

ISO2394 に基づく信頼性設計

中央大学 学生会員 ○関口 萌々子
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

今日までに、目標信頼性はどのようにして定めるべきかという議論は数多くなされてきた。しかし、この問題に対し、我々は確信のある答えを持っていないのが現状である。このような状況の中、2015年に発行された改訂版 ISO2394¹⁾では、付属書 G 目標信頼性を定めるにあたり、人命安全の最適化と規範という項目が追加されている。これは今までの ISO2394 の中で論じられてこなかった新しい内容である。具体的には、その国の 1 人当たりの GDP などの社会的な指標も構造物のもつ信頼性指標 β に反映させようということである。

現在の日本は、公共事業ばかりに多くの費用をかけられる訳ではない上に、耐用年数を超える構造物が多くある状況である。しかし、目標信頼性の定め方により、建設コストの削減や、構造物の維持管理が効率的に行えるようになる可能性がある。

そこで、本研究では 2015 年版の ISO2394 に示されている新たな概念に基づいて目標信頼性を設定し、設計を行う。そして、既存の方法で目標信頼性を設定し設計を行うことに比べてどのような違いが生じるのかを示す。また、信頼性指標 β と GDP などの社会的指標との関係性を見出すことや、GDP が比較的高くない国が地震による被害を受ける可能性がある場合、どのように目標信頼性 β を定めるべきか調べることを目的とする。

2. 研究方法

当研究室では 1998 年版の ISO2394²⁾に基づいて目標信頼性を定め、ボックスカルバートを対象に信頼性設計を行った事例を 2005 年に発表している³⁾。

本研究では 2015 年版の ISO2394 に示されている方法で目標信頼性 β を算出し、内空高さや板厚、鉄筋の径を変化させた場合の最小 β を求める。また地震力の算出方法については、先行研究では震度法を用いているが、本研究ではより地震力の影響を考慮した耐震設計を行えるようにするため、応答変位法を用いて算出した。そして、先行研究で提案されている設計案と本研究での設計案を比較する。

3. 設計方法

3.1 対象構造物

対象とする構造物は先行研究と同じく一連のボックスカルバートとする。

3.2 考慮する荷重

考慮する荷重は、頂版、底板、側板の死荷重、鉛直土圧、水平土圧、上載荷重、上載荷重による水平方向荷重、地震力の 6 種類とする。

表-1 それぞれの β に対する板厚 t とコスト

信頼性	3.1	3.7	4.2
板厚 t [m]	0.57	0.61	0.65
コスト	¥152,653	¥162,885	¥173,285

3.3 応答変位法

地震力 f は応答変位法を用いて算出する。地中構造物のように地盤の動きに構造物の動きが依存する場合、

地盤各部の相対変位に応じて構造物に外力が作用することになる。この相対変位を、地盤ばねを介して構造物に静的に作用させる方法が応答変位法である⁴⁾。ここでは地震力として、水平荷重 $P(z)$ 、周面せん断力 τ 、慣性力 P_i を考慮する。

3.4 限界状態設計法

本研究では、ISO2394 に基づき、限界状態設計法を用いて設計を行う。検討する限界状態は、曲げ破壊による終局限界状態とする。設定した内空高さ、板厚、鉄筋の直径をもとに断面内の 10 カ所の照査位置における曲げ耐力 M_u と発生曲げモーメント M_i を算出し、式(1)の限界状態関数に代入する。

$$g(x) = M_u - M_i \quad (1)$$

4. 信頼性指標 β について4.1 最小 β

断面照査位置ごとに式(1)の $g(x)$ の標準偏差と分散を求めて信頼性 β を求めた。これらの照査位置の中で最も小さい β をそのボックスカルバートの信頼性とする。また、また、最小 β が 3.1, 3.7, 4.2 になるように設計した際の板厚 t とコストを表-1 に示す。コストは建設物価 2016 年 7 月号⁵⁾を参考に算出した。この際のボックスカルバートの高さ H は 3.0m で D38 の鉄筋を頂板底板ともに 6 本ずつ使用している。

4.2. LQI に基づく目標信頼性 β

2015 年版 ISO2394/G.4.2³⁾によると社会的な支払意思額(SWTP)と統計的人命価値(SVSL)はそれぞれ式(2)と式(3)で表わされる。

$$SWTP = \frac{g}{q} \frac{de_a}{e_a} \approx \frac{g}{q} C_x dm = G_x dm \quad (2)$$

$$SVSL = \frac{g}{q} e_a \quad (3)$$

g : 国民 1 人当たりの GDP

q : 消費のための利用可能な資源と健康的な生活時間の価値との間のトレードオフの尺度

e_a : 平均年齢から平均余命をひいた値

m : 死亡率

キーワード: ISO2394, 信頼性指標, LQI

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL: 03-3817-1816

ここで、死亡率 m の低下タイプは、人命リスク低減のために施した対策の効果が年齢層によって異なる π タイプと、年齢層によらず一定の Δ タイプに分けることができる。式(2)から分かるように、社会的支払意思額(SWTP)はどちらの死亡率 m の低下タイプを選択するかによって異なる値をとる。今回は、地下構造物における耐震性を考慮した設計を対象にしているため Δ タイプのSWTPを用いて計算を行う。

2015年版ISO2394の付属書Gには、ある値 K_1 によって目標信頼性 β は表-2のように分類されると書かれている。また、 K_1 は式(4)で表わされる。

$$-\frac{dP_f(p)}{dp} \leq \frac{C_1(\gamma_s + \omega)}{g/q \cdot C_x \cdot N_F} = \frac{C_1(\gamma_s + \omega)}{G_x \cdot N_F} = K_1 \quad (4)$$

C_1 :考慮された安全対策に関する限界コスト

γ_s :社会的割引率

ω :劣化の年率

G_x :社会的支払意思額

N_F :構造的欠陥による死亡者数の期待値

この式(4)に数字を当てはめて K_1 を計算する。現在の日本では $\gamma_s=4\%$ 、 $\omega=2\%$ 、 $G_\Delta=1812000$ ドルが適用できると考える。 G_Δ は、付属書GのTable G.2を参照した。 C_1 と N_F については、対象の構造物がどのような目的のものであるかによって大きく異なるため、表-3のように12通りに場合分けしてLQIに基づく目標信頼性 β を求めた。また、 C_1 を直接知ることは困難なため、初期コスト C_0 との比を用いている。 C_0 は表-1で算出したコストを用いた。

また、GDPやSWTPが異なることが、LQIに基づく目標信頼性 β にどのような影響を与えるか調べるために、モザンビークにおけるLQIに基づく目標信頼性 β を算出した。この結果を表-4に示す。表-3と表-4における3.1↓は、計算の結果得られた K_1 が 10^{-2} よりも大きくなってしまい、表-2の範囲からはずれるがLQIに基づく目標信頼性 β は3.1よりも低くなることが予想されるということを示している。

5. 考察

表-1より、信頼性 β を3.1から3.7に、3.7から4.2に上げるのにかかるコストはそれぞれ10,232円と10,400円となった。これは信頼性 β が3.1、3.7となるようにボックスカルバートを建設したときにかかる初期コストの約7%程度であることが分かった。

例えば、表-4の C_1/C_0 が0.1と比較的大きい場合、 N_F が10人だったとしてもLQIに基づく目標信頼性 β は3.1となっている。しかし、ボックスカルバートは線状構造物であり、1ヶ所の破壊が構造物全体に致命的なダメージを与えてしまう可能性のある直列システムであるため、初期コストの1割未満のコストを上乗せするだけでレベル2地震動に対しても破壊確率を10分の1にできるとなると、信頼性を高くすることは有効であると考えられる。

表-4に示したモザンビークにおけるLQIに基づく目標信頼性 β は日本よりも1人あたりGDP、SWTPが低いいため、全体的に目標信頼性も低くなっている。ここでは、モザンビークを用いているが、表-4はモザンビークと同等の経済規模の国における目標信頼性 β を表わして

表-2 LQIに基づく目標信頼性

相対的な救命コスト	K_1	LQIに基づく目標信頼性
大	$10^{-3} - 10^{-2}$	$\beta = 3.1 (P_f \approx 10^{-3})$
中	$10^{-4} - 10^{-3}$	$\beta = 3.7 (P_f \approx 10^{-4})$
小	$10^{-5} - 10^{-4}$	$\beta = 4.2 (P_f \approx 10^{-5})$

表-3 LQIに基づく目標信頼性 β (日本)

GDP:31464ドル,SWTP:1812000ドル				
β		C_1/C_0		
		0.001	0.01	0.1
N_F (人)	0.1	3.1	3.1↓	3.1↓
	1	3.7	3.1	3.1↓
	10	4.2	3.7	3.1
	100	4.2↑	4.2	3.7

表-4 LQIに基づく目標信頼性 β (モザンビーク)

GDP:774ドル,SWTP:43000ドル				
β		C_1/C_0		
		0.001	0.01	0.1
N_F (人)	0.1	3.1↓	3.1↓	3.1↓
	1	3.1↓	3.1↓	3.1↓
	10	3.1	3.1↓	3.1↓
	100	3.7	3.1	3.1↓

いると考える。例えば、発展途上国に多く見られる、モザンビークと同等の経済規模の国が日本と同じような地震による被害を多く受ける国であるとしたら、このような信頼性を目標に構造物を作った場合、甚大な被害を受ける可能性がある。

しかし、今回の計算結果から分かるように一割未満のコストアップで3.1から3.7に、3.7から4.2に出来るとなると、地震による被害を受け易い発展途上国ならば、LQIに基づく信頼性よりも信頼性を高く設定することは妥当と言えるのではないかと考える。

6. おわりに

今後の課題としては、LQIに関する理解を深めることや、直列システムの保たれるべき信頼性について調べ、表-3や表-4の目標信頼性が妥当であるか検討する必要がある。

参考文献・出典

- 1) ISO,ISO2394, General principals on reliability for structures4thedition,2015
- 2) ISO,ISO2394,General principals on reliability for structures3rdedition 邦訳, 1998年6月
- 3) 原 麻沙子, ボックスカルバートを対象とした設計水準レベル2による信頼性設計, 土木学会関東支部技術研究発表会, 2005年3月
- 4) 農林水産省 農村振興局, 土地改良事業設計指針「耐震設計」(案), 2015
- 5) 一般財団法人 建設物価調査会, 建設物価, 2016年7月号