

R C 農業水利構造物の力学的性能に関する信頼性評価（現場打設構造）

清水建設（株）土木事業本部 正会員 ○ 辻岡 信也
 （財）日本農業土木総合研究所 中島 賢二郎
 （財）日本農業土木総合研究所 正会員 佐川 匡
 清水建設（株）和泉研究室 正会員 鈴木 誠

1. はじめに

近年、我が国においても ISO 等の国際標準に整合させる方向で、構造設計基準類の見直しが活発に行われている。国際標準の基本的な考え方は、構造物に要求される性能を定量的に照査しようとするものである。本研究では設計基準見直しを前提とした基礎研究として、コンクリート製用水路の力学的性能に着目し、各力学的性能に対応する限界状態関数を設定して、信頼性理論を用いた安全性評価を行った。また、限界状態関数に影響を与える因子が安全性にどのような影響を与えるかについて、感度に基づいて考察した。

2. 信頼性評価に用いる限界状態関数

検討対象とした限界状態は設計全体の中で、構造設計で考慮されている一部である。以下に、3つの鉄筋コンクリートに関する限界状態関数について表す。なお、式中の変数のうち、表-1に示すものについては解説を省略する。

(1) 曲げ耐力に対する終局限界状態

発生曲げモーメントが曲げ耐力に達するときを限界状態としている。

$$g_1 = M_u(f'_c, f_s, d_1, d_2) - M_d(\phi, \gamma_t, \gamma_{ws}, \gamma_{sc}) \quad (1)$$

ここで、 M_u ：曲げ耐力、 M_d ：発生曲げモーメントである。

(2) せん断耐力に対する終局限界状態

発生せん断力がせん断耐力に達するときを限界状態としている。なお、対象構造物にせん断耐力筋は配筋されない。

$$g_2 = V_{cd}(f'_c) - V_d(\phi, \gamma_t, \gamma_{ws}, \gamma_{sc}) \quad (2)$$

ここで、 V_{cd} ：せん断耐力、 V_d ：発生せん断力である。

(3) ひび割れに対する使用限界状態

コンクリートのひび割れ幅が許容ひび割れ幅に達するときを限界状態としている。

$$g_3 = w_a - w(f'_c, d_1, d_2, \sigma_{se}(\phi, \gamma_t, \gamma_{ws}, \gamma_{sc})) \quad (3)$$

ここで、 w_a ：許容ひび割れ幅（ $= 0.0035c$ ：特に厳しい腐食性環境）、 w ：発生ひび割れ幅、 C_s ：鉄筋の中心間隔、 ϕ ：鉄筋径、 σ_{se} ：鉄筋応力度である。

3. 基本変数とその統計的性質

表-1に信頼性評価に用いる確率変数とその平均値・変動係数を示す。これらの変動特性は土の内部摩擦角を除いてすべて正規分布と仮定し、土の内部摩擦角は物理的意味を考慮して、 $\tan \phi$ を対数正規分布とする。

表-1 確率変数と変動係数及び平均値

確率変数	平均値	変動係数 (%)
コンクリートの圧縮強度 f'_c	22.48N/mm ²	11
鉄筋の降伏強度 f_s	321.43N/mm ²	6
土の内部摩擦角 $\tan \phi$	0.466	15
土の単位体積重量 γ_t	18kN/m ³	5
水中土の単位体積重量 γ_{ws}	10kN/m ³	5
コンクリートの単位体積重量 γ_{sc}	24.5kN/m ³	0.5
コンクリートのかぶり d_1	設計値 mm	6.5/設計値
コンクリートのかぶり d_2	設計値 mm	6.5/設計値

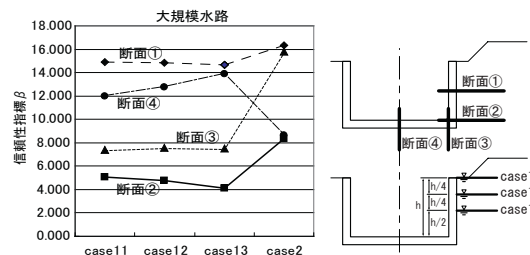
4. 各限界状態に関する信頼性

構造物として「大規模水路」「中規模水路」「小規模水路」の3つの異なる大きさの水路を対象とした。また、現設計では地下水位が側壁高さの中央にあるものとして断面を決定しているが、地下水位の影響を見るために、地下水位を3ケース、さらに荷重ケースを満水時と空水時の2ケース検討する。ただし、規模によって大きな違いは無かったため、信頼性指標 β のグラフは大規模断面のみを説明する。なお、信頼性指標 β とは破壊しない確率に準ずるものであり、感度 α とは確率変数それぞれの変動が構造物の破壊にどのくらい寄与するかを示す値である。

なお検討ケースの表記は、「case11:空液・地下水位レベル $1/2h$ 、case12:空液・地下水位レベル $3/4h$ 、case13:空液・地下水位レベル h 、case2:満液・地下水考慮せず」とする。 h は側壁高さである。ケース名の後ろにアルファベット文字がついた場合、それぞれ「L:大規模水路、M:中規模水路、S:小規模水路」を示す。また、このケース名を用いれば、現設計は case11 と case2 に対して検討を行っている。

(1) 曲げ耐力に関する信頼性評価

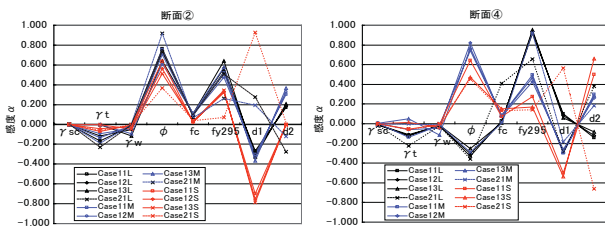
曲げ耐力に関しては、いずれのケースにおいても側壁下端部の信頼性指標 β が最も小さくなった。 β の値は5~8程度であり、かなり余裕度の大きい設計となっている。図-1に信頼性指標のグラフを示す。

図-1 曲げ耐力に関する信頼性指標 β

また、地下水位の影響であるが、例えば大規模水路の断面②を例に取った場合、水位が既定の排水口位置 (case11)

Key Words: 水利構造物, フルーム, 信頼性, 安全性, 感度解析

〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3 清水建設（株）土木事業本部設計部, TEL(03)5441-0598, FAX(03)5441-0511

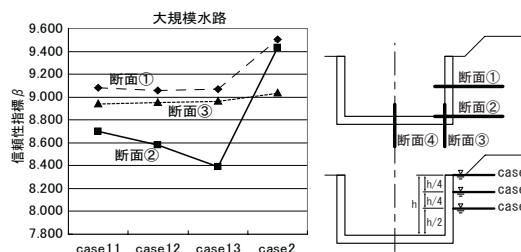
図-2 曲げ耐力に関する感度 α

から地盤面まで上がる (case13) と、 β の値が 1 程度減少する。破壊確率に換算して約 10 倍であり、地下水位が大きな影響を持っていることがわかる。すなわち側壁に設けられた排水口が閉鎖される場合は、地下水位が上昇して構造物が危険にさらされる場合があることを示している。

図-2 は断面ごとの感度 α をまとめたグラフである。case11,12,13 と case2 で若干の違いは見られるもの、ほぼ同等の結果を得た。感度が大きいものには ϕ 、 f_y 、 d_1 がある。このうち、 f_y の感度はいつも同じ符号であり、常に抵抗側に効いていることがわかる。 d_1 はケースにより正負が逆転しているが、これは d_1 が外側鉄筋かぶりという定義になっているために、満液時と空液時で引張側と圧縮側が入れ替わるのが原因である。 ϕ は土圧のパラメータであり、 ϕ の変化による土圧の変化が大きな影響を持つことがわかった。モーメントの方向により、土圧も抵抗側と荷重側に变化するため、図-2 の断面④のグラフでは ϕ の感度がケースによって正負逆になっている。

(2) セン断耐力に関する信頼性評価

図-3 に信頼性指標のグラフを示す。

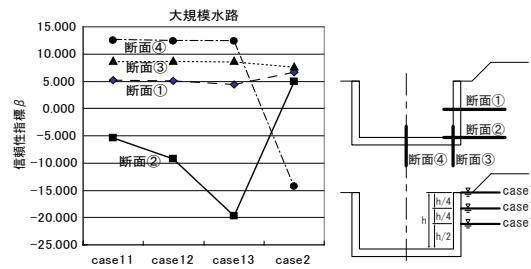
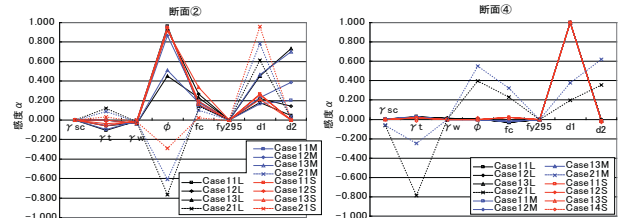
図-3 セン断耐力に関する信頼性指標 β

せん断耐力に関しても、側壁下端部で最も小さな信頼性指標 β の値となった。各断面とも 8~9 程度の大きさであり、やはり限界状態に対して余裕度大きい設計がされていると判断できる。また、感度 α の方はコンクリート強度がほぼ 1.0 で、他の確率変数の感度はほぼ 0.0 であった。照査断面の位置・ケースにかかわらず、ほぼ f_c のみが影響していることが確認された。この結果より、せん断耐力はコンクリート強度のみでコントロールできると言える。

(3) ひび割れに関する信頼性評価

図-4 に信頼性指標のグラフを示す。なお、現設計ではひび割れに対する照査は行われていない。

側壁では断面②で最も β が小さく (case11) 負になっており、地下水位の上昇によって当然 β の値はさらに小さく

図-4 ひび割れに関する信頼性指標 β 図-5 ひび割れに関する感度 α

なる (case12,13)。また、底版でも断面④で β が負になっている。これは破壊確率が 50% を越えることを示しており、ひび割れに関しては非常に厳しい断面であることを示している。このことより、設計に際しては耐久性に対してひび割れに関する照査を行うべきであると考えられる。

図-5 は断面ごとの感度 α をまとめたグラフである。外側鉄筋かぶり d_1 と土の内部摩擦角 ϕ の影響が顕著である。 ϕ は土圧を変動させるパラメータで、満水時は抵抗側に働き、空水時は荷重側に働く。一方、かぶりの方は常に抵抗側に働く。よって、実際の設計の際にはかぶり厚をいかに決定するかが非常に重要となると考えられる。

5. おわりに

本検討は、コンクリート製用水路の力学的性能に着目して、現状の設計基準に基づいて設計された構造物の信頼性を評価したものである。着目すべきは、類似した影響因子を持つ、曲げ耐力に関する β とひび割れに関する β の間に大きな開きがあるということである。現設計では、曲げ耐力の余裕度がこれほど大きい断面であっても、ひび割れに関しては十分な安全性を有しておらず、合理的な断面設計とは考えにくい。曲げ耐力とひび割れにはかぶりや鉄筋が相互に影響するため、2つの限界状態がバランスの取れたものにする検討が必要であることがわかった。今後、水利構造物全般の性能設計体系を整備していくためには、現在の構造物の耐久性能と施工性能を検討することが重要である。

参考文献

- ISO: ISO2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998.
- 農林水産省: 土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」, 2001.
- Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J.: Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag, 1982.