

複合材料製先頭構体の開発

井上 修* 橋本 光康* 野元 浩**

最近の鉄道車両、特に通勤形電車はステンレス鋼製が主流であるが、車両の顔となる「前面覆い」には一般的に繊維強化プラスチック（以下、「前面FRP」と記す。）が用いられる。

この前面FRPの取付けを含む前面構造は、意外に多くの作業工数を必要としており、ステンレス車両を新たに設計製作する場合や、中間車両を運転室付き車両（先頭車）にするなどの大規模改造に際して、工期短縮を図る上での制約要件となっている。

これは、前面FRP自体の全体剛性が低く、車体側でいわば“優しく”保持してやる必要のあることに起因しており、前面FRPの全体剛性を高めることができれば、工数削減面で大きな効果が期待される。

そこで本開発においては、前面FRPの剛性を高めるために、FRPサンドイッチ構造の検討、テストピースによる特性試験を経て前面FRPとして最も適した材料の選定を行ない、「FRPサンドイッチ構造による前面覆い（以下、「前面オオイ」と記す。）をはじめ、踏切衝突事故等を考慮しつつ、前面オオイと車体双方への取付けの容易化を図った強化フレーム（以下「強化フレーム」と記す。）を開発した。さらに、この試作品を用いて実車での使用を想定した「分布荷重試験」や「衝撃荷重試験」を実施し、定量的な強度評価を行なった。

キーワード：FRPサンドイッチ構造、複合材料

1 はじめに

上述のように、ステンレス車両においては、前面デザイン構成上の理由から、車両の正面にはFRPを用いるものが一般的であるが、従来から用いられているFRP単板材料は、薄物構造であるために全体剛性が低く、車体への取付け側に複雑な内部骨組を必要とし、さらに取付け作業においては、手間のかかる微妙なライナー調整を必要としている。

このため、前面FRPの車体取付け作業を中心とする工数削減策の確立が求められていた。

そこで、それ自身が高い剛性を有する複合材料製の「前面オオイ」をはじめ、強固な強度部材であるとともに「前面オオイ」を車体側に取付ける際の接合材となる「強化フレーム」を開発し、前面FRPの車体取付け作業を主体とする、車両前面部分の組立て工数の削減策を確立することを主眼に、実車への適用を前提とした開発を行なった。

2 基本構造検討

2.1 構造

鉄道車両において、台枠、骨組、外板で構成される強度部材の集合体を一般的に構体と称し、運転室部分を含む範囲については、その構成から単独に先頭構体（または前頭構体）と呼ばれるが、ここでは特に前面部分を構成する範囲を指している。

したがって、本開発における先頭構体構造は、FRPサンドイッチ構造の「前面オオイ」と「強化フレーム」という、2大要素で構成される。

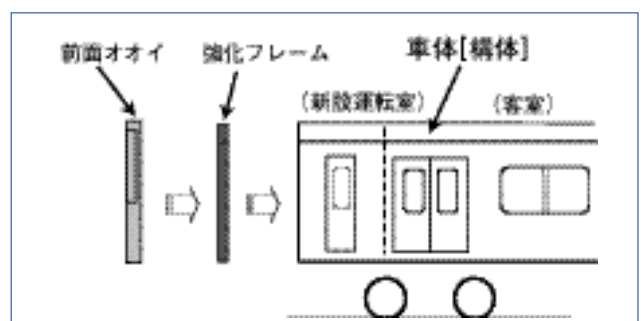


図1：先頭構体構成イメージ

なお、前面オオイと強化フレームとの強度分担は、踏切障害事故などの重・中規模の衝突に対しては主に強化フレームが、人身事故等の軽衝突に関しては主に前面オオイがそれぞれ負担する。

2.1.1 前面オオイ

従来の車両に使われている「前面FRP」は、3mm～8mm厚のポリエステル樹脂による繊維強化プラスチックの単板であり、このため前面FRP自体は剛性が小さく、車両への取付けにはステンレス構体側に骨や支えを設けて支持する必要がある。

さらに、前面FRPを支えに取付けるにあたっては、局所的な力を分散させるためのライナー調整が必要で、改造工数の増大要因となっている。

そこで、航空宇宙分野、船舶、自動車、建築などにおいて広く使われてきており、高い剛性が得られる「FRPサンドイッチ構造¹⁾」を使用して前面FRPを構成することとした。

なお、サンドイッチ構造とは、図2に示すように、板の表面に弾性率の大きい材料を配置し、中を空洞または柔らかい層として、曲げに対する弾性率を高くしつつ、軽量化を図った構造をいう。

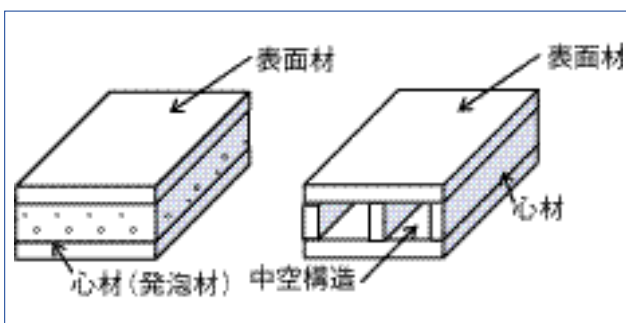


図2：サンドイッチ構造

サンドイッチ構造の主な特長は、軽く弾性率が高い。(剛性が高い)

断熱性に優れる。

遮音性に優れる。

の3点であり、の利点は、断熱性、遮音性に優れた各種プラスチックプリフォーム材の開発によるところ

が大きい。

2.1.2 強化フレーム

強化フレームは、構体と前面オオイの間に介在し、双方の取付上の仲介をなすとともに、踏切障害事故などの際に、その高い剛性を活かして被害を最小限に止める重要な部材である。

そこで本開発では、京浜東北線や中央・総武緩行線など、通勤形電車の主力として運行している209系電車(以下、「209系」と記す。)と同等の強度を確保することを目標とし、ステンレス鋼材によるアングル材及びハット材で構成した。

また、前部標識灯(前照灯)や後部標識灯(尾灯)、行先表示器等は前面上部に集中配置し、強化フレーム構造の簡素化に努めた。

2.2 材料

2.2.1 表面材及び心材の選定

表面材及び心材を選定するにあたり、平成11年度より各種比較試験、確認試験を行ってきた。その中から強度面、燃焼性面、リサイクル面等を評価して、表面材は「フェノール樹脂+ガラス繊維」、心材には「フェノール発泡+ペーパー+ハニカム(製品A)」と「ガラス3D織物(製品C)」を選定して適正な部位に使用することにした。

表面材及び心材を選定するにあたって実施した各種比較試験、確認試験結果に基づいた評価結果を表1に示す。

表1：表面材及び心材の評価結果

心材の材料	強度	燃焼	心材予備試験	パネル強度	成形性	調達	衝撃試験凹み	音の透過性	総合評価
製品A (16mm)	○	○	◎炭化のみ	◎	フクレ対策必要	◎	1.5mm	○	1
製品B (16mm)	△	△	×燃焼する	◎	曲面は?	△	4.5mm	○	3
製品C (10mm)	◎	○	---	---	曲面は○	◎	2.5mm	△	2

2.2.2 フェノール樹脂について²⁾

フェノール樹脂は熱硬化性プラスチックとして、既に130年の歴史があり、機械的特性、電気的特性、耐熱性、難燃性、耐薬品性等多くの優れた性質を有するため、工業化時代の到来と共に、従来材料に代わる人工材料として利用されるようになった。

しかし、従来のフェノール樹脂は、粉体または高粘度液体であり、コンパウンドとして使用するか、溶剤を用いて粘度を下げて基材に含浸させて使用する必要があるほか、硬化時の縮合反応のために高温・高圧を必要とするなどの制約があった。

その後、比較的低粘度で且つ高不揮発分の水系フェノール樹脂が開発され、溶剤を使用しないで直接基材へ含浸・積層することが可能となったほか、常温硬化させることも可能になり、更なる進歩を目指して研究が試みられているが、これらは総称して「第二世代フェノール樹脂」と呼ばれている。

さらに、硬化剤の開発により、ガラス繊維や炭素繊維を強化材として、不飽和ポリエステル樹脂と同様な成形技術（接触圧成形・プレス成形・SMC/BMC・FW・引抜成形等）で複合材料が成形できるようになった。

この「第二世代フェノール樹脂」を使用した複合材料を「フェノールコンポジット」という。

フェノール樹脂の最大の特徴は、高い耐熱性・難燃性を有することであるが、難燃性はポリマーの中で最も高く、燃え難いとされる塩化ビニールより更に燃えにくい。

自己消火性があり、外部から強制的に着火しても発煙は少なく、有毒性ガスが発生しないなど、他の樹脂にない優れた性能を有している。

2.3 接合方法

前面オオイは、FRPサンドイッチ構造を採用することで、高い剛性を得ることが期待できるため、前面強化フレームとの結合は前面オオイの周囲と窓周りをネジ止めにする構造とした。

強化フレームは、前面オオイの支持部分を減少させることができるため平面構成とし、窓周りの支持に必要な取付金のみを取付ける構造とした。

今後のステンレス車両の需給見通しから、既存の中間車を先頭車化改造することを想定し、強化フレームは妻構体のスミ柱や、ア・チケタの上に直接取付ける構造にすることで、改造の容易化を図ることとした。

3 衝突時の強化フレームの強度解析

3.1 解析内容

踏切での障害事故対策を考慮し、強化フレームの強度解析を行なったが、評価にあたっては前述の209系と比較することとし、下記の2点を比較の項目とした。

- ・前面オオイ腰部における、枕木方向のはりとみなしたときの断面特性。
- ・前面強化フレームと209系の前頭構体をモデル化し、レール面より1700mmの車体中心に単位集中荷重として $1 \times 10^4 \text{ N}$ （約1t）を負荷させたときの最大たわみ及び応力についてのFEM解析。

3.2 解析結果

前面腰部での枕木方向のはりとみなした断面特性比較断面2次モーメントは、前面強化フレームが $7.33 \times 10^6 \text{ mm}^4$ 、209系が $1.42 \times 10^7 \text{ mm}^4$ であり、209系の約半分であった。

209系と同等以上の値にするためには、横骨に若干の補強を追加する必要があることが判明した。

FEM解析での比較

レール面より1700mmの車体中心に単位集中荷重として $1 \times 10^4 \text{ N}$ を負荷させた時の最大たわみは、前面強化フレームが0.27mm、209系が0.19mmとなり、209系に比べ約42%大きい傾向であることがわかった。

最大応力は前面強化フレームが7.31MPa、209系が9.93MPaとなり、こちらは209系のほうが約36%大きい値となった。

結論

解析結果より、想定した前面強化フレームの強度は、209系の前面強度と比較して若干不足しており、実車両への適用を考慮した場合には、前面強化フレーム構

造を見直す必要があることが明らかとなった。

4 先頭構体試作

4.1 前面オオイと強化フレームの試作

前面オオイとして、「フェノール発泡+ペパハニカム」を中央部の芯材（厚さ26mmの部分）に、「ガラス3D織物」を取付部近くの芯材（厚さ10mm）にそれぞれ使用した、フェノール樹脂FRPサンドイッチ構造のものを試作した。



図3：試作オオイ



図4：試作強化フレーム

4.2 先頭構体の施工性評価

試作した前面オオイと強化フレームを用い、模擬的な構体取付作業を行った結果、定性的な比較ではあるが、製造現場での評価では従来からの工法に比べて作業性もよく、組立工数を減少させることが充分可能であることを確認した。

5 強度確認試験

前面オオイの強度を確認するため、高速走行時の風圧を想定した「等分布荷重試験」と衝撃が加わった時の破損状況を確認するための「衝撃試験」を実施した。

なお、強度確認試験においては、前面ガラスを取付けた状態で行なったが、これも前面オオイの高剛性がある意味で証明しているものである。

5.1 風圧試験

5.1.1 目的

試作した前面オオイを用いて、160(km/h)で高速走行する際の風圧に相当する荷重を想定し、窓下部に分布荷重を負荷して試験を実施した。



図5：等分布荷重試験（手前の荷重は铸铁制輪子）

5.1.2 測定結果

(1) たわみ量

測定結果を表2に示す。最大たわみは3014N負荷時、1.7mmであった。

表2：たわみ量測定結果

荷重 (N)	たわみ (mm)	荷重 (N)	たわみ (mm)
0	0	戻り 1918	1.2
1096	0.6	戻り 1096	0.8
1918	1.1	戻り 0	0.1
3014	1.7		

(2) 応力

測定結果を表3に示す。最大応力は3014 N負荷時、中央部とネジ取付部で0.9MPa (0.1kg/mm²)であった。

表3：応力測定結果

荷重 (N)	応力 (MPa)					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
0	0	0	0	0	0	0
1096	0	0.2	0	-0.2	-0.3	0.4
1918	0	0.3	-0.2	-0.4	-0.5	0.5
3014	0	0.4	-0.4	-0.9	-0.8	0.9
1918	0	0.3	-0.2	-0.5	-0.5	0.6
1096	0	0.3	0	-0.3	-0.3	0.6
0	0	0.1	0	-0.1	0	0

5.1.3 考察

たわみ量は最大で1.7mm、応力についても最大0.9MPaで、いずれも非常に小さい値であった。

従来方式のFRPを用いた荷重試験のデータがないため、相対的な比較は困難であるが、サンドイッチパネル構造にした効果として、高い剛性が得られたものと考えられる。

5.2 衝撃試験

5.2.1 目的

試作した前面オオイに衝撃が加わった時の強度をはじめ、オオイに破損が発生した場合の状況を確認するため、衝撃試験を実施した。

試験方法は、直径230mm (50kg) の鋼球を高さ567mmから自由落下させ、破損状況の確認及び破損範囲の測定を実施した。

5.2.2 試験結果

緩衝材 (板ゴム) を置いて落下させた場合と直接落下させた場合について試験を行ったが、いずれの場合も、前面オオイの破損は確認できなかった。

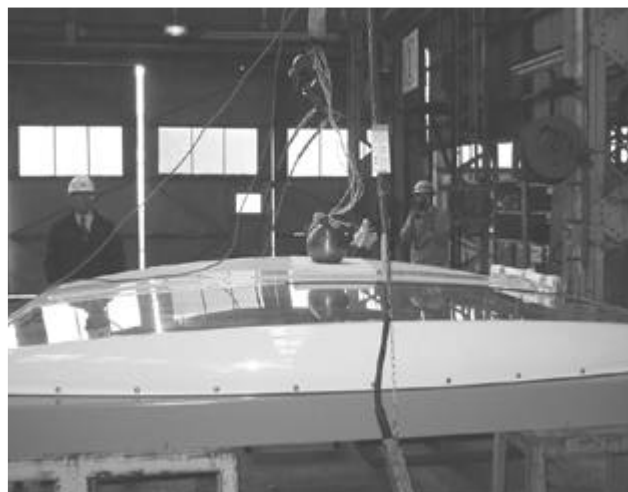


図6：衝撃試験 (鉄球を落下させた状態)

5.2.3 考察

緩衝材なしで直接FRP面に落下させた場合は鋼球がバウンドするほどで、サンドイッチ構造が有効に衝撃を吸収したことが確認できた。

ただし、当該部分を中心にFRPを切断してみると、落下位置とは離れた部分で、一部に芯材と表面層とが密着しない状況が確認できた。

隙間の生じていた部分は、取手取付部からカラ - 帯部に相当する位置で、形状に段差のある部分であった。

形状段差部では、芯材を面取りして取付けるようになっているが、この剥離部分では芯材の面取り量が不十分であったため、初めから芯材が表面層が浮き、密着していなかったためであると考えられるので、今後、成形時に注意が必要である。また製品完成後、密着度を打音検査等で確認する必要がある。

6 まとめ

冒頭に述べたように、本件は今後のステンレス車両や、既存の中間車両の先頭車化改造を想定し、先頭構体組立工数の低減を可能にする、複合材料を用いた先頭構体工法の開発が狙いである。

今回、サンドイッチ構造を採用した複合材料製の前面オオイや強化フレームを試作し、実際に両者を結合させて、等分布荷重試験や衝撃試験による強度確認をはじめ、結合時の作業性の確認を実施した結果として、総合的に次の結果を得た。

(1) 複合材料製の「前面オオイ」は、それ自身が高い剛性を有するため、強化フレームとの接合も容易であり、従来方式による構体とFRPの結合作業のような、細かい調整作業が不要で、取付作業時間を削減できることが確認できた。

また強化フレームも平面構成で製作でき、コスト削減に有効である。

(2) 「フェノール発泡+ペーパーハニカム」を中央部の芯材(厚さ26mmの部分)に、「ガラス3D織物」を取付部近くの芯材(厚さ10mm)に使用したフェノール樹脂FRPサンドイッチ構造の前面オオイを試作し、今後の量産生産に反映できることが確認できた。

ただし一部に芯材と表面層の密着が悪いために浮きが発生したこともあり、成型上での注意が必要であることも確認できた。

(3) 複合材料製前面オオイの強度確認のため、等分布荷重試験および衝撃試験を実施したが、たわみ、応力とも小さく問題はなかった。

衝撃試験についても、緩衝材なしでの落下において異常がなく、高い剛性を有することが確認できた。

(4) 強化フレームについての強度を評価するため209系と比較したが、断面特性については、解析に使用した骨材寸法形状の違い(209系のほうが高さ寸法が大)から、強化フレームでは42%程度低い数値となり、今後の実用化にあたって209系と同等以上の剛性を確保するためには、適切な補強を追加する必要があることがわかった。

以上より、強化フレームの一部設計見直しが必要であることが判明したが、本方式を応用した先頭構体構造の有効性が確認でき、技術的な目標はほぼ達成できたものと考えている。

その後、本開発成果を採り入れた車両改造が実施され、今秋から南武支線(尻手-浜川崎間)で運行を開始した205系先頭車化改造車をはじめ、既に5両の実績があるが、改造工数の低減に大きく寄与している。

現在、山手線で運行している205系通勤形電車は、今後他線区に順次転用する計画であり、短編成化に際して必要となる「中間車から先頭車への改造車」はさらに80両ほどあるが、いずれも本開発成果を採り入れる予定である。

いずれは、改造車両のみならず、新造車両においても本方式が幅広く適用されるものと考えている。

参考文献

- (1) 日本複合材料学会；おもしろい複合材料のはなし，日刊工業新聞社，1997.10.30
- (2) 社団法人 強化プラスチック協会（強化プラスチック）；フェノールFRP特集，上田市三，フェノールFRP概論，Vol.37，No.10，p360