

鋼トラス部材の耐荷力特性を考慮した部材性能照査

美濃智広¹・金治英貞²・鈴木直人³・道菅裕一⁴・鈴木政直⁵

¹ (株) 建設技術研究所 大阪本社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

² 博士 (工学), (財) 阪神高速道路管理技術センター, 技術部開発研究課 (〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7)

³ 工修, (株) 建設技術研究所 大阪本社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 1-2-15)

^{4,5} 正会員 工修 石川島播磨重工業株式会社 橋梁事業部 設計部 (〒541-0053 大阪市中央区本町4-2-12)

1. まえがき

鋼トラス橋において、主構部材は一旦損傷すると修復が極めて困難であるため、レベル2地震時にも弾性範囲もしくは大がかりな補修を必要としない損傷にとどめることが望ましい。鋼構造協会では構造物全体の耐震性能と部材の健全度の関係を提案しており、地震後直ちに緊急車両等の走行を期待する耐震性能2の場合、主部材は健全度2として軽微な損傷にとどめるものとしている¹⁾。

現行の示方書では局部座屈等を防ぎ、じん性に富んだ構造とするために、座屈パラメータを制限しており、その場合の変形性能に関しては多くの研究が蓄積されている。しかしながら、対象橋の場合、高軸力と2軸曲げを受け、かつ座屈パラメータも現行示方書を必ずしも満足するものではないため、健全度2に対する具体的な照査法の検討が必要である。

道路橋示方書では、部材軸方向力と曲げを同時に受け、かつ座屈長の長い柱部材であるトラス主構部材は、応力の照査と安定の照査を行っている。ここで、座屈耐力は断面形状や座屈パラメータ、軸力等

に大きく影響するが、設計の簡易化を図るために安全側の照査式となっている。しかしながら、既設長大橋の耐震補強の場合、補強費用が莫大となるため、合理的な照査法の導入が望ましい。

本論では既設鋼トラス橋を対象に、非線形FEM有限変形解析結果にもとづき、道路橋示方書照査値との比較を行い、合理的な部材性能の評価法に関する検討を行った。

2. 橋梁概要

対象橋は橋長980m（側径間235m＋中央径間510m＋側径間235m）のゲルバートラス橋である。大阪南港と大阪市街を結ぶ4号湾岸線とともに、湾岸線の本線を構成するため、上下2層のダブルデッキとなっている。桁下空間は50m以上の空間が確保され、大型コンテナ船の航行が可能である。死荷重軽減のため、日本で初めて超高張力鋼材70キロ級、80キロ級を本格的に採用し、総重量は約45,000トンとなっている。工事着工は1970年で、工事竣工は1974年である。ゲルバートラス橋としては、世界第3位の規模である。図1に橋梁一般図を示す。

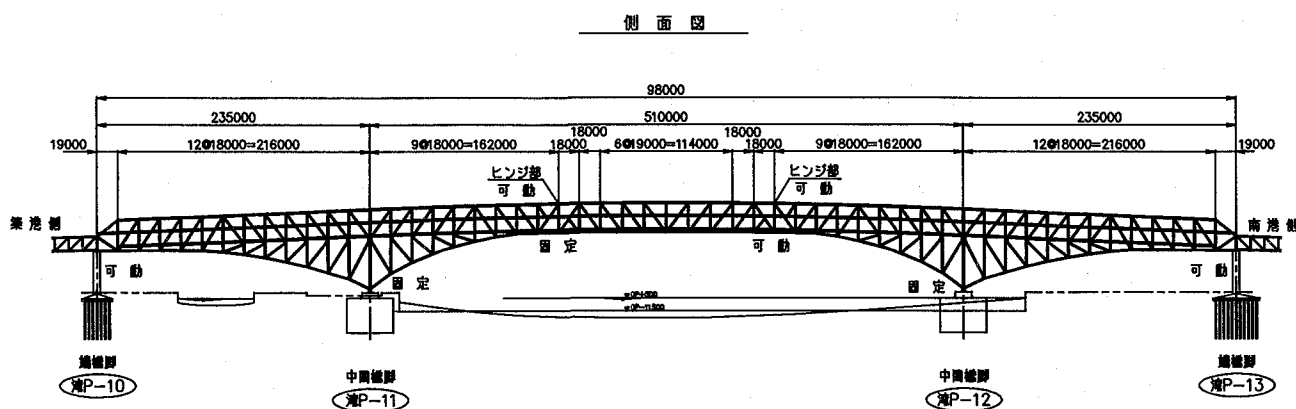


図1 橋梁一般図

3. トラス部材の要求性能と照査法

(1) 部材の要求性能と照査方針

対象橋では、地震時のリスクとライフサイクルコスト分析にもとづき、レベル2地震時に対する各部材の要求性能を設定している²⁾。死荷重等鉛直荷重を支えるトラス主構と、主として風荷重や地震力に抵抗する2次部材に分類し、それぞれ地震時に要求する機能から部材の要求性能を定めている。

2次部材はレベル2地震時の損傷を許容し、座屈や部材の降伏以降のひずみに対して照査を行うものとしている。一方で、常時死荷重等を支える主構部材は、一旦損傷すると復旧が極めて困難なことから、被災後に補修・補強を必要としない程度の損傷にとどめるものとした。

表1 耐震補強の目標

部位	要求機能	要求性能	照査方針
主構 (下弦材、上弦材、主桁斜材、鉛直材)	曲げと圧縮を受ける部材	部材は損傷せず、被災後に補修・補強を必要としない。	部材縁部の一部降伏や部分的な局部座屈は許容するが、概ね弾性範囲にとどめる。弾性要素として発生断面力を算定し、部材としてほぼ線形挙動することを確認する。
	引張を受ける部材	部材縁部の一部降伏は許容するが、概ね弾性範囲にとどめる。	弾性要素として発生断面力を算定し、部材としてほぼ線形挙動することを確認する。
2次部材 (対傾構、横構など)	曲げと圧縮を受ける部材	部材の損傷は許容し、被災後に補強や取り替えを行うことにより復旧する。	構造系の耐力力を保持できる範囲内で部材の降伏や座屈を許容する。弾性要素として一次照査し、降伏する部材については、非線形要素として応答ひずみを評価する。
	曲げを受ける部材	構造系の耐力力を保持できる範囲内で部材の降伏を許容する。	弾性要素として一次照査し、降伏する部材については、非線形要素として応答ひずみを評価する。

対象橋は床組免震化や2次部材を座屈拘束ブレース等の損傷制御構造を採用することにより、地震応答の低減を図っているが、従来の当て板による部材補強が必要となる主部材も少なくない。

基本的に弾性挙動を期待しているため、主部材は線形要素として動的解析を行っており、得られた応答値（断面力）から要求性能を照査する必要がある。

(2) トラス部材の応力照査法

地震時に発生する部材軸方向力と曲げを同時に受け、かつ座屈長の長い柱部材であるトラス主構部材は、応力の照査と安定の照査を行う必要がある。それらの影響を考慮するため、道路橋示方書の軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の照査式を用いた応力比を照査指標とした。

(軸方向力が引張の場合)

$$s_{r1} = (\sigma_t + \sigma_{by} + \sigma_{bz}) / \sigma_{ta} \quad (1a)$$

(軸方向力が圧縮の場合)

$$s_{r2} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}\right)} \quad (1b)$$

$$s_{r3} = \left\{ \sigma_c + \frac{\sigma_{bcy}}{\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} + \frac{\sigma_{bcz}}{\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eaz}}\right)} \right\} / \sigma_{cal} \quad (1c)$$

ここで、軸方向力が圧縮の場合について、局部座屈を考慮しない軸方向圧縮応力度は、圧縮部材の不完全性（初期ひずみ、残留応力等）を考慮した耐力曲線に基づいて定められている。道路橋示方書では設計の簡略化を図るために、種々の実験により提案される耐力曲線のほぼ下限値に相当する1つの耐力曲線だけを用いることとされている。しかし、長大橋の上下弦材、鉛直材、斜材などの主要部材は製作管理が十分な溶接箱型断面で構成されていることから部材構造を反映させることを目的に、より適切な耐力判定を行うため、ECCS（ヨーロッパ鋼構造協会）曲線の中で溶接箱桁断面の耐力曲線を採用した。図2に、それぞれ道路橋示方書とECCS曲線の関係を示す。

図3に主構部材のパラメータの頻度分布を示す。主構部材は $\lambda = 0.2 \sim 1.0$ 程度の範囲にあり、道路橋示方書の基準耐力曲線より若干大きな耐力力を与えることになる。

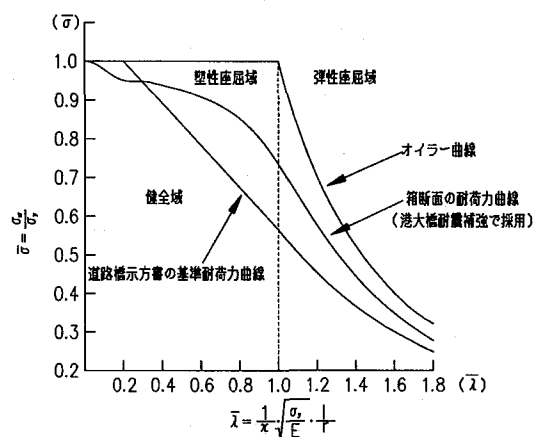


図2 基準耐力力曲線

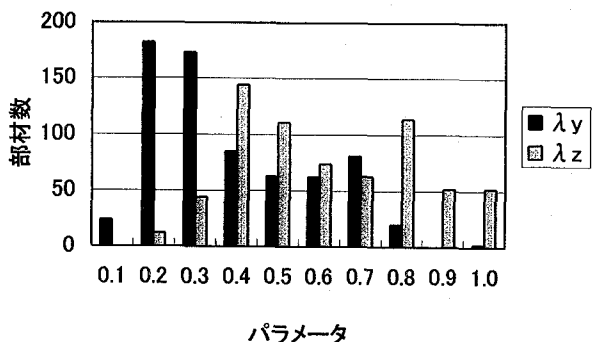
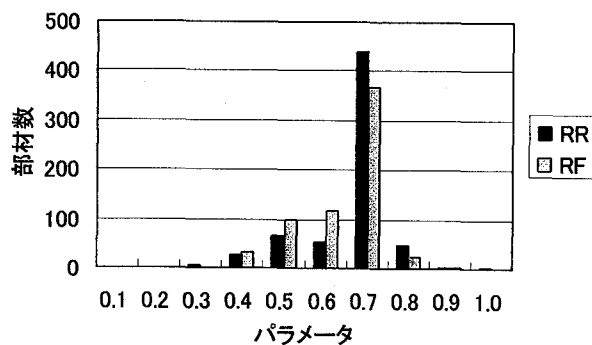


図 3 主構部材の座屈パラメータ

4. 非線形FEM有限変形解析による検証

道路橋示方書による照査値は、2軸曲げを受ける部材の一部でも降伏を許さないものであり、完全な弾性挙動を保証するものである。しかしながら、部材の一部が若干降伏を超過しても部材全体の挙動に大きな変化はなく、無補修で供用することも可能と考えられる。

そこで、トラス橋主部材（アーチ、鉛直材、斜材）を対象とした非線形 FEM 有限変形解析により応力比と耐荷力特性の関係を評価し、耐荷力曲線がほぼ弾性挙動を示す応力比を検討した。

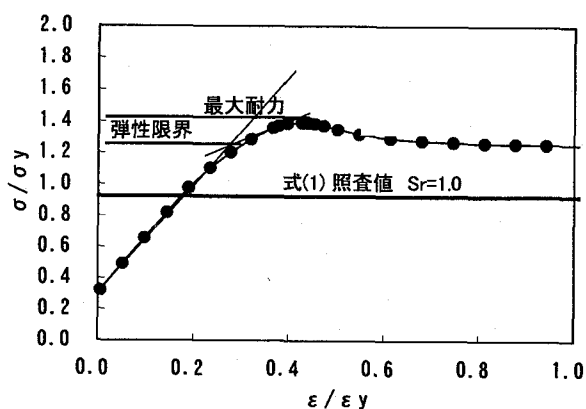


図 4 弾塑性解析による荷重-変位曲線

解析モデルの特徴は以下の通りであり、死荷重断面力を初期値として地震荷重を漸増载荷させ、荷重変位曲線を求めている。

対象部材は4節点アイソメトリックシェル要素でモデル化し、地震時応答解析より求められた断面力を载荷した。端部の境界条件は、対象部材に接続される部材を境界回転バネ（構造バネ）に置き換え、また、部材端ガセットを同じく回転バネ（局所バネ）に置き換えた。さらに、対象部材内にある格点（横桁、対傾構）からの断面力も载荷し荷重漸増解析を実施した。弾塑性解析モデルの特徴を表 2 に示す。

表 2 弾塑性解析モデルの特徴

項目	特徴
材料特性	・降伏点で塑性する
支点条件	・構造（全体骨組による）バネを考慮 ・部材端（ガセット）バネを考慮
初期不整	・部材全体に対してL/2000 ・局部パネルに対してB/150
残留応力	・縦リブ溶接部、ウェブ×フランジ溶接部に考慮

検討対象とした部材とパラメータを図 5、表 3 に示す。部材の座屈パラメータは $R=0.4\sim0.7$ 、 $\lambda=0.2\sim0.9$ の範囲にある。

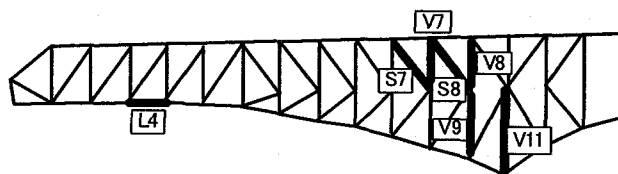


図 5 検討対象部材

表 3 検討対象部材のパラメータ

		材質	RR	RF	RL	λ_y	λ_z
下弦材	L4	SM570	0.70	0.63	0.68	0.48	0.51
斜材	S8	SM400	0.69	0.62	0.55	0.59	0.42
	S9	SM490	0.65	0.66	0.63	0.67	0.37
鉛直材	V9	SM570	0.69	0.68	0.68	0.35	0.96
	V8	SM400	0.54	0.51	0.55	0.23	0.27
	V2	SM490	0.43	0.41	0.63	0.31	0.76
	V11	SM570	0.71	0.65	0.68	0.24	0.73

図 6 にFEMによる部材の耐力曲線を示す。ひずみは部材両端の軸方向変形を部材長で除した平均ひずみである。

図 7 に最大耐力および弾性限界と座屈パラメータ λ との関係を示す。軸力が大きく全体座屈が卓越する下弦材、斜材では $\sigma/\sigma_y = (N/A+M/Z)/\sigma_y = 1.0$ 程度が最大耐力となっている。曲げの卓越する鉛直材は $\sigma/\sigma_y = 1.2 \sim 1.4$ 程度まで耐力を有していることがわかる。弾性限界も同様の傾向を示しているが、最大耐力より10~20%程度低下した値となっている。今回検討対象とした範囲では、弾性限界となる応力比は約1.2程度となっていることがわかる。

図 8 に式(1)にもとづく応力比 S_r と耐力曲線の剛性低下率 G/G_0 との関係を示す。剛性は耐力曲線における初期剛性と剛性低下後の等価剛性との比率として算定した。何れの部材も応力比 $S_r = 1.2$ 程度までは、剛性低下は20%程度にとどまっている。

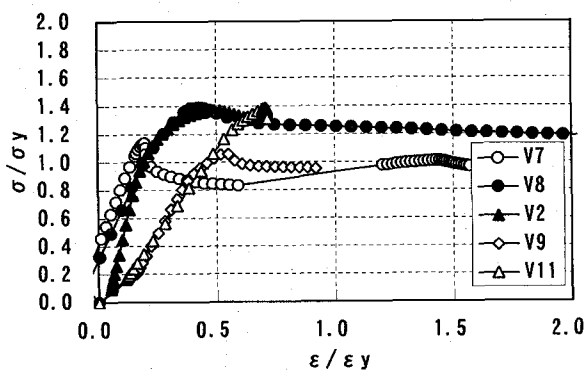


図 6 FEM 解析による部材の耐力曲線

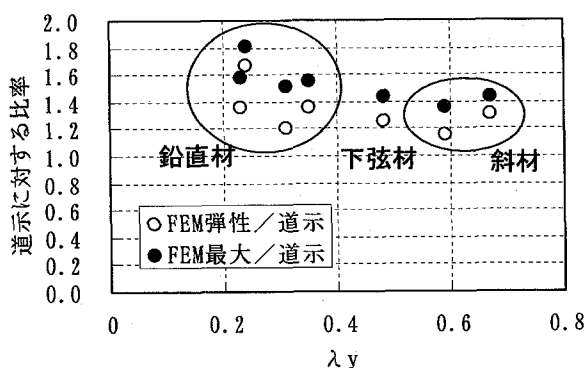


図 7 最大耐力と λ の関係

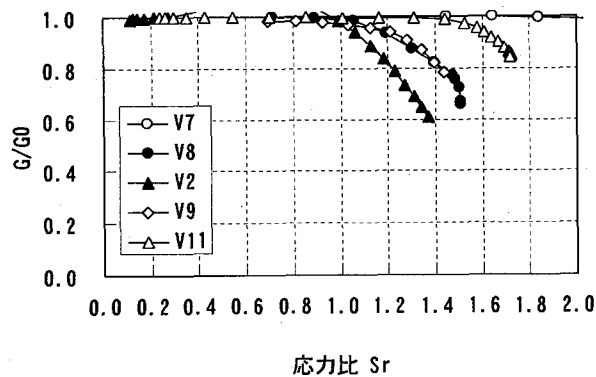


図 8 応力比と剛性低下率の関係（鉛直材）

5. まとめ

本論では、鋼トラス橋主構の代表部材を抽出し、非線形FEM有限変形解析を実施した、得られた結果を以下に示す。

- ・ 何れの部材も、道路橋示方書による照査値より大きな最大耐力が確認された。
- ・ 弾性限界となる応力比（道路橋示方書照査値との比率）は1.2程度以上期待できる。
- ・ 応力比が1.2程度までは、剛性の低下率は20%程度である。

以上の知見より、対象部材を精緻にモデル化し、部材耐力を評価することにより、合理的な照査が可能と考えられる。

謝辞：本検討に用いた非線形FEM有限変形解析を実施しデータを提供して頂いた、工事JVの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会・鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会
- 2) 金治英貞, 鈴木直人, 香川敬生, 渡辺英一: 長大トラス橋の耐震性能向上化における設計入力地震動と損傷制御構造, 土木学会論文集, 2005.4
- 3) 笹戸松二, 松本忠夫, 江見晋, 古池正宏: 長大カンチレバートラス橋の地震応答と耐震設計法について, 土木学会論文報告集第212号, 1973.4
- 4) 金治英貞, 高田佳彦, 鈴木直人, 美濃智広, 東谷修, 大濱浩二: 長大ゲルバートラス橋の損傷制御耐震補強策と応答低減効果, 土木学会地震工学論文集, 2003.11
- 5) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編, 2002
- 6) 土木学会: 鋼構造物設計指針PART-A, 1999