

限界状態設計法による既設鋼橋の1耐荷力評価法

Evaluation of Load Carrying Capacity of Existing Steel Bridges Based on Limit States Design Method

北田 俊行^{*}、関 惟忠^{**}、西岡 敬治^{***}、乙黒 幸年^{****}、岩崎 一好^{*****}、矢野 幸子^{*****}

Toshiyuki KITADA, Koretada SEKI, Takaharu NISHIOKA, Yukitoshi OTOGURO, Kazuyoshi IWASAKI and Sachiko YANO

^{*}工博 大阪市立大学 助教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)^{**}阪神高速道路公団 保全施設部 保全技術課 課長 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)^{***}阪神高速道路公団 保全施設部 保全技術課 係長 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)^{****}阪神高速道路公団 保全施設部 保全技術課 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)^{*****}(株)日本構造物設計事務所 技術第二部 課長 (〒550 大阪市西区阿波座1-6-13)^{*****}(株)日本構造物設計事務所 技術第二部 (〒550 大阪市西区阿波座1-6-13)

This paper deals with a method for evaluating the load carrying capacity of existing steel bridges of which dead loads have been additionally increased for repair, strengthening or other reasons after the completion. The method is based on a limit states design method using 5 partial factors. The increased and additional dead loads under consideration are access roads for inspection and maintenance, multipurpose passages, metal fitting for hanging stages, frames for traffic sign, speed checkers, steel plates for stiffening RC slabs for repair, and boards for decoration. The partial factor for live load among these partial factors is decided on trial through a F.E.M. analysis using the model for a standard composite I-girder bridge established by Hanshin Expressway Public Corporation(HEPC) in 1967, and experimental results by an actual bridge carried out by HEPC. It is concluded by using the proposed method that the existing composite I-girder bridges designed according to the old standard composite I-girder bridges subjected to original dead load and actual live load together with the dead loads added after the completion of the bridges do not need strengthening.

Key Words : existing steel bridges, evaluation, load carrying capacity, dead load, live load, limit states design method, maintenance, strengthening

1. まえがき

近年、既設鋼橋の安全性を評価する機会が、様々な目的によって、増加している。この論文は、次の条件下にある既設鋼橋の1耐荷力評価手法について検討を行ったものである。

- (1) 損傷、腐食、あるいは、劣化が発見された場合
- (2) 完成後に地震荷重、および、活荷重などの設計荷重が変更になった場合
- (3) 補修、補強、または、その他の理由で死荷重が増加した場合
- (4) 完成後に強度照査式、あるいは、構造解析手法などの設計手法が変更された場合

この評価手法は、国際基準である ISO 2394²⁾、および土木学会の鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会による鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則³⁾により定義された5つの部分

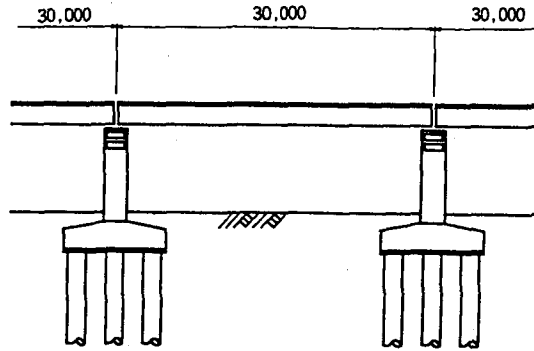
安全係数(後述の式(1)~(4)参照)を用いた限界状態設計法の書式に基づいている。それらの部分安全係数の中で活荷重係数は、1993年に阪神高速道路公団で行われた単純合成桁橋を用いたF.E.M.解析による試算⁴⁾と阪神高速道路の現在のランプ桁を用いた実橋実験⁵⁾との結果を用いて、試験的に決定している。

さらに、本論文では、例題として、検討する評価手法を用いて、具体的に、完成後に死荷重が増加された合成桁橋の安全性の評価を行っている。

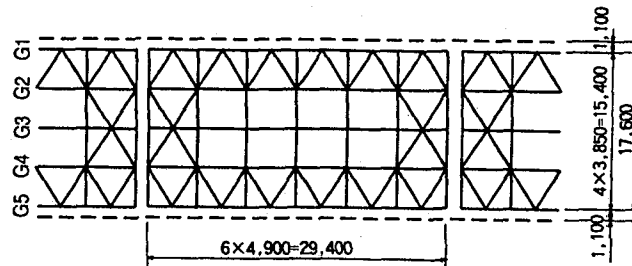
2. 対象とした橋梁

この研究においては、1967年の阪神高速道路公団の標準図集に示されている旧標準橋の1つである単純合成桁橋を対象とした。対象とした旧標準橋梁の形状寸法を図-1に示す。

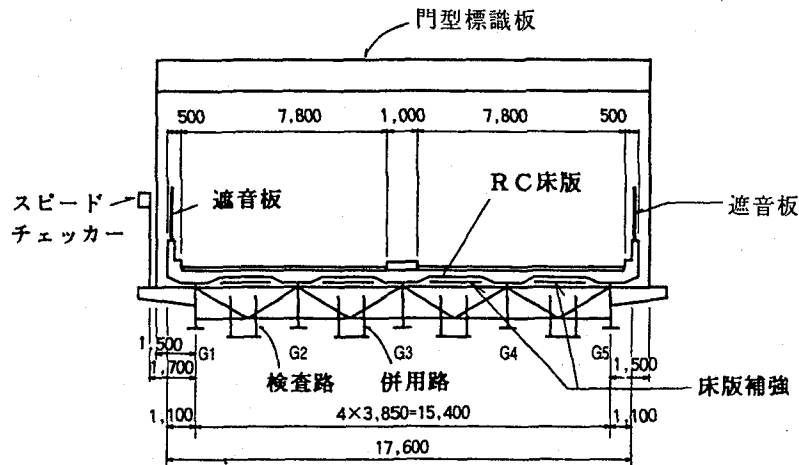
本論文は、The Fifth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (1995年)に於ける発表論文(文献1))を基に、修正・加筆したものである。



(A) 側面図



(B) 平面図



(C) 断面図 (付加死荷重を示している)

図-1 阪神高速道路公団の旧標準単純合成桁橋(1967年, 寸法単位:mm)

3. 対象とした付加荷重

実態調査を行ったところ、阪神高速道路公団において鋼橋の完成後に付加される死荷重（以下、付加死荷重という）は、以下に示す8項目の荷重であることが明らかとなった。これらの付加死荷重を有する既設橋梁の安全性の評価を行うために、これらの8項目を、下記のように、2グループに区分する。

(1) 付加死荷重(1)

- ① 検査路
- ② 多目的の併用路

③ 吊金具

④ 遮音板

なお、吊り金具は付加死荷重であるが、重量的には無視できる程度であるため、検討対象荷重から除外することも可能である。

(2) 付加死荷重(2)

⑤ 門型標識板および支柱

⑥ スピードチェッカーおよび支柱

⑦ 床版補強材（鋼板接着または桁補強）

⑧ 裏面板

ここで、付加死荷重(1)は、現在の阪神高速道路公団の設計基準において、付属設備として設計時に考慮されている。そのための死荷重強度は、 $50\text{kgf/m}^2(490\text{Pa})$ である。

4. 現行設計法を用いた応力照査

まず、現行設計手法である許容応力度法⁶⁾を用いて、対象橋梁の応力度照査を行う。

照査には、既設橋の死荷重に加えて前項に示した8項目の付加死荷重を考慮する。

なお、照査の着目箇所は、対象橋梁が単純桁橋であることから、主桁支間中央の下フランジとしている。

応力照査の結果を図-2に示す。

応力照査結果から、以下のことがわかる。

- ①外主桁(G1)の応力度が、付加死荷重を考慮しない状態でも、示方書の改訂により、引張縁の許容応

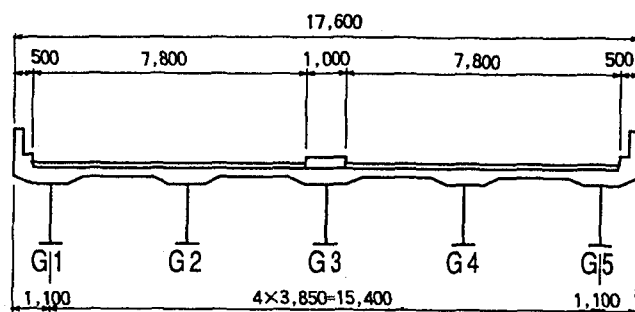
力度の割り増し(5%)を考慮しなくなったため、現行の許容応力度を3%程度超過している。

- ②付加死荷重を全て考慮した場合は、約12%の許容応力度の超過が見られる。

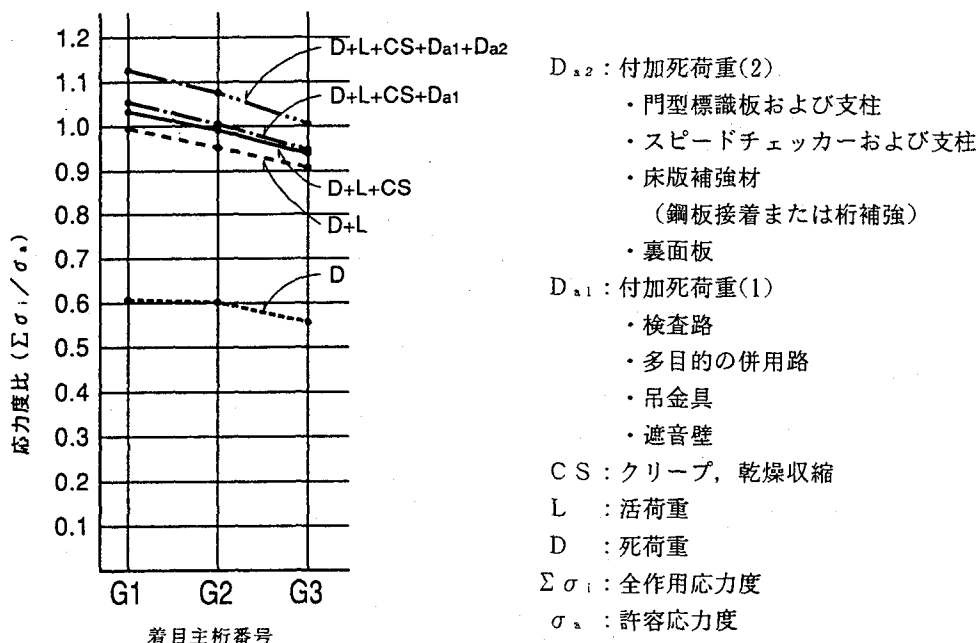
- ③超過の程度は、外桁から内桁に向かって、減少している。

5. 照査手法の検討

不特定多数の構造物を対象とする現行設計法における既設構造物の付加死荷重による許容応力度の超過問題に対処するために、以下に示す新たな手法を検討する。検討する手法においては、耐荷力に着目して、5つの部分安全係数を用いるISO 2394による限界状態設計法²⁾と、土木学会での鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則³⁾とに基づく照査式を用いている。



(a) 断面図と主桁配置(寸法単位:mm)



(b) 支間中央主桁下フランジの応力度比

図-2 現行設計法による照査結果

また、文献3)の手法に、既設構造物特有の以下の点を考慮する。

- ①既設構造物では、構造寸法の正確な値が入手可能である。
- ②既設構造物を構成する構造部材の材料の機械的性質の正確な値も入手可能な場合が多い。
- ③構造解析による誤差、および部材強度の推定値の誤差を小さくするために、詳細な解析や実験を行うことが可能である。
- ④作用荷重の特性もかなり明確になっている。
- ⑤対象橋梁の重要性なども明らかである。

すると、既設構造物の耐荷力の照査式は、次式のように与えられる。

$$\gamma_i(\gamma_{sD}\gamma_{iD}\sigma_D + \gamma_{sL}\gamma_{iL}\sigma_L) \leq \sigma_Y^* \quad (1)$$

$$\leq \sigma_Y/\gamma_m \quad (2)$$

$$\leq \sigma_U(\sigma_Y^*)/\gamma_b \quad (3)$$

$$\leq \sigma_U(\sigma_Y/\gamma_m)/\gamma_b \quad (4)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数

γ_s : 構造解析係数

γ_f : 荷重係数

γ_m : 材料係数

γ_b : 部材係数

σ_D, σ_L : 設計荷重による作用応力度

σ_Y : 公称降伏点

σ_U : 公称終局強度

上式において、下添字DおよびLは、それぞれ死荷重および活荷重を意味する。また、上添字*は、実測値を意味する。

なお、本研究では、照査箇所が、支間中央の主桁下フランジであり、引張部材であることから、上記の照査式のうち、式(2)を用いるものとし、各部分安全係数を設定する。

6. 部分安全係数

5つの部分安全係数は、次のように決定した。

6. 1 構造物係数： γ_i

この部分安全係数は、構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的・経済的影響等を考慮するための係数である。

文献3)を参考にして、阪神高速道路が我が国では非常に重要な構造物であると見なせるので、 γ_i は、1.20となる。

6. 2 構造解析係数： γ_s

γ_s は、断面力等算定時の不確実性、および構造物のモデル化の信頼性等を考慮するための安全係数である。

現在、一般的に、桁橋は、格子桁として解析されている。現行の格子解析法は、阪神高速道路公団の設計基準、道路橋示方書等⁶⁾の基準、および種々の研究により、死荷重に対して、十分に信頼のおける手法であることが確認されている。

そこで、死荷重に関しては、強度のばらつきが少なく作用位置も明確な荷重であり、現行手法による格子解析結果が妥当であるとして、構造解析係数は、1.00とする。

しかし、活荷重に関しては、ある合成桁橋を対象として、コンクリートの高欄部、および連続性のある床版を考慮したF.E.M.解析(図-3参照)の結果において、高欄部や床版による荷重分担の影響により、主桁下フランジの活荷重応力度が格子解析結果の約55%に低減される結果となっている⁴⁾。なお、F.E.M.解析では、主桁、床版、分配横桁、端横桁、および横桁部のラテラルガセットについてはシェル要素、その他の部材はビーム要素が用いられている。

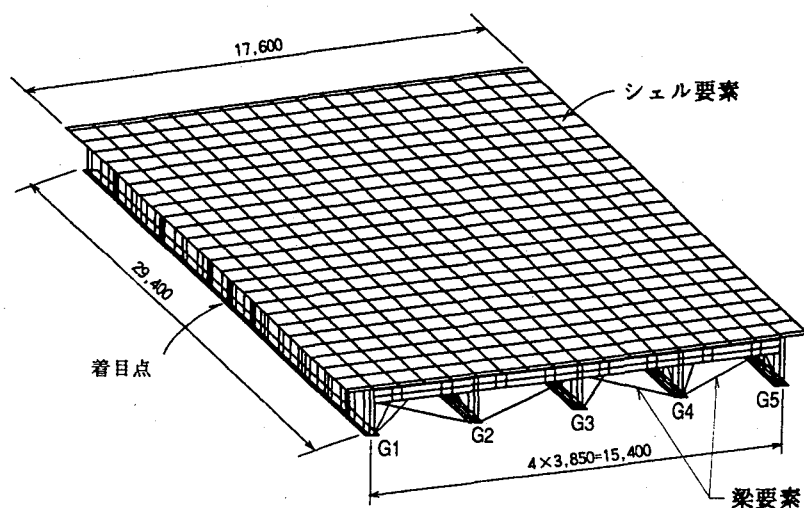


図-3 F.E.M.解析モデル(単純合成桁橋)⁴⁾ (寸法単位:mm)

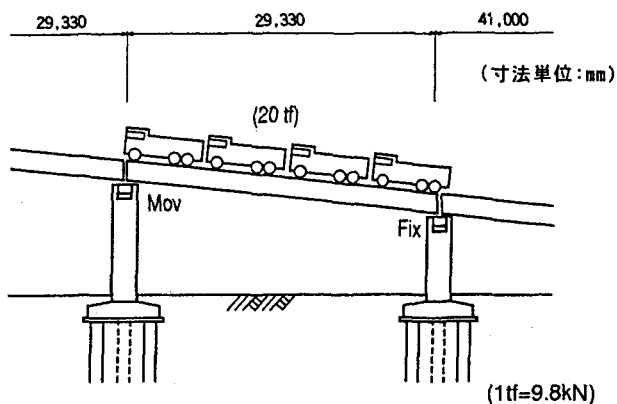
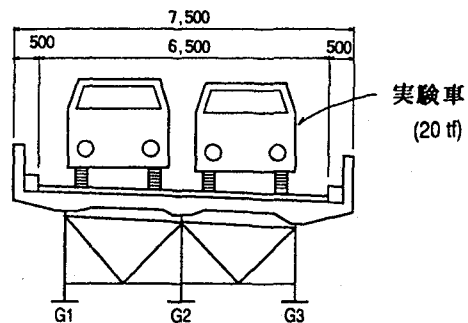
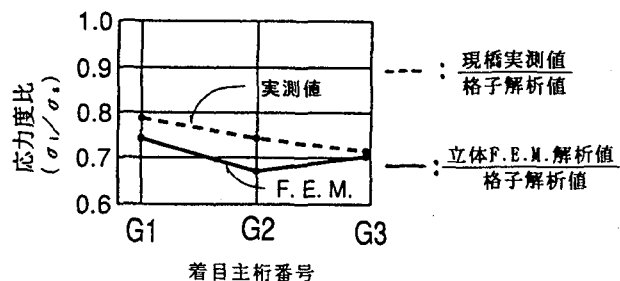


図-4 阪神高速道路公団の旧梅田ランプ橋の実橋荷重実験⁶⁾ (寸法単位:mm)



(a) 荷重状況(寸法単位:mm)



(b) 実測・F.E.M.解析結果

図-5 主桁中央断面の下フランジの応力度

表-1 主桁中央断面の下フランジの計算応力度^{4) 5)}
(1kgf/cm²=0.098MPa)

桁番号 応力度	G1	G2
F.E.M.解析 σ_F	415	353
格子解析値 σ_b	742	660
比率 σ_F/σ_b	0.56	0.53

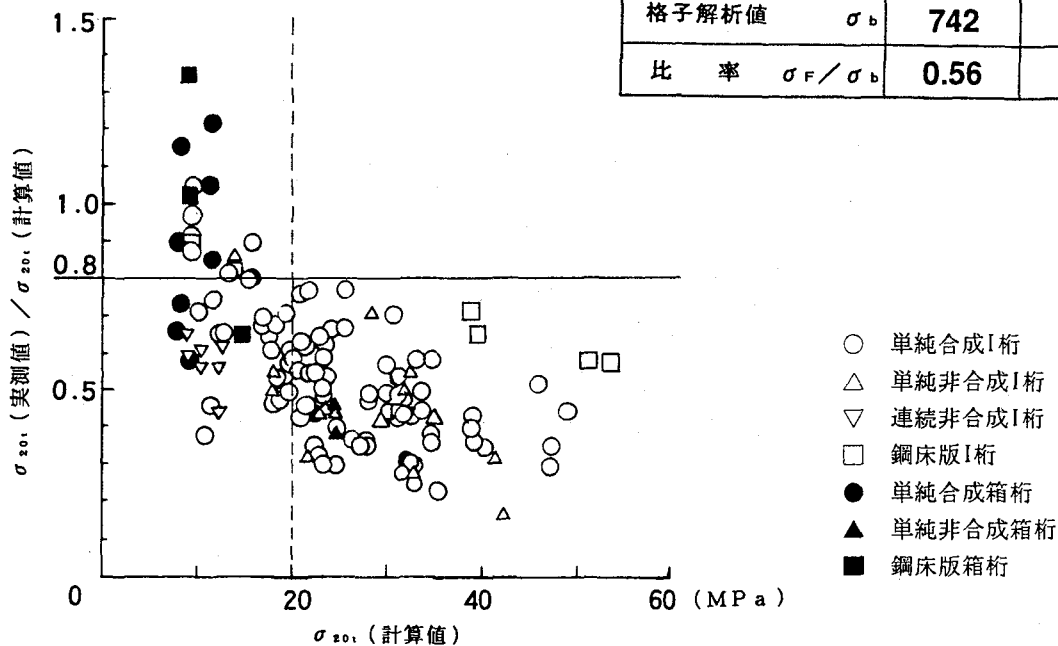


図-6 20tf車走行時に生じる応力の実測値と計算値との比⁷⁾

また、阪神高速道路の梅田ランプ桁（図-4 参照）の20tfのトラック荷重を用いた実験の結果（図-5 参照）は、格子解析結果の71～79%となっている⁶⁾。

そこで、活荷重の構造解析係数 γ_{sL} は、これらのデータを考慮して、安全側に、0.80とした。

また、実橋を用いた多数の実測結果である図-6のデータ⁶⁾からも、上記係数値の妥当性が確認できる。ただし、同図から、 $L < 20\text{m}$ の領域では、 $\gamma_{sL} > 0.80$ の場合もあり、 $\gamma_{sL} = 0.80$ の適用範囲は、支間長 $L \geq 20\text{m}$ とすべきであることがわかる。

6. 3 荷重係数： γ_i

荷重係数 γ_i は、荷重の特性の望ましくない方向への変動、荷重の算出方法の不確実性、荷重特性が限界状態に及ぼす影響、および環境作用の変化等を考慮するための安全係数である。

死荷重は、鋼重に着目した場合、設計値から最大約5%の変動が考えられるので、死荷重係数 γ_{ID} は、表-2と図-7⁸⁾とを参照して、1.05とした。

活荷重による荷重係数 γ_{LL} は、以下のようにして決定する。図-8～10に示すように、文献8)において、阪神高速道路で調査された実態荷重から、交通モデルを設定し、1車線荷重に対してのモンテカルロ・シミュレーションによってモーメント比($\alpha = M_{50}/M_L$)を算出している。ここに、 M_{50} は、期間50年間の曲げモーメントの最大応答値分布における10%の超過確率に対応する値である。そして、 M_L は、旧設計手法(L_{20} 活荷重)による最大曲げモーメントである。

なお、図-8および図-9に示すように、モンテカルロ・シミュレーションにおいては、トレーラー類積載車の車重分布の10%超過確率に対応する車重 W_0 より大きいトレーラー類積載車を1つの集中荷重に理想化し、スパン中央に作用して、 M_{50} を求める計算の効率化がはかられている。また、 M_{50} が決定された車両配置状況の1例を図-10に示す。

次に、図-11～12によって、1車線荷重に対するモーメント比 α_1 を、荷重分配率を用いて、2車線荷重に対する修正モーメント比 α_2 に換算した。その結果から、 γ_{LL} は1.70とした。

表-2 死荷重のばらつき⁸⁾

桁形式	死荷重	精査死荷重/設計死荷重	
		平均値	変動係数
鋼桁 鋼重	プレートガーダー	0.97	0.04
	鋼箱桁	0.96	0.04
	鋼床版桁	0.99	0.03
	全桁形式	0.97	0.04

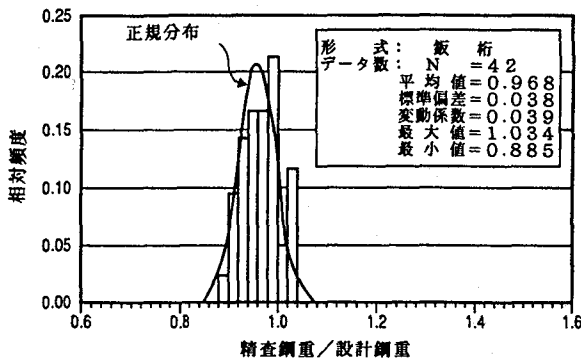


図-7 プレートガーダー橋の鋼重分布⁸⁾

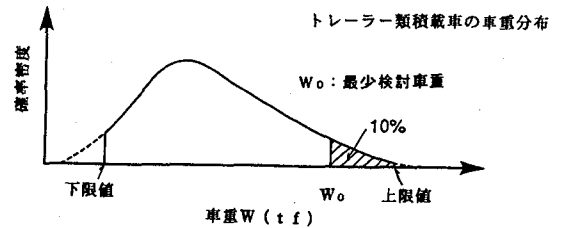


図-8 トレーラー類積載車の重量分布⁸⁾

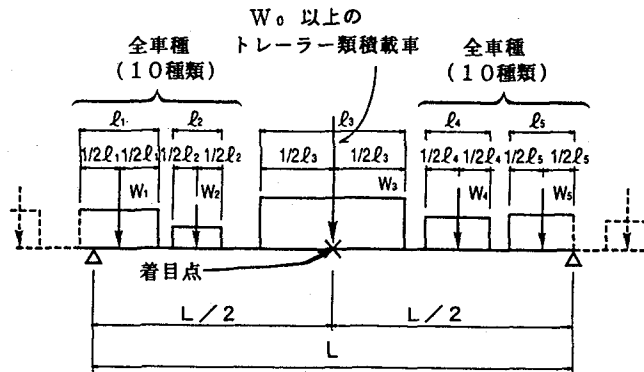


図-9 車両荷重の載荷方法⁸⁾

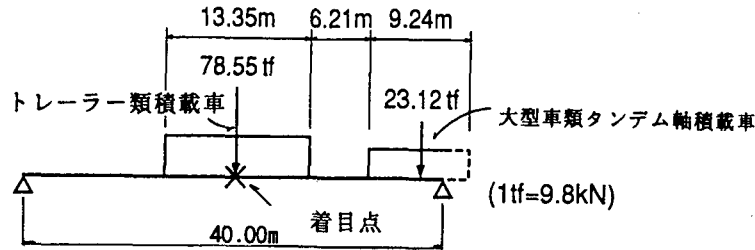


図-10 50年間の最大曲げモーメントに相当する荷重状態の1例⁸⁾

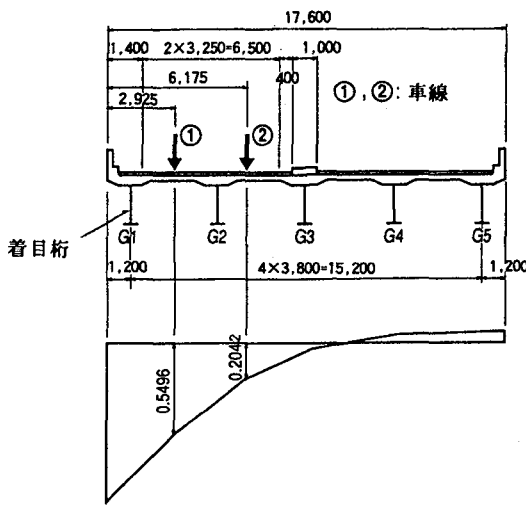


図-11 外桁G1の荷重分担曲線⁵⁾(寸法単位:mm)

6. 4 材料係数: γ_m

γ_m は、材料強度の特性値からの望ましくない方向への変動、引張試験用の供試体と構造物中との材料特性の差異、材料特性が限界状態に及ぼす影響、および材料特性の経時変化等を考慮するための安全係数である。

鋼板の材料係数は、文献3)を参考にして 1.05 とした。

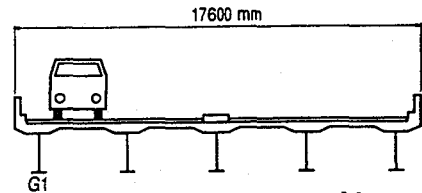
7. 耐荷力評価式

前節において設定した部分安全係数を用いると、単純合成桁橋の支間中央主桁下フランジ部の評価式として、次式が得られる。

$$\nu = \frac{\gamma_i \gamma_m (\gamma_{SD} \gamma_{ID} \sigma_D + \gamma_{SL} \gamma_{IL} \sigma_L)}{\sigma_Y} \leq 1.0 \quad (5)$$

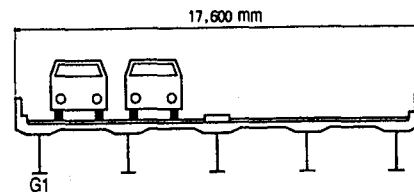
ここに、 ν は、既設単純合成桁橋の安全性に関する指標である。

そして、5つの部分安全係数は、次のようである。



$$\alpha_1 = \frac{M_{G1}}{M_L} = 1.241$$

(a) 1車線載荷



$$\alpha_2 = \frac{0.5496 + 0.2042}{0.5496} \times 1.241 = 1.702$$

(b) 2車線載荷

図-12 1～2車線のモーメント比⁵⁾

$$\gamma_i = 1.20$$

$$\gamma_m = 1.05$$

$$\gamma_{SD} = 1.00$$

$$\gamma_{ID} = 1.05$$

$$\gamma_{SL} = 0.80 \quad (L \geq 20 \text{ m})$$

$$\gamma_{IL} = 1.70$$

ただし、式(5)の適用範囲は、支間長 $L \geq 20 \text{ m}$ とする。

8. 照査結果

検討した耐荷力評価式を用いて、既設合成桁橋の照査を行った結果を図-13に示す。

照査結果より、設計当初の死荷重、および現行の活荷重以外に付加死荷重を考慮しても、旧標準橋の単純合成桁橋は、 $\nu < 1.0$ となり、耐荷力の面から、既設構造物を特に補強する必要がない結果となった。

ただし、本論文において、 $\gamma_{SL} = 0.8$ としているが、この値は、幅員、支間長、断面構成などによって変化すると考えられる。したがって、今後は、式(5)をより一般化するために、さらなる十分な検討が必要である。

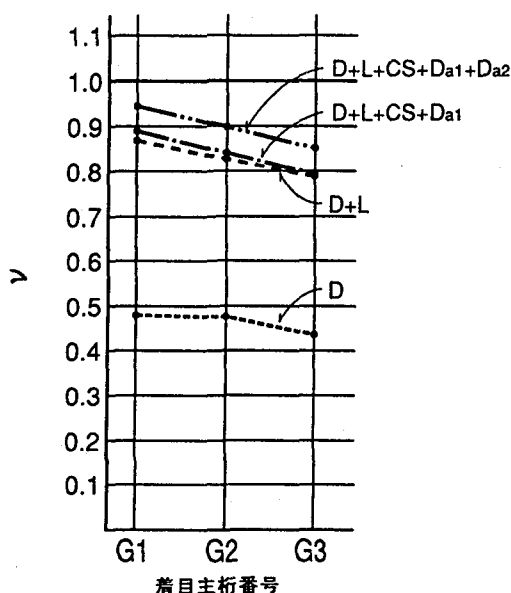


図-13 付加死荷重を考慮した場合の安全性に関する指標 γ の計算結果

9. まとめ

既設鋼橋の耐荷力の照査法を開発するために行った本研究で得られた主な成果をまとめると、以下のとおりとなる。

- (1) 5つの部分安全係数を用いる既設鋼橋の耐荷力の照査式について検討した。
- (2) 補修、補強、および、その他の理由により、完成後に付加される死荷重（付加死荷重）の内容を明らかにした。
- (3) 阪神高速道路公団の旧標準橋の1つである単純合成桁橋は、設計示方書の改訂により、付加死荷重を考慮なくとも、現行の設計示方書の許容応力度を若干超過する。
- (4) 付加死荷重を考慮すると、この旧単純合成桁橋では、現行の設計示方書の許容応力度を10%程度も超過する。
- (5) 検討した照査式を用いて、付加死荷重を有するこの旧標準単純合成桁橋の耐荷力照査を、具体的に実施した。
- (6) その結果、阪神高速道路公団の旧標準単純合成桁橋は、耐荷力の面から、安全であると判定され、補強の必要性がないことになった。

謝辞

本研究は、阪神高速道路管理技術センターの「鋼橋の耐久性に関する調査研究委員会」（委員長：福本秀士 大阪大学・教授）の中の「鋼橋の耐久性向上に関する検討部会」（主査：北田俊行 大阪市立大学・助教授）における調査・研究活動の一環として行ったものであり、同委員会、および部会の検討成果に基づいている。委員会・部会の委員各位ならびに関係各位に深謝の意を表す次第である。

D_{a2} ：付加死荷重(2)

- ・門型標識板および支柱
- ・スピードチェッカーおよび支柱
- ・床版補強材
(鋼板接着または桁補強)
- ・裏面板

D_{a1} ：付加死荷重(1)

- ・検査路
- ・多目的の併用路
- ・吊金具
- ・遮音板

CS：クリープ、乾燥収縮

L：活荷重

D：死荷重

$\Sigma \sigma_i$ ：全作用応力度

σ_a ：許容応力度

また、本研究は、平成6～7年度の2年間にわたる文部省・科学研究補助金・一般研究C（研究代表者：北田俊行）の研究活動の一環としても行っている。

参考文献

- 1) T.Kitada, I.Sugiyama, T.Nishioka and K.Iwasaki :A Method for Checking Load Carrying Capacity of Existing Steel Bridges, Proceeding of the Fifth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Vol.3, pp.2011~2016, July 1995
- 2) International Organisation for Standard (ISO 2394): General Principles on Reliability for Structures, October 1986
- 3) 土木学会鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会：鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則，土木学会論文集，No.450/I-20, pp.13-20, 1992年7月
- 4) 阪神高速道路公団・（財）阪神高速道路管理技術センター：鋼橋の耐久性に関する調査研究業務，1993年3月
- 5) 阪神高速道路公団・（財）阪神高速道路管理技術センター：旧梅田入路構造物に関する調査研究，pp.85~104, 1992年3月
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II. 鋼橋編，丸善，pp.13-20, 1990年6月
- 7) 坂野昌弘・藤野陽三・長井正嗣・三上市蔵：300年耐用鋼道路橋の疲労設計法，鋼構造年次論文報告集，第2巻，pp.643~650, 1994年11月
- 8) 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究，pp.54~75, 1986年12月

(1995年 9月18日受付)