

東京電力㈱ 正員 西原 茂雄
 東電設計㈱ 正員 栗原美津雄
 大日本土木㈱ 正員 丹羽 誠

1. はじめに

本報は、昨年度の年講における「仮設立坑の信頼度解析（その1～3）」¹⁾の研究成果をもとに、一般立坑の本設計を対象とした、レベルⅡ信頼性設計法、及び限界状態設計法に基づく設計キャリブレーションの方法とその結果を示すものである。

2. 信頼度解析法

信頼度解析は、限界状態として、終局限界状態、使用限界状態を対象とした。一般立坑における破壊モードは、立坑各部材（側壁、底版・頂版）の断面破壊（曲げ、せん断）を設定した。また、性能関数は、次式で表されるものを用いた。

$$Z = R - N \cdot S \quad (Z > 0 : \text{安全}, Z \leq 0 : \text{破壊}) \quad (1)$$

ここに、 R ：耐力、 N ：荷重効果の補正係数、 S ：荷重効果を表す。耐力 R は、コンクリート標準示方書に従い算定した。また、荷重効果 S は、本報で対象とする立坑の一般的な解析法である鉛直方向（水平方向）骨組構造解析法により算定した。しかしながら、この骨組構造解析法では、立坑の3次元的な形状効果を表すことができないため、荷重効果の評価としては必ずしも精度の高い解析法とは言えない。そこで、実際の挙動に最も近いと考えられ、かつデータの入手が容易な3次元FEM解析を基準として設定した荷重効果の補正係数 N により、構造解析誤差として評価する方法を用いた。この手法は、3次元FEM解析を基準にして荷重効果を算定しているので、解析方法が変わっても（例えば二方向版解析）、補正係数 N を再評価することにより、信頼度の比較が可能と考えられる。

3. 安全性指標 β 算定結果

表-1に信頼度解析に用いた一般立坑6事例の概略を示す。表中、主方向は設計計算書で考えられている解析方向であり、信頼度解析もこの主方向に従った。フレーム層数は、主方向の構造解析モデルの層数である。これらの実績設計事例に対する安全性指標 β の算定結果を表-2に示す。終局限界状態に対する β 値は、底版・頂版の曲げ破壊を除いて、平均値でほぼ $\beta \approx 5$ となった。この値は、目標 β 値が示されている他の設計コード（AISC, ACI等）と比較すると若干高い値であるが、これは、信頼度解析を行った設計断面が、必ずしもクリティカルな設計となっていないためと考えられる。また、使用限界状態に対する β 値は、他に比較できる設計コードがないので一概には言えないが、終局限界状態と比較して、 β 値はかなり低くなると考えるのが妥当であろう。しかし、表-2によれば、曲げはかなり低くなっているのに対し、せん断はほぼ同じ値となっている。これは、データ数が少ない上に、設計断面の余裕が大きいためと考えられる。部材毎の比較では、終局限界状態と異なり、側壁、底版・頂版ともほぼ同等の β 値となっている。

表-1 解析事例一覧

事例 No.	種 別	床付深さ (G.L.-m)	平面形状 (m)		フレーム 層数(層)	主方向
			B	L		
1	人 孔	21.637	4.350	9.500	5	鉛直方向
2	人 孔	26.350	4.800	8.300	7	鉛直方向
3	人 孔	17.887	5.400	18.800	4	鉛直方向
4	人 孔	12.450	4.500	6.900	3	鉛直方向
5	人 孔	35.900	4.700	9.000	9	鉛直方向
6	到達立坑	19.250	3.100	9.900	4	鉛直方向

表-2 安全性指標 β 算定結果

限界 状態	部 材	破 壊 モード	標本数	安全性指標 β	
				平均値	標準偏差
終 局 限 界	側 壁	曲 げ	33	4.93	2.03
		せん断	21	5.27	3.74
	底 版 頂 版	曲 げ	16	8.80	3.89
		せん断	8	4.94	4.46
使 用 限 界	側 壁	曲 げ	33	2.12	1.22
		せん断	7	4.63	1.55
	底 版 頂 版	曲 げ	16	2.45	2.28
		せん断	2	4.27	0.04

4. 目標 β 値の設定

前項の安全性指標 β 算定結果をもとに、目標 β 値について考察する。通常、設計キャリブレーションを行う場合、既往設計ぎりぎりのレベルの β 値を目標 β 値とするのが一般的である。しかしながら、前述のように設計断面が必ずしも最適設計断面とは限らないこと、また、たとえ最適設計断面であっても、種々の設計パラメータの条件により β 値にばらつきがあることから、各破壊モードの β 値の最小値を目標 β 値とすることは問題がある。そこで、既往設計の破壊基準である許容応力度に着目した目標 β 値の設定方法を検討する。前掲の実績設計事例はいずれも許容応力度法で設計されており、各々の設計断面における鉄筋、コンクリートの許容応力度と発生応力度との比（以下許容応力度比 F と呼ぶ）を求めることができる。この許容応力度比 F に対応する実績 β 値は既に信頼度解析により得られているので、その相関関係から目標 β 値を設定しようというものである。このとき、許容応力度ぎりぎりのレベルである $F=1.0$ に対応する β 値を、 $\beta \sim F$ の回帰分析により求め、目標 β 値とする。回帰分析に用いる回帰式は、次に示す対数式を用いた。

$$\beta = a + b \cdot \ln(F) \quad (2)$$

ここに、 a 、 b ：回帰係数を表す。図-1に側壁の終局せん断破壊の許容応力度比 F と β 値をプロットしたものを示す。図中、曲線は、回帰分析により得た回帰式の平均値を表す。図-1によれば、ばらつきはあるものの $\beta \sim F$ 関係に高い相関がみられる。このとき、目標 β 値となる $F=1.0$ に対応する β 値も回帰式の平均値回りにばらついていると言えるが、ここでは、許容応力度法と同等の信頼度レベルを得る、という観点から、回帰式の平均値から目標 β 値を設定した。他の破壊モードについても同様に設定した。その一覧を表-3に示す。表-3によれば、終局限界状態に対する目標 β 値が部材によりかなり差があるが、これは、荷重効果のばらつきの差によるものである。しかし、ここで示した目標 β 値は、許容応力度法と同等の信頼度レベルを得るための1つの指標と考えているので、この様なばらつきがあっても問題ないものと考えられる。

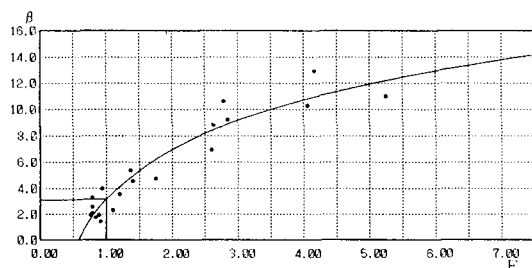


図-1 側壁の終局せん断破壊に対する F と β

表-3 目標 β 値一覧

部 材	破 壊 モ ー ド	終局限界状態	使用限界状態
側 壁	曲 げ	4.2	1.2
	せん断	3.2	0.2
底 版 頂 版	曲 げ	6.7	1.0
	せん断	7.0	0.2

5. 部分安全係数による表示方法の検討

実設計においては、信頼度解析が極めて繁雑になるため、2次モーメント法に基づく部分安全係数により安全性照査を行う方法を検討する。安全性照査式は式(1)の性能関数に対応して次式で表される。

$$\phi \cdot R > \gamma_N \cdot (\gamma_S \cdot S) \quad (3)$$

ここに、 ϕ ：耐力低減係数、 γ_N ：構造解析係数、 γ_S ：荷重係数を表す。参考文献2によれば、式(3)による部分安全係数は、目標 β 値が与えられれば、 R 、 N 、 S の変動係数の関数となる。従って、変動係数が確定量として与えられる N を除いて、信頼度解析で得られた変動係数はばらついているため、直接部分安全係数に書き直すとまとまりのないものとなる。そこで、 R 、 S の変動係数をモデル化する。 R の変動係数は、その絶対値も小さく、ほぼ一定値であることから、各破壊モード毎の変動係数の平均値を代表値とする。 S の変動係数は、荷重の中でもウェイトの高い側圧のばらつきに左右されており、設計断面の地表面からの深さと相関関係を示している。従って、 S の変動係数は、深さ方向に層別する、または、深さ方向の関数として表すことによりモデル化する。現在、この検討方針に従い、部分安全係数による表示方法を策定中である。

<参考文献> 1) 日向他；「仮設立坑の信頼度解析（その1～3）」、土木学会第41回年講I, 1986、2) A.H-S.Ang & W.H.Tang;「Probability Concepts in Engineering Planning and Design Vol.2」, W.& S., 1984