

道路橋の設計における荷重係数法の導入に関する試算

神戸建設部 設計課 北沢正彦
工務部 設計課 石崎浩
同部同課 堀江佳平

要 約

阪神高速道路公団では昭和56年度から昭和61年度にかけて設計荷重委員会を設置し、阪神高速道路の活荷重、風荷重、温度荷重、地震荷重等の荷重実態を調査するとともに、これらの荷重を受ける構造物の安全性について種々の検討を加え、設計荷重体系の現状と今後の方向性に関する調査研究を進めて来た。研究成果については、既に技報第三号¹⁾、第四号²⁾、第六号³⁾にその一部を報告した通りであり、また設計荷重委員会報告書⁴⁾に詳しくまとめられている。

本報告は上記に引き続いて行うもので、昭和60年度に検討した課題のうち現行設計法から将来的に荷重係数を用いた設計法へ移行するための試算結果について示す。すなわち、荷重係数設計法の考え方と荷重係数の算定方法を整理し、具体的な実態荷重と構造物のモデルを用いて荷重係数を試算し、現行設計法と対比しながらその実用性ならびに有効性を検討した。その結果、ここで目標とする荷重係数を用いれば、種々の組合わせ荷重を受ける構造物の安全性が均等化し、道路橋の設計に荷重係数法を導入することの有意性が高いことを確認した。

まえがき

現在、道路橋の設計法を現行の許容応力度法から荷重係数を用いた設計法へ移行するために、日本道路協会を中心とする各方面の協力によって示方書の改訂検討作業が進められている。特に、活荷重をはじめとする荷重の実態調査には最近の情報が入り入れられ、検討作業も順調に進んでおり、これまでにその成果として第一次報告書⁵⁾がまとめられている。

阪神高速道路公団の設計荷重委員会における調査研究の成果も、直接的あるいは間接的に反映さ

れており、責任の一端を果たしている。設計法の具体化をめざしてさらに検討すべき課題を多く、阪神高速道路公団としても都市内高速道路の建設・維持管理者として、この問題に積極的に取り組んでいる。

実務的にこのような設計法は欧米諸国のBS 5400⁶⁾やOHBDC⁷⁾等において既に実用化されており、また我が国では土木学会のコンクリート標準示方書⁸⁾が最近になってその様式に移行したところである。

これらの背景には、構造物設計における確率論的な信頼性評価の研究が進み、安全性の合理的な評価を設計に取り入れるよう提唱されて来たことがあげられる。諸外国の時勢に続いて、我が国においてもようやく道路橋示方書を改訂する機運が高まって来たと言える。言い換えれば、新しい設計法の考え方や荷重係数の算定方法が、ようやく研究段階から実務段階へと進展し、橋梁技術者にその理解が深まって来たものと考えられる。

したがって、我が国の道路橋示方書を改訂するにあたり、諸外国の結果を踏襲するだけでなく、荷重や構造物の実情に合わせてより適切な設計法を作り上げることが望まれる。

本報告では、このような観点から荷重係数設計法の考え方と荷重係数の算定方法をまとめ、阪神高速道路の代表的なタイプの鋼製橋脚のモデルおよび荷重実態調査によって得た荷重のモデルを用いて荷重係数を試算した結果を示す。ここでは、死荷重、活荷重、温度荷重および地震荷重についてそれらの組合わせを設定し、目標とする限界状態確率を与えて最適な荷重係数を試算した。荷重組合わせの問題を理論的に考察するだけでなく、実際の荷重と構造物について試算することをねらいとして行った。

なお、この報告ではこのような設計法を荷重係数法と呼ぶことにするが、道路橋示方書の改訂にあたっては限界状態設計法と呼ばれている。基本的には荷重係数を用いる設計法として、現行の許容応力度設計法に対比して、これらは同じものと考えて良い。

1. 荷重係数設計法の考え方

1-1 設計照査の目的

設計された構造物に環境条件に対応した荷重が作用し、部材の変形や応力があるレベルや強度を超えると、構造物が破壊あるいは使用不能に陥る。構造物の設計では、このような構造物にとって望ましくない状態が起きないように十分な安全性や使用性を確保する必要がある、そのための設計照査として設計荷重、設計安全率、公称強度さらに

は照査式を規定している。しかも、構造物全体に対して、安全性や使用性はなるべく均等に確保されるのが望ましく、また経済性から見ても合理的なバランスが必要とされる。

周知の通り、現行の道路橋示方書では、考えられる荷重組合わせの中から支配的と思われる組合わせをいくつか規定し、しかも組合わせ荷重の生起頻度や荷重効果の足し合わせに応じて許容応力度の割増しを行い、これに基づいて設計照査を行っている。

ところが、現行の設計安全率および割増し率の設定においては、経験的な判断が左右しておりその定量的な産出根拠は必ずしも明確ではない。たとえば、死荷重と活荷重の組合わせでは、通常ともに約1.70の設計安全率が与えられるが、ばらつきが少ない死荷重に対してもこのように高い設計安全率を与えることが合理的とは考えにくい。

これに対して、荷重係数法では設計照査の規定に確率論的な評価を取り入れることによって、各荷重の実態特性に基づく設計荷重の設定ができ、しかも構造物間あるいは支配的な荷重組合わせの種類間では、安全性のバランスを向上させることができるという利点がある。つまり、構造物の安全性や使用性の大きさに関する不確定要因に対して確率論的な定量評価を行い、数値的な根拠に基づいて設計照査の内容を規定するものである。

現行の許容応力度設計法と比較して荷重係数設計法の基本的な考え方をまとめると、次のような特徴をあげることができる。

- (1) 強度および荷重の組合わせについて、強度係数やそれぞれの荷重係数等を用いて設計照査を行う。
- (2) 設計照査の規定にあたって、強度や荷重に関する種々の不確定要因に対して信頼性理論に基づく評価を取り入れことができる。
- (3) 照査する構造物の限界状態として、使用限界あるいは終局限界を直接的に考慮することができる。

これらの点を満たす設計法を採用すれば、設計照査の目的に合う設計が可能になるものと考えられる。

1-2 荷重係数と設計安全率および割増し率との関係

設計荷重の組合わせケースをCode-j(j=1, 2, …)とにおいて、現行の許容応力度設計法による設計照査式を次のようにまとめることができる。

$$\xi_j \sigma_a \geq \sum_m \alpha_m \cdot X_{m^*} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、

ξ_j : 荷重組合せ Code-j における許容応力度の割増し率

σ_a : 許容応力度

α_m : 荷重mの荷重効果への変換係数

X_{m^*} : 荷重mの設計荷重

一方、荷重係数法の設計照査式は次のようにまとめることができる。

$$\phi \sigma^* \geq \gamma_{oj} \sum_m \alpha_m \gamma_{mj} X_{m^*} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、

ϕ : 強度係数

σ^* : 部材の限界状態を表わす公称強度

γ_{oj} : 荷重組合せ Code-j の全体係数

γ_{mj} : 荷重組合せ Code-j における荷重mの荷重係数

α_m, X_{m^*} : 式(1)と同じ

式(1)と式(2)による設計照査の方法は、いわゆるレベル-Iの方法と呼ばれているもので、設計荷重によって与えられる荷重効果の和が規定された抵抗力より等しいか小さくなることを確認することによって、必要とする部材の安全性や使用性の余裕を確保しようとするものである。

式(2)において、強度係数 ϕ は部材の強度が公称強度を下回る可能性に対する安全率を表わす。また、 γ_{mj} は各荷重の最大値が設計荷重を超える可能性に対する安全性を表わし、各荷重のばらつきを考慮して荷重間のバランスを図ろうとするものである。これに対して、全体係数 γ_{oj} は荷重組合せ間のバランスを図るための係数で、土木学会のコンクリート標準示方書における設計照査式と対比して組合せ係数とも呼ばれる。

いま、許容応力度 σ_a と限界状態を表わす公称強度 σ^* との間に、設計安全率 η を介して次の関係があるとすると、

$$\sigma_a = \sigma^* / \eta \quad \dots\dots (3)$$

式(3)を式(1)へ代入して式(2)と同じ形にすれば、現行の設計安全率と割増し率と荷重係数法との間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{\eta}{\xi_j} \sum_m \alpha_m \cdot \chi_{m^*} = \frac{\gamma_{oj}}{\phi} \sum_m \alpha_{mj} \cdot \alpha_m \cdot \chi_{m^*} \quad \dots\dots (4)$$

したがって、Code-j において許容応力度の割増し率 ξ_j によって低減した設計安全率が、荷重係数法の全体係数、強度係数および荷重係数と一対一の対応をなすことがわかる。式(4)において、もし $\phi=1.0$ 、 $\gamma_{oj}=1.0$ と仮定すれば、 γ_{mj} は荷重mに対する設計安全率を意味することがよく理解できる。

1-3 荷重係数の算定方法

設計照査に用いる荷重係数等の規定を作るにあたっては、1-1に示したように荷重係数設計法の考え方に基づいて、できるだけその目的に適合するように決めるのが望ましい。これまでに提案されている荷重係数の算定方法としては、たとえば線形化二次モーメント法があるが、この方法ではさまざまな組合せ荷重を受ける構造物の安全性を均等化するという考え方には必ずしも合致せず、実際の設計照査式を作るにあたって実用的でない面があった。

そこで、荷重係数設計法の考え方を忠実に反映するような荷重係数の算定方法として、ここでは構造物の安全性や使用性の大きさを限界状態確率によって表わし、各構造物の限界状態確率のばらつきが最小となるようにして荷重係数を算定する方法を開発した。この方法に対して、各構造物の限界状態確率の最大値を規定する方法、つまりその上限値を与えるような考え方もある。これらのうち、どちらを採用すべきかについてはさらに検討が必要と考えられるため、ここでは前者の方法を用いて荷重係数を試算することにした。その流れを図-1に示す。

なお、式(2)に示した各係数のうち、強度係数 ϕ と全体係数 γ_{oj} の値を簡単のために1.0と仮定した。最終的には全体係数と各荷重係数を分離して求めるのが望ましいが、その方法や考え方についてはさらに検討が必要と考えられる。

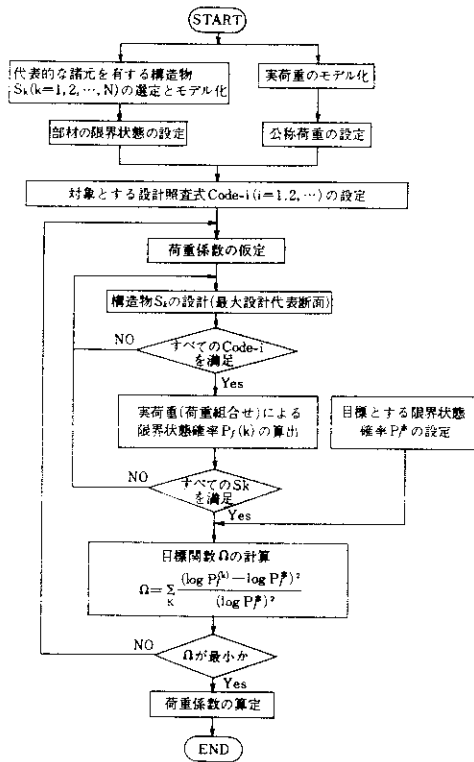


図-1 荷重係数算定の流れ

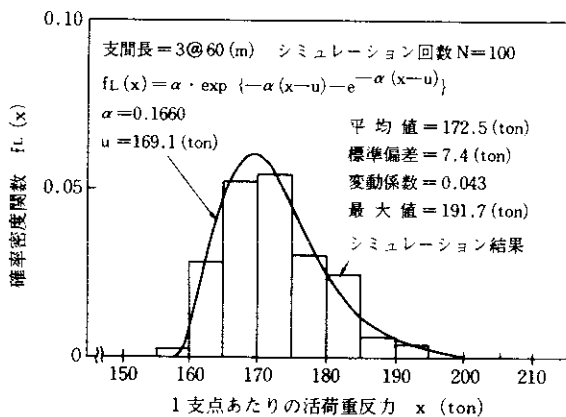


図-3 活荷重モデル

2. 対象とする荷重と構造物の設定

2-1 荷重と荷重組合せのモデル

2-1-1 実荷重モデル

できるだけ実用的に荷重組合せの問題を検討するために、常時と地震時の比較、ならびに地震時における活荷重および温度荷重との組合せに主眼を置き、死荷重(D)、活荷重(L)、温度荷重(T)および地震荷重(E)を代表的に解析の対象として選定した。その発生特性を図-2のようにモデル化し、各荷重が発生した時の荷重強度をその確率密度関数によって表わした。

具体的な実荷重のモデルとして図-3～図-5に示すものを用いた。活荷重では1箇月に1回程度発生する渋滞荷重をシミュレーションによって求めた。温度荷重では活荷重や地震荷重と組合せることを考え、任意の時刻の温度荷重の分布のうち比較的荷重の大きい範囲のみをモデル化した。地震荷重では再帰期間が平均2年間以上のものを考え、構造物の固有周期 $T_n=0.5$ 秒を仮定して応答加速度をモデル化した。また、死荷重はばらつきが小さいことから確定値とし、設計死荷重に等しい場合と設計死荷重の5～10%増の場合を考えた。ここでは、主として、後者の場合について示す。

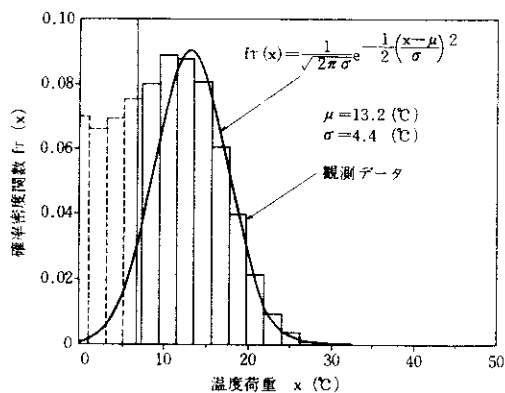


図-4 温度荷重モデル

| | 実際の荷重発生パターン | 実荷重のモデル化 | 確率密度関数 |
|--------|-------------|----------|--------|
| 死荷重 D | | | |
| 活荷重 L | | | |
| 温度荷重 T | | | |
| 地震荷重 E | | | |

図-2 荷重の発生特性とモデル化

2-1-2 荷重の組合せ

荷重の発生状況から、表-1 に示すような実荷重の組合せを考えることができ、これに対して現行設計法と荷重係数法設計照査式として、それぞれ Code-1 ~ Code-4 を代表的に考えるものとした。ただし、実荷重の組合せケース Case-i ($i=0,1,2,\dots,7$) とおく。

ここで、基本の

許容応力度 $\sigma_a=2100(\text{kgf}/\text{cm}^2)$

降伏強度 $\sigma_y=3600(\text{kgf}/\text{cm}^2)$

を限界状態とすると、現行の設計安全率約1.70は σ_y/σ_a で表わされる。これに許容応力度の割増し率を考慮して、両方の設計照査式を対比するための換算係数 ξ_j/η を示す。

荷重効果の組合せにあたっては、モンテカルロシミュレーション法を用いた。すなわち、個々の荷重のサンプル値をそれぞれの確率分布を用いて作成し、これを確定量として構造物に作用させて荷重効果を求め、その足し合わせによって一つの

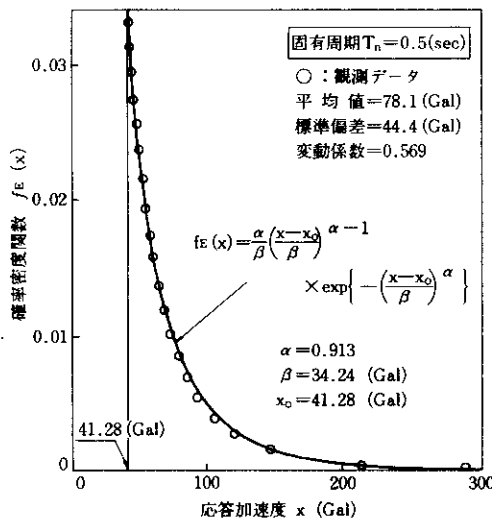


図-5 地震荷重モデル

組合せ荷重による荷重効果を求める。これを十分な個数のサンプルが得られるまで繰り返し、その頻度分布に最適な確率分布をあてはめて荷重効果

の組合せを行った。この方法によれば比較的容易に解析することができ、各荷重のシミュレーション回数をいずれも500回とした。

表一 実荷重の組合せと設計照査式の定義

| 実荷重の組合せ | | 設計照査式 | | | |
|---------|---------|--------|-------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 組合せケース | 荷重の種類 | 組合せケース | 現行設計法 | $\frac{\xi_j}{\eta}$ | 荷重係数法 |
| Case-0 | D | Code-1 | $\phi_1 \sigma_y \geq \alpha_D D^* + \alpha_L L^*$ | $\frac{1.00}{1.70}$ | $\alpha_y \geq \alpha_D \gamma_{D1} D^* + \alpha_L \gamma_{L1} L^*$ |
| Case-1 | D+L | | | | |
| Case-2 | D+T | Code-2 | $\phi_2 \sigma_y \geq \alpha_D D^* + \alpha_L L^* + \alpha_T T^*$ | $\frac{1.15}{1.70}$ | $\alpha_y \geq \alpha_D \gamma_{D2} D^* + \alpha_L \gamma_{L2} L^* + \alpha_T \gamma_{T2} T^*$ |
| Case-3 | D+L+T | | | | |
| Case-4 | D+E | Code-3 | $\phi_3 \sigma_y \geq \alpha_D D^* + \alpha_E E^*$ | $\frac{1.50}{1.70}$ | $\alpha_y \geq \alpha_D \gamma_{D3} D^* + \alpha_E \gamma_{E3} E^*$ |
| Case-5 | D+L+E | | | | |
| Case-6 | D+T+E | Code-4 | $\phi_4 \sigma_y \geq \alpha_D D^* + \alpha_T T^* + \alpha_E E^*$ | $\frac{1.70}{1.70}$ | $\alpha_y \geq \alpha_D \gamma_{D4} D^* + \alpha_T \gamma_{T4} T^* + \alpha_E \gamma_{E4} E^*$ |
| Case-7 | D+L+T+E | | | | |

2-1-3 設計荷重の設定

荷重係数設計法に用いる設計荷重としては、各荷重がバランスのとれたものであることが望ましく、現行の設計荷重をそのまま用いて良いかどうかについて検討しなければならない。しかし、こ

こでは現行の道路橋示方書における規定に用いるのが理解し易く、また現行設計法の延長線で議論することができるためこれを設計荷重として用いることにした。

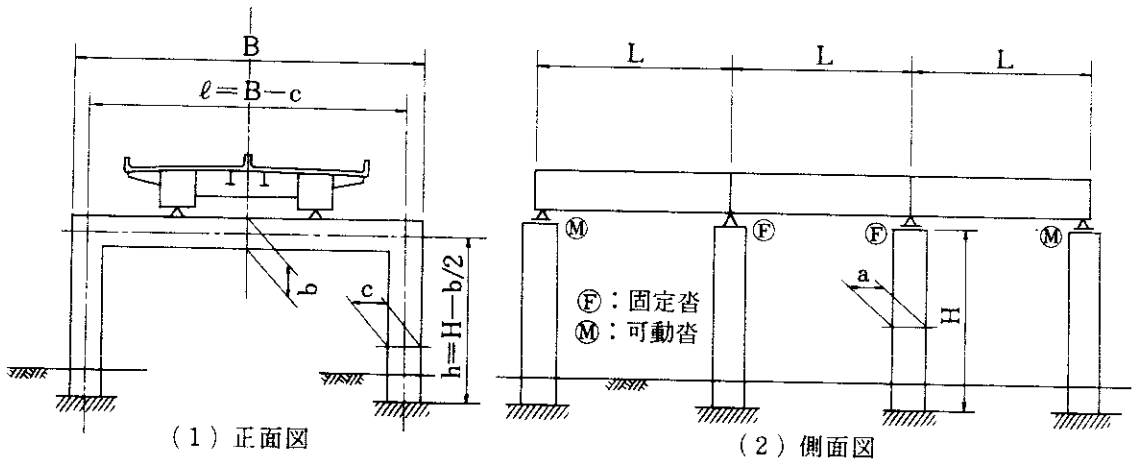


図-6 対象とする構造物モデル

2-2 構造物のモデル荷重と構造解析

2-2-1 対象とする構造物

阪神高速道路の代表的な構造物を解析の対象とするものとし、図-6に示す三径間連続箱桁とこれを支える鋼製ラーメン橋脚を構造物モデルとして選定した。各諸元について使用実績の多い範囲でいくつかのモデルを考えるものとし、表-2に

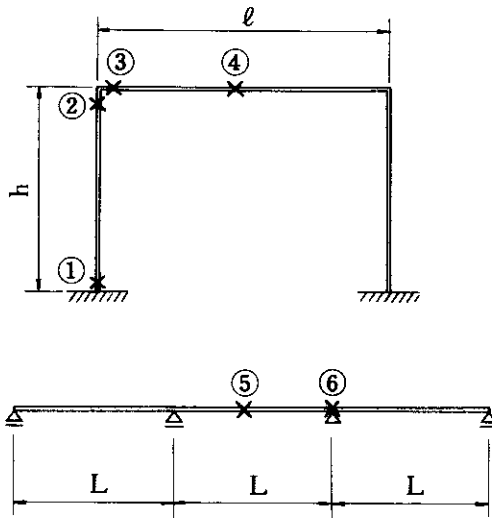


図-7 骨組モデルと着目点

示すように上部構造の支間長、橋脚の全高さおよび全幅に応じてNo.1～No.12のモデルを設定した。

図-7に示すように、骨組モデルと着目点を設定し、主として橋脚のモデルを用いた。

鋼製橋脚では地震荷重と温度荷重が同時に作用する橋軸直角方向面内の挙動を考えた。また、各構造物の断面ごとに部材の断面積を求め、これに鋼材の単位体積重量と部材長を乗じて集計し、概算鋼重を算出した。

なお、橋脚のモデルについては、表-1に示したCase-0～Case-7の荷重とCode-1～Code-4の設計荷重組合せのすべてを考え、上部工のモデルについては温度荷重と地震荷重が作用しないため、Case-0～Case-1とCode-1のみを対象にした。

2-2-2 構造解析上の仮定

構造解析にあたって、次の仮定を用いた。

- (1) 各部材は補剛材を有しない箱断面とし、着目点ごとに一樣な断面とする。
- (2) 箱断面の上下縁が σ_y に達した時を部材の終局限界と見なし、座屈を考慮しない。
- (3) 橋脚については梁と柱の剛比を構造物モデルごとに確定値とする。

表-2 構造物モデルの諸元

| 構造物 No. | 支間長 L | 橋脚全高 H | 橋脚全副 B | 橋脚高さ h | 橋脚幅 ℓ | 単位 (m) | | |
|------------|----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|----------|---------|
| | | | | | | 梁柱厚さ a | 梁高さ b | 柱幅 c |
| 1 | 40.0 | 10.0 | 20.0 | 9.17 | 18.50 | 2.00 | 1.67 | 1.50 |
| 2 | 40.0 | 10.0 | 30.0 | 8.75 | 28.00 | 2.00 | 2.50 | 2.00 |
| 3 | 40.0 | 20.0 | 20.0 | 19.17 | 18.00 | 2.00 | 1.67 | 2.00 |
| 4 | 40.0 | 20.0 | 30.0 | 18.75 | 27.50 | 2.00 | 2.50 | 2.50 |
| 5 | 60.0 | 10.0 | 20.0 | 9.17 | 18.50 | 3.00 | 1.67 | 1.50 |
| 6 | 60.0 | 10.0 | 30.0 | 8.75 | 28.00 | 3.00 | 2.50 | 2.00 |
| 7 | 60.0 | 20.0 | 20.0 | 19.17 | 18.00 | 3.00 | 1.67 | 2.00 |
| 8 | 60.0 | 20.0 | 30.0 | 18.75 | 27.50 | 3.00 | 2.50 | 2.50 |
| 9 | 80.0 | 10.0 | 20.0 | 9.17 | 18.50 | 4.00 | 1.67 | 1.50 |
| 10 | 80.0 | 10.0 | 30.0 | 8.75 | 28.00 | 4.00 | 2.50 | 2.00 |
| 11 | 80.0 | 20.0 | 20.0 | 19.17 | 18.00 | 4.00 | 1.67 | 2.00 |
| 12 | 80.0 | 20.0 | 30.0 | 18.75 | 27.50 | 4.00 | 2.50 | 2.50 |

3. 荷重係数の試算と設計法の比較

3-1 荷重係数の試算

今回の検討では、部材の終局限界状態のみを考えることにした。目標とする終局限界状態確率は、現行設計法による結果を基に工学的に判断して耐用年数50年で 10^{-3} と 10^{-5} の2ケースを設定した。前者に比べて後者はやや安全側の設定であり、その違いが得られる荷重係数や概算鋼重に与える影響を比較することにした。

まず、橋脚のモデルについて、荷重係数を算定するにあたってなるべく未知変数の個数を少なくするために、次の3ケースに区分して試算した。

a) 常時と地震時の検討：

Code-1とCode-3のみを用いる場合

b) 温度時と地震時の検討：

Code-2とCode-3のみを用いる場合

c) 温度荷重と地震荷重との組合せの検討：

Code-1とCode-4のみを用いる場合

いずれの場合にもそれぞれ2つの死荷重係数が含まれるが、ここではそれらと同じ値に設定した。得られた荷重係数についてはそれぞれ次のような結果となり、これをまとめて表-3に示す。

なお、上部工のモデルについてCode-1を用いて試算したところ、表-3の結果と良く一致した。したがって、表-3は上部工と橋脚のモデルに共通な結果と考えられ、次のことが明らかになった。

(1) 死荷重強度が設計死荷重に等しい場合と設計死荷重より大きい場合の比較では、前者の死荷重係数が1.00、後者のそれが1.05となり上部工死荷重の設定値に等しい結果となった。

(2) 活荷重係数は、目標値 10^{-3} と 10^{-5} に対してそれぞれ約1.20と1.30となったが、これは活荷重のみの50年最大値分布から求めた超過確率値と設計荷重値との比に近い値となった。

(3) 地震荷重係数は、目標値 10^{-3} と 10^{-5} に対して死荷重が設計死荷重に等しい場合と設計死荷重より大きい場合でやや異なり、前者の場合には約2.30と3.35、後者の場合には約2.45と3.55となった。いずれも、目標値が 10^{-3} から 10^{-5} へ変化すると荷重係数の値が、50%程度大きくなり、地震荷重のみの50年最大値分布の超過確率値の変化幅と良い相関が見られた。しかし、超過確率値に対して荷重係数の方が9~10%程度大きく、これは死荷重のみならず活荷重による慣性力をも実荷重としての地震荷重の中に見込んだためと考えられる。

(4) 活荷重や地震荷重と組合せ場合の温度荷重の荷重係数は非常に小さく、設計荷重の組合せとして温度荷重を入れる必要性の少ないことを示唆している。つまり、地震荷重や活荷重と温度荷重とが組合せられて最大値となるような場合には、活荷重あるいは地震荷重が最大となる状態が支配的となる。さらに、目標値が 10^{-3} から 10^{-5} へと小さくなるにつれて温度荷重係数が小さくなった。

(5) 以上の結果を総合的に見ると、各荷重の最大値を同時に組合せて設計照査する必要が少ないことを意味しており、本研究の結果では温度荷重を無視して、活荷重もしくは地震荷重のみで照査すれば良いことが示された。しかしながら、これらの結果は実荷重のモデル化のあり方に大きく依存するものであり、本研究の温度荷重のモデル化がやや過小評価であったとも考えられる。

(6) 解析の簡略化のために、3つのケースに分け

表-3 得られた荷重係数による設計照査式

| 組合せケース | 目標値 $P_f^* = 10^{-3}$ | $P_f^* = 10^{-5}$ |
|--------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Code-1 | $\sigma_y \geq \alpha_D \cdot 1.05D^* + \alpha_L 1.20L^*$ | $\sigma_y \geq \alpha_D \cdot 1.05D^* + \alpha_L 1.30L^*$ |
| Code-2 | $\sigma_y \geq \alpha_D \cdot 1.05D^* + \alpha_L 1.15L^* + \alpha_T 0.30T^*$ | $\sigma_y \geq \alpha_D \cdot 1.05D^* + \alpha_L 1.30L^* + \alpha_T 0.05T^*$ |
| Code-3 | $\sigma_y \geq \alpha_D \cdot 1.05D^* + \alpha_E 2.45E^*$ | $\sigma_y \geq \alpha_D \cdot 1.05D^* + \alpha_E 3.55E^*$ |
| Code-4 | $\sigma_y \geq \alpha_D \cdot 1.05D^* + \alpha_T 0.25T^* + \alpha_E 2.35E^*$ | $\sigma_y \geq \alpha_D \cdot 1.05D^* + \alpha_T 0.10T^* + \alpha_E 3.50E^*$ |

て各設計荷重の組合せについて検討したが、ケース a) と c) の各 Code-1 およびケース a) と b) の各 Code-3 の各係数は結果的に等しく、各設計荷重組合せごとにその最適値を求めることができた。

3-2 支配荷重からみた設計法の比較

3-2-1 現行設計法による支配荷重

現行設計法の荷重組合せと設計安全率を用いて構造物を設計し、着目点の断面決定を支配する設計荷重の組合せケースおよび概算鋼重を表-4 のように得た。

これによると、着目点①(柱下端)が Code-2 か Code-3、つまり温度時か地震時のケースによって断面が決定しており、その他の着目点では Code-1 の常時によって決定している。わずかに、構造物 No.7 と No.11 の着目点③が Code-3 によって決定しているが、その場合でも Code-1 の結果と比較すると大差はない。さらに、温度+地震時の組合せである Code-4 によって断面が決定している着目点は無く、ここで対象としている構造物と着目点とに限定するならば、結果的に Code-4 の荷重組合せケースを設計照査に用いる意味は無いことになる。つまり、Code-1 ~ Code-3 のみを用いて設計すれば良いことになる。ただし、このことが Code-4 の設計荷重組合せに対応する実荷重の組合せケース、すなわち表-1 の Case-6 や Case-7 といった組合せが構造物の安全性に意味を持たないということではないし、荷重係数体系の設計照査式における Code-4 が構造物設計に意味を持たないということでもない。あくまで、現行設計法に規定されている Code-4 の設計安全率や割増し率に対して考察しうるものである。

3-2-2 荷重係数法による支配荷重

表-3 の荷重係数設計法を用いて構造物を設計し、各着目点の断面決定を支配する設計荷重の組合せケースおよび概算鋼重を表-5 のように得た。

これによると、着目点①~③においては Code-3 や Code-4、つまり地震荷重を含むケースに

よって断面が決定しており、しかも橋脚高さが低く、かつ橋脚幅が大きい構造物 No.2、No.6、No.10 では温度+地震時の Code-4 が支配的となり、その他では Code-3 が支配的となっている。また、着目点④においては、Code-1 または Code-2 によって断面が決定している。橋脚高さが低い構造物は温度時で、また橋脚高さが高い構造物は常時の組合せケースがそれぞれ支配的となって、普通に予測される組合せケースが順当に支配荷重となっていることがわかる。表-4 の現行設計法

表-4 現行設計法による構造物

| 構造物 No. | 支配的な設計荷重ケース | | | | 概算鋼重 W (ton) |
|---------|-------------|---|---|---|--------------|
| | ① | ② | ③ | ④ | |
| 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 42.9 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 90.3 |
| 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 55.4 |
| 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 96.8 |
| 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | 59.7 |
| 6 | 2 | 1 | 1 | 1 | 123.8 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 1 | 77.5 |
| 8 | 3 | 1 | 1 | 1 | 133.1 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 1 | 78.3 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 1 | 160.4 |
| 11 | 3 | 1 | 3 | 1 | 102.1 |
| 12 | 3 | 1 | 1 | 1 | 172.8 |
| 合計 | | | | | 1193.1 |

表-5 荷重係数法による構造物

| 構造物 No. | 支配的な設計荷重ケース | | | | 概算鋼重 W (ton) | |
|---------|-------------|---|---|---|-------------------|-------------------|
| | ① | ② | ③ | ④ | $P_f^* = 10^{-3}$ | $P_f^* = 10^{-5}$ |
| 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 38.6 | 46.6 |
| 2 | 4 | 4 | 4 | 2 | 60.9 | 67.4 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 78.3 | 103.3 |
| 4 | 3 | 3 | 3 | 1 | 97.2 | 119.5 |
| 5 | 3 | 3 | 3 | 2 | 54.9 | 66.3 |
| 6 | 4 | 4 | 4 | 2 | 85.0 | 94.1 |
| 7 | 3 | 3 | 3 | 1 | 110.0 | 144.9 |
| 8 | 3 | 3 | 3 | 1 | 135.2 | 166.1 |
| 9 | 3 | 3 | 3 | 2 | 73.2 | 88.4 |
| 10 | 4 | 4 | 4 | 2 | 111.6 | 123.6 |
| 11 | 3 | 3 | 3 | 1 | 145.4 | 191.5 |
| 12 | 3 | 3 | 3 | 1 | 177.1 | 217.4 |
| 合計 | | | | | 1167.5 | 1429.3 |

による場合と比べると、この結果では Code-1 ~ Code-4 のすべてが出現しており、不必要な設計荷重の組合せケースは存在しない。ただし、前記したように活荷重や地震荷重と組合せる温度荷重の影響は小さく、この場合にも Code-1 と Code-2 あるいは Code-3 と Code-4 との差は非常に小さい。また、前者では着目点②と③において、主として Code-1 が支配的であるのに対して、後者では Code-3 や Code-4 が支配的となっており大きな変化が見られる。

3-2-3 実荷重と設計荷重との対比による比較

設計された部材の限界状態確率を支配する実荷重の組合せケースを見ると、まず現行設計法で設計された構造物においては、図-8 に示すように着目点①~③では Case-4 や Case-6 が支配的となり、着目点④では Case-1 や Case-3 が支配的となった。

前述のごとく、着目点①の断面決定では Code-2 や Code-3 が支配的となっており、Code-3 と Case-4 は対応しているものの、Code-2 と Case-6 とは荷重組合せが対応していない。さらに、着目点②と③では Code-1 が支配的となったのに対して、実荷重では地震荷重を含むケースが支配的となっており、明らかに異なる荷重組合せがそれぞれ設計と実態荷重とを支配している。また、着目点④ではそれぞれ支配する荷重組合せは対応しているものの限界状態確率は近似的にゼロに等しいという結果となった。

次に、荷重係数法で設計された構造物においては、支配的な実荷重ケースの傾向は図-8 の結果と類似しており、着目点①~③では Case-4 や Case-6 が、着目点④では Case-1 や Case-3 が支配的となった。このことは、部材の断面定数にかかわらず荷重の作用状況によってその断面力の大きさが決まることを意味し、言い換えれば構造物にとって支配的な実荷重の組合せケースは、構造物の形状や規模および荷重の特性によって決まっていると考えてよい。したがって、設計荷重

および実荷重の支配的な組合せケースと対比すると荷重係数設計法による場合には両者が良く一致し、この点で現行設計法に比べてより適切な設計をもたらすものと言える。

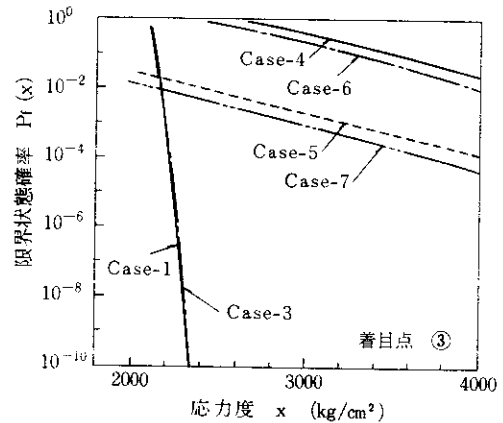


図-8 現行設計法による構造物の限界状態確率

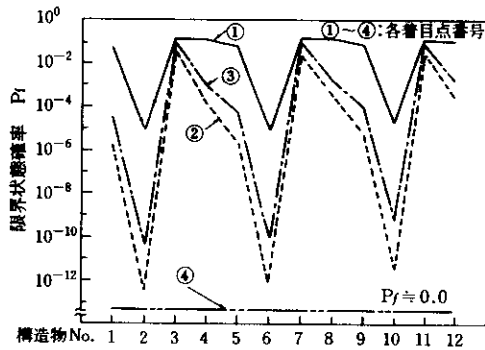
3-3 構造物の安全性からみた設計法の比較

3-3-1 現行設計法による構造物の安全性
終局限界状態である降伏強度 $\sigma_y = 3600 \text{ kgf/cm}^2$ において、それぞれの設計法による構造物の限界状態確率を求めると図-9 のようになった。現行設計法では構造物および着目点によって非常に大きなばらつきがあり、構造物の安全性という点で均等になっていない。

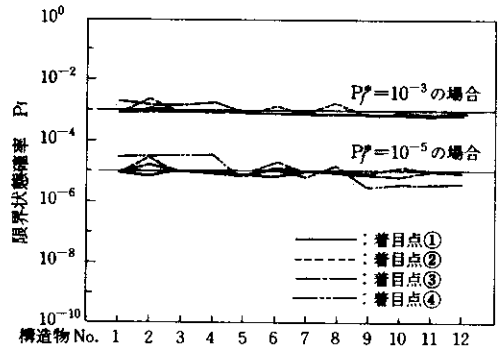
3-3-2 荷重係数法による構造物の安全性
荷重係数法による構造物あるいは着目点間の限界状態確率が非常に均等化したことが明白である。すなわち、前述した荷重係数体系による設計法の合理性が具体的な数値を用いて示されたと言える。

3-3-3 概算鋼重の対比による比較

安全性レベルの大小に表わす一つの目安として概算鋼重に着目し、その総計で両設計法を比較した。表-4 と表-5 の結果からわかるように、現行設計法は 10^{-3} のレベルに相当している。さらに、



(1) 現行設計法による場合



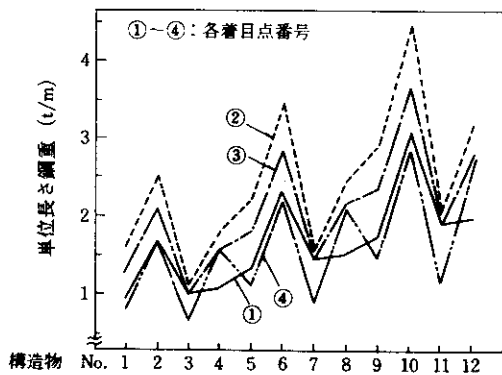
(2) 荷重係数法による場合

図-9 各設計法による限界状態確率の比較

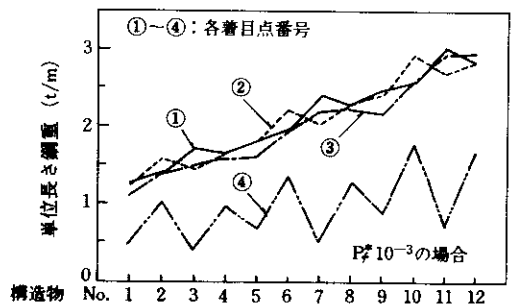
これを単位長さあたりの鋼重で比較すると、図-10に示すように現行設計法による構造物間のばらつきに比べて、荷重係数法によるばらつきは、比較的小さくなっており、概算鋼重においても構造物の均等化が見られる。このように、現行設計法では構造物の安全性の面のみならず、経済性の面においても合理化すべき問題点のあることがわかる。なお、 10^{-3} と 10^{-5} の比較では、前者に比べて後者の方が概算鋼重でみると平均的にみて約20%の増となった。

4. 考察

この研究では、具体的な荷重係数を算定するための方法論を開発するとともに、実際の構造物と荷重のモデルを用いてその試算例を提示した。具体的な数値によって現行設計法の不合理さを示し、荷重係数法によれば構造物の安全性レベルが均等化するとともに、経済性においても効果的な設計が可能となることを示した。勿論、このような検討過程の中にはいくつかの重要な仮定や問題点を含んでおり、この研究の結果が直ちに実用的な荷重係数を提供するものではないが、一連の考え方と方法論的な開発によって、今後、荷重係数法を導入する上で有効な示唆を得たと思われる。



(1) 現行設計法による場合



(2) 荷重係数法による場合

図-10 各設計法による単位長さ鋼重の比較

5. 今後の課題

この研究の方法や考え方にはいくつかの仮定を含んでおり、また一つの考え方を提示するものであって、今後次の点について検討すべきものと考えられる。

① 本研究の最適化規範によれば、目標とする限界状態確率を超過する構造物が必ず出現するが、このような点は構造物の安全性から見て必ずしも最適とは言えない。したがって、限界状態確率の上限值を設定するような考えについても検討する必要がある。

② 荷重組合せを考慮した構造物の信頼性評価では、結局の所、用いる荷重モデルの特性におとしく左右される。個々の荷重について実態荷重特性をより正確にモデル化するとともに、荷重組合せを行ううえでさらに工夫が必要と考えられる。たとえば、活荷重や温度荷重ではそれらの荷重を単独に見る場合と、地震荷重と組合せる場合とは異なる荷重モデルを使い分ける必要があろう。

③ 実荷重の組合せケースに対して、考慮すべき設計荷重の組合せケースをどのように設定すべきかを検討する必要がある。たとえば、現行の設計では活荷重と地震荷重の組合せを規定していないが、阪神高速道路のように渋滞が頻繁におこる場合にはこのような組合せについても考える必要があろう。

④ 照査式の中で、全体係数と荷重係数とに分けて考える必要があると考えられる。

あとがき

この研究にあたり終始有益な御討議を賜った、阪神高速道路公団設計荷重委員会（委員長：小西一郎京都大学名誉教授）の委員各位に深謝の意を表します。特に、Columbia大学篠塚正宣教授には、この研究の技術的な面の開発において多大な御指導を賜った。また、解析にあたり総合技術コンサルタントの久保、明田両氏の協力を得た。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 江見, 中島, 石崎; 活荷重実態調査報告, 阪神高速道路管理技術センター, 技術第三号, 昭和58年
- 2) 江見, 中島, 山内; 実態活荷重のモデル化とシミュレーションによる応答解析, 阪神高速道路管理技術センター, 技報第四号, 昭和59年
- 3) 江見, 中島; 阪神高速道路の設計風荷重, 阪神高速道路管理技術センター, 技報第四号, 昭和59年
- 4) 江見, 杉山, 北沢, 堀江; 実態荷重からみた現行構造物の安全性の検討, 阪神高速道路管理技術センター, 技報第六号, 昭和61年
- 5) 江見, 北沢, 堀江; 阪神高速道路における設計活荷重と衝撃荷重の考え方, 阪神高速道路管理技術センター, 技報第六号, 昭和61年
- 6) 設計荷重委員会報告書, 第1編～第4編, 昭和59年3月
- 7) 設計荷重委員会報告書, 昭和61年12月
- 8) 日本道路協会, 限界状態設計法分科会荷重検討班第一次報告書, 昭和61年11月
- 9) BSI, British Standard 5400, 1978
- 10) MTC, Ontario Highway Bridge Design Code, 1983
- 11) 土木学会, 昭和61年度制定コンクリート標準示方書, 昭和61年1月