

平成23年 3月 31日現在

機関番号：15301
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20580264
 研究課題名（和文） 軟弱地盤上構造物の長期残留沈下に対する維持管理を対象とした信頼性設計
 研究課題名（英文） Reliability-based design on maintenance of structures on soft grounds for long term residual settlement
 研究代表者
 西村 伸一（NISHIMURA SHINICHI）
 岡山大学・大学院環境学研究科・准教授
 研究者番号：30198501

研究成果の概要（和文）：本研究は、軟弱地盤上に施工された農業土木構造物（干拓堤防など）の維持管理を目的とした最適設計を目指したものである。軟弱地盤上の構造物において、改修等で荷重が生じた場合に予想される長期の圧密沈下を対象とした。ここでは、長期残留沈下予測を適切に行う簡便な手法を開発し、これに基づいて、供用期間内のライフサイクルコスト最小化に基づく最適設計問題を信頼性設計理論の立場から議論した。

研究成果の概要（英文）：This research tried to develop the optimum design method for the structures on the soft grounds such as the dikes of polder lands. When the structures on the soft grounds are repaired, or improved, additional loads are generated, and the consolidation settlement is expected. In this research, the simple method to predict such long term settlement is developed. By using this method, the reliability-based design as an optimum design method to minimize the life-cycle costs, has been discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学

キーワード：連結型圧密試験装置、軟弱地盤、長期残留沈下、圧密、変位予測、超過確率、ライフサイクルコスト、現場計測

1. 研究開始当初の背景

近年、土構造物に関する設計コードが性能設計仕様に改変されつつある。その中で、要

求性能は、各限界状態で置き換えられ、性能照査法としても限界状態設計法が採用されている。また、性能規定で将来の許容変位量が

指定されることも考えられ、安定問題に加え、構造物の変位予測がさらに重要な課題となりつつある。高精度な変位予測のためには、観測が必須要件であるが、このことは、「性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則」（地盤工学会，2006）でも謳われている。そこで、本研究においても、許容残留沈下量照査のため、観測データに基づいた高精度変位予測法の開発を目指した。

一方、土構造物の挙動予測に際しては、避けがたい不確定性が存在するため、確定値として予測値を得ることは理論上不可能である。したがって、照査結果は、許容残留沈下量の超過確率という形で整理される。また、超過確率と破壊損失費用との積をとることによって、リスクが算定され、さらに、リスクと構造物の維持管理・改修費用を導入することによってライフサイクルコストが算定される。この、ライフサイクルコストを基に、最適な構造物の改修方法、改修までの供用期間、維持管理方法を検討することが、今後の合理的な設計法であると考えられる。

著者は、従来から、観測値に基づいた変位予測法に関する研究を行ってきた。これらの主な成果は、Nishimura et al. (2002, 2005) でまとめられている。この中で、圧密硬化、せん断による剛性の劣化、誘導異方性を考慮した変位予測法を開発している。ただし、これらの研究では、残留沈下は考慮されていない。また、西村ら (2001, 2006) では、いわゆる二次圧密の予測も行っているが、これらの成果では、沈下挙動のひずみ速度依存性が明確にはモデル化されていない。今回は、新たな試験装置を作成し、特に、この点を考慮したモデル化を行った。

引用文献

西村伸一・藤井弘章：実測値に基づく二次圧密を考慮した圧密沈下予測，農業土木学会

論文集，第216号，pp.71-79(2001)

Nishimura, S., Shimada, K. and Fujii, H.:

Consolidation inverse analysis considering spatial variability and non-linearity of soil parameters, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.3, pp.45-61(2002)

Nishimura, S., Nishiyama, T. and Murakami, A.:

Inverse analysis of soft grounds considering and nonlinearity and anisotropy, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.2, pp.87-95(2005)

西村伸一・日高健寿：分割型圧密試験に基づく二次圧密を考慮した沈下予測モデルの開発，農業土木学会論文集，第241号，pp.97-105 (2006)

2. 研究の目的

(1) 粘性土のひずみ速度依存性のモデル化

モデル化のためには、詳細な実験を行う必要があるが、ここでは、第一に、試験装置の開発を行う。ひずみ速度依存性の圧密挙動の同定のためには、連結型圧密試験装置が有効である。今回は、この試験装置を定圧载荷、定ひずみ速度载荷の両方に対応できるものとする。前者は、実際の現地の圧密に近い载荷条件を再現できるのに対し、後者は、ひずみ速度依存性挙動を詳細に検討するのに適している。さらに開発した試験装置を用いて長期圧密試験を行ない、ひずみ速度依存性挙動を的確に表現し、長期残留沈下（二次圧密）を予測できるモデルを検討する。

(2) 残留沈下量の予測法の開発

本研究では、現地計測結果から、土構造物や地盤の材料定数を同定し、将来の残留沈下を予測する方法を検討するため、逆解析に対応した解析コードを目指すものとする。開発したコードを用いて、各種の圧密試験結果や、現地実測値に基づいて長期残留沈下を予測す

る。また、予測に対して有効な現地計測（変位計測，水圧計測）についても検討する。

(3) 残留沈下に対応したリスク評価・ライフサイクルコストの算定

残留沈下の予測値には不確実性が介在するため，許容変位に対する超過確率を次式で算定する。

$$P_f(t) = \text{Prob}[S(t) > S_a] \quad (1)$$

Prob: 確率 $S(t)$: 時間 t における予測沈下量

S_a : 許容沈下量

これから，ライフサイクルコストが次式で算定されることになる。

$$LCC(t) = C_0 + C_M(t) + C_F(t)P_f(t) \quad (2)$$

C_0 : 初期建設コスト C_M : 維持管理コスト

C_F : 残留変位が許容値を超えた場合の損失

実構造物を対象に，LCCの計算を行い，これを最小にする供用期間に対する最適な維持管理・改修方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 粘性土のひずみ速度依存性のモデル化

① 定圧・定ひずみ速度両用連結型圧密試験装置の開

開発する圧密セルを図-1に示す。また，このセルは連結されており，間隙水がセル間を行き来する。連結数は，4連を予定しており，末端のセルが排水面もしくは非排水面となる。この試験装置の特色は，圧密中の試料内部の間隙水圧やひずみ分布を知ることができることである。試験装置は，定圧・定ひずみ速度・定ひずみ速度・定ひずみ速度のどちらの制御にも対応できる構造となっている。前者の制御には空気圧制御装置，後者の制御にはACサーボモーター方式制御装置を用いる予定である。

② 圧密試験およびモデル化

作成した試験機を用いて圧密試験を実施する。使用する試料は，低塑性材料としてカオ

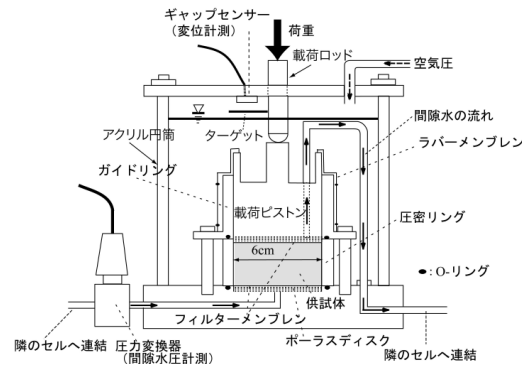


図-1 連結型圧密試験機

リン粘土，高塑性材料として，笠岡海成粘土を用いる。これによって，粘性土のひずみ速度依存性および，長期残留沈下特性（二次圧密特性）を明らかにする。さらに，これらの挙動を満足するモデル化を行う。留意点は，モデル化の目標を長期変位予測対応に特化することである。これによって，モデルを簡略化でき，パラメータ数を減らすことができる。一般に，現地では，変位と間隙水圧が計測されるので，モデルパラメータは，これらの計測値から同定可能となるように配慮する必要がある。

(2) 残留沈下量の予測法の開発および解析

土・水連成有限要素法に(1)において提案したモデルを導入する。また，実測値からモデルパラメータが同定可能となるように逆解析が可能なコードとする。逆解析手法としては，非線形最小自乗法および粒子フィルタを用いるものとする。

実施した定圧試験結果に対して，比較的早期の観測結果から長期の二次圧密を予測し，解析手法の有効性を確認する。

(3) 残留沈下に対応したリスク評価・ライフサイクルコストの算定

変位予測値は，不確実性を含むため，確定値としては得られない。このために，予測結果は，許容残留沈下量の超過確率という形で得られる。確率の算定のために，モンテカル

口法を実施する。さらに、残留沈下が、許容値越えた場合を想定して、構造物の損失費用を推定する。これに基づき、ライフサイクルコストが算定できる。最終的に、ライフサイクルコストを最小にする、最適な構造物の改良工法について検討する。

4. 研究成果

(1) 研究の具体的成果

① 連結型圧密試験機の開発および圧密試験研究目的で、示したとおりの試験機を開発し、これを用いた圧密試験を実施した。最終的に、試験機は、図-1のものが4連結される形となった。第一に、低塑性で、透水性の高いカオリン粘土を材料に選び、数回の試験を実施し、粘性土のひずみ速度依存性について考察を行った。さらに、高塑性の会成粘土を用いて長期の試験を行い、これに基づいて、二次圧密の予測法の検討を行った。

② 二次圧密を含めた簡易沈下予測法の開発
逆解析に対応できる簡便な手法の開発を目指し、弾・粘性モデルを採用した。地盤の二次圧密を考慮した場合、時間 t における地盤の沈下量 $S(t)$ は式(3)によって求めることができる。すなわち、時間 t における一次圧密沈下量と二次圧密沈下量をそれぞれ $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 、沈下量 $S(t)$ は式(3)で与えられる。ここでは、二次圧密は、間隙比の減少速度 $-\dot{e}$ が限界値 $-\dot{e}_0$ を下回ったときに生じるものと仮定している。

$$S(t) = S_1(t) \quad (-\dot{e}_0 < -\dot{e}) \quad (3)$$

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t) \quad (-\dot{e}_0 \geq -\dot{e})$$

本研究では、 載荷条件や、境界条件が複雑な場合も対応できることを考慮して、一次圧密量を求めるために線形弾性理論に基づいた有限要素法を用いている。一次圧密を支配するパラメータは、体積圧縮係数 m_v および透水係数 k である。二次圧密部分の沈下解析には二次圧密開始時間 (log t 法結合時間) を

t_a とすると、式(4)で与えられる。

$$S_2(t) = r_a m_v H \cdot \ln\left(\frac{t}{t_a}\right) \quad (4)$$

$$t_a = t \Big|_{\dot{e} = -\dot{e}_0}$$

二次圧密の変形特性をあらわすパラメータとして、二次圧密係数比 r_a を定義し、かつ $-\dot{e}_0$ と r_a 同定することを提案している。

上記の手法の応用として、道路盛土を対象に、沈下量から二次圧密のパラメータを同定し、同定されたパラメータに基づき、将来沈下が限界値を超える確率を評価した。なお、パラメータの同定法としては粒子フィルタを用いている。これに基づき、対策案を考慮したライフサイクルコストの算定を行い、信頼性設計を実施した。

(2) 得られた成果の国内外の位置づけ

地盤のひずみ速度依存性挙動や、二次圧密に関する研究は、従来から進められてきたものである。今回は、計測結果からパラメータを同定するために、簡略なモデルを目指している点が新しい点であり、国内外を問わず同等の研究は見られない。

(3) 今後の展望

信頼性解析において、将来沈下量の超過確率の算定のためには、観測誤差の評価が欠かせないが、現在のところ、このための有効な方法が存在しない。今後は、何らかの設定法を整理していく必要がある。また、実際の性能設計での本手法の適用例を増やしていき、信頼性設計の理念を実際の設計思想に根付かせることが今後の最も重要な課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① 珠玖隆行・西村伸一・村上 章・藤沢和謙：
土構造物の信頼性設計における粒子フィルタの適用，水土の知，Vol.79, No.5，
pp.345-348 (2011) 査読有り

- ② Nishimura, S., Shyuku, T. and Fujisawa, K.: Prediction of multi-dimensional consolidation behavior based on the observed values, Computer Methods for Geomechanics: Frontiers and New Applications, Proc. of 13th IACMAG, Vol.1, pp.106-111 (2011) 査読有り
- ③ 珠玖隆行・村上 章・藤澤和謙・西村伸一: 地盤解析におけるデータ同化, 地盤工学会誌, Vol.59, No.3, pp.8-11 (2011) 査読有り
- ④ 西村伸一・藤原身江子・工藤健雄・内藤秀信・与那城稔・土屋善浩・高山裕太: 河川堤防の安全性評価に向けた強度分布の推定方法, 地盤と建設, Vol.28, No.1, pp.39-45 (2010) 査読有り
- ⑤ Nishimura, S., Fujisawa, K. and Murakami, A.: Reliability-based design of earth-fill dams based on the spatial distribution of strength parameters, Georisk, Vol.4, No.3, pp.140-147 (2010) 査読有り
- ⑥ 珠玖隆行・村上 章・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸: 粒子フィルタによる神戸空港島沈下挙動のデータ同化, 応用力学論文集, Vol.13, pp.67-77 (2010) 査読有り
- ⑦ 西村伸一・森 俊輔・藤澤和謙・村上 章: 豪雨時の越流破堤に対するため池堤体の信頼性設計, 土木学会応用力学論文集, Vol.12, pp.89-97 (2009)
- ⑧ 村上 章・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸・樋口知之: 粒子フィルタによる地盤解析のデータ同化, 土木学会応用力学論文集, Vol.12, pp.99-105 (2009) 査読有り
- ⑨ 西村伸一・清水英良: 期待総費用最小化理論に基づく干拓堤防の最適液状化対策, 地盤工学会誌, Vol.57, No.3, pp.26-29 (2009) 査読有り
- ⑩ 村上 章・西村伸一・鈴木 誠・森 充広・倉田高士・藤村達也: 開水路基礎の支持力問題における信頼性解析, 農業農村工学会論文集, 第 260 号, pp.175-181 (2009) 査読有り
- ⑪ 村上 章・西村伸一・鈴木 誠・森 充広・倉田高士・藤村達也: 開水路基礎の支持力照査における部分安全係数の算定, 農業農村工学会論文集, 第 259 号, pp.71-78 (2009) 査読有り
- ⑫ Nishimura, S. Mori, S.: Risk evaluation and reliability-based design of earth-fill dams for overflow due to heavy rains, Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, Furuta, H., Frangopol D. M., Shinozuka, M. (eds.), Proc. of ICOSAR2009, pp.246-251 (2009) 査読有り
- ⑬ Murakami, A. Nishimura, S., Suzuki, M., Mori, M., Kurata, T. and Fujimura, T.: Determination of partial factors for the verification of the bearing capacity of shallow foundations under open channels, Geotechnical risk and safety, Proc. IS-Gifu 2009 (2009) 査読有り
- ⑭ Nishimura, S., Murakami, A. and Fujisawa, K.: Risk evaluation and reliability-based design of earth-fill dams, Prediction and simulation methods for geohazard mitigation, Proc. of IS-Kyoto2009, pp.547-552 (2009) 査読有り
- [学会発表] (計 20 件)
- ① 村上 章・片岡資晴・珠玖隆行・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸: 粒子フィルタによる実地盤挙動のデータ同化, 平成 22 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 (神戸市, 8 月 31 日-9 月 2 日), pp.316-317 (2010.8.)
- ② 西村伸一・近藤祐介・藤澤和謙: 堤体物性値の不確定性を考慮した洪水解析, 平成 22 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集 (神戸市, 8 月 31 日-9 月 2 日), pp.316-317 (2010.8.)
- ③ 高山裕太・西村伸一・鈴木 誠・村上 章・藤澤和謙: インディケータシミュレーションによる表面波探査とサウンディング試験結果に基づく N 値の合成, 第 45 回地盤工学研究発表会 in 松山 (松山市, 8 月 18-20 日), pp.73-74(2010.8.20)
- ④ 珠玖隆行・村上 章・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸: フィルタ特性が地盤挙動のデータ同化結果に及ぼす影響, 第 45 回地盤工学研究発表会 in 松山 (松山市, 8 月 18-20 日), pp.759-760(2010.8.19)
- ⑤ 片岡資晴・村上 章・珠玖隆行・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸: 粒子フィルタを用いた地盤挙動観測値のデータ同化, 第 45 回地盤工学研究発表会 in 松山 (松山市, 8 月 18-20 日), pp.761-762(2010.8.19)
- ⑥ 西村伸一・土居慶彦・藤澤和謙: 二次元圧密模型実験とモデルパラメータの同定, 第 45 回地盤工学研究発表会 in 松山 (松山市, 8 月 18-20 日), pp.741-742(2010.8.18)
- ⑦ 西村伸一・高山裕太・鈴木 誠・村上 章・藤澤和謙: サウンディングと表面波探査に基づく堤体の N 値推定 -インディケータシミュレーション法の利用-, 第 24 回信頼性シンポジウム (大阪市, 12 月 10-11 日) (2009.12.11)
- ⑧ 西村伸一・高山裕太・村上 章・藤澤和謙・鈴木 誠: サウンディングと表面波探査に基づく N 値推定, 第 64 回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集 (徳島市, 10 月 28 日), pp.115-117 (2009.10.28)
- ⑨ 土居慶彦・西村伸一・村上 章・藤澤和謙: 模型実験による二次元圧密挙動の考察と最適化手法によるパラメータ同定, 第 64 回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集 (徳島市, 10 月 28 日), pp.124-126

(2009.10.28)

- ⑩ 西村伸一・高山裕太・鈴木 誠・村上 章・藤澤和謙：表面波探査とサウンディング試験結果の合成による盛土強度の空間分布推定，第44回地盤工学研究発表会 in 横浜，（横浜市，8/18-8/21），pp.133-134 (2009.8.19)
- ⑪ 村上 章・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸・尾崎曹斗：粒子フィルタを用いた地盤挙動のデータ同化，第44回地盤工学研究発表会 in 横浜，（横浜市，8/18-8/21），pp.849-850 (2009.8.18)
- ⑫ 村上 章・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸・亀谷 聡・珠玖隆行：局所載荷模型実験における変形計測値のデータ同化，第44回地盤工学研究発表会 in 横浜，（横浜市，8/18-8/21），pp.851-852 (2009.8.18)
- ⑬ 高山裕太・西村伸一・鈴木 誠・村上 章・藤澤和謙：表面波探査とサウンディング試験結果の合成による盛土強度の空間分布推定，平成21年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集（つくば市，8月4-6日），pp.626-627 (2009.8.6)
- ⑭ 亀谷聡・村上章・西村伸一・藤澤和謙・珠玖隆行・尾崎曹斗：粒子フィルタによる地

盤の弾塑性パラメータ同定，平成21年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集（つくば市，8月4-6日），pp.622-623 (2009.8.5)

- ⑮ 西村伸一・森俊輔・藤澤和謙・村上 章：豪雨時の越流被害に対するため池堤体の信頼性設計，平成21年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集（つくば市，8月4-6日），pp.598-599 (2009.8.5)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 伸一 (NISHIMURA SHINICHI)
岡山大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号：30198501

(2) 研究分担者

村山 八州雄 (MURAYAMA YASUO)
岡山大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号：20346414
村上 章 (MURAKAMI AKIRA)
京都大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号：80157742