

空港土木施設設計への信頼性設計法導入に関する研究

吉浪康行* 藤田宗久** 伊豆太*** 松浦壽彦****

Study on Reliability-based Design for Civil Engineering Facilities in Airports

by

Yasuyuki YOSHINAMI*, Munehisa FUJITA**, Futoshi IZU*** and Toshihiko MATSUURA****

Level 1 reliability-based design was studied for RC box culverts located in airports. First, 6 box culverts were designed based on the current design code and the reliability analysis was made to the serviceability limit state with respect to the bending moment. Through the analysis, the reliability index β and the sensitivity factors α were obtained. In order to determine the partial factors, the reference values of the target reliability index shown in ISO2394 were used. Then, the reliability-based design was carried out. It was confirmed that the design results of the reliability-based design were more appropriate than those of the current design code from the viewpoint of the structural safety.

Key words: Reliability-based design, Partial factor, Box culvert, Revision of design code

1 はじめに

1996年に発効したWTOのTBT(Technical Barriers to Trade)協定を受けて、土木構造物に関する構造設計基準類の「国際標準への整合化」が推進されている。2007年には「港湾の施設の技術上の基準」¹⁾(以下、港湾基準)が改訂された。この港湾基準では、国際標準であるISO2394²⁾で規定されているレベル1信頼性設計法(部分係数形式の安全性照査法)が採用されており、今後の国内構造設計基準においても、レベル1信頼性設計法に基づく改訂が行われようとしている。空港土木施設(基本施設舗装を除く)に関しては、「空港土木施設構造設計要領及び設計例」³⁾(以下、現行基準)に基づいて各種土木施設の設計が行われている。本論文は、それらの土木施設のうち、最も一般的な地中構造物であるRCボックスカルバートを対象として、レベル1信頼性設計法を採用する場合の部分係数の設定について検討し、今後の信頼性設計法導入における知見を得ることを目的とする。

まず、6ケースの設計状況において、現行基準に基づいて試設計を行う(3章)。続いて、設計された断面の信頼性解析を行い、信頼性指標を把握するとともに、確率変数の感度係数を算定する(4章)。ISO2394を参考に目標信頼性指標を設定し、変動係数と感度係数を用いて、確率変数の部分係数の算定方法を示す。算定した部分係数を用いて、6ケースの設計状況において、レベル1信頼性設計に基づく設計を行う(5章)。これらの結果を踏まえて、現行基準とレベル1信頼性設計の設計結果について、構造安全性の観点から考察する(6章)。

2 設計条件

空港の場周道路のRC製ボックスカルバートを対象として、曲げモーメントに関する使用限界状態に着目して設計を行う。

2.1 基本設計条件

試設計を行う断面の内空寸法は、H 空港場周道路に設置されているボックスカルバートの寸法を参考にして、Fig. 1に示す通り、7.5m×5.5mと設定する。

土被り厚は、1.5m、2.5m、5.0mの3種類を考慮する。

活荷重は、航空機荷重(LA-0)とトローリングトラクター荷重(LT-1)の2種類を考慮する。航空機荷重では、土被り厚が1.5mと2.5mの場合は、荷重の衝撃作用を考慮して30%割増することとする。

各検討ケースにおける荷重による鉛直方向地中応力を、土被り厚に応じてTable Iに示す。

Table I Vertical Stress at Top Slab

荷 重	土被り H(m)	鉛直方向地中応力 (単位: kN/m ²)	検討 ケース
航空機荷重 (LA-0)	1.50	172.60	case-1
	2.50	114.74	case-2
	5.00	49.03	case-3
トローリングトラクター荷重 (LT-1)	1.50	54.9	case-4
	2.50	22.6	case-5
	5.00	10.0	case-6

+ 原稿受理 2011年4月30日 Received

* 復建調査設計(株)東京支社 〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-8-15 Fukken Co. Ltd., 3-8-15, Iwamoto-cho, Chiyoda-ku, Tokyo

** 清水建設(株)土木技術本部 〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 SHIMIZU CORPORATION, Civil Division, 1-2-3, Shibaura, Minato-ku, Tokyo

*** 国土交通省 国土技術政策総合研究所

〒239-0826 神奈川県横浜須賀市長瀬3-1-1 National Institute for Land and Infrastructure Management, 3-1-1, Nagase, Yokosuka-shi, Kanagawa

**** 港湾空港建設技術サービスセンター

〒100-0013 東京都千代田区霞が関3-3-1 Service Center of Port Engineering, 3-3-1, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo

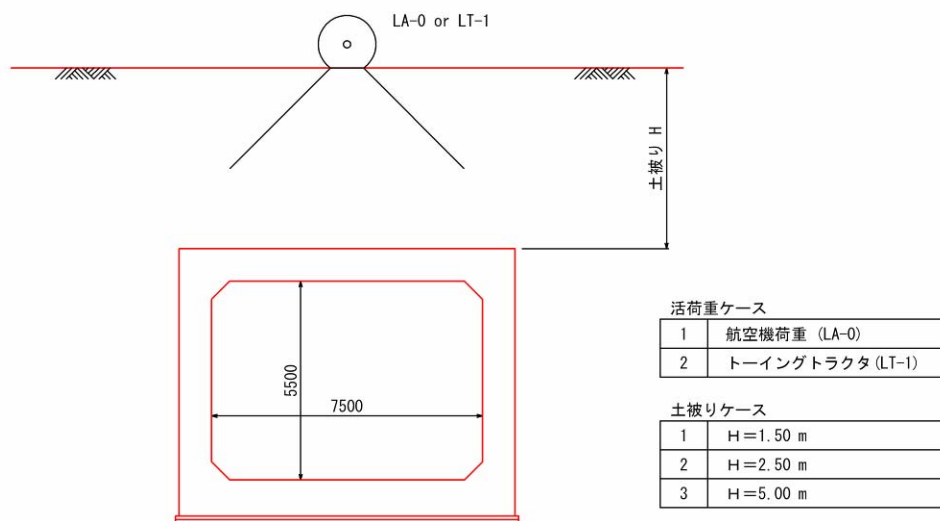


Fig. 1 Basic Design Condition

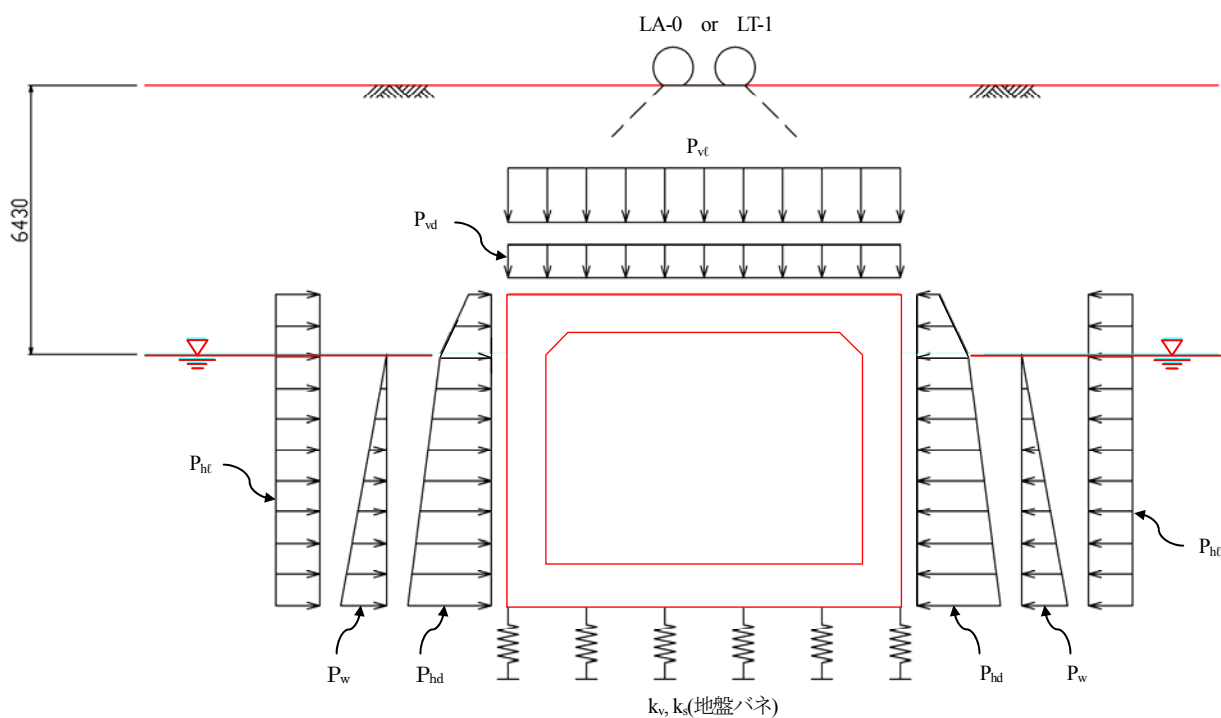


Fig. 2 Analysis Model

2.2 使用材料

使用材料の規格値は、以下の通りとする。

- ・コンクリートの設計基準強度 $f'_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$
- ・鉄筋の降伏強度 (SD345) $f_y = 345 \text{ N/mm}^2$

2.3 地盤条件

地盤条件は、以下の通りとする。

- ・土の単位体積重量 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- ・静止土圧係数 $K_0 = 0.5$

- ・地下水位 GL-6.43m
- ・鉛直方向地盤反力係数 $k_v = 19,600 \text{ kN/m}^3$
- ・水平方向地盤反力係数 $k_s = 6,500 \text{ kN/m}^3$

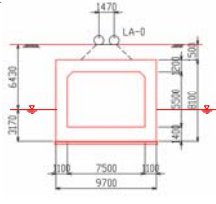
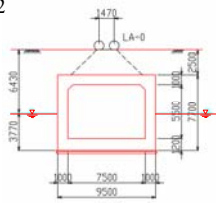
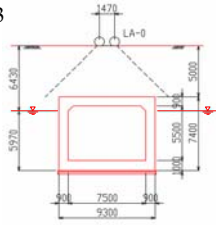
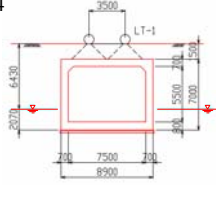
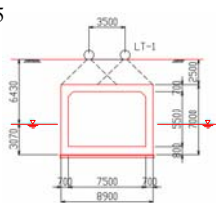
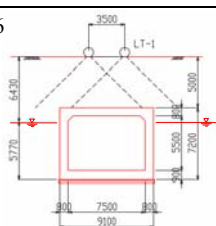
3 現行基準に基づく設計

3.1 解析モデル

解析モデルを Fig. 2 に示す。

- P_{vd} : 頂版に作用する鉛直土圧(kN/m^2) $P_{vd} = \gamma \cdot H$
- γ : 土の単位体積重量(kN/m^3)

Table II Design Results based on Current Design Code

活荷重	土被り	断面図	部材厚(m)		配筋		
LA-0	1.5m	case-1 	頂版	1.20	端部	(外側引張)	D29 @ 125
					中央	(内側引張)	D35 @ 125
			側壁	1.10	上	(外側引張)	D29 @ 125
					下	(外側引張)	D25 @ 125
			底版	1.40	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D35 @ 125
	2.5m	case-2 	頂版	1.00	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D32 @ 125
			側壁	1.00	上	(外側引張)	D25 @ 125
					下	(外側引張)	D25 @ 125
			底版	1.20	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D35 @ 125
	5.0m	case-3 	頂版	0.90	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D29 @ 125
			側壁	0.90	上	(外側引張)	D25 @ 125
					下	(外側引張)	D25 @ 125
			底版	1.00	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D32 @ 125
LT-1	1.5m	case-4 	頂版	0.70	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D25 @ 125
			側壁	0.70	上	(外側引張)	D25 @ 125
					下	(外側引張)	D25 @ 125
			底版	0.80	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D25 @ 125
	2.5m	case-5 	頂版	0.70	端部	(外側引張)	D22 @ 125
					中央	(内側引張)	D22 @ 125
			側壁	0.70	上	(外側引張)	D22 @ 125
					下	(外側引張)	D22 @ 125
			底版	0.80	端部	(外側引張)	D22 @ 125
					中央	(内側引張)	D25 @ 125
	5.0m	case-6 	頂版	0.80	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D29 @ 125
			側壁	0.80	上	(外側引張)	D25 @ 125
					下	(外側引張)	D25 @ 125
			底版	0.90	端部	(外側引張)	D25 @ 125
					中央	(内側引張)	D29 @ 125

H : 土被り厚(m)

P_{vt} : 航空機荷重(LA-0)またはトーイングトラクター荷重(LT-1)による鉛直方向地中応力(kN/m²)で、土被り厚に応じて Table I の値を用いる。

P_{hd} : 水平土圧(kN/m²)

P_w : 水圧(kN/m²)

P_{hf} : 航空機荷重(LA-0)またはトーイングトラクター荷重(LT-1)による水平方向地中応力(kN/m²)で下

式により求める。

$$P_{hf} = P_{vt} \times K_0$$

K_0 : 静止土圧係数

3.2 許容応力度

コンクリートと鉄筋の許容応力度は、以下の通りとする。

- ・コンクリートの許容曲げ応力度 $\sigma_{ca} = 9 \text{ N/mm}^2$
- ・鉄筋の許容引張応力度 $\sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$

3.3 設計結果

現行基準（許容応力度法）に基づいて、曲げモーメントに着目して設計した結果を Table II に示す。活荷重の違いによる設計結果を比較すると、航空機荷重（LA-0）の設計断面の方がトーイングトラクター荷重（LT-1）の設計断面よりも大きくなることがわかる。また、航空機荷重では、土被りが小さい程、部材厚さは大きくなっている。これは、土被りが小さいと応力分散の範囲が狭くなり、航空機荷重による鉛直方向地中応力が、土被り重量に比べて大きくなっているためである。トーイングトラクター荷重のケースでは、土被り重量の方が、トーイングトラクター荷重による鉛直方向地中応力よりも大きいため、土被りが大きい case-6 で部材厚が大きくなっている。

4 信頼性解析

現行基準に基づいて設計された断面について、曲げモーメントに関する使用限界状態に対する信頼性解析を行い、確率変数の感度係数と各ケースにおける信頼性指標を算定する。

信頼性解析には FORM（First Order Reliability Method）⁴⁾を用いる。

4.1 限界状態関数

「コンクリート標準示方書〔設計編〕8.3.3 曲げひび割れの検討」⁵⁾では、ひび割れ幅の検討を省略できる場合の鉄筋応力度の制限値は 120N/mm^2 とされている。本検討で設計対象とした 6 ケースの許容応力度法による断面の各検討位置において、鉄筋の降伏強度を 120N/mm^2 とした場合の初期降伏モーメントと、鉄筋の降伏強度を特性値である 345N/mm^2 とした場合の初期降伏モーメントを算出し、その比の値を平均すると 0.43 となった。このことから、検討対象とする使用限界状態を「断面に発生する曲げモーメント M が初期降伏モーメント M_{y0} の 50% に達する状態」と設定した。限界状態関数を式(1)に示す。

$$g_M = 0.5M_{y0}(f_y, f_c) - M(K_0, P, K_V) \quad (1)$$

ここに、

M_{y0} : 初期降伏モーメント (N・m)

f_y : 鉄筋の降伏強度 (N/mm²)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

M : 発生曲げモーメント (N・m)

K_0 : 静止土圧係数

P : 載荷重 (kN/m²)

K_V : 地盤反力係数 (kN/m³)

M_{y0} と M の括弧内の f_y , f_c , K_0 , P , K_V は確率変数を表している。

4.2 確率変数

信頼性解析に用いる確率変数の統計量の設定根拠は次の通りである。

Table III Parameters of Design Variables for Reliability Analysis

	特性値	平均値	変動係数	分布形
鉄筋の降伏強度	345 N/mm ²	390 N/mm ²	0.07	正規
コンクリートの圧縮強度	24 N/mm ²	28.7 N/mm ²	0.10	正規
静止土圧係数	0.50	0.50	0.12	正規
載荷重	1.00	0.859	0.10	正規
地盤反力係数	19600 kN/m ³	19600 kN/m ³	0.76	対数正規

(1) 鉄筋の降伏強度 f_y

分布形 : 正規分布

特性値 : 降伏強度とする → 345N/mm^2

変動係数 : 港湾基準における鋼材強度の変動係数を参考に設定 → 0.07

平均値 : 特性値を超過する確率を 95% として算定 → 390N/mm^2

(2) コンクリートの圧縮強度 f_c

分布形 : 正規分布

特性値 : 設計基準強度とする → 24N/mm^2

変動係数 : 全国生コンクリート品質管理監査会議の圧縮試験結果を基に設定⁶⁾ → 0.10

平均値 : 特性値を超過する確率を 95% として算定 → 28.7N/mm^2

(3) 静止土圧係数 K_0

分布形 : 正規分布

特性値 : 現行設計法における設計値 → 0.50

変動係数 : 港湾基準における土圧合力の変動係数を参考に設定 → 0.12

平均値 : 特性値に等しいものとする → 0.50

(4) 載荷重 P

分布形 : 正規分布

特性値 : 現行設計法における設計値

変動係数 : 0.10 とする

平均値 : 特性値を超過しない確率を 95% として算定 → 特性値の 0.859 倍

(5) 地盤反力係数 K_V

分布形 : 対数正規分布（変動係数が大きい）

特性値 : 現行設計法における設計値 → 19600 kN/m³

変動係数 : 港湾基準における水平地盤反力係数の変動係数を参考に設定⁷⁾ → 0.76

平均値 : 特性値に等しいものとする → 19600 kN/m³

このように設定した確率変数の統計量と分布形を Table III に示す。

Table IV Results of Reliability Analysis

			信頼性指標	感度係数				
				鉄筋 降伏強度	コンクリート 圧縮強度	静止 土圧係数	載荷重	地盤 反力係数
case-1	頂版	端部	2.377	0.683	0.068	-0.337	-0.644	-0.017
		中央	2.878	0.719	0.081	0.238	-0.648	0.013
	側壁	上	1.500	0.633	0.074	-0.172	-0.751	-0.013
		下	0.470	0.604	0.078	-0.291	-0.733	0.083
	底版	端部	1.817	0.650	0.061	-0.503	-0.562	0.071
		中央	2.159	0.707	0.075	0.286	-0.634	0.105
case-2	頂版	端部	1.926	0.710	0.071	-0.383	-0.587	-0.031
		中央	3.042	0.767	0.087	0.263	-0.579	0.022
	側壁	上	-0.141	0.652	0.080	-0.054	-0.752	-0.015
		下	0.521	0.690	0.092	-0.287	-0.645	0.131
	底版	端部	1.974	0.721	0.068	-0.476	-0.487	0.108
		中央	3.033	0.783	0.088	0.268	-0.537	0.138
case-3	頂版	端部	3.195	0.869	0.088	-0.411	-0.255	-0.054
		中央	2.852	0.891	0.095	0.325	-0.300	0.039
	側壁	上	0.886	0.916	0.107	-0.060	-0.382	-0.027
		下	-0.220	0.860	0.109	-0.283	-0.324	0.252
	底版	端部	1.078	0.837	0.087	-0.442	-0.245	0.190
		中央	2.897	0.890	0.103	0.283	-0.270	0.210
case-4	頂版	端部	5.256	0.846	0.090	-0.365	-0.365	-0.093
		中央	3.433	0.807	0.083	0.332	-0.477	0.061
	側壁	上	3.387	0.848	0.093	-0.056	-0.517	-0.041
		下	2.244	0.816	0.096	-0.305	-0.422	0.231
	底版	端部	3.502	0.820	0.085	-0.423	-0.327	0.184
		中央	1.201	0.725	0.073	0.323	-0.460	0.391
case-5	頂版	端部	3.909	0.863	0.082	-0.446	-0.196	-0.103
		中央	2.187	0.859	0.079	0.423	-0.269	0.072
	側壁	上	1.918	0.943	0.094	-0.075	-0.305	-0.047
		下	0.244	0.821	0.090	-0.375	-0.223	0.357
	底版	端部	1.667	0.810	0.077	-0.500	-0.170	0.245
		中央	2.321	0.840	0.085	0.352	-0.222	0.337
case-6	頂版	端部	4.243	0.912	0.095	-0.390	-0.062	-0.067
		中央	4.598	0.941	0.104	0.310	-0.073	0.045
	側壁	上	2.226	0.987	0.110	-0.055	-0.095	-0.035
		下	0.936	0.911	0.111	-0.300	-0.077	0.250
	底版	端部	2.216	0.877	0.092	-0.428	-0.057	0.190
		中央	2.446	0.899	0.099	0.316	-0.075	0.278

4.3 解析結果

曲げモーメントに関する限界状態に対する信頼性解析結果（信頼性指標と確率変数の感度係数）を Table IVに示す。また、信頼性指標と確率変数の感度係数を、頂版・側壁・底版毎に平均した値を Table Vに示す。

信頼性指標は、頂版が 1.9～5.3、側壁が 0.2～3.4、底版が 1.1～3.5 とばらついており、それぞれの平均値は、3.325、1.164、2.193 であり、大きい方から頂版→底版→側壁の順となっている。このことから、許容応力度法を用いた現行基準で設計された断面は、部材によって安全性水準に大きな違いがあることがわかる。

感度係数は、確率変数が限界状態関数に与える影響の大きさを表している。耐力側の確率変数の符号は正となり、荷重側の確率変数の符号は負となる。影響の大きさは感度係数の絶対値の大きさで判断できる。通常、感度係数が 0.2 以下の確率変数は、限界状態関数に与える影響が小さいと判断される場合が多い。Table IVの静止土圧係数の感度係数を見ると、頂版と底版の中央部では正の符号（限界状態において平均値よりも小さい値）で、それ以外の部材端部では負の符号（限界状態において平均値よりも大きい値）となっている。このことは、ボックスカルバート側面の土圧が小さい方が、頂版と底版の中央部の内引張モーメント

Table V Mean Values of Reliability Indices and Sensitivity Factors

	信頼性 指標	感度係数				
		鉄筋降伏強度	コンクリート 圧縮強度	静止土圧係数	載荷重	地盤反力係数
頂版	3.325	0.823	0.085	-0.037	-0.372	-0.010
側壁	1.164	0.807	0.095	-0.193	-0.436	0.094
底版	2.193	0.797	0.083	-0.079	-0.337	0.204

が大きくなり、大きい方が部材端部の外引張モーメントが大きくなることに対応している。また、地盤パネの算定に用いる地盤反力係数の感度係数は、側壁下部と底版で比較的大きな値となっている。このように感度係数にはばらつきがあるが、各確率変数に対して1つの部分係数を設定することとし、部分係数の設定においてはTable Vに示す感度係数の平均値を用いることとする。

Table Vを見ると、感度係数の絶対値が0.2を上回る確率変数は、鉄筋降伏強度と載荷重である。鉄筋降伏強度の確率変数が0.8程度と大きく、コンクリート圧縮強度の感度係数が0.1以下と小さくなっている理由は、断面が曲げ引張の限界状態で決まっているからである。また、各確率変数の感度係数の平均値のばらつきは、頂版・側壁・底版間で、さほど大きくないことがわかる。

5 レベル1信頼性設計法に基づく設計

レベル1信頼性設計を行うために確率変数の部分係数を算定する。そのために、確率変数の統計量はTable IIIに示す値を用い、感度係数はTable Vに示す値を用いる。

5.1 目標信頼性指標

部分係数を算定するために、ISO2394のANNEX Eに示されている目標信頼性指標（Table VI）を参考にして、目標信頼性指標を設定する。

本検討においては、安全対策の相対コストを「高」と考えることとする。使用限界状態を対象としているためTable VIに従って $\beta_t = 1.5$ （破壊の影響は「時々」）とする。目標信頼性指標の違いが、部分係数や設計結果に与える影響を検討するために、 $\beta_t = 2.3$ （破壊の影響は「中」）の場合も検討することとする。この目標信頼性指標の値は、現行基準に基づく設計結果の信頼性指標の平均値程度と考えられる。（Table V参照）

5.2 部分係数

各確率変数の部分係数 γ_X は式(2)または式(3)により算出する。

$$\cdot \text{正規分布: } \gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_t V_X) \frac{\mu_X}{X_k} \quad (2)$$

$$\cdot \text{対数正規分布: } \gamma_X = \frac{\exp\left(-\alpha_X \beta_t \sqrt{\ln(1 + V_X^2)}\right)}{\sqrt{1 + V_X^2}} \frac{\mu_X}{X_k} \quad (3)$$

Table VI Target Reliability Indices (ISO2394)

安全対策の 相対コスト	破壊の影響					
	小	時々	中	大		
高	0	A 1.5	2.3	B	3.1	
中	1.3	2.3	3.1	C	3.8	
低	2.3	3.1	3.8		4.3	

注) A : 使用限界状態では、可逆的なものは0、非可逆的なものは1.5を使う。

B : 疲労限界状態では、検査の可能性に依存して2.3～3.1を使う。

C : 終局限界状態では、安全性クラスに応じて3.1, 3.8, 4.3を使う。

Table VII Partial Factors

$\beta_t = 1.5$

	鉄筋 降伏 強度	コンクリート 圧縮強度	静止土圧 係数	載荷重	地盤 反力 係数
頂版	1.03	1.18	1.01	0.91	0.81
側壁	1.04	1.18	1.04	0.92	0.73
底版	1.04	1.18	1.02	0.90	0.65
部分係数の 設定値	1.05	1.20	1.00	0.90	0.75

$\beta_t = 2.3$

	鉄筋 降伏 強度	コンクリート 圧縮強度	静止土圧 係数	載荷重	地盤 反力 係数
頂版	0.98	1.17	1.01	0.94	0.82
側壁	0.99	1.17	1.05	0.95	0.70
底版	0.99	1.17	1.03	0.93	0.59
部分係数の 設定値	1.00	1.15	1.05	0.95	0.70

ここに、

β_t : 目標信頼性指標

α_X : 確率変数 X の感度係数

V_X : 確率変数 X の変動係数

μ_X : 確率変数 X の平均値

X_k : 確率変数 X の特性値

式(2)および(3)により算出した頂版・側壁・底版の部分係数と、それらを平均し、0.05 単位でまるめて設定した部分係数の値を Table VII に示す。

式(2)と式(3)で計算される部分係数は、特性値に乘ずる係数として定義されている。したがって、耐力側の部分係数は、確率変数の平均値を低減させる値となり、荷重側の部分係数は、確率変数の平均値を割り増す値となる。4.3 節で述べたように、感度係数は、耐力側の確率変数の符号は正となり、荷重側の確率変数の符号は負となるため、式(2)と式(3)の中の α_X の前に「-」が付与される。

ここで、Table III の $\beta_i = 1.5$ の場合の鉄筋降伏強度とコンクリート圧縮強度の部分係数について、説明する。部分係数はそれぞれ、1.05 と 1.20 と設定した。それぞれの特性値は、345N/mm² と 24N/mm² なので、設計値は、特性値に部分係数を乗じて、

- ・鉄筋降伏強度 : $345 \times 1.05 = 362 \text{ N/mm}^2$
- ・コンクリート圧縮強度 : $24 \times 1.20 = 28.8 \text{ N/mm}^2$

と算定される。これらの設計値は、それぞれの平均値 390N/mm² と 28.7N/mm² に対して、それぞれ 93%、100% となっている。本検討の設計条件においては、設計断面が曲げ引張の限界状態で決まっているため、鉄筋降伏強度の感度係数が 0.8 程度、コンクリート圧縮強度の感度係数が 0.1 未満となっている。したがって、平均値からの低減は、鉄筋降伏強度が大きく、コンクリート圧縮強度の方はほとんど低減しなくて良いという結果になっている。

ここで注意しなければならないのは、コンクリート標準示方書では、材料強度の部分係数は、特性値を割る係数として定義されているが、本論文では、特性値に乘ずる係数として定義されているという点である。本論文で算定したこれらの部分係数を、コンクリート標準示方書と同様に、特性値を割る係数として算定すると、それぞれ、0.95 と 0.83 となる。Table III の $\beta_i = 2.3$ の場合について、同様に算定すると、それぞれ、1.00 と 0.87 となり、信頼性指標が大きくなると（安全性水準が高くなると）、コンクリート標準示方書と同じ定義の部分係数は大きくなるのがわかる。

5.3 レベル1信頼性設計法の安全性照査式

レベル1 信頼性設計法の安全性照査式を式(4)に示す。式(1)に示す限界状態関数に含まれる各確率変数が、部分係数×確率変数の特性値（＝設計値）となっている。

$$0.5M_{y0}(\gamma_s f_y, \gamma_c f_c) \geq M(\gamma_k K_0, \gamma_p P, \gamma_V K_V) \quad (4)$$

ここに、

- M_{y0} : 初期降伏モーメント (N・m)
- γ_s : 鉄筋の降伏強度の部分係数
- f_y : 鉄筋の降伏強度の特性値 (N/mm²)
- γ_c : コンクリートの圧縮強度の部分係数
- f_c : コンクリートの圧縮強度の特性値 (N/mm²)
- M : 発生曲げモーメント (N・m)
- γ_k : 静止土圧係数の部分係数

- K_0 : 静止土圧係数の特性値
- γ_p : 載荷重の部分係数
- P : 載荷重の特性値 (kN/m²)
- γ_V : 地盤反力係数の部分係数
- K_V : 地盤反力係数の特性値 (kN/m³)

Table VIII Rebar Quantity Ratio of Level 1 Reliability-based Design

検討ケース	部材	部位	現行基準設計に対する配筋量比	
			$\beta_i = 1.5$	$\beta_i = 2.3$
case-1	頂版	端部	1.00	1.24
		中央	0.83	1.00
	側壁	上	1.00	1.24
		中央	1.27	1.27
		下	1.27	1.27
	底版	端部	1.27	1.27
		中央	1.00	1.00
case-2	頂版	端部	1.27	1.27
		中央	0.81	1.00
	側壁	上	1.27	1.27
		中央	1.27	1.27
		下	1.27	1.27
	底版	端部	1.27	1.27
		中央	0.83	1.00
case-3	頂版	端部	1.27	1.27
		中央	1.00	1.00
	側壁	上	1.27	1.27
		中央	1.27	1.27
		下	1.27	1.27
	底版	端部	1.27	1.27
		中央	1.00	1.00
case-4	頂版	端部	1.00	1.00
		中央	1.00	1.00
	側壁	上	1.00	1.00
		中央	1.00	1.00
		下	1.00	1.00
	底版	端部	1.00	1.00
		中央	1.00	1.27
case-5	頂版	端部	1.00	1.00
		中央	1.00	1.00
	側壁	上	1.00	1.00
		中央	1.00	1.00
		下	1.31	1.31
	底版	端部	1.31	1.31
		中央	1.00	1.00
case-6	頂版	端部	1.00	1.00
		中央	0.79	1.00
	側壁	上	1.00	1.00
		中央	1.00	1.00
		下	1.27	1.27
	底版	端部	1.27	1.27
		中央	1.00	1.00

5.4 設計結果

設定した部分係数を用いて、レベル1信頼性設計を行った。その際、各検討ケースの部材厚は、現行基準で設計した部材厚と同一とした。したがって、それぞれの設計で配筋だけが変化することになるので、配筋量を比較することで、設計結果を比較することができる。

現行基準で設計した配筋量に対する、レベル1信頼性設計の配筋量の比を、各ケース、各部位毎に計算した結果をTable VIIIに示す。

なお、鉄筋量に関しては、具体的な鉄筋径の変化（たとえば、D25 → D29）に対応して決定しているため、Table VIIIに示す配筋量比は、理論上の必要最小鉄筋量には一致していない。

6 考察

Table VIIIで、目標信頼性指標が $\beta_r=1.5$ の場合の配筋量比を見ると、頂版中央ではcase-1, case-2, case-6で1.0を下回っており、底版中央ではcase-2で1.0を下回っているが、側壁では全ての部位で1.0以上となっている。Table Vを見ると、現行基準で設計された断面の信頼性指標の平均値は、頂版・底版・側壁の順に、 $3.325 \rightarrow 2.193 \rightarrow 1.164$ と小さくなっている。したがって、 $\beta_r=1.5$ で設計すると、信頼性指標が大きかった（安全性の裕度が大きかった）部材では、配筋量が減少する部位があり、信頼性指標が小さかった部材では、配筋量が増加する部位があるという結果になったことがわかる。このことは、信頼性設計法に基づく設計を行うと、現行基準で設計された部材の信頼性指標のばらつきが小さくなり、部材間の安全性水準をバランスよく設計できることを表している。

Table VIIIで、目標信頼性指標が $\beta_r=2.3$ の場合の配筋量比を見ると、全ての部材で1.0以上となっていることがわかる。すなわち、現行基準で設計された断面よりも配筋量が増加しているということである。

以上より、現行基準で設計されたボックスカルバートは、曲げモーメントに関する使用限界状態において、信頼性指標が $\beta_r=1.5 \sim 2.3$ 程度の安全性水準で設計されていると考えられる。

また、レベル1信頼性設計法では、目標信頼性指標が大きくなると、断面の配筋量が増加することが確認できた。

7 結語

空港場周道路のRC製ボックスカルバートを対象として、曲げモーメントの使用限界状態に関して、現行基準に基づく設計を行った。その設計された断面の信頼性解析を行った結果、部材間で信頼性指標がばらついていることがわかった。

レベル1信頼性設計法を実施するために、確率変数の部分係数を設定した。その際に、目標信頼性指標は、ISO2394に示されている値を参考に設定した。その部分係数を用いて、レベル1信頼性設計を実施した結果、現行基準で設計した断面に比べて、部材間の信頼性指標のばらつきが小さ

くなっていることが確認できた。このことは、レベル1信頼性設計法が現行基準に比べて、部材間の安全性水準をバランスよく設計できることを表している。

本論文では、1種類のボックスカルバートの6ケースの荷重状態を対象にして、レベル1信頼性設計法の適用について検討した。現行基準にレベル1信頼性設計法を導入する場合には、以下の項目について検討する必要があるものと思われる。

- (1) 本論文では1断面のボックスカルバートのみの検討を実施したが、種々の形状の構造物を対象にして検討する必要がある。
- (2) 本論文では使用限界状態のみに着目したが、終局限界状態等の他の限界状態についても検討する必要がある。
- (3) 本論文ではISO2394を参考に目標信頼性指標を設定したが、レベル1信頼性設計法に基づく設計結果が、現行基準に基づく設計結果と同程度の安全性水準を維持できるように、コードキャリブレーションによって目標信頼性指標を設定する方法についても検討する必要がある。
- (4) 本論文では限られた少数の設計条件において部分係数を設定したが、他の設計条件においても、レベル1信頼性設計法に基づく設計結果が、目標信頼性指標の安全性水準を実現していることを確認するために、部分係数法で得られた設計断面に対して再度信頼性解析を行い、設定した部分係数の妥当性を検証する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 2007.
- 2) ISO: General principles on reliability for structures, ISO2394, 1998.
- 3) 国土交通省航空局, 国土交通省国土技術政策総合研究所監修: 空港土木施設構造設計要領及び設計例, (財)港湾空港建設技術サービスセンター(SCOPE), 2010.
- 4) R.Rackwitz and B.Fiessler: Structural reliability under combined random load sequences, *Computers & Structures*, Vol.9, pp.489-494, 1978.
- 5) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書【設計編】, (社)土木学会, 2007.
- 6) 全国生コンクリート品質管理監査会議: 平成22年度全国統一品質管理監査結果, 2011.
- 7) 安間清, 菊池喜昭, 長尾毅, 鈴木誠, 藤田宗久, 吉浪康行: キャリブレーションに基づく直杭式横棧橋の部分係数法の検討, 土木学会論文集C, Vol.63, No.2, pp.566-576, (社)土木学会, 2007.