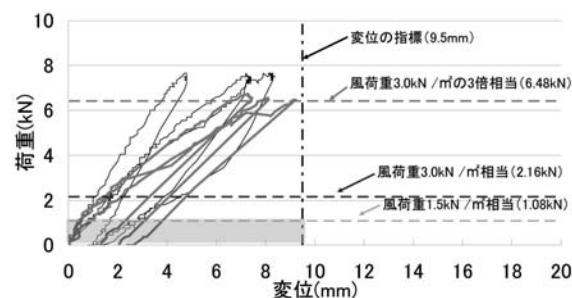


図12 荷重－変位曲線（細線：初期型、太線：改良型）

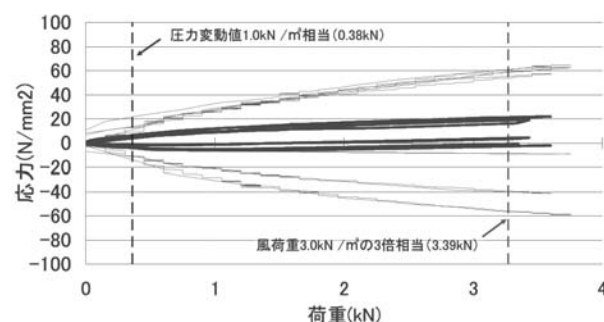


図13 応力－荷重曲線（細線：初期型、太線：改良型）

参考文献

- 1) 土木学会 構造工学委員会 FRP橋梁研究委員会編：FRP橋梁－技術とその展望－、丸善、2004.1
- 2) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説（鋼鉄道橋、鋼とコンクリートとの合成鉄道橋）、1983.4
- 3) 社団法人プラスチック協会 編：FRP構造設計便覧、1994.9
- 4) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発、鉄道総研報告、Vol.21、No.12、pp.17-22、2007.12