

บทที่ 4

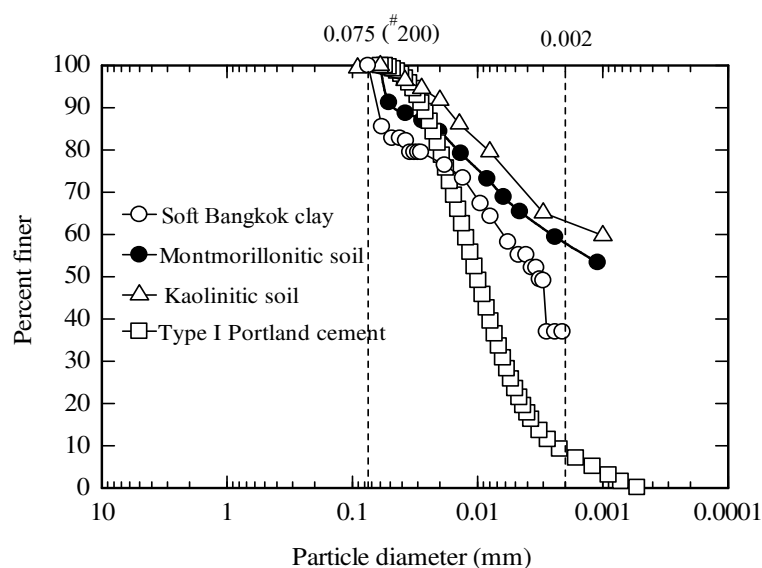
ผลทดสอบและวิเคราะห์ผลการศึกษาของดินซีเมนต์

ผลทดสอบพื้นฐาน

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง (Low and high swelling clays) รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของการบวมตัวอิสระต่อค่าอัตราเบอร์กซ์ของดินเหนียวและค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ ทำให้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ทั่วไปเพื่อใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

1. คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติพื้นฐานและอัตราการบวมตัวอิสระ

การศึกษานี้ทำการทดสอบดินสามชนิดซึ่งครอบคลุมระดับการบวมตัวตั้งแต่ต่ำจนถึงสูง คือ ดินเหนียวคาโอไลน์หรือดินขาว ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และดินเหนียวอนทัมอริโอไนท์หรือเรียกดินเบนโทไนท์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ถูกเก็บที่ความลึก 3 ถึง 4 เมตรจากผิวดินภายในบริเวณสถานที่ก่อสร้างทางหลวงพิเศษ (วงแหวนรอบนอกตะวันออก) อำเภอลำลูกกา จังหวัด กรุงเทพฯ ค่าพิกัดอัตราเบอร์กซ์หาได้จากวิธี Fall cone ตามมาตรฐาน BS: 1377- part II, 1990 ค่าขีดจำกัดเหลวของดินเหนียวคาโอไลน์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และดินเหนียวเบนโทไนท์ เท่ากับ 42.5, 92.5 และ 222 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พิกัดพลาสติกเท่ากับ 27.5, 31.8 และ 36.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับและปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ เท่ากับ 1.02 ถึง 1.52 เปอร์เซ็นต์, 80 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ และ 4.20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับดินเหนียวคาโอไลน์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และดินเหนียวเบนโทไนท์ ตามลำดับ คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดสอบแสดงดังในตารางที่ 4.1 และการกระจายตัวของวัสดุทดสอบดังในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวของดินคาโอลิไนท์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดินเหนียวมอนท์มอริโอไนท์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 4.1

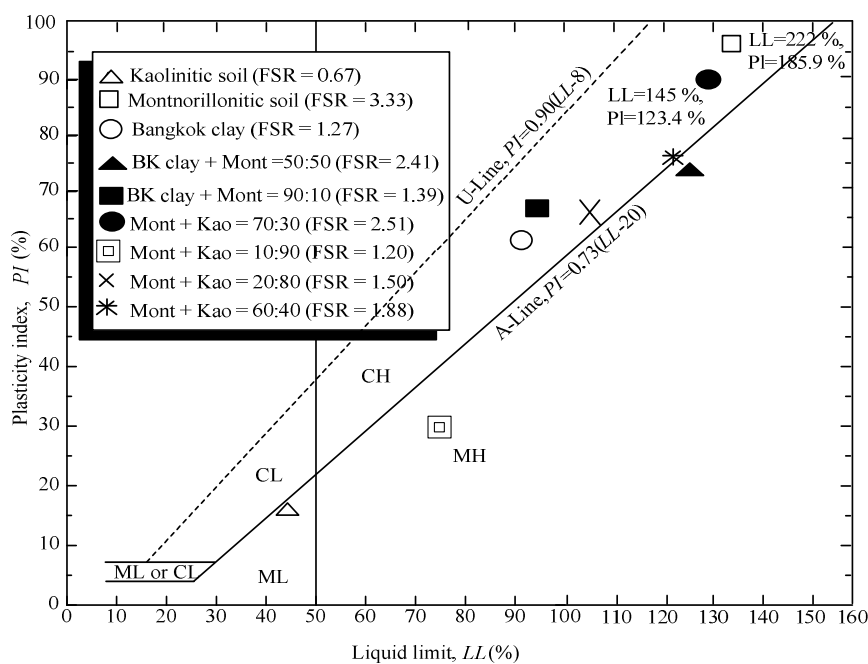
คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินคาโอลิไนท์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดินเหนียวมอนท์มอริโอไนท์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Chemical Compounds	Portland Cement Type I	Kaolinitic Soil	Montmorillonitic soil	Soft Bangkok clay
% SiO_2	20.90	59.79	77.70	63.83
% Al_2O_3	4.76	31.84	10.63	21.34
% Fe_2O_3	3.41	1.59	3.74	8.41
% MgO	1.25	-	0.78	1.54
% CaO	65.41	-	2.96	0.94
% Na_2O	0.24	-	-	0.28
% K_2O	0.35	3.05	0.55	2.45
% SO_3	2.71	0.05	-	1.22
Plastic Limit, %	-	27.5	36.04	31.8
Liquid Limit, %	-	42.5	222	92.5
Initial water content, %	-	1.02-1.52 [*]	4.20 [*]	80-90
Specific Gravity	3.15	2.78	2.69	2.71

หมายเหตุ * ดิน 2 ชนิดนี้เป็นดินการค้า ไม่ใช่ดินธรรมชาติ จากบริษัททำให้มีความชื้นต่ำ

2. ผลของอัตราส่วนการบวมตัวอิสระต่อขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติก

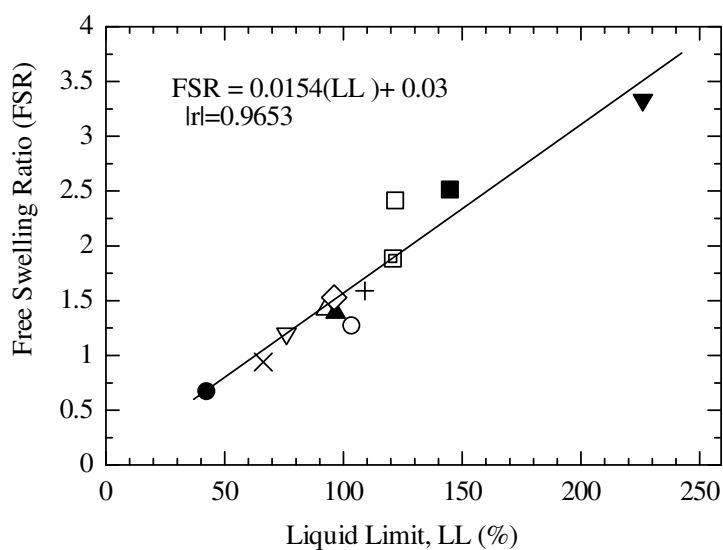
ภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติกซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าการบวมตัวอิสระ



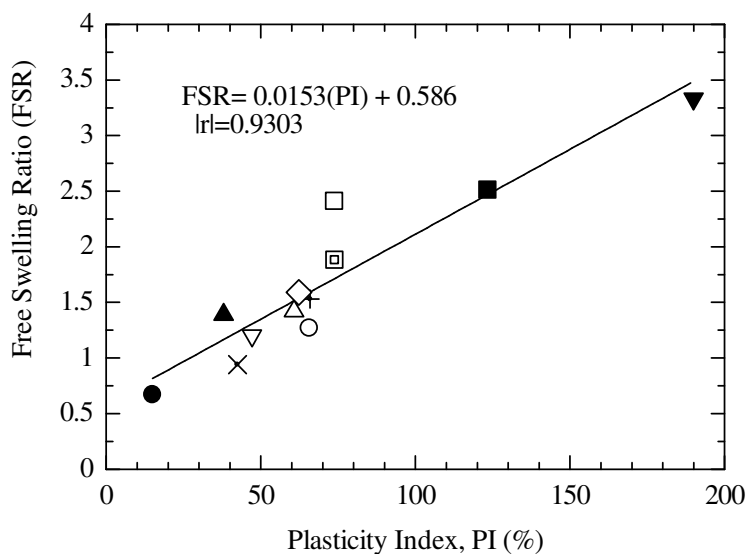
ภาพที่ 4.2 แผนผังดัชนีพลาสติกและขีดจำกัดเหลวของดินเหนียวที่มีค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระต่าง ๆ

ดังนั้นเราสามารถหาความสัมพันธ์ของขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติกของดินกับค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระได้ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าดินเหนียวที่มีอัตราส่วนการบวมตัวอิสระที่สูงกว่าจะแสดงผลค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติกที่สูงกว่า ทั้งนี้ ค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระสามารถบ่งชี้ชนิดของแร่ดินเหนียวได้ดังนั้นค่าขีดจำกัดเหลวก็สามารถบ่งชี้ได้เช่นกัน ถ้าดินเหนียวมีแรมอนท์มอริโอไนท์ในปริมาณที่มากกว่าจะส่งผลให้ความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้ดีและทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นดินเหนียว (Double Layer) มากขึ้นทำให้ดินเหนียวมีการจัดเรียงตัวในลักษณะแบบขนาน (Dispersed structure) ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจึงสามารถเข้าไปแทรกระหว่างแผ่นได้ง่าย และส่งผลให้เกิดการบวมตัว (Swelling) อย่างมากเมื่อถูกน้ำและส่งผลให้ดินมีค่าขีดจำกัดเหลวสูง ดังนั้นจะเห็นว่าค่าขีดจำกัดเหลวเป็นคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ในทางตรงข้ามหากดินเหนียวมีปริมาณแร่คาโอลิไนท์ที่สูงกว่าจะส่งผลให้การตกตะกอนในน้ำ

ได้ไม่ดีพอ Silva (1974) กล่าวว่าในสารแขวนลอยระหว่างน้ำและอนุภาคดิน (Suspension) อนุภาคดินกับอนุภาคอิสระของน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคดินเหนียวจะเกิดแรงกระทำซึ่งกันและกันอย่างไม่มีทิศทาง (Random impact) และส่งผลให้อนุภาคดินเหนียวเคลื่อนตัวแบบไร้ทิศทาง เรียกว่า การเคลื่อนตัวแบบบราวเนียน (Brownian movement) การเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทางนี้จะทำให้อนุภาคดินเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและอยู่ในสภาวะสมดุลด้วยแรงระหว่างอนุภาคดิน (Interparticle force) ดังนั้น พฤติกรรมของดินจะขึ้นอยู่กับแรงสุทธิระหว่างอนุภาคดิน (Net interparticle force) ถ้าแรงสุทธิระหว่างอนุภาคดินเป็นแรงดึงดูด (Attractive force) เนื่องจากความเข้มข้นของประจุบวก อนุภาคดินมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่เข้าใกล้กันและเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Coagulation) จากผลทดสอบดังในภาพที่ 4.3 และ 4.4 ทำให้สามารถประเมินค่าการบวมตัวอิสระของดินได้เพียงทราบค่าขีดจำกัดเหลวหรือดัชนีพลาสติกของดินเท่านั้น ทั้งนี้ทำให้ทราบพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของขีดจำกัดเหลวและค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ

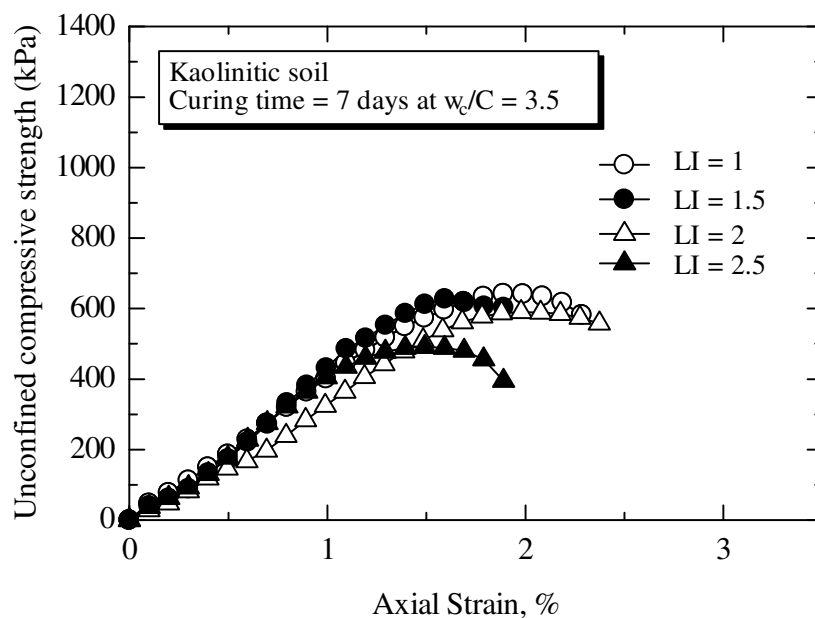


ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของดัชนีพลาสติกและค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ

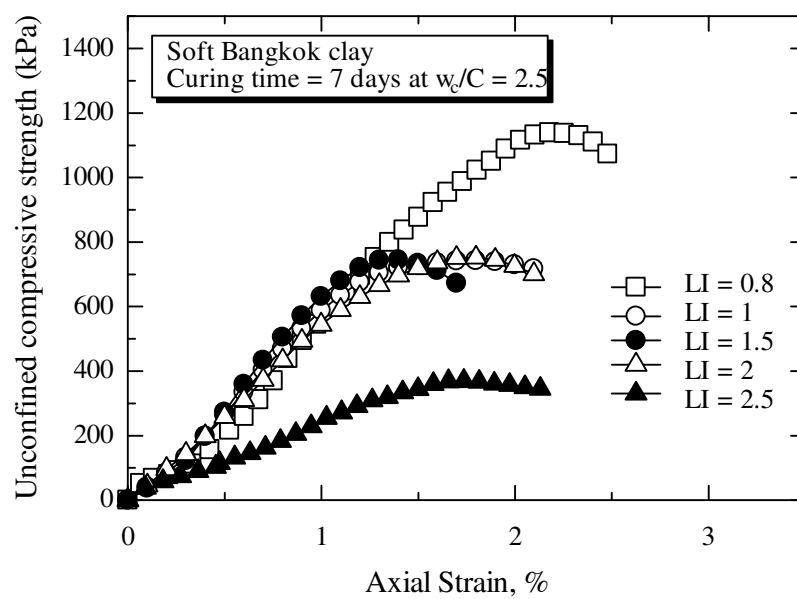
3. ผลของอัตราส่วนการบวมตัวอิสระที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ กับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

จากภาพที่ 4.5 ค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 7 วันของดินทั้งที่ไม่มีการบวมตัว (ดินขาวหรือดินคาโอไลน์ท์) ดินที่มีการบวมตัวต่ำ (ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ) และดินที่มีการบวมตัวสูง (ดินมอนท์มอริโอไนท์หรือดินเบนโทไนท์) จะพบว่าดินที่ค่าการบวมตัวอิสระหนึ่ง ๆ ปริมาณความชื้นในช่วงสูง (สูงกว่าและเท่ากับค่าขีดจำกัดเหลว) และช่วงปริมาณความชื้นต่ำ (ต่ำกว่าค่าขีดจำกัดเหลว) จะมีพฤติกรรมด้านกำลังต่างกันกล่าวคือที่ระยะบ่มหนึ่ง ๆ สำหรับดินไม่บวมตัวและดินที่มีการบวมตัวต่ำในช่วงปริมาณความชื้นสูง ($LI = 1, 1.5, 2$) ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกันและมีค่าความเค้นสูงสุดใกล้เคียงกันแม้ว่าดินซีเมนต์จะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันก็ตามหากแต่ดินมีค่าอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ที่เท่ากัน สำหรับดินที่มีการบวมตัวสูงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกันนั้น จะเกิดขึ้นในช่วงปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่า ($LI = 0.6, 0.8, 1$) กล่าวคือดินเบนโทไนท์มีค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ต่างกันก็ตามในช่วงปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.6 0.8 และ 1 เท่าของดัชนีเหลว ดังในภาพที่ 4.5ค จากผลทดสอบข้างต้นนี้ชี้ชัดว่าดินซีเมนต์จะมีช่วงปริมาณความชื้นช่วงหนึ่ง ๆ ที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์และอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เป็นตัวแปรเดียวที่ควบคุมกำลังอัด

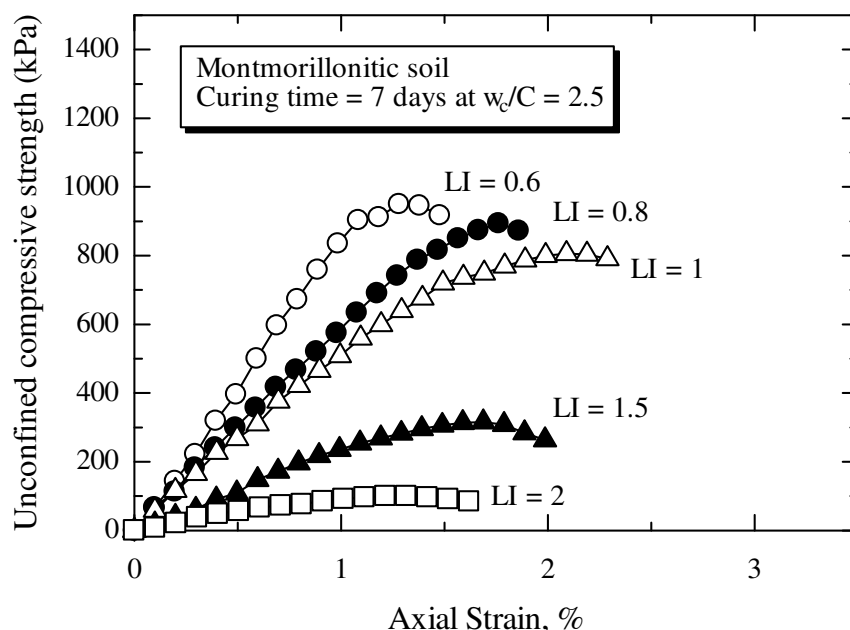
แกนเดี่ยวของดินซีเมนต์ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต (Horpibulsuk and Miura, 2001; Miura et al, 2001)



ก) ดินขาวหรือดินคาโอลิไนท์



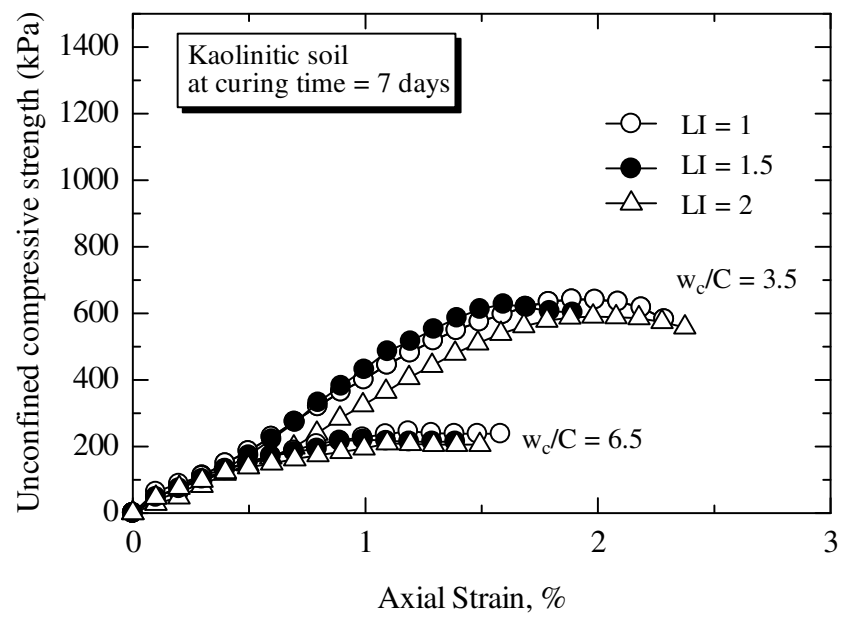
ข) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



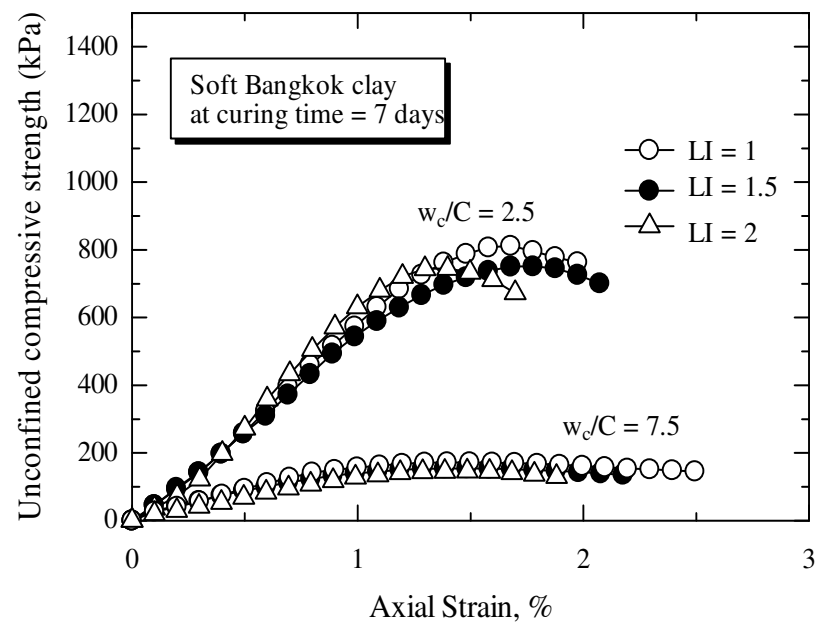
ค) ดินมอนทอร์มิลโลไนท์หรือดินเบนโทไนท์

ภาพที่ 4.5 กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันของดินคาโอลิไนท์ ดินเหนียวกรุงเทพฯ ฯ
และดินเบนโทไนท์ผสมซีเมนต์

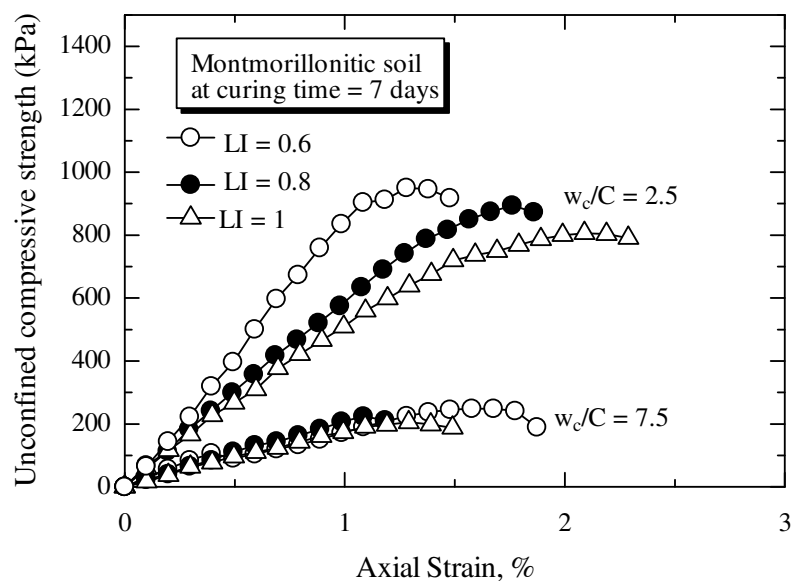
จากผลทดสอบข้างต้นพิจารณาความสัมพันธ์ในช่วงที่มีเพียงตัวแปรหลักตัวเดียวที่เป็นตัวแปรควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ดังนั้นในภาพที่ 4.6 จะแสดงความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดที่อายุบ่ม 7 วันของดินขาวและดินเหนียวกรุงเทพฯ ฯ ที่ค่าดัชนีเหลวเท่ากับ 1 ถึง 2 และค่าดัชนีเหลวเท่ากับ 0.6 ถึง 1 สำหรับดินเบนโทไนท์ พบว่าดินซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อซีเมนต์ต่ำกว่าจะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่สูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต (Horpibulsuk and Miura, 2001; Miura et al, 2001) ดังนั้นตัวแปรหลักที่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์จึงผนวกรวมทั้งปัจจัยด้านปริมาณความชื้นซึ่งเป็นตัวควบคุมโครงสร้างดิน แล้วยังมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย และปัจจัยของปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์จะเป็นตัวแปรควบคุมระดับของพันธะเชื่อมประสานแล้วยังมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเช่นกัน ดังนั้นอัตราส่วนการบวมตัวอิสระจึงเป็นปัจจัยโดยตรงต่อช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์เพราะอัตราส่วนการบวมตัวอิสระมีผลอย่างมากต่อขีดจำกัดเหลวซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการไหลหรือความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลของน้ำและเป็นปัจจัยทางอ้อมกับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ซึ่งจะกล่าวต่อไป



ก) ดินขาวหรือดินคาโอลิไนท์



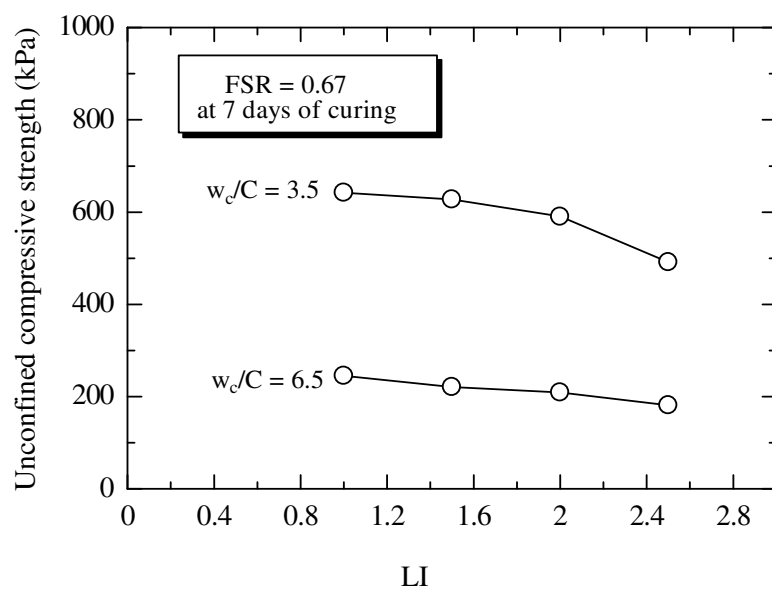
ข) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



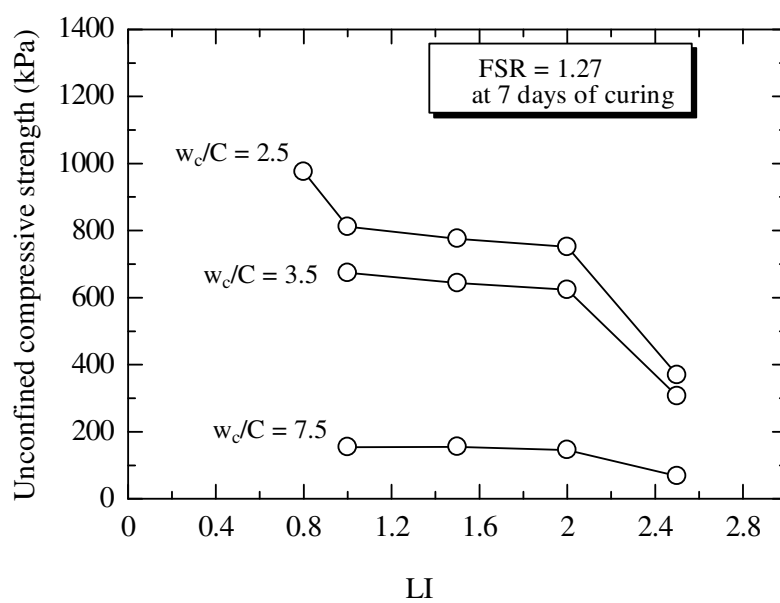
ค) ดินมอนทอมอริลโลไนท์หรือดินเบนโทไนท์

ภาพที่ 4.6 กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันของดินคาโอลิไนท์ ดินเหนียวกรุงเทพฯ ฯ และ ดินเบนโทไนท์ผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อซีเมนต์ต่าง ๆ

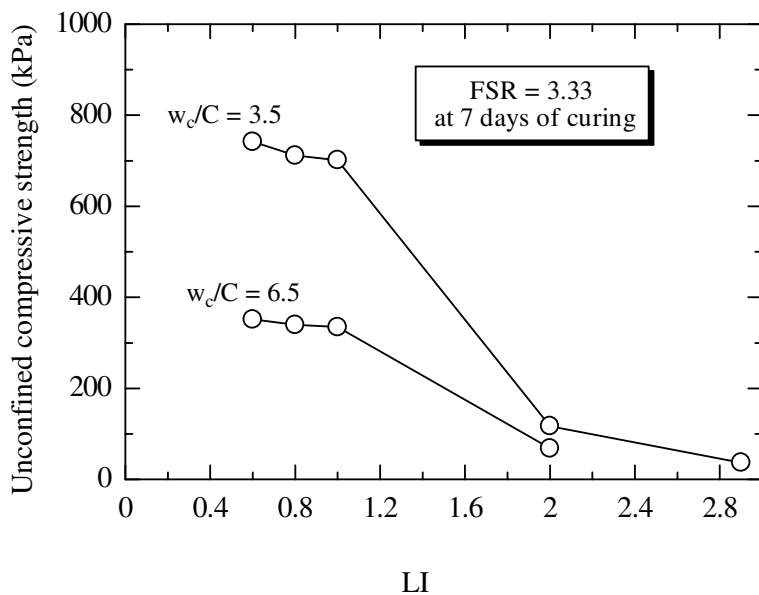
จากผลทดสอบข้างต้นของดินที่มีค่าการบวมตัวอิสระที่แตกต่างกันทั้งสามชนิดพบว่าที่การบวมตัวหนึ่ง ๆ จะมีช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์แตกต่างกัน ความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับปริมาณความชื้นที่ดัชนีเหลวต่าง ๆ และค่าอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์หนึ่ง ๆ ของดินทั้งสามประเภท (ดินขาว ดินเหนียวกรุงเทพฯ ฯ และดินเบนโทไนท์) ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงได้ดังภาพที่ 4.7 จะเห็นว่าในช่วงปริมาณความชื้นสูง (LI = 1, 1.5, 2) สำหรับดินที่ไม่มีการบวมตัวและดินที่มีการบวมตัวต่ำ (FSR < 1.5 ตาม Prakash and Sridharan , 2004)) ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่แตกต่างกันมากนัก หลังจากนั้น (LI = 2.5) จะมีกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังในภาพที่ 4.7ข ในกรณีของดินที่มีการบวมตัวสูง (FSR > 1.5 ตาม Prakash and Sridharan , 2004)) พบว่าช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กลับลดลงมาอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1 เท่าของดัชนีเหลว ดังในภาพที่ 4.7ค ดังนั้นดินที่มีค่าการบวมตัวอิสระที่สูงขึ้นจึงมีแนวโน้มที่ช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ลดลง



ก) ดินเหนียวคาโอลินไนท์ (ดินขาว) ที่มีค่าการบวมตัวอิสระเท่ากับ 0.67

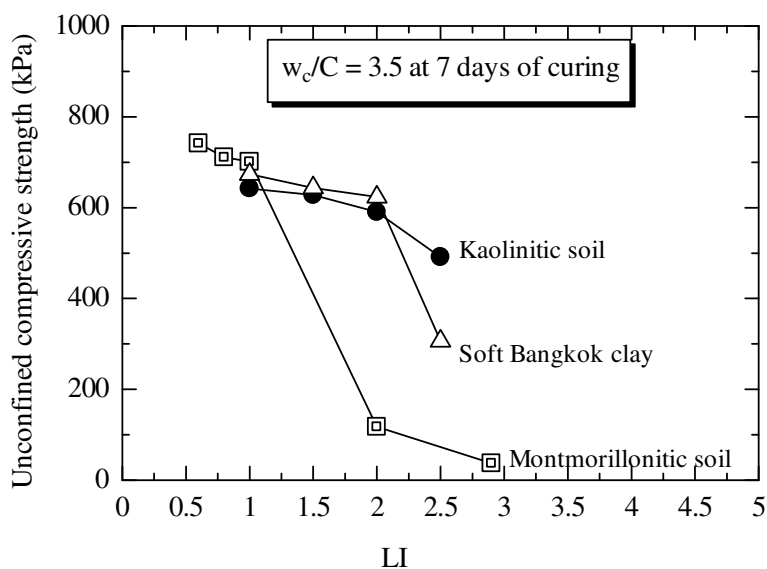


ข) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่มีค่าการบวมตัวอิสระเท่ากับ 1.27



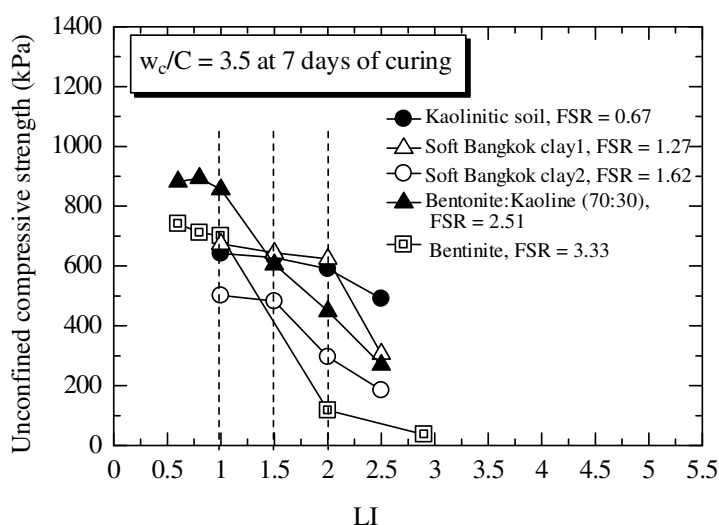
ค) ดินเบนโทไนท์ที่มีค่าการบวมตัวอิสระเท่ากับ 3.33

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเหลวของดินที่มีค่าการบวมตัวอิสระต่าง ๆ กับ
กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 4.8 ค่ากำลังอัดของดินคาโอลิไนท์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ และดินเบนโทไนท์ผสม
ซีเมนต์กับค่าดัชนีเหลว ที่ $w_c/C = 3.5$ ที่อายุบ่ม 7 วัน

ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินขาว ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ และดินเบนโทไนท์ผสมซีเมนต์ที่มีค่าอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์เท่ากับ 3.5 ที่ระยะบ่ม 7 วัน พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินไม่บวมตัวถึงบวมตัวต่ำ (ดินขาวและดินกรุงเทพ ฯ) ให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกันในช่วงปริมาณความชื้นเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลว และเท่ากับ 0.6 ถึง 1 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินบวมตัวสูง (ดินเบนโทไนท์) ดังนั้นในการพิจารณาสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์จำเป็นต้องแบ่งพิจารณาตามพฤติกรรมการบวมตัวของดิน เนื่องจากมีช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่ควบคุมกำลังในช่วงปริมาณความชื้นสูงและต่ำ และเพื่อจำกัดผลของปริมาณความชื้นโดยมีเพียงตัวแปรหลักที่ควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์คืออัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์เท่านั้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป แต่สิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาก่อนการออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์คือการหาช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่มีค่าการบวมตัวอิสระหนึ่ง ๆ ซึ่งผู้เขียนได้ทำการทดสอบหาช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ในช่วงปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2 และ 2.5 เท่าของดัชนีเหลวเท่านั้นกับดินที่มีการบวมตัวอิสระเท่ากับ 0.67 (ดินคาโอไลน์), 1.27 (ดินกรุงเทพฯ:1 บริเวณอำเภอลำลูกกา), 1.62 (ดินกรุงเทพฯ:2 บริเวณด่านเก็บเงินทับช้าง) , 2.51 (ดินคาโอไลน์:ดินเบนโทไนท์ = 30:70) และ 3.33 (ดินเบนโทไนท์) ได้ผลทดสอบดังในภาพที่ 4.9 ดังนั้นผู้เขียนจะขอแนะนำช่วงปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากข้อกำหนดของการทดสอบดังข้างต้นซึ่งเป็นช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ดังตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.9 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่มีการบวมตัวอิสระต่าง ๆ ผสมซีเมนต์กับค่าดัชนีเหลว ที่ $w/C = 3.5$ ที่อายุบ่ม 7 วัน

ตารางที่ 4.2

ช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อซีเมนต์ค่าหนึ่ง ๆ ($w_c/C = 3.5$) ของดินที่มีการบวมตัวอิสระต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 7 วัน

อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ, FSR	ช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัด ของดินซีเมนต์
0.67	(1 – 2) LI
1.27	(1 – 2) LI
1.62	(1 – 1.5) LI
2.51	(0.6 – 1) LI
3.33	(0.6 – 1) LI

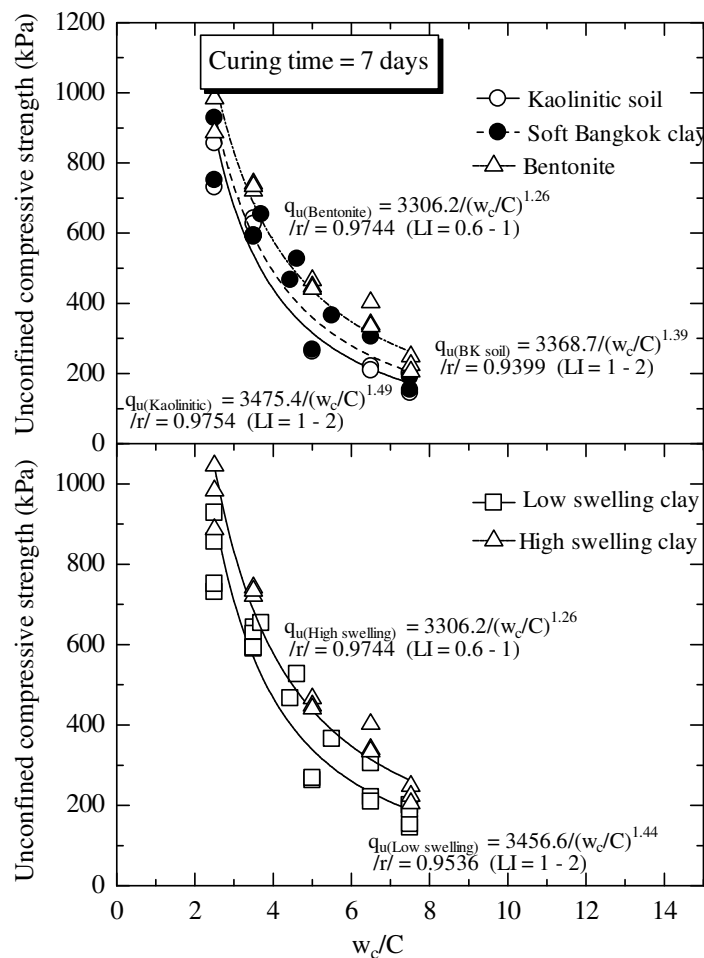
ทั้งนี้หากต้องการได้ปริมาณความชื้นวิกฤต (Critical water content, w_c) ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่มากที่สุดที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์แล้วจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนแปลงช่วงของปริมาณความชื้นเริ่มต้นให้แตกต่างกันน้อยลง ($\Delta LI < 0.5$) เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระของดินมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของดินซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติก

การวิเคราะห์ผลกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

1. ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัด

ภาพที่ 4.10 แสดงกำลังอัดแกนเดียวและอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 7 วัน พบว่าดินเบนโทไนท์จะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สูงที่สุดทั้งนี้อาจเป็นเพราะดินเบนโทไนท์มีช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ในช่วงต่ำ ($LI = 0.6 - 1$) ซึ่งยังคงอยู่ในสภาวะพลาสติกถึงกำลังจะเหลว ในทางตรงกันข้ามสำหรับดินคาโอไลไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ซึ่งมีช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวนั้นพบว่าดินคาโอไลไนท์ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุด จากผลทดสอบข้างต้นผู้เขียนจะแยกวิเคราะห์หาสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เป็น 2

ส่วนตามประเภทของการบวมตัวคือ 1) ดินที่มีการบวมตัวสูง และ 2) ดินที่ไม่มีการบวมตัวถึงมีการบวมตัวต่ำ ดังนั้นในภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวบวมตัวต่ำผสมซีเมนต์กับตัวแปรหลักอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ที่อายุบ่มต่าง ๆ และพบว่าที่ระยะเวลาบ่มหนึ่ง ๆ มีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 4.1



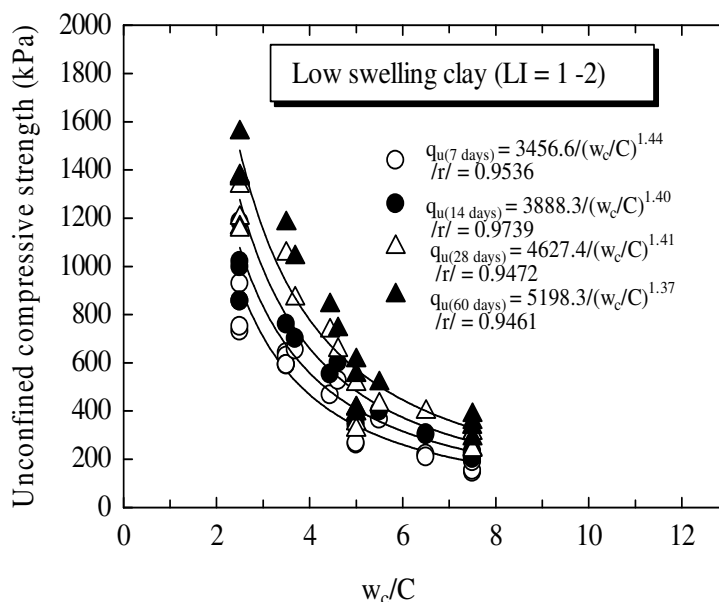
ภาพที่ 4.10 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ของดินคาโอไลไนท์ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ และดินเบนโทไนท์ที่อายุบ่ม 7 วัน

ภาพที่ 4.11 พบว่าดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ในความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในฟังก์ชันกำลัง (Power Function) ดังสมการที่ 4.1

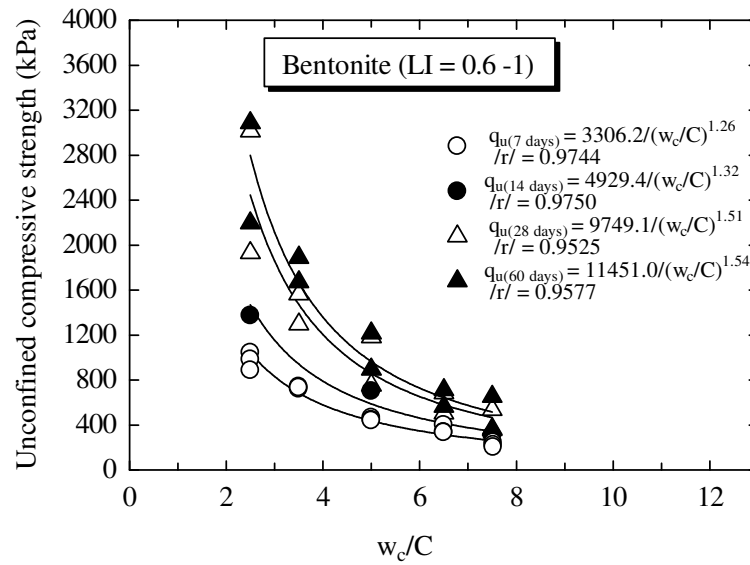
$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C}\right)^B} \quad (4.1)$$

เมื่อ q_u คือกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง (kPa) A และ B เป็นค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามชนิดของดิน B จะเป็นตัวแปรที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ w_c/C ต่อกำลังอัด ค่า B ยิ่งมาก การเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากตาม สำหรับดินชนิดหนึ่งผสมซีเมนต์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม อัตราการเปลี่ยนแปลงของ w_c/C ต่อกำลังอัดแกนเดียว จะแปรผันอย่างมากกับประเภทของปูนซีเมนต์ (Horpibulsuk et al., 2003) แต่เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ดังนั้น B จึงมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับดินทุกชนิด

จากภาพที่ 4.11 จะเห็นว่า B มีค่าใกล้เคียงกันและจากเหตุผลข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยจึงประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ B ประมาณคงที่และมีค่าเท่ากับ 1.40 สำหรับดินบวมตัวต่ำและสูง และที่ระยะเวลาหนึ่ง ๆ มีพารามิเตอร์ A คงที่ ด้วยเหตุนี้เอง อัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินบวมตัวต่ำและปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.6 ถึง 1 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินบวมตัวสูง ที่ระยะบ่มค่าหนึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.2



ก) ดินที่มีการบวมตัวต่ำ (ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯและดินคาโอลินท์)



ข) ดินที่มีการบวมตัวสูง (ดินเบนโทไนท์)

ภาพที่ 4.11 กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวผสมซีเมนต์กับ w_c/C ที่อายุบ่มต่าง ๆ

สำหรับดินบวมตัวต่ำ

$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)_2}} \right\} = \left[\frac{A/(w_c/C)_1^{1.40}}{A/(w_c/C)_2^{1.40}} \right] = \left[\frac{(w_c/C)_2}{(w_c/C)_1} \right]^{1.40} \quad (4.2ก)$$

สำหรับดินบวมตัวสูง

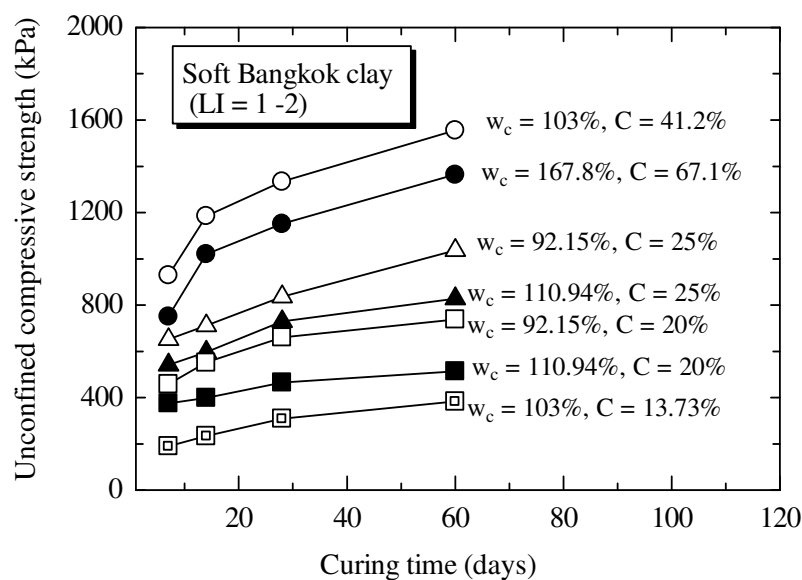
$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C)_1}}{q_{(w_c/C)_2}} \right\} = \left[\frac{A/(w_c/C)_1^{1.40}}{A/(w_c/C)_2^{1.40}} \right] = \left[\frac{(w_c/C)_2}{(w_c/C)_1} \right]^{1.40} \quad (4.2ข)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)_1}$ คือกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ $(w_c/C)_1$ และ $q_{(w_c/C)_2}$ คือกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ $(w_c/C)_2$

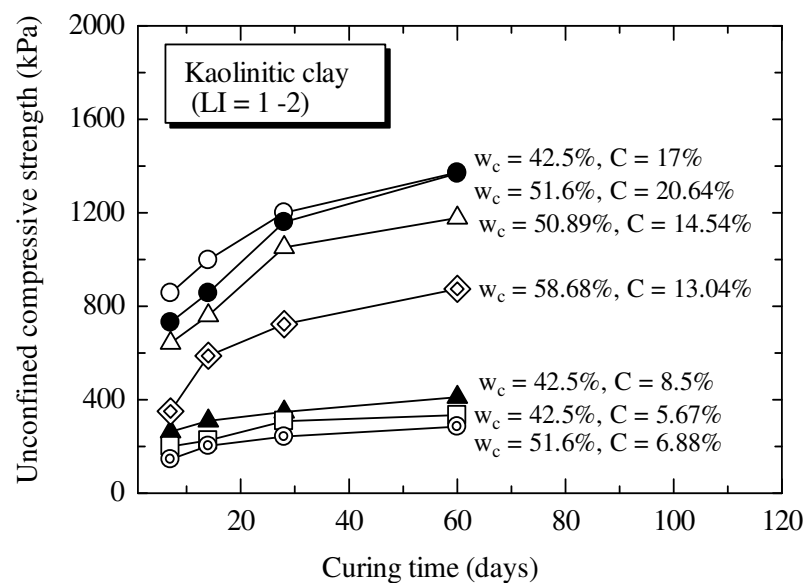
ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้ทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ในช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังและอัตราส่วนความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ใดๆ ได้ เมื่อทราบกำลังอัดแกนเดียวที่อัตราส่วนการผสมหนึ่ง ๆ ($w_c/C = 2.5 - 7.5$) ที่ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ซึ่งข้อจำกัดของความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นคือไม่สามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่มใดๆ ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติ อาจมีสถานการณ์ที่เราจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพื่อลดอายุบ่ม แต่ยังคงได้กำลังอัดตามต้องการ ด้วยเหตุนี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาอิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียว พร้อมทั้งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณน้ำในดิน และอายุบ่ม

2. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและระยะบ่ม

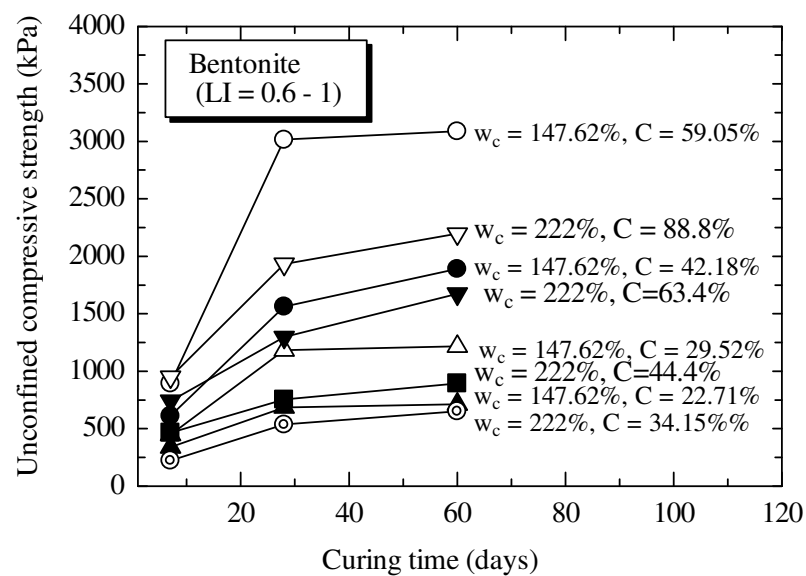
ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอายุบ่ม ที่ปริมาณความชื้นในช่วง 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและดินคาโอลิไนท์ และปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.6 ถึง 1 เท่าของดัชนีเหลวสำหรับดินเบนโทไนท์ ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ



ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



ข) ดินขาวหรือดินคาโอไลน์ท์



ค) ดินเบนโทไนท์

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
ดินคาโอไลน์ท์ และดินเบนโทไนท์ผสมซีเมนต์

จากภาพที่ 4.11 ถึง 4.12 จะเห็นได้ว่า ที่ค่า w_c/C ค่าหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวถูกควบคุมด้วยตัวแปร A เนื่องจากตัวแปร B มีค่าประมาณคงที่ ด้วยเหตุนี้เองความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างการพัฒนา กำลังและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} \quad (4.3)$$

เมื่อ q_{D1} คือกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการทราบค่าที่อายุบ่ม D_1 วัน q_{D2} คือกำลังอัดแกนเดียวที่ทราบค่าที่อายุบ่ม D_2 วัน และ A_{D1} และ A_{D2} คือค่าของ A ที่สอดคล้องกับ D_1 และ D_2 ตามลำดับ

ดังได้กล่าวแล้วข้างต้นว่า ค่าของ A จะมีความแตกต่างกันตามแต่ชนิดของดิน และอายุบ่ม แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวต่อเวลาควรจะต้องมีค่าเท่ากันสำหรับดินซีเมนต์ทุกชนิดตามแต่พฤติกรรมของการบวมตัวคือการบวมตัวต่ำและสูง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ด้วยเหตุนี้เองสมการดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นสมการเอกภาพสำหรับดินซีเมนต์ที่มีการบวมตัวต่ำและสูง ในทางปฏิบัติ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ถ้าเราสามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่เวลาใดๆ ในพจน์ของอายุบ่มเพียงอย่างเดียว ความพยายามดังกล่าวได้รับการจัดทำขึ้นโดยอาศัยสมมติฐานข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและลอการิทึมของอายุบ่ม ของดินที่มีการบวมตัวต่ำ ซึ่งได้นำผลทดสอบดินกรุงเทพฯ ๗ ผสมซีเมนต์จากงานศึกษาในอดีต Uddin, 1994 และรายงานผลการออกแบบส่วนผสมในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษกรุงเทพฯ - ชลบุรี ร่วมกับผลทดสอบจากงานศึกษาวิจัยนี้ ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ได้จะมีความชันแตกต่างกัน ตามแต่ชนิดของดิน ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม แต่อย่างไรก็ตาม โดยอาศัยการ Normalization อิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวจะได้รับการพิจารณาและสามารถแสดงโดยสมการเส้นตรงเพียงเส้นเดียว ในภาพที่ 4.13 ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{q_D}{q_{28}} = a + b \ln D \quad (4.4)$$

เมื่อ q_D คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม D วันใดๆ q_{28} คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ระยะบ่ม 28 วัน a และ b เป็นค่าคงที่ จากการศึกษพบว่า a และ b มีค่า

เท่ากับ 0.2132 และ 0.2394 ตามลำดับ สำหรับดินเหนียวบวมตัวต่ำผสมซีเมนต์ และ -0.0726 และ 0.303 ตามลำดับ สำหรับดินเบนโทไนท์ (ดินที่มีการบวมตัวสูง) ผสมซีเมนต์ เราจะได้สมการการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวดังต่อไปนี้

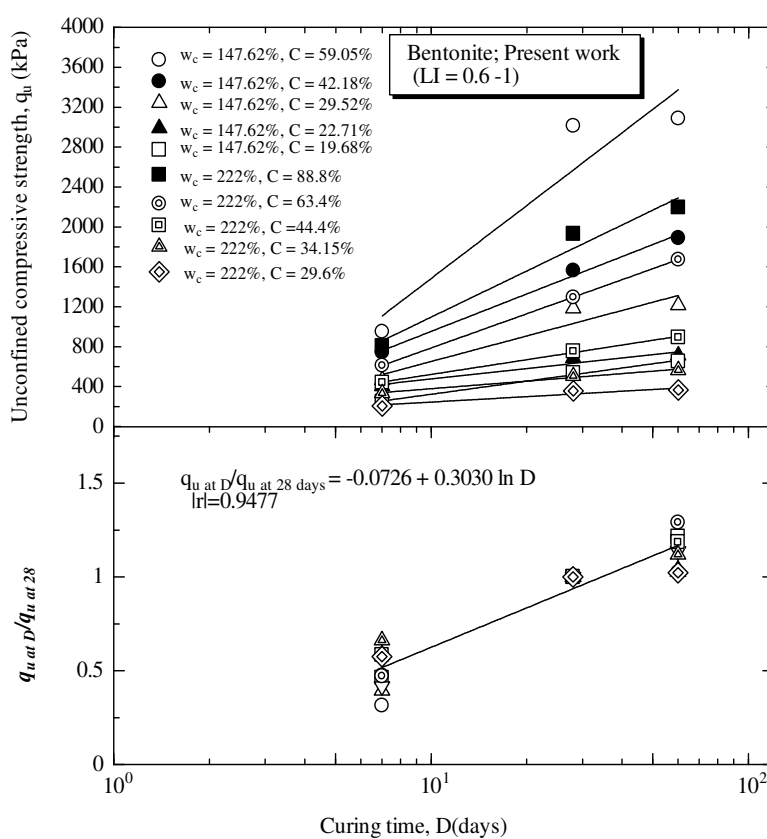
สำหรับดินที่มีการบวมตัวต่ำ (7 – 60 วัน)

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.2132 + 0.2394 \ln D \quad (4.5ก)$$

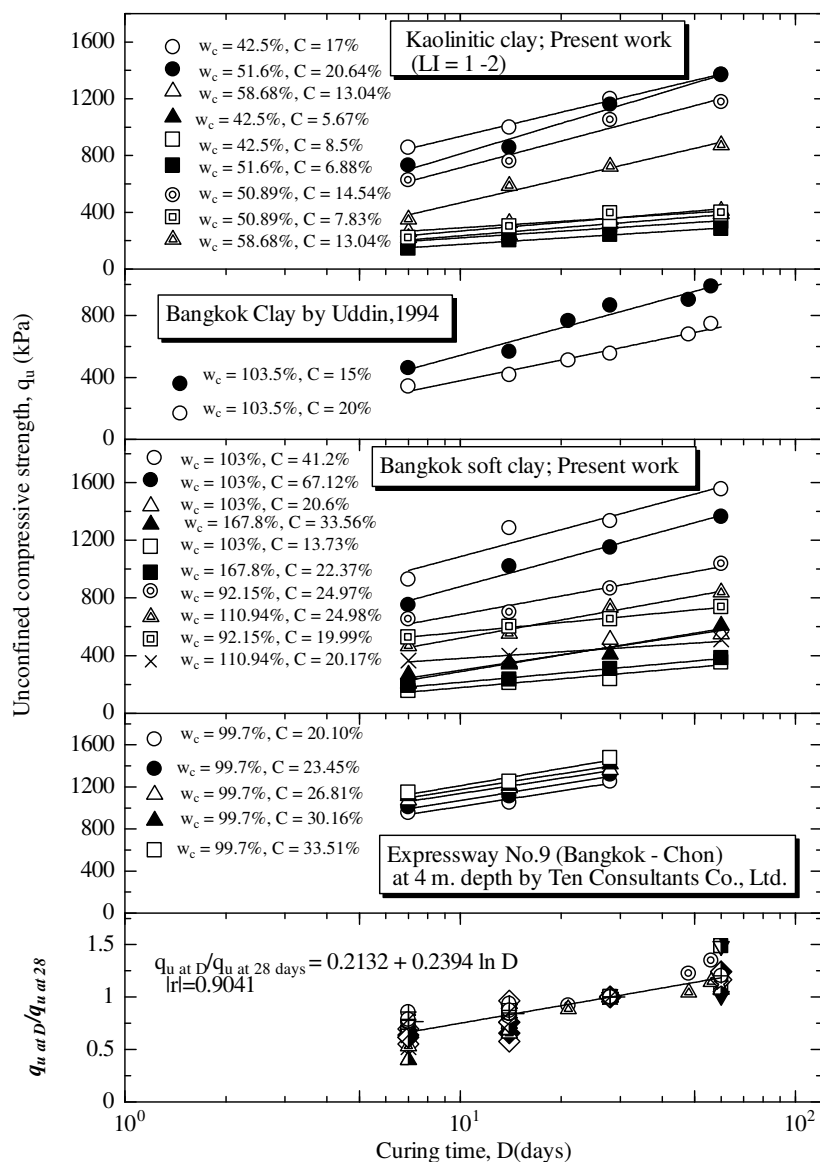
สำหรับดินที่มีการบวมตัวสูง (7 – 60 วัน)

$$\frac{q_D}{q_{28}} = -0.0726 + 0.3030 \ln D \quad (4.5ข)$$

ซึ่งพบว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์สำหรับดินบวมตัวต่ำและสูงดังในสมการที่ 4.5 นั้นให้ผลใกล้เคียงกันมากในช่วงเวลาที่สูงขึ้น



ก) ดินที่มีการบวมตัวสูง



ข) ดินที่มีการบวมตัวต่ำ

ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแกนเดียวและอายุบ่มของดินซีเมนต์และการ Normalization

จากผลทดสอบแสดงว่าค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์หากแต่มีผลต่อช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวเท่านั้น ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดแกนเดียวของดินครอบคลุมดินไม่บวมตัวถึงบวมตัวสูงแสดงในภาพที่ 4.14 และสมการที่ 4.6

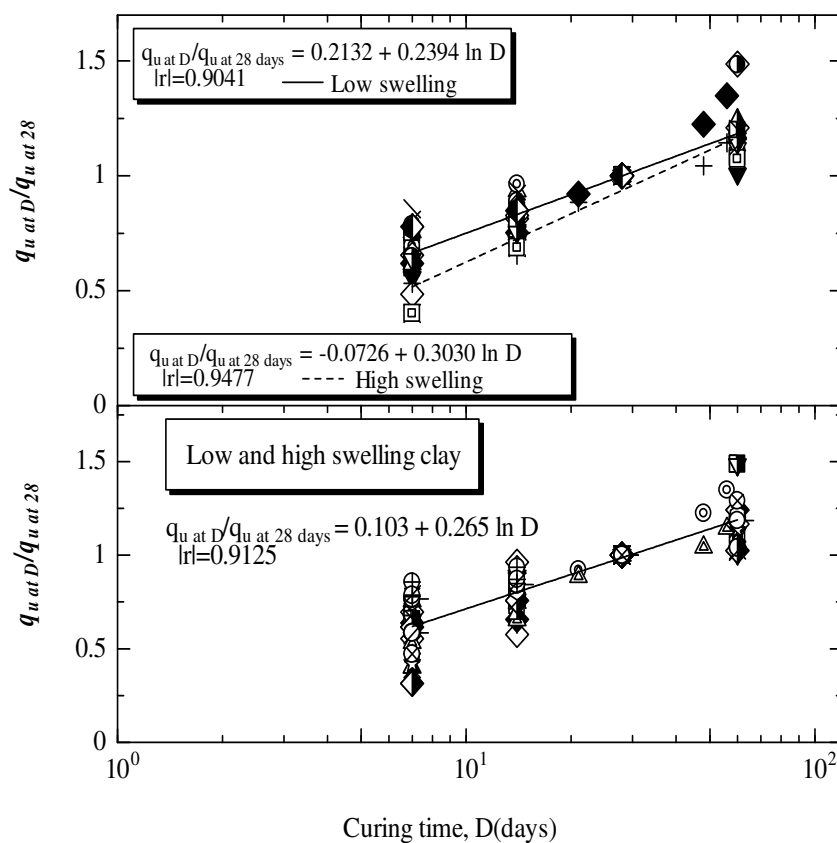
สำหรับดินที่มีการบวมตัวต่ำและสูง (7 – 60 วัน)

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.103 + 0.265 \ln D \quad (4.6)$$

และพบว่าเมื่อผลทดสอบใกล้เคียงกับงานศึกษาในอดีต Horpibulsul et al., 2003 มาก สำหรับกรณีที่ดินมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 ถึง 2.5 เท่าของดัชนีเหลวดังสมการข้างล่างนี้

Horpibulsuk et al., 2003 For $L/I = 1.0 \sim 2.5$

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \quad (4.7)$$



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalization ของกำลังแกนเดียวและอายุป่มของ ดินบวมตัวต่ำและบวมตัวสูงผสมซีเมนต์

3. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์และอายุบ่ม

จากการศึกษา เราพบว่าค่าของ B มีค่าประมาณ 1.40 ทั้งสำหรับดินบวมตัวต่ำและดินบวมตัวสูงด้วยเหตุนี้เอง ทำให้เราได้สมการอัตราส่วนกำลังที่อายุบ่มใดๆ ซึ่งค่าของ A จะถูกตัดทอนออกไป จากการรวมสมการดังกล่าวนี้กับสมการอัตราค่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียว ซึ่งแปรผันตามอายุบ่มเท่านั้น เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม ในช่วงที่ w_c/C มีค่าระหว่าง 2.5 ถึง 7.5 ดังนี้

สำหรับดินที่มีการบวมตัวต่ำและสูง (7 – 60 วัน)

$$\left\{ \frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}} \right\} = \left[\frac{(w_c/C)_{28}}{(w_c/C)_D} \right]^{1.40} (0.103 + 0.265 \ln D) \quad (4.8)$$

Relative correlation = 0.9125

เมื่อ $q_{(w_c/C)_{1,D}}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่ w_c/C หลังจากอายุบ่ม D วัน $q_{(w_c/C)_{28}}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทราบค่า ที่ระยะบ่ม 28 วัน

ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวดินซีเมนต์ อาศัยสมการที่ 4.8 แสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.6 ในงานออกแบบส่วนผสมของการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน 3C/1) สุขาภิบาล 3 กม. 43+900, งานออกแบบส่วนผสมงานก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3256 อำเภอบางพลี - ลาดกระบัง และงานออกแบบส่วนผสมของการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน 3) อำเภอบางพลี - อำเภอธัญบุรี ตามลำดับ เช่นเดียวกับดินเหนียวของประเทศไทยโดย Kawasaki et al., 1981 และดินเหนียว Tokyo (Tatsuoka and Kobayashi, 1983) ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3
คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ประเทศญี่ปุ่น

Location	Sand content (%)	w_n (%)	LL (%)	PL (%)	Humus content (%)	pH	Remark
Tokyo	1	99.6	90.5	35.2	0.39	7.2	Kawasaki et al., 1981
Mie	44	61.0	55.8	24.0	0.34	6.6	
Osaka	5	113.0	95.0	29.9	0.37	7.5	
Hiroshima	3	136.3	121.0	36.1	0.54	7.3	
Kangawa	16	109.7	91.0	31.5	0.71	6.7	
Aichi	5	99.3	83.4	23.4	0.60	7.4	
Tokyo	3.9	120	97	46	-	-	Tatsuoka and Kobayashi, 1983

ตารางที่ 4.4

การทำนายกำลังอัดแกนเดียวบริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวน

รอบนอกตะวันออก (ตอน 3C/1) สุขาภิบาล 3 กม. ที่ 43+900

($LL = 80 - 91.5\%$, $PL = 25 - 29.6\%$, รายงานผลทดสอบจากกรมทางหลวง, 2549)

Depth (m.)	Curing time, (days)	Cement content, C (%)	Water content, w_c (%)	Clay- water/cement ratio, w_c / C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)	$\frac{q_{up} - q_{ul}}{q_{ul}} \times 100$ %
3	7	24.12	122.62	5.08	631	621.42	1.52
	14	24.12	122.62	5.08	758	805.93	6.32
	28	24.12	122.62	5.08	1053	990.43	5.94
	7	25.50	124.00	4.86	703	661.27	5.94
	14	25.50	124.00	4.86	874	857.60	1.88
	28	25.50	124.00	4.86	1121	1053.94	5.98
	7	27.57	126.06	4.57	793	720.65	9.12
	14	27.57	126.06	4.57	920	934.62	1.59

ตารางที่ 4.5

การทำนายกำลังอัดแกนเดียวบริเวณโครงการก่อสร้างเสาชิมดินซีเมนต์ทางหลวงหมายเลข 3256

อำเภอบางพลี - ลาดกระบัง ($LL = 70 - 80\%$, $PL = 29 - 30.7\%$)

(รายงานผลทดสอบจากกรมทางหลวง, 2549)

Depth (m.)	Curing time, $D(\text{days})$	Cement content, $C(\%)$	Water content, $w_c(\%)$	Clay- water/cement ratio, w_c/C	Laboratory strength, $q_{ul}(\text{kPa})$	Predicted strength, $q_{up}(\text{kPa})$	$\frac{q_{up} - q_{ul}}{q_{ul}} \times 100$
							%
3	7	19.74	110.54	5.60	358.6	413.88	15.42
	14	19.74	110.54	5.60	499.8	536.77	7.40
	28	19.74	110.54	5.60	669	Reference	1.40
	7	23.03	113.83	4.94	453.2	492.92	8.76
	14	23.03	113.83	4.94	614.4	639.27	4.05
	28	23.03	113.83	4.94	864.6	785.62	9.13
	7	26.32	117.12	4.45	592.6	571.01	3.64
	14	26.32	117.12	4.45	770.2	740.54	3.85
	28	26.32	117.12	4.45	1010.4	910.08	9.93
	7	32.89	123.70	3.76	761.8	722.91	5.10
	14	32.89	123.70	3.76	940.4	937.55	0.30
	28	32.89	123.70	3.76	1196.6	1152.18	3.71
6	7	19.14	100.34	5.24	439.2	454.00	3.37
	14	19.14	100.34	5.24	556	588.79	5.90
	28	19.14	100.34	5.24	758.2	723.58	4.57
	7	22.33	103.53	4.63	516.8	539.20	4.33
	14	22.33	103.53	4.63	673.4	699.29	3.84
	28	22.33	103.53	4.63	927.8	859.38	7.37
	7	25.52	106.72	3.18	596.2	913.39	53.20
	14	25.52	106.72	3.18	808.4	1184.58	46.53
	28	25.52	106.72	3.18	1060.6	1455.77	37.26
	7	31.90	113.10	3.54	742.8	784.97	5.68

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

Depth (m.)	Curing time, $D(\text{days})$	Cement content, $C(\%)$	Water content, $w_c(\%)$	Clay- water/cement ratio, w_c/C	Laboratory strength, $q_{ul}(\text{kPa})$	Predicted strength, $q_{up}(\text{kPa})$	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ %
	14	31.90	113.10	3.54	958.8	1018.03	6.18
	28	31.90	113.10	3.54	1261	1251.09	0.79
12	7	17.06	95.66	5.61	463.2	413.27	10.78
	14	17.06	95.66	5.61	600.8	535.97	10.79
	28	17.06	95.66	5.61	791.8	658.67	16.81
	7	19.90	98.50	4.95	543.8	492.20	9.49
	14	19.90	98.50	4.95	711.6	638.34	10.29
	28	19.90	98.50	4.95	946.2	784.48	17.09
	7	22.75	101.35	4.45	646.2	570.20	11.76
	14	22.75	101.35	4.45	836	739.50	11.54
	28	22.75	101.35	4.45	1101	908.79	17.46
	7	28.44	107.04	3.76	788.2	721.95	8.41
	14	28.44	107.04	3.76	1051	936.29	10.91
	28	28.44	107.04	3.76	1347.6	1150.64	14.62
Mean Absolute Percent Error, MAPE ($\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$)							11.16 %

ตารางที่ 4.6

การทำนายกำลังอัดแกนเดี่ยวบริเวณโครงการก่อสร้างเสาชิมดินซีเมนต์ทางหลวงหมายเลข 9 ตอน

วงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน 3) ตอนอำเภอบางพลี – ัญบุรี

($LL = 60 - 90.4\%$, $PL = 24.4 - 30.5\%$, รายงานผลทดสอบจากกรมทางหลวง, 2549)

Depth (m.)	Curing time, $D(\text{days})$	Cement content, $C(\%)$	Water content, $w_c(\%)$	Clay- water/cement ratio, w_c/C	Laboratory strength, $q_{ul}(\text{kPa})$	Predicted strength, $q_{up}(\text{kPa})$	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ %
3	7	20.95	106.7	5.09	872.8	898.92	2.99
	14	20.95	106.7	5.09	1167.2	1165.81	0.12

ตารางที่ 4.7

การทำนายกำลังอัดแกนเดียวบริเวณเมืองต่าง ๆ ของประเทศญี่ปุ่น

(Kawasaki et al., 1981 and Tatsuoka and Kobayashi, 1983) LI = 1 – 2

	Curing		Clay-				$\frac{I q_{up} - q_{ul}}{q_{ul}} \times 100$
	time,	Cement	Water	water/cement	Laboratory	Predicted	
Location	D	content,	content,	ratio,	strength,	strength,	
	(days)	C (%)	w_c (%)	w_c / C	q_{ul} (kPa)	q_{up} (kPa)	%
Aichi	7	20.0	99.3	5.0	925	757.15	18.15
LL=83.4%,	28	20.0	99.3	5.0	1889	1206.75	36.12
PL =23.4%	7	30.0	99.3	3.3	1079	1335.70	23.79
(Kawasaki	28	30.0	99.3	3.3	2159	Reference	1.40
et al,1981)	60	30.0	99.3	3.3	2872	2564.89	10.69
Mie	7	20.0	56.7	2.8	810	912.66	12.67
LL=55.8%,	28	20.0	56.7	2.8	1465	1454.61	0.71
PL = 24%	60	20.0	56.7	2.8	1754	1752.55	0.08
(Kawasaki	7	10.0	56.7	5.7	347	345.83	0.34
et al,1981)	28	10.0	56.7	5.7	559	Reference	1.40
	60	10.0	56.7	5.7	771	664.09	13.87
Osaka	7	20	113.5	5.68	901	692.97	23.09
LL = 95%,	28	20	113.5	5.68	1707	1104.46	35.30
PL =29.9%	60	20	113.5	5.68	2052	1330.69	35.15
(Kawasaki	7	30	113.5	3.78	1036	1222.48	18.00
et al,1981)	28	30	113.5	3.78	1976	Reference	1.40
	60	30	113.5	3.78	2513	2347.49	6.59
Hiroshima	7	20	136.3	6.82	1745	1507.07	13.63
LL =121%,	28	20	136.3	6.82	2436	2401.98	1.40
PL =36.1%	60	20	136.3	6.82	2877	Reference	0.59
(Kawasaki	7	30	136.3	4.54	2589	2.69	2.69
et al,1981)	28	30	136.3	4.54	3952	7.22	7.22
	60	30	136.3	4.54	4508	13.25	13.25
Kanagawa	7	20	109.7	5.49	2384	1769.95	25.76
LL = 91%,	28	20	109.7	5.49	3120	2820.96	9.58

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

Location	Curing		Clay-		Laboratory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)	$\frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$ %
	time,	Cement	Water	water/cement			
	D (days)	content, C (%)	content, w_c (%)	ratio, w_c / C			
PL =31.5%	60	20	109.7	5.49	3560	3398.78	4.53
(Kawasaki	7	30	109.7	3.66	3623	3122.41	13.82
et al,1981)	28	30	109.7	3.66	5047	Reference	1.40
	60	30	109.7	3.66	5340	5995.84	12.28
Tokyo	7	30	99.6	3.32	4321	3756.541	13.06
LL=90.5%,	28	30	99.6	3.32	6072	Reference	1.40
PL =35.2%	60	30	99.6	3.32	6825	7213.544	5.69
Tokyo by Tatsuoka and Kobayashi, 1983							
LL = 97%,	8	20	140	7	2254	1996.17	11.43
PL = 46%	28	20	140	7	3052	Reference	1.39
Mean Absolute Percent Error, MAPE ($MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ q_{up} - q_{ul} }{q_{ul}} \times 100$)							22.06 %

จากตารางที่ 4.4 ถึง 4.7 เราสามารถสรุปได้ว่าสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์มีประสิทธิภาพและช่วยในการทำนายกำลังอัดแกนเดียวเพียงทำการทดสอบเดียวที่ระยะบ่ม 28 วันเท่านั้น ในช่วงอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.5 ถึง 7.5 และอายุบ่ม 7 ถึง 60 วัน ผลการทำนายที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบมากด้วยค่า Mean Absolute Percent Error สำหรับดินกรุงเทพฯ สำหรับงานออกแบบส่วนผสมของการก่อสร้างเสาค้ำดินซีเมนต์บริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน3C/1) สุขาภิบาล 3 กม. 43+900, งานออกแบบส่วนผสมงานก่อสร้างเสาค้ำดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3256 อำเภอบางพลี - ลาดกระบัง และงานออกแบบส่วนผสมของการก่อสร้างเสาค้ำดินซีเมนต์บริเวณโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน3) อำเภอบางพลี - อำเภอรัญบุรี เท่ากับ 11.62 %, 11.16% และ 10.22% ตามลำดับ ดังนั้นพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในงานวิศวกรรม และใน

กรณีของดินเหนียวที่ประเทศญี่ปุ่นผสมซีเมนต์ (Kawasaki et al., 1981 และ Tatsuoka and Kobayashi, 1983) มีค่า MAPE เท่ากับ 22.06 %