特集号

技術報告

磁気浮上式鉄道用アルミニウム・ハニカムパネル製 SCM 支持枠の設計

小田 和裕*・阿座上雅芳*・加藤 健一*
永岡 齊**・奥戸行一郎***・難波 圭三***

Design of the aluminum SCM frame for Mag-Lev train

Kazuhiro ODA*, Masayoshi AZAGAMI*, Kenichi KATO*
Hitoshi NAGAOKA**, Koichiro OKUTO*** and Keizo NANBA***

1. はじめに

磁気浮上式鉄道は、(財)鉄道総合技術研究所が、宮崎実験線で、テスト車両 MLU002を用いて走行実験を継続中である。そのシステムは、推進力・浮上力ともに、車両に搭載した超電導磁石 (SUPER CONDUCTING MAGNET; SCM) と地上配置コイルとの間に作用する電磁気力に依存するので、車体をはじめあらゆる部分で軽量化をはかっている。強い磁場環境下であるため非磁性材料が望まれることもあり、アルミニウム合金を軽量化素材として多用しているが、一層の軽量化材料として、今回、ろう付アルミニウムハニカムパネルに着目した。

ろう付アルミニウムハニカムパネルは容易に溶接組立が可能で作業性が良い。かつ、比強度や比剛性が非常に高いという、ハニカムパネル一般の特徴を有しており、アルミニウム合金の素材としての安定性と高耐久性、コストの妥当性も考慮すると、構造物の軽量化に有望な構造材である。

実験車両 MLU002の現状の側面図を図1に示す。前後に1台ずつ台車があり、それぞれの台車には、片側当たり3個ずつ超電導磁石 (SCM) が取付けられている。

将来の磁気浮上式鉄道では、地上コイルの配置方法を変更する計画である。その場合の乗り心地向上策とし

て、SCM と台車枠の間にばね系を挿入し車体を2段階のばね系で支持する方法を開発中である。図2にその概念を示す。平成元年度には、このうち日向市寄りの1台車を、2重台車枠方式に改造することとなり、台車枠の重量が倍増することを防ぐため、超電導磁石を支持する支持枠 (SCM 支持枠) に軽量化材料であるろう付アルミニウムハニカムパネルを用いることとした。

ろう付アルミニウムハニカムパネルを用いた溶接構造物はまったく新しい構造物であるため、SCM 支持枠を設計するに当たり、強度や剛性、さらには解析手法についても、種々詳細な検討を必要とした。本報告では、その

図1 MLU002の側面図

図2 従来方式と2段階ばね系の車体支持方式

* (財)鉄道総合技術研究所 (東京都)。Railway Technical Research Institute (Kokubunji-shi, Tokyo)。

** (株)日立製作所笠戸工場 (下松市)。Kasado Works, Hitachi Ltd. (Kudamatsu-shi, Yamaguchi)。

*** 住友軽金属工業(株)技術研究所 (名古屋市)。Sumitomo Light Metal Ind. Ltd. (Nagoya-shi, Aichi)。

受理日：平成3年6月5日

図3 SCM支持枠の溶接組立

結果の一部を報告する。なお、SCM支持枠開発の概要と、解析手法の基本検討については、著者らが別途報告している^{1)~3)}。

2. SCM支持枠の構成

SCM支持枠の外観を図3に示す。これは溶接工場にて製作途上の状況である。アルミニウム板材同志の溶接組立て構造物では、溶接時の入熱による残留ひずみが大きく、拘束方法や溶接手順にノウハウを必要とした。しかし、ろう付アルミニウムハニカムパネルは面内剛性が高く、熱ひずみの発生がほとんどなく、高い仕上がり精度が確保できた。

SCM支持枠の基本構造は、超電導磁石を直接取り付ける側梁2本が台車の両側に並び、この2本の間を多数の横梁でつないだ枠組構造である。横梁は側梁を貫通している。

上下力は、側梁の4箇所にてけられた空気ばね座を介して弾性的に伝達され、前後力および左右力は横梁上に配置された前後・左右の各アンカー座に剛に伝達される。

側梁はろう付アルミニウムハニカムパネルを4辺に配した長方形断面の箱桁構造であり、各々4隅に配置した、Rを付けたコーナー金具（押出し形材）に溶接接合されている。横梁は、空気ばね用の補助空気室を兼ねるアルミニウム管である。内圧を受ける円管状の容器をサンドイッチパネルで形成することは、別報²⁾に述べるとおり得策ではないので、アルミニウム合金の円管を用いた。

また、空気ばね座は、上下両面に空気ばねが設けられるため、80 mmの厚さを必要とする。この厚さも、ろう付アルミニウムハニカムパネルを3層に重ねて確保し、空気ばね座の軽量化も計ることとした。

ろう付アルミニウムハニカムパネルの材質（芯材）は6951-T6合金、アルミニウム管・形材は6N01-T5合金、

その他のアルミニウム板材は5083-O合金とし、これらが溶接で組立てられている。ろう付アルミニウムハニカムパネルの調質には、溶接作業を済ませた後、焼戻し処理をした。また、SCM支持枠には、熱処理を済ませた後、必要箇所の機械加工が施されている。

3. ハニカム溶接構造物の構造解析

ハニカム構造材の設計検討は航空宇宙分野で接着ハニカムに関して行われている⁴⁾。しかし、接着剤は溶接に耐えられないので、ろう付アルミニウムハニカムパネルを用いたハニカム溶接構造物に関しては先例がない。SCM支持枠を設計するためには新しい設計基準が必要となるので、ハニカム溶接構造物の構造解析手法の検討を行った。SCM支持枠のような構造物は、種々の部分に様々な荷重が加わる複雑な構造物である。これを有限要素法で解析するために、ハニカムコアを個々に要素分割したのでは、要素数が多くなり過ぎ、解析は不可能となる。

そこで、ハニカムコアを面板間で平均化した素材（3軸直交異方性中実体）に近似する方法と、ハニカムパネルを1枚の板（2軸直交異方性板）に近似する方法の二つを考案した。便宜上、前者をハニカムソリッドFEM、後者をハニカムシェルFEMと呼ぶ。前者の内、ハニカムコアのパネル面内の剛性は無視し、厚さ方向の剛性は無限大とする方法（すなわち、ハニカムコアの存在を無視し、2枚の面板の間の距離は常に一定に保たれると仮定する方法）は、等価板厚法と呼ばれ、航空宇宙関係で接着ハニカムパネルに対して、よく用いられている等方性板解析である⁵⁾。

ハニカムソリッドFEM、ハニカムシェルFEMとも、構造解析に先立ち、それぞれの中実体および異方性板の解析用材料定数を与える必要がある。今回は、まず初期解析として、解析が容易な範囲の大きさの小型パネルを

表1 ソリッドFEM用材料定数の例

		材 料 定 数
引 張 り	xE	0.0105×10^5 MPa
	yE	0.0087×10^5 MPa
	zE	0.0195×10^5 MPa
せん断	xyG	4.9×10^2 MPa
	xzG	5.6×10^2 MPa
	yzG	4.0×10^2 MPa
ポアソン比	X方向荷重	$\nu_y = 1.0 \quad \nu_z = 0.15$
	Y方向荷重	$\nu_x = 0.57 \quad \nu_z = 0.11$
	Z方向荷重	$\nu_x = \nu_y = 0.01$

x；ハニカムL，y；ハニカムW方向⁶⁾

図4 ハニカム溶接箱桁の強度実験

図5 ハニカム溶接箱桁のシェル FEM 解析

図6 ハニカム溶接箱桁の応力の実験値と解析値の比較

取り出し、3次元平板構造の有限要素法解析を行った。その解析結果を、別に行っていた実験結果⁶⁾などと照合し、妥当な結果であることを確認したうえで、材料定数の算出を行った。一例として、ハニカムソリッド FEM 解析用の材料定数を示したものが表 1 である。

4. 側梁の強度と剛性の確認

側梁と同じ断面の箱桁（長さ1.2 m）をハニカム溶接構造物として製作し、これを試験片として、種々の荷重を加える強度実験を行った。強度実験の様子を図 4 に示

図7 梁継手の強度実験

図8 梁継手の解析例

す。他方、同じ荷重条件のもとで、ハニカムソリッド FEM およびハニカムシェル FEM による構造解析を行い、実験結果を考察した。ハニカムシェル FEM 解析の結果の一例を図 5 に示す。箱桁の剛性値を解析（ソリッドおよびシェル FEM）と実験とで求めた結果と比較すると3者とも非常によく一致している。SCM 支持枠を骨組構造として構造解析をする際には、ハニカムソリッド FEM 解析の値を用いることとした。

側梁は強軸回りの曲げと剪断を受け、かつ、梁軸回りにねじられると考えられる。そこで、この箱桁試験片の曲げねじり載荷実験を行い、応力測定値をハニカムソリッド FEM 解析の結果と比較した。図 6 に比較結果を示すが、両者は非常によく一致する。

5. 梁継手の強度実験と解析

側梁と横梁の継手の強度と剛性を調べる目的で実大部分模型（側梁長さの1/5）を作成し、強度実験を行った。強度実験の様子を図 7 に示す。また、この強度実験に対

図9 空気ばね座の強度実験

図10 空気ばね座の解析例

してもハニカムソリッドFEM解析を実施し、実験の結果と比較した。解析結果の一例を図8に示す。

両者はよく一致するが、いずれもかなり高い応力を示している。疲労限度を70 MPaとして設計していたので、継手構成を見直し、FEM解析と後述の実大試験により、発生応力が疲労限度以下にあることを確認した。

6. 空気ばね座の強度実験と解析

空気ばね座はろう付アルミニウムハニカムパネルを3層に重ねて、上下の空気ばねの間隔を確保できる厚さとした。このハニカム溶接構造物の強度を確認するために、空気ばね座のみの実大部分模型を作成し、強度実験を行った。実験の様子を図9に示す。このような実験で

図11 実大試験片の固有振動数測定

図12 実大試験片モード解析の一例

は表面の応力しか測定できないので、内部のハニカムパネルに発生する応力を確認する目的で、この場合もハニカムソリッドFEM解析を行った。図10に、解析結果の一例を示す。

7. 実大試験片の実験と解析

上記のような基礎検討の結果、実際に走行しているSCM支持枠と同じ実大試験片を作成し、種々の実験的検討を行った。結果の概要は別報に記すが¹⁾、固有振動数測定の状況を図11に示す。支持枠全体の解析は、2本の側梁と12本の横梁を梁材とした骨組構造解析により計算した。空気ばね座は剛体とし、SCMを模擬した治具の剛性は零の場合と、無限大の場合とを計算した。側梁（ハニカム溶接箱桁）の梁定数には、ハニカムソリッドFEM解析の結果を用いた。モード解析の結果の一例を図12に示す。

図13および図14は、静荷重試験（上下方向载荷）の結果（実験値）と解析値を比較したものである。両者はかなりよい一致を示している。

8. おわりに

ろう付アルミニウムハニカムパネルは、軽量かつ高剛

a. 変位分布

b. 軸方向ひずみ分布

図13 側梁の変位とひずみの計算値との比較

性であることを要求される際、溶接構造物として用いるのに最も適したものである。磁気浮上式鉄道車両用超電導磁石支持枠（SCM 支持枠）に適用し、強度実験と構造解析を実施した結果、期待通りの強度と剛性を確保しつつ、かなりの軽量化が計れることが確認された。ろう付アルミニウムハニカムパネルを用いることにより、SCM 支持枠の場合、板材と型材のみの同等の溶接構造物に比し、4 割近い軽量化が計れるものと見込まれる。

SCM 支持枠は、相当複雑なハニカム溶接構造物であり、とくにハニカム同志や、板材と型材との継手部を設計するには、非常に膨大な検討が必要であった。製作方法の検討も行ったが、部材と継手の基礎的な強度実験を系統的に行い、かつ、実大試験片による確認実験を行った結果として必要かつ十分な強度と剛性を有する SCM 支持枠を設計することができた。

強度実験の結果は、ほとんどすべて、構造解析シミュレーションによる考察を加えつつ、その都度設計に折込むこととした。構造解析には、別途独自に開発した有限

a. 変位分布

b. 曲げひずみ分布

図14 横梁の変位とひずみの計算値との比較

要素法（ハニカムソリッド FEM とハニカムシェル FEM）を活用した。

なお、この研究の一部は、(財)鉄道総合技術研究所が受ける国庫補助金により実施されたことを付言する。

参 考 文 献

- 1) 小田和裕, 阿座上雅芳, 加藤健一, 奥戸行一郎, 難波圭三: 住友軽金属技報, **32** (1991), NO. 2.
- 2) 奥戸行一郎, 難波圭三, 檜山裕二郎, 水越秀雄: 軽金属溶接, 投稿中.
- 3) 中島 洋, 小田和裕: 軽金属, **40** (1990), 229.
- 4) 國本 隆: 軽金属, **40** (1990), 390等.
- 5) 島村昭治, 宮入裕夫: [サンドイッチ構造], 日刊工業新聞社, 1974. 5.
- 6) 中西 広, 難波圭三, 佐野啓路, 伊藤泰永: 住友軽金属技報, **29** (1988), NO. 3, 218.