

バンコク パープルライン — 車両の強度解析と試験設備 —

Thailand Bangkok Purple Line
— Strength Analysis and Testing Facility —

荒木雅之 Masayuki ARAKI
麻生和夫 Kazuo ASO
浅田謙二 Kenji ASADA
市川 聡 Satoshi ICHIKAWA
大野真弘 Masahiro OHNO

タイ王国のバンコク市で建設中のパープルライン向け車両の設計・製作は、当社の前身である東急車輛時代から数えて約10年振りの輸出車両である。一方でこの10年ほどの間に、鉄道関連の規格がヨーロッパを中心として急速に整備・拡張されてきたことは周知の事実である。したがって、このパープルライン向け車両の設計・製造は、これら最新の海外規格に当社として初めて本格的に取り組んだ例となる。本稿では、技術仕様書に基づき海外規格に沿って要求された車両構体と台車枠との強度検証に関し、当社で実施した解析、および新たに整備した試験設備の概要を述べる。

1 はじめに

パープルライン向け車両の設計・製作には、従来から国内向けの鉄道車両に適用しているJIS規格ではなく、ISO規格、UIC規格、EN規格などの国際的に認められた規格の適用が要求された。これらの鉄道に関する海外の諸規格は、市場の国際化、とりわけ1993年設立のEUによるヨーロッパ市場経済の統合や、1995年設立の世界貿易機関（WTO）による国際標準化の動きなどに合わせて整備・拡張が進められており、特にヨーロッパ諸国では、相互直通運転（インターオペラビリティ）や標準化に関連した研究開発とそれに伴う規格化の動きが活発である⁽¹⁾。さらに、ヨーロッパ諸国は、域内規格であるEN規格を国際規格化する活動も進めている。このように、鉄道関連の規格の整備や国際化が進められている中で、当社として約10年振りに設計・製作に取り組んだ輸出車両がパープルライン向け車両である。

本稿では、パープルライン向け車両の構体と台車枠との強度面から要求されたこれら海外規格に基づく検証内容と、それに対する解析および試験設備による対応状況の概要を紹介する。

2 車両構体の強度解析

パープルライン向け車両構体に対する強度検証は、技術仕様書に基づき主としてEN 12663-1:2010 (Railway applications-Structural requirements of railway vehicle bodies Part 1) に沿って行った。国内車両では一般に、

JIS E7106:2006 (鉄道車両 — 旅客車用構体 — 設計通則) に定められた上下最大荷重、前後荷重、ねじり荷重、3点支持荷重について解析やJIS E7105:2006 (鉄道車両—旅客車用構体—荷重試験方法) に従った試験が行われる⁽²⁾。これに対してEN 12663-1では、車両をいくつかのカテゴリに分類し、それぞれのカテゴリに応じた要求事項や、具体的な荷重値が定められている。今回のパープルライン向け車両は、地下鉄等のP-IIIカテゴリに相当している。このP-IIIカテゴリには、上下荷重のほかに次のような荷重がある。まず、4通りの前後方向荷重があり、それぞれ負荷位置とその荷重値が定められている。また、JIS E7106ではジャッキ支持による荷重条件として空車質量での3点支持が示されているが、EN 12663-1では空車質量に台車質量を含めた状態でのジャッキ支持条件が3通り示されている。このように、JIS E7106に比べて評価すべき荷重条件が多岐に渡ることがEN12663-1の特徴である。

さらに、JIS E7106では一般に行わない旨が示されている疲労強度評価であるが、パープルライン向け車両ではEN 12663-1に沿った疲労強度の評価を行った。

以上のような強度評価を図1に示す3次元モデルに基づく有限要素法によって実施した。図1は、左右方向の半分モデルとして示しているが、実際には車両構体全体を対象としたモデルを構築して解析を行った。解析の結果、静的強度と疲労強度との双方がEN 12663-1および客先要求仕様を十分に満足することを確認した。

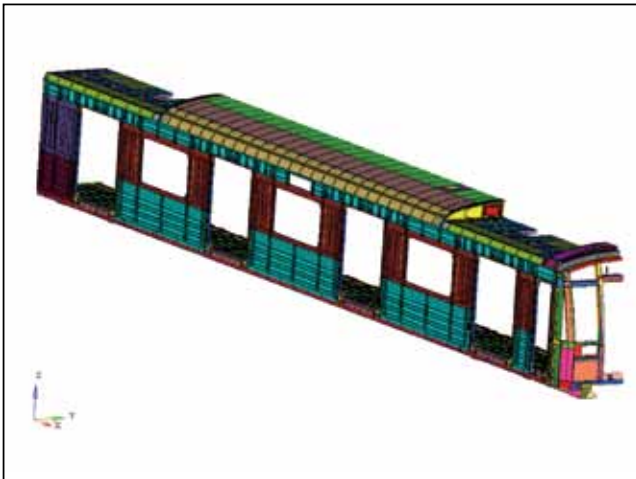


図1 車両構体の強度解析モデル

3 衝突解析

海外向け車両の設計・製作において必須となる強度評価項目として耐衝突特性がある。パープルライン向け車両の耐衝突特性の評価は、技術仕様書に基づき主としてEN 15227+A1:2008 (Railway Applications–Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies) に沿って行った。EN15227+A1では、車両のカテゴリに応じていくつかの衝突シナリオが定められている。パープルライン向け車両は、地下鉄等のC-IIカテゴリに相当しており、同一編成同士の速度25km/hによる衝突というシナリオに基づいた評価が要求された。

パープルラインは開業当初3両編成で運行されるが、将来的には最長で6両編成による運行が計画されている。このため、衝突解析は6両編成同士の衝突を想定して実施した。まず初めに、バネマスモデルによる概略解析を実施して連結器緩衝装置の性能検討を行った。つぎに図2に示した先頭車の3次元有限要素モデルを用いた詳細な衝突解析を行った。この3次元解析では、上下のオフセット量40mmの考慮を行った。

これらの解析結果に基づいて適切な性能を有する連結器緩衝装置を選定した。その結果、速度25km/hによる衝突においても先頭車両の構体間での衝突が生じることがなく、かつEN15227+A1の要求を満たしていることを確認した。図3に衝突終了後の両先頭車の状況を示す。

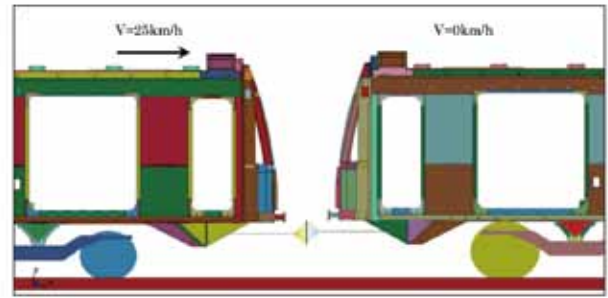


図2 衝突解析モデル

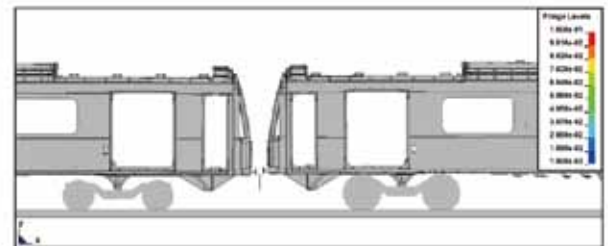


図3 衝突終了後の先頭車

4 台車枠強度解析

パープルライン向け台車枠に対する強度検証は、技術仕様書に基づき主としてUIC 615-4 2nd edition (Motive power units–Bogies and running gear – Bogie frame structure strength tests) に沿って行った。国内向けの台車枠では、JIS E4207:2004 (鉄道車両一台車一台車枠設計通則) およびJIS E4208:2004 (鉄道車両一台車荷重試験方法) に基づいた疲労強度評価が行われている⁽³⁾。このJISによる疲労強度評価は、主に静荷重による応力から求めた平均応力と動荷重による応力から求めた変動応力とを応力限界図に適用して評価を行う。一方UIC615-4には、3種類の静的な荷重試験と疲労試験とが要求されている。静的な荷重試験は、営業運転時の最大荷重を想定した降伏点に対する強度評価を目的としたもの1種類と、営業運転時の繰り返し荷重に対する疲労強度評価を目的としたもの2種類とに分かれている。静荷重試験結果に基づく疲労強度評価の手法に関しては、「最新の学識水準に沿ったもの」と記載されており、具体例としてERRI Report B12/RP17のAppendix6に記載されているGoodman-Smith線図を挙げている。

パープルライン向け台車枠では、上記したUIC615-4が要求する3種類の静的な荷重に対して、図4に示した3次元有限要素モデルを用いた解析を行った。その結果、営業運転時の最大荷重に対して降伏点以内の応力であること、および疲労強度を満たしていることを確認した。

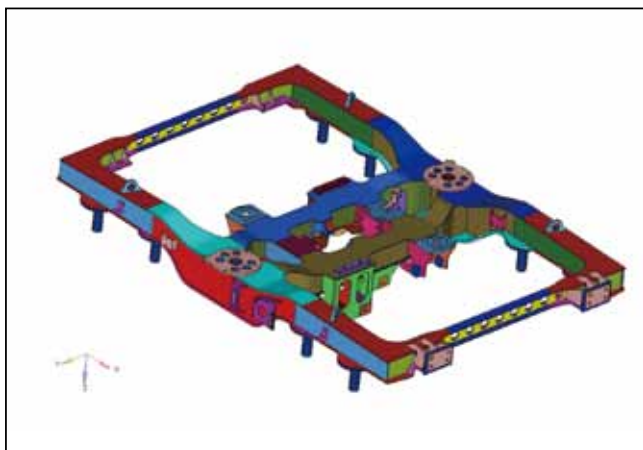


図4 台車枠の強度解析モデル

5 疲労強度評価手法の一例

国内向けの鉄道車両の疲労強度評価は、前述したようにJIS E4207に示されている応力限界図を用いて行われることが一般的である。一方で、ここまで述べてきたEN規格やUIC規格などでは、最新の技術的知見に基づき国際的にも認知された手法による疲労強度評価が要求されている。本稿では、疲労強度評価に関する国際的な規格の一例としてドイツ溶接協会の規格であるDVS 1612:2014-08（英文名 Design and endurance strength assessment of welded joints with steels in rail vehicle constructions）を取り上げ、その内容を簡単に紹介する。

DVS 1612は、国際溶接学会（IIW）の疲労強度設計指針（Recommendations for fatigue design of welded joints and components）と同様に、溶接継ぎ手の形状に応じた等級分けを行っており、それぞれの等級に対する疲労強度を示している。この継ぎ手形状に基づく等級分けは、他の海外規格、例えばEurocode 3や、国内における鋼構造協会の疲労強度設計指針なども採用している手法である。ここで、DVS 1612を特徴付けているものは、疲労強度の許容値を求めるための線図を、直応力に関する平均応力の正負と鋼種とによって区別している点である。すなわち、平均応力の正負2種類とS355およびS235の2種類の鋼種とからなる4種類のそれぞれに対し、継ぎ手形状に応じた等級ごとに決まる疲労強度の許容値の線図（DVS1612ではMKJ線図と称する）を定めている。

図5は、SS400相当の鋼種であるS235に対する直応力の平均応力が正の時のMKJ線図を、DVS1612に記載されている式に基づいてグラフ化したものである。横軸は、最小応力を最大応力で除した応力比であり、縦軸は疲労強度の許容値である。また、図中にA～F3で示されている記号は継ぎ手形状に応じた等級を表しており、カッ

コ内の数字は応力比が-1、すなわち両振りの時の疲労強度の許容値を表している。図では、応力比が1に近づくに従って許容値が急激に増加しているが、許容値は材料の降伏点によって限定されると規格の本文に述べられている。この他に、DVS1612では、10mm以上の板厚に対する許容値の低減式や多軸応力状態に対する評価手法などが定められている。

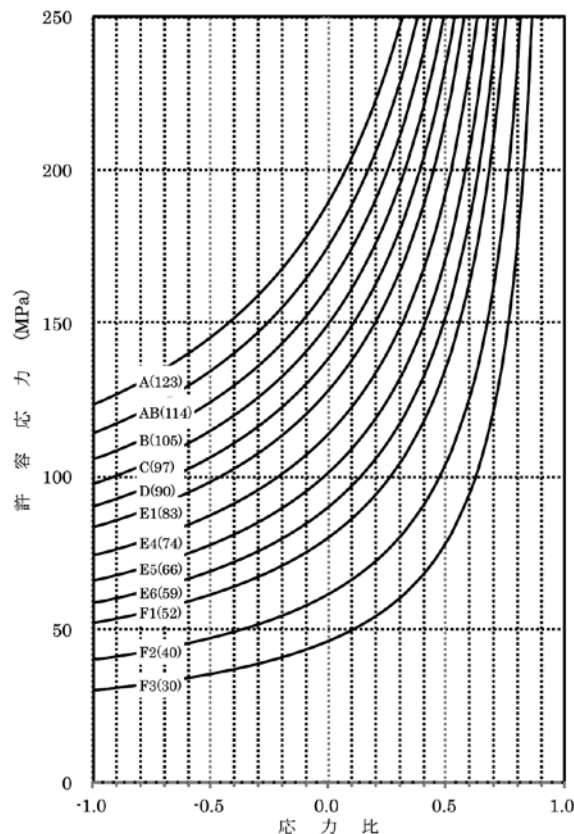


図5 S235の疲労MKJ線図

6 荷重試験設備

パープルライン向け車両では各種の荷重試験を行ったが、ここでは構体荷重試験の実施に当たって新たに導入した設備を紹介する。

従来の構体荷重試験では、JIS E7105に沿った車端圧縮試験を行ってきた。しかし、EN 12663-1には、前述したように多種類の車両前後方向の荷重が定義されている。そこで今回、これら各種の車両前後方向の荷重試験を可能とするために、新たな構体荷重試験設備を導入した。図6に導入した設備を用いたパープルライン向け車両の構体荷重試験の実施状況を示す。



図6 構体荷重試験の実施状況

7 さいごに

ここまで、パープルライン向け車両に対する強度解析と試験設備について、国内規格および海外規格との比較を交えながら述べてきた。実際の解析や試験に当たっては、国内市場とは大きく異なるさまざまな規格や顧客の要求に苦労を重ねたが、その苦労の見返りとして海外規格や国際市場における技術動向などについて理解を深めることができた。そして、その結果としてパープルライン向け車両を、規格や顧客の要求を十二分に満足した車両として送り出すことができた。

市場のグローバル化や新興国の経済発展に伴い、今後も海外向け車両への取り組みが増大していくと考えられる。また一方で、ヨーロッパを中心とする鉄道関連規格の整備もさらに進むものと考えられる。このような状況の中で、海外規格に対応した解析技術および試験技術がなおいっそう重要になっていくと考えられる。したがって、今後ともたゆまぬ努力を続けていく所存である。

参考文献

- (1) 田中裕：「鉄道分野における国際化とは」、RRR Vol.68 No.2, 16-19, (2011), 鉄道総合技術研究所
- (2) 宇治田寧：「機械・機械構造物の強度設計と事例2. 鉄道車体」, 材料 Vol.59 No.7, 575-582, (2010), 日本材料学会
- (3) 山本三幸：「鉄道関連製品の疲労に関わる研究開発とその展望」, 新日鉄住金技報 395号, 34-40, (2013), 新日鉄住金株式会社

著者紹介



荒木雅之
生産本部
技術部 部長（基礎開発）



麻生和夫
生産本部
技術部（車体設計） 主任技師



浅田謙二
生産本部
技術部（技術解析） 課長



市川 聡
技術士（機械部門）
生産本部
技術部（台車設計） 主査



大野真弘
生産本部
技術部（試験） 課長