

戦-69 泥炭性軟弱地盤の地震時変形に伴う被害軽減技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 22～平 25

担当チーム：寒地地盤チーム

研究担当者：富澤幸一、林宏親、福島宏文、
橋本聖、江川拓也、梶取真一

【要旨】

近年、豪雨、豪雪、大規模地震などによる地盤災害が多発しており、安全・安心な暮らしを守る社会資本整備が強く求められている。特に、大規模地震が発生した際、既設の土木構造物は大きく被災した事例が数多く認められている。北海道には脆弱な泥炭性軟弱地盤が広く分布するが、そこに築造された盛土（道路盛土や河川堤防）や構造物基礎の動的な力学挙動の詳細は未だ明らかになっておらず、地震時の泥炭層の変形に起因する盛土や構造物基礎の補強技術の確立が求められている。そこで、本研究では、泥炭性軟弱地盤における既設土木構造物（盛土・基礎）の地震時変形に伴う被災軽減技術の確立を目的に、室内実験・数値解析を主体に、現場条件に応じた盛土・基礎の合理的耐震補強工法を検討した。

その結果、泥炭の動的変形特性について、基本的な特性が明らかとなった。また、泥炭性軟弱地盤中の杭基礎の地震時挙動を検討し、既設基礎の耐震補強技術として、性能規定設計を考慮した耐震照査フローを策定した。

キーワード：泥炭、地震、盛土、杭基礎、軽減技術

1. はじめに

近年、日本において大規模地震が多発しており、既設土木構造物（盛土・基礎）も被災している。そのため、安全・安心な社会資本整備の構築が求められてきている。特に、北海道には脆弱な泥炭性軟弱地盤が広く分布するが、そこに築造された既設土木構造物（盛土・基礎）の地震時の被災軽減技術および合理的耐震補強工法を早期に用意する必要がある。

以上の背景を受けて、本研究では、泥炭の室内実験や数値シミュレーションなどを実施し、泥炭性軟弱地盤の地震時変形挙動を検討した。さらに、既設基礎の耐震性能評価および耐震補強技術として、現行の性能規定設計を考慮した耐震照査フローを策定した。

2. 泥炭性軟弱地盤の地震時変形の評価

2. 1 泥炭性軟弱地盤上の盛土の地震被害事例

1993 年釧路沖地震によって、河川堤防および道路盛土に大規模な被害が生じた。代表的な被害事例として、十勝川統内地区築堤の被害が挙げられる（図 1、写真 1）¹⁾。天端および堤外側のり面上部が約 2～3.5m 沈下し、築堤法線方向の大きな開口亀裂がみられた。これ以外の地震においても、泥炭性軟弱地盤上の盛土に大きな被害が報

告されている²⁾³⁾⁴⁾。

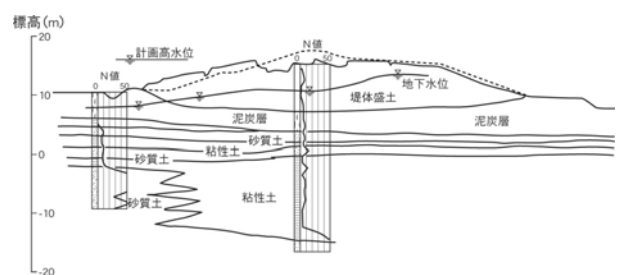


図1 1993 年釧路沖地震における十勝川統内築堤 (KP32.7) の被災断面
文献1)を基に一部修正



写真1 1993 年釧路沖地震における十勝川統内築堤の被災状況

これらの大きな変状は、泥炭性軟弱地盤における地震動の増幅だけでは説明できないと考えられる。そこで、一般研究「泥炭性軟弱地盤における盛土の耐震補強技術に関する研究（平成 18 年度～21 年度）」において、そのメカニズムについて検討した結果、沈下して地下水位以下に埋没した盛土層（以下、沈下盛土層）の圧縮、泥炭層の側方への変形ならびに沈下盛土層での過剰間隙水圧の発生による盛土のり尻付近の泥濘化が複合的に作用した結果であることがわかった。また、沈下盛土層の液状化については、その簡易的な予測法を明らかにした。しかし、泥炭性軟弱地盤の変形については、不明なままであるので、本研究において検討することとした。

2. 2 泥炭の動的変形特性

地震による泥炭の変形特性に関する研究^{5)~9)}は、砂質土や粘性土などに比べ研究事例が極めて少なく、未だ不明確な部分を残しているのが現状である。そこで、不攪乱泥炭に対して繰返し三軸試験および繰返しねじりせん断試験を行い、動的変形特性を調べた。

2. 2. 1 繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験の比較

植物繊維が水平に堆積し、強い構造異方性を有する泥炭に対しては、供試体の 45 度面に繰返し荷重が作用する三軸試験よりも繰返しねじりせん断試験の方が適している可能性がある。よって、繰返しねじりせん断試験と従来良く用いられてきた繰返し三軸試験結果を比較した。なお、実験方法については、文献 10) に詳しい。

図 2 に繰返しねじりせん断試験から得た等価せん断剛性率 G を繰返し三軸試験の G で除した比率とせん断ひずみの関係を有効拘束圧ごとに示す。1%以下のせん断ひずみにおいて、ねじりせん断試験の G は三軸試験結果の 75%～80%であった。それより大きいせん断ひずみでは、60%～70%となった。これは、泥炭特有の構造異方性の影響が顕著に現れたものと考えられる。ねじりせん断試験では、水平面に繰返し荷重が作用することから、実際に近い状況と考えられる。

2. 2. 2 異方圧密応力比が泥炭の動的変形特性に与える影響

砂質土や粘性土の試験の場合、平均有効応力 p' ($= (1+2K_0)\sigma_v'/3$: K_0 は異方圧密応力比 ($=\sigma_h'/\sigma_v'$)、 σ_h' は水平圧密応力、 σ_v' は鉛直圧密応力) を一定にすれば、異方圧密応力比の影響は無視できることが確認されている^{11) 12)}。一方、泥炭は構造異方性が強く、無機質土と比べて異なる K_0 特性を持つ¹³⁾。そこで、繰返しねじりせん断試験を行い、異方圧密応力比の違いが動的変形特性に与える影響を調べた。

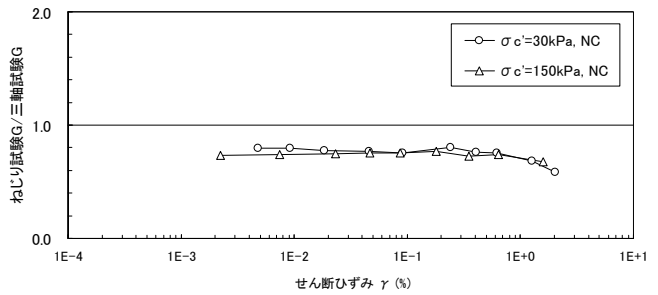


図2 二つの試験方法から得られたGの比較

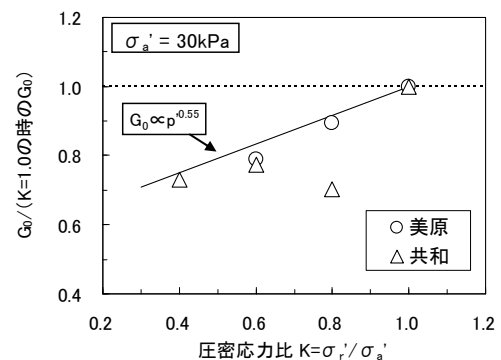


図3 軸方向応力一定の場合の異方圧密応力比と初 G_0 の比率

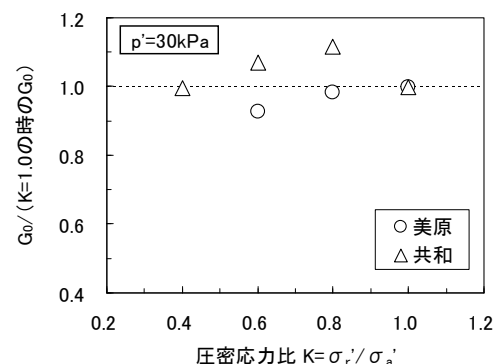


図4 平均有効応力一定の場合の異方圧密応力比と G_0 の比率

図3に異方圧密応力比と等方圧密したときの初期せん断剛性率 G_0 に対する異方圧密時の G_0 の比の関係を示す。データにばらつきはあるものの、異方圧密応力比が小さくなるに伴い G_0 が小さくなった。その傾向は、能登・熊谷⁵⁾の報告よりも顕著なことから、異方圧密応力比がせん断剛性に与える影響が強いことがわかる。したがって、原位置の有効土被り圧を軸方向応力として等方圧密で室内試験をした場合、 K_0 値が小さい泥炭ほど G_0 を過大に見積もることになる。

図4に異方圧密応力比と等方圧密したときの G_0 に対

する異方圧密時の G_0 の比の関係を整理する。異方圧密応力比に関係なく G_0 の比率は 0.93~1.1 の範囲にあった。異方圧密時の圧密応力比が変化しても平均有効応力を等しくすれば、得られる G およびそのひずみ依存性に違いはほとんどないと考えられる。

以上の結果から、泥炭の動的変形特性を得るために、繰返しねじりせん断試験を実施する場合、圧密条件を原位置での応力状態を再現した異方圧密とするか、もしくは原位置と平均有効応力を等しくした等方圧密とするのが良いと判断できる。

3. 泥炭性軟弱地盤における既設基礎の耐震性能

3. 1 基礎の耐震性能と基礎補強技術

現行の道路橋設計法では、プレート境界型や内陸直下型の大規模地震動に対して、橋脚や基礎などの構造部材は所要の耐震性能を確保するように規定されている¹⁴⁾。つまり、構造物基礎は地震時に本体の復旧に支障となるような大きな損傷や橋全体系の安全性を損なうような過大な変形を生じさせないことが重要となる。

そのため既設基礎についても、現行照査指標に照らし、基礎の耐力・変形性能が著しく小さいものや既に損傷・変形が生じているものについては、地震水平保有耐力を確保するため耐震補強を行うことが必要となる。とりわけ、泥炭性軟弱地盤はせん断強度が過小であることから、その中に施工された基礎については、近年の多発している大規模地震での被災事例を考慮し、合理的な耐震補強を講じる必要がある。

一般に、大規模地震に対して橋梁は損傷を軽減するため、橋脚本体に比べて基礎は水平保有耐力が大きいことが求められる。ただし、現在、橋脚本体や支承構造を中心に耐震補強が実施されているが、例えば橋脚を RC 巻立てなど補強した場合に、現場条件によっては基礎本体に付加が加わり、図 5 に示すように降伏耐力 P_y が以下の関係となり基礎の耐震補強が必要になるケースもある。

$$rPy < pPy$$

ここに、 rPy : 基礎の降伏耐力

pPy : 橋脚補強後の降伏耐力

特にこのようなケースでは、既設基礎の耐震性能を確保するため、必要に応じた耐震補強が必要と考えられる。

既設構造物基礎の補強技術としては、概ね以下の手法が提案されている¹⁵⁾。

1) 基礎の耐力増加工法

フーチング補強・増杭工法・地中連続増設工法など

2) 基礎周辺の地盤改良工法（液状化対策を含む）

置換工法・固結工法・地盤締固めなど

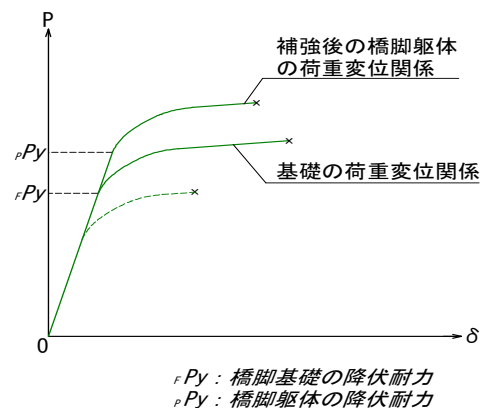
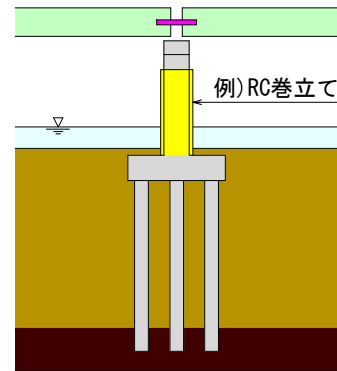


図5 基礎と橋脚降伏耐力（橋脚補強後の事例）

なお、既設基礎の耐震補強に際しては、実施の有無も含めた事由を整理し、関係機関と十分な協議を行うとともに、工法別の耐震性能の変化を解析する必要がある。

3. 2 既設基礎の耐震照査フロー

泥炭性軟弱地盤では、前記したようにその必要性に応じて、既設基礎の耐震補強を施す必要があると考えられる。そこで、現行の性能規定設計を考慮し、既設基礎の耐震照査フローを策定した（図6）。

フロー内の地質調査は、粘性土系地盤ではせん断強度および砂質土系地盤では液状化判定が主体となる。基礎の損傷・変形の調査は目視・試掘・ボアホールカメラ・IT試験などを実施することになる。また、レベル1およびレベル2地震動に対する基礎の耐力照査は、少なくとも橋脚補強と同様に、降伏耐力の確保が前提である。

本フローに従い、既設基礎の耐震補強を講じることで所要の耐震性能が確保されることが考えられるが、せん断強度が非常に小さい泥炭性軟弱地盤中の基礎補強では、基礎周辺の地盤改良工法が有効な場合もある¹⁶⁾。

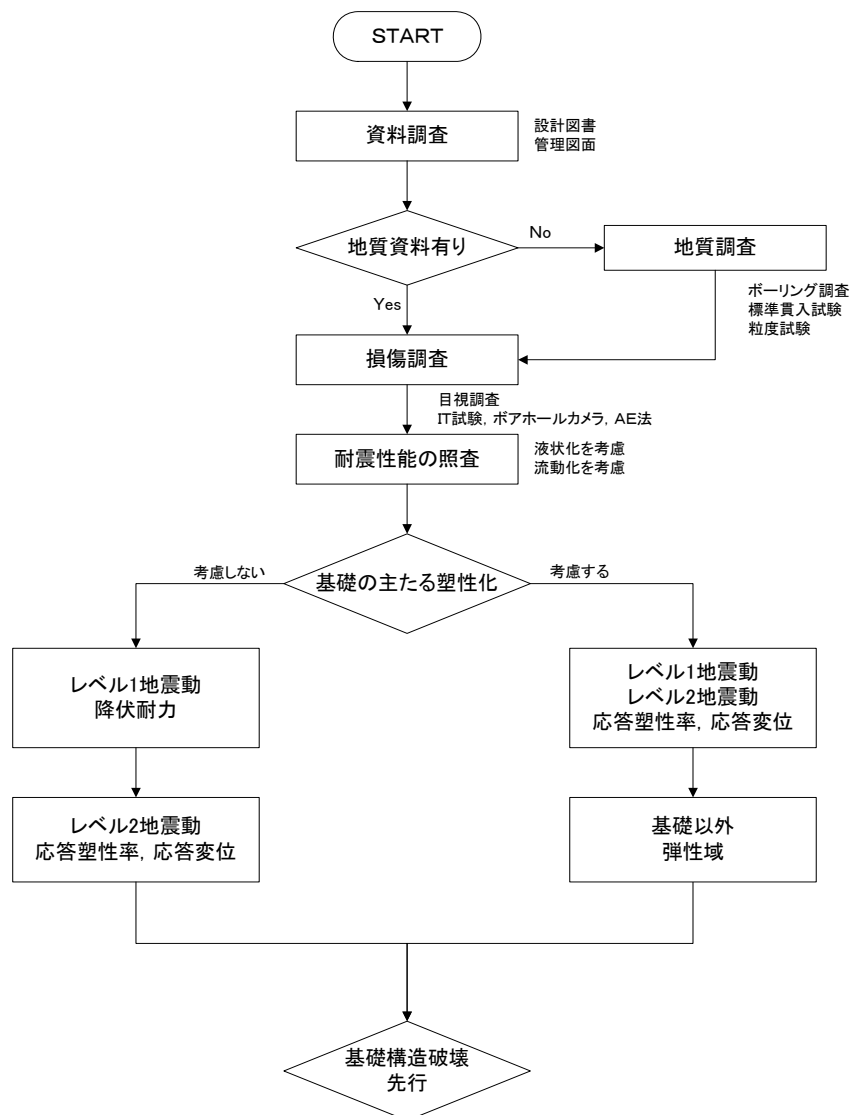


図6 既設基礎の耐震照査フロー

4. まとめ

本研究の結果を要約すると以下の通りである。

(1) 泥炭の動的変形特性について

- 1) 泥炭の動的変形試験のうち、ねじりせん断試験では、水平面に繰返し荷重が作用することから、実際に近い状況と考えられる。
- 2) 泥炭の動的変形特性を得るために、繰返しねじりせん断試験を実施する場合、圧密条件を原位置での応力状態を再現した異方圧密とするか、もしくは原位置と平均有効応力を等しくした等方圧密とするのが良いと判断できる。

(2) 泥炭性軟弱地盤における既設基礎の耐震補強技術について

- 1) 泥炭性軟弱地盤中の既設基礎は、現行照査指標に照らし、耐力・変形性能が著しく小さいものや既に損傷・変形が生じているものは、地震水平保有耐力を確保するため耐震補強を行うことが必要である。耐震補強実施の有無などは、関係機関との協議による。
- 2) 基礎耐震補強技術として、現行の性能規定設計を考慮し、既設基礎の耐震照査フローを提案した。今後の研究の継続により、泥炭性軟弱地盤における既設基礎の合理的耐震補強工法を策定する考えである。

参考文献

- 1) 北海道開発局開発土木研究所:1993年釧路沖地震被害調査報告、開発土木研究所報告第100号、pp.13-32、1993.
- 2) 北海道開発局土木試験所:1968年十勝沖地震被害調査報告、土木試験所報告第49号、pp.9-24、1968.
- 3) 地盤工学会:1994年北海道東方沖地震災害調査報告書、pp.100-105、1998.
- 4) 地盤工学会:2003年十勝沖地震地盤災害調査報告書、pp.47-69、1998.
- 5) 能登繁幸、熊谷守晃:泥炭の動的変形特性に関する実験的研究、土木試験所月報、No.393、pp.12-21、1986.
- 6) 石原研而、國生剛治、堤 千花、石田寛和:高有機質土の動的変形特性に関する研究、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ部門)、pp.167-168、2003.
- 7) Wehling, T. M., Boulanger, R. W., Arulnathan, R., Harder Jr., L. F., Torres, R. A., Driller, M. W.:Nonlinear dynamic properties of a fibrous organic soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.129, No.10, pp.929-939, 2003.
- 8) 近江健吾、森 友宏、風間基樹、渦岡良介、仙頭紀明:宮城県における高有機質土の動的変形特性、第42回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.719-720、2007.
- 9) 荻野俊寛、高橋貴之、及川 洋、三田地利之:北海道および秋田県で採取された不かく乱高有機質土の変形特性、第44回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.269-270、2009.
- 10) 林 宏親、西本 聡、梶取真一:泥炭の動的変形特性に関する検討、地盤工学会北海道支部技術報告集No.50、pp.79-84、2010.
- 11) 安田 進、山口 勇:種々の不攪乱土における動的変形特性、第20回土質工学研究発表会発表講演集、pp.539-542、1985.
- 12) Kokusho, T., Esashi, Y. and Yoshida, Y.: Dynamic Properties of Soft Clay for Wide Strain Range, Soils and Foundations, Vol.22, No.4, pp.1-18, 1982.
- 13) 林 宏親、三田地利之、田中洋行、西本 聡:泥炭性軟弱地盤の静止土圧係数とその評価、土木学会論文集C、Vol. 62、No. 1、pp.127-138、2006.
- 14) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、pp.1-46、2002.
- 15) 日本道路協会:既設道路橋基礎の補強に関する参考資料、pp.1-80、2000.
- 16) 土木研究所寒地土木研究所:北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン、pp.1-189、2010.