老朽ため池のリハビリテーションに関する研究

小林範之¹

Studies on Rehabilitation of Overage Irrigation Tanks

Noriyuki Kobayashi¹

1 はじめに

全国にある農業用ため池には、古い時代に築造され、老朽化が進行しているものが数多く存在する。老朽の内容としては、漏水、滑り破壊に対する安全率の不足、堤頂余裕高の不足、法面の浸食、取水施設・余水吐の能力不足などがあるが、なかでも漏水問題やそれに起因する堤体の安定問題は深刻である。また、ため池の中には、耐震設計が考慮されていないものが未だ数多く存在し、決壊にいたるような大きな事故につながる場合も考えられる。さらに、最近ではため池自体の利用頻度の減少や、農村地域の過疎化や高齢化によりため池管理が困難になってきていること、ため池下流部に住宅地が増加し二次災害の危険性が增大していることから、ため池の維持管理が重要な課題となっている。

学会賞を賜った一連の研究は、老朽ため池が抱える上記の問題、特に透水性および耐震性に関する問題点を解決することを目的としたものである。以下では受賞対象となった6編の論文の内容について簡単に述べる。

2 老朽ため池における漏水箇所特定調査方法

研究対象としたため池は、堤高約20m、堤長約130m、総貯水量約50万m³であり、中心コア型フィルダムとして昭和2年に竣工された。近年、ため池の老朽化が進み、貯水池からの漏水が多量となったため、堤体の改修が計画されることになった。ため池の改修工事を行うためには漏水の原因や場所を特定する必要がある。ここでは、ボーリング孔を用いた現地観測を行い、満水時と水位低下時の堤体内の水温分布を比較することによって、漏水経路の特定を行った。本結果から、満水位から約4m下がりの間に特に漏水量の急増しやすい部分があると推察された。特に、堤体右岸側上部が漏水箇所の1つであり、その漏水は貯水池からのものと考えられた。その根拠として、①堤体右岸側上部の水温は貯水池表面水温に近いが、堤体中央部および左岸側の水温は貯水池の水温に影響されない、②堤体右岸側と左岸側での水温の差は漏水が多い時に顕著であり、漏水が少ない時にはその差がほとんどなくなる、の2点が挙げられた。

この結果は貯水位-漏水量関係や現場透水試験による透水係数分布から考えられる漏水箇所と一致し、本手法の有効性が示された。(Kobayashi et al., 2000)

3 不均質透水場の浸透

3.1 不均質透水場の作成と浸透流解析

老朽化したため池を改修する場合、築造時の資料を入手することが困難であったり、時間的、経済的、物理的な理由から調査の規模が小さくなるため、不確定な要因が多くなる。このため、ため池堤体の性質を評価するときには、非常に少数の限られた調査結果から材料定数の空間分布を推定しなければならない。このような場合、調査結果の平均を解析領域全体に与えて均質なモデルを作成し確定的に評価することが多いが、この方法では老朽化ため池で問題となる局所的な問題には対処できないし、不合理な設計となる恐れがある。本研究は、透水係数のばらつきに着目し、有限要素法による浸透流解析の信頼性について評価した。ここでは、空間的なばらつきをもつ擬似的な透水場をモンテカルロシミュレーションにより複数個発生させ、解析結果のばらつきを検討した。

空間的なばらつきのある不均質な透水場を、①対象領域の透水係数は対数正規分布を示す、②透水係数には空間的相関性がある、という2つの条件から作成する。まず、与えられた解析領域内に距離相関を考慮した N 個の正規乱数 Z を発生させ、この乱数を基数とした対数正規分布に変換することによって透水係数の分布を求める。式(1)はここで用いた共分散関数、式(2)は乱数 Z から透水係数 k への変換式である。

$$C(h_x, h_y) = \sigma_g^2 \exp \left\{ -\sqrt{\left(\frac{h_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{h_y}{a_y}\right)^2} \right\} \quad (1)$$

$$k_{j,k} = \exp(\mu_{\ln k} + \sigma_{\ln k} Z_{j,k}^i), \quad \mu_{\ln k} = \ln(\mu_k) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln k}^2 \quad (2)$$

ここで、 σ_g : 乱数 Z の標準偏差、 h_x, h_y : 2点間の距離、 a_x, a_y : 相関距離、 μ_k, σ_k : 透水係数の平均と標準偏差である。

解析モデルは、上流側水頭にに基づき無次元化した拘束流モデルである。高さ $H(=1)$ 、幅 $L(=1)$ の正方形、上流側水頭 $h_1=1$ 、下流側水頭 $h_2=0$ とした。透水係数 k は 10^n で与え、 n は距離相関を考慮した平均0の正規乱数である。解析結果より、 σ_k が大きくなると、浸透量の平均値 Q_m は理論解 $Q_t(=1)$ から急激に減少し、その傾向は a が大きくなるほど強くなることがわかった。これは、 a が大きくなると透水係数の小さい領域が集中的に存在するためであると考えられた。また、たとえ σ_k が大きくて

¹愛媛大学農学部助教授 Associate Professor, Faculty of Agriculture, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama-shi, Ehime, 790-8566 Japan

も、浸透量の標準偏差 σ_f は a に関わらず小さいことがわかった。(Kobayashi *et al.*, 2001)

3.2 パーコレーションによる不均質透水場の評価

3.1 で発生させた不均質透水場をパーコレーションにより評価した。パーコレーションとは、ある物質の多数の不規則な分布の中につながりが生じることによってクラスターが形成されるときに、クラスター自身の特徴や生じたクラスターが系の性質に与える影響などを調べるものである。ここでは、クラスターの特徴であるしきい値および臨界確率と浸透流量の関係を調べた。

不均質透水場における主透水経路の探索方法は次の通りである。透水係数の小さいサイトから順に占有サイトとし、つながった占有サイトの集合をクラスターとする。そして、そのクラスターが上流側から下流側へつながったときパーコレートしたとし、そのクラスター内の最大の透水係数をしきい値 k_t 、そのサイト占有確率 p を臨界確率 p_c とした。解析結果より、 k_t が大きくなると、浸透流量 Q が増加し、 p_c が大きくなると Q が減少する。また、 μ_k 、 σ_k および a が同じ不均質透水場であれば、その浸透流量は k_t と p_c で表現できることがわかった。(Kobayashi *et al.*, 2002)

3.3 相関異方性とフラクタル次元

アースダムなどの盛土構造物における透水係数の空間分布は、施工上の特徴などから水平方向と鉛直方向の相関に違いのあることが考えられる。そこで相関異方性をもたせた不均質透水場において浸透流解析を実施し、その浸透場および浸透特性をフラクタル次元により評価した。

相関異方性をもつ不均質浸透場は、式(1)において $a_x \neq a_y$ として求めた。また、フラクタル次元には容量次元を用い、ボックスカウンティング法により算定した。解析結果より、フラクタル次元が不均質透水場の相関異方性の評価に対する有効な指標であることを示した。また、相関異方性は浸透量に対して支配的な要因となった。すなわち、鉛直方向の相関を強くした場合、解析領域全体の流速が比較的均一となり、流量は減少する。一方、水平方向の相関を強くした場合、局所的に浸透流速が大きい部分が現れ、流量が増加することがわかった。(Kobayashi *et al.*, 2003)

4 ため池の地震危険度と耐震性

4.1 ため池地震危険度評価システムの開発

ため池の耐震改修については限られた財源の中で合理的に改修事業を進めていくため、その優先順位を危険度によって評価する必要がある。本研究では、多数のため池を対象とした簡便な地震危険度の評価方法を提案した。ため池諸元や地震加速度などの要因を個々に判断するのではなく、複数の要因を同時に解析できることやダムタイプや地形、地質などの定性的な要因を考慮することができるところから、ニューラルネットワークによる多変量解析を実施し、ため池地震危険度を判定した。その際、2001年芸予地震によって被害の発生したため池のデータを収集し、分析を行った。本手法は「ため池防災データベース」を活用しており、汎用的なため池地震危険度評価システムとなっている。(小林ら, 2002)

4.2 耐震性の評価

研究対象としたため池では堤体天端に縦断方向のクラックが発生する被害が生じた。本ため池は、コア部の力学強度および遮水性を増すため、築造時にコア材を石灰処理して盛り立ててある。現在ではこの工法を採用することはないが、戦前に築造されたため池の中には、このようなコアを有するものが存在し、その耐震性についてはほとんど検討されていない。本研究では芸予地震時の堤体挙動を再現するため、2次元の非線形地震応答解析を行い、堤体天端に発生した被害に対するコア部石灰処理土の影響を検討した。解析結果より、①コア部の石灰処理や貯水の有無は、応答加速度や応答変位にほとんど影響しない。②堤体天端のクラックの原因となる引張応力の発生には貯水の有無は関係がない。③堤体天端のクラックは石灰処理による剛性の高いコア部に起因している、ことがわかった。(小林ら, 2003)

5 まとめ

ため池の築造に関して、従来ではその時点での効果と経済性のみを考慮することが多かったが、近年ではライフサイクル(LC)の考え方が導入されつつある。すなわち、ため池建設の合理性を計画、設計、施工のみでなく、供用期間中の維持管理、改修、解体なども含めたトータルでの評価を行うものである。ここで検討したリハビリテーション技術は簡便かつ有効であり、LCの維持・管理手法として十分機能すると考えられる。

最後になりましたが、学会賞を賜り大変光栄に存じます。受賞にあたり、ご推薦、ご審議いただいた関係者の皆様に、厚く御礼申し上げます。また、「ため池」に関して全くの素人である私をこの研究へと導いて下さり、多くのご指導、ご鞭撻をいただいた愛媛大学農学部吉武美孝教授に深く感謝いたします。さらに、当研究室に在籍された学生諸氏にも研究を進める上で多大な御助力を受けました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

引用文献

- [1] Kobayashi, N., Yoshitake, Y., Matsumoto, S., Morishita, K. and Tsuchihara, T. (2000): Water leakage through embankment of an overage irrigation tank - A case study to identify leaky transections-, *JRCS*, 6(1), pp.21-25.
- [2] Kobayashi, N., Yoshitake, Y. and Iima, K. (2001): A statistical approach to confined seepage problem with generation of random permeability field, *JRCS*, 7(1), pp.7-12.
- [3] Kobayashi, N., Yoshitake, Y., Otsuka, N., Iima, K. and Matsumoto, S. (2002): Percolation properties of random permeability field, *JRCS*, 7(2), pp.7-11.
- [4] Kobayashi, N., Yoshitake, Y. and Iima, K. (2003): Evaluation of fracture characteristics of random field with anisotropic spatial correlation, *JRCS*, 8(2), pp.1-6.
- [5] 小林範之・吉武美孝・勝山邦久・岡林千江子 (2002): ため池地震危険度評価システムの構築-芸予地震による愛媛県のため池被害を事例として-, 農業土木学会論文集, 222(70-6), pp.69-75.
- [6] 小林範之・吉武美孝・勝山邦久・横尾久美恵 (2003): 石灰処理されたコアを有するため池の動的挙動-芸予地震による被害事例からの検討-, 農業土木学会論文集, 225(71-3), pp.17-24.