

การวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างระหว่างปูนซีเมนต์  
และไซโลที่ใช้เก็บโดยวิธีของไฟไนท์เอลเมนต์



นายวิโรจน์ รุจิวิวัฒน์

004798

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

แผนกวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. ๒๕๒๑

A FINITE ELEMENT ANALYSIS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION  
ON THE CEMENT-SILO INTERACTIONS

Mr. Viroj Rujiviphat

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering  
Department of Civil Engineering  
Graduate School  
Chulalongkorn University

1978

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างระหว่าง


ปูนซีเมนต์และโซลที่โซ้เก็บโดยวิธีของไฟไนท์เอลเมนต์

โดย นายวิโรจน์ รุจิวิวัฒน์


แผนกวิชา วิศวกรรมโยธา

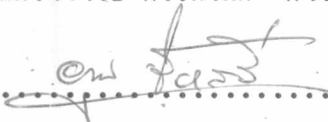
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.นิวัตต์ ดารานันท์)

  
..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ อรุณ ชัยเสรี)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวิชาน ลักคณะประสิทธิ์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างระหว่างปูนซีเมนต์  
 และซีโลที่ใช้เก็บโดยวิธีของไฟไนท์เอลเมนต์

ชื่อผู้ผลิต                นายวิโรจน์ รุจิวิวัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษา        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ

แผนกวิชา                วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา              ๒๕๒๑



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการของไฟไนท์เอลเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมระหว่าง  
 ปูนซีเมนต์และซีโลที่ใช้บรรจุ คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่จะต้องใช้ในการวิเคราะห์ได้มาจากการ  
 ทดลอง ผลของการทดลองปรากฏว่าปูนซีเมนต์เป็นวัสดุอัสติคชนิดไร้เชิงเส้น ดังนั้นเราจึงใช้  
 การวิเคราะห์แบบลำดับชั้น ในการวิเคราะห์ได้พิจารณาถึงการบรรจุปูนซีเมนต์เป็นชั้น ๆ ซีโล  
 ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบทรงกระบอกกลมทำด้วยเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ  
 ๑๒ เมตรตามลำดับ สูง ๒๐ เมตร และเป็นซีโลชนิดที่ใช้การลำเลียงออกด้านบน มวลของ  
 ปูนซีเมนต์ในแต่ละชั้นของการบรรจุถูกจำลองเป็นไฟไนท์เอลเมนต์ทั้งวงแหวนมีความสมมาตรรอบแกน  
 ศูนย์กลางของซีโล ผังซีโลถูกจำลองเป็นสปริงเอลเมนต์ซึ่งมีสภาพเสมือนที่รองรับยืดหยุ่นและ  
 ได้พิจารณาถึงความผิดระหว่างปูนซีเมนต์และผังซีโลโดยใช้ผลจากการทดลอง ผลที่ได้จากการ  
 วิเคราะห์แสดงถึงความจุของซีโล การทรุดตัวของปูนซีเมนต์ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ  
 ปูนซีเมนต์ การกระจายหน่วยแรงคานด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผังซีโล และการกระจาย  
 หน่วยแรงคานแนวตั้งของปูนซีเมนต์กระทำต่อพื้นซีโล การวิเคราะห์ให้ข้อสรุปว่าสภาพเงื่อนไขบน  
 พื้นผิวของมวลปูนซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของซีโล ความผิดระหว่างปูนซีเมนต์และผังซีโล  
 และการสั่นไถลของปูนซีเมนต์มีผลต่อพฤติกรรมระหว่างปูนซีเมนต์และซีโลที่ใช้บรรจุ

Thesis Title        A Finite Element Analysis and Experimental  
                         Investigation on the Cement-Silo Interactions  
Name                Mr.Viroj Rujiviphat  
Thesis Advisor     Assistant Professor Karoon Chandrangsu, Ph.D.  
Department        Civil Engineering  
Academic Year     1978

#### ABSTRACT

This research presents a finite element method for an analysis on the cement-silo interactions. The mechanical properties of cement were obtained from series of experiments. Testing results showed that cement is a nonlinear elastic material. Thus an incremental formulation must be used for the analysis. Top unloading, cylindrical steel-walled silo with diameters of 3, 6 and 12 meters and 20 meters high were analysed by the finite element method. The cement mass was divided into laminae representing the sequential loading of silos. Each lamina of the cement mass was modeled by several axisymmetric ring elements. The silo wall was modeled as spring elements to simulate elastic supports. The friction mechanism between cement mass and silo wall was also considered by using the results of experiments. Numerical results showed the final capacity of silo, the deformation of cement mass, the variation of cement density along depth, lateral pressure distribution against the silo wall, and vertical pressure distribution against the silo floor. This analysis indicates that silo diameter, friction between cement mass and silo wall, and boundary conditions have influence on the cement-silo interactions.

กิติกรรมประกาศ

ในการเขียนวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ จันทรางศุ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมการวิจัยที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติและได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.นิวัตต์ คารานันท์ ศาสตราจารย์ อรุณ ชัยเสรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปดิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อย

ผู้เขียนขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนสำหรับการวิจัยเรื่องนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือในการทดลอง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักงานสถิติแห่งชาติ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องคำนวณคอมพิวเตอร์

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณนายชัยยะ แสงศรี ซึ่งเป็นผู้พิมพ์ต้นฉบับของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนเพื่อน ๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยครั้งนี้



วิโรจน์ รุจิวิวัฒน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย

ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

จ

กิตติกรรมประกาศ

ฉ

สารบัญ

ช

รายการตารางประกอบ

ณ

รายการรูปประกอบ

ญ

สัญลักษณ์

ด

ศัพท์วิทยาการ

ณ

บทที่

๑ บทนำ

๑

๑.๑ ความเป็นมาของปัญหา

๑

๑.๒ วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

๓

๒ บททบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

๔

๓ ภูมิหลังของทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

๑๒

๓.๑ บทนำ

๑๒

๓.๒ การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์เอลเมนต์ขั้นสูง

๑๒

๓.๓ การวิเคราะห์พฤติกรรมโดยใช้ตัวแปรระยะเคลื่อนเป็นหลัก

๑๖

๓.๔ การประยุกต์วิธีการของไฟไนต์เอลเมนต์สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรม  
ซึ่งใช้ตัวแปรระยะเคลื่อนเป็นหลัก

๑๔

๓.๕ การสร้างเมทริกซ์สำหรับคุณสมบัติของไฟไนต์เอลเมนต์

๒๒

๔ กลสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

๓๒

๔.๑ ความสัมพันธ์ระหว่างสเตรซและสเตรนของปูนซีเมนต์

๓๒

๔.๒ การหาคูสมบัติกลศาสตร์ของปูนซีเมนต์

๓๒

๔.๓ การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโล

๔๖



๕.๔	การหาค่ามุลาดชั้นของปูนซีเมนต์	๕๒
๕	การวิเคราะห์พฤติกรรมระหว่างปูนซีเมนต์และไฮโลที่ใช้บรรจุโดยวิธี ไฟไนท์เอลเมนต์	๕๔
๕.๑	การจำลองมวลบรรจุของปูนซีเมนต์และไฮโลสำหรับการวิเคราะห์	๕๔
๕.๒	ผลของการวิเคราะห์พฤติกรรมระหว่างปูนซีเมนต์และไฮโลที่ใช้บรรจุ	๕๖
๖	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	๘๒
๖.๑	สรุปผลการวิจัย	๘๒
๖.๒	ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป	๘๘
	เอกสารอ้างอิง	๘๘
	ประวัติ	๘๑



## รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
๔.๑	ผลการทดลอง Consolidation ของตัวอย่างปูนซีเมนต์	๓๖
๔.๒	ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง Consolidation โดยวิธีไฟไนท์เอลเมนต์	๔๓
๔.๓	ผลการทดลอง Direct Shear เพื่อหาความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์ และแผ่นเหล็ก	๔๔
๔.๔	ผลการทดลองหามุมลาดชันของปูนซีเมนต์	๕๓
๕.๑	ลำดับความจุของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตร	๕๗

## รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
๑.๑ : ไซโลและบังเกอร์	๒
๒.๑ ตัวอย่างการจัดกลุ่มของไซโลและบังเกอร์	๕
๒.๒ การแบ่งประเภทของบินโดยใช้ Plane of rupture	๘
๓.๑ ลำดับการเคลื่อนที่และเปลี่ยนรูปทรงของวัตถุ	๑๔
๓.๒ แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสเตรซ, สเตรน และระยะเคลื่อน	๑๗
๓.๓ การแบ่งอาณาบริเวณของวัตถุเป็นไฟไนท์เอลเมนต์	๒๐
๓.๔ ไฟไนท์เอลเมนต์ทั้งมวลใน Global System และ Local System	๒๓
๓.๕ แผนภูมิของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธี ไฟไนท์เอลเมนต์แบบลำดับชั้น	๓๑
๔.๑ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่บรรจุอยู่ในภาชนะสำหรับการทดลอง Consolidation	๓๔
๔.๒ ความสัมพันธ์ระหว่างสเตรซและสเตรนของปูนซีเมนต์จากผลการทดลอง Consolidation	๓๗
๔.๓ การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการใช้สมการที่ (๔.๕) ซึ่งใช้แทน ความสัมพันธ์ระหว่างสเตรซและสเตรนของปูนซีเมนต์	๔๑
๔.๔ การจำลองตัวอย่างปูนซีเมนต์เป็นไฟไนท์เอลเมนต์สำหรับการวิเคราะห์หา อัตราส่วนยึดหดของปูนซีเมนต์	๔๒
๔.๕ การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์โดยใช้ค่าอัตราส่วนยึดหด ของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ กัน	๔๔
๔.๖ การเปรียบเทียบการใช้สมการที่ (๔.๕) กับผลการวิเคราะห์โดยใช้ค่า อัตราส่วนยึดหดของปูนซีเมนต์ต่าง ๆ กัน	๔๕
๔.๗ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะเคลื่อนของปูนซีเมนต์จากผลการทดลอง Direct Shear	๔๗
๔.๘ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและน้ำหนักรวมทุกตั้งฉากกับผิวสัมผัสจากผล การทดลอง Direct Shear	๕๐

รูปที่

หน้า

๕.๘	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการใช้สมการที่ (๕.๑๒) ซึ่งใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงบรรทุกตั้งฉากกับผิวสัมผัส	๕๑
๕.๑	การบรรจุปูนซีเมนต์ชั้นแรกของไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ	๕๕
๕.๒	การจำลองมวลปูนซีเมนต์และผนังไฮโลสำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลเมนต์	๕๕
๕.๓	การบรรจุปูนซีเมนต์ชั้นถัดขึ้นไปที่ใช้ในการวิเคราะห์	๕๙
๕.๔	ลำดับความจุของไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร	๖๐
๕.๕	ลำดับความจุของไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร	๖๑
๕.๖	ลำดับความจุของไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร	๖๒
๕.๗	การทรุดตัวของปูนซีเมนต์ในไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๖๓
๕.๘	การทรุดตัวของปูนซีเมนต์ในไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๖๔
๕.๙	การทรุดตัวของปูนซีเมนต์ในไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๖๕
๕.๑๐	ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร	๖๖
๕.๑๑	ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร	๖๗
๕.๑๒	ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร	๖๘
๕.๑๓	การเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของไฮโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๗๐

๕.๑๔	คอนทิวรัระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๗๑
๕.๑๕	คอนทิวรัระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๗๒
๕.๑๖	คอนทิวรัระดับความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๗๓
๕.๑๗	คอนทิวรัระดับหน่วยแรงดันแนวตั้งของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๗๔
๕.๑๘	คอนทิวรัระดับหน่วยแรงดันแนวตั้งของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๗๖
๕.๑๙	คอนทิวรัระดับหน่วยแรงดันแนวตั้งของปูนซีเมนต์ของไซโลขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร เมื่อบรรจุปูนซีเมนต์จนถึงชั้นสุดท้าย	๗๗
๕.๒๐	ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันแนวตั้งของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อ พื้นไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร	๗๘
๕.๒๑	ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันแนวตั้งของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อ พื้นไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร	๗๙
๕.๒๒	ลำดับการกระจายหน่วยแรงดันแนวตั้งของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อ พื้นไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร	๘๐
๖.๑	การเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของไซโลขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร โดยวิธีไฟไนท์เอลเมนต์และการใช้สูตรสำเร็จ	๘๔
๖.๒	การเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของไซโลขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร โดยวิธีไฟไนท์เอลเมนต์และการใช้สูตรสำเร็จ	๘๕
๖.๓	การเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของไซโลขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร โดยวิธีไฟไนท์เอลเมนต์และการใช้สูตรสำเร็จ	๘๖

สัญลักษณ์

- A = พื้นที่ของวัตถุอ้างอิงกับสภาพสมดุลง ณ จุดเริ่มต้น  $C_0$
- a = พื้นที่ของวัตถุอ้างอิงกับสภาพสมดุลงปัจจุบัน ณ จุด  $C_1$
- $\bar{a}$  = พื้นที่ของวัตถุอ้างอิงกับสภาพสมดุลง ณ จุด  $C_2$
- a = ด้านกว้างของไซโลสี่เหลี่ยม
- B = แมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสเตรนและระยะเคลื่อน
- b = ด้านยาวของไซโลสี่เหลี่ยม
- $C, C_{IJMN}$  = แมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสเตรนและสเตรน
- $C_0$  = สภาพสมดุลง ณ จุดเริ่มต้น
- $C_1$  = สภาพสมดุลง ณ จุดปัจจุบัน
- $C_2$  = สภาพสมดุลง ณ จุดใกล้เคียงต่อจากจุดปัจจุบัน
- D = เส้นผ่านศูนย์กลางของไซโล
- E = โมดูลัสยืดหยุ่น
- $E_{IJ}$  = Green Strain Tensor
- $E_i$  = hoop force ต่อหนึ่งหน่วยความสูงต่อหนึ่งหน่วยสเตรน
- $e_{IJ}$  = Linear Green Strain Tensor
- $l_F$  = แมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างสเตรนส่วนเชิงเส้นและระยะเคลื่อน
- $f_I$  = เวกเตอร์หน่วยแรงมวล
- $H_i$  = ความสูงของเอลเมนต์ i
- h = ความลึกจากผิวบนของมวลบรรจุมาจ้ังจุดที่ต้องการหาหน่วยแรง
- $h_s$  = ความสูงของส่วนลาดเอียงของผิวบนของมวลบรรจุ
- J = Jacobian Transformation
- $K_G$  = Geometric Stiffness Matrix
- $K_L$  = Linear Stiffness Matrix
- k = อัตราส่วนหน่วยแรงต้งันด้านข้างต่อหน่วยแรงต้งันแนวต้ง

- $L$  = ความยาวของ เส้นรอบรูปหน้าตัดของไฮโลหลาย เหลี่ยม  
 $M$  = จำนวนไฟไนท์เอลเมนต์ทั้งหมดที่ประกอบขึ้นเป็นวัตถุ  
 $N$  = เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์ระยะเคลื่อนและระยะเคลื่อนที่  
     nodal point  
 $2_P$  = เวกเตอร์รวมของหน่วยแรงกระทำภายนอกและหน่วยแรงมวล  
 $P_i$  = hoop force ของเอลเมนต์  $i$   
 $P_h$  = หน่วยแรงดันด้านข้าง  
 $P_v$  = หน่วยแรงดันแนวตั้ง  
 $\hat{q}_m$  = ส่วนประกอบของเวกเตอร์ระยะเคลื่อนที่จุด  $m$  ของ nodal point  
     ของแต่ละไฟไนท์เอลเมนต์  
 $q_{r_i}$  = ระยะเคลื่อนในแกนรัศมีของเอลเมนต์  $i$   
 $R$  = Hydraulic Radius  
 $R$  = รัศมีของไฮโล  
 $S_{IJ}$  = Second Piola-Kirchhoff Stress Tensor  
 $s, t$  = โคออร์ดิเนตของ Local System  
 $t_I$  = เวกเตอร์ของหน่วยแรงกระทำภายนอก  
 $u_I$  = ส่วนประกอบของเวกเตอร์ระยะเคลื่อนที่จุดใด ๆ ภายในไฟไนท์เอลเมนต์  
 $V$  = ปริมาตรของวัตถุอ้างอิงกับสภาพสมดุลย์ ณ จุดเริ่มต้น  $C_0$   
 $v$  = ปริมาตรของวัตถุอ้างอิงกับสภาพสมดุลย์ปัจจุบัน ณ จุด  $C_1$   
 $\bar{v}$  = ปริมาตรของวัตถุอ้างอิงกับสภาพสมดุลย์ ณ จุด  $C_2$   
 $W_j, W_k$  = Weight Function  
 $W_{res}$  = พลังงานที่เหลืออยู่  
 $\hat{X}_m$  = โคออร์ดิเนตของจุด  $m$  ของ nodal point  
 $X_1, X_2, X_3$  = โคออร์ดิเนตของ Global System  
 $\eta_{IJ}$  = Nonlinear Green Strain Tensor  
 $\delta$  = ความหนาแน่นของมวลบรรจุ

- $\sigma_0$  = ความหนาแน่น เริ่มต้นของปูนซีเมนต์  
 $\sigma_c$  = ความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงของปูนซีเมนต์  
 $\sigma$  = สเตริช, หน่วยแรงบรรทุกตั้งฉากกับผิวสัมผัส  
 $\epsilon$  = สเตรอน, อัตราส่วนระยะหดตัวต่อความหนา เริ่มต้นของตัวอย่างปูนซีเมนต์  
 $\nu$  = อัตราส่วนยึดหด (Poisson's Ratio)  
 $\tau$  = หน่วยแรงเฉือน  
 $\mu$  = สัมประสิทธิ์ของความฝืดภายในของมวลบรรจุ  
 $\mu'$  = สัมประสิทธิ์ของความฝืดระหว่างมวลบรรจุและผนังไซโล  
 $\delta$  = การแปรผัน  
 $^{\circ}\Omega$  = สภาพสมดุลง่าย ณ จุด เริ่มต้นการ เปลี่ยนรูปทรงของวัตถุ  
 $f_{\Omega}$  = สภาพสมดุลง่าย ณ จุดสุดท้ายของลำดับพฤติกรรม  
 $^n\Omega$  = สภาพสมดุลง่าย ณ จุดปัจจุบันในการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น  
 $\emptyset^m$  = ฟังก์ชันแห่งการประมาณที่จุด  $m$  ของ nodal point  
 ของแต่ละไฟไนท์เอลเมนต์  
 $\emptyset$  = มุมลาดชัน, มุมของความฝืดภายในของมวลบรรจุ  
 $\beta$  = มุมระหว่างผิวบนของมวลบรรจุและแนวราบ

## ศัพท์วิทยาการ

การแปรผัน	Variation
การแยกออกเป็นส่วนย่อย	Discretization
การลำเลียงออกด้านบน	Top Unloading
การวิเคราะห์แบบลำดับขั้น	Incremental Formulation
กำแพงกันดิน	Retaining Wall
โคออร์ดิเนต	Coordinate
เชิงเส้น	Linear
ไซโล	Silo
บังกเกอร์	Bunker
บิน	Bin
ผลิตภัณฑ์เกษตร	Silage
ผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์	Ensiled Crops
พลังงานส่วนเพิ่มสมมุติ	Incremental Virtual Work
พลังงานเหลือ	Residual Work
ฟังก์ชันแห่งการประมาณ	Interpolation Function
ไฟไนท์เอลเมนต์	Finite Element
มวลบรรจุ	Storage Material
มาตรวัดระยะ	Dial Gage
มุมของความฝืดภายใน	Angle of Internal Friction
มุมลาดชัน	Angle of Repose
แมทริกซ์แปรผัน	Inverse Matrix
แมทริกซ์สลับเปลี่ยน	Transpose Matrix
โมดูลัสยืดหยุ่น	Modulus of Elasticity
ระยะเคลื่อน	Displacement



ไร้เชิงเส้น	Nonlinear
แรงเฉือน	Shear Force
วัสดุมวลเม็ด	Granular Material
เวกเตอร์	Vector
สูตรสำเร็จ	Empirical Formula
สเตร็ช	Stress
สเตรน	Strain
สติฟเนส	Stiffness
สมมาตรรอบแกนศูนย์กลาง	Axisymmetric
หน่วยแรงดันด้านข้าง	Lateral Pressure
หน่วยแรงดันแนวตั้ง	Vertical Pressure
อัตราส่วนยืดหด	Poisson's Ratio
อนุพันธ์	Differtiate
อินทิเกรต	Integrate