

石川工業高等専門学校 正会員 ○出村穂典
名古屋大学工学部 正会員 松尾 穂

1. まえがき 本研究は、橋梁の設計規準における現行安全率を信頼性設計の概念を用いて照査することとを目的としている。現行の安全率の決定には次のような問題点があると考えられる。(1) 各種の不確実な要因の安全性に及ぼす影響や、安全性と経済性の関係が定量的に取扱われていない。(2) 橋梁構造物は各種の部材より構成されている。現行設計法では、部材や破壊モード、作用荷重毎に安全率が設定され、各部材が所定の安全性水準を満たしておれば、構造物全体の安全性も満足しているとしている。ところが、各部材により、設計式の精度、作用荷重や部材強度の力学的・統計的特性、破壊が生じたときの影響度などが異なり、また反面、部材相互間、部材と構造物全体の間には構造的・機能的な関連性もある。現行設計法では、このような相違点、関連性を定量的に評価して各部材の安全率を設定するための基本的な考え方や手続きが不明確である。(3) 使用実態の調査によれば、損傷事例の多い部材と少ない部材があり、安全性の水準にアンバランスが見られる。

本研究は、それぞれの部材の使用実態をフィードバックし、且つ適合性のとれた安全率の最適決定法について、信頼性設計の立場より検討し、その手法を用いて得られた安全率と現行安全率と比較する。ここでは、橋台の側方移動に対する安全率の、主桁との関連を考慮した最適な決定法について考察する。

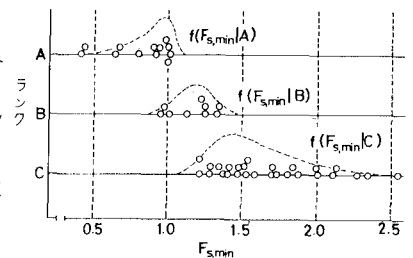
2. 損傷事例の逆解析 橋台が背面盛土の偏載荷重により側方に移動し、支承が破壊したり、伸縮継手が密着する損傷事例が多く発生している。側方流動の定量的な把握は難しく、各機関では損傷事例を収集し、その中から支配的な要因を抽出し、その要因の組み合わせによる判定指標や基準を提案している(表-1参照)。日本道路公団では、損傷事例をA, B, Cにランク分けし、各ランクと橋台形式や盛土高さ、杭列数、フレロードの有無、軟弱地盤厚の厚さ、一軸圧縮強度 q_u 値などの関係を数量化し類により解析し、影響の大きい要因を組み合わせている(Aランク: 施工時に橋台形式の変更、支承・継手の補修を必要とする, Bランク: 伸縮継手が密着, Cランク: 移動が生じないが機能的に問題がない)。建設省では、地盤支持力に対する安定係数に、盛土高さ、軟弱地盤厚などの地盤条件の他に、基礎の根入れ深さ、杭列数などの構造条件も加えている。また首都高速道路公団では、円弧すべり法による安全率と計算沈下量の2つに基準を設けている。このような判定指標や基準は、各ランクを明確に識別しているとともに、力学的な裏付けがあれば設計への適用に有用である。

本研究では、側方流動に対する安全性は、円弧すべり法による安全率 $F_{s,min}$ によって相似的に表現できるとし、以下のような点に留意し、 $F_{s,min}$ による各ランク(日本道路公団と同様)の識別を試みた。(1) フレロードが施工されている橋台は、圧密による強度増加も考慮する。強度増加率 $m=0.3$ とする。(2) S.C.P(サンドコンパクション・マイル工法)が施工されている地盤は、複合地盤として砂杭の強度も考慮し、応力分担比 $\eta=3.0$ 、砂杭の内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ とする。(3) 損傷は、橋台施工中または竣工直後に生じるものとし、長期経過後の損傷事例は解析から省く。(4) 円弧すべりの安全率 $F_{s,min}$ の計算には、橋台・盛土の形状、地盤の強度の変化などもなるべく正確に組み入れる。

各ランクの $F_{s,min}$ の分布の解析結果を図-1に示す。 $F_{s,min}$ による損傷のランク分けは他の機関によっても行

表-1 各機関の判定基準

日本道路公団
指標 $F = \frac{C}{r \cdot h} \cdot \frac{1}{D}$
判定基準 $F > 4.0$ 無対策 $F < 4.0$ フレロード工法, その他対策工
建設省
指標 $I = H_1 \times H_2 \times H_3 \times \frac{r \cdot h}{C}$
$H_1(\frac{D}{r})$: 軟弱層比に与える補正係数
$H_2(\frac{h}{D})$: 基礎体積比に与える補正係数
$H_3(\frac{D}{r})$: 軟弱層厚さの補正係数
判定基準 $I \geq 1.5$ 無対策 $I < 1.5$ 対策工実施を要する
首都高速道路公団
指標 $\left\{ \begin{array}{l} \text{円弧すべり法} \text{の安全率 } F_s \\ \text{軟弱地盤厚 } h \text{ の計算に考慮する} \end{array} \right.$
判定基準 $F_s \geq 1.6$ 無対策 $F_s < 1.6$ 対策工実施を要する
C(r, h): 安定係数, D: 軟弱地盤厚, η : 応力分担比, B: 橋台幅, A: 橋台長さ

図-1 $F_{s,min}$ のランク別分布

なわけてゐるが、明確に分離されてゐない。本研究では、B.C.P.が施工されてゐる地盤は、砂杭の強度も含め、またフーロードが施工されてゐる場合は、圧密による強度増加も考慮しているために分離が比較的明確に存、たとえられる。

3. 最適安全率決定システム 橋台の側方移動による上部構造への影響としては、ブルーノの損傷、すなわち伸縮継手の定着による主桁に発生する温度応力の影響が考えられる。ブルーノの損傷は、橋台の施工時に生ずるために、上部構造とは構造的な関連はなく、橋台の施工のやり直しにともなう工期の遅延などの機能的な関連からくる影響のみであると考えられる。ブルーノの損傷は工学的に問題はないので影響は無視できる。

そこで、上部構造との関連を考慮した安全率の決定のために、

図-2のようなシステムを考える。その基本的な考え方は、信頼性設計の概念により、上部・下部構造を合せた構造物全体の期待総損失量が最小となるように安全率を決定する。使用実績の評価は、上部構造の場合、不確定な要因を荷重に関する要因 S 、部材強度に関する要因 R 、その他の要因 K に分け、 K の分布の母数 θ_K を未知とし、未知母数 θ_K を、多くの同種の構造物の破壊・非破壊の使用実績より統計的に推定する。また下部の場合、各種の不確定な要因を $F_{S,mi,n}$ により、まとめて表現し、 $F_{S,mi,n}$ を確率変数とし、各ラングの $F_{S,mi,n}$ の分布を決定に組み入れる。

決定に用いられる期待総損失量 $E[C_T(r, F_{s, \min})]$ は次式で表わされる。

$$E[C_T(r; F_{S, min})] = C_{c,U}(r) + C_{c,L}(F_{S, min}) + C_{F,A} P(A|F_{S, min}) + \int C_F \cdot P(F|B, r, \theta_k) \cdot P(B|F_{S, min}) S^1(\theta_k) d\theta_k \quad (1)$$

こゝに、 $P(A|F_{S, \min})$, $P(B|F_{S, \min})$ は、 $F_{S, \min}$ が与えられた場合の損傷 A , B の生じる確率で、ベイズの定理より次式のように表わされる。

$$P(A|F_{s,min}) = \frac{P(F_{s,min}|A)}{P(F_{s,min}|A) + P(F_{s,min}|B) + P(F_{s,min}|C)} \quad \text{--- (2)}$$

また、 $C_{d,u}(t)$, $C_{d,L}(F_{S,min})$ はそれぞれ上部・下部構造の建設費を表し、 $C_{F,A}$ は、Aランクの損傷が生じた場合の損失費であり、 C_F は上部構造が破壊したとき要する費用で、現行安全率が過ぎる時点で最適に決定されたとして、逆算して求められる。 $P(F|B,t,\theta_k)$ は、橋台にBランクの損傷が生じたために上

4. 数値計算結果 図-3に示すような地盤条件の橋台について行なつた数値計算結果を表-2に示す。図-2における最適対策工法としては、この計算ではS.C.P.のみを採用している。砂置換率 A_s によつて $F_{s, \min}$ を変化させる。なお表中の費用の単位は1万円で、 $E(\cdot)$ は期待値を示している。上部構造の建設量は、通常安全率 r は1.7が用いられるので、 $r=1.7$ のときの建設量を基準にする。この結果では、 $r=1.7$ の場合も、1.8の場合も、最適安全率 $F_{s, \min}$ は1.2となり、妥当な値を示している。

5. おおび こので示した計算結果は一例にすぎなく、詳細は当日発表する予定である。

【参考文献】 1) 高速道路調査会, “軟弱地盤上の橋台基礎に関する調査研究報告書”, 2) 建設省土木研究所, “橋の側方移動力に関する研究”, 3) 首都高速道路協会, “極軟弱地盤における構造物設計法に関する調査研究”, 4) Minoru Matsuo and Hisashi Suzuki: Study on Reliability-based Design of Improvement of Clay Layer Sand Compaction Piles, SandF (to appear).

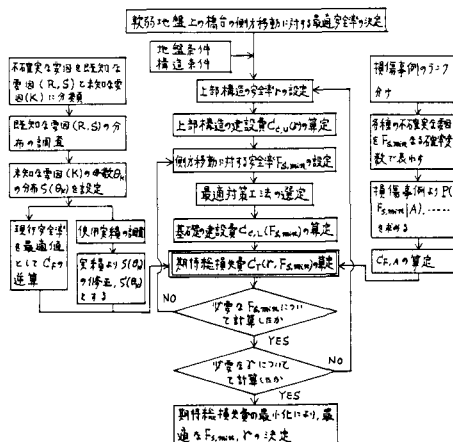


図-2 安全率の最適決定システム

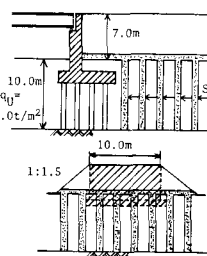


Figure 3

Table 2 Optimum $F_{S \text{ min}}$

(a) $\gamma=1.8$, $C_p=1229.0$ $\times 10^4$ Yen							
	$C_{0,0}$	$C_{0,1}$	$F_{S,\min}$	$C_{1,1}$	$E(C_{1,1})$	$E(C_1)$	$E(C_2)$
1	245.0	0.100	1.072	527.1	543.9	557.6	676.9
2	245.0	0.125	1.119	558.9	1644.0	818.0	1370.5
3	245.0	0.150	1.162	780.7	2988.7	887.1	2224.1
(4)	245.0	0.175	1.200	922.4	45.8	173.6	1087.0
5	245.0	0.200	1.234	1054.1	6.8	183.8	2149.8
6	245.0	0.225	1.264	1186.0	1.0	811.9	2243.8
7	245.0	0.250	1.293	1316.7	0.1	777.5	2340.2
8	245.0	0.275	1.320	1449.5	0.0	742.0	2435.5
9	245.0	0.300	1.343	1581.3	0.0	709.7	2536.0

(b) $\gamma=1.7$, $C_p=1864.0$ $\times 10^4$ Yen							
	$C_{0,0}$	$C_{0,1}$	$F_{S,\min}$	$C_{1,1}$	$E(C_{1,1})$	$E(C_1)$	$E(C_2)$
1	0.0	0.100	1.072	527.1	543.9	845.6	4812.7
2	0.0	0.125	1.119	558.9	1644.0	1740.7	5748.5
3	0.0	0.150	1.162	780.7	2988.7	3415.4	2437.1
(4)	0.0	0.175	1.200	922.4	45.8	193.0	2291.4
5	0.0	0.200	1.234	1054.1	6.8	1279.8	2340.8
6	0.0	0.225	1.264	1186.0	1.0	1231.4	2416.4
7	0.0	0.250	1.293	1316.7	0.1	1178.9	2496.4
8	0.0	0.275	1.320	1449.5	0.0	1125.4	2574.9
9	0.0	0.300	1.343	1581.3	0.0	1076.1	2657.8