

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420506

研究課題名(和文) 静電容量式センサによる浸水・空洞化モニタリングと空洞化危険度指標の提案

研究課題名(英文) capacitive sensors for submersion and cavitation monitoring and suggestion of cavitation risk index

研究代表者

上野 勝利 (Ueno, Katsutoshi)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：70232767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：堤防、護岸、道路盛土や舗装内部への浸水と排水の繰り返しにより、地中に空洞が形成され、ある時陥没する事故が発生している。そこで、模型実験を行い空洞の発生から陥没に至るまでの過程を実験室内で再現し、メカニズムを明らかにした。地中に埋設した単純な電線をセンサとし、水浸と空洞化を検知する方法を2つ開発した。一つの方法は電線の静電容量変化に着目したものであり、もう一つは高周波信号の反射から水浸・空洞化位置を同定する方法である。開発した計測方法を現場計測に適用し、装置の改良とデータの蓄積を行っている。さらに空洞の規模と位置により、地盤の支持力がどの程度低下するか、数値解析により求める方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Sudden collapse of the hidden cavities occurs due to cyclic submersion and drainage history in earth structures, such as levees, quay walls, road embankments and pavements. A series of model tests of quay walls was conducted to clarify the sequence of cavitation from generation to collapse. Two monitoring methods using a couple of simple buried electric wires were developed: one was based on changes in capacitance of the coupled wires, and another was a kind of reflectometry, called "closed circuit rader". In-situ measurement of ground water level have been continued to compile data and knowledge for improvements of the developed monitoring system.

The influence of size and position of the cavities on the bearing capacity was examined by an elastic-perfectly plastic FE analysis. The diagram showing the relationships between the degree of deterioration of bearing capacity and size and position of the cavities were proposed.

研究分野：地盤工学

キーワード：空洞 護岸 支持力 地すべり 静電容量型センサ 閉回路レーダー モニタリング 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

昨今の極端気象の影響によって、地盤災害や土構造物の被害がたびたび発生している。図1は平成23年台風6号によって被災した、ある防潮堤(延長520m)の様子を示したものである。この台風による高潮により、防潮堤のつま先部分が洗掘され、およそ200mに渡り転倒や前面への大きな孕み出しが生じた。その結果、護岸の背面の自転車道路には、縦断方向に顕著なクラックが発生した。図1に示す箇所では、護岸は転倒しなかったものの、裏込め土が流失して空洞が形成され、自転車道路のコンクリートスラブが崩落した。隣接する家屋にも影響が生じた。付近の河川の河口の防潮堤では、つま先が露出し、裏込め土が排出され、護岸背面にポットホール型の陥没孔が形成された。

このような被害は一回の台風によって健全な状態から一気に発生したとは限らず、過去の高潮によって浸水・排水履歴を受け、裏込め土が徐々に流亡していき、ある時点で終局的な崩壊に至った可能性も考えられる。実際、この現場でも過去に防潮堤が高潮の被害を受けており、古い防潮堤の前面に矢板を打ち、防潮堤を補修し拡張していた。

海岸侵食を受ける地点は、再び同じ被害に見舞われる可能性が高い。補修時に図2のようにセンサを埋め込み、浸水や空洞化をモニタリングし、初期の段階で補修を行うことができれば、維持管理コストの低減が期待できる。



図1 護岸の空洞化

モニタリング案2

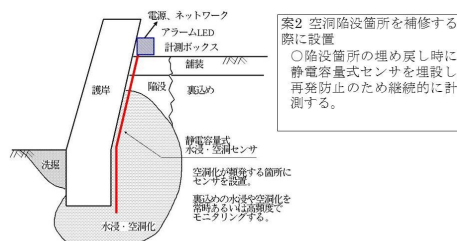


図2 モニタリング案

このような空洞化の調査には、これまで地中レーダによる探査が行われてきた。しかしながら、反射波形の解釈には経験を積んだ技

術者が必要であり、先見情報のない状態からの空洞判定は難しいのが現状である。また頻度の高いサイトであっても高々年1回程度の調査であり、急激な浸水や空洞化のイベント発生時に対応することも難しい。単発的な調査ではなく、図2に示すように、護岸の裏込め内にセンサを埋設し、常時モニタリングを実施し、浸水や空洞化を早い段階で検知することができれば、軽微な補修で対応が可能となる。あるいは急激な含水比変化などを事前に探知できれば、崩壊の前兆を捕らえた適切な避難情報の提供が期待できる。一方、護岸や堤防、道路などの長延長な土構造物に対して常時モニタリングを行うためには、計測点が多点となるため、廉価なセンサと計測機器が必要である。そしてモニタリング結果から、空洞化の危険性を判定する方法が必要である。

2. 研究の目的

昨今の極端気象の影響によって、地盤災害や土構造物の被害がたびたび発生している。土の変形強度特性の劣化や、排水時の土砂流失による空洞発生など、土構造物の浸水・漏水による被害を防ぐためには、土構造物内部の水分状態の継続モニタリングが必要である。盛土、舗装、護岸など長延長な構造物に対応可能な方法を開発することが必要である。

空洞の発生は、繰り返し生じる土構造物内への浸水と排水に起因していると考えられる。そこで本研究では次の目的を設定した。

(1) 浸水・排水繰り返しによる空洞化の再現

浸水・排水繰り返しによる地盤内の空洞発生を実験室内で再現し、空洞化のメカニズムを明らかにする。そして空洞の形状や位置など、センサの設置個所の検討に必要な知見を得る。

(2) 静電容量型センサの開発

地中に電極となる平行電線を埋設し、その周辺の水分変化や空洞化を静電容量変化として検出する静電容量型のセンサを開発する。特に長期間地中に埋設して使用すること、計測対象が長大であること、多数設置するためコストが低廉であることが、センサに求められている。

(3) 閉回路レーダ法による浸水・空洞箇所の検出方法の開発

地中に伝送線路を埋設し、高周波信号の応答から、伝送線路上の空洞箇所、浸水箇所を検出する方法を開発する。

(4) 空洞を有する地盤の支持力

空洞の深さや寸法と得られる支持力の関係を明らかにし、危険な空洞の判定方法を提案する。

(5) 現場計測

開発した静電容量型センサを用いて実際の現場での計測を行い、手法の検証ならびに計測データの蓄積を行う。静電容量型センサの適用範囲を広げるため、地滑り斜面の水位モニタリングも対象とする。

3. 研究の方法

(1) 空洞化の再現

矢板を銅板でモデル化し、締固めたマサ土を用いて矢板岸壁の模型地盤を作製した。矢板には損傷孔を設け、繰返し水位を上下させ、損傷孔から裏込土への繰返し浸水・排水履歴を与えた。模型地盤と矢板の状態を側面から観察し、空洞の発生過程を観察した。実験は第2年度に重力場で行い、第3年度に遠心力場で行った。

(2) 静電容量型センサの開発

地盤内に長期埋設される静電容量型センサに適した電極について検討した。絶縁材料にポリエチレンを用いたフィーダー線と、テフロン樹脂の一種であるETFEを絶縁被膜としたツイスト線を主要な電極材料として、水位計、水分計、浸水・空洞センサと用いた。また、沿岸域での使用も考慮し、塩分濃度が測定値に及ぼす影響についても検証を行った。

(3) 閉回路レーダ法の開発

U字溝を用いて延長10mの模型地盤を作製し、閉回路レーダの伝送線路となるフィーダー線を埋設した。そのフィーダー線の一端から高周波信号を給電し、フィーダー線上の特性インピーダンスの変化点からの反射信号を観測した。模型地盤の所定の位置に空洞を形成し、土中のフィーダー線を露出させ、空洞の形成を再現した。そして反射信号の到達時間から空洞の発生とその位置の検出が可能が確認した。

(4) 空洞を有する地盤の支持力

弾完全塑性モデルを援用した地盤の破壊を考慮できる有限要素法解析を用いて、空洞深さと空洞幅を変化させた一連の解析を行い、基礎地盤内の空洞深さと空洞幅が地盤の支持力に与える影響の検討を行った。用いた解析手法はあらかじめ模型実験結果によって検証している。なお、載荷幅Bは10cmとした。

(5) 現場計測

台風で被害を受けた河川堤防の復旧時に、フィーダー線を埋設していただき、閉回路レーダ法の検証準備を行っている。

石川県能美市の灯台笹地区の危険斜面において、静電容量型水位計を設置し、水位の計測を実施した。また、2015年12月には、水位計を交換し、新たに地表から1.23mの深さに水分計を設置して継続測定を行っている。

る。

4. 研究成果

(1) 空洞化の再現

図3に重力場の実験で観察された空洞の発生例を示す。また、図4に空洞の発生から天盤の崩壊に至るまでの、空洞のスケッチを示す。

損傷孔の位置が浅い場合、損傷孔から地表面まで逆四半円錐状の陥没ができた。一方、損傷孔の位置が深い場合には、損傷孔のまわりの土砂が流出し、ある幅まで空洞が発達すると天盤が崩落する。これが繰り返されると、チムニー状の陥没孔ができる。

空洞が発達する流れとして、空洞の発生、土砂の浸食、損傷孔の閉塞、水頭差の発生、土砂の流出、繰返し、天盤の崩落、という挙動が確認できた。

(2) 静電容量型センサについて、下記の知見を得た。

測定対象との接触性から、水分計測や浸水・空洞化検出には、ツイスト線よりもフィーダー線が適していた。一方水位計には、感度の高さや雑音への抵抗性から、フィーダー線よりもツイスト線が適していた。

シールド構造がなくとも雑音の影響が許容範囲である電極の延長は、フィーダー線では2m以下、ツイスト線では数m以下であった。それ以上の延長では、雑音を防ぐために電極にはシールド構造が必要であることが分かった。

水位計として用いる場合、純水を除き水道水や質量比10%までの濃度の食塩水では、塩分濃度の違いによる測定値の有意な違いは見られなかった。これは純水以外では電気伝導度に対して積分回路中の抵抗の値が十分に大きく、相対的に影響が無視できたためと理解された。

(3) 閉回路レーダ法について、下記の知見を得た。

延長10mの場合、フィーダー線の埋設位置に空洞が発生するならば、空洞の大きさが20cm程度から検出することができた。

複数の箇所空洞が発生した場合であっても、対応する箇所にそれぞれ反応を見ることができた。したがって始点近くに空洞が形成された後であっても、引き続き他の箇所での空洞検出が可能であることが分かった。

空洞化だけでなく、浸水・漏水についても該当箇所での反応を観測することができた。しかしながら、時間の経過により水が浸透・拡散し、浸水箇所の境界が曖昧となった。その結果閉回路レーダの反応も判別が難しくなった。漏水箇所の同定のためには、比較的短い時間間隔で測定する必要があることが分かった。

先端からの反応を基準に伝搬速度を推定することにより、空洞や浸水の発生箇所の推

定が可能であることを確認した。



図3 空洞化再現実験による空洞化の観察

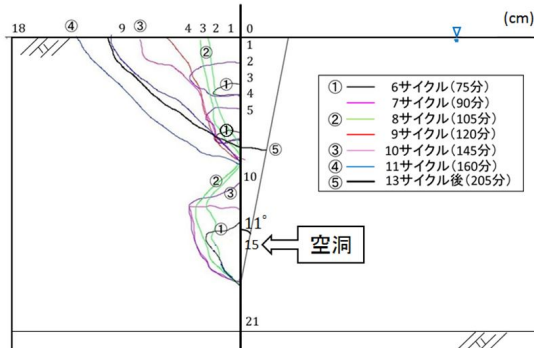


図4 観察された空洞のスケッチ

(4) 空洞を有する地盤の支持力

図5にFEM解析から得られた、正規化空洞深さ D/B と、空洞を有する地盤の極限支持力の関係を示す。空洞深さが深くなるにつれて極限支持力が大きくなり、正規化空洞深さ D/B が1.9の時(空洞幅3cmの場合) 空洞なしの支持力と同程度となり、空洞深さの影響がなくなった。この結果は、図6に示す $D/B=1.9$ のケースの最大せん断ひずみ分布からも、空洞なしの地盤の破壊形態(プラントルすべり線)とよく似ていることが確認できる。空洞の深さを $D/B=2.3$ と一定に保ち空洞幅を変化させた場合、空洞幅の影響がなくなったのは、正規化空洞幅が W/B 0.4 のときであった。

(5) 現地計測

現地計測では、昨年度は夏季の降雨量が少なく有効なデータが少なかったが、これまでの計測結果から、次のことが明らかになった。

10mm/h を超える比較的強い雨が降っても、数時間の降雨であれば地下水位の変動は少ない。

逆に10mm/hを下回る弱い雨でも、2日以上続くと地下水位への反応が大きくなる。

積雪のある厳冬期の地下水位が年間を通

じて一番高い。

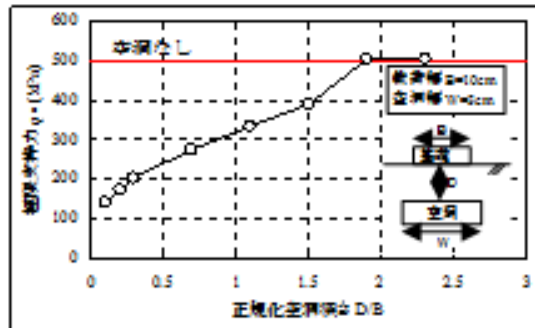


図5 極限支持力と正規化空洞幅 D/B の関係

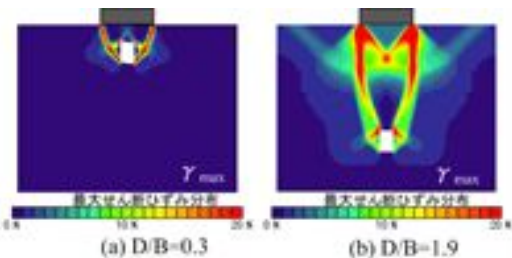


図6 FEM解析による空洞を有する地盤の支持力解析結果(最大せん断ひずみ分布)



図7 静電容量型水位計による地下水位計測結果のWEBページによるリアルタイムのデータ公開(暫定)

現地計測期間のみのデータでは、斜面の危険度を判定することが難しいため、計測期間内の降雨と地下水位の変化の関係を、並列タンクモデルを用いたモデル化により定式化した。この関係式を元に、1kmメッシュで提供されるようになったレーダー・アメダス解析雨量の2006年からの雨量から地下水位の過去の変動を予測し、その最大値を暫定の基準とし、危険度を判定する方法を提案した。

また、地表から1.23mに新たに設置した水分計の測定期間は短い、水位の上昇とは位相差が確認できており、地下水位が受ける地表からの浸透の影響と地下水脈として変化とを適切に評価できる可能性が示唆されている。

住民の皆さんへの周知方法としては、現在

暫定版ではあるが、図7に示すWEBページによるリアルタイムのデータ公開を通じて危険度を認識していただくことを検討している。現在、地元住民の皆さんとの協議に基づき公開画面の構築を進めているところであり、順調に長期計測の成功と、計測機器の安定性向上ならびに研究成果の還元と進んでいる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

LIN Wenli, Katsutoshi UENO, Ryosuke UZUOKA, Hisashi SUZUKI, Development of Capacitance Displacement Monitoring System and its Performance Tests, J. of Geomate, 査読有, Vol. 10, Issue 21, 2015, pp.1956-1963.

Katsutoshi Ueno, Shokkheang Sreng, Koji Kobayashi, Surface kinematometry by image processing for geotechnical model tests, ICPMG 2014 Physical modelling in Geotechnics, 査読有, Vol. 1, 2014, pp.337-343.

上野 勝利、高原 利幸、土構造物の維持管理のための静電容量式水浸・空洞化センサの開発、ケミカルエンジニアリング、査読なし、59巻3号、2013、pp.54-60.

〔学会発表〕(計21件)

近藤 健太、高原 利幸、上野 勝利、危険斜面における地下水位測定を基にした危険度推定に関する研究、第51回地盤工学研究発表会、2016

若林 佳汰、高原 利幸、地質区分を援用した土砂災害警戒情報基準に関する研究、第51回地盤工学研究発表会、2016

古田 真、高原 利幸、PL値を用いた液状化危険度評価における影響因子の検討、第50回地盤工学研究発表会、2015

高原 利幸、和田 滉平、上野 勝利、危険斜面における地下水位の直接測定と土壤雨量指数の比較、第50回地盤工学研究発表会、2015

黒木 孝洋、高辻 祐紀、上野 勝利、渦岡 良介、鈴木 壽、繰り返し载荷を受けた浅い基礎の支持力・変形挙動、第50回地盤工学研究発表会、2015

谷垣 嘉基、上野 勝利、渦岡 良介、阿南 悠佑、防潮堤の転倒対策工のための矢板根入れ深さの検討、第50回地盤工学研究発表会、

2015

スレン ソッキアン、上野 勝利、小林 浩二、サブピクセル精度の画像解析手法を用いた遠心模型実験における地盤変位の計測、第50回地盤工学研究発表会、2015

阿南 悠佑、大住 俊揮、矢上 千尋、上野 勝利、渦岡 良介、鈴木 壽、水位変動による損傷孔を有する矢板裏込めの空洞化実験、第50回地盤工学研究発表会、2015

Katsutoshi UENO, Development of capacitance type sensors to detect cavity formation and its laboratory test, Technical Workshop on Current Geotechnical Topics, MOU program of NK & ITC in cooperation with the University of Tokushima, 2014

SRENG Sokkheang, Formation of under-road cavity and its stability, Technical Workshop on Current Geotechnical Topics, MOU program of NK & ITC in cooperation with the University of Tokushima, 2014

野々垣 遥也、上野 勝利、空洞を検知する閉回路レーダ法の開発 - 屋外暴露実験、第49回地盤工学研究発表会、2014

福田 典紀、大住 俊揮、上野 勝利、水位上昇により転倒した防潮堤の対策工に対する遠心模型実験、第49回地盤工学研究発表会、2014

高原 利幸、PL値を用いた液状化危険度評価におけるボーリング本数の影響、第49回地盤工学研究発表会、2014

上中 正好、野々垣 遥也、内藤 恵太、上野 勝利、静電容量式空洞センサの塩分濃度の影響、地盤工学会四国支部平成25年度技術研究発表会、2013

原 勝哉、笹田 宏紀、上野 勝利、橋本 親典、渡邊 健、粒状体・流体連成によるフレッシュコンクリートの流動解析、土木学会第68回年次学術講演会、2013

高原 利幸、大塚 悟、保坂 吉則、大河津 分水旧可動堰の木杭支持力調査、土木学会第68回年次学術講演会、2013

下河 太一、居上 靖弘、渦岡 良介、上野 勝利、鈴木 壽、軟弱粘性土地盤の変形による盛土の水分・応力状態に関する遠心模型実験、第48回地盤工学研究発表会、2013

野々垣 遥也、上野 勝利、鈴木 大夢、高原利幸、閉回路レーダー法による地下空洞の検知実験、第 48 回地盤工学研究発表会、2013

上野 勝利、松井 雄揮、石川 翔太、高原 利幸、地中埋設を考慮した単純な静電容量型浸水・空洞化センサ、第 48 回地盤工学研究発表会、2013

スレン ソッキアン、上野 勝利、小林 浩二、向井 健次郎、紅野 良太、サブピクセル精度の画像解析手法を用いた遠心力模型実験における地盤変位の計測、第 48 回地盤工学研究発表会、2013

②高原 利幸、杉本 利英、伝達関数の形状を考慮した固有値指標と地震時堤防被災の関係に関する研究、第 48 回地盤工学研究発表会、2013

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 1 件)

名称：未公開のため省略
発明者：上野 勝利ほか 3 名
権利者：国立大学法人徳島大学、他 1 社
種類：特許
番号：特願 2016-54522 号
出願年月日：平成 28 年 3 月 17 日
国内外の別：国内

取得状況 (計 1 件)

名称：静電容量型水分計および水位計
発明者：上野 勝利
権利者：国立大学法人徳島大学
種類：特許
番号：特許第 5688731 号
取得年月日：平成 27 年 2 月 6 日
国内外の別：国内

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野 勝利 (UENO, Katsutoshi)
徳島大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：7 0 2 3 2 7 6 7

(2) 研究分担者

高原 利幸 (TAKAHARA, Toshiyuki)
金沢大学・環境デザイン学系・助教
研究者番号：2 0 3 2 4 0 9 8

スレン ソッキアン (SRENG, Sökkheang) 日本工営株式会社中央研究

所・総合技術開発部 地盤・材料グループ・
研究員

研究者番号：1 0 4 6 3 5 7 2

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()

研究者番号：