

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา  
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๕

ชื่อโครงการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมแบบระบายน้ำของดินทรายโดยการ  
วิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบดิสตริงเอลิเมนต์

เลขที่ ๕๙/๒๕๕๕

โดย

สยาม ยิ้มศิริ

๕๙๐๑๖๖๑๖

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

- 7 น.ร. 2558

354980

กันยายน ๒๕๕๕

แจ้งบริการ

๕ 6 ต.ค. 255๘

---

**บทคัดย่อ**

ผลกระทบของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินต่อพฤติกรรมของทรายภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำได้ศึกษาโดยใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์แบบ DEM โดยการวิเคราะห์ DEM จะจำลองการทดสอบ isotropically consolidated drained triaxial compression loading และ extension ของตัวอย่างที่ initial soil fabric แบบต่างๆ ผลการวิเคราะห์ DEM ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้รายงานโดยนักวิจัยต่างๆ และได้วิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้ (i) ผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทราย และ (iii) พฤติกรรม anisotropy ซึ่งสามารถพบว่าปรากฏการณ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้ในเชิงปริมาณจากผลการวิเคราะห์ DEM ที่ได้

**ABSTRACT**

The effects of initial soil fabric on behaviors of sand are investigated by employing Distinct Element Method (DEM) numerical analysis. Isotropically consolidated drained triaxial compression loading and extension tests are simulated and the effects of initial soil fabric on resulting soil behavior are investigated. The numerical analysis results are compared qualitatively with the published experimental data and the effects of specimen reconstitution methods and anisotropy reported in the laboratory studies are systematically explained by its soil fabric condition.

## บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

ผลกระทบของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดิน (soil fabric) ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดนั้นเป็นที่สนใจมาเป็นระยะเวลายาวนานแล้ว เพราะเชื่อว่าสาเหตุของการที่ทรายมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับทิศทางของแรงกระทำนั้นน่าจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคทราย (inherent anisotropy) อีกทั้งผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายต่อพฤติกรรมของดินสามารถอธิบายด้วยผลจาก soil fabric ผลของ soil fabric ได้ถูกศึกษาเป็น 2 แนวทาง คือ (i) การพิจารณาการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายโดยตรงจากการเตรียมตัวอย่างทรายด้วยวิธีต่างๆ โดยอาศัย scanning electron microscope (SEM) ส่องดูตัวอย่างทรายที่ถูกตัดออกเป็นแผ่นบาง (thin section) และ (ii) การศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของมวลทราย เช่น พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายที่เกิดจากการเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธีต่างๆ แต่ยังคงมีการศึกษาจำนวนน้อยที่พยายามอธิบายถึงผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายอย่างเป็นระบบ (หรืออีกนัยหนึ่งคือการเชื่อมโยงระหว่างข้อ (i) กับ (ii)) (เช่น Oda, 1972; Mulilis et al., 1977; Ibrahim & Kagawa, 1991; และ Vaid et al., 1999) อย่างไรก็ตามการศึกษาเหล่านี้จะอธิบายผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายในเชิงคุณภาพมากกว่าเชิงปริมาณ เนื่องจากการประเมินการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายในเชิงปริมาณทำได้ยาก ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำโดยโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขที่ชื่อ PFC3D (Itasca, 1999) ผลการคำนวณเชิงตัวเลขนี้จะสามารถวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของทรายได้ในเชิงปริมาณ เมื่อนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้รายงานมาแล้วจะทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่สนใจอย่างเป็นระบบได้

## คำนำ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินต่อพฤติกรรมของทรายภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำ โดยโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขที่ชื่อ PFC3D (Itasca, 1999) ซึ่งผลการคำนวณเชิงตัวเลขนี้จะสามารถวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายได้ในเชิงปริมาณ เมื่อนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้รายงานมาแล้วจะทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่สนใจในเชิงปริมาณอย่างเป็นระบบได้ ข้อมูลที่จะได้จากโครงการวิจัยนี้จะทำให้เกิดความเข้าใจเพิ่มเติมถึงผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมของดิน ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) ขั้นสูงที่จะพิจารณาพฤติกรรมดังกล่าวเข้าไว้ด้วยกันต่อไป

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 (เลขที่ 59/2555) จากมหาวิทยาลัยบูรพา โดยส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ได้ตีพิมพ์เป็นบทความวิจัยในเอกสารการประชุมสัมมนาทางวิชาการภายในประเทศ จำนวน 1 บทความ ดังนี้

สยาม ยิ้มศิริ (2555), “การศึกษาระดับจุลภาคของพฤติกรรมของทรายภายใต้การทดสอบสามแกนแบบระบายน้ำ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 17, จังหวัดอุดรธานี, จัดโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร, 9-11 พฤษภาคม 2555

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ii
คำนำ	iii
สารบัญ	iv
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1-1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1-2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	1-2
<b>บทที่ 2 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์แบบดีสตีงอิลิเมนต์</b>	
2.1 วิธีดีสตีงอิลิเมนต์	2-1
2.2 แบบจำลองพฤติกรรมที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค	2-2
2.3 ค่าที่คำนวณระหว่างการวิเคราะห์	2-4
2.3.1 Coordination number	2-4
2.3.2 Porosity และ void ratio	2-5
2.3.3 Stress	2-5
2.3.4 Strain	2-6
2.3.5 Degree of fabric anisotropy	2-6
2.4 วิธีดำเนินการวิเคราะห์	2-7
2.4.1 การเตรียมตัวอย่าง	2-8
2.4.2 การจัดสภาพเริ่มต้น/การ preshearing	2-8
2.4.3 การเงื่อนไขสุดท้าย	2-9
2.5 แผนการดำเนินการทดลอง	2-9
<b>บทที่ 3 พฤติกรรมภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำ</b>	
3.1 ผลกระทบของ initial soil fabric	3-1
3.2 Anisotropy	3-2
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลองที่เคยตีพิมพ์โดยใช้ผลการวิเคราะห์ DEM</b>	
4.1 ผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายต่อคุณสมบัติภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำของทราย4-1	

---

4.2 คุณสมบัติ anisotropy ภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำของทราย	4-3
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	5-1
เอกสารอ้างอิง	R-1
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์	

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย

ผลกระทบของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดนั้นเป็นที่สนใจมาเป็นระยะเวลายาวนานแล้ว เพราะเชื่อว่าสาเหตุของการที่ทรายมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับทิศทางของแรงกระทำนั้นน่าจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคทราย (inherent anisotropy) อีกทั้งผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายต่อพฤติกรรมของดินสามารถอธิบายด้วยผลจาก soil fabric ผลของ soil fabric ได้ถูกศึกษาเป็น 2 แนวทาง คือ (i) การพิจารณาการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายโดยตรงจากการเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธีต่างๆ โดยอาศัย scanning electron microscope (SEM) ส่องดูตัวอย่างทรายที่ถูกตัดออกเป็นแผ่นบาง (thin section) และ (ii) การศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของมวลทราย เช่น พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายที่เกิดจากการเตรียมตัวอย่างทรายด้วยวิธีต่างๆ มีการศึกษาจำนวนน้อยที่พยายามอธิบายถึงผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายอย่างเป็นระบบ (หรืออีกนัยหนึ่งคือการเชื่อมโยงระหว่างข้อ (i) กับ (ii)) (เช่น Oda, 1972; Mulilis et al., 1977; Ibrahim & Kagawa, 1991; และ Vaid et al., 1999) อย่างไรก็ตามการศึกษาเหล่านี้จะอธิบายผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายในเชิงคุณภาพมากกว่าเชิงปริมาณ เนื่องจากการประเมินการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายในเชิงปริมาณทำได้ยาก

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำโดยโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขที่ชื่อ PFC3D (Itasca, 1999) ซึ่งจะวิเคราะห์ปัญหาการเสีรูปร่างของมวลทรายแบบ Distinct Element Method (DEM) ตามวิธีการที่เสนอโดย Cundall & Strack (1979) โปรแกรม PFC3D จะพิจารณาให้อนุภาคทรายเป็นทรงกลมแข็งและออกแรงกระทำต่อกันตามแบบจำลองพฤติกรรมที่จุดสัมผัส (contact point constitutive model) ผลการคำนวณเชิงตัวเลขนี้จะสามารถวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของทรายในแง่ของ contact normal ได้ในเชิงปริมาณ เมื่อนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้รายงานมาแล้วจะทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่สนใจในเชิงปริมาณอย่างเป็นระบบได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือการศึกษาถึงผลกระทบของการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายแบบระบายน้ำในเชิงปริมาณ โดยจะทำให้สามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์ต่างๆดังนี้

- a. ผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างดินต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทราย
- b. ผลกระทบของการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายต่อพฤติกรรม anisotropy

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของทรายภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำจะถูกศึกษาโดยโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งวิเคราะห์ปัญหาการเสียรูปของมวลทรายแบบ Distinct Element Method (DEM) โดยใช้โปรแกรมที่ชื่อ PFC3D (Itasca, 1999) และนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้ถูกตีพิมพ์โดยผู้วิจัยอื่นเพื่อจะช่วยให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่สนใจในเชิงปริมาณอย่างเป็นระบบได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ข้อมูลที่จะได้จากโครงการวิจัยนี้จะทำให้เกิดความเข้าใจเพิ่มเติมถึงผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมของทราย ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) ขั้นสูงที่จะพิจารณาพฤติกรรมดังกล่าวเข้าไว้ด้วยต่อไป เพราะในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงนั้นต้องการข้อมูลของพฤติกรรมของดินที่ซับซ้อนกว่าที่การทดสอบดินแบบธรรมดาที่ได้ใช้กันมาในอดีต



## บทที่ 2 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์แบบดิสตังอิลิเมนต์

### 2.1 วิธีดิสตังอิลิเมนต์

วิธีดิสตังอิลิเมนต์ (Distinct Element Method) หรือเรียกย่อว่า DEM เป็นการจำลองพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของระบบของอนุภาคที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนโดยมีการเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระและออกแรงกระทำต่อกันที่จุดสัมผัส การวิเคราะห์แบบนี้จะพิจารณาการเคลื่อนที่และการหมุนของแต่ละอนุภาครวมทั้งการหายไปของจุดสัมผัสเดิมและการเกิดขึ้นของจุดสัมผัสใหม่ในระหว่างการดำเนินการวิเคราะห์ วิธีการคำนวณแบบนี้ได้เริ่มใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านกลศาสตร์ของหินก่อนโดย Cundall (1971) และต่อมาได้ถูกประยุกต์ในกลศาสตร์ของดินโดย Cundall & Strack (1979) การวิเคราะห์แบบ DEM สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางจุลภาคซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ เช่น การเคลื่อนที่และการหมุนของอนุภาค แรงกระทำที่จุดสัมผัส ทิศทางของการสัมผัส ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาค จำนวนจุดสัมผัส และ ข้อมูลทางด้านพลังงาน

ในการคำนวณด้วยวิธีดิสตังอิลิเมนต์นั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคจะถูกจำลองโดยการสมมูลชั่วคราวที่เวลาสั้นๆ สภาพสมมูลของแรงกระทำที่จุดสัมผัสและการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นคำนวณจากชุดการคำนวณเพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค การเคลื่อนที่ของอนุภาคนี้เป็นผลมาจากการกระจายตัวของกรอบการรบกวนต่อกลุ่มอนุภาคที่เกิดขึ้นที่ขอบเขต กรรมวิธีแบบนี้เป็นการวิธีทางพลศาสตร์ โดยที่ความเร็วของการกระจายของการรบกวนนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของกลุ่มอนุภาค พฤติกรรมทางพลศาสตร์นี้ถูกจำลองด้วยการคำนวณแบบ timestepping โดยที่ความเร็วและความเร่งของอนุภาคถูกสมมุติให้มีค่าคงที่ในระหว่าง timestep เล็กๆ การคำนวณแบบนี้เหมือนกับการคำนวณที่ใช้ในวิธี explicit finite-difference สำหรับ continuum analysis ค่า timestep นั้นจะเลือกใช้ต้องมีค่าสั้นมากพอเพื่อให้ในหนึ่ง timestep นั้นการรบกวนไม่สามารถกระจายไปไกลกว่าอนุภาคที่อยู่ติดกัน ดังนั้นในทุกช่วงเวลาของการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่ออนุภาคใดๆสามารถคำนวณได้จากปฏิสัมพันธ์กับอนุภาคที่มันสัมผัสอยู่ด้วย โดยค่า critical timestep นี้สามารถคำนวณจากความเร็วที่การรบกวนจะแพร่กระจายผ่านกลุ่มอนุภาคซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของกลุ่มอนุภาค เช่น มวลและ moment of inertia ของอนุภาค และ contact stiffness ของจุดสัมผัส การวิเคราะห์แบบ explicit (ซึ่งตรงข้ามกับแบบ implicit) นั้นทำให้สามารถที่จะจำลองพฤติกรรมแบบไม่เป็นเส้นตรงของกลุ่มของอนุภาคจำนวนมากโดยไม่ต้องใช้ความจำในการคำนวณมากเกินไปและไม่ต้องการการคำนวณแบบ iteration

วงรอบการคำนวณที่กระทำในการวิเคราะห์แบบ DEM เป็นการคำนวณสลับไปมาระหว่างกฎของการเคลื่อนที่ของวัตถุข้อที่ 2 ของ Newton และ กฎของแรง-การเคลื่อนที่ที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค อีกทั้งยังมีการปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาคและกำแพงขอบเขตตลอดเวลาดังแสดงในรูปที่ 1 กฎของการเคลื่อนที่ของวัตถุข้อที่ 2 ของ Newton นั้นใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคที่เกิดจาก contact และ body force ในขณะที่กฎของแรง-การเคลื่อนที่ที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคนั้นใช้ในการคำนวณ contact force ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาค ลักษณะสำคัญของการคำนวณ DEM คือการอนุญาตให้มีการเคลื่อนที่และการหมุนของอนุภาคอย่างอิสระรวมถึงการสัมผัสกันหรือไม่สัมผัสกัน

ระหว่างอนุภาคในขณะที่การคำนวณกำลังดำเนินไป ดังนั้นจึงสำคัญอย่างยิ่งที่โปรแกรม DEM จะต้องมีการ algorithm ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจหาและทบทวนจุดสัมผัสที่มีอยู่ สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมของ algorithm นี้สามารถอ่านได้จาก Cundall (1988a) หรือ Lian et al. (1994) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์ DEM กระทำโดยใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า PFC3D ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่จำหน่ายโดย Itasca Consulting Group, Inc. โปรแกรม PFC3D จำลองการเคลื่อนที่และปฏิสัมพันธ์ของกลุ่มของอนุภาคที่เป็นทรงกลม ซึ่งการคำนวณด้วยโปรแกรม PFC3D นี้สามารถพิจารณาได้เป็นส่วนย่อยของการวิเคราะห์ DEM เพราะการคำนวณ DEM สามารถใช้กับอนุภาครูปทรงใดก็ได้ PFC3D ทำการคำนวณโดยใช้สมมติฐานดังนี้

- อนุภาคถูกพิจารณาให้เป็นวัสดุแข็งเกร็ง
- จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นบนพื้นที่ที่เล็กมาก (เป็นจุด)
- พฤติกรรมที่จุดสัมผัสพิจารณาเป็นแบบ soft contact โดยที่อนุภาคแข็งเกร็งสามารถทับซ้อนกับอนุภาคอื่นที่จุดสัมผัสได้
- ขนาดของการทับซ้อนระหว่างอนุภาคนั้นขึ้นอยู่กับ contact force โดยความสัมพันธ์ของกฎของแรง-การเคลื่อนตัวที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค อย่างไรก็ตามการทับซ้อนนี้ถือว่าเล็กมาก
- ทุกอนุภาคเป็นทรงกลม

ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับทฤษฎีในการวิเคราะห์ DEM ด้วย PFC3D สามารถพบได้ในคู่มือโปรแกรม PFC3D (Itasca, 1999)

## 2.2 แบบจำลองพฤติกรรมที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค

การวิเคราะห์ DEM ต้องการความรู้เกี่ยวกับกฎของแรง-การเคลื่อนตัวที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค โดยที่อนุภาคจะมีปฏิสัมพันธ์กับอนุภาคอื่นและกำแพงขอบเขตผ่านแรงที่กระทำที่จุดสัมผัส คำว่า "การสัมผัส" ใช้ในการอธิบายปฏิสัมพันธ์นี้และหมายถึงการสัมผัสกันทางกายภาพจริง ๆ ในโปรแกรม PFC3D นั้นการสัมผัสประกอบด้วยวัตถุสองชนิด (อาจจะเป็น อนุภาค-อนุภาค หรือ อนุภาค-กำแพง) และเกิดขึ้นที่จุดเดียวและเป็นสิ่งที่ contact force กระทำด้วย กฎของแรง-การเคลื่อนตัวที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคอธิบายพฤติกรรมทางกายภาพที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคนั้น โดยทั่วไปจะใช้ความสัมพันธ์แบบ elastic-perfectly plastic ระหว่าง contact force และ relative displacement โดยมี normal และ tangential contact stiffness อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง contact force และ relative contact displacement ในทิศทาง normal และ tangent ในโปรแกรม PFC3D นั้นส่วนประกอบในทิศทาง normal นั้นมีความสัมพันธ์โดย secant stiffness ในขณะที่ส่วนประกอบในทิศทาง tangent นั้นมีความสัมพันธ์โดย tangent stiffness ฉะนั้น total normal contact force สามารถคำนวณได้ตลอดเวลาถ้าทราบ total normal contact displacement แต่เฉพาะ incremental tangential contact force จะสามารถคำนวณได้เมื่อทราบ incremental tangential contact displacement ฉะนั้นหมายความว่าถ้า normal contact stiffness เปลี่ยนแปลงค่าระหว่างการดำเนินการคำนวณจะมีผลกระทบต่อกลุ่มของอนุภาคทั้งหมดทันที แต่ถ้า tangential contact stiffness เปลี่ยนแปลงค่าระหว่างการดำเนินการคำนวณจะมีผลกระทบเฉพาะ

ต่อ increment ของ tangential contact force ที่จะเกิดขึ้นใหม่เท่านั้น ซึ่งลักษณะแบบนี้ทำให้ PFC3D สามารถคำนวณกรณีที่มีการเสียดทานเพิ่มเข้าไปในระบบและการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคระหว่างการดำเนินการคำนวณได้

กฎของแรง-การเคลื่อนตัวที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคแบบ simplified Hertz-Mindlin contact model นั้นถูกใช้ในโครงการวิจัยนี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง contact force และ relative displacement เป็นแบบไม่เป็นเส้นตรง โดย contact stiffness เป็นฟังก์ชันของรูปทรงทางเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุที่สัมผัสกัน และ normal contact force ที่เกิดขึ้น

แบบจำลองมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีของ Mindlin & Deresiewicz (1953) โดยที่ secant normal contact stiffness  $K_N$  นิยามโดย

$$K_N = \left( \frac{2G\sqrt{2r}}{3(1-\nu)} \right) \sqrt{d_N} \dots\dots\dots (1)$$

และ tangent tangential contact stiffness  $k_R$  นิยามโดย

$$k_R = \left[ \frac{2(3rG^2(1-\nu))^{1/3}}{2-\nu} \right] f_N^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

- โดยที่
- $f_N$  คือ normal contact force
  - $d_N$  คือ normal contact displacement
  - $G$  คือ average shear modulus ของวัสดุสองอันที่สัมผัสกัน
  - $\nu$  คือ average Poisson's ratio
  - $r$  คือ average radius

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่าง อนุภาค-อนุภาค นั้น ค่ารูปทรงทางเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัตถุเฉลี่ย นิยามโดย

$$r = \frac{2r^A r^B}{r^A + r^B} \dots\dots\dots (3a)$$

$$G = \frac{1}{2}(G^A + G^B) \dots\dots\dots (3b)$$

$$\nu = \frac{1}{2}(\nu^A + \nu^B) \dots\dots\dots (3c)$$

โดยที่ subscript A และ B คืออนุภาคที่สัมผัสกัน

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่าง อนุภาค-กำแพง นั้น กำแพงจะพิจารณาเป็นวัตถุแข็งและค่าคุณสมบัติทางอีลาสติกของของอนุภาคเท่านั้นที่ถูกใช้ คือ

$$r = r^{ball} \dots\dots\dots (4a)$$

$$G = G^{ball} \dots\dots\dots (4b)$$

$$\nu = \nu^{ball} \dots\dots\dots (4c)$$

หมายเหตุว่า normal contact stiffness ในสมการที่ (1) นั้นเหมือนกับสมการที่เสนอโดย Mindlin & Deresiewicz (1953) แต่ tangential contact stiffness ในสมการที่ (2) นั้นเป็นสมการอย่างง่ายของ

สมการที่เสนอโดย Bowden & Tabor (1964) โดยสมการที่ (2) นั้นไม่รวมพจน์ของความไม่เป็นเส้นตรงที่เกิดจาก tangential contact force

การลื่นไถลระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นเมื่อ tangential contact force มีค่าเท่ากับค่ามากที่สุดที่ยอมให้ซึ่งเท่ากับค่า coefficient of inter-particle friction angle ที่น้อยที่สุดของอนุภาคที่สัมผัสกันคูณด้วยขนาดของ normal contact force ดังแสดงในสมการที่ (5) สภาพการลื่นไถลจะถูกตรวจสอบที่ทุกๆจุดสัมผัสในทุกๆ timestep ถ้าเกิดการลื่นไถลขึ้นขนาดของ tangential contact force จะถูกปรับให้เท่ากับค่ามากที่สุดที่ยอมให้

$$f_{R,max} = \tan \phi_{\mu,min} f_N \quad \dots\dots\dots (5)$$

โดยที่  $f_{R,max}$  คือ maximum allowable tangential contact force  
 $\phi_{\mu,min}$  คือ minimum inter-particle friction angle of the two contacting entities  
 $f_N$  คือ normal contact force.

### 2.3 ค่าที่คำนวณระหว่างการวิเคราะห์

ในระหว่างการดำเนินการวิเคราะห์นั้น PFC3D จะคำนวณคุณสมบัติทางจุลภาคของอนุภาคที่อยู่ในปริมาตรรูปทรงกลมที่อยู่ในตำแหน่งที่ผู้ใช้กำหนดในแบบจำลอง คุณสมบัติทางจุลภาคนี้ เช่น coordination number, porosity, sliding fraction, stress, และ strain rate ปริมาตรรูปทรงกลมนี้ PFC3D นั้นเรียกว่า “ทรงกลมตรวจวัด” คุณสมบัติอื่นๆ เช่น strain และ degree of fabric anisotropy นั้นถูกคำนวณระหว่างการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันที่เขียนขึ้นมาเองเพิ่มเติม ในส่วนต่อไปนี้จะอธิบายถึงสมมุติฐานและการประมาณของคุณสมบัติที่ถูกคำนวณที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้

#### 2.3.1 Coordination number

Coordination number  $C_N$  หมายถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนจุดสัมผัสต่อหนึ่งอนุภาค ในการคำนวณโดย PFC3D จะพิจารณาเฉพาะอนุภาคที่มีเส้นทรอยต์อยู่ในทรงกลมตรวจวัด การคำนวณจะเป็นดังสมการที่ (6)

$$C_N = \frac{\sum_{N_b} n_c^{(b)}}{N_b} \quad \dots\dots\dots (6)$$

โดยที่  $N_b$  คือ จำนวนของอนุภาคที่มีเส้นทรอยต์อยู่ในทรงกลมตรวจวัด  
 $n_c^{(b)}$  คือ จำนวนจุดสัมผัสของอนุภาค (b)

หมายเหตุว่าจุดสัมผัสบางจุดจะถูกนับสองครั้งแต่บางจุดจะถูกนับครั้งเดียว (ถ้าคู่อนุภาคของจุดสัมผัสอยู่นอกทรงกลมตรวจวัด)

#### 2.3.2 Porosity และ void ratio

Porosity  $n$  นิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างในทรงกลมตรวจวัดต่อปริมาตรของทรงกลมตรวจวัด ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$n = \frac{V_{void}}{V_{sphere}} = \frac{V_{sphere} - V_{ball}}{V_{sphere}} = 1 - \frac{V_{ball}}{V_{sphere}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

โดยที่  $V_{sphere}$  คือ ปริมาตรของทรงกลมตรวจวัด

$V_{void}$  คือ ปริมาตรของช่องว่างในทรงกลมตรวจวัด

$V_{ball}$  คือ ปริมาตรของอนุภาคที่อยู่ในทรงกลมตรวจวัด คำนวณดังสมการที่ (8)

$$V_{ball} = \sum_{N_p} V_p - V_{overlap} \quad \dots\dots\dots (8)$$

โดยที่  $N_p$  คือ จำนวนอนุภาคที่ตัดกับทรงกลมตรวจวัด

$V_p$  คือ ปริมาตรของอนุภาค  $p$  ที่อยู่ในทรงกลมตรวจวัด

$V_{overlap}$  คือ ปริมาตรของอนุภาคที่ทับซ้อนกันที่อยู่ในทรงกลมตรวจวัด

หมายเหตุว่าในการคำนวณนี้ได้พิจารณาปริมาตรบางส่วน (ไม่เต็มอนุภาค) ที่ตัดกับทรงกลมตรวจวัดและปริมาตรของอนุภาคที่ทับซ้อนกันที่เกิดจาก normal contact force แล้วด้วย

เมื่อสามารถคำนวณหา porosity แล้วก็สามารถคำนวณ void ratio  $e$  ได้จากสมการที่ (9)

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \dots\dots\dots (9)$$

### 2.3.3 Stress

Stress เป็นปริมาณทาง continuum ดังนั้นจะไม่มีอยู่จริงในจุดใดๆในกลุ่มของอนุภาคเพราะกลุ่มของอนุภาคเป็น discrete ในแบบจำลองแบบ discrete จะมีค่า inter-particle contact forces และ displacements แทนซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุในแบบจุลภาค ค่าเหล่านี้จะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปของขนาดมหภาคเพื่อจะเชื่อมโยงกับแบบจำลอง continuum การเฉลี่ยจึงต้องถูกดำเนินการเพื่อเชื่อมโยงระหว่างขนาดจุลภาคและขนาดมหภาค

ค่าเฉลี่ย stress tensor  $\sigma_{ij}$  ในปริมาตร  $V$  ของวัสดุนั้นวิเคราะห์มาจาก inter-particle contact forces โดยใช้สมการที่ (10) (Christoffersen et al., 1981) โดยที่การคำนวณในโครงการวิจัยนี้พิจารณาว่า compressive stress นั้นเป็นบวก

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{N_c} x_i f_j \quad \dots\dots\dots (10)$$

โดยที่  $N_c$  คือ จำนวนจุดสัมผัสในปริมาตร  $V$

$x_i$  คือ location vector ของจุดสัมผัส

$f_j$  คือ contact force

อย่างไรก็ตามยังมีความยุ่งยากในการแปลผลเมื่อใช้สมการที่ (10) กับอนุภาคที่อยู่ในปริมาตรของทรงกลมตรวจวัด ในโปรแกรม PFC3D นั้นจะพิจารณาอนุภาคที่มีเซ็นทรอยด์อยู่ในทรงกลมตรวจวัดในการคำนวณ average stress tensor ในการที่จะพิจารณาปริมาตรของอนุภาคที่ถูกทิ้งไปจากการพิจารณานี้จะใช้ค่า correction factor ซึ่งขึ้นอยู่กับ void ratio ซึ่งรายละเอียดการพิจารณาปรับแก้ดังกล่าวอยู่ในคู่มือโปรแกรม PFC3D (Itasca, 1999)

2.3.4 Strain

Strain นั้นถูกคำนวณด้วยฟังก์ชันที่เขียนขึ้นมาเองซึ่งคำนวณมาจากการเคลื่อนที่ของกำแพงขอบเขต 6 อันซึ่งใช้เป็นขอบเขตของตัวอย่างดินรูปสี่เหลี่ยม โดยพิจารณา compressive strain มีเครื่องหมายเป็นบวก

2.3.5 Degree of fabric anisotropy

Fabric tensor ถูกใช้เพื่ออธิบายลักษณะของการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรงกลม ตาม Oda (1982) นั้น second-order fabric tensor  $F_{ij}$  ของกลุ่มของอนุภาคทรงกลมเท่ากันสามารถนิยามโดยสมการที่ (11)

$$F_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \quad \dots\dots\dots (11)$$

โดยที่  $n_i$  คือ contact normal ในทิศทาง  $i$ -direction  
 $E(n)$  คือ contact normal distribution function (spatial probability density function of  $n$ )

$\Omega$  คือ unit sphere

$d\Omega$  คือ elementary solid angle ดังแสดงในรูปที่ 2

สมการที่ (12) สามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งดังแสดงในสมการที่ (12)

$$F_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} n_i n_j E(\gamma, \beta) \sin \gamma d\gamma d\beta \quad \dots\dots\dots (12)$$

โดยที่มุม  $\gamma$  และ  $\beta$  กำหนดดังแสดงในรูปที่ 2

ในกรณีของสภาพ cross-anisotropic fabric โดยที่มีแกนสมมาตรเป็น 3-axis ตามรูปที่ 2 นั้นฟังก์ชัน  $E(\gamma, \beta)$  สามารถแสดงได้ด้วย Fourier series ในสมการที่ (13) (Chang et al., 1989) โดยที่สมการที่ (14) มีสมมาตร  $E(\pi+\gamma) = E(\gamma)$  และไม่ขึ้นอยู่กับมุม  $\beta$

$$E(\gamma, \beta) = \frac{3(1 + a \cos 2\gamma)}{4\pi(3 - a)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

โดยที่  $a$  คือ degree of fabric anisotropy ( $-1 < a < 1$ )

จากสมการที่ (13) จะเห็นว่าการจัดเรียงอนุภาคของดินนั้นสามารถแสดงด้วย parameter ตัวเดียวคือ  $a$  ฟังก์ชัน contact normal distribution functions ตามที่แสดงในสมการที่ (13) สำหรับค่า  $a$  ต่างๆ ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อค่า  $a > 0$  นั้น contact normal ของกลุ่มอนุภาคจะหนาแน่นในแนวตั้ง (3-direction) ในขณะที่เมื่อค่า  $a < 0$  นั้น contact normal ของกลุ่มอนุภาคจะหนาแน่นในแนวนอน (1- and 2-directions)

เมื่อแทนสมการที่ (13) ลงในสมการที่ (12) และทำการอินทิเกรตก็จะได้ fabric tensor  $F_{ij}$  ดังแสดงในสมการที่ (14) เราสามารถเห็นได้ว่าสภาพของ fabric tensor ในกรณี cross-anisotropic fabric condition นั้นสามารถแสดงด้วย parameter ตัวเดียว คือ  $a$

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{3a-5}{5(a-3)} & & \\ & \frac{3a-5}{5(a-3)} & \\ & & \frac{-(5+a)}{5(a-3)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

ในขณะที่เดียวกันระหว่างการวิเคราะห์ DEM นั้นข้อมูลของ contact normal distribution สามารถได้มาจากข้อมูลการคำนวณโดยตรงและค่า fabric tensor สามารถวิเคราะห์ได้ตามสมการที่ (15) ซึ่งเป็น limited form ของสมการที่ (12)

$$F_{ij} = \frac{1}{N_c} \sum_{N_c} n_i n_j \dots\dots\dots (15)$$

โดยที่  $N_c$  คือจำนวนของจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคเท่านั้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า fabric tensor ที่ได้จากการคำนวณ DEM โดยตรงจากสมการที่ (15) กับสมการ analytical ตามสมการที่ (14) ก็จะสามารถหาค่า degree of fabric anisotropy  $a$  ที่เกิดขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ DEM (โดยในโครงการวิจัยนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยของ  $a$  จากทั้ง 3 แกน) ค่า degree of fabric anisotropy  $a$  นี้คำนวณโดยใช้ฟังก์ชันที่เขียนขึ้นมาเอง จากการวิเคราะห์จะพบว่า contact normals distribution จากการวิเคราะห์ DEM ตรงกับที่ได้จาก analytical solution ในสมการที่ (14) ซึ่งการเปรียบเทียบนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 ในการวิจัยนี้ค่า degree of fabric anisotropy  $a$  และการเปลี่ยนแปลงของมันจะใช้เป็นคุณสมบัติที่อธิบายการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินในขณะต่างๆ

**2.4 วิธีดำเนินการวิเคราะห์**

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทดสอบ isotropically consolidated undrained triaxial compression loading และ extension unloading กลุ่มของอนุภาคขนาดไม่เท่ากันที่บรรจุอยู่ในกำแพงขอบเขตรูปลูกบาศก์นั้นถูกใช้แทนตัวอย่างดิน ค่าคุณสมบัติของกลุ่มของอนุภาคที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 1 การคำนวณนี้เลือกใช้กลุ่มของอนุภาคที่มีจำนวนอนุภาคค่อนข้างมาก (3500-3800 อนุภาค) เมื่อเทียบกับขนาดของตัวอย่างดิน ค่า shear modulus และ Poisson's ratio ของอนุภาคที่ใช้สำหรับ simplified Hertz-Mindlin contact model นั้นใช้ค่าของ glass bead ตามที่ให้ไว้โดย Cundall (1988b) ค่าความหนาแน่นของอนุภาคนั้นใช้เท่ากับค่าโดยทั่วไปของดิน (Lambe & Whitman, 1979) สำหรับค่า inter-particle friction angles ที่ใช้นั้นจะมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับของ glass bead ( $\phi_\mu$  ของ glass bead =  $15^\circ$ ) เพราะจะทำให้ผลการวิเคราะห์ DEM ตรงกับความเป็นจริงและเสถียรมากกว่า เหตุผลน่าจะเป็นเพราะอนุภาคที่ใช้ในการวิเคราะห์ DEM เป็นทรงกลมทำให้มีการกลิ้งหรือหมุนง่ายกว่าในความเป็นจริง จึงต้องใช้ inter-particle friction angle ที่มากกว่าเพื่อชดเชยส่วนนี้

การทดสอบ triaxial test จะถูกจำลองด้วยการเคลื่อนที่ของกำแพงขอบเขต 6 อัน โดยจะเคลื่อนที่ใน strain-rate ที่กำหนดสำหรับ strain-controlled condition หรือให้รักษา stress ที่กำหนดด้วย servo-

control สำหรับ stress-controlled condition และในการวิเคราะห์นี้ไม่พิจารณาแรงดึงดูดโลก โดยในหัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายแต่ละขั้นตอนในการวิเคราะห์ DEM

#### 2.4.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างดินถูกเตรียมโดยการเติมอนุภาคขนาดเล็กในจำนวนที่ได้คำนวณไว้แล้วลงในช่องว่างรูปลูกบาศก์ก่อนจะขยายขนาดของอนุภาคนั้นให้เป็นที่ต้องการเพื่อให้ได้ void ratio ตามต้องการ อนุภาคที่ใช้จะมีขนาดไม่เท่ากัน การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธี radius-expansion นี้มีข้อได้เปรียบว่าการเตรียมโดยการขยับกำแพงขอบเขตเพื่อให้ได้ void ratio ที่ต้องการ คือ วิธี radius-expansion จะให้ตัวอย่างที่ isotropic และ uniform มากกว่า ใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่าเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล และรักษาขนาดเดิมของตัวอย่างไว้ได้ (Itasca, 1999) รูปของกลุ่มอนุภาคที่ใช้แทนตัวอย่างดินหลังจากการเตรียมโดยวิธี radius expansion method ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5

#### 2.4.2 การจัดสภาพเริ่มต้น/การ preshearing

หลังจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแล้ว ตัวอย่างจะถูก isotropically consolidated ภายใต้ confining stress เท่ากับ 1 MPa ขนาดของ confining stress ที่ 1 MPa นี้เป็นค่าสมมุติและไม่ได้ตั้งใจที่จะไปเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้สำหรับดินจริง

ในการที่จะสร้างการจัดเรียงตัวของอนุภาคแบบต่าง ๆ นั้น บางตัวอย่างจะถูก undrained preshearing และ isotropically reconsolidated กลับไปที่  $p'=1$  MPa โดย undrained preshearing นี้จะกระทำในทิศ compression หรือ extension การทำ preshearing นี้ตั้งใจเพื่อจะให้ตัวอย่างมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคต่าง ๆ กันสำหรับการเฉือนในภายหลัง ตัวอย่างที่ถูก preshearing ในทิศ compression จะมี contact normal หนาแน่นในแนวตั้ง ( $a>0$ ) ในขณะที่ตัวอย่างที่ถูก preshearing ในทิศ extension จะมี contact normal หนาแน่นในแนวนอน ( $a<0$ ) ส่วนตัวอย่างที่ไม่ถูกการ preshearing ใดๆจะมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคแบบ isotropic ( $a\approx 0$ )

ค่า void ratio ของตัวอย่างก่อนการ preshearing นั้นถูกปรับโดยการ trial&error เพื่อให้ค่า void ratio หลังการ preshearing/reconsolidation มีค่าเท่ากันในทุกตัวอย่างทั้งที่ถูก preshearing ในทิศต่างๆ และไม่ถูก preshearing ฉะนั้นค่า void ratios ของทุกตัวอย่างก่อนการเฉือนขั้นสุดท้ายจะมีค่าเท่ากันหมด

#### 2.4.3 การเฉือนขั้นสุดท้าย

ท้ายที่สุดตัวอย่างที่อยู่ภายใต้ isotropic confining stress เดียวกัน และมี void ratio เท่ากันแต่มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคไม่เหมือนกัน จะถูกเฉือนขั้นสุดท้ายแบบ monotonic drained shearing ทั้งในแบบ compression loading และ extension unloading พฤติกรรมของตัวอย่างในช่วงนี้เป็นส่วนที่สนใจสำหรับโครงการวิจัยนี้ และ ผลการทดลองจะแสดงและวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป



หมายเหตุว่าการเฉือนตัวอย่างด้วยการขยับกำแพงแข็งหกอันนี้ไม่ได้เป็นการจำลองการทดสอบ triaxial อย่างแท้จริง เพราะในการทดสอบ triaxial นั้นขอบเขตทางด้านข้างจะ flexible เนื่องจากมี rubber membrane ซึ่งไม่ rigid อย่างที่จำลองในแบบจำลองโดย DEM การจำลองแบบที่ทำโดย DEM นั้นจะไม่อนุญาตให้ตัวอย่างเกิด shear band และ bifurcation ดังนั้นพฤติกรรมที่ได้จากการจำลอง DEM ควรจะพิจารณาว่าเป็น element behavior

## 2.5 แผนการดำเนินการทดลอง

แผนการวิเคราะห์ที่ได้ถูกออกแบบเพื่อศึกษาผลกระทบของ initial anisotropic soil fabric และการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างการเฉือนแบบระบายน้ำ โดยรายละเอียดของแผนการดำเนินการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ในแต่ละส่วนนั้นตัวอย่างดินจะมี void ratio เท่ากันและอยู่ภายใต้ isotropic consolidation stress เดียวกัน แต่มี initial soil fabric ต่างกันจากนั้นจะถูกเฉือนขั้นสุดท้าย สภาพตัวอย่างดังต่อไปนี้ได้ถูกจำลอง

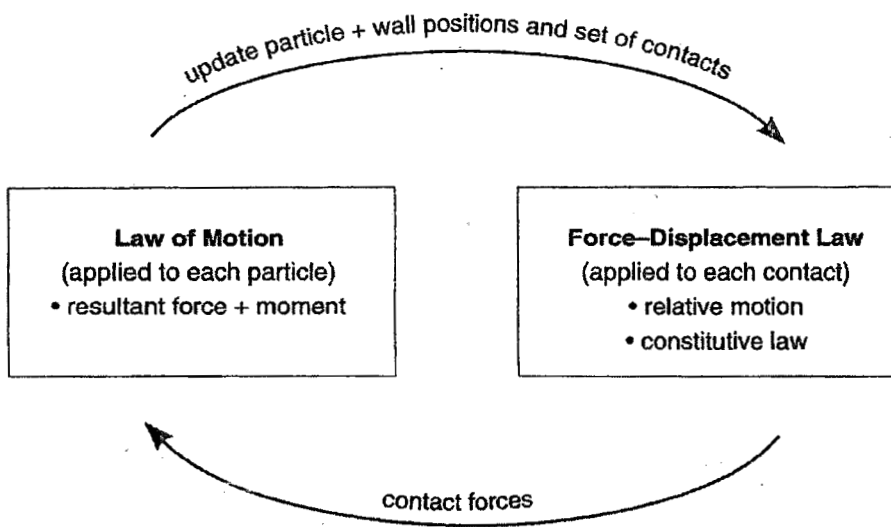
- ลักษณะการเฉือนแบบต่างๆ (compression/extension)
- ทิศทางการเฉือนต่างๆ (vertical/horizontal)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างๆในการวิเคราะห์ DEM

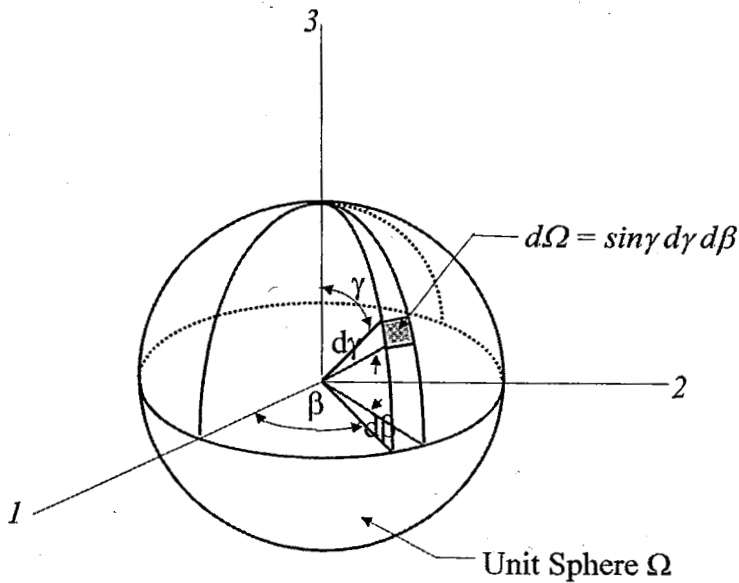
Number of particles	Loose specimen: approx. 3500 Dense specimen: approx. 3900
Radius of particle	Normal distribution at mean radius of 4 cm (max. radius = 5 cm and min. radius = 3 cm)
Initial specimen size	$1.2 \times 1.2 \times 1.2 \text{ m}^3$
Initial void ratio	Loose specimen: 0.73 Dense specimen: 0.58
Particle density	$2700 \text{ kg/m}^3$
Inter-particle friction angle	$45^\circ$
Particle-wall friction angle	$0^\circ$ (smooth wall)
Contact model	Simplified Hertz-Mindlin
Particle shear modulus	$29 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Particle Poisson's ratio	0.2

ตารางที่ 2 แผนการทดลอง

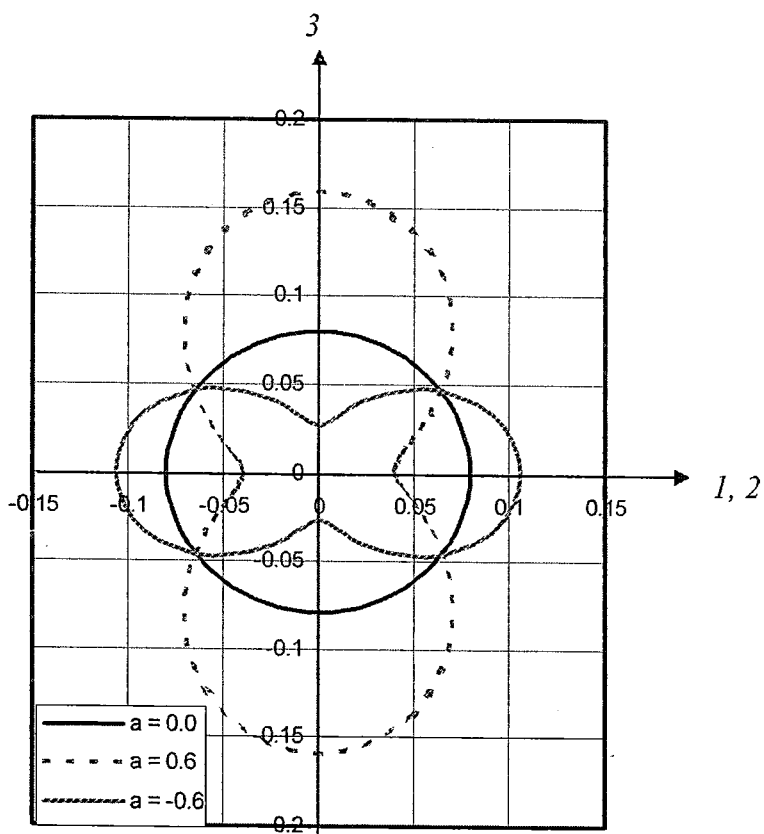
Test number	Initial degree of fabric anisotropy, $a_0$	Initial void ratio, $e_0$	Nominal isotropic confining stress, $p_0'$ (MPa)	Mode of shearing	Direction of shearing	Drainage condition
D-DVC1	-0.01	0.59	1	Compression	Vertical	Drained
D-DVE1	-0.01	0.59	1	Extension	Vertical	Drained
D-DHC1	-0.01	0.59	1	Compression	Horizontal	Drained
D-DVC2	0.12	0.57	1	Compression	Vertical	Drained
D-DVE2	0.12	0.57	1	Extension	Vertical	Drained
D-DHC2	0.12	0.57	1	Compression	Horizontal	Drained
D-DVC3	-0.13	0.59	1	Compression	Vertical	Drained
D-DVE3	-0.13	0.59	1	Extension	Vertical	Drained
D-DHC3	-0.13	0.59	1	Compression	Horizontal	Drained



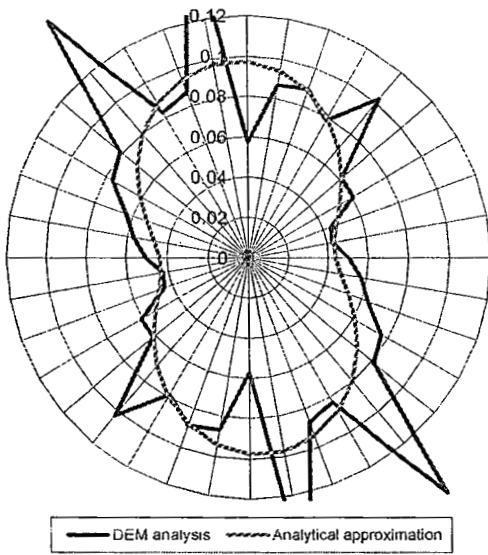
รูปที่ 1 วงรอบการคำนวณในการวิเคราะห์แบบ DEM (Itasca, 1999)



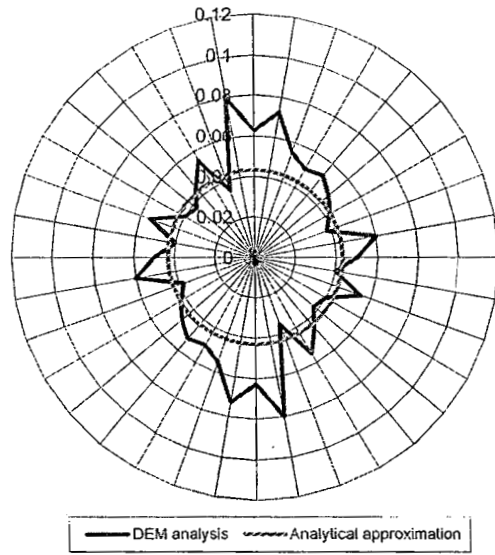
รูปที่ 2 Elementary solid angle



รูปที่ 3 Contact normals distribution function



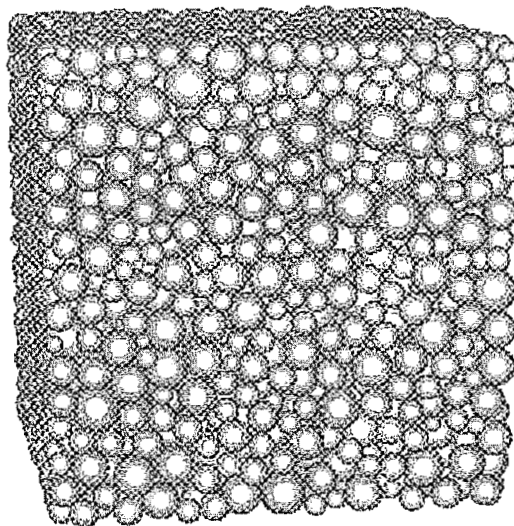
Vertical section



Horizontal section

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ( $a = 0.39$ )

รูปที่ 4 เปรียบเทียบ contact normals distribution จากการศึกษา DEM และจาก analytical approximation



รูปที่ 5 ตัวอย่างในการวิเคราะห์ DEM หลังจากการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธี radius-expansion (ไม่แสดงกำแพงขอบเขต)

### บทที่ 3 พฤติกรรมภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำ

ในบทนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์ DEM ที่ทำการทดสอบ monotonic drained triaxial compression และ extension shearing

#### 3.1 ผลกระทบของ initial soil fabric

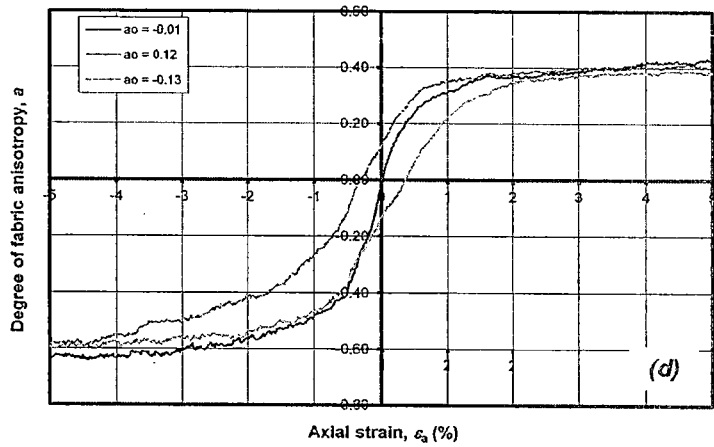
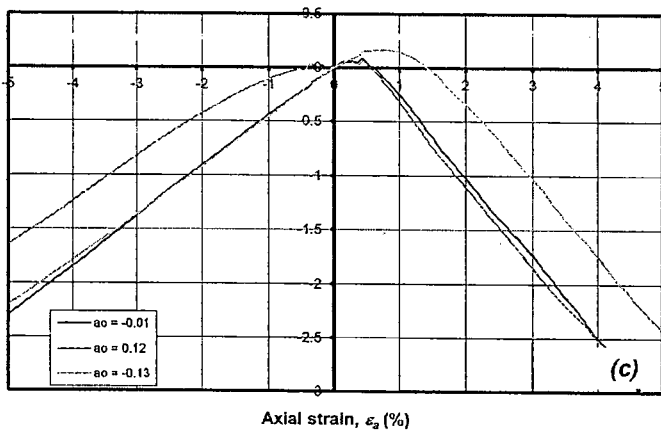
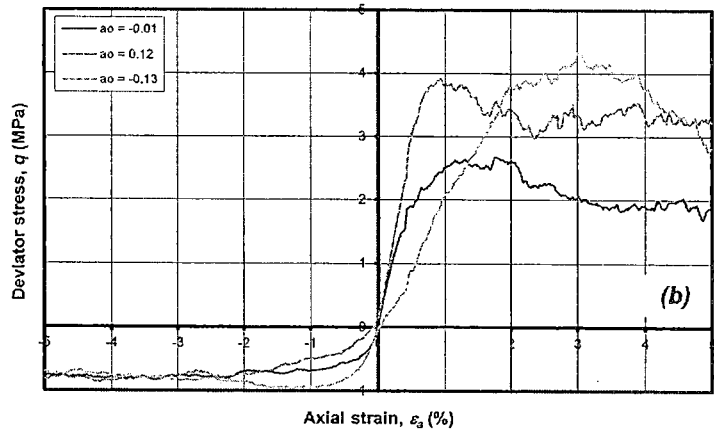
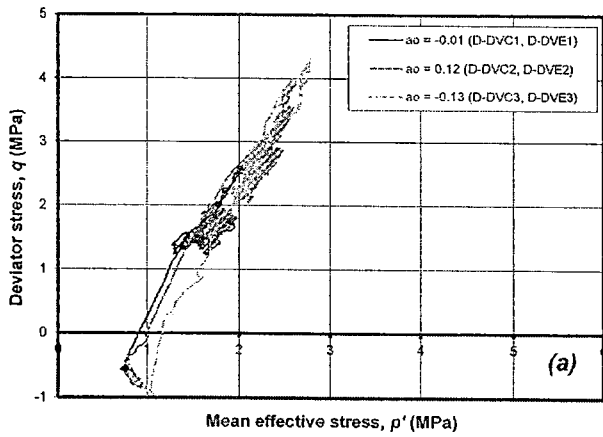
ผลกระทบของ initial degree of fabric anisotropy  $a_0$  ต่อ undrained behavior นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่า drained behavior ของตัวอย่างที่มี initial soil fabric ลักษณะต่างๆมีค่าต่างกันมาก ถึงแม้ว่าตัวอย่างทั้งหมดจะมี void ratio ที่เท่ากันและอยู่ภายใต้ isotropic stress state ที่เท่ากัน สำหรับการทดสอบแบบ drained compression shearing (ค่า  $q$  เป็นบวก) นั้นตัวอย่างที่ถูก preshearing แบบ compression mode ( $a_0 > 0$ ) จะมีพฤติกรรม dilative มากกว่าและมี stiffness ที่มากกว่า ในขณะที่ตัวอย่างที่ถูก preshearing แบบ extension mode ( $a_0 < 0$ ) จะมีพฤติกรรม contractive มากกว่าและมี stiffness ที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของตัวอย่างต่างๆจะตรงกันข้ามสำหรับการทดสอบแบบ drained extension shearing (ค่า  $q$  เป็นลบ) โดยที่ตัวอย่างที่ถูก preshearing แบบ extension mode ( $a_0 < 0$ ) จะมีพฤติกรรม dilative มากกว่าและมี stiffness ที่มากกว่า ในขณะที่ตัวอย่างที่ถูก preshearing แบบ compression mode ( $a_0 > 0$ ) จะมีพฤติกรรม contractive มากกว่าและมี stiffness ที่น้อยกว่า สำหรับตัวอย่างที่ไม่ถูก preshearing หรือตัวอย่าง isotropic ( $a_0 \approx 0$ ) จะมีพฤติกรรมอยู่ระหว่างพฤติกรรมของตัวอย่าง anisotropic ทั้งสองแบบ

#### 3.2 Anisotropy

ตัวอย่างบางตัวอย่างจะถูกเฉือนแบบ drained compression shearing ทั้งในแนวตั้งและในแนวนอนเพื่อศึกษาคุณสมบัติ anisotropic characteristics ผลการวิเคราะห์ DEM ได้แสดงในรูปที่ 7 ( $a_0 \approx 0$ ), 8 ( $a_0 > 0$ ), และ 9 ( $a_0 < 0$ ) สำหรับตัวอย่างที่มี isotropic fabric ( $a_0 \approx 0$ ) จะมีพฤติกรรมจากการเฉือนในแนวตั้งและแนวนอนที่เหมือนกันซึ่งก็สามารถคาดหวังได้สำหรับ isotropic material (รูปที่ 7) สำหรับตัวอย่างที่มี anisotropic-fabric แบบที่ contact normal หนาแน่นในแนวตั้ง ( $a_0 > 0$ ) นั้นจะมีพฤติกรรมของการเฉือนในแนวตั้งที่มี stiffness มากกว่า, strength มากกว่า, และ dilative มากกว่า ตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวนอน (รูปที่ 8) ในทางกลับกันตัวอย่างที่มี anisotropic-fabric แบบที่ contact normal หนาแน่นในแนวนอน ( $a_0 < 0$ ) นั้นจะมีพฤติกรรมของการเฉือนในแนวนอนที่มี stiffness มากกว่า, strength มากกว่า, และ dilative มากกว่าตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวตั้ง (รูปที่ 9)

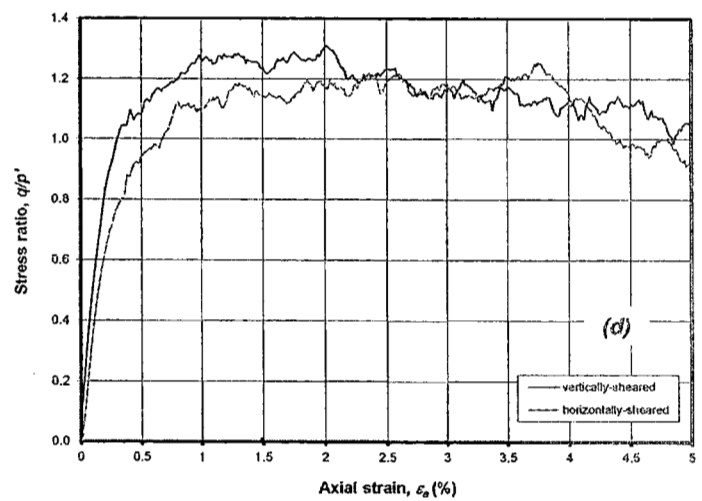
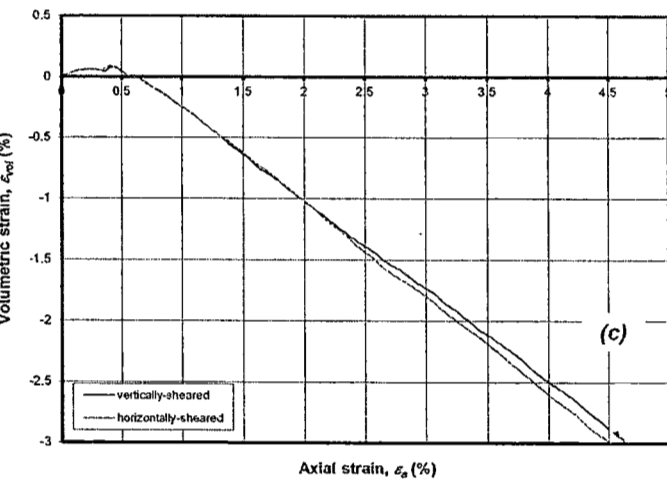
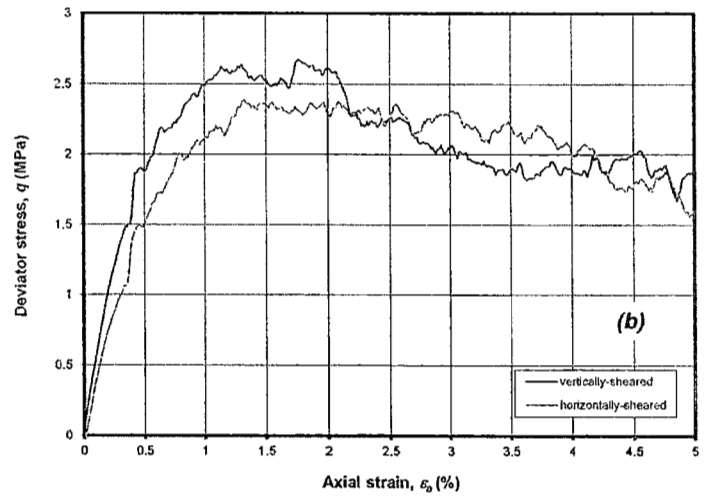
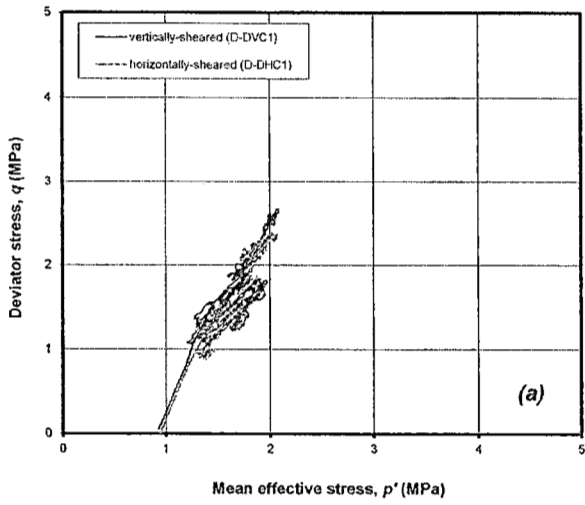
ถึงแม้ว่าจะไม่มีผลการวิเคราะห์ DEM สำหรับการเฉือนแบบ drained extension แต่ก็น่าจะคาดได้ว่าผลที่ได้น่าจะเป็นไปในทางตรงข้ามกับของ drained compression

หมายเหตุตรงนี้ว่าค่า degree of fabric anisotropy ไม่สามารถคำนวณได้ตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วสำหรับตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวนอน เพราะว่า contact normal ของตัวอย่างที่เฉือนในแนวนอนไม่เป็นไปตามสมมุติฐานของ cross-anisotropic fabric ตามสมการที่ (13) แล้ว

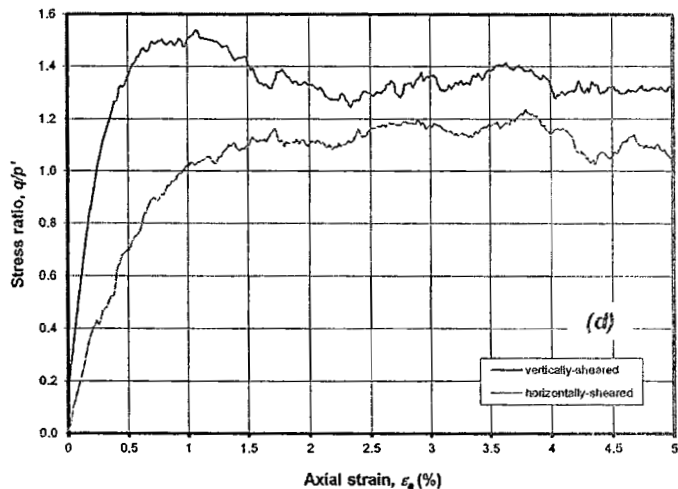
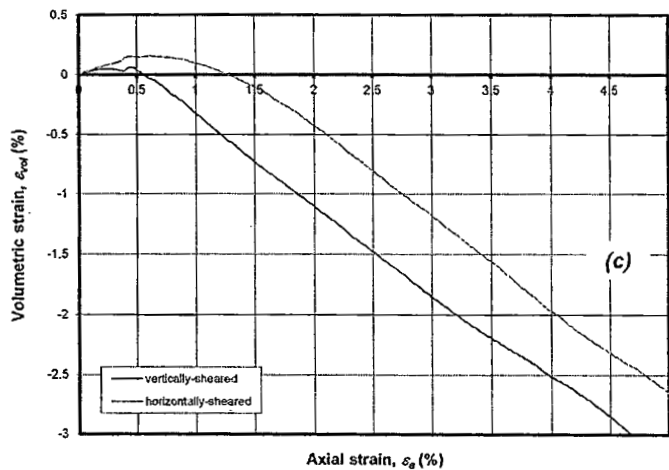
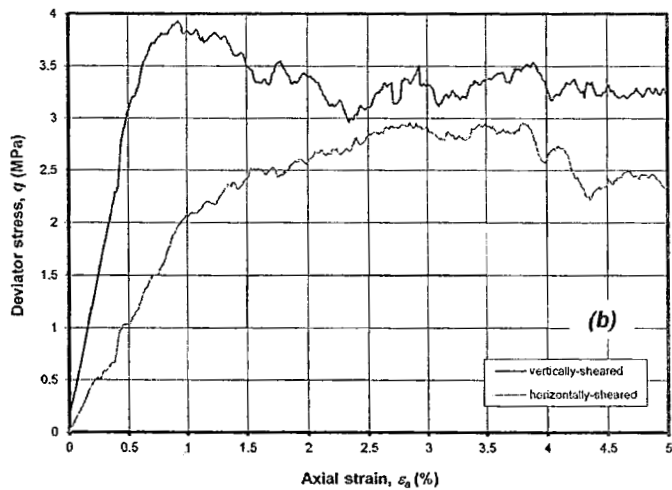
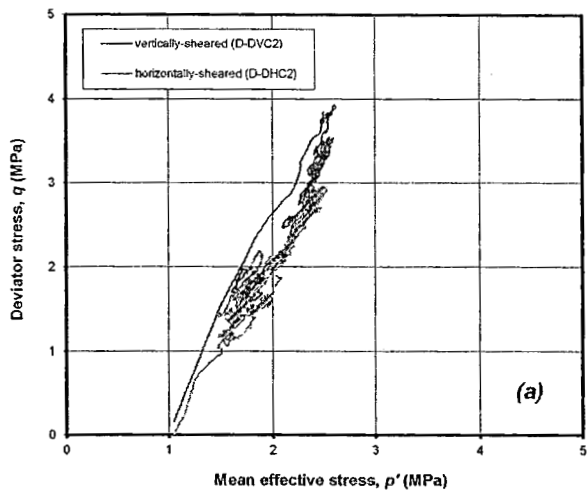


รูปที่ 6 ผลกระทบของ initial soil fabric ต่อพฤติกรรมภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำ: (a) Stress path, (b) Stress-strain curve, (c) Volumetric strain, (d) Degree of fabric anisotropy

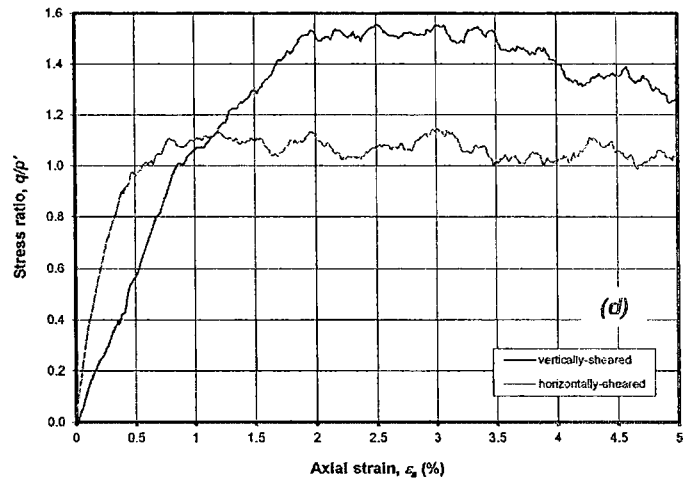
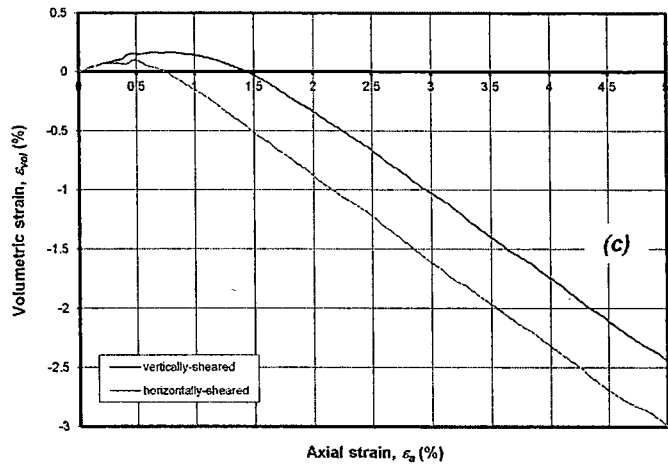
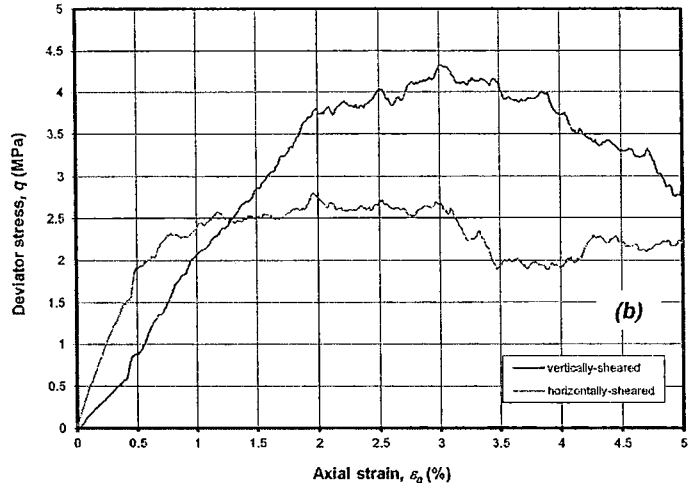
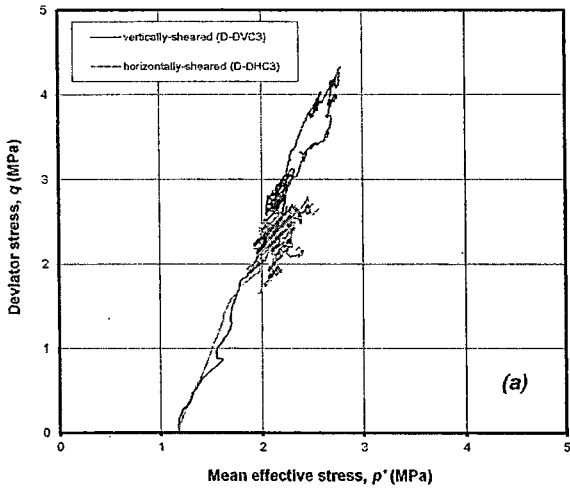




รูปที่ 7 พฤติกรรม anisotropic ภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำ ( $a_0 = -0.01$ ): (a) Stress path, (b) Stress-strain curve, (c) Volumetric strain, (d) Stress ratio



รูปที่ 8 พฤติกรรม anisotropic ภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำ ( $a_0 = 0.12$ ): (a) Stress path, (b) Stress-strain-curve, (c) Volumetric strain, (d) Stress ratio



รูปที่ 9 พฤติกรรม anisotropic ภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำ ( $a_0 = -0.13$ ): (a) Stress path, (b) Stress-strain curve, (c) Volumetric strain, (d) Stress ratio

## บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลองที่เคยตีพิมพ์โดยใช้ผลการวิเคราะห์ DEM

ในบทที่ 4 นี้ผลการวิเคราะห์ DEM ภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำที่ได้แสดงในบทที่ 3 จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการของทรายที่ได้เคยตีพิมพ์มาแล้ว โดยจะวิเคราะห์ลักษณะสำคัญที่พบในการทดลองนี้โดยการพิจารณาแบบจุลภาค

### 4.1 ผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายต่อคุณสมบัติภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำของทราย

ผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายต่อพฤติกรรม undrained static/cyclic ของทราย โดยเฉพาะพฤติกรรม cyclic และ liquefaction นั้นได้เป็นที่สนใจของนักวิจัยมากมาย โดยการศึกษาผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ (i) การศึกษาทางจุลภาคโดยตรงโดยการจัดเรียงตัวของอนุภาคเนื่องจากวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายแบบต่างๆ (เช่น resin impregnation/thin-section analysis) และ (ii) การศึกษาโดยอ้อมโดยการศึกษาถึงพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของตัวอย่างทรายที่เกิดจากวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายแบบต่างๆ (เช่น monotonic/cyclic triaxial tests) การสรุปงานที่ผ่านมาของนักวิจัยต่างๆได้แสดงในตารางที่ 3 และ 4

มันเป็นการยากที่จะหาข้อสรุปที่แน่นอนเกี่ยวกับผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายต่อพฤติกรรมทางจุลภาคของตัวอย่างทราย เพราะ การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของชนิดของทรายและวิธีการจะมีผลกระทบอย่างมากต่อผลการทดลองที่ได้ อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะสรุปแนวโน้มที่สังเกตได้จากตารางที่ 3 ดังนี้

- วิธี moist tamping จะสร้างตัวอย่างที่มี contact normal หนาแน่นในแนวตั้งมากที่สุด
- วิธี dry pluviation ร่วมกับ dynamic compaction (ตัวอย่างเช่นการเคาะและการสั่นสะเทือน) จะสร้างตัวอย่างทรายที่มี contact normal หนาแน่นในแนวตั้งและแกนยาวของอนุภาคหนาแน่นในแนวนอนสำหรับตัวอย่างแน่นปานกลางถึงแน่น ( $D_r = 62\%$  และ  $68\%$ ) ในขณะที่แกนยาวของอนุภาคจะจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบสำหรับตัวอย่างที่แน่นมาก ( $D_r = 90\%$  และ  $97\%$ ).
- วิธี dry pluviation นั้นหากมีการเพิ่มเติมด้วย dynamic compaction (ตัวอย่างเช่นการเคาะและการสั่นสะเทือน) ก็จะทำให้ contact normal มีความหนาแน่นในแนวตั้งเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มเติมด้วย plunging จะเป็นการทำลายการจัดเรียงของอนุภาคที่สร้างขึ้นมาก่อนหน้านั้นโดยวิธี dry pluviation นี้
- หากพิจารณาความหนาแน่นของ contact normal ในแนวตั้งจากมากที่สุดไปน้อยสุด จะสามารถเรียงวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายต่างๆได้ดังนี้ moist tamping, dry pluviation ร่วมกับ dynamic compaction, dry pluviation, และ dry pluviation ร่วมกับ plunging
- Moist tamping จะสร้างตัวอย่างที่ non-uniform ในขณะที่ water pluviation และ dry pluviation จะสร้างตัวอย่างที่ค่อนข้าง uniform

ถึงแม้ว่าข้อมูลในตารางที่ 3 จะแสดงแนวโน้มตามที่กล่าวมาข้างต้นแต่ก็ยังมีผลการทดลองของนักวิจัยบางคนไม่เป็นไปตามแนวโน้มนี้โดยน่าจะมีเหตุผลดังนี้ การศึกษาทางจุลภาคของ Ibrahim & Kagawa (1991) ให้ผลไม่ตรงกับแนวโน้มที่ได้สรุปไปแล้วซึ่ง Ibrahim & Kagawa (1991) ให้เหตุผลว่าค่า aspect ratio (ความยาวต่อความกว้างของอนุภาค) ที่มีค่ามากของทรายที่ใช้ทดลองทำให้ผลการทดลองที่ได้ผิดไป ซึ่งข้าพเจ้าคิดว่าการใช้ทรายที่มีความยาวมากอาจทำให้การพิจารณา contact normal หรือทิศทางของ contact plane direction ทำได้ยากซึ่งก็อาจจะเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองของผู้วิจัยนี้ไม่ตรงกับแนวโน้มโดยรวม

ผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างทรายต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของทรายจากงานวิจัยต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 4 จะสังเกตเห็นว่ามีการศึกษาพฤติกรรมของทรายภายใต้การเงื่อนไขแบบระบายน้ำเพียงงานเดียว ในการนี้จึงได้รวมผลการศึกษาพฤติกรรมของทรายภายใต้การเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำไว้ด้วย ซึ่งก็พบว่าข้อมูลแสดงแนวโน้มตรงกัน โดยที่ตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธี moist tamping จะมี stiffness มากที่สุด, strength มากที่สุด, cyclic stress ratio มากที่สุด, และมีพฤติกรรมแบบ dilative ในขณะที่ตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธี air pluviation (ร่วมกับ plunging) มี stiffness น้อยที่สุด, strength, cyclic stress ratio น้อยที่สุด, และมีพฤติกรรมแบบ dilative ส่วนตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธี air pluviation ร่วมกับ dynamic compaction นั้นมีพฤติกรรมอยู่ตรงกลาง

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาของ Vaid et al. (1999) แสดงความแตกต่างจากผลการทดลองอื่น Vaid et al. (1999) พบว่าตัวอย่างที่เตรียมโดยวิธี moist tamped ให้ steady-state strength ต่ำกว่าและมีพฤติกรรม contractive มากกว่าตัวอย่างที่เตรียมโดยวิธี water pluviation ในขณะที่นักวิจัยคนอื่นได้ผลตรงกันข้าม ความไม่ตรงกันนี้น่าจะเนื่องจากตัวอย่างทรายที่ Vaid et al. (1999) ใช้มี relative density ต่ำ ( $D_r = 32-44\%$ ) Lee et al. (1999) ได้แสดงความเห็นว่าการที่ตัวอย่างทรายที่เตรียมด้วยวิธี moist tamping จะให้ liquefaction resistance ที่มากกว่าจะเกิดขึ้นเฉพาะกับตัวอย่างทรายที่มีค่า relative density มาก ( $D_r > 45\%$ ) โดยที่ตัวอย่างทรายที่เตรียมโดยวิธี moist tamping จะให้ค่า liquefaction resistance ที่ต่ำกว่าเมื่อตัวอย่างนั้นมี relatively density ที่ต่ำ (โดยทั่วไป  $D_r < 30\%$ ) เนื่องจากวิธี moist tamping จะสร้างการจัดเรียงอนุภาคที่เปิดและ collapsible อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์นี้ไม่ถูกพบในการทดสอบตัวอย่างหลวมของทราย Nevada โดย Zlatovic & Ishihara (1997) แต่อย่างใด

ตารางที่ 5 สรุปและเชื่อมโยงผลการสังเกตในตารางที่ 3 และ 4 ซึ่งจะเห็นว่า initial contact normal distribution นั้นมีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของตัวอย่างทราย สำหรับกรณีของ drained triaxial compression นั้นเมื่อ contact normal หนาแน่นในแนวตั้ง (ทิศของแรงที่กระทำ) ค่า stiffness, strength, และ cyclic stress ratio จะเพิ่มขึ้นและดินจะมีพฤติกรรม dilative มากขึ้น ซึ่งข้อสรุปนี้ก็ตรงกับผลการวิเคราะห์ DEM ที่ได้แสดงในบทที่ 3 ซึ่งแสดงว่าความแตกต่างของ soil fabric ในรูปของ contact normal distribution เป็นเหตุผลเบื้องหลังผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของทราย

หมายเหตุว่าข้อสรุปข้างต้นนั้นมาจากผลงานที่ได้ตีพิมพ์ของการทดสอบ triaxial compression เท่านั้นเนื่องจากไม่สามารถหาผลงานที่ได้ตีพิมพ์สำหรับการทดสอบ extension ได้ อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ DEM ในบทที่ 3 แสดงว่าพฤติกรรมในการทดสอบแบบ extension น่าจะมีผลที่ตรงกันข้ามกับ

ผลการทดสอบแบบ compression Ladd (1977) ก็ได้ให้ความเห็นว่าการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินที่ทำให้ตัวอย่างดินมี static strength ที่สูงกว่าในการทดสอบแบบ compression ไม่จำเป็นที่จะต้องให้ static strength ที่สูงกว่าในการทดสอบแบบ extension

#### 4.2 คุณสมบัติ anisotropy ภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำของทราย

Athur & Menzies (1972) ได้ศึกษาพฤติกรรม anisotropy ภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำของตัวอย่างสี่เหลี่ยมของทราย Leighton Buzzard โดยใช้เครื่องมือ cubical triaxial ตัวอย่างทรายแห้งถูกเตรียมด้วยวิธี air pluviation กับตัวอย่างที่มีมุมเอียงกับทิศ major stress direction ต่างๆ ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อตัวอย่างถูกเฉือนในทิศทางที่ทรายตก (แนวตั้ง หรือ ตั้งฉากกับระนาบการวางตัวของอนุภาค) ตัวอย่างจะมี strength และ stiffness มากที่สุด ในขณะที่ถ้าตัวอย่างถูกเฉือนในแนวเดียวกับระนาบการวางตัวของอนุภาค (แนวนอน) ตัวอย่างจะมี strength และ stiffness ต่ำที่สุด

Oda (1972a) ได้ทำการทดลอง drained triaxial compression test กับตัวอย่างทรายที่เตรียมโดยวิธี water pluviation ร่วมกับ tapping โดยเตรียมที่มุมเอียงของตัวอย่างต่างๆ ผลการทดลองพบว่าเมื่อทิศทางของ major principal stress เปลี่ยนจากแนวตั้งเป็นแนวนอนจะทำให้ stiffness และ strength ลดลงและจะทำให้ตัวอย่างมีพฤติกรรม contractive มากขึ้น Oda (1981) ได้ทำการทดลอง drained biaxial tests (สภาพ plane-strain) กับตัวอย่างทราย Toyoura, Tochigi, และ glass bead ซึ่งถูกเตรียมโดยวิธี dry pluviation และผลการทดลองแสดงว่าตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวตั้งนั้นมี strength และ stiffness ที่มากกว่า และมีพฤติกรรม dilative มากกว่าตัวอย่างดินที่ถูกเฉือนในแนวนอน

Miura & Toki (1984) ได้ทำการทดลอง drained triaxial compression และ extension tests กับตัวอย่างทรายที่เตรียมโดยวิธี Multi-Sieve Pluviation (MSP) (Miura & Toki, 1982) และตัวอย่างทรายคงสภาพด้วยซึ่งได้มาจาก block sample ด้วยวิธีการแช่แข็ง ผลการทดลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 ซึ่งแสดงว่าสำหรับการทดสอบแบบ triaxial compression นั้นตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวตั้งจะมี stiffness และ strength ที่สูงกว่า และมีพฤติกรรม dilative มากกว่าตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวนอน ในทางกลับกันสำหรับการทดสอบ triaxial extension นั้นตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวนอนจะมี stiffness และ strength ที่สูงกว่า และมีพฤติกรรม dilative มากกว่าตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวตั้ง

ผลการทดสอบ DEM ในบทที่ 3 แสดงว่าพฤติกรรม anisotropic ที่พบเกิดขึ้นเนื่องจาก anisotropic characteristic ของ soil fabric ผลการทดลองที่ได้กล่าวไปแล้วให้ผลตรงกับผลการวิเคราะห์ DEM ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นกรณีของ  $a_0 > 0$  การเปรียบเทียบนี้บอกเป็นนัยว่าตัวอย่างทรายที่เตรียมโดยวิธี air pluviation และ water pluviation รวมทั้งตัวอย่างคงสภาพนั้นมี contact normal หนาแน่นในแนวตั้ง

ตารางที่ 3 การศึกษาทางจุลภาคของลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายที่เกิดจากวิธีการเตรียมตัวอย่างแบบต่างๆ

Sand type	Sand characteristics	Specimen reconstitution	Microscopic characteristics	References
Sand C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniform sand</li> <li>- Rounded to subrounded particle</li> <li>- Length to width ratio = 1.45</li> <li>- <math>D_r = 68\%</math></li> </ul>	Dry pluviation + tapping	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Long axes concentrate in the horizontal direction</li> <li>- Contact normals concentrate in vertical direction</li> </ul>	Oda (1972a, b)
		Dry pluviation + plunging	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Long axes concentrate in the vertical direction</li> <li>- Contact normals distribute randomly</li> </ul>	
Crushed Basalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Silty fine sand</li> <li>- Length to width ratio = 1.64</li> <li>- <math>D_r = 62, 90\%</math></li> </ul>	Dynamic compaction (tapping) ( $D_r = 90\%$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Long axes distribute randomly</li> </ul>	Mahmood & Mitchell (1974)
		Static compaction (slow loading) ( $D_r = 90\%$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Long axes distribution showed a weak bimodal preferred orientation at nearly <math>45^\circ</math> from horizontal</li> </ul>	
		Dry pluviation ( $D_r = 62\%$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Long axes concentrate in the horizontal direction</li> </ul>	
Monterey #0 Sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniform medium sand</li> <li>- Rounded and somewhat elongate particle</li> <li>- Length to width ratio = 1.39</li> <li>- <math>D_r = 53</math> to <math>106\%</math></li> </ul>	Dry pluviation $D_r = 53\%, 106\%$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Long axes distribute randomly for both loose and dense specimen</li> </ul>	Mahmood et al. (1976)
		Vertical vibratory compaction $D_r = 97\%, 104\%$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Long axes distribute randomly when the vibration is shorter than required to attain <math>D_r = 100\%</math> but long axes concentrate in the direction of <math>40^\circ</math> from horizontal when the vibration is longer than required to attain <math>D_r = 100\%</math>.</li> </ul>	
Monterey #0 Sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniform medium sand</li> <li>- Rounded to sub-rounded particle</li> <li>- Length to width ratio = 1.40</li> <li>- <math>D_r = 50\%</math></li> </ul>	Moist tamping	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Highest contact normals distribution in vertical direction</li> <li>- Nonuniform density distribution (by X-ray analysis)</li> </ul>	Mullis et al. (1977)
		Dry vibration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intermediate contact normals distribution in vertical direction</li> <li>- Relatively uniform density distribution (by X-ray analysis)</li> </ul>	
		Dry pluviation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lowest contact normals distribution in vertical direction</li> <li>- Relatively uniform density distribution (by X-ray analysis)</li> </ul>	

ตารางที่ 3 (ต่อ) การศึกษาทางจุลภาคของลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคทรายที่เกิดจากวิธีการเตรียมตัวอย่างแบบต่างๆ

Sand type	Sand characteristics	Specimen reconstitution	Microscopic characteristics	References
Toyoura Sand	- $D_{50} = 0.18$ mm - $D_r = 80\%$	Dry pluviation by MSP* method	- Long axes concentrate in horizontal direction	Miura & Toki (1984)
Ishikari Sand	- $D_{50} = 0.26$ mm - $D_r = 85\%$		- Long axes concentrate in the direction of $45^\circ$ from horizontal	
Ottawa Sand, ASTM C-109	- $D_{50} = 0.4$ mm - $D_r = 35\%, 80\%$	Water pluviation	- Uniform density distribution (by comparing the void ratio of horizontal slices of solidified sample by gelatin technique)	Vaid & Negusse (1988)
Detroit River Sand	- Angular to sub-rounded particle - Length to width ratio = 2.0 - $D_r = 50\%$	Moist tamping	- Highest contact normals distribution in horizontal direction	Ibrahim & Kagawa (1991)
		Dry vibration (horizontally)	- Intermediate contact normals distribution in horizontal direction	
		Dry pluviation	- Contact normal distributes randomly	
Fraser River Sand	- Uniform medium grained - $D_{50} = 0.3$ mm - $D_r = 17\%$	Moist tamping	- Nonuniform density distribution (by comparing the void ratio of horizontal slices of solidified sample by gelatin technique)	Vaid et al. (1999)

\* MSP = Multi-Sieve Pluviation



ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างทรายที่ได้จากวิธีการเตรียมตัวอย่างแบบต่างๆ

Sand type	Sand characteristics	TX* type	Sand reconstitution	Strength and stiffness characteristics	References
Sand C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniform sand</li> <li>- Rounded to subrounded particle</li> <li>- Length to width ratio = 1.45</li> <li>- <math>D_r = 68\%</math></li> </ul>	CIDC** $p_o' = 50\text{kPa}$	Dry pluviation + tapping	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Higher stiffness</li> <li>- More dilative</li> </ul>	Oda (1972b)
			Dry pluviation + plunging	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lower stiffness</li> <li>- More contractive</li> </ul>	
Sand with trace of silt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SP-SM</li> <li>- <math>D_r = 60\text{-}80\%</math></li> </ul>	Undrained cyclic TX	Moist tamping & moist vibration	- Higher cyclic stress ratio	Ladd (1974, 1977)
			Dry tamping & dry vibration	- Lower cyclic stress ratio	
Monterey #0 Sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniform sand</li> <li>- Sub-rounded particle</li> <li>- <math>D_r = 60\%</math></li> </ul>	Undrained cyclic TX $p_o' = 100\text{ kPa}$	Moist tamping	- Higher cyclic stress ratio	Silver et al. (1976)
			Dry tamping	- Lower cyclic stress ratio	
Monterey #0 Sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniform medium sand</li> <li>- Rounded to sub-rounded particle</li> <li>- Length to width ratio = 1.40</li> <li>- <math>D_r = 50\%</math></li> </ul>	Undrained cyclic TX $p_o' = 55\text{ kPa}$	Moist tamping	- Highest cyclic stress ratio	Mullis et al. (1977)
			Dry vibration	- Intermediate cyclic stress ratio	
			Dry pluviation	- Lowest cyclic stress ratio	
Detroit River Sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Angular to sub-rounded particle</li> <li>- Length to width ratio = 2.0</li> <li>- <math>D_r = 50\%</math></li> </ul>	Undrained cyclic torsional simple shear on hollow cylinder specimen $\sigma_{vo}' = 57\text{ kPa}$	Moist tamping	- Higher cyclic stress ratio	Ibrahim & Kagawa (1991)
			Dry pluviation	- Lower cyclic stress ratio	
Nevada #120 Sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>e = 0.80</math></li> <li>- <math>D_r = 23\%</math></li> </ul>	CIUC*** $p_o' = 300\text{ kPa}$	Moist tamping	- More dilative	Zlatovic & Ishihara (1997)

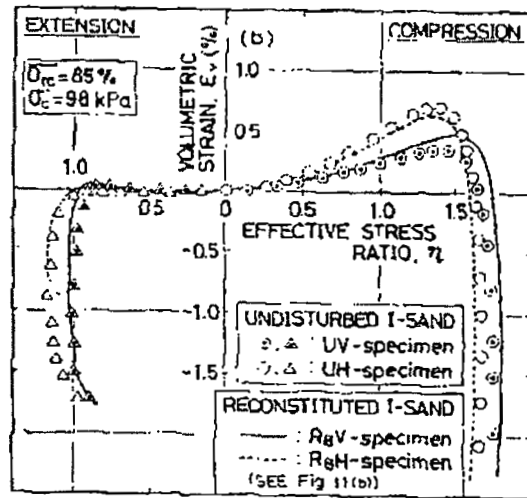
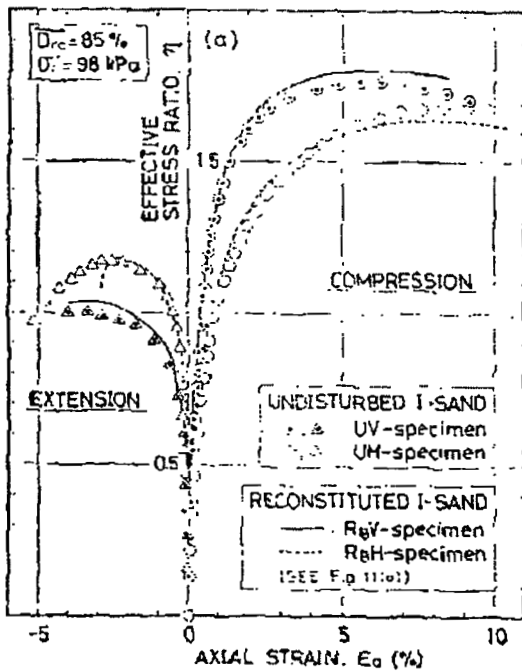
ตารางที่ 4 (ต่อ) คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างทรายที่ได้จากวิธีการเตรียมตัวอย่างแบบต่างๆ

Sand type	Sand characteristics	TX type	Sand reconstitution	Strength and stiffness characteristics	References
Masado soil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Well draded decomposed granite</li> <li>- Gravel content = 55%</li> <li>- <math>e = 0.345, 0.360</math></li> <li>- <math>D_r = 44, 50\%</math> (exclude gravel)</li> </ul>	CIUC $p_o' = 100, 200 \text{ kPa}$	Moist tamping	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Higher stiffness</li> <li>- More dilative</li> </ul>	Tsukamoto et al. (1998)
			Water pluviation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lower stiffness</li> <li>- More contractive</li> </ul>	
HK marine sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SP</li> <li>- Silica sand</li> <li>- Subangular to subrounded particle</li> </ul>	CIUC $D_r = 51\%$ and $91\%$ $p_o' = 200 \text{ kPa}$	Moist tamping	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Higher stiffness</li> <li>- More dilative</li> </ul>	Lee et al. (1999)
			Dry pluviation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lower stiffness</li> <li>- More contractive</li> </ul>	
		Undrained cyclic TX ( $D_r = 46-100\%$ ), $p_o' = 150 \text{ kPa}$	Moist tamping	- Higher cyclic stress ratio	
			Dry pluviation	- Lower cyclic stress ratio	
Fraser River Sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniform medium-grained</li> <li>- <math>D_{50} = 0.3 \text{ mm}</math></li> </ul>	CIUC $p_o' = 100 \text{ kPa}$ $D_r = 44\%$	Moist tamping	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lower steady-state strength</li> <li>- More contractive</li> </ul>	Vaid et al. (1999)
			Water pluviation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Higher steady-state strength</li> <li>- More dilative</li> </ul>	
		Undrained simple shear $\sigma_{vo}' = 100 \text{ kPa}$ $D_r = 32\%$	Dry pluviation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lower steady-state strength</li> <li>- More contractive</li> </ul>	
			Water pluviation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Higher steady-state strength</li> <li>- More dilative</li> </ul>	
Syncrude Sand	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniform medium grained sand</li> <li>- <math>D_{50} = 0.2 \text{ mm}</math></li> </ul>	Undrained simple shear $\sigma_{vo}' = 200 \text{ kPa}$ $D_r = 44\%$	Moist tamping	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lowest steady-state strength</li> <li>- Most contractive</li> </ul>	
			Dry pluviation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intermediate steady-state strength</li> <li>- Intermediate between contractive and dilative</li> </ul>	
			Water pluviation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Higher steady-state strength</li> <li>- Most dilative</li> </ul>	

\* TX = triaxial test, \*\* CIDC = Isotropically Consolidated Drained Compression, \*\*\* CIUC = Isotropically Consolidated Undrained Compression

ตารางที่ 5 ผลกระทบของ soil fabric ต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของตัวอย่างทราย

Sample reconstitution methods	Contact normals distribution	Mechanical behaviors
Moist tamping	Highest concentrate in the vertical direction	Highest stiffness and strength Most dilative
Dry pluviation with dynamic compaction	Intermediate concentrate in the vertical direction	Intermediate stiffness and strength Intermediate dilative
Dry pluviation	Lowest concentrate in the vertical direction	Lowest stiffness and strength Least dilative (most contractive)



รูปที่ 10 พฤติกรรม anisotropic ภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำของตัวอย่างที่ถูกเฉือนในแนวตั้งและแนวอนของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการและตัวอย่างคงสภาพ (Miura & Toki, 1984)

## บทที่ 5 บทสรุป

พฤติกรรม stress-strain ของดินในสภาพระบายน้ำได้ถูกศึกษาโดยการวิเคราะห์ DEM โดยการจำลองการทดสอบ isotropically consolidated triaxial compression loading and extension unloading และ ทำการศึกษาผลกระทบของการจัดเรียงตัวของเม็ดดินต่อพฤติกรรมของดินที่สังเกตได้

ผลการวิเคราะห์ DEM แสดงว่าสภาพ initial soil fabric มีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมภายใต้การเฉือนแบบระบายน้ำในช่วง intermediate-strain ถ้าตัวอย่างถูกเฉือนในทิศทางที่มี contact normal หนาแน่น ตัวอย่างจะมี stiffness มากกว่า, strength มากกว่า, และมีพฤติกรรม dilative มากกว่า ในทางกลับกันถ้าตัวอย่างถูกเฉือนเฉือนในทิศตรงกันข้ามผลก็จะเป็นตรงกันข้าม ผลกระทบของวิธีการเตรียมตัวอย่างดินสามารถอธิบายได้อย่างเป็นรูปธรรมด้วยความแตกต่างของ initial soil fabric จากผลการวิเคราะห์ DEM

พฤติกรรม anisotropic ของทรายภายใต้ isotropic stress condition นั้นสามารถอธิบายได้อย่างเป็นรูปธรรมว่าเกิดจากสภาพ anisotropic soil fabric จากผลการวิเคราะห์ DEM สำหรับตัวอย่างที่มี contact normal หนาแน่นในแนวตั้ง ( $a_0 > 0$ ) เมื่อถูกกดในแนวตั้งจะมี stiffness มากกว่า, strength มากกว่า, และมีพฤติกรรม dilative มากกว่าเมื่อถูกกดในแนวนอน ในทางกลับกันสำหรับตัวอย่างที่มี contact normal หนาแน่นในแนวนอน ( $a_0 < 0$ ) เมื่อถูกกดในแนวนอนจะมี stiffness มากกว่า, strength มากกว่า, และมีพฤติกรรม dilative มากกว่าเมื่อถูกกดในแนวตั้ง พฤติกรรม anisotropic จากผลการวิเคราะห์ DEM ในกรณีของ  $a_0 > 0$  (contact normal หนาแน่นในแนวตั้ง) ให้ผลคล้ายกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธี air pluviation, water pluviation, และตัวอย่างทรายคงสภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- Arthur, J. R. F. and Menzies, B. K. (1972), "Inherent anisotropy in a sand", *Geotechnique* 22, No. 1, pp. 115-128
- Bowden, F. P. and Tabor, D. (1964), *The Friction and Lubrication of Solids*, Part II., Oxford at Clarendon Press
- Castro, G. (1975), "Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 101, No. GT6, pp. 551-569
- Chang, C. S., Sundaram, S. S., and Misra, A. (1989), "Initial moduli of particulated mass with frictional contacts", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 13, pp. 629-644
- Christoffersen, J., Mehrabadi, M. M., and Nemat-Nasser, S. (1981), "A Micromechanical Description of Granular Material Behavior", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 48, pp. 339-344
- Cundall, P. A. (1971), "A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems", *Proc. of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics*, Nancy, France, Vol. 1, Paper No. II-8
- Cundall, P. A. (1988a), "Formulation of a Three-dimensional Distinct Element Model- Part I. A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 25, No. 3, pp. 107-116
- Cundall, P. A. (1988b), "Computer simulations of dense sphere assemblies", in *Micromechanics of Granular Materials*, Eds. Satake, M. & Jenkins, J. T., Elsevier Science Publishers B. V., pp. 113-123
- Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique* 29, No. 1, pp. 47-65
- Finn, W. D. L., Bransby, P. L., and Pickering, D. J. (1970), "Effect of strain history on liquefaction of sand", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM6, pp. 1917-1934
- Graham, J. and Houlsby, G. T. (1983), "Anisotropic elasticity of a natural clay", *Geotechnique* 33, No. 2, pp. 165-180

- Ibrahim, A. A. and Kagawa, T. (1991), "Microscopic Measurement of Sand Fabric from Cyclic Tests Causing Liquefaction" *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 14, No. 4, pp. 371-382
- Ishihara, K. (1993), "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique* 43, No. 3, pp. 351-415
- Ishihara, K. (1996), *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Clarendon Press, Oxford
- Ishihara, K. and Okada, S. (1978), "Effects of stress history on cyclic behaviour of sand", *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 4, pp. 31-45
- Ishihara, K. and Okada, S. (1982), "Effects of large preshearing on cyclic behaviour of sand", *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 3, pp. 109-125
- Ishihara, K., Tatsuoka, F., and Yasuda, S. (1975), "Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 1, pp. 29-44
- Itasca Consulting Group, Inc. (1999), *PFC<sup>3D</sup>: Particle Flow Code in 3 Dimensions, Version 2.0*, Vol. 1, 2, 3
- Ladd, R. S. (1974), "Specimen Preparation and Liquefaction of Sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, No. GT10, pp. 1180-1184
- Ladd, R. S. (1977), "Specimen Preparation and Cyclic Stability of Sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT6, pp. 535-547
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), *Soil Mechanics, SI Version*, John Wiley & Sons
- Lee, K. L. and Focht, J. A., Jr. (1975), "Liquefaction Potential at Ekofisk Tank in North Sea", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 101, No. GT1, pp. 1-18
- Lee, K. M., Shen, C. K., Leung, D. H. K., and Mitchell, J. K. (1999), "Effects of Placement Method on Geotechnical Behavior of Hydraulic Fill Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 10, pp. 832-946
- Lian, G., Thornton, C., and Kafui, D. (1994), *TRUBAL: A 3-D Computer Program for Modelling Particle Assemblies*, Department of Civil Engineering, Aston University, Birmingham, UK
- Mahmood, A. and Mitchell, J. K. (1974), "Fabric-property relations in fine granular materials", *Clays and Clay Minerals*, Vol. 22, pp. 397-408

- Mahmood, A., Mitchell, J. K., and Lindblom, U. (1976), "Effect of Specimen Preparation Method on Grain Arrangement and Compressibility in Sand", *Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing*, ASTM STP 599, pp. 169-192
- Mindlin, R. D. and Deresiewicz, H. (1953), "Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 20, No. 3, pp. 327-344
- Miura, S. and Toki, S. (1982), "A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand", *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 1, pp. 61-77
- Miura, S. and Toki, S. (1984), "Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sand sampled from natural deposits", *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 3, pp. 69-84
- Mullis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K., and Arulanandan, K. (1977), "Effect of Sample Preparation on Sand Liquefaction", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT2, pp. 91-108
- Oda, M. (1972a), "Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material", *Soils and Foundations*, Vol. 12, No. 1, pp. 17-36
- Oda, M. (1972b), "The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand", *Soils and Foundations*, Vol. 12, No. 2, pp. 1-18
- Oda, M. (1977), "Co-ordination number and its relation to shear strength of granular material", *Soils and Foundations*, Vol. 17, No. 2, pp. 29-42
- Oda, M. (1981), "Anisotropic Strength of Cohesionless Sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 107, No. GT9, pp. 1219-1231
- Riemer, M. F. and Seed, R. B. (1997), "Factors Affecting Apparent Position of Steady-State Line", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 281-288
- Rothenburg, L. and Bathurst, R. J. (1989), "Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials", *Geotechnique* 39, No. 4, pp. 601-614
- Schofield, A. N. and Wroth, C. P. (1968), *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill
- Seed, H. B., Mori, K., and Chan, C. K. (1977), "Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT4, pp. 257-270
- Shibuya, S. and Hight, D. W. (1987), "A bounding surface for granular materials", *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 4, pp. 123-136

- Silver, M. L., Chan, C. K., Ladd, R. S., Lee, K. L., Tiedemann, D. A., Townsend, F. C., Valera, J. E., and Wilson, J. H. (1976), "Cyclic Triaxial Strength of Standard Test Sand", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 102, No. GT5, pp. 511-523
- Suzuki, T. and Toki, S. (1984), "Effects of preshearing on liquefaction characteristics of saturated sand subjected to cyclic loading", *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 2, pp. 16-28
- Symes, M. J., Gens, A., and Hight, D. W. (1984), "Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand", *Geotechnique* 34, No. 1, pp. 11-27
- Symes, M. J., Shibuya, S., Hight, D. W., and Gens, A. (1985), "Liquefaction with cyclic principal stress rotation", *Proc. of the 11<sup>th</sup> ICSMFE*, San Francisco, Vol. 4, pp. 1919-1922
- Tsukamoto et al. (1998)
- Vaid, Y. P., Chung, E. K. F. and Kuerbis, R. H. (1989), "Preshearing and undrained response of sand", *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 4, pp. 49-61
- Vaid, Y. P., Chung, E. K. F. and Kuerbis, R. H. (1990), "Stress path and steady state", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 1-7
- Vaid, Y.P. and Negussey, D. (1988), "Preparation of Reconstituted Sand Specimens", *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977*, Eds. Donaghe et al., American Society for Testing Materials, pp. 405-417
- Vaid, Y. P., Sivathayalan, S., and Stedman, D. (1999), "Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response on Sand", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 22, No. 3, pp. 187-195
- Yoshimine, M., Ishihara, K., and Vargas, W. (1998), "Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand", *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 3, pp. 179-188
- Zhang, H. and Garga, K. (1997), "Quasi-steady state: a real behaviour?", *Canadian Geotechnical Journal* 34, pp. 749-761
- Zlatovic, S. and Ishihara, K. (1997), "Normalized behavior of very loose non-plastic soils: effects of fabric", *Soils and Foundations*, Vol. 37, No. 4, pp. 47-56