

サイズシフトを考慮した、経年変化をもとむ構造物の設計手法の適用例

建設省 工本研究所 栗林 栄一  
 建設省 工本研究所 田崎 忠行  
 建設省 工本研究所 市川 秀樹

1. はじめに

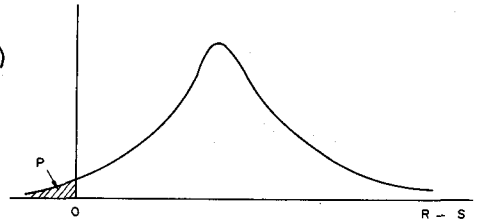
構造物を設計する際には、荷重における安全率をかけた耐荷力を有するように構造形式、材料、施工方法などを選択するのが一般である。しかしながら構造物の安全性は設計当初の予測とは異なり、材料強度のばらつき、製作精度のばらつき、解析上の不確定要因、外力の不確定要因などによってあるばらつきを持つものである。特に地震に対する安全性を対象とした場合、大きな地震動強度をもつ地震の発生する確率は数的に減少しはするが、設計において考慮した地震動強度を上回るような地震が発生する確率は0にはならない。又、有史以来のすべての地震に対して絶対に破壊しないような構造物を作ることは、経済性の見地から、社会の要求と必ずしも合致することにはならないであろう。ここでは、構造物が破壊する確率が与えられた場合の構造物の設計手法の適用例について述べるものである。

2. 破壊する確率

構造物の耐震強度をR、地震による荷重強度をSとすると、構造物が限界状態、即ちR<Sとなるような確率Pは次式で与えられる。

$$P = P_r [R < S] = \int_0^{\infty} F_R(x) \cdot f_S(x) dx \quad \text{----- (1)}$$

ここで  $P_r [R < S]$  : R < Sとなる確率  
 $F_R(x)$  : Rの累積分布関数  
 $f_S(x)$  : Sの確率変数



ここで  $f_S(x)$  を一定期間  $t$  (例えば一年間) に発生する地震による荷重強度の確立変数とし、 $R$  は、材料強度、製作精度のばらつき、解析上の不確定要因等を無視してある一定期間  $t$  においては一定値をとるものと仮定すると、構造物の耐用期間中における通算した危険率は

$$U_0 = 1 - \prod_{t=1}^{T_0} (1 - P) \quad P = \int_R^{\infty} f_S(x) dx \quad \text{----- (2)}$$

ここで  $U_0$ : 危険率  
 $T_0$ : 耐用期間

よって、社会的に受忍される危険率  $U^*$  というものが存在するとすれば

$$U_0 = U^* \quad \text{----- (3)}$$

を満足するように構造物を設計すればよいことになる。

ここで  $U^*$  を橋梁を例にとり、過去の地震における被害程度は受忍されるとして求めてみる。表-1は、関東地震以降に落橋した橋梁の数を示している。構造物の破壊を落橋には至らなくとも、機能の低下まで含めて考えると、新潟地震においては、破壊された橋梁数は次のように推定される。

$$( \underset{3}{\text{}} \geq 20\text{mの落橋数} ) + ( \underset{13}{\text{}} \geq 20\text{mの機能が低下した橋数} ) \times \frac{4019}{609} \quad ( \text{昭和39年末現在の新潟県に存在する} \geq 20\text{mの橋数} = 107 \text{橋} )$$

関東地震以降に落橋ないし機能低下した橋梁数は次のように推定される。

$$22 \times \frac{107}{3} = 785 \text{橋}$$

関東地震以降の全道路における平均橋数は375,000橋と推定されるので、この期間内における橋梁の被害を受け確率を、通常橋梁の耐用期間と考えられている50年に換算すると

$$\frac{785}{375,000} \times \frac{50}{51} = 2.1 \times 10^{-3}$$

よって、これ以降は $U^* = 2.1 \times 10^{-3}$ として議論を進めることにする。

3. 新設橋に対する適用例

新設橋については、 $U_0 = U^*$ を満足するように設計強度を設定したうえで、耐用期間中における全費用が最小となるようにすればよい。ここでは、全費用として耐用期間の途中において強度を引き上げるような補強をする費用まで含めて次のように仮定した。

$$C = C_c + C_R + C_F \longrightarrow \text{Min} \text{-----(4)}$$

ここで C: 全費用     $C_c$ : 建設費     $C_R$ : 補強費     $C_F$ : 破産損失による費用

$C_c, C_R, C_F$ は次のように仮定した。

$$C_c = C_{c0}(1 - c \log U_0) \text{-----(5)}$$

$C_{c0}, c$ : 定数,  $U_0$ : 耐用期間中に補強がないと仮定したときの危険率

$$C_R = \alpha \sum \{C_c(R + \Delta R) - C_c(R)\} \text{-----(6)}$$

$\alpha$ : 定数,  $N$ : 補強回数,  $\Delta R$ : 補強強度,  $C_c(R + \Delta R), C_c(R)$ : 強度 $R + \Delta R, R$ の構造物の建設費

$$C_F = (C_{F0} + mC_c)U_0 \text{-----(7)}$$

$C_{F0}, m$ : 定数

一方、地震動の震度 $I_{JMA}$ と1年間に $I_{JMA}$ を超過する確率 $P$ との関係を、震度の大きい地震に着目して

$$\log P = 3.24 - 0.87 I_{JMA} \text{-----(8)}$$

と仮定した。地震動の震度 $I_{JMA}$ と応答加速度 $A_R$ の間には次のような関係がある。

$$A_R = 7.92 \times 10^{0.25 I_{JMA}} \text{ (gal)} \text{-----(9)}$$

よって $R = A_R$ のような構造物は、 $P$ という破産確率を持つと一応考えられる。 $R$ として、材料の劣化、腐食、疲労等による経年変化も考慮して、当初の強度 $R_0$ の75%になるという極端な例をとる。

$$R(t) = R_0 \{0.15 \log(51 - t) + 0.75\} \text{-----(10)}$$

(8)式と(9)式を等しいとしたときの $I_{JMA}$ を(7)式に代入し、これを(2)式に代入すると

$$U_0 = 1 - \prod_{t=1}^T \{1 - 2.34 \times 10^6 \times R(t)^{3.48}\} \text{-----(11)}$$

完成してから $T$ 年後に $\Delta R$ の補強を行なう場合には

$$U_0 = 1 - \prod_{t=1}^T \{1 - 2.34 \times 10^6 \times R(t)^{3.48}\} \prod_{t=T+1}^T \{1 - 2.34 \times 10^6 \times \{R(t) + \Delta R\}^{3.48}\} \text{-----(12)}$$

表-2には $U_0 = 2.1 \times 10^{-3}$ を確保するため、完成後の補強をしない場合および10, 20, 30, 40年後に補強する場合の全費用が示してある。ここでは利子率である。

4. 既設橋に対する適用例

橋梁の耐荷力を引き上げるといった意味での補強を行なうのは、材料の劣化等による耐荷力の減少を補うという場合のほか、学問の進歩によって荷重と耐荷力の関係がより一層明確となり、耐荷力の基準が引き上げられるという場合に実施される例も多い。この場合には補強以後の全費用として次のものをとった。

$$C' = C_R + C_F \longrightarrow \text{Min}$$

表-3には橋梁完成後 $T$ 年間は従来の基準即ち耐用期間中における危険率が $U^* = 2.1 \times 10^{-3}$ に従い、 $T$ 年以降は耐用期間に換算した危険率が $U_2^*, U_3^*, U_4^*$ になったときの全費用が示してある。

以上までの議論は、構造物の耐荷力は補強によって十分に上昇せよということ为前提条件であるが、実際の既設の構造物のなかには十分な補強をするためには莫大な費用を必要とし、場合によっては改築の方が経済

的なこともある。このような場合は、構造物が完成してからの経過期間において被害が生じなかったという実績を考慮して、(2)式における $T$ の替わりに構造物が完成してからの経過した期間を $T$ として、 $T_0 - T$ を入れて求めた $U$ が一定の水準を保っていけばよいという考えもあろう。

$$U = 1 - \prod_{t=1}^{T_0-T} (1-P) \text{-----(13)}$$

$$U = U^* \text{-----(14)}$$

図-1において、構造物A、Bは危険率が一定の水準を下回らないので特に問題はない。一方構造物Cについては危険率が $U^*$ を上回っているので補強が必要である。この場合、補強すべき強度として上記の考え方をとれば基準強度をとる必要はなく、余命期間( $T_0 - T$ )における危険率が一定水準を下回らないようにすればよい。

### 5. 結論

- (1) 新設構造物については、利率 $=0$ の場合は補強の有無による全費用の差はみられない。利率 $=0.10$ になると補強を実施した方が全費用は若干小さくなる。
- (2) 既設構造物については、社会的に受忍さうる危険率が小さくなった場合、この計算例では破壊損失による費用が小さかったため、補強するよりも、補強しないで放置した方が全費用が小さくなるという結果になった。同じ補強をする場合には、補強時期が早いほど全費用が小さい。補強費用と補強をすることによる破壊損失の減少との比( $C_f - C_f^0 / C_r$ )即ち補強の効率は、補強時期が早いほど大きい。
- (3) 既設の構造物で、耐用期間における危険率を一定水準に保つことが不可能ほど耐荷力の小さいものについては、余命期間において危険率が一定水準を下回らないという考え方もあろう。

### 6. 参考文献

- 1) 大正12年関東大地震被害調査報告(第3巻) 橋梁建築の部 土木学会 昭和24年
- 2) 土木研究所資料第256号 南海地震および福井地震による橋梁基礎被害残存資料 昭和43年12月
- 3) 福井震災誌 福井県 昭和24年6月
- 4) 昭和39年新潟地震の被害調査報告 土木学会新潟震災調査委員会編 昭和41年6月
- 5) 市原、栗林、田崎：地震対策における構造物の耐震性向上の計画手法, UJNR第8回合同部会, May, 1976
- 6) 栗林、若崎: Observed Earthquake Responses of Bridges, 第41回世界地震工学会議論文集(Proc. of 4. WCEE) 1969年1月

TABLE 1 DESTROYED BRIDGES AFTER KANFO EARTHQUAKE

EARTHQUAKE	DATE	NUMBER OF DESTROYED BRIDGES
KANTO	1923. 9. 1	8
NANKAI	1946. 12. 21	1
FUKUI	1948. 6. 28	10
NIIGATA	1964. 6. 16	3
TOTAL		22

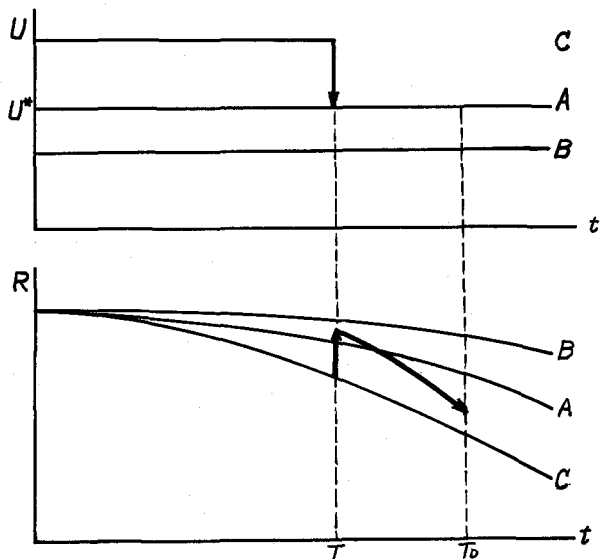


Fig. 1 RESISTIVITY AND CUMULATIVE PROBABILITY OF FAILURE OF EXISTING STRUCTURES.

TABLE 2. TOTAL COSTS OF BRIDGES ( UNIT: $\times C_{C0}$  )

$R_0$	$\Delta R$	$C_c$	$C_R$	$C_F$	$C(\gamma=0.00)$	$C(\gamma=0.05)$	$C(\gamma=0.10)$
WITHOUT RETROFITTING							
1302	——	1.110	0.000	0.004	1.114	1.114	1.114
RETROFITTING AFTER 10 YEARS							
1223	96	1.106	0.010	0.004	1.120	1.114	1.111
1233	83	1.106	0.009	0.004	1.119	1.114	1.111
1243	71	1.107	0.007	0.004	1.118	1.114	1.112
1253	58	1.107	0.006	0.004	1.117	1.114	1.111
1263	46	1.108	0.005	0.004	1.117	1.113	1.111
1273	34	1.108	0.004	0.004	1.116	1.113	1.112
1283	22	1.109	0.002	0.004	1.115	1.113	1.111
1293	10	1.109	0.001	0.004	1.114	1.113	1.111
1302	0	1.110	0.000	0.004	1.114	1.113	1.111
RETROFITTING AFTER 20 YEARS							
1223	125	1.106	0.013	0.004	1.123	1.112	1.108
1233	108	1.106	0.012	0.004	1.122	1.112	1.108
1243	91	1.107	0.010	0.004	1.121	1.112	1.109
1253	75	1.107	0.008	0.004	1.119	1.112	1.109
1263	59	1.108	0.006	0.004	1.118	1.112	1.110
1273	43	1.108	0.005	0.004	1.117	1.112	1.110
1283	28	1.109	0.003	0.004	1.116	1.112	1.110
1293	13	1.109	0.001	0.004	1.114	1.112	1.110
1302	0	1.110	0.000	0.004	1.114	1.111	1.110
RETROFITTING AFTER 30 YEARS							
1223	189	1.106	0.020	0.004	1.130	1.111	1.107
1233	161	1.106	0.017	0.004	1.127	1.111	1.107
1243	134	1.107	0.014	0.004	1.125	1.111	1.108
1253	108	1.107	0.012	0.004	1.123	1.111	1.108
1263	84	1.108	0.009	0.004	1.121	1.111	1.109
1273	60	1.108	0.006	0.004	1.118	1.111	1.109
1283	38	1.109	0.004	0.004	1.117	1.111	1.109
1293	17	1.109	0.002	0.004	1.115	1.111	1.110
1302	0	1.110	0.000	0.004	1.114	1.111	1.110
RETROFITTING AFTER 40 YEARS							
1253	234	1.107	0.025	0.004	1.136	1.112	1.108
1263	170	1.108	0.019	0.004	1.131	1.111	1.108
1273	117	1.108	0.013	0.004	1.125	1.111	1.109
1283	71	1.109	0.008	0.004	1.121	1.111	1.109
1293	30	1.109	0.003	0.004	1.116	1.110	1.109
1302	0	1.110	0.000	0.004	1.114	1.110	1.110

TABLE 3. TOTAL COSTS AFTER RETROFITTING ( UNIT: $\times C_{C0}$  )

$U^*$	$\Delta R$	$C_F$	$C_R$	$C_F'$	$C_R + C_F'$	$(C_F - C_F')/C_R$
WITHOUT RETROFITTING						
$2.1 \times 10^3 \times 1$	——	0.004	——	——	——	——
RETROFITTING AFTER 10 YEARS						
$\frac{1}{2}$	96	0.004	0.025	0.002	0.027	0.074
$\frac{1}{5}$	124	0.004	0.057	0.001	0.058	0.051
$\frac{1}{10}$	151	0.004	0.082	0.000	0.082	0.040
RETROFITTING AFTER 20 YEARS						
$\frac{1}{2}$	96	0.003	0.025	0.001	0.026	0.059
$\frac{1}{5}$	124	0.003	0.057	0.001	0.058	0.040
$\frac{1}{10}$	151	0.003	0.082	0.000	0.082	0.032
RETROFITTING AFTER 30 YEARS						
$\frac{1}{2}$	96	0.002	0.025	0.001	0.026	0.042
$\frac{1}{5}$	124	0.002	0.057	0.000	0.057	0.029
$\frac{1}{10}$	151	0.002	0.082	0.000	0.082	0.023
RETROFITTING AFTER 40 YEARS						
$\frac{1}{2}$	96	0.001	0.025	0.001	0.026	0.023
$\frac{1}{5}$	124	0.001	0.057	0.000	0.057	0.016
$\frac{1}{10}$	151	0.001	0.082	0.000	0.082	0.013