感度解析と経験則による鉄道客車の満足設計*

安達 瑛二^{*1}, 大島 聡^{*2}, 東 正毅^{*1}Satisfactory Design of Railway Passenger Cars Using
Sensitivity Analysis and Empirical Knowledge

Eiji ADACHI, Satoru OHSHIMA and Masatake HIGASHI

Railway passenger car bodies have been parametrically designed based on empirical knowledge of expert designers. To meet demands for systematic and satisfactory design, this paper presents a new computer aided design method to determine satisfactory structures and dimensions using sensitivity analysis and empirical knowledge. Data of a tentatively designed structure is inputted into a computer using a product modeling technique. The structure produces an evaluation model consisting of sections called blocks which in turn consist of components. Introducing sensitivity analysis we can evaluate the effectiveness of the weak parts of all blocks and all parameters of the components. Responding to the analysis in terms of empirical knowledge, the priority list of parameters to be modified is decided, since designers expect the new method to be as usable as conventional methods. On a railway passenger car we obtained a practical solution in less than 28 hours, after examining all possible cases of the modification.

Key Words: Design Engineering, Satisfactory Design, Railway Passenger Car, Sensitivity Analysis, Product Modeling

1. 結 言

従来の鉄道車両構体の設計は、部材配置や寸法の決定など、過去の類似例に頼る設計が多く、その修正は一部に限定されしかも設計者の経験に頼ることが多かった。その結果、得られた設計解は設計的にも製造上も必ずしも最適解とは言えなかった。近年、鉄道車両構体の設計に設計期間の短縮、多種構体の部品共用化、高剛性化と軽量化、生産性向上への配慮、等が求められるようになった。このような複雑かつ高度化した設計には従来の経験的設計修正だけでは不十分で、コンピュータを用いた高速かつ合理的な新しい設計法が必要である。一般に、実際の設計には、ある目的関数を最適化するよりも、できるだけ多くの目的関数をその満足水準以上にする満足設計が適している。一方、鉄道車両の設計自動化について、これまで意匠設計⁽¹⁾、台車設計⁽²⁾、機器配置設計と製図⁽³⁾、等の研究例は報告されているが、構体設計の研究例を見ない。

そこで本研究は、鉄道客車の曲げ強度設計を例に、感度解析と経験則とを組合せた満足設計を新たに試み

たものである。すなわち、感度解析により構体強度に影響するすべての部材を評価した設計満足化を図り、また、感度解析結果に経験則を組合せて設計修正方法の優先順位付けを行うことにより従来の装備設計、材料取り、製造方法を崩さない極めて合理的かつ実用的な満足設計解を得るものである。なお、鉄道客車構体に働く曲げ荷重を負担するのは主として側構体と考えられるので、本研究では側構体のみを設計対象としている。

2. 満足設計のプロセス

まず過去の類似例と経験的知識により試みの解を入力する。入力された部材寸法と位置、およびそれらの関係記述から客車構体の形状が、プロダクト・モデリング⁽⁴⁾を用いて、コンピュータ内で生成される(構体モデル)。

生成された構体モデルは、形状および機器の配置検討には適しているが強度評価には不適當なため、さらに強度解析に適した二次元ラーメン構造(評価モデル)に置き換える。評価モデルの二次元ラーメン構造はブロック(3・2節参照)を要素とする。

強度評価は各ブロックの応力およびたわみ率(3・2節参照)が許容値内にあるかどうかで行う。応力ある

* 原稿受付 平成元年5月17日。

^{*1} 正員、豊田工業大学(〒468 名古屋市天白区久方2-12-1)。^{*2} 日本車輛製造(株)(〒442 豊川市穂ノ原2-20)。

いはたわみ率が許容値を越えているブロック（以後、強度不足ブロックと呼ぶ）が存在すると、その強度不足を補う効果の大きいブロックをまず探し、次いでそのブロック内の効果の大きい部材とその諸元とを捜す。探し出されたブロックおよび部材諸元の採用の優先順位は効果の大きさ（感度係数の大きさ）と設計上また製造上の都合（経験則）との絡み（優先順位決定ルール、4・3節参照）により決定される。優先順位に従って、各ブロックの強度不足が解消されるまで、部材諸元の修正を行う（図1）。

3. 構体モデルと評価モデル

設計に必要なすべての情報はデータベースに納められ、設計の進行に伴い、追加され、書き換えられる。構体設計に必要な情報は部材の存在、部材の属性（位置、形状、種類、材質、断面積、断面二次モーメント、等）、部材間の関係、負荷条件、評価基準、評価結果などである。これらの情報を用いて自動的に設計を行い、構体構造を表す構体モデルの生成、強度評価のための評価モデルの生成、および強度評価と設計修正を行う。

3・1 構体モデル 構体ははり、柱、板、等の部材の集合体である。したがって、これら部材の情報（存在、属性、関係）があれば構体モデルを生成できる⁽⁴⁾。すなわち、多角柱、多角錐、等の基本立体（cell）の組合せ方を1階述語論理で、また、面、辺、点間の関係をリスト構造で表現したセル構造で部材を表す。この方法によれば構体モデルの生成と各部材の形状モデルの保存が

同時に可能である。なお、部材の存在、属性、関係の記述は Common Lisp 環境下の論理形データベース Comet/LM⁽⁴⁾で行っている。

試みの解の入力データは構体の全長と高さ、出入口の寸法と位置、窓の寸法と位置、部材の寸法とその位置、外板板厚、等である。試みの解の段階で生成した構体モデルを示す（図2）。

3・2 評価モデルと吉峯法⁽⁵⁾ 構体モデルは構造、部材、機器配置、等の検討には適しているが、強度評価には適していない。そのため、強度評価として、構体モデルから自動的に評価モデルを生成する。広く実用されている構体の強度評価法には吉峯法と有限要素法とがあるが、ここでは吉峯法を採用する。

まず曲げ荷重に対して、構体を側構体各部の断面の図心軸に配した要素（ブロック）から成る二次元ラーメン構造として扱う（図3）。すなわち、二次元ラーメン構造は出入口あるいは窓を囲む部分（ブロック）で構成され、ブロックはさらに部材（メンバ、せん断パネル）で構成される。各ブロックはそれぞれ部材（メンバ、せん断パネル）から成る。また、曲げ荷重はブロックの節点への集中荷重、たわみは荷重点の変位、たわみ率は構体の長手方向に分布する定点間のたわみ変化率である。たわみ率は強度評価項目の一つである。応力は各ブロックあるいは各部材の曲げ、引張り、せん断応力とする。

吉峯法では、不静定系の一部を切断して静定系とし、切断部に余力を与え、このようにして作った等価な静定系の切断部において負荷荷重による変位と余力による変位とが等しいと置くことにより解く。

ブロックおよび部材の属性は断面二次モーメント I 、断面積 A 、せん断力に対する断面積 A_s 、種類、位

図1 満足設計の流れ図

図2 構体モデル（左半分と部分拡大）

置, 評価結果である。

4. 修正法の選定と設計修正

修正すべきブロックおよび部材（以後、それぞれ修正ブロックおよび修正部材と呼ぶ）の選定と優先順位付けとは、強度不足ブロックの強度不足量に対する、各ブロックおよび各部材の感度係数と、設計上および製造上の経験則とにより行う。

4・1 感度解析 感度係数は設計変数の比の変化に対する応力またはたわみ率の比の変化とする。感度解析は二段階で行う。まず修正ブロックを選定するために、各ブロックの属性 (I, A, A_s) を設計変数として感度係数を求める。次いで、修正ブロック内の修正部材を選定するために、各部材の属性 (I, A, A_s) を設計変数として感度係数を求める。ここで、感度係数がある値以上のブロックに限定すると、次の修正部材選定のための感度解析を簡略化できる。本研究では、有意なブロックおよび部材は感度係数が 0.1 以上のものとした。その結果、本研究の場合、強度不足ブロックから遠く離れたブロックは応力過大に対する修正ブロックから除外された。また、たわみ率過大に対する修正ブロックはほぼ全ブロックとなった。

ブロックの属性および部材の属性を設計変数とする感度係数は設計変数を元の値のそれぞれ 50 % および 200 % とした時の強度不足ブロックの応力およびたわみ率の比の変化を近似した直線のこう配で表され、各ブロックおよび各部材の各設計変数についてそれぞれ 2 個ずつ存在する [式 (1)]。経験的に見て、50 %, 200 % はそれぞれ現実にとり得る設計変数の比の下限、上限を表す。

$$a_{0.5} = \frac{v_{0.5} - v_0}{x_{0.5} - x_0}, \quad a_{2.0} = \frac{v_{2.0} - v_0}{x_{2.0} - x_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

図 3 評価モデル

a : 感度係数

v : 応力またはたわみ率の比

x : 設計変数の比

4・2 経験則 永年の経験と経験的知識に基づく

経験則は設計上も製造上も無視できない。すなわち、設計上では、経験則を取り入れることにより、未解析の性能も目標達成でき、共用機器が搭載可能となり、軽量で信頼性の高い構造が実現しやすい。製造上では、経験則を取り入れることにより、汎用性の高い材料、従来の加工機械および加工工程をそのまま使用できる。その結果は経済性の高い、実現性の高い設計解となりやすい。

本研究における、経験則は次の項目と順位である。

(1) 特殊形状、特殊断面の部材を避ける（設計上、製造上）

(2) 部材追加を極力避ける（設計上、製造上）

(3) 板厚増加を極力避ける（設計上）

4・3 修正ブロックおよび修正部材の優先順位

優先順位付けはまずブロックについて行い、次いでブロック内の部材について行う。すなわち、ブロックの優先順位 1 位を選びそのブロック内の部材の優先順位 1 位から末位までを選び、次いでブロックの優先順位 2 位に移る (図 4)。部材の優先順位はブロック内のものと構体全体におけるものと 2 種類である。

修正ブロックあるいは修正部材の優先順位付けは次の項目と順位（優先順位決定ルール）で行う。

(1) 感度係数が大きい

(2) 重量増加が小さい

(3) 経験則 (4・2 節参照) に従う

(4) 他の問題ブロック、要注意ブロックに悪影響がない

すなわち、修正ブロック、次いで修正部材を (1) に従い優先順位付けし、その順位を (2) に従い修正し、

Candidate block	Priority of block	Candidate part	Modification method	Priority in a block	Priority in the body
B _{can} -1	1	P _{can} -1-1	M-1-1	1	1
		P _{can} -1-2	M-1-2	2	2
		P _{can} -1-3	M-1-3	3 (*)	7
B _{can} -2	2	P _{can} -2-1	M-2-1	1	3
		P _{can} -2-2	M-2-2	2	4
B _{can} -3	3	P _{can} -3-1	M-3-1	1 (*)	8
		P _{can} -3-2	M-3-2	2	5
		P _{can} -3-3	M-3-3	3	6

Modification method : M-(Priority in the body)-(Priority in a block)

(*) Undesirable judging from empirical knowledge

図 4 修正の優先順位の例

(3)に従いさらに修正あるいは一部削除し、(4)に従いさらに一部削除し、最終的な優先順位を決定する。なお、(2)に従い、断面二次モーメントの増加にはまず断面高さの増加によるものを優先し、また、(3)に従い、部材追加とせん断パネル板厚の増加をそれぞれ末位と下位とする。

なお、修正部材決定の Lisp によるプログラムの一例を次に示す。

```
(rule shuuseirule1
(if (modify * block1 * blok2 * method)
(not (apply * block1 * block2 kohorule7))
(me I * method)
(p_bem * block2 * part)
(offset * block2 * part))
(then
(asrP (apply * block1 * block2 kohorule7))
(mf_part * block1 * block2 * part chg_thick)
(mf_part * block1 * block2 * part chg_height)
(add * block1 * block2 reinforce offset
* part * part)))
```

4.4 設計修正 設計修正の実行は前述の優先順位に従い行う。各設計変数の修正可能限度と1回当たりの修正量をあらかじめデータベースに登録しておく。修正可能限度は他部材、配置機器、等との干渉を避け、また、過剰な構造を避けるものである。まず優先順位が1位のブロックの1位の部材属性の修正を行い、その修正可能限度に到達してもなお強度不足ブロックの強度不足が解消しない場合には2位の部材属性の修正に移る、と言う流れになる。なお、修正が4.3節の

表1 負荷荷重

Total load	$4.85 \times 10^5 \text{ N}$
Body weight	$2.06 \times 10^5 \text{ N}$
Pay load	$2.35 \times 10^5 \text{ N}$
Dynamic load (converted to static load)	$4.41 \times 10^4 \text{ N}$

図5 適用例の鉄道客車構体

(4)に該当する場合には、優先順位が先の修正を一部旧に戻し、次位の修正を行うことがある。

5. 適用例：鉄道客車構体

本研究の妥当性と実用性を検証するために、実際の20m級の鉄道客車構体(図5は左右対称な構体の左半)の初期設計値に本研究の方法を適用した。構体は普通鋼製軽量構造で外板板厚は $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、初期設計時の部材数は109個である。構体の負荷荷重は車体重量(=車両重量-台車重量)、最大積載荷重(300%乗車時)および上下動荷重の静荷重換算値の総和である(表1)。評価基準は応力が疲労限度の75%以下(引張り)、67%以下(圧縮)、たわみ率が 2.5×10^{-3} 以下(出入口下)、 2.0×10^{-3} 以下(窓下)で、いずれも経験的知識によるものである。応力評価位置は各ブロック当たり4~6点、たわみ率評価位置は構体下部の1~2点とした。

なお、本適用例の計算機(UNIVAC SS-5, 1 MIPS)処理時間は約27.5時間(含:モデル生成6時間、感度解析6.5時間、修正部材決定2.5時間、修正実行12時間)、修正部材は16個(含:追加部材5個)であった。

5.1 応力およびたわみ率 表2に応力過大の10

表2 強度不足ブロックの初期値および修正値

Block	Point	Stress MPa						Def. Ratio $\times 10^{-3}$	
		UP.LH	UP.MID	UP.RH	LW.LH	LW.MID	LW.RH	LH	RH
4	Original	-117.4	144.1	-202.9	130.3	-185.1	232.8	0.34	4.17
	Modified	-41.9	80.4	-75.8	44.8	-78.1	84.7	-0.49	2.50
	Ratio	0.28	0.38	0.52	0.27	0.52	0.51	0.20	1.00
6	Original	48.8	—	-45.8	-107.4	—	-20.9	2.06	—
	Modified	52.4	—	-31.8	-94.3	—	-13.3	1.80	—
	Ratio	0.31	—	0.21	0.84	—	0.09	0.90	—
7	Original	48.7	—	-14.9	-5.8	—	28.2	2.06	—
	Modified	33.8	—	-13.0	-8.7	—	25.0	1.80	—
	Ratio	0.20	—	0.09	0.05	—	0.15	0.90	—
12	Original	88.1	—	-182.3	-150.8	—	55.7	2.00	—
	Modified	88.1	—	-144.7	-122.9	—	81.8	1.78	—
	Ratio	0.41	—	0.98	0.84	—	0.37	0.71	—
21	Original	-182.1	—	65.9	55.5	—	-150.7	2.00	—
	Modified	-144.8	—	68.1	61.8	—	-122.9	1.78	—
	Ratio	0.98	—	0.41	0.37	—	0.84	0.71	—
27	Original	-45.4	—	48.5	-20.0	—	-108.5	2.06	—
	Modified	-31.7	—	52.3	-13.0	—	-94.0	1.80	—
	Ratio	0.22	—	0.31	0.09	—	0.84	0.90	—
28	Original	-15.9	—	47.7	28.5	—	-5.4	2.06	—
	Modified	-13.7	—	33.0	25.3	—	-8.3	1.80	—
	Ratio	0.09	—	0.20	0.15	—	0.04	0.90	—
31	Original	-202.9	144.1	-117.4	232.8	-185.1	130.3	4.17	0.34
	Modified	-75.9	80.4	-42.1	84.7	-78.1	44.9	2.50	-0.49
	Ratio	0.52	0.38	0.29	0.58	0.52	0.27	1.00	0.20

Ratio=Modified value/Allowable value

Allowable stress: in tension 186.6 MPa
in compression 147.0 MPa

Allowable deflection ratio: on beams around a door 2.5×10^{-3}
on beams around a window 2.0×10^{-3}

図6 ブロック断面の例(初期, 修正, 経験的設計)

点たわみ率過大の6点を含む八つのブロックの初期値および修正結果を示す。応力あるいはたわみ率が許容値を越えていたものは許容値以下になり、その他のものもその修正によって許容値を越えないことがわかる。

5.2 修正部材の形状 部材の修正結果の一例を、初期, 修正, および経験的設計を比較して、ブロックの断面形状で示す(図6)。(a)はメンバの断面高さによる修正で、経験的設計では部材の基本構造が従来構造と大幅に異なり、本研究の修正に比べ原価も重量も大きい。(b)はせん断パネル追加による修正で、本研究の修正は上部に比較的小きなパネル追加、経験的設計は下部に比較的大きなパネル追加となっている。

(a), (b)とも、本研究の修正は従来の設計の基本構造を守り、その部品は小形, 軽量, 簡易で、実用に適する。本研究の修正による構体の三次元形状の一部を

図7 設計修正後の構体(部分)

構体モデルにより示す(図7)。

6. 結 言

本研究により、実用性を重視した満足設計に関し、以下の結論を得た。

(1) 鉄道客車構体の設計の合理化および高速化に、コンピュータによる満足化が有効であることを示し、曲げ強度の設計に適用し、実用的な解を得た。

(2) 満足化の方法として感度解析が有効であるが、その実行に当たっては、全構造を要素(ブロック)に分け、ブロックと部材の二段階にわたる感度解析が効率的である。

(3) 従来の設計、製造の工程になじむ実用的な満足設計解を得るには、満足化の方法に経験則を組合せることが重要である。本研究では感度解析による満足化を経験則で補正し、従来の経験的設計よりも重量、原価、生産性の優れた設計解を得た。

文 献

- (1) 湯川・堀江, 車両と機械, 2-4 (1988), 8.
- (2) 吉井・ほか3名, 住友金属, 35-3 (1983), 341.
- (3) 竹市, CAD CAM, No.3 (1984), 72.
- (4) Kimura, F., ほか3名, *Robotics and CIM*, 4-3-4, (1988), 483.
- (5) 吉峯・荒井, 鉄道技術研究所連報, 65-1027 (1965); 荒井, 鉄道技術研究所連報, 65-122 (1965).

討 論

〔質問〕 萩原 一郎〔日産自動車(株)〕

以下、少々厳しい表現になったことをお許し願いたい。

(1) ①適用例でモデル生成に6時間、感度解析で6.5時間とあるがなぜこれだけの時間がかかるのか、およその内容を教えていただきたい。

②感度解析の式(1)で、 v はなにか。

③4・3節で、まず“感度係数が大きい”のを修正ブロックあるいは修正部材の優先付けをするとあるが、適用例では v として応力過大の10点の応力、たわみ率過大の6点の計16あるはず、 v の選び方によって感度係数による優先付けが異なることに対してどうするのか、議論がない。これも経験則か。

(2) 緒言のところで「従来の鉄道車両構体の設計は～経験に頼ることが多かった。」とある。一方、4・2節の経験則のところでは緒言で否定された内容を逆に肯定しているかのようである。例えば、「～経験則を取り入れることにより未解析の性能も目標達成でき、～信頼性の高い構造が実現しやすい。」など、これはどういうことか。

(3) 構体モデルと評価モデルとはかなり形状が異なる。構体モデルから評価モデルをつくる方法について議論する必要がある。その点いかがか。

(4) ここで述べられている経験則は著者のみ知っているもので読者にはわからない。とすると本論文は“鉄道客車構体に働く曲げ荷重に対する応力およびたわみを二次元ラーメン構造で置き換えて求めただけのもの”とも解釈できる。その点いかがか。

(5) 2160ページ左欄28行めの「経験的に見て、50%、200%はそれぞれ現実にとり得る設計変数の比の下限、上限」など意味不明の箇所も多い。“経験的に見て”とは“製造上なのか”、“感度解析の精度上のことなのか”。

(6) 緒言のところで、満足設計すなわち“ある目的関数を最適化するよりも、できるだけ多くの目的関数をその満足水準以上にする”こととしているが内容は必ずしもそうでない。そうでなければ“結言”のところでも、今後の課題として明記すべきではないか。

(7) 全体の印象であるが、ようやく次に、本質があるかと思えば“経験則”とやらで何が何だかさっぱりわからなくなる。経験がない人でも“なるほど”と感じさせる必要がある。いかがか。

〔回答〕 (1) ①モデル生成は構体モデル（基本

立体、関係記述、属性）と評価モデル（ブロック、関係記述、ブロック属性）を含み、基本立体とブロック属性が時間の80%を占める。LISP Comet/LMをインタプリタ処理するため、さらに感度解析はFortran（吉峯法）を併用するため、長時間を要する。② v は応力またはたわみ率のそれぞれの許容値に対する比（符号は改良方向を正にそろえる）である。③応力およびたわみ率を含め、1以上で最大の v を持つ部位から設計修正を始める。

(2) 緒言の「経験に頼ること」は少ない確証のもとに勘で行う設計の意で、2158ページ右欄1～6行めに示すように、本研究のめざすものとは異なる。4・2節の経験則は、その(1)～(3)に示すように、設計上または製造上の一種の制約条件であり、勘で行う設計とは異なる。

(3) 評価モデルは、構体モデルから、開口部を基準としたブロックの存在、ブロックと部材の関係記述、ブロックの属性を生成する。評価モデルが簡略であるのは、現用されている、吉峯法を採ったためである。

(4) 本研究の経験則は4・2節の(1)～(3)に明示されている。これらは多くの設計事例において一般的な制約条件（設計上、製造上）で、不可欠と言うよりは望ましい条件である。2160ページ右欄27～32行めに示すように、設計修正の優先順位付けの段階で可能な限り満たすことが本研究の考えである。

(5) 2160ページ左欄11～15行めに示すように設計変数はブロックあるいは部材の剛性、面積であるから、「経験的に見て」は設計上のことである。剛性、面積の値を50%以下あるいは200%以上に変化させることは、製品の成り立ち、性能、重量、原価、などから見てあり得ない。

(6) 満足設計と最適設計との違いは2158ページ左欄12～14行めに示すとおりである。満足設計にも目的関数の選び方、満足水準のとり方、収束の判定、などにさまざまな考え方があり、本研究は応力、たわみ率、重量（満足水準は数値で示されていない）を目的関数とし、設計変数の最小および最大変化量、「経験則」[2160ページ(1)～(3)]を制約条件とした一つの満足設計である、と考えている。今後とも非理論的、非工学的な部分も含む実際の設計について実用性ある自動化を試みたい。

(7) 「経験がない人にも“なるほど”と感じさせる必要がある」とのご意見には同感である。