จิระยุทธ สืบสุข : การพัฒนาแบบจำลองโมดิไฟด์ สตัคเจอร์ด แคม เคลย์ และการนำไปใช้ในวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ (DEVELOPMENT OF THE MODIFIED STRUCTURED CAM CLAY MODEL AND FINITE ELEMENT IMPLEMENATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข, 224 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองพฤติกรรม (constitutive model) สำหรับดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน (structured clays) ซึ่งประกอบด้วยสามส่วนหลัก ส่วนแรก กล่าวถึง การพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมทั่วไปสำหรับดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน (destructured clay) ดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ (naturally structured clay) และดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานสังเคราะห์ (artificially structured clay) แบบจำลองนี้พัฒนาจากแบบจำลองสตัคเจอร์ด แคม เคลย์ (Structured Cam Clay: SCC) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่ให้ชื่อว่า แบบจำลองโมดิไฟด์ สตัคเจอร์ด แคม เคลย์ (Modified Structured Cam Clay: MSCC) อิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน (soil structure) และการสลายของพันธะเชื่อมประสาน (destructuring) ต่อพฤติกรรมทางกลของดินเหนียวสามารถอธิบายได้โดยหลักการความเค้นประสิทธิผลดัดแปลง (modified effective stress) ซึ่งเป็นผลรวมของความเค้นประสิทธิผลปัจจุบัน (current effective stress) และความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน (structure strength) พันธะเชื่อมประสานส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเค้นประสิทธิผลดัดแปลง และขนาดของผิวคราก (yield surface) อีกทั้งยังเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (cohesion) กำลัง ณ จุดยอด (peak strength) และความแข็งแกร่ง (stiffness) อีกด้วย การแตกสลายของพันธะเชื่อมประสานเริ่มเกิดขึ้นเมื่อสถานะความเค้น (stress state) อยู่บนผิวคราก กฎการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสาน (destructuring law) ได้ถูกพัฒนาตามหลักการดังนี้ คือ การแตกสลายของพันธะเชื่อมประสานเกิดทันทีหลังจากจุดวิบัติ (failure) กระบวนการนี้เป็นผลจากการแตกหัก (crushing) ของพันธะเชื่อมระหว่างอนุภาคเม็ดดิน (soil-cementation structure) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดพฤติกรรมอ่อนตัวลงเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น (strain softening) พันธะเชื่อมประสานจะแตกสลายอย่างสมบูรณ์เมื่อสถานะความเค้นอยู่ที่สถานะวิกฤต (critical state) ผิวครากของดินพันธะเชื่อมประสาน และดินไร้พันธะเชื่อมประสานจะเป็นผิวเดียวกันที่สถานะวิกฤต รูปร่างผิวครากสำหรับแบบจำลอง MSCC ยังคงใช้รูปร่างเดียวกันกับแบบจำลองโมดิไฟด์ แคม เคลย์ (Modified Cam Clay: MCC) ในขณะที่พลาสติคโพเทนเชียล (plastic potential) พัฒนาขึ้นโดยการรวมอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสานที่มีต่อทิศทางของความเครียดพลาสติค (plastic strain direction) ในการคำนวณพฤติกรรมการแกร่งขึ้น (hardening) และพฤติกรรมการอ่อนลง (softening) พารามิเตอร์ของแบบจำลอง MSCC แบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ พารามิเตอร์สำหรับอธิบาย

พฤติกรรมที่ไม่เกี่ยวข้องกับพันธะเชื่อมประสาน (destructured properties) และพารามิเตอร์สำหรับอธิบายอิทธิพลของพันธะเชื่อมประสาน (structured properties) พารามิเตอร์ทั้งหมดของแบบจำลองนี้มี นัยทางกายภาพ (physical meaning) และสามารถหาได้จากผลการทดสอบแรงอัดแบบสามแกน

งานวิจัยในส่วนที่สอง คือ การปรับปรุงแบบจำลอง MSCC สำหรับการทำนายพฤติกรรมของดินพันธะเชื่อมประสานในสถานะอัดตัวมากกว่าปกติ (overconsolidated structured clays) แบบจำลองนี้ได้รับการพัฒนาให้สอดคล้องตามหลักการพื้นฐานของแบบจำลอง SCC โดยให้ชื่อว่า แบบจำลองโมดิไฟด์ สตัคเจอร์ด แคม เคลย์ ร่วมกับทฤษฎีขอบเขตผิว (Modified Structured Cam Clay with Bounding Surface Theory: MSCC-B) แบบจำลองที่ปรับปรุงขึ้นนี้สามารถอธิบายกระบวนการแกร่งขึ้น และกระบวนการแตกสลายของพันธะเชื่อมประสานของดินพันธะเชื่อมประสานอัดตัวมากกว่าปกติ ค่าโมดูลัสความแกร่งขึ้นแบบพลาสติค (plastic hardening modulus) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดการให้น้ำหนักบรรทุกสามารถคำนวณได้โดยอาศัยเทคนิคภาพฉายเชิงรัศมี (radial mapping technique) พารามิเตอร์ h ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อแสดงอิทธิพลของสถานะความเค้นสำหรับดินพันธะเชื่อมประสานอัดตัวมากกว่าปกติในสมการคำนวณโมดูลัสความแกร่งขึ้นแบบพลาสติค ผลการคำนวณจากแบบจำลอง MSCC-B ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของตัวอย่างดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ และดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานสังเคราะห์ ภายใต้การทดสอบการอัดตัวแบบเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic compression test) และการทดสอบการรับแรงเฉือนแบบอัดตัว (compression shearing test) จากผลการศึกษาปรากฏว่าแบบจำลอง MSCC-B สามารถทำนายผลการตอบสนองทางกล (mechanical response) ของดินพันธะเชื่อมประสานอัดตัวมากกว่าปกติภายใต้สถานะระบายน้ำ (drained condition) และไม่ระบายน้ำ (undrained condition) ได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยในส่วนสุดท้ายศึกษาผลกระทบของพันธะเชื่อมประสานต่อความเค้น (stress) ความเครียด (strain) และกำลัง (strength) แบบเฉพาะจุด (local element) ที่ไม่เป็นแบบเดียวกัน (inhomogeneous) ในการทดสอบการรับแรงเฉือนภายใต้แรงอัดแบบสามแกน โดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลอง MSCC ในการศึกษานี้แบบจำลอง MSCC ถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบคอนทินัม จาโคเบียน (continuum Jacobian) และถูกเขียนเป็นรหัสภาษาคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณร่วมกับโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์เชิงพานิชย์ ชื่อว่า ABAQUS การศึกษาทำโดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของตัวอย่างดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานสังเคราะห์ภายใต้การทดสอบแรงอัดแบบสามแกน โดยใช้พารามิเตอร์ของแบบจำลองสำหรับดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานสังเคราะห์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ทั้งในสภาวะระบายน้ำ และไม่ระบายน้ำ การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นแบบ couple hydro-mechanic ความเค้น และความเครียดเฉพาะที่ของ

ตัวอย่างดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานสังเคราะห์ที่ปริมาณซีเมนต์ต่าง ๆ ถูกนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน ในส่วนท้าย นัยสำคัญที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบโดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ได้รับการสรุปและวิจารณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

JIRAYUT SUEBSUK : DEVELOPMENT OF MODIFIED STRUCTURED CAM CLAY MODEL AND FINITE ELEMENT IMPLEMENTATION.
THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 224 PP.

CONSTITUTIVE EQUATION/STRUCTURED CLAY/PLASTICITY/ CRITICAL STATE MODEL/SOIL STRUCTURE/DESTRUCTURING/BOUNDING SURFACE THEORY/FINITE ELEMENT ANALYSIS

With the advances in the calculation by a numerical method and computer hardware, it becomes more common to predict the response of geotechnical material using a constitutive model in numerical analysis. The constitutive models for structured clay have been developed in this research. The thesis is composed of three consecutive parts. First part presents a generalised constitutive model for destructured, naturally structured and artificially structured clays that extends the Structured Cam Clay (SCC) model. This model is designated as "Modified Structured Cam Clay (MSCC) model". The influence of structure and destructuring on the mechanical behaviour of clay can be explained by the change in the modified effective stress, which is the sum of the current mean effective stress and the additional mean effective stress due to structure (structure strength). The presence of structure increases the modified mean effective stress and yield surface, enhancing the cohesion, peak strength and stiffness. The destructuring begins when the stress state is on the virgin yield surface. After the failure (peak strength) state, the abrupt destructuring occurs as the soil-cementation structure is crushed; hence the strain softening. The soil structure is completely removed at the critical state when the yield surface becomes identical to

the destructured surface. The destructuring law is proposed based on this premise. In the MSCC model, the yield function is the same shape as that of the Modified Cam Clay (MCC) model. A plastic potential is introduced so as to account for the influence of structure on the plastic strain direction for both hardening and softening behaviours. The required model parameters are divided into those describing destructured properties and those describing structured properties. All the parameters have physical meaning and can be simply determined from the conventional triaxial tests.

Second part presents a generalised critical state model with the bounding surface theory for simulating the stress-strain behaviour of overconsolidated structured clays. The model is formulated based on the framework of the Structured Cam Clay (SCC) model and is designated as the Modified Structured Cam Clay with Bounding Surface Theory (MSCC-B) model. The hardening and destructuring processes for structured clays in the overconsolidated state can be described by the proposed model. The image stress point defined by the radial mapping technique is used to determine the plastic hardening modulus, which varies along loading paths. A new proposed parameter h, which depends on the material characteristics, is introduced into the plastic hardening modulus equation to take the soil behaviour into account in the overconsolidated state. The MSCC-B model is evaluated in light of the model performance by comparisons with the measured data of both naturally and artificially structured clays under isotropic compression and compression shearing tests. From the comparisons, it is found that the MSCC-B model gives an excellent prediction of mechanical response in both drained and undrained conditions.

Last part presents the study of the inhomogeneous stress-strain-strength behaviour influenced by the structure strength by using the finite element analysis

with the MSCC model. The MSCC model formulated with a continuum Jacobian has been coded into the commercial finite element program, ABAQUS by the user subroutine, UMAT. The generalised MSCC model has been used to study a triaxial compression test of artificially structured clay specimens with various cement contents under drained and undrained conditions by a couple hydro-mechanic finite element analysis. The influence of structural properties on the inhomogeneity is studied. The local stress and strain of the artificially structured specimens is compared with those of the destructured specimen under various isotropic yield stress ratio (YSRiso). The key aspects of finite element simulation of artificially structured clay are summarised and discussed.

School of Civil Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature _____