

オンライン地震応答実験による飽和砂地盤上の河川堤防の挙動の評価

山口大学大学院	学生員	○福田賢二郎
山口大学工学部	正員	兵動正幸・中田幸男
復建調査設計株式会社	正員	藤井照久
奥村組技術研究所	正員	日下部伸
岡山県	正員	矢吹浩祐

1.まえがき

最近の地震により飽和砂地盤上の河川堤防の崩壊が頻発しており、その対応が重要な課題となってきた。河川堤防は延長距離が長く、破堤による越流が阻止できれば一時的に多少の損壊は許容されることから、地震による変形の程度を予測する手法の確立が望まれている。本研究は、地震応答解析と要素試験を連成させたオンライン地震応答実験装置を導入し、地震時における飽和砂地盤上の河川堤防の変形及び沈下を評価することを目的としたものである。本研究では3連の単純せん断試験機を導入し、地盤の非線形な復元力を要素試験の供試体から直接求め、オンラインで応答解析に結びつけ、コンピュータ制御で実験を行った。対象は北海道南西沖地震で被災した後志利別川河川堤防であり現場で調査された河川堤防の天端沈下量と、オンライン地震応答実験により得られた地盤の累積水平変位量との比較を行った。

2.オンライン地震応答実験の概念

オンライン地震応答実験の原理を図-1に示す。このシステムは、日下部ら²⁾により6連の中空ねじりせん断試験機と連結して水平地盤の液状化の評価のために開発されたものである。まず、解析対象地盤を質点系にモデル化し、基盤面から地震動を入力する。そして、コンピュータにより質点系の振動方程式を解き、応答変位を求める。次に得られた変位に相当するせん断ひずみをコンピュータ制御により供試体に与え、その時自動計測された復元力を用いて次のステップの応答変位を計算する。この過程を地震動が継続する間繰返す。すなわち、時々刻々に変化する地盤の非線形な復元力を要素試験の供試体から直接求め、オンラインで応答解析に結びつけ、地震時の地盤の挙動をシミュレートする方法である。

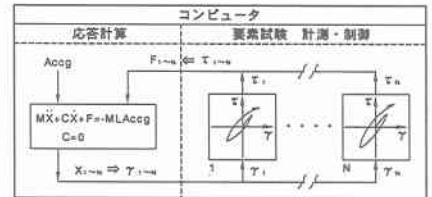


図-1 オンライン地震応答実験の概念

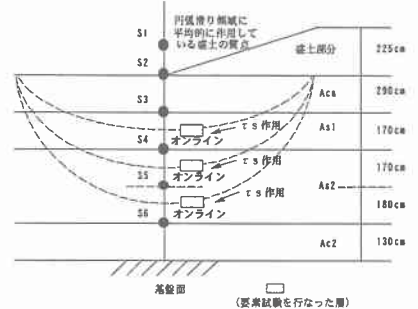


図-2 解析対象モデル図

3.実験条件

本研究では、3連の単純せん断試験機²⁾を用いて、北海道南西沖地震で被災した後志利別川河川堤防をモデルとした断面(No.1～No.5)について、オンライン地震応答実験を行った。それぞれの入力加速度は震源波形から距離減衰をもとに計算された波形を用いた。試料は豊浦標準砂を用い、それぞれの現場でサンプリングされた土の、液状化強度をもとに、等価な液状化強度になるよう相対密度を調節した。図-2は断面No.3における盛土とその周辺地盤を質点系にモデル化したものである。図のように盛土法尻付近の土層を6質点にモデル化した。この中で最上部の質点は、盛土の慣性力を与えるために設けられた質点であり図の破線より左側の部分の質量を与えた。分別された各土層のうち液状化を起こし、大変形が生じたと思われる図中のAs1層とAs2層をオンライン層とし、他の層には修正 R-O モデルを適用した解析層とした。また、盛土による初期せん断応力を考慮するため、自重による円弧滑り解析を行い、平均的な初期せん断応力比として事前に排水状態で供試体に作用させ、その状態から地震波の入力を行った。

4.オンライン地震応答実験の結果と考察

図-3に断面No.3における入力加速度波形($\alpha_{max}=182\text{Gal}$)および各質点の応答加速度波形を示している。応答加速度波形は砂層の間隙水圧上昇に伴う軟化の影響を受け、上層にいくにつれて長期化していることが認められる。また振幅を見ると基盤面から入力された加速度波形は増幅しS3層で減衰し盛土部分では再び増幅している様子が見られる。図-4は断面No.3における各オンライン層における有効応力径路を示している。いずれの図においても供試体に初期せん断を作用させているために破壊線付近まで徐々に間隙水圧が上昇し有効応力の低下が認められる。S4,S5層の有効応力径路は破壊線に

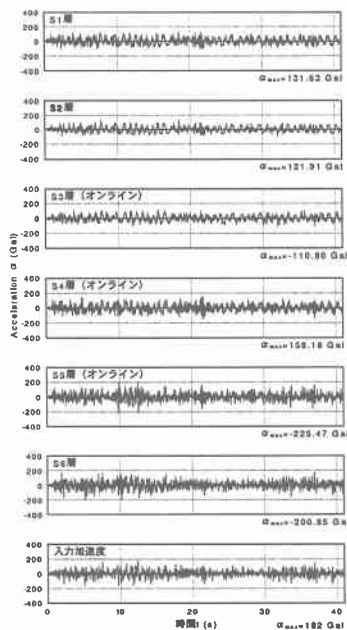


図-3 入力加速度と応答加速度

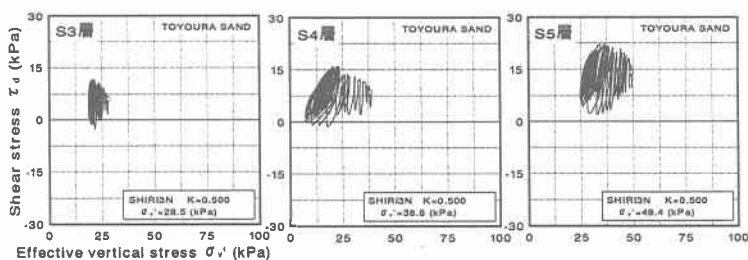


図-4 有効応力経路

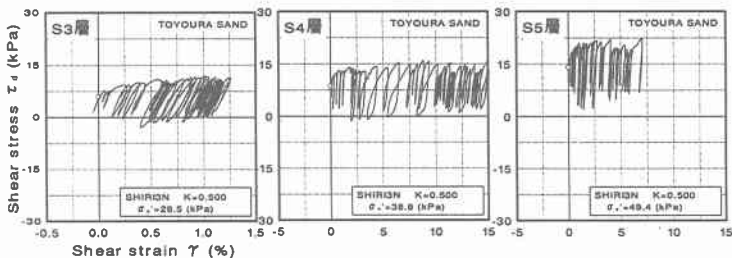


図-5 せん断応力～せん断ひずみ関係

至っている様子が認められる。図-5 には断面 No.3 におけるせん断応力～せん断ひずみ関係を示している。いずれの層においても、繰返しせん断により残留ひずみが発達していく様子が認められる。

5. 変形量の比較

図-6 は現場で調査された河川堤防の天端沈下量と、オンライン地震応答実験により得られた累積水平変位量の比較を示したものである。オンライン地震応答実験の結果に対しては、円弧滑りによって円弧内の地盤が一様に移動するという仮定の下に、オンライン層の水平変位量と天端沈下量が等価なものと考えて両者の比較を試みた。この図を見てみると変位量そのものは、一致していないが沈下の傾向はうまくとらえられていることが分かる。本解析による沈下量が過小評価された理由として、現場で調査された地盤の変形量は地震で被害を受けた直後のものではなく、数日を経たものであるため、発生した間隙水圧の消散による沈下や永久変形の時間遅れ分等が加わったと考えられる。また地盤の物性値等も被害前のものと必ずしも一致しているとは限らないため、液状化強度や距離減衰をもとに算出された入力加速度などが正確に把握できなかったこと等が考えられる。今回のオンライン地震応答実験では、残留変形による破壊が法尻下部の地盤に生じていると仮定したが、実際には盛土直下地盤の液状化に伴う土圧増加等の 2 次元的影響もあるのではないかと考えられる。また断面 No.2, No.4 においては被害なしと報告されているが、実験結果をふまえると堤防下の基礎地盤は若干の変形を生じたのではないかと考えられ、変形が小さかったのは、飽和砂層厚が他と比べ薄かったこと液状化強度が比較的高かったこと堤体高さが低かったことなどの理由による。これらのことを考慮した上で実際の天端沈下量とオンライン地震応答実験による水平累積変位量を比較してみると、本研究結果は、実測結果を比較うまく評価しているのではないかと考えられる。

6. まとめ

本研究は、初期せん断応力が作用した堤体基礎地盤は地震動を受けることにより、有効応力の低下による滑り破壊が生じると想定し、オンライン地震応答実験を行った。対象とした断面は北海道南西沖地震で被災した河川堤防の 5 断面である。本実験では、対象とした被災断面の変状が使用した試験機の測定限界を超えるものであったため、最終変形量までは評価できない結果となった。しかしながら被害状況と実験結果の対応から本研究による方法は地震による河川堤防の大崩壊直前の変形レベルまでは、十分予測することが可能であることが分かった。

参考文献 1) 日下部他：地盤系オンライン地震応答実験システムの開発、第 22 回土質工学研究発表会講演集、pp.528-526,1987 2) 原本利徳他：粘土地盤上の盛土の動的遠心模型実験(その 14)-オンライン地震応答実験による盛土周辺地盤の変形の評価-、第 33 回地盤工学会研究発表会 pp.1029-1030,1998

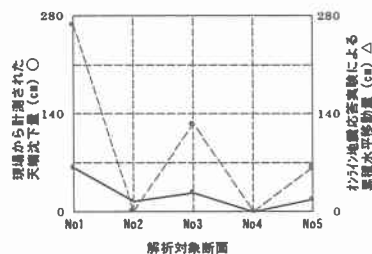


図-6 変形量の比較