

DISS. ETH NO. 21580

RIVER DYKE FAILURE MODELING UNDER TRANSIENT WATER CONDITIONS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

WILMER FERNEY MORALES PEÑUELA

M.Sc., National University of Colombia

born on 29.09.1980

citizen of Republic of Colombia

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Sarah M. Springman

Prof. Dr. Dietmar Adam

Dr. Jacques Garnier

2013

Kurzfassung

Die Häufigkeit von Hochwasserereignissen ist in den letzten Jahrzehnten markant gestiegen wobei ebenfalls der resultierende Schaden zugenommen hat. Daher ist es erforderlich bei der Planung von Schutzmassnahmen, aber auch bei der Erstellung von Hochwasserkarten erforderlich das mechanische Verhalten von Flusssdämmen, einem der am häufigsten eingesetzten Schutzbauwerke genauer zu erfassen. Dabei steht die Untersuchung der bodenmechanischen Komponenten wie auch der Einfluss von Vorsättigung und Infiltration im Vordergrund. Diese Anteile sind in den seltensten Fällen bei der Analyse von Deichbrüchen berücksichtigt worden.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung befasst sich dieses Forschungsprojekt mit der Analyse des Einflusses einer transienten Wasserbelastung durch mehrere Hochwasserzyklen und anschliessender Ueberspülung des Deiches. Diese Analyse erfolgte in drei Teilprojekten:

- Analyse der Ergebnisse aus einem Überlauffeldversuch (Mayor, 2013)
- Physikalische Modellierung von kleinmassstäblichen Modellen unter einem erhöhten Schwerfeld in einer Zentrifuge
- Numerische Modellierung der Grundwasserströmung, und deren Einfluss auf die Stabilität der Luft- und Wasserseiten eines Deiches.

Für den Überlauffeldversuch im Feld wurde im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes (Mayor, 2013) entlang der Rhone in Baltschieder (VS) ein Abschnitt eines Deiches der 2. Rhonekorrektur mit Spundwänden eingegrenzt und mit verschiedenen Hochwasserzyklen belastet. Der Grasbewuchs und eine schlecht erodierbare Kiesschicht auf der Krone des Deiches verhinderten hier die erwartete Oberflächenerosion. Stattdessen entstand eine Instabilität der luftseitigen Böschung die eine innere Erosion erlaubte. Um dieses näher zu analysieren wurden Laboruntersuchungen an dem siltigen Sand, der den wesentlichen Anteil der beim Bau verwendeten Materialien darstellt, durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf der Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Bodenparameter. Zusammen mit den Parametern aus empirischen Gleichungen, wie zum Beispiel Kozeny-Carman (Carrier, 2003) und „modified Kovacs“ (Aubertin et al., 2003), erlaubte dies die erfolgreiche numerische Modellierung des Experimentes. Die Grundwasserströmung und die Stabilität des Deiches wurden simuliert, um die Ereignisse, die während des Tests beobachtet wurden, abzubilden.

Die physikalische Modellierung erfolgte mit einer Versuchsserie aus 12 kleinmassstäblichen Modellen unter einer erhöhten Erdbeschleunigung von 33-g so dass diese Modelle im Prototyp Deichen mit einer Höhe von 5 m entsprechen. Variiert wurden die Hangneigung (1:2, 1:2,5, 1:3) und zum Teil verschiedene zusätzliche Schutzmassnahmen (Fussfilter, Schlitzwand). Das Ziel der Modellierung war die Analyse des Einflusses der einzelnen Schutzmassnahmen auf die Grundwasserströmung bei Hochwasser-Zyklen sowie die Untersuchung des Bruchmechanismus, der sich während eines Überlaufs einstellt. Dazu wurden alle Modelle mit zwei Zyklen eines Hochwassers belastet bevor der Überlauf simuliert wurde. Die Hochwasser Zyklen folgten einer Sinusform mit einer Dauer im Prototypmasstab von jeweils

20 Tagen. Der Überlauf sollte eine gemessene Durchflussganglinie eines Schweizer Flusses bei Hochwasserereignis im Jahr 2005 abbilden. Die Modelle wurden aus einem, in vielen Projekten verwendeten Feinsand gebaut. Mit zusätzlichen Laborversuchen wurde auch für dieses Material das mechanische und hydraulische Verhalten unter ungesättigten Bedingungen bestimmt.

In den Versuchen konnten zwei Arten von Bruchmechanismen identifiziert werden. Im Fall das keine Schlitzwand als Schutzmassnahme verwendet wurde begann das Wasser die Oberfläche des Deiches zu erodieren so dass sich eine „Bruchkehle“ einstellte durch die das Wasser schnell floss. Diese Bruchkehle vergrösserte sich mit der zeit. Eine zweite Art von Bruchmechanismus wurde beobachtet, wenn eine Schlitzwand eingesetzt wurde. Eine Bruchkehle entwickelte sich an der Krone des Deiches nahe der Wand. Wenn die Grösse der Bruchkehle die Schlitzwand erreicht wurde der Boden vor der Wand, das heisst auf der Luftseite, erodiert, wodurch sich eine schmale und flache Bruchzone in der Nähe der Wand einstellte.

Eine numerische Simulation wurde mit einer kommerziell erhältlichen Software, die auf der Finite Elemente Methode (FEM) basiert ist, durchgeführt, um die ungesättigten Grundwasserströmung für alle zwölf Deiche zu untersuchen. Zusätzlich wurde der zeitliche Verlauf der Stabilität der Luft- und Wasserseite Böschungen mit dem Gleitkreisverfahren geprüft. Die Ergebnisse aus den numerischen Simulationen bildeten die Ergebnisse der physikalischen Modellierung in der Zentrifuge gut dar. Ebenfalls konnten lokalen Instabilitäten während der Hochwasserzyklen für die Deiche, die keine Filter enthalten haben abgebildet werden. Dieses Ergebnis gelang durch eine geeignete Definition der Randbedingungen des Problems und einer genauen Bestimmung der Bodenparameter durch gezielte Laboruntersuchungen.

Abstract

Knowledge of the performance of river dykes during flooding is necessary when designing governmental assistance plans aimed to reduce both casualties and material damage. This is especially relevant when floods have increased in their frequency during the last decades, together with the resulting material damage and life costs.

Most of previous attempts for analyzing dyke breaching during flooding have neglected to consider the soil mechanics component and the influence of infiltration and saturation changes on the failure mechanisms developed in the river dyke. This research project aimed to fill that gap in knowledge by analyzing, in a comprehensive manner, the effect of transient water conditions, represented by successive flood cycles, on the seepage conditions and subsequent breaching of dykes. Therefore, three key sub-projects were carried out: the analysis of the results from an overflow field test, the physical modeling of small-scaled models under an enhanced gravity field, and the numerical modeling of the flow response and the resulting stability of both the air- and water-side slopes.

The overflowing field test was carried out in a section of a dyke enclosed within a rectangular sheet-pile box along the Rhone River in Baltschieder, south west Switzerland. This formed the concluding part of another research project (Mayor, 2013), which had been devoted to the analysis of the response of a dyke to successive flood cycles.

The grass cover and a low erodability gravel on the crown of the dyke prevented the it from being eroded superficially, as was expected. An instability event on the air-side slope, followed by internal erosion, was observed instead. Laboratory tests were carried out to determine the unsaturated flow parameters of the silty sand composing the main body of the dyke. These, together with parameters estimated from empirical relationships, such as the Kozeny-Carman (Carrier, 2003) and modified Kovacs (Aubertin et al., 2003) equations, allowed numerical modeling of the experiment to be completed with success. Both the flow response and stability of the dyke were simulated to represent the response that was observed during the test.

The physical modeling was performed by testing 12 small-scale models at an increased gravity of 33-g. These represented dykes of 5 m height at prototype scale, with three different slope gradients (1:2.0, 1:2.5, 1:3.0), and included one or two protective measures (a toe filter, a cut-off wall) plus a homogeneous dyke. The goal was to analyze the effect of each protective measure on the groundwater flow during flood cycles and on the breaching mechanism that developed during an overflow event. Therefore, two cycles of floods, with a subsequent overflow were applied to all of the models. The flood cycles had a sinusoidal shape, each one with a duration of 20 days. The overflow was intended to replicate a hydrograph measured in a Swiss river during a flood in 2005.

The sand used to build the models was characterized by compiling information from previous research projects, which had used the same soil. Specific tests were performed in order to determine the mechanical (water content controlled triaxial test and suction controlled oedometer tests) and hydraulic parameters (Soil Water Retention Curve) under unsaturated conditions.

Two types of dyke breaching mechanisms were identified. If a cut-off wall was not included, water started eroding the soil surface, creating a breach throat, through which water flowed rapidly, which, in turn, increases the size of the throat. A second type of breaching mechanism was observed when a cut-off wall was placed. A breach throat started to develop in the crest of the dyke, closer to the wall, in a similar manner to that observed for the dykes without the wall. When the throat reached the cut-off wall, it could not continue increasing towards the water-side. Instead, the soil in front of the wall, i.e. on the air-side, started to be eroded, creating a narrow and shallow breach zone in the vicinity of the wall.

A numerical simulation of the unsaturated groundwater flow for all twelve dykes was carried out with commercial software based on the Finite Element Method (FEM), which allows the governing equation for flow through unsaturated porous media to be solved. Additionally, the variation in time of the stability of both air- and water-side slopes was investigated using a limit equilibrium approach.

The results from the numerical simulations matched accurately with the results obtained with the centrifuge modeling, including the prediction of local instabilities during the flood cycles for those dykes that did not include a toe filter. This was a consequence of an appropriate definition of the boundary conditions of the problem, together with an accurate estimation of the soil parameters through specific laboratory tests.