

図的表現による橋梁の耐荷性評価の支援手法

Evaluation of Load Resistance of Existing Bridges by Graphical Expression

城戸隆良* 近田康夫** 小堀為雄***
 Takayoshi KIDO Yasuo CHIKATA Tameo KOBORI

【抄録】近年、既設橋梁の耐荷性の性能を評価、チェックする方法が幾つか確立されてきているが、本研究は基本的な耐荷性を無次元化された2次元の (α, β) 座標上で比較検討できるような表現法として与える。荷重の対象は死荷重と活荷重を基本としている。そして、耐荷性の評価を支援する方法として耐荷性を図的に表現し、幾つかの橋梁形式について評価支援を行う方法の応用を示す。作図に必要なデータを与えることでその図的表現はパソコンを用いるなどで容易に作図表示を行える。

【Abstract】In this paper, the format for evaluation of load resistance of an existing bridge is offered and the methods of evaluation are investigated. In the investigation, the coefficient γ_l is expressed in terms of 4 parameters α, β, m and γ_d (see Eq.(3)), and the load resistance is graphically expressed on (α, β) -plane. And also, by using parameters α and β , coefficients γ_d and γ_l which are similar to the Load Factors are derived, so the concept of Load Factor Design Method is introduced to the evaluation.

【キーワード】耐荷性評価、既設橋梁の維持管理

【Keywords】evaluation of load resistance, maintenance of existing bridge

1. まえがき

道路橋は年々、新しく架設される一方で、比較的年数を経ている橋梁があるなど、維持管理するための耐荷性の管理が必要であり、かつ複雑となっている。

近年、橋梁の損傷問題や積載超過の車両問題など、橋梁にとって好ましくない問題が散見されるようになった。積載超過の車両問題については法的な対応が検討され始

めている。荷重環境の変化については通過する自動車交通量の増加や車両の大型化が進んでおり、通過する交通荷重の実態を的確にとらえて耐荷性を確認する方法が必要になっている。また、自動車による輸送手段の活発化とともに、大量かつ効率のよい高規格の輸送手段としての道路利用の社会的要請から、道路規格や設計荷重の見直し、あるいは、既設橋梁にあっては供用荷重や補強強化の検討など、耐荷性の再検討の必要性も考えられよう。

* 〒920 金沢市小立野2-40-20 金沢大学工学部土木建設工学科 TEL.0762(61)2101(ex.245)

** 金沢大学工学部土木建設工学科

*** 金沢大学工学部土木建設工学科

すでに、既設橋梁の基本的な耐荷性の性能を評価、チェックする方法が幾つか確立されてきているが、その中では T-20, L-20 の設計荷重を基準にした基本耐荷力と橋梁の現状に合わせて補正を行って求める供用荷重に関する検討方法¹⁾が一般的な管理方法としてあげられる。また、既設橋梁の供用中における耐荷性をチェックする場面としては、交通荷重実態調査やパソコンによる自動車荷重列のシミュレーションを行い、その荷重列が通過していく過程での橋梁の主要部材の応答を求めるなどの手段により、現状での応答を評価する場合²⁾などが考えられる。さらに、新規橋梁の設計場面では設計データを基にして、将来の供用後の耐荷性に関する再評価のシナリオに備えて、基本的な耐荷性を何らかの形で無次元化された座標上で比較検討できるような表現方法が確立されることが今後の橋梁の維持管理を容易にするであろう。

本論文は、それらの耐荷性の評価を支援する方法として、耐荷性を図的に表現して評価支援を行う方法^{3), 4)}を基に、その応用を図り、パソコンを用いた橋梁の耐荷性の評価支援の方法とその作図表示方法を示す。

2. 耐荷性の視覚化表現

耐荷性評価の方法について、数値情報と判定値との比較判断のみでなく、さらにその結果を視覚的に表現することによって評価支援を行おうとする方法を示す。

基本的には簡略化した次式を基にする。

$$R \geq \gamma_D \cdot D + \gamma_L \cdot L \dots\dots\dots (1)$$

ここに、R:部材抵抗強度、 γ_D :死荷重に関する係数、D:死荷重作用、 γ_L :活荷重に関する係数、L:活荷重作用とする。

各 γ^* は、元々Rにかかる抵抗係数や右項全体にかかる全体安全係数などの概念を簡略化して、この2つのみの係数で代表させるものとする。ここで、各作用を設計特性値について扱う場合には、式(1)でそれぞれに*をさらに付けて表現し区別するものとする。

式(1)をさらに改めて、耐荷性について応力の関係式として表現しなおす。

$$\sigma_u \geq \gamma_d \sigma_d + \gamma_l \sigma_l \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\sigma_u = m \sigma_a$ 、 $\sigma_t = \sigma_d + \sigma_l$ 。ここに、 σ_u :最大強度、m:公称安全率、 σ_a :許容応力、 σ_t :合計作用応力、

σ_d, σ_l :死荷重、活荷重による応力、 γ_d, γ_l :死荷重、活荷重の余裕係数ということにする。

式(2)に対して、 $\alpha = \sigma_l / \sigma_t$ 、 $\beta = \sigma_t / \sigma_a$ の各応力比で表すと無次元化されたパラメータとなる。これらを基に (α, β) の座標上で表現する。式(2)の関係式より γ_l について求めると

$$\gamma_l \leq \frac{m + \gamma_d \beta (\alpha - 1)}{\alpha \beta} \dots\dots\dots (3)$$

の関係が得られ、 γ_d を任意に定めることにより γ_l が求められる。なお、 $0 < \alpha < 1$ 、 $0 < \beta \leq m$ 、また、一般に $1 < \gamma_d \leq m$ 、 $1 < \gamma_l \leq 2.5$ などの範囲が設定できる。 γ_d, γ_l は荷重係数と同じような形式となっているが、本論文では任意にどちらかを設定して与えられる係数で、最大強度に至るまでの安全余裕を係数として与えている。適切とはいいがたいが余裕係数ということにする。なお、式(3)より、

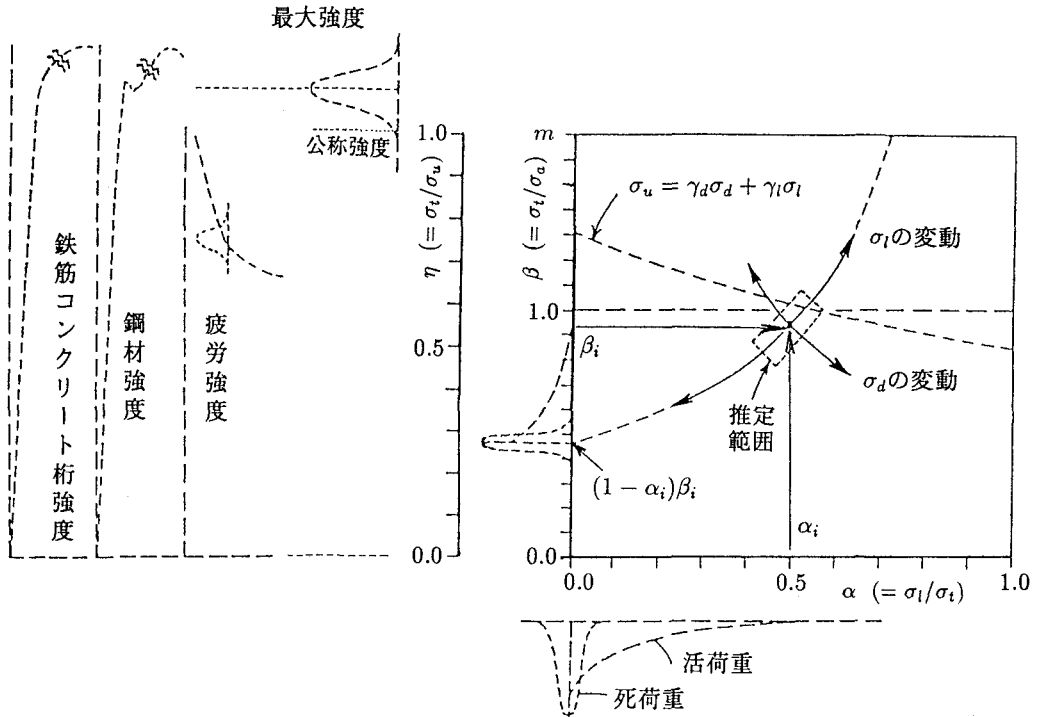
$$\beta \leq \frac{m}{(\gamma_l - \gamma_d) \alpha + \gamma_d} \dots\dots\dots (4)$$

となる。この式(4)は、 γ_d, γ_l を与えることで、ある α に対する β が求められ、限界線の作図設定ができる。

この関係を (α, β) の座標を持つ図で示せば、図1のようなモデル図になる。

図1左の縦軸の η は σ_t / σ_u である。これは最大強度との比であるので最大値が1。0以下となることが必要である。この η 軸表示は主に鉄筋コンクリート橋の場合の評価に対応させるためである。右図の縦軸は着目する部材の応力比 β_i が許容応力(β が1.0の場合に相当)を越えるか越えないか、あるいは、ある γ_d, γ_l を設定した場合の限界線を表示して、その限界線を越えるか越えないかの判定が視覚的に行えるように設定したものである。また、横軸は着目する部材の応力比 α_i の大小により、死荷重と活荷重応力に対して活荷重応力がどの程度の割合であるかの状態を表示している。また、4.(1)項の応用において述べる補正計算を行えば、図1のようにある変動幅を与えることで推定範囲をもって表示でき、 σ_d 、あるいは σ_l の変動や推定誤差を与えることで感度評価に利用できる。

図1の周辺に図示した点線の各分布は意図する評価のための背景をモデル化している。横軸では死荷重に関する想定分布と活荷重の作用頻度の想定分布を模擬化して

図1 (α, β) 座標上での表現と背景モデル

示す。縦軸の β ではこれと同様な分布性状となる。鉄筋コンクリート(桁、部材)の強度や鋼材の強度、あるいは、許容応力を越える領域での疲労強度および最大強度の分布の模擬図を示した。鉄筋コンクリート桁や部材はある限界を越えることにより、ひび割れ問題が生ずるが応力的には最大強度までは耐えれると考える。鋼材も最大強度まで耐えれると考える。最大強度から公称強度を設定すると、最大強度分布のうちの下位の方の値で代表されていることになる。しかし、最大強度まで耐えれると仮定しても、コンクリートのひび割れや鋼材の疲労問題など、許容応力を越えるような過酷な応力状態になればこのような別の問題についての検討が必要になるろう。

耐荷性は狭義のレベルを扱い、このような変位、損傷、振動問題などの使用性に関する検討は含まない。

荷重係数設計法の流れでは、許容応力度設計法のように死荷重および活荷重の安全率を同一値とするのではなく、それぞれの分布やばらつきを基に安全性指標(ある

いは破壊確率)を考慮する信頼性理論で検討されるように、それぞれに関する荷重係数を推定する立場をとる。死荷重のようにほぼ確定的で変動の少ない荷重に対して係数は小さく、変動の大きい活荷重については係数が大きく推定される。その係数に対応させるかのように、式(4)を基に式(2)の限界線を図示できる。

以上のように、図1のそれぞれの点線で示す概念が背景として考えられる。

3. 耐荷性評価のための図的表現の適用

(1) プレートガーダー橋

対象とする橋梁モデルに対して重要な着目点を任意に選び、死荷重と活荷重に関しての耐荷性を検討する。評価は応力度 σ に対して行う方法または曲げモーメント M に対して検討してもよい。載荷試験や点検などにより、応力状態や断面寸法の変化などが把握された場合には、その結果を適用し修正する。修正は主に活荷重応力度に修正係数を掛けて補正する。死荷重応力度について

も、死荷重の実態に近い結果を与えることが望ましく、設計死荷重応力度に対して修正係数を掛ける補正も考えておく。その他、交通実態調査などの結果を基に渋滞時の活荷重シミュレーションが行えれば、実情での活荷重レベルを推定し、その結果を図上に表現することによって、その予測範囲を持たせて表示することもできる。

なお、曲げモーメント M について行うときは、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= M_t/M_t, \\ \beta &= M_t/M_a, \\ \eta &= M_t/M_u, \\ M_t &= M_d + M_l, \\ M_u &= \gamma_d M_d + \gamma_l M_l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

の関係式に置き換えれば、同様に (α, β) 座標上での表現が可能になる。

ここに、 σ_y を保証降伏応力とすると、

M_u : 曲げ部材の保証抵抗曲げモーメント (たとえば、 $\sigma_y \geq M_y y/I$, y : 着目している曲げ部材断面の図心からの縁端までの距離 (cm), I : 部材断面での断面二次モーメント (cm⁴), より求められる M_y を M_u とする) であり、終局抵抗曲げモーメントをここでは仮定していない (一般に I 形断面桁の終局抵抗曲げモーメントは降伏抵抗曲げモーメントの 1 ~ 1.2 倍程度で降伏変形を伴う)

M_d : 着目している曲げ部材に作用する死荷重による曲げモーメントで実態を考慮したもの

M_l : 着目している曲げ部材に作用する活荷重による曲げモーメントで実態を考慮したもの

(単位はいずれも (kgf・cm) または (tf・m)) である。

図 2 に示す結果は、L-20 荷重に対して再評価した一例である。この結果では①, ③の着目点に比較して②の着目点が応力的に上位にあることがわかる。

たとえば、その内容について②の結果は、 $\alpha = 0.42$, $\beta = 0.97$ である。応力度では $\sigma_a = 1400(\text{kgf}/\text{cm}^2)$, $\sigma_d = 788(\text{kgf}/\text{cm}^2)$, $\sigma_l = 570(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ である。 $\gamma_d = 1.3$ と $\gamma_l = 2.5$ の限界線を仮定して式 (4) に代入すると、この場合、 $\alpha = 0.42$ での限界値 β は $\beta \leq 0.94$ が求められる。②の結果の $\beta = 0.97$ はこの限界値 0.94 を越えている。そこで、式 (3) において $\gamma_d = 1.3$ とすると②の結果は

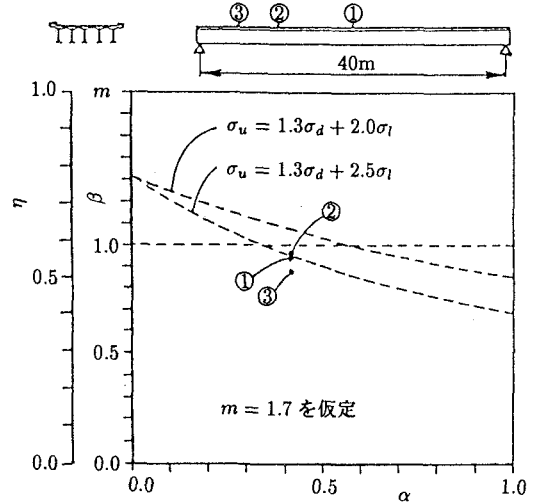


図 2 プレートガーダー橋の例

$\gamma_l \leq 2.38$ を得る。また、 $\beta = 0.97$ であるので許容応力度を満足している ($\beta \leq 1.0$)。図 2 を見てわかるように①と③の結果は $\sigma_u = 1.3\sigma_d + 2.5\sigma_l$ を満足している。

(2) トラス橋

対象とするトラス橋モデルで着目した各部材の結果を図 3 に例示する。このモデルにおいても応力度に対して行う方法または軸力 N に対して検討してもよい。修正および検討についてはプレートガーダー橋の例と同様の考え方で行う。

なお、軸力 N について行うときは、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= N_t/N_t, \\ \beta &= N_t/N_a, \\ \eta &= N_t/N_u, \\ N_t &= N_d + N_l, \\ N_u &= \gamma_d N_d + \gamma_l N_l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

の関係式に置き換えれば、同様に (α, β) 座標上で表現が可能になる。

ここに、

N_u : トラス部材の保証抵抗引張力 (または保証抵抗圧縮力) (たとえば、引張部材にあっては $\sigma_y \geq N_y/A$, A : 部材の純断面積 (cm²) より求められる N_y を N_u とする)

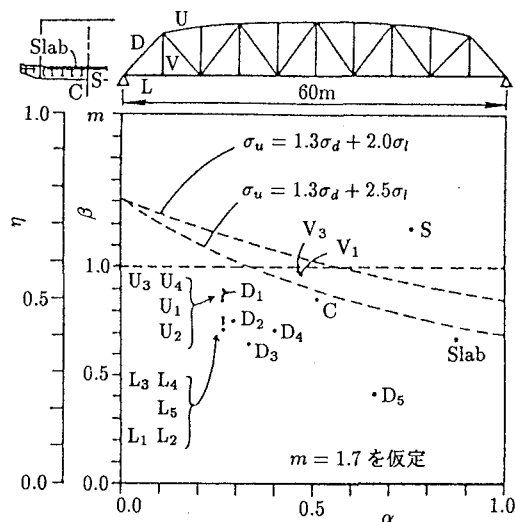


図3 トラス橋の例

N_d : 着目しているトラス部材に作用する死荷重による軸力で実態を考慮したもの

N_l : 着目しているトラス部材に作用する活荷重による軸力で実態を考慮したもの (あるいは, TL-20 荷重などによるもの)

(単位はいずれも (kgf) または (tf)) である。

図3に示す結果は、旧方書で設計された既設トラス橋について、外観点検調査、寸法調査、静的載荷試験、動的走行試験を行った結果を基に修正係数を与えて、各応力度を補正して、TL-20 荷重に対する評価を行ったものである。引張部材と圧縮部材および曲げ部材の結果を混在させて表示した結果である。この結果を比較検討すると、縦桁 S が特に問題になることがわかる。次いで垂直材 V である。活荷重比率 α の小さい主構部材は余裕があり、 α の大きい部材は活荷重の変化に対して敏感な部材であり、特に Slab (床版) は活荷重の増大に対して敏感であることがわかる。

(3) 鉄筋コンクリート橋

ゲルパー桁橋のモデルについて各着目点の結果⁵⁾を図4に例示する。

この例では、曲げモーメント M に対して検討を行った。評価式はプレートガーダー橋と同様であるが、鉄筋

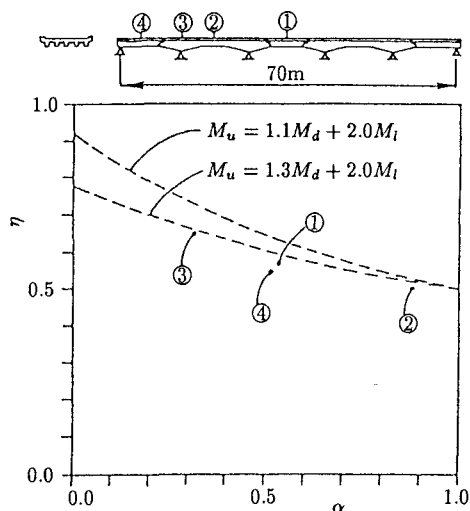


図4 鉄筋コンクリート橋の例

コンクリート橋の場合には、「コンクリート橋の耐荷力算定指針案」で示される限界状態について考えるものとし、 M_u としては M_u : 桁の破壊に対する抵抗曲げモーメントとする。曲げモーメントの単位は (tf・m) で算定する。

図4の結果は、外観点検調査、静的載荷試験、動的走行試験を行った結果を基に修正係数を与えて、TL-20 荷重に対する評価を行ったものである。この場合も、圧縮、引張曲げモーメントの結果を混在して表示している。着目点として ② の結果は交番応力が得られるので大きい方の値を表示している。結果として $M_u = 1.3 M_d + 2.0 M_l$ の限界線などを満足している。 α の大きい着目点 ② については活荷重の増大に対して敏感であると考えられる。

(4) 合成桁橋

合成桁橋における応力は、合成前と合成後の合計応力により検討することになる。したがって、死荷重応力については、合成前、合成後の死荷重およびクリープ、乾燥収縮、温度差による応力を考慮し、それを死荷重応力の項に含める。そして、活荷重応力については次のようである。

たとえば、図5は、特殊大型車 (TT-146 とする。軸数 10、総重量約 146tf) が通過する場合の桁の安全性の検討例⁶⁾ に対して図的表現により結果を表示しようとする。

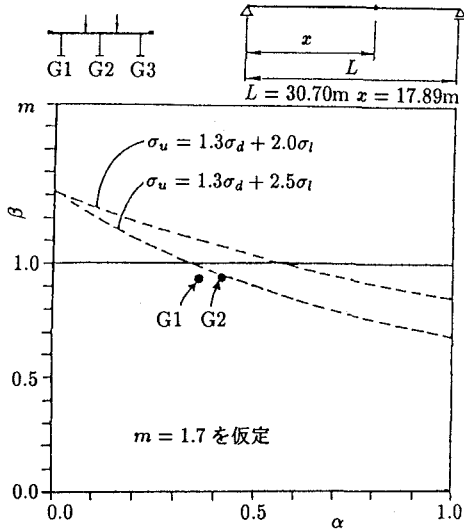


図5 合成桁橋の例

する例である。TT-146 が幅員中央を極低速で通過するとき、鋼桁の絶対最大曲げモーメントの生ずる位置について応力測定した結果について、通過時の最大の応力度を用い、死荷重関連の応力は設計値と現状寸法を基に解析により推定した結果を用いている。主桁は3本であるが耳桁のG1と中桁のG2の結果についてプロットした。結果は図5のようにG1,G2の各点である。結果的には許容応力度を満足し、他の2本の破線で示す限界線以下となっている。

4. 応用

(1) 補正の方法

ここでは供用状態に対応した補正を考え、補正を加えた場合の表示法を示す。種々の補正係数は、対象とする既設橋梁の定期点検や試験調査などを行った結果から推定する。いま、 σ_d に関する補正係数 K_d 、同じく σ_l に補正係数 K_l を仮定すれば、 σ_t と補正された σ_t' は

$$\sigma_t = \beta \sigma_a = (1 - \alpha) \beta \sigma_a + \alpha \beta \sigma_a \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_t' = \beta' \sigma_a = K_d \sigma_d + K_l \sigma_l = \sigma_d' + \sigma_l' \dots\dots\dots (8)$$

と表される。式(7),(8)により β' は

$$\beta' = K_d(1 - \alpha)\beta + K_l\alpha\beta \dots\dots\dots (9)$$

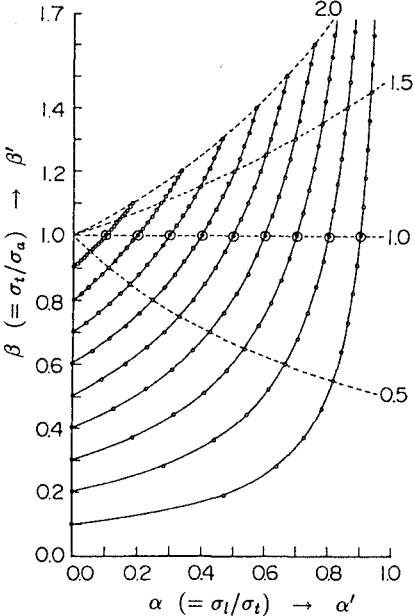


図6 σ_l の変動による α, β の変化

また、 σ_t' を σ_d' と σ_l' に分け、 $\alpha' = \sigma_l'/\sigma_t'$ で示すと

$$\sigma_t' = (1 - \alpha')\sigma_t' + \alpha'\sigma_t' = \sigma_d' + \sigma_l' \dots\dots\dots (10)$$

$$\alpha' = K_l\alpha\beta/\beta' \dots\dots\dots (11)$$

となる。

以上の β', α' によって K_d, K_l の補正係数を考えた評価ができる。ただし、表面上は応力が補正された形式で表示されるので注意して適用すれば、有効な応用ができる。

たとえば、この補正を利用して図6に (α, β) の基本的な特徴を示す。図6で示す○は $\beta = 1.0$ を基準とし、それぞれ α を 0.1 ごとに示した。この場合の各基準点から活荷重が 0.1 倍ごとに増減した場合、 α, β がどう変化するかを示している⁴⁾。それが各点○であり、各点を実線で結んで示した。すなわち、活荷重の増減によって実線に沿った増減となる。これは最初に示した図1の σ_l の変動傾向を説明している。

同様に図1の σ_d の変動や死荷重の変化傾向は、この横軸を $(1 - \alpha)$ 軸に置き換えて解釈すればよい。

耐荷性評価のための (α, β) 座標による図的表現
対象 プレートガーダー橋
(応力度による評価検討の場合)

引張の場合

着目点No.

材質

公称降伏応力 σ_y (kgf/cm²)最大強度 $\sigma_u = m \sigma_a$ 許容応力 σ_a (kgf/cm²)公称安全率 m 死荷重応力 σ_d (kgf/cm²)活荷重応力 σ_l (kgf/cm²)合計応力 $\sigma_t = \sigma_d + \sigma_l$ 死荷重に関する余裕係数 γ_d 活荷重に関する余裕係数 γ_l (γ_d を与えたときの γ_l の余裕は?)活荷重応力比率 $\alpha = \sigma_l / \sigma_t$ 合計応力比率 $\beta = \sigma_a / \sigma_u$

②

SS400

2400

2394

1400

1.71

700

700

1400 限界線値

1.3

2.5

0.5

1

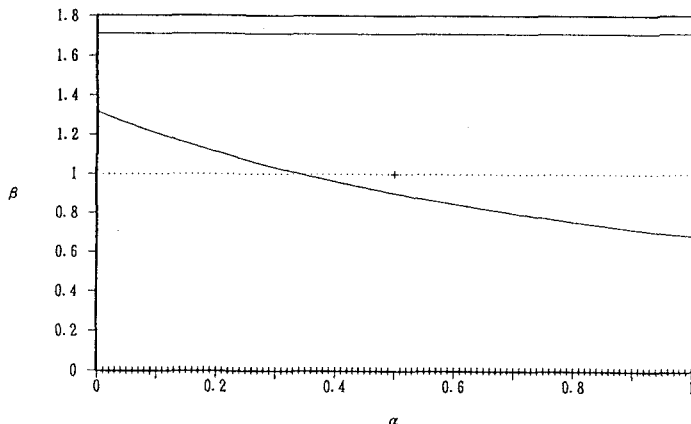
(α, β) 座標表現図

図 7 表計算ソフトによる作図例

なお図中の数値は、 $\beta = 1.0$ における各 α での値を基準にして活荷重が増減した場合の倍率を示し、倍率 2.0, 1.5, 1.0, および 0.5 についてそれぞれ点線で示した。 α の大きいものほど β の変化幅が大きいことがわかる。

(2) 補正を伴う適用および自動車荷重列シミュレーションの利用について

補正を行う場面は幾つかあるが、ここでは死荷重、活荷重の変動性、すなわち、図1で述べたように σ_d, σ_l の変動範囲表示をもって示す。死荷重の変化は舗装のオーバーレイなどの補修、修繕によって生ずることがある。活荷重の変動は地域差などがあって、既設橋梁では個々の現状や将来の変化を同一視できない個別問題として考える必要がある。このことから、活荷重の実態を交通量調査や自動車荷重調査などから類推し、耐荷性評価に取り入れて検討することも重要な判断材料になる。

交通量などの実態把握法には幾つかの方法があるであろう。たとえば、車種別交通量および通過位置分布調査の測定データがある場合での対応というような設定をする。それらの基本的なデータを基にパソコンなどによりシミュレーション手法⁷⁾を用いて、車種別自動車荷重モデルの作成、交通流シミュレーションを行い、自動車荷重列を作成して、各主要部材の応力を求めて検討する。補正およびシミュレーション方法と結果の図的表示方法と検討方法の例についてはすでに報告^{2), 4)}している。また、基本耐荷力 P と図的表現法との対応も例示している。

(3) 設計荷重の変更に対して

設計荷重の見直しにより、特に設計活荷重の強化が必要となる場合については、既存橋梁の耐荷性⁸⁾の見直しあるいは補強が必要になる場合が考えられる。よって、

このような場合においても必要なデータを求めて (α, β) 軸上でプロットして表し、視覚的に耐荷性の再検討をすることができる。

(4) パソコンによる (α, β) 軸上での図的表現

パソコンにより図的表現として表示するには、前記の目的の各式に必要なデータを代入して (α, β) 軸上でプロット表現するのみであり容易である。

プログラム作成やマン・マシン・インターフェースの配慮および印刷出力部分の基本的な構成は、市販の表計算ソフトを用いて作成することができる。表計算ソフトは各データ入力や訂正が容易であり、また、データシートや計算過程を必要なセルに設計でき、計算式を埋め込んだり、マクロ機能もあるので、作図表現および印刷も比較的容易なので便利である。たとえば、表計算ソフトによる基本部分の表示例を図7に示す。しかし、表計算ソフトでは表現も制約されるので、さらに機能を高めるには、処理としてはそれほど難しくはないのでプログラム用言語を用いて自作することも比較的容易である。または、データ入力部分を表計算ソフトに依存し、データファイルに登録させ、表示はそのデータを読み込んで自作プログラムで表現したり、あるいは、フリーウェアの図形表現、印刷用のソフトを利用するなど、幾つかの方法がある。

プログラムを自作するときには、目的が耐荷性評価を支援する図的表現であるので、色表現を使い、引張、圧縮、交番応力など色を替えて表示する、あるいは、部材ごとに部材番号を付けたりする。また、目的の部材が限界線を越えたときに警告を表示したり必要なメッセージを表示するなど、利用者の判断を支援する幾つかの工夫を施すのがよい。

5. あとがき

(α, β) 軸上で結果をプロット表現するのみで橋梁の耐荷性評価を視覚的に支援する一方法について示した。

そして、その図的表現を利用、応用、適用する場合について幾つかの例を示した。また、その表現をパソコンを用いて表現する方向について示唆した。利用は例示したような数種の橋梁形式に限定されると考えられる。

今後、既存橋梁の耐荷性の再評価を行う場面があると思えば、できれば新規の橋梁の設計時点から維持管理での耐荷性評価に備えた、本論文で示したような同一座標

上での表示手法をとって比較評価ができればよいと考えられる。もちろん基本的に、計算により求められた数値情報とその内容、および、部材の特徴を理解して目的とする耐荷性評価を専門家は進めることが必要である。その数値情報を視覚的に確認、支援する方法としての図的表現法を示した。本研究が橋梁維持管理上有効な手段となれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木研究所橋梁研究室：既存橋梁の耐荷力と供用限界に関する研究、第25回建設省技術研究会報告、pp. 251-282、建設省昭和46年度。
- 2) 近田康夫、城戸隆良、小堀為雄：既設道路橋に作用する活荷重と耐荷性評価シミュレーション、金沢大学工学部紀要、第24巻、pp. 21-28、1991-3。
- 3) 小堀為雄、城戸隆良、津田和俊、近田康夫：橋梁診断の基礎概念と既存橋の診断例について、第29回構造工学シンポジウム、pp. 19-26、1983-2。
- 4) 小堀為雄、城戸隆良、近田康夫：視覚化による既存橋の耐荷性評価に関する研究、金沢大学工学部紀要、第17巻、第2号、pp. 69-77、1984-10。
- 5) 小堀為雄、城戸隆良、近田康夫、本田秀行：RCゲルバー桁橋の健全性調査の一例、橋梁と基礎、pp. 35-40、1985-12。
- 6) 城戸隆良、近田康夫、小堀為雄：特殊大型車の通過に伴う桁橋の補強と載荷試験、第17回日本道路会議一般論文集、pp. 822-823、1987-10。
- 7) 藤野陽三、伊藤学、遠藤元一：シミュレーションに基づく道路橋設計活荷重の評価、土木学会論文報告集、第286号、pp. 1-13、1979-6。