機械・構造物の強度と安全性評価の実例

3. 新幹線車両の構体[†]

公 江 茂 樹* 大 西 登喜夫**

Applications of Strength Design and Safety Assessment in Machine and Structure

III : Car Body Structures of Shinkansen

by

Shigeki KOE* and Tokio OHNISHI**

Key words : Shinkansen, Car body, Structure, Speed-up, Strength, Fatigue, Buckling, Weight reduction, FEM, Aluminum hollow extrusion, Aluminum honeycomb, CFRP

1 はじめに

我が国の鉄道車両の高速化は1964年の東海道新幹線の開業により飛躍的に向上し、1987年の旧日本国有鉄道の分割・民営化後は新幹線の高速化¹⁾が一段と活発に行われて、現在270～300km/hの営業運転が実現している。さらに高速化を目指してリニア新幹線の走行試験も行われている。これらの車両には高速化に伴う軽量化^{2),3)}、低騒音化、安全性の確保など厳しい条件を満たすことが要求される。

鉄道車両は大きく分けると車体と台車に分かれる。台車の特性⁴⁾や強度⁵⁾については別の機会に譲り、ここでは新幹線の高速化に伴う車体（以下その骨組みをさす構体という言葉を用いる）構造の変遷とその強度と安全性評価について解説する。

構体の強度・安全性には車体の変形や車両間の力に対する静的強度や柱・板の座屈強度のほかに、高速車両特有の車内外気圧差に対する静的強度とその変動による疲労強度を考慮する必要がある。

2 高速新幹線の開発経緯

1962年に東海道新幹線の試験電車を製作以来、0系電車の量産製作は約3000両に上っている。1973年には961形試験電車の製作を行い、これは東北・上越新幹線用量産車である200系へとつながっている。1985年には、0系の代替として2階建て車両を含む100系が登場した。1987年に国鉄がJR各社へ分割・民営化されると、営業運転速度向上を中心に各種新幹線の開発が盛んになった。1990年には、JR東海において300系^{6),7)}が登場し、時速270km/hでの営業運転を実現している。一方、1992年には、JR東日本において試験電車STAR21⁸⁾を、またJR西日本において試験電車WIN350を完成させ、走行

試験が行われてきた。また、この間に、JR東日本において新幹線—在来線直通の新幹線400系が開発され、1992年より東京から福島經由山形までの間で営業運転を行っている。さらに、東北新幹線の通勤需要に対応する総2階建て新幹線車両E1系⁸⁾の開発が行われ、1994年より営業運転を開始している。また、1995年にはE2/E3系⁹⁾の量産先行車が完成し、1997年にはE3系⁹⁾が秋田までの新幹線—在来線直通新幹線として営業運転を開始し、E2系は長野行き新幹線として営業運転を始めた。

このように新形車両が続々と投入される中、都市間の到達時間の短縮や輸送量の増加に対応する車両として、8両で分割併合できる総2階建てのE4系¹⁰⁾が開発され、1997年末に営業を開始した。さらに、より高速な新幹線として、500系¹¹⁾（図1(a)）がJR西日本により開発され、1996年より試験運転を開始し、1997年初めより山陽新幹線区間にて営業運転を開始した。1997年末には東京まで乗り入れ、東京—博多での営業運転を始めた。また、JR東海においてはJR西日本と共同で300系の後継として、快適な車内空間、車外環境への配慮をコンセプトとした700系¹²⁾（図1(b)）の開発が行われ、1999年より営業運転を開始している。

高速新幹線のもう一つの動きとして、リニア車両¹³⁾（JR東海、JR総研）の開発が行われている。山梨実験線用車両の第1編成が1995年に納入され、走行試験において1997年末には速度550km/hを記録した。同年に第2編成が完成し、第1編成と第2編成を用いて、すれ違い走行試験などが実施されている。

3 高速新幹線構体構造について

高速新幹線車体の構造には、歴史的経緯、構体を取りうる寸法、走行路線など種々の条件の下で^{14),15)}車両の

† 原稿受理 平成13年1月31日 Received Jan. 31, 2001

* 正会員 川崎重工工業(株)技術本部技術研究所 〒673-8666 明石市川崎町, Technical Inst., Kawasaki Heavy Ind. LTD., Kawasaki-cho, Akashi, 673-8666

** 川崎重工工業(株)車両カンパニー 〒652-0884 神戸市兵庫区和田山通, Rolling Stock Company, Kawasaki Heavy Ind. LTD., Hyogo-ku, Kobe, 652-0884

(a) 500 系新幹線 (写真提供: JR 西日本)

(b) 700 系新幹線 (写真提供: JR 東海)

図 1 新幹線電車

高速化, 軽量化, 高強度, 走行経済性, 低騒音, 低振動, 低コスト, メンテナンス性, 乗り心地などを高める努力がなされ, これまでにさまざまな種類の構成材料^{16), 17)}と構造方式^{2), 18)~21)}が開発されてきた。

これら各種構体の使用材料, 寸法等を 0 系から 700 系および E1 系から E4 系の営業運転車, STAR21 からリニアの試験車に整理して表 I に示す。構体構造の材料は当初鋼であったものが, 近年では軽量化を目的として, A6N01, A7N01 等のアルミニウム合金²²⁾が多く用いられるようになってきた。これら構体の構造図の例として 300 系, 400 系, 500 系, 700 系について図 2 に示す。高速新幹線車両 (図 1) では, トンネル突入時の微気圧波^{23)~25)}を抑えるため先頭部の形状を工夫している。

次に各車種の構造の特徴を述べる。0 系と 100 系は鋼製の骨部材と外板をスポット溶接で結合した骨皮構造である。200 系は新幹線としては始めて構体材料にアルミニウム合金を適用しているが, これは 0 系等の鋼をアルミニウム (A7N01, 5083 等) に置き換えた構造と考えることができる。300 系の構体構造は A6N01, A7N01 等の大型の押し出し形材 (図 3) が使用されており, 200 系と比べるとかなりの軽量化を果たしている。側梁はボックス形状をしており, それ自身で大きな剛性を有している。また, 屋根外板や側外板は補強材がついた形状の押し出し形材が用いられている。

400 系は新幹線一在来線直通新幹線で他の新幹線より小さく, E1 系は総 2 階建て新幹線であるが, いずれも 0 系, 100 系に近い鋼の骨皮構造である。E2 系, E3 系, E4 系はアルミニウム合金の大型押し出し形材を用いており, 300 系と同様の構造である。

500 系新幹線の構体は側, 床構造等の主構造にろう付けアルミハニカム²⁶⁾を用いており (図 4), 従来の構造とは大きく異なる。ハニカムを主構造に採用するに当たっては, ハニカムの要素試験体を用いて静的試験や疲労試

表 I 各種新幹線の要目

車種	主要材料	構造/工法	速度 (km/h)	主要寸法 (mm)
0系	鋼 (SPA-C, SS400等)	骨皮構造 溶接組立	220	L 24 500 B 3 380 H 4 000
100系 *1	鋼 (SPA-C, SS400等)	骨皮構造 溶接組立	220 230	L 24 500 B 3 380 H 4 000
200系 *1	アルミニウム合金 (A7N01, 5083等)	骨皮構造 スポット溶接	240	L 24 500 B 3 380 H 4 000
300系	アルミニウム合金 (A6N01, A7N01等)	押し出し形材 溶接組立	270	L 24 500 B 3 380 H 3 650
400系	鋼 (SPA-C, SS400等)	骨皮構造 溶接組立	240	L 20 000 B 2 947 H 3 970
500系	アルミハニカム アルミ合金 (A6N01, A7N01等)	アルミハニカム 溶接組立 *2	300	L 24 500 B 3 380 H 3 690
700系	アルミニウム合金 (A6N01, A7N01等)	中空押し出し形材 (ダブルスキン) 溶接組立	270 285	L 24 500 B 3 380 H 3 650
E1系 *3	鋼 (SPA-C等)	骨皮構造 溶接組立	240	L 24 500 B 3 380 H 4 485
E2系	アルミニウム合金 (A6N01, A7N01等)	押し出し形材 溶接組立	275	L 24 500 B 3 380 H 3 700
E3系	アルミニウム合金 (A6N01, A7N01等)	押し出し形材 溶接組立	275	L 20 000 B 2 945 H 4 080
E4系 *3	アルミニウム合金 (A6N01, A7N01等)	押し出し形材 溶接組立	240	L 24 500 B 3 380 H 4 485
STAR21 *4	アルミニウム合金 (A7075, A2024等)	骨皮構造 リベット結合	350~	L 17 500 B 3 100 H 3 500
WIN350 *4	アルミニウム合金 (A6N01, A7N01等)	押し出し形材 溶接組立	350~	L 24 500 B 3 380 H 3 400
300X *4	アルミニウム合金 (A6N01, A7N01等)	骨皮構造 スポット溶接	350~	L 24 500 B 3 100 H 3 300
リニア *4	アルミニウム合金 (A6N01, A7N01等)	骨皮構造 リベット結合	500~550	L 28 000 B 2 900 H 3 280

*1 主要寸法は 1 階車 *2 ハニカムと大型押し出し形材併用
*3 全 2 階建車両 *4 試験車/材料・構造は一例

験を行ってその強度を確認している。²⁷⁾

700 系新幹線の構体は, 大型中空押し出し形材²⁷⁾ (以後中空形材という) を本格的に採用した車両である (図 5)。側構造, 屋根構造等に中空形材を使用して剛性を高めると共に, 中空材の内部に防音材を充てんすることで防音効果を向上させる等, 従来の新幹線と異なる構造となっている。

リニア車両¹³⁾の構体の種類にはいくつかあるが, 表 I に示した例ではアルミ合金の外板にリング状にフレームが結合された構造である。外板は小骨が一体成形された押し出し材であり, 外板同士, 外板とフレーム, フレーム同士はリベットで結合されている。全体としては航空機の構造に近い構造である。

以上のように, 高速新幹線の構体構造はさまざまな変遷を続けてきた。これらは重量, コスト, 剛性, 荷重, 強度, ぎ装性, 振動・騒音特性, 製造性, その他の条件にもっとも相応しいことを目指して行われてきたもので, その時代の要求と技術を反映している。また, 新たな技術が開発されて構体構造が変わってきている。なお, これらの要求項目は相反するものもある。近年は高速性とともに関連性や環境にやさしい車両が求められてきている。

(a) 300 系

(b) 400 系

(c) 500 系

(d) 700 系

図2 各種新幹線の構体構造

図3 大型押し出し形材

図4 ろう付けアルミハニカム

図5 中空形材

4 構体に作用する外力と強度評価方法

4・1 構体に作用する外力

高速車両構体に作用する外力としては、在来線車両と同様な、自重、乗客荷重、曲線通過時の変形荷重、牽引力・ブレーキ荷重の他に、高速車両特有なトンネル通過時に生じる車内外圧力差およびその変動による繰返し差圧がある。

車両が高速でトンネルに突入すると前方に圧縮波、後方に膨張波ができ、これがトンネル内を往復する²³⁾(図6)。圧力波が往復している中を車両が通過すると構体はトンネル内の圧力変動をそのまま車内外の差圧変動として繰返し受けることになる。したがって、最大差圧に対する静的強度とともに差圧変動による疲労強度の評価が必要になる。

なお、最大差圧の計算式はJIS E7105(1989)に次式のように与えられている。

$$\Delta p = 380(V/200)^2 + 20$$

ここに Δp : 車内外圧力差 mmAq

V : 速度 km/h

実際の適用に際しては、車体とトンネルの断面積の影響を考慮してこの式を補正して使用する。

4・2 強度評価

自重、乗客荷重に対しては垂直荷重条件による静的強度評価を、牽引力・ブレーキ荷重に対しては車端圧縮荷重条件による静的強度評価を、曲線通過時等の変形荷重に対してはねじり荷重を条件としている。その他3点支持荷重条件による静的強度評価を行う。車内外圧力差に対しては内圧負荷条件による静的強度と疲労強度の両方

図6 トンネル内の圧力波の伝播

の評価を行う。

疲労強度を評価するためには、変動荷重の大きさとともにその頻度が必要である。そのために差圧や発生応力の大きさとその頻度を実車で計測してデータが蓄積されてきている。²⁵⁾これを基に、評価すべき車両が走行する路線のトンネル断面積と車体断面積の比と、車両の速度を用いて差圧の大きさを推定する。また路線のトンネル数や年間の稼働率、運用年数から差圧の発生頻度を推定する。これらより差圧と頻度の関係が得られ、応力範囲と頻度の関係を作成することができる。

静的強度では材料の降伏や座屈（局部座屈を含む）を起こさないことが、疲労強度ではき裂が発生しないことが求められる。

5 高速新幹線構体の応力解析

構体の強度検討は近年では主に解析的手法で行われる。すなわち有限要素法（Finite Element Method 以下 FEM）を用いて、前記の外力に対応した全体強度解析、局部強度解析、内圧強度解析が行われる。

5.1 全体強度解析

全体的な剛性の把握、変形および応力分布（応力の流れ）を確認する。全体解析モデルの例として E1 系の場合を図 7 に示す。通常、屋根外板や側外板はシェル要素で、側柱や側梁は梁要素でモデル化するが、必要な場合はすべてシェル要素で解析する。

5.2 局部強度解析

5.2.1 局部座屈 外板等の薄板では、発生応力が降伏応力より小さくても、板の寸法で決まる座屈強度を上回る応力が生じると、座屈を生じ変形する。そのため、外板等の薄板では座屈強度の検討が必要である。単純な形状では便覧等により座屈強度を求めることが出来るが、複雑な形状では FEM により座屈強度を求める。

5.2.2 応力集中部 通常の有限要素法ではコーナ

図7 FEM 解析全体モデル

一部等の応力集中による応力は計算されない。このため、必要な部位についてはズームング解析を行うか、その部分の要素分割を細かくして全体解析を再度行う。

5.3 内圧強度解析

車両が圧力を受けた場合、車端部は妻構造があるので剛性が高く変形しにくい。車体中央部は変形が大きく強度的に厳しい。このため応力解析は一般に中央付近の一部分を輪切り構造として切り出して（通常 1 窓分あるいは半窓分）行う。E1 系の場合の解析モデルを図 8 に示す。なお、必要な場合には車端部についても解析を行う。

6 構体部材の許容応力と強度評価手順

6.1 静的強度

静的許容応力は材料の降伏強度と引張り強さを基にして決められている。一般には材料の降伏応力 σ_y が用いられ、降伏しないように設計される。必要に応じて余裕度を考慮した許容応力が設定される。

6.2 座屈強度

座屈強度は、当該部分の寸法、板厚、材料（ヤング率）、周辺の支持状態（境界条件）によって異なる。部位ごとに便覧を用いた手計算や、FEM によって求められる。なお、座屈強度については必要に応じて試験を行って強度を求める場合もある。図 9 には中空材の座屈強度試験の状況を、図 10 には FEM 解析による座屈モードの計算結果の例を示す。

6.3 疲労強度

疲労許容応力は、疲労設計指針を利用するか、公的疲労データや図 11 のように疲労試験を新たに実施して得たデータを基にして疲労線図（S-N 線図）の形で設定される。疲労強度評価は図 12 に示すような手順で行う。まず FEM 解析で得られた応力と差圧頻度から応力の頻度を求める。次にこれをマイナー則あるいは修正マイナー

図8 FEM 解析輪切りモデル

図9 中空形材の曲げ強度試験

図10 FEM解析による座屈変形モード

図11 突き合わせ溶接継ぎ手の疲労線図 (S-N 線図)

図12 疲労強度評価法のフロー図

則を用いて、材料あるいは継ぎ手の S-N 線図に適用し累積疲労被害度を求める。最後に運行条件等を考慮して寿命を算定し評価する。実際には使用年数を先に与えて許容応力を求めておき、FEM 解析等による発生応力と許容応力を比較して強度を評価している場合が多い。

溶接構造の場合、継手形式によって疲労強度が異なる。図13に700系の場合の継ぎ手の例を示す。

(1) 鋼材

溶接継手には日本鋼構造協会の疲労設計指針²⁸⁾を用い、スポット溶接には試験で取得したデータを用いる。

図13 溶接継ぎ手の例 (700系)

(2) アルミニウム

一般の溶接継手には軽金属車両委員会資料や英国規格 BS CP118²⁹⁾と試験で取得したデータを、スポット溶接には試験で取得したデータを用いる。

(3) その他の新しい構造や材料

アルミリベット継手、ロウ付けアルミハニカム²⁶⁾、アルミ中空形材、アルミ摩擦かく拌接合 (FSW)、CFRP などでデータが無い場合は、試験を行って取得したデータを用いる。図14にはアルミハニカムの S-N 線図の例を示す。

7 実体強度確認

内圧に対する疲労強度を、実体モデルで各部の応力を静的に測定することにより確認することもある。図15に実長の半分 (長さ約10m) の部分構体の例を示す。内圧を静的に負荷して各部の応力を測定することにより気密荷重に対する疲労強度の確認を行う。²⁷⁾

図14 アルミハニカムの疲労線図 (S-N 線図)

図15 新幹線部分構体の例

8 高速新幹線構体構造の新材料について

複雑な形状である先頭車両の先頭部分について、平滑度を良くする事を主な目的として、CFRPを使用した構造の開発が行われ、E4系に実用化されている。¹⁰⁾この構造では、2枚のCFRPの板の間に発泡材をはさんだサンドイッチ構造のものを用いている。図16に、CFRP先頭構体を示す。

9 おわりに

0系から700系にいたる新幹線車両の変遷と構体構造の強度評価について概説した。高速大量輸送を担う新幹線は今後も高速化だけでなく快適性や環境への配慮を考慮しながら発展していくものと考えられる。

参考文献

- 1) 望月 旭, JREA, **33**, 19099 (1990).
- 2) 松田和夫, 日本機械学会誌, **85**, 716 (1982).
- 3) 鈴木康文, 佐藤 潔, 阿久津勝則, 鉄道総研報告, **7**, No.3, **65** (1993).
- 4) 岡本 勲, 下村隆行, 榎本 衛, 鉄道総研報告, **9**, No.1, **7** (1995).
- 5) 外山和男, 公江茂樹, 岩村 明, 材料, **41**, 957 (1992).
- 6) 伊藤順一, 車両と機械, **6**, No.4, **4** (1992).
- 7) 伊藤順一, 金属, **64**, No.6, **25** (1994).

図16 CFRP製先頭構体

- 8) 畑 正, 電気学会誌, **117**, 287 (1997).
- 9) 太田朝道, アルミプロダクツ, **10**, No.4, **14** (1997).
- 10) 石塚 理, 古川 誠, 板東舜一, 宮部秀樹, 山本達也, 織田光秋, 水田明能, 西川弘泰, 川崎重工技報, No.143, **68** (2000).
- 11) 吉村慎一郎, 影山真佐富, 服部 晃, 石塚 理, 日本機械学会第4回機械材料・材料加工技術講演会, **83** (1996).
- 12) 伊藤順一, Rolling Stock Machinery, **7**, No.4, **18** (1999).
- 13) 高尾喜久雄, 吉村正文, 田川直人, 松平頼治, 永野克幸, 井上明彦, 鉄道総研報告, **10**, No.1, **5** (1996).
- 14) 大山忠夫, 鉄道総研報告, **9**, No.1, **1** (1995).
- 15) 宮本昌幸, 鉄道総研報告, **9**, No.8, **1** (1995).
- 16) 桐村勝也, 鈴木康文, 長藤敬晴, 阿部則次, 長沢広樹, 菅原 淳, 大野 薫, 御船直人, 久保俊一, 辻村太郎, RRR, **50**, No.7, **25** (1993).
- 17) 辻村太郎, 鉄道総研報告, **9**, No.6, **1** (1995).
- 18) 鈴木康文, 日本機械学会誌, **96**, 294 (1993).
- 19) 平松幹雄, 電気車の科学, **46**, No.1, **16** (1993).
- 20) 田中眞一, 日本機械学会誌, **99**, 257 (1996).
- 21) 大西登喜夫, 大南亮一, 渡瀬 賢, 川崎重工技報, No.131, **118** (1996).
- 22) 服部守成, アルミニウム, **3**, No.13, **148** (1996).
- 23) 前田達夫, 鉄道総研報告, **10**, No.2, **5** (1996).
- 24) 公江茂樹, 日本機械学会関西支部第220回講習会, **21** (1996).
- 25) 仁瓶寛太, 尾野英夫, 公江茂樹, 稲村文秀, 大西登喜夫, 川崎重工技報, No.138, **30** (1998).
- 26) 竹島義雄, 平田勝彦, 住友軽金属技報, **27**, **50** (1986).
- 27) 大西登喜夫, 川上直朗, 大西博幸, 公江茂樹, 川崎卓巳, 川崎重工技報, No.138, **24** (1998).
- 28) 社) 日本鋼構造協会編, “鋼構造物の疲労設計指針・同解説”, p.5 (1993) 技報堂出版.
- 29) British Standards Institution, BS-CP118, **79** (1969).