บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

หลักการ ทฤษฎี และแนวความคิด

2.1 คอนกรีต

คอนกรีตโดยทั่วไปจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย หิน น้ำ ในบางครั้งอาจมีน้ำยาผสมคอนกรีตด้วย โดยนำส่วนผสมเหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้คือ

- ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ (ในบางครั้งอาจมีน้ำยาผสมคอนกรีตผสมเพิ่มด้วย) เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์
- ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย เรียกว่า มอร์ต้า
- มอร์ต้าผสมกับหินหรือกรวด เรียกว่า คอนกรีต

ขบวนการผลิตคอนกรีตนั้น ต้องมีการควบคุมด้านต่างๆเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ ทั้งทางด้านความสามารถในการเทได้ (Workability) ,กำลัง (Strength) , ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ (Pemeability) และความทนทาน (Durability) อีกทั้งการผสม การลำเลียง การเทลงแบบหล่อ และการอัดแน่น ต้องเป็นที่พอใจเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว จึงจะถือได้ว่าเป็นคอนกรีตที่มีคุณภาพ

เมื่อทราบถึงองค์ประกอบของคอนกรีตแล้วต่อไปจะกล่าวถึงเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในโครงการวิจัยชิ้นนี้

2.2 เถ้าลอย

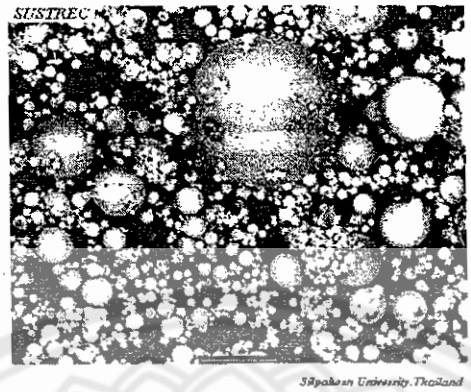
เถ้าลิกไนต์เป็นของเหลือจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ ในปัจจุบันโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เมื่อเดินเครื่องเต็มที่จะใช้ถ่านหินลิกไนต์ จากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประมาณวันละ 400000 ตัน เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเผาถ่านหินลิกไนต์ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะนี้ ได้กระทำที่อุณหภูมิประมาณ 900 ถึง 1000°C เถ้าลิกไนต์เป็นของที่เหลือจากการเผาถ่านหิน ส่วนใหญ่จะเป็นอนุภาคทรงกลม ขนาดเล็ก เรียกว่า เถ้าลอยลิกไนต์ (Electrostatic Precipitator) และอาจมีจำนวนสูงสุดถึงประมาณวันละ 8000

2.2.1 คุณสมบัติของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะจัดเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถนำไปใช้ผสมทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตได้

1) ลักษณะทางกายภาพ เมื่อถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งถูกบดละเอียด ถูกเผาที่อุณหภูมิสูงถึงระดับ 900 °C คาร์บอนในถ่านหิน จะถูกเผาไหม้หมดไป สิ่งปนอยู่ในถ่าน เช่น Clay , Quartz , Felspar จะร้อนจัด อยู่ในสภาพที่ใกล้หลอมตัวเป็นของเหลว แต่กลับถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว จึงเปลี่ยนแปลงสภาพ แข็งตัวกลายเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก ในขณะที่ลอยตัวขึ้นไปถึงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนในอัตราที่สูง

เมื่ออยู่ในสภาพที่แห้ง จะเป็นผงฝุ่นสีเทาคล้ายปูนซีเมนต์ หรืออาจเป็นสีเทาดำ หรือเทาปนน้ำตาล เมื่อสัมผัสด้วยมือ จะรู้สึกว่าเนียนละเอียดและลื่น เหมือนแป้งฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค อนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะมีสัณฐานกลม ส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 ถึง 100 ไมครอน อนุภาคโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 30 ถึง 40 ไมครอน (1 มิลลิเมตร = 1000 ไมครอน) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.9 ถึง 2.2 และผงฝุ่นจะมีความหนาแน่นในสภาพแห้งประมาณ 900 ถึง 1100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 2.1 เถ้าลอย ใช้กล้องขยาย 10000เท่า

ที่มา www.cpac.co.th

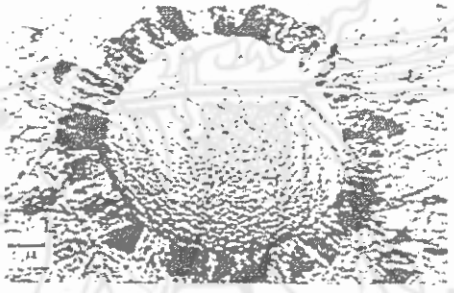
2) องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางแร่วิทยา การเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของเถ้าลอยลิกไนต์ หลังผ่านการเผาถ่านหินลิกไนต์ ที่อุณหภูมิสูง ทำให้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ มีองค์ประกอบทางแร่วิทยาดังนี้ เป็นผลึก (Crystalline) 15 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี กับด่าง $Ca(OH)_2$ และตรวจพบว่า ประมาณ 65 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ของเถ้าลอยลิกไนต์ อยู่ในรูปอสัณฐาน ที่ไม่เป็นโครงสร้าง ซึ่งมีรูปแน่นอน (Amorphous) และไม่มีความเป็นผลึก (Non-Crystaline) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น SiO_2 กับ Al_2O_3 ที่อยู่ใน Glass Phase ซึ่งเป็นส่วนสำคัญ ที่สามารถเกิด ปฏิกิริยาเคมีกับด่าง $Ca(OH)_2$ ได้

องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย เป็นส่วนสำคัญที่บ่งชี้ ถึงคุณภาพของเถ้าลอยชนิดหนึ่งๆ ยิ่งเถ้าลอยมีส่วนที่ไม่เป็นผลึกอยู่มาก ความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ก็จะเพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย ซึ่งองค์ประกอบทางแร่วิทยานี้จะวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธี X-Ray Diffractometry (XRD)

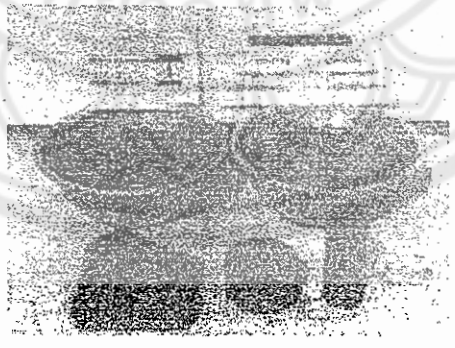
การหาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ โดยวิธีใช้เครื่อง X-Ray Fluoresence พบว่า เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะมีปริมาณของ ซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก รวมกันมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำของ Pozzolan Class F ตาม ASTM ฉ618 และ **มี SO_3 น้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยิ่งต่ำกว่าเกณฑ์ขั้นสูงสุด ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานเดียวกัน**

3) มีคุณสมบัติเชื่อมประสานได้ เมื่อเถ้าลอยลิกไนต์อยู่ในสภาพที่ชื้นด้วยน้ำ ภายใต้อุณหภูมิปกติ ส่วนที่เป็น Glass Phase ของ ซิลิก้า และ อะลูมินา จะทำปฏิกิริยาเคมี Pozzolanic กับสาร$Ca(OH)_2$ แล้วเกิดเป็นสารที่แข็งตัวซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) ได้ ในลักษณะเช่นเดียวกับสารแข็งตัว ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และสารเชื่อมประสานนี้ จะเกิดขึ้นบน พื้นผิวโดยรอบอนุภาคของเถ้าลอย หนาประมาณ 1 ไมครอน

ดังนั้น เถ้าลอยจึงเหมาะในการนำมาใช้เป็นสารทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้อย่างแท้จริง เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับน้ำจะทำให้เกิดผลพลอยได้คือ $Ca(OH)_2$ ซึ่งสารนี้จะสามารถทำปฏิกิริยา Pozzolanic ต่อไปกับ Silica และ Alumina ในเถ้าลอย ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานเพิ่มมากยิ่งขึ้นได้



รูปที่ 2.2 ลักษณะพื้นผิวโดยรอบของเถ้าลอย
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

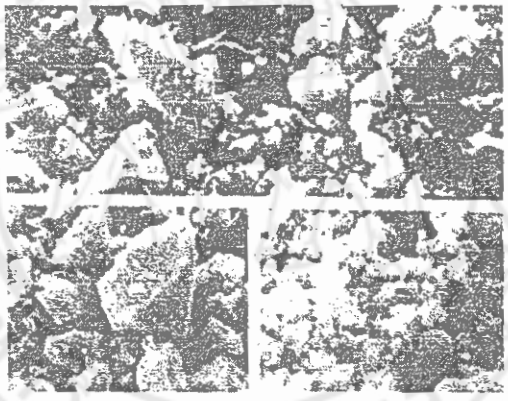


รูปที่ 2.3 ผงเถ้าลอยเมื่อผสมกับน้ำ
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

2.2.2 การใช้เถ้าลอยลิกไนต์ทดแทนปูนซีเมนต์

1) ปฏิกิริยาปอซโซลานิค (Pozzolanic) เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) มีส่วนประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ อยู่ในรูปสารประกอบของซิลิกา (Silica) และ อะลูมินา(Alumina) เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ในสภาพที่มีความชื้น ในระยะแรกน้ำกับปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยา ไฮเดรชั่น(Hydration) เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ที่แข็งตัว เช่น Calcium Silicate Hydrate,Calcium Aluminate Hydrate และเป็นสารละลาย $Ca(OH)_2$ อิสระอยู่ในโพรงของเนื้อคอนกรีต (Pore Solution) ซึ่งสามารถถูกชะล้างออกไปได้

ปฏิกิริยาปอซโซลานิค(Pozzolanic) กับสาร $Ca(OH)_2$ ส่วนนี้เกิดเป็นสารเชื่อมประสานชนิดเดียวกันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีดเหลือปริมาณ $Ca(OH)_2$ น้อยลง มีความแข็งแรงในระยะยาวเพิ่มขึ้น และมีความคงทนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคซีเมนต์กับเถ้าลอย
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

2) ประโยชน์จากความกลม และขนาดที่เล็กของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ จากการเผาถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 900 ถึง 1100 องศา เมื่อไอร้อนลอยขึ้นไป และเกิดการถ่ายเทความร้อน จนไอร้อนเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ละอองเถ้าซึ่งเป็นของแข็งที่เหลืออยู่ จะรวมตัวกันก่อรูปเป็นอนุภาคเล็กๆ มีสัณฐานเป็นทรงกลม และมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 30 ไมครอน ด้วยความกลมและขนาดที่เล็ก อนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ จึงเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นที่ดี ในลักษณะของ Ball Bearing ระหว่างที่ผสมคลุกเคล้าร่วมกับปูนซีเมนต์ หิน และทราย ในการ

ผสมคอนกรีต การคลุกเคล้าจึงสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าที่ใช้กับคอนกรีตปกติ ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเป็นสารเชื่อมประสาน

คุณสมบัติที่เป็นทรงกลมขนาดเล็กของเถ้าลอยลิกไนต์จะช่วยอุดแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดหิน ทราย และปูนซีเมนต์ ได้เป็นอย่างดีทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่น ทึบน้ำมากขึ้น สารละลายต่างๆแทรกซึมเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น ดังนั้น จึงส่งผลให้คอนกรีตชนิดนี้มีความคงทนต่อการทำลายของสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้นด้วย

3) คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน จะมีดังต่อไปนี้

ก) ข้อดีกว่า คือ มีความสามารถในการเทได้สูงกว่า มีความสามารถในการสูบฉีดตามท่อ (Pump) สูงกว่า Slump Loss ช้ากว่า ลดความร้อนในคอนกรีตได้มากกว่า มีกำลังในอายุยาวสูงกว่า มีความพรุนของคอนกรีตจะต่ำกว่า มีการหดตัวแบบออโตจีนัสต่ำกว่า มีการหดตัวแบบแห้งต่ำกว่า การเกิดสนิมในเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ต่ำกว่า มีความต้านทานซัลเฟตและกรดสูงกว่า และยังมีความต้านทานผลจากการปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวมสูงกว่า

ข) ข้อด้อยกว่า คือ ระยะเวลาการก่อตัวยาวกว่า กำลังในระยะต้นต่ำกว่า คาร์บอเนชั่นเกิดขึ้นสูงกว่าและความต้านทานต่อการเยือกแข็งและการหลอมเหลวของน้ำสลับกันต่ำกว่า (ซึ่งในเรื่องนี้มักไม่เป็นปัญหาในประเทศไทยเพราะเป็นเมืองร้อน)

ค) คุณสมบัติเทียบเท่า คุณสมบัติทางกลศาสตร์ต่างๆ เช่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ค่าสัมประสิทธิ์ปัวซอง และความต้านทานต่อการขัดสี (เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่มีกำลังอัดใกล้เคียงกัน)

4) การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง มีลักษณะการนำไปใช้ในงานคอนกรีต อาจจำแนกประเภทของงานคอนกรีตที่สามารถใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุผสมทดแทนปูนซีเมนต์อย่างมีคุณประโยชน์เพิ่มพิเศษได้ 5 ลักษณะคือ

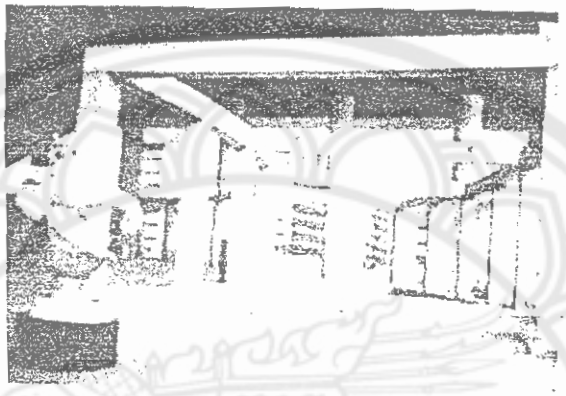
ก) คอนกรีตบดอัด(Roller-Compacted Concrete,RCC)

ข) คอนกรีตที่ไหลเข้าแบบได้ง่าย(Self-Compacting Concrete,SCC)

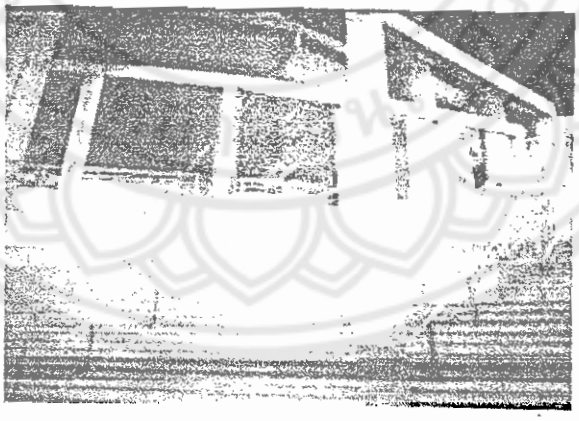
ค) คอนกรีตความร้อนต่ำ(Low Heat Concrete,LHC)

ง) คอนกรีตต้านซัลเฟต(Sulfate Resistance Concrete,SRC)

จ) คอนกรีตที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมของทะเล(Marine Concrete)



รูปที่ 2.5 งานโครงการสร้างคอนกรีตผิวเปลือย(Fair-Face Concrete)
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก



รูปที่ 2.6 โครงการก่อสร้างศูนย์กีฬาเมืองทองธานี(Multi-Purposes Sport Complex)
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

ในปีพ.ศ.2530 เริ่มใช้เป็นวัสดุดินถม (Earthfill Material) เป็นครั้งแรกในงานทำชั้นพื้นทางของถนนที่แม่เมาะ และใช้ในงานถมปรับพื้นที่เพื่อรองรับสิ่งก่อสร้างอื่นๆ เช่นสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ อาคารควบคุมงานก่อสร้างที่แม่เมาะ ต่อมาในปีพ.ศ. 2536 กฟผ. ได้เริ่มใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์(Cement Replacement Material) สำหรับงานคอนกรีตเป็นครั้งแรก ในงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตที่ปากมูล

รูปที่ 2.7 แสดงงานก่อสร้าง ชั้นรองพื้นทางของถนนด้วยการบดอัดเถ้าลอย โดยใช้รถบดล้อเหล็กขนาด 10 ตัน เมื่อปีพ.ศ.2530

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

รูปที่ 2.8 งานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่ปากมูล(พ.ศ.2537)

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดจากการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์แล้วทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และน้ำ

2.2.3 หลักการใช้เถ้าลอยในโครงสร้างวิศวกรรม

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) สมการ (1) ถึงสมการ (4) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3Cao.2Al_2.3H_2O$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(HO)_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอยซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ลงในส่วนผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮออกไซด์ ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ดังสมการ (5) และ (6) ได้สารไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ผลเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมที่เกิดขึ้นจะช้ากว่าแต่ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานคอนกรีต เมื่อใส่เถ้าลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆก็จะทำให้คอนกรีดระบายความร้อนได้ทันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration of Portland cement)

$$2(2\,CaO.SiO_2) + 4H_2O \Longrightarrow 3\,Cao.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (1)$$

$$2(3\,CaO.SiO_2) + 6H_2O \Longrightarrow 3\,Cao.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2)$$

$$2(2\,CaO.Al_2O_3) + 4H_2O \Longrightarrow 3\,Cao.2Al_2O_3.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (3)$$

$$2(3\,CaO.Al_2O_3) + 6H_2O \Longrightarrow 3\,Cao.2Al_2O_3.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (4)$$

ปฏิกิริยาระหว่าง $Ca(OH)_2$ กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Pozzolanic reaction)

$$3\,Ca(HO)_2 + 2SiO_2 \Longrightarrow 3\,CaO.2SiO_2.3H_2O \quad (5)$$

$$3\,Ca(HO)_2 + 2Al_2O_3 \Longrightarrow 3\,CaO.\,2Al_2O_3.3H_2O \quad (6)$$

การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะซับซ้อนกว่าที่นำสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมโดยตรง จากการทำการทดลองพบว่าเถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย

2.3 ดิน (Soil) (อ้างอิงมาจากปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร)

" ดิน " ในทางวิศวกรรม หมายถึง กรวด (gravel) ทราย (sand) ทรายเม็ดป่นหรือตะกอนทราย (silt) และ ดินเหนียว หรือส่วนผสมของสิ่งเหล่านี้ซึ่งอาจเป็นพวกที่มีและไม่มีความเชื่อมแน่น ดินเกิดเม็ดของแร่ธาตุต่างๆที่ตกตะกอนทับถมรวมตัวกันไม่แน่น สามารถแยกออกจากกันด้วยวิธีง่ายๆเช่นการนำไปละลายน้ำเป็นต้น

การจัดหมู่ของดินทางวิศวกรรมนั้นจะใช้คุณสมบัติทางกายภาพของดินเป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณา เช่น ขนาดของเม็ดดิน และความอ่อนตัวของเนื้อดิน เป็นต้น จากการที่ดินแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป จึงมีหน่วยงานและผู้เกี่ยวข้องได้พยายามจำแนกดินออกเป็นกลุ่ม หรือประเภทของดินตามลักษณะหน่วยงานและวัตถุประสงค์ที่นำไปใช้สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโยธามักจะใช้สัญลักษณ์ที่วิศวกรส่วนใหญ่ใช้เป็นมาตรฐานอยู่แล้ว ซึ่งสามารถจดจำได้ง่ายและสำหรับการจำแนกดินจะมีหลายวิธี เช่น ระบบจำแนกดินของ American Association of State Highway and Transport Official System (AASHTO) , Unified Soil Classification System (USCS) , American Standard Testing Material System (ASTM) , Federal Aviation Agency (FAA) นอกจากยังมีระบบอื่นที่ไม่เป็นที่นิยมนักในปัจจุบันวิธีการจำแนกดินที่ใช้กันอยู่นั้นมักจะขึ้นอยู่ลักษณะหรือประเภทงานที่นำไปใช้ เช่น AASHTO จะใช้กับงานถนน ระบบ FAA จะใช้กับการสร้างสนามบิน และระบบ USCS จะใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมทั่วไปและเป็นที่นิยมกว่าระบบอื่น

ก. ลักษณะทั่วไป (อ้างอิงมาจากปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร)

เนื้อดินมีรูปร่างลักษณะยาวคล้ายรูปเข็ม มีเนื้อละเอียด ได้แก่ ดินเหนียว (clay) ประกอบด้วยแร่ดินเหนียว (clay minerals) พวกธาตุซิลิกอน และอะลูมินั่มเป็นส่วนใหญ่ อาจมีธาตุเหล็ก แคลเซียม โซเดียม โปแตสเซียม และแมกนีเซียมผสมอยู่บ้างเล็กน้อยรวมกันเป็นผลึก 3 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มเคโอลิไนท์ (Kaolinite) กลุ่มมอนท์มอริลโอไนท์ (Montmorillonite) และกลุ่มอินไลท์ (Illite) มีโครงสร้างเป็นแผ่น (Sheet structure) ประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานสองชนิด คือ ซิลิก้าเตตราฮีดรอล และอ๊อกตาฮีดรอลไฮดรอกไซด์ของอลูมินั่ม (หรือของเหล็กหรือแมกนีเซียม) ส่วนดินที่เกิดจากสารอินทรีย์นั้นจะมีธาตุคาร์บอนอยู่มาก

ข. โครงสร้างของดิน (อ้างอิงมาจากปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร)

โครงสร้างของดินขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและรูปร่างของเม็ดดิน แบ่งออกเป็น

1. โครงสร้างเม็ดเดี่ยว (Single – grained Structure) เป็นโครงสร้างของกรวดทรายส่วนใหญ่ที่มีขนาดของอนุภาคโตกว่า 0.05 มม. โดยปกติอยู่ในสภาพหลวม ๆ โดยเรียงเม็ดต่อเม็ดซ้อนกันอยู่ มีอัตราส่วนช่องว่างมาก แต่เมื่อได้รับน้ำหนักบรรทุก หรือการสั่นสะเทือนจะขยับตัวและอยู่ในสภาพแน่น ดังนั้นการทรุดตัวของทรายจะเกิดขึ้นทันทีที่ได้รับน้ำหนัก แต่การทรุดตัวต่อไปจะมีมากน้อยมากไม่เหมือน กับพวกดินเหนียว

2. โครงสร้างเป็นผลึก (Flocculent Structure) ได้แก่ โครงสร้างของพวกดินเหนียวที่มีขนาดของอนุภาคเล็กมาก แต่อนุภาคจะมีน้ำห่อหุ้มอยู่ และมีประจุไฟฟ้า ซึ่งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกันจะผลักกัน ส่วนที่มีประจุไฟฟ้าต่างกันจะดูดกันและรวมตัว เกาะกันเป็นผลึก

3. โครงสร้างเป็นรวงผึ้ง (Honey – combed Structure) เป็นโครงสร้างของพวกที่มีเนื้อละเอียดมาก มีลักษณะการเกิดคล้ายกับโครงสร้างที่เป็นผลึก แต่มีน้ำหนักเบากว่าจึงรวมตัวเกาะกันเป็นรูปคล้ายรวงผึ้ง มีอัตราส่วนช่องว่างสูงมาก

โครงสร้างของดินในแบบที่ 2 และ 3 ยึดเกาะกันโดยอาศัยแรงเชื่อมแน่น เมื่อได้รับน้ำหนักบรรทุกก็จะเกิดการยุบอัดตัวและทรุดตัวเรื่อยไป

รูปที่ 2.9 โครงสร้างของดิน
ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

ค. ลักษณะของเนื้อดิน

ดินที่เกิดจากการสลายตัวของหิน อาจจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะกว้าง ๆ คือ

1. **พวกดินเม็ดหยาบ (ทราย,กรวด)** ลักษณะของเนื้อประกอบด้วยเม็ดใหญ่น้อยไม่มีความเชื่อมแน่น มีอัตราส่วนช่องว่างมากกกว่าร้อยละ 45 น้ำซึมผ่านได้ง่าย ไม่ยึดพองตัว แต่อาจเปลี่ยนรูปได้โดยคงปริมาตรเดิมไว้ เมื่อทำให้ทรายทรุดตัวสนิทมีช่องว่างน้อย จะทำให้มีความสามารถต้านทานต่อแรงกดได้ดีเยี่ยม

2. **พวกดินเม็ดละเอียด (clay)** ลักษณะของเนื้อเป็นเม็ดละเอียดมาก มีความเชื่อมแน่นมาก มีอัตราส่วนช่องว่างแตกต่างกันตั้งแต่ 25% ถึง 93% น้ำซึมผ่านได้ยาก มีการยึดพองตัว เปลี่ยนปริมาตรและรูปขนาดได้แม้ขณะไม่ต้องรับน้ำหนักหรือเมื่อบรรทุกน้ำหนักอยู่ หรือแม้ภายหลังจากเอาน้ำหนักบรรทุกออกแล้ว ความสามารถต้านทานต่อแรงเฉือนขึ้นอยู่กับแรงเชื่อมแน่นที่ยึดเกาะเม็ดดิน

สิ่งที่กำหนดประเภทของเนื้อดิน คือ สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคอนินทรีย์ 3 กลุ่มขนาด (Soil seperates) คือ

1. อนุภาคทราย (Sand) = กลุ่มขนาดโตที่สุด
2. อนุภาคทรายแป้ง (Silt) = กลุ่มขนาดปานกลาง
3. อนุภาคดินเหนียว (Clay) = กลุ่มขนาดเล็กที่สุด

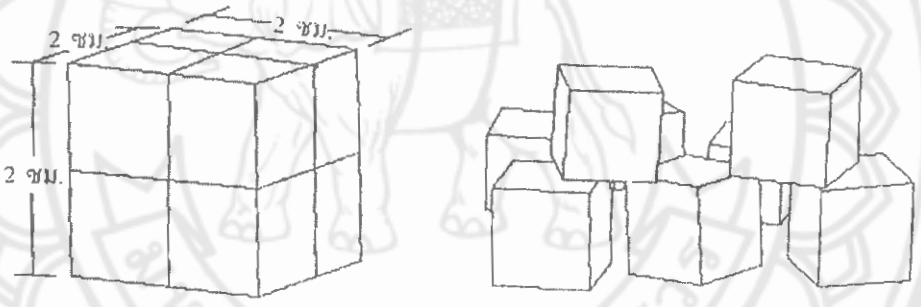
กลุ่มขนาดแต่ละกลุ่ม จะประกอบด้วยอนุภาคหลายขนาด จัดไว้เป็นช่วง ซึ่งกำหนดโดยพิกัดของขนาด พิกัดบน (Upper limit) และพิกัดล่าง (Lower limit)

สัดส่วนผสมของอนุภาคหลายกลุ่มขนาด มีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่

- **ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) - สัมพันธ์กับจำนวนและขนาดของช่องในดิน**
- **ความสามารถในการถ่ายเทอากาศ (Aeration) - สัมพันธ์กับจำนวนและขนาดของช่อง ในดิน**
- ความสามารถในการรับแรงของดิน (Soil strength) หรือการเกาะตัวของอนุภาคดิน - สัมพันธ์กับความ แข็งแรงของการเชื่อมยึดระหว่างอนุภาคเดี่ยว โดยสารเชื่อม - อนุภาคดินเล็ก - พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมาก การเชื่อมยึดแข็งแรง

อิทธิพลของขนาดของอนุภาคดินต่อพื้นที่ผิวของอนุภาคดิน

อนุภาคขนาดเล็กของดินเหนียว (Clay) จะมีพื้นที่ผิวของอนุภาคมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ของทรายแป้ง (Silt) และอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดของทราย (Sand)



(ก) (ข)

รูปที่ 2.10 รูปแสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของอนุภาค
ที่มา Soil Texture สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี

อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อเนื้อที่ผิว (ก) เมื่อกล่องขนาดเล็ก 8 กล่อง จัดเรียงเป็นลูกบาศก์ขนาด 2x2x2 ลบ.ซม. และ (ข) เมื่อกล่องขนาดเล็กกระจายตัวกันอยู่ เห็นได้ว่าเนื้อที่ผิวในกรณี (ก) มีค่าน้อยกว่า กรณี (ข) มาก เนื่องจากกรณี (ก) ไม่มีเนื้อที่ผิวภายใน

พื้นที่ผิวภายในของดินมีผลต่อ

- การดูดซับน้ำ ดินที่มีพื้นที่ผิวรวมของอนุภาคมากกว่า จะดูดซับน้ำได้มากกว่า ซึ่งการ ดูดซับน้ำยังขึ้นกับขนาดและจำนวนรวมของช่องในดินด้วย
- การดูดซับธาตุอาหารพืช ดินที่มีพื้นที่ผิวรวมของอนุภาคมากกว่า จะดูดซับธาตุอาหารได้มากกว่า ซึ่งการดูดซับธาตุอาหารยังขึ้นกับชนิดของประจุไฟฟ้าบนผิวอนุภาคและความหนาแน่นของประจุต่อหน่วยพื้นที่ด้วย

อิทธิพลของขนาดของอนุภาคดินต่อขนาดของช่องภายในดิน

- ช่องระหว่างทรงกลมขนาดใหญ่มีขนาดใหญ่กว่าช่องระหว่างทรงกลมขนาดเล็ก
- ปริมาตร

<u>หากอนุภาคของดินมีขนาดใหญ่</u> เช่น ทรายและทรายแป้ง

- พื้นที่ผิวภายในของดินมีค่าน้อย ดูดซับน้ำได้น้อย
- ช่องระหว่างอนุภาคมีขนาดใหญ่ ดูดน้ำด้วยแรงต่ำ

→

- ดินนั้นระบายน้ำ (drainage) ได้ดี ส่วนมากช่องในดินจะมีอากาศอยู่
- ดินนั้นระบายอากาศ (aeration) ดี เนื่องจากในดินมีช่องอากาศมาก และมีความต่อเนื่องถึงกัน

<u>หากอนุภาคของดินมีขนาดเล็ก</u> เช่น ดินเหนียว

- พื้นที่ผิวภายในของดินมีค่ามาก ดูดซับน้ำได้มาก
- ช่องระหว่างอนุภาคมีขนาดเล็ก ดูดน้ำด้วยแรงสูง

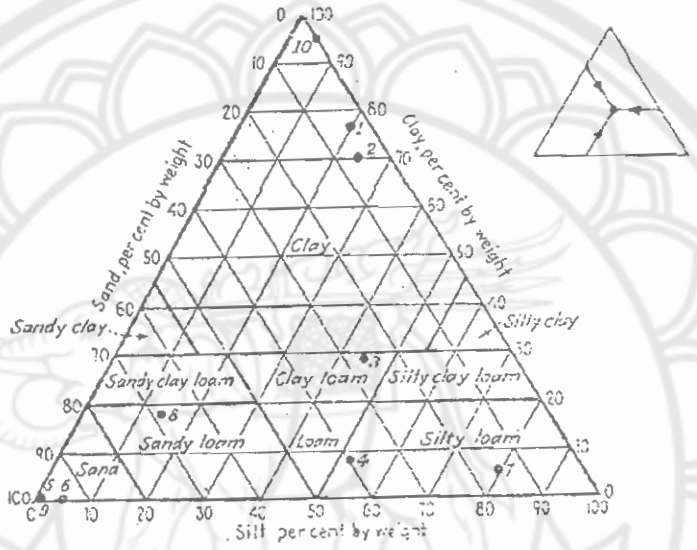
→

- ดินนั้นระบายน้ำไม่ ดี ส่วนมากช่องในดินจะมีน้ำขังอยู่
- ดินนั้นระบายอากาศไม่ ดี เนื่องจากมีช่องอากาศน้อยและมักไม่ต่อเนื่อง ถึงกันเพราะมีน้ำมีน้ำขวาง

รูปที่ 2.11 รูปแสดงการเปรียบเทียบอนุภาคของดิน

ที่มา Soil Texture สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี

อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อขนาดของช่อง (ก) อนุภาคขนาดใหญ่เมื่อเรียงตัวกันย่อมให้ช่องระหว่างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่จะมีปริมาตรรวมของช่องน้อย (ข) อนุภาคขนาดเล็กเมื่อเรียงตัวกันย่อมให้ช่องระหว่างอนุภาคที่มีขนาดเล็ก แต่จะมีปริมาตรของช่องมาก ช่องขนาดใหญ่ (macrospores) มักเป็นที่อยู่ ของอากาศ ส่วนช่องขนาดเล็ก (microspores) มักเป็นที่อยู่ของน้ำขนาดของช่องภายในดินมีผลกระทบต่อแรงดึงน้ำ (Capillary) แรงดึงน้ำในช่องจะผันแปรกลับกับขนาดของช่อง



รูปที่ 2.12 Triangular Soil Classification Chart

ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

ง. การจำแนกประเภทของดิน

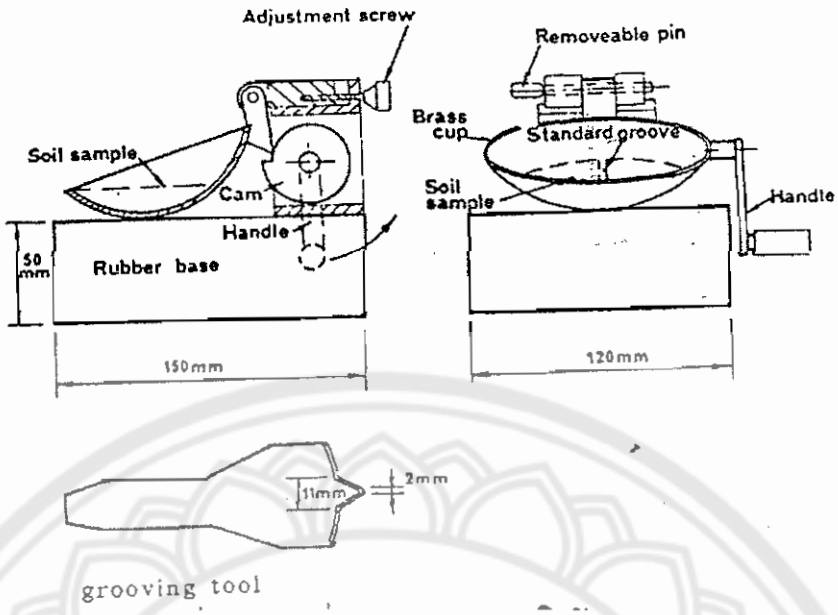
- **ดรรชนีที่ใช้ในการจำแนกประเภทของดินได้แก่ Atterberg's limit**

ชาวสวีเดน ชื่อ แอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg) พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลดินเม็ดละเอียด ทำให้ดินมีสถานภาพความเหลวต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

การลดปริมาณน้ำในมวลดินเม็ดละเอียด จะทำให้ดินเปลี่ยนสถานภาพความเหลว เช่น เหลว (liquid) หนืด (plastic) ค่อนข้างแห้งและแข็ง (semi solid) และแห้งและแข็ง (solid) เรียกปริมาณน้ำที่ทำให้ดินมีสถานภาพต่าง ๆ กันนี้ว่า พิกัดความข้นเหลว (Consistency Limits) หรือพิกัดของแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) เพื่อให้เกียรติแก่นาย Atterberg ซึ่งเป็นคนแรกที่ค้นคว้าพิกัดต่าง ๆ นี้ ได้แก่

1. พิกัดความเหลว (Liquid Limit : L.L.) เป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในมวลดินที่ทำให้ดินเหลวและไหลได้

การทดสอบหาค่าพิกัดความเหลว ทำโดยอาศัยเครื่องมือของ อาเธอร์ คาซาเกรนเด (Arthur Casagrende) ดังรูป 2.13 โดยใส่ดินเปียกในถ้วยทองเหลือง ปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วแบ่งดินเป็นร่องโดยใช้ Grooving tool จากนั้นหมุนมือจับเพื่อยกถ้วยขึ้นสูง 1 เซนติเมตร และตกกระแทกลงมาด้วยความเร็ว 2 ครั้งต่อวินาที ค่า L.L. จะหาได้เมื่อมวลดินที่อยู่ระหว่างร่องมาตรฐาน (Standard groove) ทั้งสองข้างไหลมาบรรจบกันเป็นระยะทางครึ่งนิ้วพอดี หลังจากที่ยกมวลดินสูง 1 เซนติเมตร แล้วกระแทกลงมาเป็นจำนวน 25 ครั้งมวลดินที่มีค่าพิกัดความเหลวสูงจะยุบอัดตัวมากกว่ามวลดินที่มีค่าพิกัดความเหลวต่ำ



รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบหาพิกัดความเหลว
ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

2. พิกัดความเหนียวหนืด (Plastic Limit : P.L.) เป็นปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในมวลดินที่ดินยังมีความเหนียวหนืดสามารถปั้นเป็นรูปร่างได้โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว ทดสอบโดยคลึงมวลดินด้วยฝ่ามือบนแผ่นกระจกให้เป็นเส้นกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) โดยไม่มีรอยแตกที่ผิว แล้วเริ่มมีรอยแตกที่ผิวพอดี

ช่วงปริมาณน้ำในมวลดิน ซึ่งดินอยู่ในสภาพความเหนียวหนืด (Plastic State) เรียกว่าดัชนีความเหนียวหนืด (Plastic Index : P.I.) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างพิกัดความเหลวกับพิกัดความหนืด นั่นคือ

$$P.I. = L.L. - P.L.$$

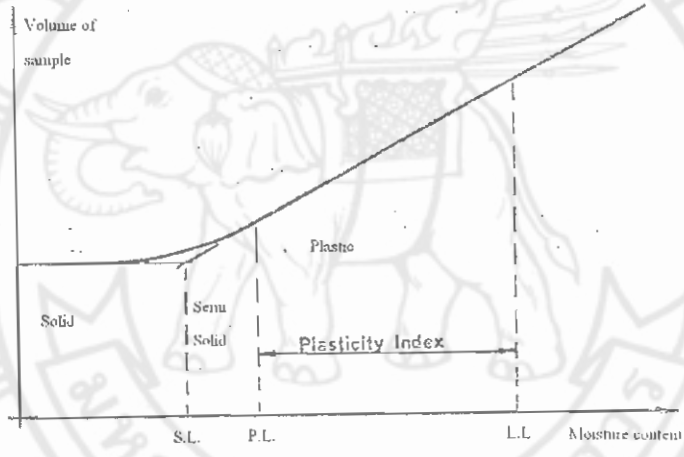
สำหรับดินที่ไม่สามารถหาพิกัดความเหนียวหนืดได้ จะรายงานค่าดัชนีความเหนียวหนืดว่า NP ซึ่งหมายความว่าไม่มีความเหนียวหนืด (Non - Plastic) ถ้าค่าพิกัดความเหนียวหนืดมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าพิกัดความเหลวแล้วจะแสดงค่าดัชนีความเหลวหนืดว่าเท่ากับศูนย์

อัตราส่วนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างผลต่างของปริมาณน้ำในมวลดินตามธรรมชาติ (V_w) กับค่าพิกัดความเหนียวหนืด ต่อดัชนีความเหนียวหนืด เรียกว่า ดัชนีความเหลว (Liquidity Index : L.I.) นั่นคือ

$$L.I. = \frac{V_w - P.L.}{P.I.}$$

ปกติเม็ดดินละเอียดแบ่งออกตามสถานะภาพความเหลวต่างๆดังนี้

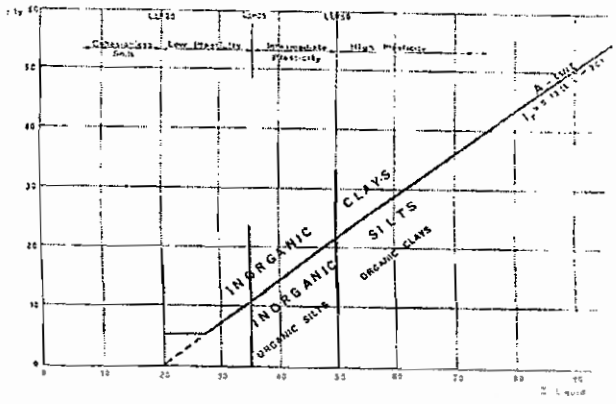
- Low plasticity (L) เมื่อมี Liquid Limit น้อยกว่า 35 %
- Intermediate Plasticity (I) เมื่อมี Liquid Limit อยู่ระหว่าง 35 % ถึง 50 %
- High Plasticity (H) เมื่อมี Liquid Limit สูงกว่า 50 %



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับปริมาณของมวลดินที่สถานภาพความเหลวต่างๆกัน
ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

ส่วนการจำแนกเม็ดดินละเอียดออกเป็น Inorganic clays และ Inorganic silts หรือ (Organic soils) อาศัยเส้นที่เรียกว่า A – Line ตามสมการ P.I. = 0.73 (L.L. – 20) ดังรูปที่ 2.14 นี้ เรียกว่า แผนภูมิแสดงความเหนียวหนืด (Plastic Chart) ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบได้ค่า ดัชนีความเหนียวหนืด และค่าพิกัดความเหนียว ก็นำมาเขียนจุดลงในแผนภูมินี้ ถ้าจุดอยู่เหนือเส้น A – Line ก็เป็น clay แต่ถ้าจุดอยู่ต่ำกว่าเส้น A – Line แสดงว่าเป็น silt

สำนักหอสมุด
- 4 พ.ค. 2549
4840525
ป TA
บ39
ว4225ก
2548



รูปที่ 2.15 แผนภูมิแสดงความเหนียวหนืด
ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

- **การจำแนกประเภทของดินตามคาซากรานเด (Casagrande's classification)**

จากตาราง 2.1 แสดงการจำแนกประเภทของดินตาม Casagrande โดยใช้ขนาดของเม็ดดินและสถานภาพความเหลวเป็นเกณฑ์ ซึ่งเรียกชนิดของดินเป็นตัวย่อต่างๆกัน โดยที่ตัวย่อต่างๆนี้มีความหมายต่างๆกันดังนี้

ตาราง 2.1 ประเภทของดินตามคาสซากรานเด
ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

ประเภทของดิน		ตัวย่อและความหมาย
ดินเม็ดหยาบ **(Coarse – grained Soils)** กรวด Gravel ทราย Sand	 G S	ขนาดคละดี **Well grade** ขนาดคละไม่ดี **Poorly grade** สม่ำเสมอ **Uniform** ปนดินเหนียว **Clay binder** ปนเม็ดละเอียดมาก **Excess fines**
ดินเม็ดละเอียด **(Fine – grained Soils)** ตะกอนทราย Silt ดินเหนียว Clay ดินอินทรีย์ Organic soils พีต Peat	 M C O P	 ความเหนียวหนืดต่ำ **Low Plasticity** ความเหนียวหนืดปานกลาง **Medium Plasticity** ความเหนียวหนืดสูง **High Plasticity**

ตารางที่ 2.2 Casagrande's claasification
ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร

1		2	3	4	5
Major division		Description and identification	Sub group	Casagrande group symbol	Applicable classification test
Coarse grained soil	Boulders and cobble	Soil consisting chiefly of boulder larger than 200 mm in diameter or cubble between 200 mm and 80 mm. Identifiable by visual inspection	Boulder gravel	-	Mechanical analysis
	Gravel and gravelly soil	Soil with an appreciable fraction between the 80 mm and 2 mm sieve. Generally easily identifiable by visual inspection. A medium to high dry strength indicate that some clay is present . A negligible dry strength indicate the absence of clay	Well-grade gravel sand with small clay content	GW	Mechanical analysis
			Well-grade gravel sand with small clay content	GC	Mechanical analysis liquid and plastic limit on binder
			Uniform gravel with little or no fine	GU	Mechanical analysis
			Poorly-gravel grade sand little or no fine	GP	Mechanical analysis
			Gravel-sand with excess of fine	SW	Mechanical analysis liquid and plastic limit on binder if applicable
	Sand and sandy soil	Soil with liquid limit less than 35 % and generally with less than 20 % of clay . Not gritty between the finger . Cannot be readily rolled into thread when moist . Exhibit dilatarcy	Well grade sand and gravelly sand	SC	Mechanical analysis
			Well grade sand with small clay	SU	Mechanical analysis liquid and plastic limit on binder
			Uniform sand with little or no fine	SP	Mechanical analysis
			Poorly grade sand	SF	Mechanical analysis
			Sand with excess of fine	ML	Mechanical analysis liquid and plastic limit on binder if applicable

ตารางที่ 2.2 Casagrande's claasification (ต่อ)
ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร

Fine grained soil Containing little or no coarse – grained material Coarse grained soil	Fine grained soil having low plasticity	Soil with liquid limit between 35 and 50 % and generally containing between 20 and 40 % clay. Can be readily rolled into thread when moist. Do not exhibit dilatarcy . Show some shrinkage on drying	Silt , rock flour silty fine sand with slight plasticity	CL	Mechanical analysis liquid and plastic limit if applicable
			Clayey silt	OL	
			Organic silt of low plasticity	ML	Liquid and plastic limit
	Fine grained soil having medium plasticity	Soil with liquid limits greater than 50% and generally with a clay content greater then 40% can be readily rolled into threads when moist. greasy to the touch.show considerable shrinkage on drying.All highly compressible	Silty clay or sandy clay	CI	Liquid and plastic limit from natural conditions and after oven drying
			Clay of medium plasticity	OI	Mechanical analysis liquid and plastic limit if applicable
			Organic clay of medium plasticity	MH	Liquid and plastic limit
	Fine grained soil having high plasticity	Soil with liquid limits greater than 50% and generally with a clay content greater then 40% can be readily rolled into threads when moist. greasy to the touch.show considerable shrinkage on drying.All highly compressible soils	Highly compressible micaceous	CH	Liquid and plastic limit from natural conditions and after oven drying
			Clay of high plasticity	OH	Mechanical analysis liquid and plastic limit if applicable
			Organic clay of high plasticity	CH	Liquid and plastic limit
Fibrous organic soil with very high compressibility		Usually brown or black in colour . Very compressible . Easily identifiable visually	Peat or other highly organic swamp soil	Pt	Moisture content

- **การจำแนกประเภทของดินตาม AASHTO** (อ้างอิงมาจากปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร)

ตาราง 2.3 แสดงการจำแนกประเภทของดินตาม AASHTO เพื่อใช้สำหรับงานทางหลวง สนามบิน โดยอาศัยขนาดของเม็ดดิน สถานภาพความเหลวและดัชนีของกลุ่มเป็นเกณฑ์ แบ่งดินออกเป็น 7 กลุ่มใหญ่ตั้งแต่ A – 1 จนถึง A – 7 ทั้ง 7 กลุ่มใหญ่นี้แบ่งออกเป็น 12 กลุ่มย่อยตามคุณสมบัติต่างที่ให้ไว้ในตาราง ดินกลุ่ม A – 1 เป็นดินที่ดีที่สุด ส่วนดินกลุ่ม A – 7 จะเป็นดินเลวสุด ในตารางดังกล่าวได้แยกดินเม็ดหยาบ (A – 1 ถึง A – 3) กับดินเม็ดละเอียด (A – 4 ถึง A – 7) โดยถือว่า ดินเม็ดละเอียดจะมีส่วนที่ผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 35

ดินกลุ่ม A – 7 ที่แบ่งย่อยออกเป็นดินกลุ่ม A – 7 – 5 และ A – 7 – 6 นี้ อาศัยสมการเส้นตรง P.I. = L.L. – 30 ที่เริ่มต้นเขียนจากจุดที่มี L.L.= 40 % และ P.I. = 10 % ถ้าจุดอยู่เหนือเส้นตรงนี้ก็จะเป็นดินกลุ่ม A – 7 – 5 แต่ถ้าอยู่ใต้เส้นก็จะเป็นดินกลุ่ม A – 7 – 6

ดัชนีของกลุ่ม(Group Index) เป็นค่าตัวเลขจำนวนเต็มบวกที่จะบอกว่าดินดีหรือไม่ถ้าดินดีเหมาะสมต่อการใช้งาน ค่าดัชนีของกลุ่มจะต่ำ (สังเกตจากตาราง 2.3) จะคำนวณหาค่านี้ได้จากสมการ G.I. = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd

ในเมื่อ G.I. = Group Index (ใช้เลขจำนวนเต็มบวกหากมีค่าเป็นลบให้ใช้เท่ากับศูนย์)

a = ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 35% แต่ไม่เกิน 75%

b = ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 15% แต่ไม่เกิน 55%

c = ส่วนของค่า L.L. ที่มากกว่า40 แต่ไม่เกิน60

d = ส่วนของค่า P.I. ที่มากกว่า 10 แต่ไม่เกิน 30

ดังนั้นจากตาราง 2.3 สำหรับดินกลุ่ม A-2-6 ที่มีส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 35% มี L.L. = 40 % แต่มี P.I. = 20 % จะได้ค่า a = (35-35) = 0 , b = (35-15) =20 , c = (40-40) =0 , d = (20 – 10) = 10 แทนค่าลงในสมาการข้างต้นจะได้ดัชนีของกลุ่ม =2 ซึ่งจะเขียนตัวเลขนี้กำกับไว้ในวงเล็บท้ายชื่อกลุ่ม นั่นคือเป็นดินกลุ่ม A – 2 – 6 (2)

ตาราง 2.3 AASHTO Soil Classification

ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

Classisication of highway subgrade materials (with suggested subgroups)											
General classification	Granular materials (35 percent or less of total sample passing No.200)							Silt-clay materials (More than 35 percent. Of total sample Passing NO. 200)			
Group classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5, A-7-6
Sieve analysis , percent Passing: NO. 10 NO. 40 NO. 200	50 max. 30 max. 15 max.	50 max. 25 max.	51 max. 10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.	36 max.	36 max.	36 max.	36 max.
Characteristics of fraction Passing No.40: Liquid limit Plastieity index	6 max.		NP	40 max. 10 max.	41 max. 10 max.	40 max. 11 max.	41 max. 11 max.	40 max. 10 max.	41 max. 10 max.	40 max. 11 max.	41 max. 11 max.
Group index	0		0	0		4 max.		8 max.	12 max.	16 max.	20 max.
Usual types of significant Constituent materials	Stone fragments, Gravel and sand		Fine sand	Silt or clayey gravel and sand				Silty soils		Clayey soils	
General rating as subgrade	Excellent to good							Fair to poor			

- **การจำแนกประเภทของดินแบบ UNIFIED (Unified soil classification)** (อ้างอิงมาจากปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร)

ตาราง 2.4 แสดงการจำแนกประเภทของดินแบบ unified เพื่อใช้กับงานวิศวกรรมด้านต่างๆการจำแนกนี้ดัดแปลงมาจากการจำแนกประเภทของดินตามคาซากรานเด โดยอาศัยขนาดของเม็ดดินและสถานภาพของความเหลวของดินเป็นเกณฑ์พิจารณา

เมื่อพิจารณาตามขนาดของเม็ดดิน จะแบ่งดินออกเป็น ดินเม็ดหยาบ กับ ดินเม็ดละเอียด โดยใช้อักษรย่อตัวแรกกำกับชื่อของกลุ่มดินต่างๆดังนี้

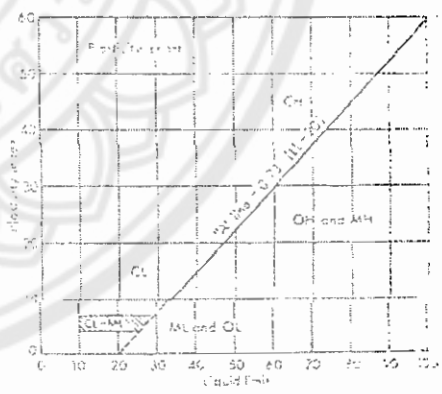
ดินเม็ดหยาบเป็นพวกที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 50% ได้แก่ กรวด (G) ทราย (S) ดินเม็ดละเอียดเป็นพวกที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 50% ได้แก่ ตะกอนทรายอนินทรีย์และทรายเม็ดละเอียด (M) ดินเหนียวอนินทรีย์ (C) ตะกอนทรายอินทรีย์และดินเหนียวอินทรีย์ (O)พีต ดินโคลนหรือดินเลนสีดำและดินอินทรีย์สูง (Pt) ในการจำแนกดินเม็ดหยาบออกเป็นกรวดหรือทรายให้พิจารณาที่ตะแกรงเบอร์ 4 ถ้ามีส่วนลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ได้มากกว่า 50% ถือว่าเป็นทราย

ในแต่ละกลุ่มข้างต้นยังแบ่งย่อยลงไปอีกโดยใช้ส่วนขนาดคละ และสถานภาพความเหลวที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นเกณฑ์ ดังอธิบายในตาราง 2.4 และใช้อักษรย่อดังต่อไปกำกับชื่อของกลุ่ม ดังนี้ ขนาดคละดีมีดินเม็ดละเอียดปนน้อยกว่า 12 % (W) ขนาดคละไม่ดีมีดินเม็ดละเอียดปนน้อยกว่า 12% (P) มีพิกัดความเหลวน้อยกว่า 50% (L) มีพิกัดความเหลวมากกว่า 50% (H)

ตาราง 2.5 แสดงความเหมาะสมของดินที่จะนำไปใช้งานด้านวิศวกรรมตามการจำแนกประเภทของดินแบบ unified

ตาราง 2.4 Unified Soil Classification

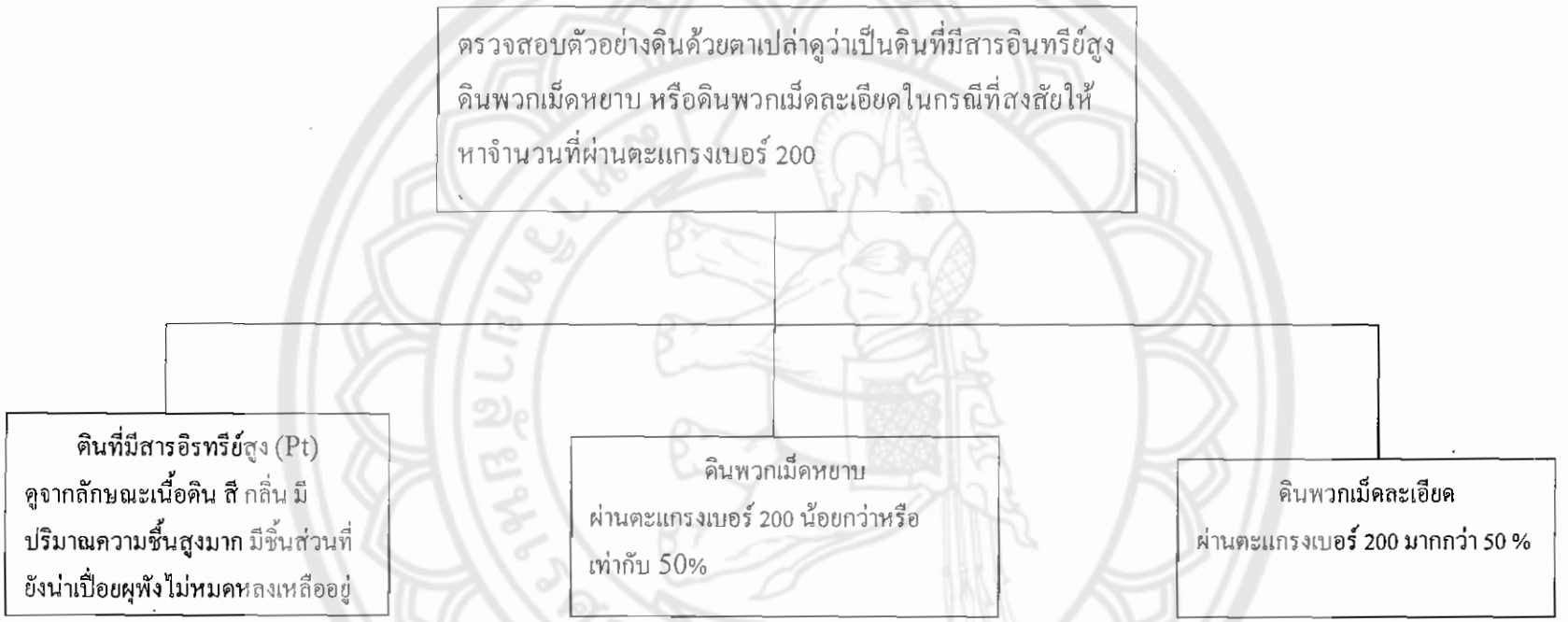
Major decisions			Group symbols		Typical names	Laboratory classification criteria		
Coarse-grained soils (More than half of material is larger than No. 200 sieve size)	Gravels (More than half of coarse fraction is larger than No.4 sieve size)	Clean gravels (Little or no fines)	GW		Well-graded gravels,gravel-sand mixtures,little or no fines	Determine percentages of sand and gravel from grain-size curve. Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size), Coarse-grained soils are classified as follows: Less than 5 percent GW,GP,SW,SP More than 12 percent GM,GC,SM,SC 5 to 12 percent *Borderline cases requiring dual symbols*	$C_u = D_{60}$ greater than 4 ; $C_c = (D_{30})^2$ between 1 and 3	
			GP		Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines		Not meeting all gradation requirements for GW	
		Gravels with fines (Appreciable amount of fines)	GM	d	Silty gravels,gravel-sand-silt mixtures		Atterberg limits below "A" line of PI less than 4	Above "A" line with PI between 4 and 7 are border line cases requiring use of dual symbols
				u			Atterberg limits above "A" Line with PI greater than 7	
			GC		Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures			
	Sands (More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size	Clean sands (Little or no fines)	SW		Well-graded sands,gravelly sands, little or no fines		$C_u = D_{60}$ greater than 6 ; $C_c = (D_{30})^2$ between 1 and 3	
			SP		Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines		Not meeting all gradation requirements for SW	
		Sands with fines (Appreciable Amount of fines)	SM	d	Silty sands, sand-silt mixtures		Atterberg limits below "A" line or PI less than 4	Limits plotting in hatched zone with PI between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols
				u				
			SC		Clayey sands,sands-clay mixtures		Atterberg limits above "A"line with PI greater than 7	
Fine-grained soils (More than half of material is smaller than No. 200 sieve)	Silts and clays (Liquid limit less than 50)		ML		Inorganic silts and very fine sands,rock flour, silty or clayey fine sands,or clayey silts with slight plasticity			
			CL		Inorganic clays of low to medium plasticity,gravelly clays,sandy clays,silty clays, lean clays			
			OL		Organic silts and organic silty clays of low plasticity			
	Silts and clays (Liquid limit greater than 50)		MH		Inorganic silts,micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts			
			CH		Inorganic clays of high plasticity,fat clays			
			OH		Organic clays of Medium to high plasticity,organic silts			
	Highly organic soils		Pt		Peat and other highly organic soils			



ตาราง 2.5 ความเหมาะสมของดินที่จะนำไปใช้งาน

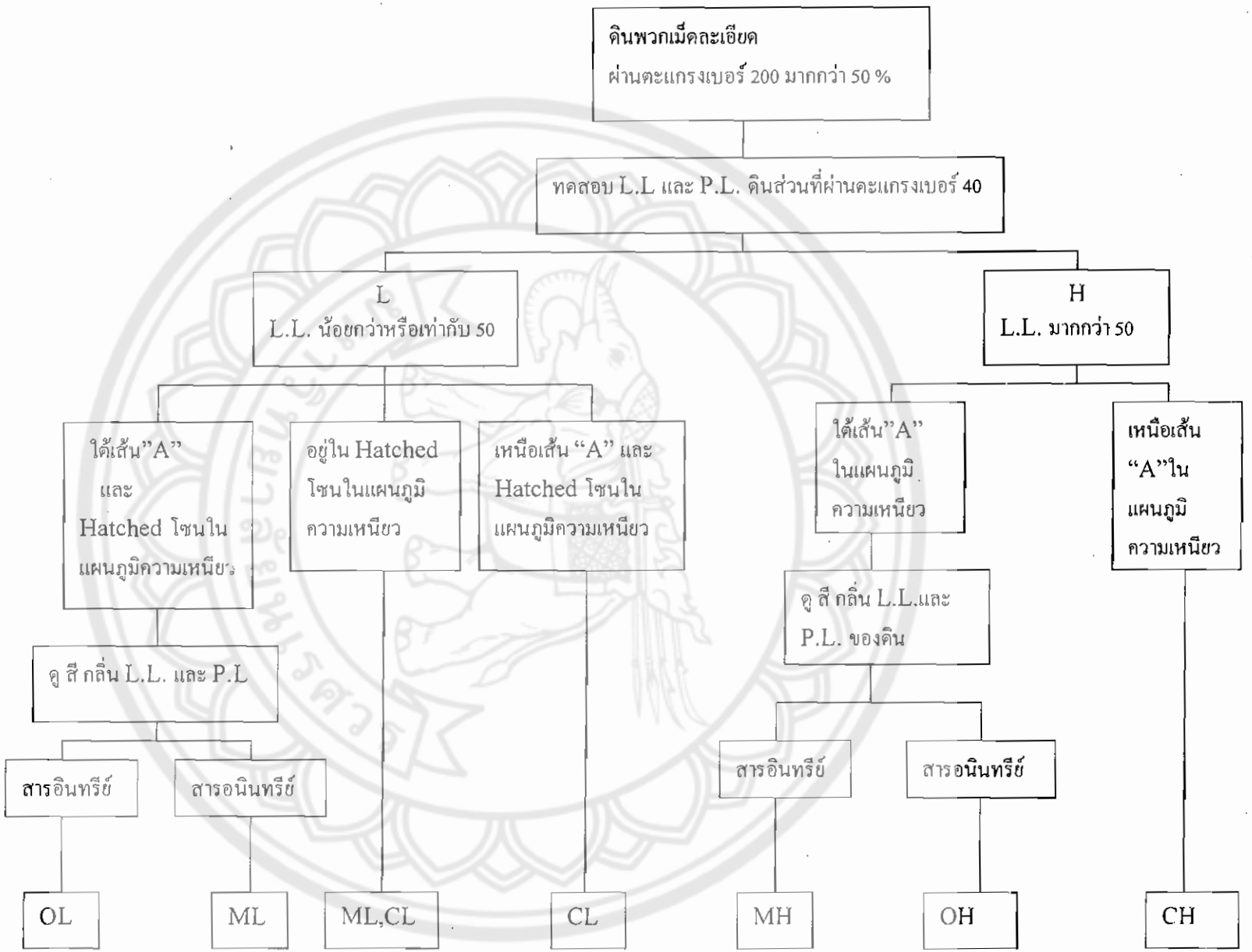
ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิด ช่อวิเชียร

การจำแนกประเภท		การใช้ในงานเขื่อน	การใช้ในงานฐานรากรับแรงบนกำแพง	การใช้ในงานป้องกันน้ำซึม	การใช้ในงานถนนทำชั้นรองพื้นใต้ผิวลาดยาง
กลุ่มดิน	คำอธิบาย				
GW	กรวดหรือกรวดผสมทราย มีหลายขนาดคละกันมีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	เสถียรมาก,ใช้ทำเขื่อนหรือทำนบตรงส่วนที่ให้น้ำซึมผ่านได้	ดี	ทำแกนลดความเร็วของน้ำซึม	ดี
GP	กรวดหรือกรวดผสมทราย ขนาดเดียวกัน มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	เสถียรมาก,ใช้ทำตัวเขื่อนหรือทำนบตรงส่วนที่ให้น้ำซึมผ่านได้	ดี	ทำแกนลดความเร็วของน้ำซึม	เลวหรือดี
GM	กรวดปนดะกอนทราย กรวดปนทรายและดอกอนทรายมีเม็ดขนาดเดียวกัน	ค่อนข้างเสถียรใช้ทำแกนกันน้ำซึม	ดี	ใช้สำหรับปลายลาดเขื่อนด้านใต้น้ำบางครั้งไม่จำเป็น	พอใช้หรือดี
GC	กรวดปนดินเหนียว,กรวด ทราย และดินเหนียวปนดละกันมีเม็ดขนาดเดียว	ค่อนข้างเสถียรใช้ทำแกนกันน้ำซึม	ดี	ไม่จำเป็น	ไม่ดี
SW	ทรายผสมขนาดคละกันทรายปนกรวดมีเม็ดละเอียดปนบ้าง หรือไม่มีเลย	เสถียรมากใช้ทำส่วนที่ให้น้ำซึมผ่านได้แต่จะต้องป้องกันความลาดของเขื่อน	ดี	ใช้ลูมดินปลายเขื่อนด้านเหนือน้ำและปลายลาดเขื่อนด้านใต้น้ำ	ไม่ดี
SP	ทรายเม็ดขนาดเดียวกัน ทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	เสถียรมากใช้สำหรับเขื่อนที่มีความลาดไม่มากนัก	ดีไม่ขึ้นกับความหนาแน่น	ใช้ลูมดินปลายเขื่อนด้านเหนือน้ำและปลายลาดเขื่อนด้านใต้น้ำ	ไม่ดีหรือไม่เหมาะ
SM	ทรายปนดะกอนทราย ทรายปนดะกอนทรายมีเม็ดขนาดเดียวกัน	ค่อนข้างเสถียรไม่ค่อยเหมาะกับส่วนที่น้ำซึมได้ใช้ทำแกนกันน้ำซึม	ดีไม่ขึ้นกับความหนาแน่น	ใช้ลูมดินปลายเขื่อนด้านเหนือน้ำและปลายลาดเขื่อนด้านใต้น้ำ	ไม่ดี
SC	ทรายปนดินเหนียว,ของผสมของทรายกับดินเหนียวมีขนาดเดียวกัน	ค่อนข้างเสถียรใช้ทำแกนสำหรับเขื่อนกันน้ำท่วม	อาจดีหรือเลว	ไม่จำเป็น	ไม่เหมาะสม
ML	ดะกอนทรายอนินทรีย์,ทรายละเอียดมาก,หินฝุ่น,ทรายละเอียดปนดะกอนทรายหรือดินเหนียวมีสภาพพลาสติกน็กน้อย	เสถียรภาพไม่ดีใช้เป็นดินถมถ้าปรับได้ถูกต้อง	เลวมาก อาจเกิดการเลื่อนตัว	ใช้สำหรับปลายลาดเขื่อนด้านใต้น้ำบางครั้งก็ไม่จำเป็น	ไม่เหมาะสม
CL	ดินเหนียวอนินทรีย์มีสภาพพลาสติกต่ำกว่าปกติ ดินเหนียวปนกรวด หรือปนทรายหรือปนดะกอนทราย ดินเหนียวมีความหนืดเล็กน้อย	เสถียรเหมาะสำหรับทำแกนกันน้ำซึม	อาจดีหรือเลว	ไม่จำเป็น	ไม่เหมาะสม
OL	ดะกอนทรายอินทรีย์มีสภาพพลาสติกเล็กน้อย และดินเหนียวปนดะกอนทราย	ไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นดินถม	อาจดีหรือเลวอาจเกิดการทรุดตัวมาก	ไม่จำเป็น	ไม่เหมาะสม
MH	ดะกอนอนินทรีย์ดินเหนียวปนทรายหรือดะกอนทรายมีไมกาหรือดินเบาผสม	ขาดเสถียรภาพใช้ทำแกนโดยวิธีชลศาสตร์ไม่เหมาะที่จะใช้รถบด	ต่ำ	ไม่จำเป็น	ไม่เหมาะสม
CH	ดินเหนียวอนินทรีย์มีสภาพพลาสติกมาก ดินเหนียวมีความเหนียวสูง	ค่อนข้างเสถียรภาพสำหรับความลาดไม่มากนักใช้ทำแกนเขื่อน	อาจดีหรือเลว	ไม่จำเป็น	ไม่เหมาะสม
OH	ดินเหนียวอินทรีย์มีสภาพพลาสติกสูงกว่าปกติ ดะกอนทรายอนินทรีย์	ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นดินถม	ต่ำมาก	ไม่จำเป็น	ไม่เหมาะสม
Pt	พีตและดินอินทรีย์สูงอื่นๆ	ไม่ใช้ในงานก่อสร้าง	เอาออกจากดินฐานรากและไม่นำมาใช้		ไม่เหมาะสม



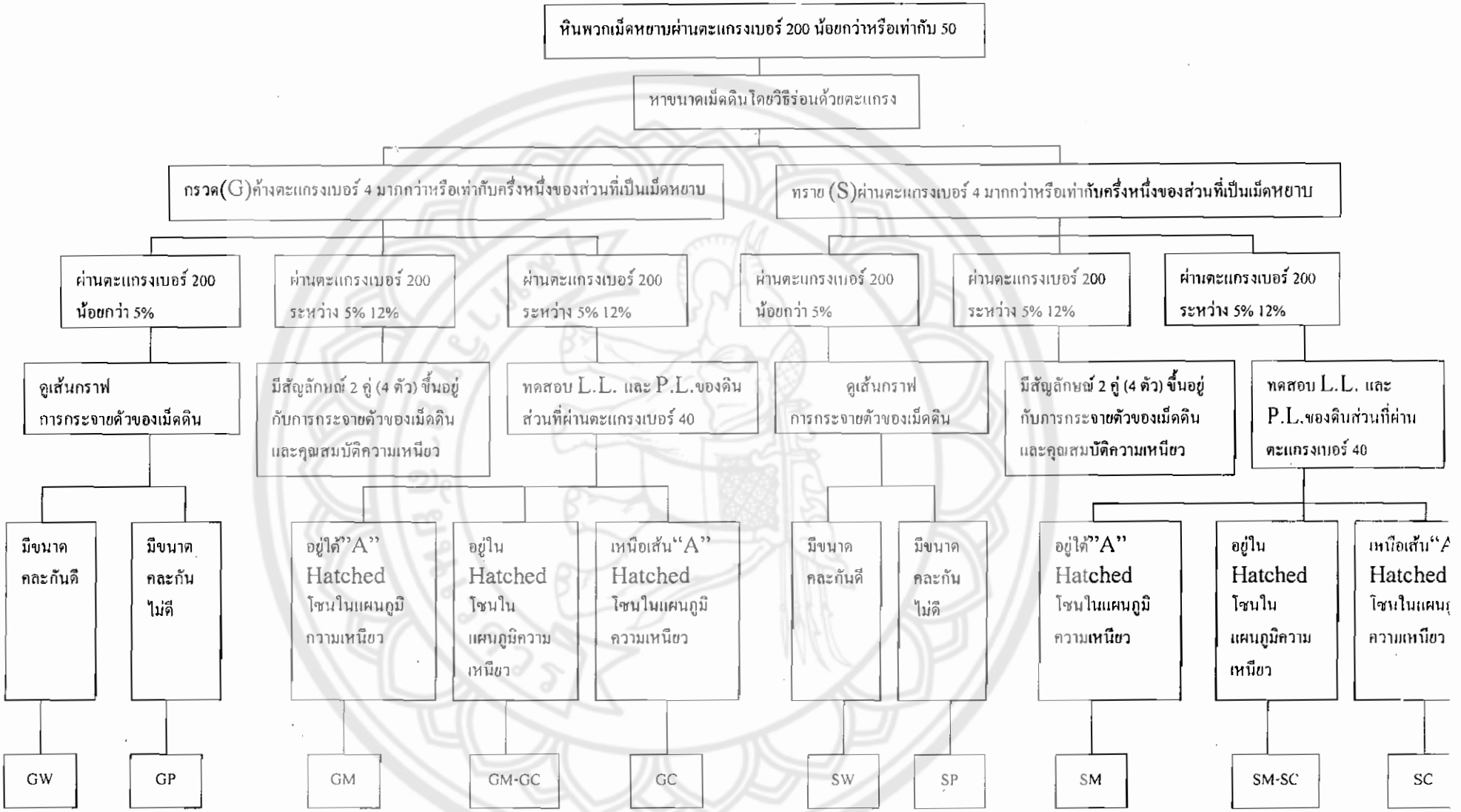
รูปที่ 2.16 แผนภูมิแสดงการจำแนกดินระบบ USCS ขั้นที่ 1

ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร



รูปที่ 2.17 แผนภูมิแสดงการจำแนกดินระบบ USCS ขั้นที่ 2

ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร



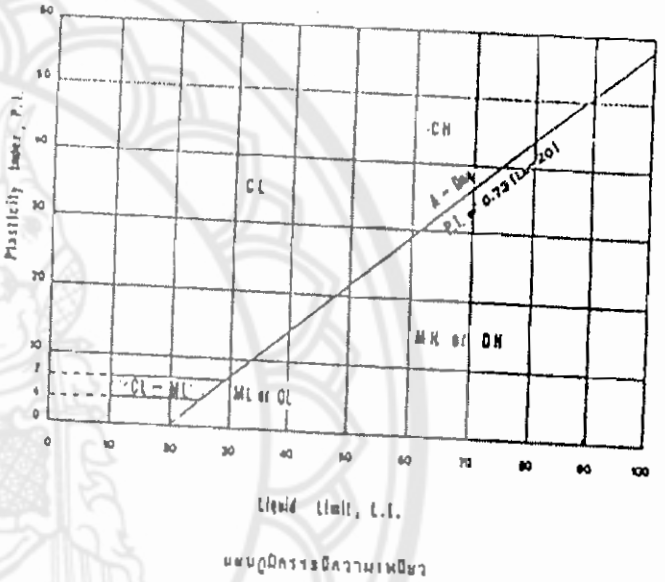
รูปที่ 2.18 แผนภูมิแสดงการจำแนกดินระบบ USCS ขั้นที่ 3

ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

การจำแนกประเภททั่วไป			สัญลักษณ์ กลุ่ม	ชื่อกลุ่มดิน	เกณฑ์การจำแนกประเภท		
ดินพวกเม็ดหยาบ ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 %	กรวด ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของส่วนที่เป็นเม็ดหยาบ	กรวดสะอาด (มีเม็ดละเอียดปนอยู่บ้างหรือไม่มีเลย)	GW	กรวดมีขนาดคละกันดี กรวดสะสมทราย มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย	การจำแนกประเภทโดยอาศัยเปอร์เซ็นต์ของเม็ดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5 % : GW , GP , SW , SP ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 12 % : GH , GC , SW , SC ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่าง 5 – 12 % : ตามเกี่ยวกัน ใช้สัญลักษณ์ 2 คู่ (4ตัว)	$Cu = D_{60} / D_{10}$ มากกว่า 4 $Cc = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60}$ อยู่ระหว่าง 1 - 3	
			GP	กรวดมีขนาดคละกันไม่ดี กรวดผสมทราย มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย		ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท GW	
		กรวดมีเม็ดละเอียดปน (มีเม็ดละเอียดปนอยู่บ้างหรือไม่มีเลย)	GM	กรวดมีตะกอนทรายปน กรวด– ทราย - ตะกอนผสมกัน		Atterburg limit อยู่ใต้เส้น A หรือ P.I. น้อยกว่า 4	Atterburg limit อยู่ใน Hatched โซน ถือว่าคาบเกี่ยวกันใช้สัญลักษณ์ 2 คู่
			GC	กรวดมีดินเหนียวปน กรวด– ทราย - ตะกอนผสมกัน		Atterburg limit อยู่เหนือเส้น A หรือ P.I. มากกว่า 7	
	ทราย ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าครึ่งหนึ่งของส่วนที่เป็นเม็ดหยาบ	ทรายสะอาด (มีเม็ดละเอียดปนอยู่บ้างหรือไม่มีเลย)	SW	ทรายมีขนาดคละกันดี ทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย		$Cu = D_{60} / D_{10}$ มากกว่า 6 $Cc = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60}$ อยู่ระหว่าง 1 - 3	
			SP	ทรายมีขนาดคละกันไม่ดี ทรายปนกรวด มีเม็ดละเอียดปนบ้างหรือไม่มีเลย		ไม่เข้าเกณฑ์ประเภท SW	
		ทรายมีเม็ดละเอียดปน	SM	ทรายมีตะกอนทรายปน ทราย - ตะกอนทรายผสมกัน		Atterburg limit อยู่ใต้เส้น A หรือ P.I. น้อยกว่า 4	Atterburg limit อยู่ใน Hatched โซน ถือว่าคาบเกี่ยวกันใช้สัญลักษณ์ 2 คู่
			SC	ทรายมีดินเหนียวปน ทราย - ดินเหนียวผสมกัน		Atterburg limit อยู่เหนือเส้น A หรือ P.I. มากกว่า 7	

รูปที่ 2.19 การจำแนกประเภทของดินตามระบบ USCS

ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

การจำแนกประเภททั่วไป		สัญลักษณ์	ชื่อกลุ่มดิน	เกณฑ์การจำแนกประเภท
ดินพวกที่มีละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 50 %	ตะกอนทรายและดินเหนียว L.L. น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50	ML	ตะกอนทรายอนินทรีย์และทรายละเอียดมาก ทรายละเอียดปนตะกอนทรายหรือดินเหนียวมีความเหนียวเล็กน้อย	
		CL	ดินเหนียวอนินทรีย์มีความเหนียว ดินเหนียวบนกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวบนตะกอนทราย ดินเหนียวด้าน	
		OL	ตะกอนทรายอินทรีย์และดินเหนียว ปนตะกอนทรายอนินทรีย์ มีความเหนียวต่ำ	
	ตะกอนทรายและดินเหนียว L.L. มากกว่า 50	MH	ตะกอนทรายอนินทรีย์ ทรายละเอียด หรือตะกอนทรายปนดินเนา ตะกอนทรายมีความยืดยุ่น	
		CH	ดินเหนียวอนินทรีย์ มีความเหนียวสูงดินเหนียวมีความหนืดสูง	
		OH	ดินเหนียวอินทรีย์ มีความเหนียวปานกลางถึงสูง ตะกอนทรายอินทรีย์	
ดินพวกสารอินทรีย์สูง		PL	ดินโคลนสีดำ และดินอินทรีย์สูง	แยกได้โดย สี กลิ่น การสัมผัสและลักษณะเนื้อ

รูปที่ 2.20 รายละเอียดการจำแนกประเภทของดินตามระบบ USCS

ที่มา ปฐพีกลศาสตร์ ศาสตราจารย์ ดร.วินิต ช่อวิเชียร

จ. การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดิน (Water Content)

ความชื้นในมวลดิน(Water Content , ω) เป็นคุณสมบัติของดินมักใช้บ่อยสุดและมีประโยชน์มากเนื่องจากเมื่อปริมาณเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ไปซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดด้วย อัตราส่วนของน้ำหนักต่อน้ำหนักตินแห้ง ดินประเภท Sedimentation clay นั้น จะมีความชื้นในมวลดินที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ในการหาตัวอย่างตัวแทน (Representative Specimen) เพื่อนำมาหาความชื้นมวลดินนั้น จำเป็นต้องเลือกดินที่นำมาให้ความชื้นในมวลดินขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณที่มีอยู่ ซึ่งถ้ามีปริมาณดินมากยิ่งทำให้ค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้นและถ้าจำเป็นต้องทำการชั่งวัดน้ำหนักดินอย่างรวดเร็ว เพื่อให้เกิดการสูญเสียน้ำน้อยที่สุด ภาชนะที่บรรจุที่ใช้ควรมีน้ำหนักที่เหมาะสมกับดิน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ควรอยู่ที่ 105°C หรือ 110°C โดยปกติมักอบตัวอย่างดินตลอดทั้งคืน ถึงแม้ว่าเวลาในการอบแห้งดินนั้นขึ้นอยู่กับชนิด จำนวน และรูปร่างของดิน เช่น ทราย 2-3 กรัมสามารถอบแห้งเป็นเวลา 1.00 ชั่วโมง การบอกความชื้นในมวลดินมักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการ

$$\omega = (W_1 - W_2) / (W_2 - W_0) * 100$$

W_1 = น้ำหนักของภาชนะบรรจุรวมกับน้ำหนักดินที่มีความชื้น
W_2 = น้ำหนักของภาชนะบรรจุรวมกับน้ำหนักดินอบแห้ง
W_0 = น้ำหนักของภาชนะบรรจุ

2.4 <u>ทฤษฎีการบดอัดดิน</u> (อ้างอิงมาจาก ปฐพีกลศาสตร์ วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา)

ดินเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้เป็นฐานรากหรือวัสดุในการก่อสร้างได้ถ้าหากมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสม เช่น ดินสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างถนน เขื่อนดิน เป็นต้น การบดอัดตินเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินโดยใช้พลังงานกลทำให้อนุภาคเม็ดดินถูกจัดเรียงตัวอยู่ในสภาวะที่แน่นขึ้นและเคลื่อนเข้ามาใกล้กันมากขึ้น หรือเป็นการลดช่องว่างอากาศนั่นเอง ดินจะมีความหนาแน่นแห้งหรือหน่วยน้ำหนักแห้งสูงขึ้นดินจะมีคุณสมบัติด้านวิศวกรรมดีขึ้น ได้แก่ กำลังเฉือนเพิ่มขึ้น การทรุดตัวลดลง และความซึมน้ำของดินลดลง การบดอัดดินในภาคสนามสำหรับดินเหนียวใช้วิธีการบดทับ (Rolling) ส่วนดินเม็ดหยาบจะใช้วิธีสั่นสะเทือน(Vibration) จะให้ผลดีที่สุด

ก. หลักการในการบดอัดดิน(อ้างอิงมาจาก ปฐพีกลศาสตร์ วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา)

การบดอัดดินเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติด้านวิศวกรรมดีขึ้น จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นแห้งหรือหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน ดินที่มีความหนาแน่นแห้งที่สูงขึ้นก็จะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น โดยปกติการบดอัดดินจะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดิน พลังงานในการบดอัดและลักษณะของดิน การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินหรือพลังงานในการบดอัดจะมีผลเปลี่ยนแปลงต่อความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด เส้นกราฟการบดอัด(Compaction Curve) จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูประฆังคว่ำ(Hyperbolic Curve) จุดสูงสุดของกราฟเรียกว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดหรือหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด(Maximum Dry Density หรือ Maximum Dry Unit Weight) ปริมาณน้ำในการบดอัดที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงที่สุดเรียกว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมหรือปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Water Content หรือ Optimum Moisture Content)

ดินในสภาวะแห้ง อากาศจะมีน้ำเคลือบผิวเม็ดดินเป็นลักษณะฟิล์มบางๆ เมื่อเติมน้ำลงในดินเล็กน้อยเพื่อการบดอัด ดินยังคงมีสภาพแข็ง(stiff) ไม่สามารถทำให้เม็ดดินเคลื่อนที่เข้าหากันได้มากนัก จนกระทั่งเมื่อปริมาณน้ำที่เพิ่มเข้าใกล้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม น้ำในดินจะหล่อลื่นทำให้เม็ดดินสามารถเคลื่อนเข้าใกล้กันมากขึ้นเมื่อบดอัด ซึ่งมีผลทำให้ปริมาตรของดินลดลง ความหนาแน่นแห้งของดินจึงสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณน้ำในดินที่สูงเกินปริมาณน้ำที่เหมาะสม น้ำจะเข้าไปแทนที่เม็ดดินทำให้เม็ดดินอยู่ห่างกันมากขึ้น ปริมาตรดินเพิ่มขึ้นความหนาแน่นแห้งจึงลดลง

การคำนวณการบดอัดดินจำเป็นต้องทราบความหนาแน่นแห้งของดินในการบดอัด ซึ่งโดยทั่วไปจะหาจากความหนาแน่นรวมของดิน ซึ่งความหนาแน่นรวมสัมพันธ์กับความหนาแน่นแห้งของดิน ดังนี้

สูตร $$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+V_w}$$

เมื่อ γ_d = ความหนาแน่นแห้งของดิน

γ_t = ความหนาแน่นรวมของดิน

V_w = ปริมาณน้ำในดิน

ข. การทดลองบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ(อ้างอิงมาจาก ปฐพีกลศาสตร์ วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา)

การบดอัดดินแต่ละชนิดให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณน้ำที่เหมาะสมไม่เท่ากัน ขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัด การบดอัดในห้องทดลองจะใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการบดอัดในภาคสนาม โดยมีอยู่ 2 มาตรฐานที่เป็นที่นิยมใช้กัน คือการบดอัดแบบมาตรฐาน(Standard Procter Test) และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน(Modified Procter Test) ซึ่งทั้งสองวิธีใช้พลังงานในการบดอัดดินไม่เท่ากัน จึงนำไปใช้ประโยชน์สำหรับงานต่างประเภทกัน โดยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานใช้พลังงานในการบดอัดสูงกว่าจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการความแข็งแรงหรือต้องการรับน้ำหนักมากๆ เช่น งานบดอัดวัสดุพื้นทางหรือรองพื้นทางสำหรับรันเวย์ของสนามบิน เป็นต้น ส่วนการบดอัดแบบมาตรฐานเหมาะสำหรับงานก่อสร้างที่รับน้ำหนักที่ไม่มากนัก เช่น งานบดอัดวัสดุสำหรับถนนทั่วๆไป เป็นต้น

2.5 <u>ทฤษฎีคอนกรีตบดอัด</u> (อ้างอิงมาจาก สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย)

การผสมผสานวิศวกรรมงานดิน กับวิศวกรรมงานคอนกรีตเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดการพัฒนา เทคโนโลยีของคอนกรีตจากเหลวมาเป็นแห้งจนไม่มีค่ายุบตัว (No Slump) ทำให้สามารถบดทับได้เหมือนบดทับดิน

ในวิศวกรรมงานดินนั้น การออกแบบส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความชื้นกับความแน่น (Moisture-Density) ความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับปริมาณของความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture) กับการบดอัด ถ้าการบดอัดกระทำ ณ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ก็จะทำให้ความแน่นขณะแห้ง (Dry Density) มีค่าสูง ซึ่งจะทำให้ Compressive Strength at 7 days สูงขึ้นด้วย ตามหลักการ Zero-Air-Void ของวิศวกรรมงานดิน

ส่วนวิศวกรรมงานคอนกรีตนั้น ความแข็งแรง (Compressive Strength) จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (Water-Cement Ratio) คือ เมื่อซีเมนต์มีปริมาณมาก จะทำให้ความสามารถในการรับกำลังมีค่าสูง และโดยเฉพาะที่ปริมาณที่ซีเมนต์คงที่ ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้น้ำน้อยลง จะทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น

การผสมผสานหลักการด้านวิศวกรรมงานดิน และงานคอนกรีตเข้าด้วยกันโดยวิธี No-Slump- Zero-Air-Void-Concrete คือ พัฒนาคอนกรีตใช้ปริมาณน้ำน้อย แล้วบดทับจนไม่มีช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ จะทำให้ได้คอนกรีตบดอัดที่มี Compressive Strength สูง โดยจากการทดลองในห้องปฏิบัติการในประเทศญี่ปุ่น พบว่า RCC ที่ใช้น้ำในการผสมน้อยในปริมาณประมาณ 90 กก. ต่อ ลบ.ม. จะทำให้ได้ RCC ที่มี Compressive Strength สูงที่สุด

2.6 <u>ลักษณะทั่วไปของคอนกรีตบดอัด</u> (อ้างอิงมาจาก เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก)

แนวคิดการใช้คอนกรีตบดอัดเป็นการประสานวิชาการทางด้านคอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology) และวิศวกรรมปฐพีกลศาสตร์ (Soils Engineering) เข้าด้วยกัน โดยเปลี่ยนสถานะคอนกรีตจากสภาพคอนกรีตเหลว (ลดปริมาณน้ำ) มาเป็นแห้งและบดอัดแบบสั่นสามารถ ซึ่งทำงานได้รวดเร็วขึ้น และได้นำเถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite Fly Ash) มาทดแทนปูนซีเมนต์ทำให้ลดค่าใช้จ่ายและลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีต ทำให้การเทคอนกรีตไหลลื่น (Workability) ดีขึ้นและการเพิ่มกำลัง (Strength)

คอนกรีตบดอัดมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญบางประการที่ต่างจากคอนกรีตปกติทั่วไป (Conventional Concrete) ส่วนผสมของคอนกรีตบดอัดจะมีสารเชื่อมประสาน (Cementitious Material) ในปริมาณที่ต่ำกว่าที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตปกติซึ่งจะมีปริมาณซีเมนต์สูงกว่า 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรคอนกรีต

คอนกรีตบดอัดที่ผสมเสร็จใหม่ๆจะมีสภาพแห้งมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา ค่าการยุบตัว (Slump test) จะได้เท่ากับศูนย์ (No Slump Concrete) สาเหตุที่ต้องผสมคอนกรีตแห้งๆเพื่อให้ได้เนื้อวัสดุมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักของเครื่องจักรบดอัดโดยไม่ทำให้เครื่องจักรจมลงขณะทำการบดอัด

การใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อสารเชื่อมประสานในปริมาณที่ต่ำจะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย โดยวัสดุผสมต้องไม่แห้งเกินไป ถ้าวัสดุผสมแห้งเกินไปส่งผลให้การบดอัดคอนกรีตได้เนื้อแน่นสม่ำเสมอกระทำได้ยากและด้อยคุณภาพ ลักษณะของเนื้อคอนกรีตสดใน

ขณะที่ผสมใหม่ๆจะมีสภาพเปียกชื้นหมาดๆคล้ายหินคลุกที่ผสมน้ำและคลุกเคล้าด้วยกันจนสม่ำเสมอก่อนการบดอัด

การทำให้คอนกรีตบดอัดมีเนื้อแน่นพิจารณาโดยใช้พลังงานจากการบดอัดเป็นหลักเหมือนการบดอัดดินโดยทั่วไปและใช้ความสั่นสะเทือนเข้ามาช่วยด้วยในบางจังหวะจะทำให้คอนกรีตสดสามารถอัดตัวกันจนมีเนื้อแน่นในเวลาอันสั้น ดังนั้นอุปกรณ์หลักโดยทั่วไปที่ควรใช้ในการบดอัดคือ รถบดล้อเหล็กชนิดที่สามารถปรับเลือกใช้ความสั่นสะเทือนได้ (Vibratory Roller)

2.6.1 การจำแนกกลุ่มของคอนกรีตบดอัด (RCC)

การจำแนกกลุ่มของ RCC จะแบ่งตามปริมาณสารเชื่อมประสานใน RCC 1 ลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้เพื่อจะได้สัมพันธ์กับคุณสมบัติความสามารถทึบน้ำ และค่าความแข็งแรงต้านแรงเฉือน(Shear Strength) ของ RCC ดังนี้

1) RCC ใช้สารเชื่อมประสานน้อย (Low Cementitious Content,LCC) หรือ Lean RCC เป็น RCC ที่ใช้สารเชื่อมประสานรวมไม่เกิน 100 กิโลกรัม ต่อ RCC 1 ลูกบาศก์เมตร

2) RCC ใช้สารเชื่อมประสานปานกลาง (Medium Cementitious Content,MCC)เป็น RCC ที่ใช้สารเชื่อมประสานรวมไม่เกิน 100 กก. ถึง 150 กิโลกรัม ต่อ RCC 1ลูกบาศก์เมตร

3) RCC ใช้สารเชื่อมประสานสูงมาก (High Cementitious Content,HCC) เป็น RCC ที่ใช้สารเชื่อมประสานมากกว่า 150 กิโลกรัม ต่อ RCC 1 ลูกบาศก์เมตร

2.7 เทคนิคและเครื่องจักรกลงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด (กรณีศึกษาเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก , อ้างอิงจาก กรมชลประทาน)

วงการการก่อสร้างในปัจจุบันได้ให้ความสนใจกับความทนทานของคอนกรีตมากขึ้น แทนที่จะสนใจแต่กำลังของคอนกรีต เพียงอย่างเดียวเป็นสำคัญ เช่นที่ผ่านมา คอนกรีตที่มีกำลังเพียงพอสำหรับใช้งานได้ แต่มีอายุการใช้งานที่ยืนยาว จะเป็นคอนกรีต ที่พึงประสงค์มากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูงแต่เสื่อมสภาพลงไปมากมายในเวลาเพียงไม่กี่ปี

2.7.1 ปัจจัยที่จะช่วยให้คอนกรีต เพิ่มความทนทานต่อการกร่อนทำลายของสิ่งแวดล้อม มีดังนี้

1) การใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานที่ต่ำ จะช่วยลดโพรงในคอนกรีตลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น และมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น

2) ใช้วัสดุ Pozzolan เช่น Silica Fume, GGBS หรือ เถ้าลอยไนต์ ผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีตในปริมาณที่เหมาะสมกับปัญหาของสภาพใช้งาน เพื่อลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ อิสระในโพรงคอนกรีตให้เหลือน้อยลง เสริมความแข็งแรงในระยะยาว และเพิ่มความทึบน้ำของคอนกรีตให้สูงขึ้น

3) ปรับส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสม ประกอบกับใช้การจี้เขย่าเท่าที่จำเป็นอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อทำให้เนื้อคอนกรีตสด อัดตัวกัน ได้แน่น และไม่เกิดการแยกตัวของหินย่อยออกจากมวลคอนกรีต

4) บ่มคอนกรีตอย่างเพียงพอ เพื่อให้ปฏิกิริยา Hydration เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีต พัฒนากำลัง และความทึบน้ำขึ้น

5) ใช้ระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เพียงพอ และเหมาะสมกับสภาพการใช้งานวัตถุประสงค์หลักของการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีดบดอัดแน่นก็คือ การย่นระยะเวลาการทำงาน ขอยกตัวอย่างเช่น การก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตธรรมดา (Conventional Concrete) จะต้องให้ระยะเวลาในการเทคอนคอนกรีตได้ในแต่ละครั้งหนึ่งคือ ได้ครั้งละ 1000 ลูกบาศก์เมตรต่อสัปดาห์ (ตั้งแบบและผูกเหล็ก) แต่หากใช้ RCC จะได้ครั้งละ 10000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นแรมเดือน

2.7.2 การเตรียมการและการผสมคอนกรีต

A. ในขั้นต้นจะคัดเลือกเถ้าลอยที่เหมาะสมโดยการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย เพื่อควบคุมปริมาณ SO_2 ไม่ให้เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก การตรวจสอบจะกระทำโดยสุ่มเก็บตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์วันละ 2 ครั้งในช่วงเช้าและช่วงบ่าย ซึ่งผลการทดสอบจะทราบได้ภายในเวลาไม่เกิน 2 ชั่งโมง เถ้าลอยที่ผ่านเกณฑ์คัดเลือกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 9 และ 10 จะถูกบรรจุลงในถุงขนาดความจุ 800 กิโลกรัม

การขนส่งจะขนส่งจากลำปางในปริมาณวันละ 100 ตัน โดยใช้รถบรรทุกชนิดมีรถพ่วงเมื่อถึงหัวงานก่อสร้าง เถ้าลอยจะถูกเก็บรักษาไว้ในโรงเก็บซีเมนต์ ซึ่งมีความจุประมาณ 700 ตัน เถ้าลอยและซีเมนต์ในโรงเก็บจะถูกเป่าส่งแยกกัน ขึ้นไปเก็บไว้บนถังบรรจุ (Silo) ขนาดความจุ 100 ตัน อย่างละถัง

B. การผสมคอนกรีต การผสมคอนกรีตสดสำหรับงานคอนกรีตบดอัด จะกระทำที่โรงผสมคอนกรีตที่กำลังผลิดประมาณ 800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยจะควบคุมให้อุณหภูมิขณะผสมเสร็จไม่เกิน 25 องศาเซลเซียส และจะมีการลำเลียงกรวดทรายบนสายพานลำเลียงเข้าสู่โม่ผสมคอนกรีต คอนกรีตสดที่จะขนส่งไปใช้งานจะต้องมีคุณสมบัติพอเหมาะต่อการบดอัด ทั้งนี้โดยควบคุมความสามารถในการทำงานบดอัด ของคอนกรีตสดก่อนส่งไปใช้งานด้วยการตรวจค่า Loaded VeBe Time ของคอนกรีตสดให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตลอดเวลา

2.7.3 การขนส่ง การเท และการปู

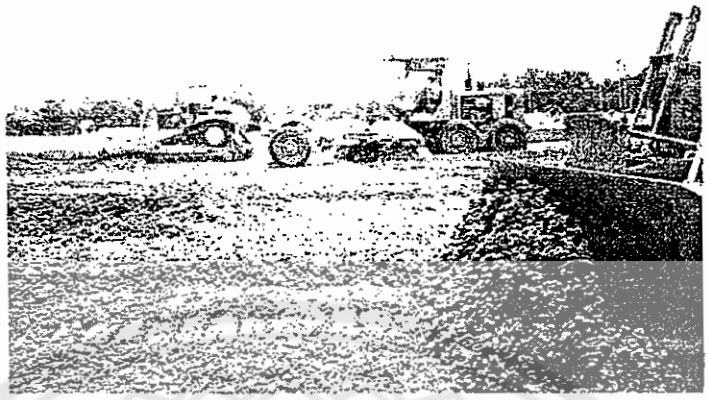
A. การขนส่ง (Transportation) คอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วจากโรงผสมคอนกรีตจะถูกลำเลียงโดยสายพาน (Conveyor) ไปยังโรงปล่อยคอนกรีตซึ่งมีรถบรรทุกเทท้ายมารอรับคอนกรีตไปยังบริเวณก่อสร้างเขื่อน คอนกรีดที่มีสภาพความชื้นที่เหมาะสมจะถูกเทลงในบริเวณที่ต้องการซึ่งจะไม่มีการวิ่งทับคอนกรีตที่บดอัด

ในกรณีที่ใช้รถบรรทุกในช่วงสุดท้ายก่อนที่จะถึงบริเวณการทำงานจะต้องปูผิวทางด้วยหินใหญ่ (Large Aggregate) หรือวัสดุที่สะอาดพอที่จะป้องกันไม่ให้มีสิ่งสกปรกติดล้อยางที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวหน้าของคอนกรีตบดอัด

รูปที่ 2.21 สายพานลำเลียงวัสดุผสม
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

B. การเทและการปู (Placing and Spreading) การปูคอนกรีต จะทำโดยรถแทรกเตอร์โดยการเดินของรถจะเดินบนคอนกรีตที่ยังไม่ได้รับการบดอัดรวมทั้งการหมุนตัว หรือการตะกุยจะทำได้เฉพาะบนคอนกรีต ที่ยังไม่ได้บดอัดเท่านั้น รถเกลี่ยดิน (Mortar Grader) จะไม่ใช้ในบริเวณคอนกรีตที่มีการบดอัดแล้วและชั้นความหนาของการบดอัดประมาณ 35 เซนติเมตร อุณหภูมิของคอนกรีตก่อนทำการเทจะต้องน้อยกว่า 25 องศาเซลเซียส ในทุกกรณี

รูปที่ 2.22 การเทคอนกรีตบดอัด
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก



รูปที่ 2.23 การเกลี่ยคอนกรีตบดอัด

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

2.7.4 การบดอัด(Compaction)

การบดอัดกระทำเมื่อใช้รถ Bulldozer ไถเกลี่ยคอนกรีตแห้งให้ได้ชั้นความหนาประมาณ 35 เซนติเมตร ก่อนการบดอัด แล้วใช้รถบดอัดล้อเหล็กชนิดมีความสั่นสะเทือน (Vibratory Roller) ขนาดหนัก 10 ตัน บดอัดประมาณ 6 เที่ยว แต่การบดอัดในบริเวณที่แคบๆ จะใช้รถบดอัดขนาดเล็กชนิดมีความสั่นสะเทือน (Vibratory Roller) หนัก 1.5 ตัน บดอัดประมาณ 12 เที่ยวแทน

ส่วนที่ประชิดกับผนังกั้นแบบ ซึ่งไม่สามารถใช้เครื่องจักรบดอัดต่อไปด้วยเครื่องจักรได้อีก แล้วจะเว้นเป็นร่องประชิดกับผนังดังกล่าว เป็นแถบกว้างประมาณ 0.8 ถึง 1.0 เมตร และใช้วิธีเทคอนกรีตเหลว ตามวิธีการเทคอนกรีตปกติเพื่อเชื่อมต่อเนื้อคอนกรีตปกติกับเนื้อคอนกรีตบดอัดเข้าด้วยกัน

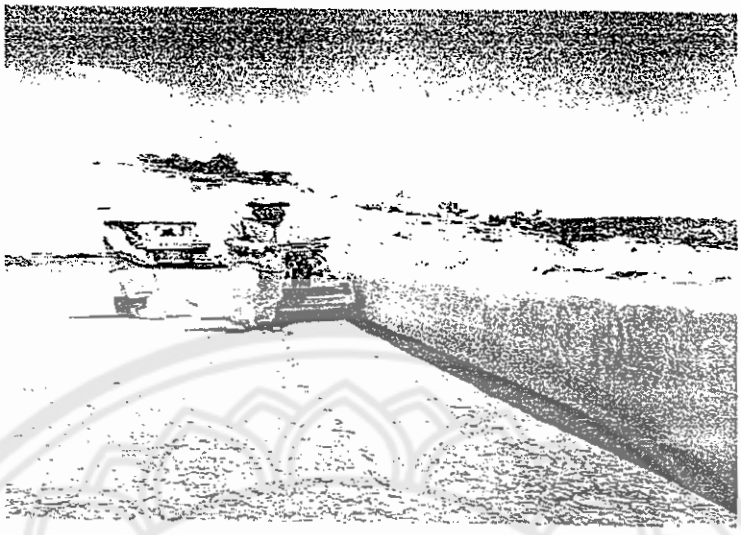
คอนกรีตเหลวที่ใช้งานลักษณะนี้เป็นคอนกรีตที่ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป โดยมีส่วนผสมของซีเมนต์ 250 ถึง 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต และต้องมีกำลังต้านรับแรงกดแกนเดียวของแท่งตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การบดอัดจะกระทำต่อเนื่องกันเป็นชั้นๆ โดยแต่ละชั้นจะมีความหนาหลังการบดอัดประมาณ 30 เซนติเมตร หลังจากนั้นจะฉีดน้ำบ่มชื้นในบริเวณที่บดอัดแล้วเสร็จ ในขณะรอเวลาก่อนบดอัดชั้นต่อไป ระยะเวลาเมื่อเริ่มผสมคอนกรีตจนกระทั่งบดอัดแล้วเสร็จได้ ควบคุมไว้ไม่เกิน 1 ชั่วโมง 30 นาที งานบดอัดจะดำเนินต่อเนื่องกันไป การบดอัดจะต้องเร่งดำเนินการภายใน 15 นาที หลังจากทำการปูคอนกรีดแล้วเสร็จ และภายในหนึ่งชั่วโมง หลังจากผสมคอนกรีดแล้ว

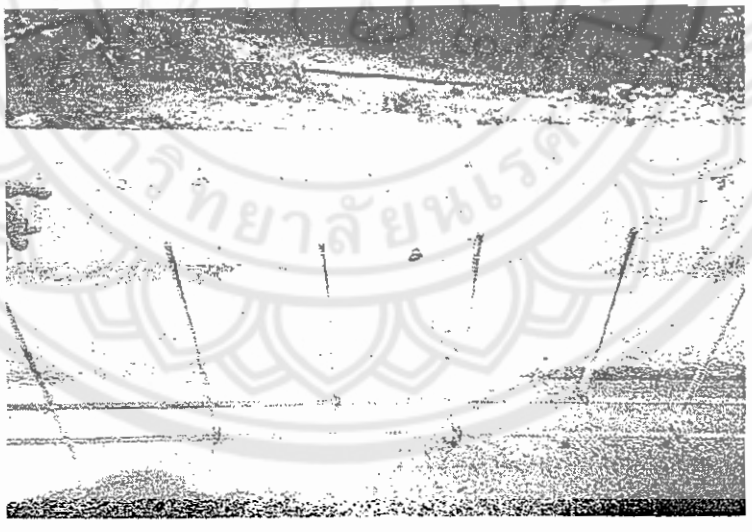
หนึ่งรอบของการบดอัด คือการเดินทางเดียวของรถบดอัด จำนวนรอบของการบดอัดจะกำหนดระหว่างการทำ Suitability Test โดยจำนวนรอบนี้สามารถปรับได้จากผลของการทดสอบความหนาแน่นโดย Nuclear Density Measurement การบดอัด RCC ให้รอบที่ 1 จะต้องไม่บดอัดด้วยการสั่นสะเทือน

รูปที่ 2.24 การบดอัดคอนกรีต

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก



รูปที่ 2.25 ส่วนที่ประชิดกับผนังกั้นแบบ
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก



รูปที่ 2.26 แสดงส่วนประชิดผนังกั้น
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

2.7.5 การทำรอยต่อในงานก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน

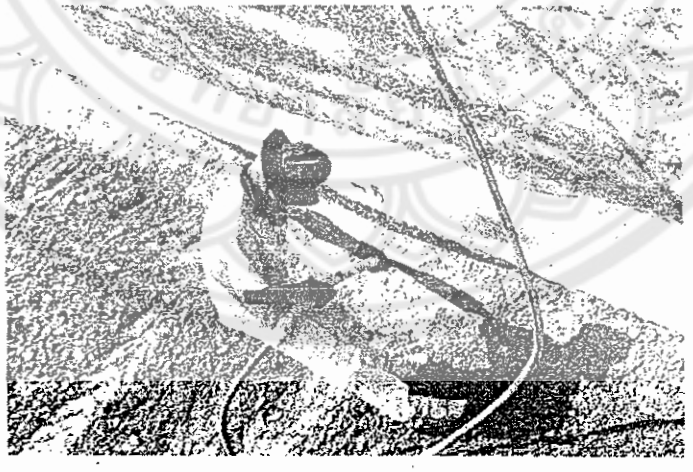
A. รอยต่อในงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด

1) รอยต่อเชื่อมแนวนอน (Horizontal Joints)

2)รอยต่อเชื่อมแนวตัดขวางของตัวเขื่อน (Transverse Joints)

รูปที่ 2.27 แสดงรอยต่อเชื่อมแนวนอน

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก



รูปที่ 2.28 แสดงรอยต่อเชื่อมแนวตัดขวาง

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

B. การปฏิบัติต่อผิวรอยต่อของเขื่อนคอนกรีตบดอัด

1) การปฏิบัติต่อผิวรอยต่อเชื่อมแนวนอน (Horizontal Joints) ระหว่างชั้นของการบดอัดคอนกรีตจะกระทำได้หลายวิธีตามเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ลักษณะการปฏิบัติต่อผิวรอยต่อเชื่อมแนวนอนในงานคอนกรีตบดอัด
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

ลักษณะรอยต่อเชื่อม	เวลาที่นับจากการผสมคอนกรีตเสร็จ	ลักษณะการปฏิบัติต่อผิวรอยต่อเชื่อมแนวนอนในงานคอนกรีตบดอัดในโครงการเขื่อนคลองท่าด่าน
Fresh	น้อยกว่า 24 ชั่วโมง	เก็บเศษกรวดและซับน้ำออก
Prepared	ระหว่าง 24-48ชั่วโมง	ล้างผิวหน้าโดยการฉีดน้ำความดันต่ำจนเห็นกรวด
Cold	มากกว่า 48 ชั่วโมง	ล้างผิวหน้าโดยการฉีดน้ำความดันต่ำจนเห็นกรวด หรือเม็ดหิน หลังจากการนั้นเทคอนกรีตปกติซึ่งมีหินใหญ่ไม่เกิน 12.5 มิลลิเมตร หนา 2 เซนติเมตร ลงไปบนรอยต่อเชื่อมก่อนการเทคอนกรีตบดอัด (RCC) ปูแผ่ทับลงไป

รูปที่ 2.29 แสดงการต่อรอยต่อเชื่อมในแนวนอน
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

2) การสร้างรอยต่อเชื่อมตามแนวตัดขวาง (Transverse Joints) ของเขื่อน เผื่อคอนกรีตหดตัว จะสร้างทุกระยะห่างกันประมาณ 40 เมตร โดยมีแผ่นยางกันน้ำ (Rubber Waterstop) กั้นยาวในแนวดิ่งตลอดรอยต่อใกล้ผิวหน้าเขื่อนด้านเหนือน้ำ ซึ่งสร้างขึ้นไว้เป็นรอยต่อเชื่อมเผื่อการหดตัว เพื่อนำร่องให้เกิดรอยแยก (Crack Inducers) ขึ้นในเนื้อคอนกรีตบดอัด อย่างเป็นระเบียบและอยู่ในระนาบเดียวกัน

2.7.6 สลิปท์ฟอร์มในงานเขื่อนคอนกรีตบดอัด

สลิปท์ฟอร์มในงานเขื่อนคอนกรีตบดอัด จะหล่อขึ้นโดยวิธีการของคอนกรีตธรรมดา (Conventional Concrete) ซึ่งใช้วิธีการเทคอนกรีดเหลว คอนกรีตเหลวที่ใช้ในงานทำ สลิปท์ฟอร์มเป็นคอนกรีตที่ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไปซึ่งจะต้องมีกำลังต้านแรงกดของแท่งตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ได้ไม่น้อยกว่า 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และลักษณะสลิปท์ฟอร์มที่สำคัญในงานเขื่อนมีดังนี้

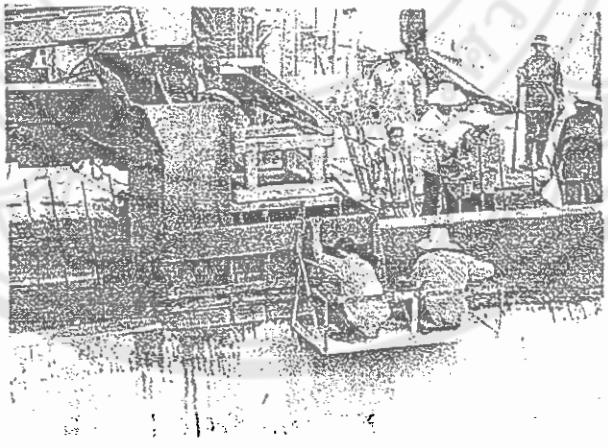
1) สลิปท์ฟอร์มด้านเหนือน้ำ(Upstream Slipform Concrete)
2) สลิปท์ฟอร์มด้านท้ายน้ำ(Downstream Slipform Concrete)

2.7.7 เทคนิคการก่อสร้างสลิปท์ฟอร์มของเขื่อนคอนกรีตบดอัด

ก่อนที่จะมีการเทคอนกรีตเป็นชั้นๆละ 30 เซนติเมตร จะเริ่มด้วยการเทคอนกรีตธรรมดาเป็น สลิปท์ฟอร์มด้านเหนือน้ำหนา 60 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร เพื่อใช้แทนไม้แบบด้านเหนือน้ำแล้วเทคอนกรีตสดหลังสลิปท์ฟอร์มเสริมด้วยเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ระยะห่าง 20 เซนติเมตร หนา 40 เซนติเมตรเพื่อป้องกันการยืดหดตัวและลดการซึมผ่านของน้ำด้วย สำหรับสลิปท์ฟอร์มด้านท้ายน้ำจะเทคอนกรีตธรรมดาเช่นเดียวกับมีขนาดความหนา 70 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร

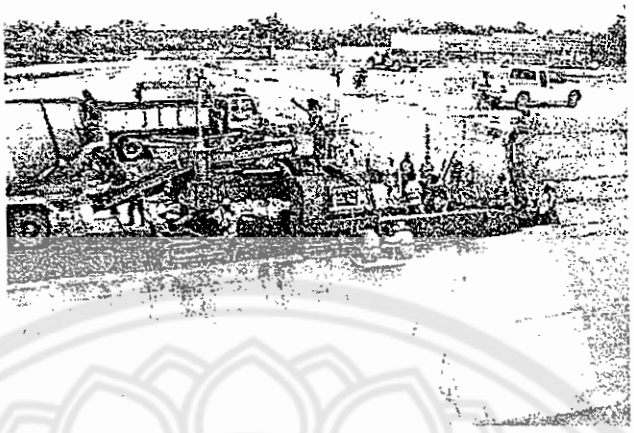
เพื่อให้ได้ความหนาของสลิปท์ฟอร์มเท่ากันโดยตลอดและเพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการก่อสร้างซึ่งต้องให้ทันกับงานคอนกรีดบดอัดที่มีการบดอัดคอนกรีตอยู่อย่างต่อเนื่องจึงได้การนำเครื่องจักรมาใช้สำหรับหล่อ สลิปท์ฟอร์มโดยการนำคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วจากโรงผสมมายังบริเวณก่อสร้างสลิปท์ฟอร์มโดยรถโม่ผสมคอนกรีตขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร และเทคอนกรีดลงในกระบะของเครื่องทำสลิปท์ฟอร์ม คอนกรีตที่นำมาใช้ในงานสลิปท์ฟอร์มจะต้องมีค่าการยุบตัว (Slump Test) เพื่อให้ได้คอนกรีตที่ก่อตัวอย่างรวดเร็วจึงจะสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

ในตัวเขื่อนคอนกรีตบดอัดจะมีแรงดันของคอนกรีตสูงเพราะปริมาตรของคอนกรีตจำนวนมากและตัวเขื่อนมีความสูงถึง 112 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง จึงมีการออกแบบให้สลิปท์ฟอร์มทำหน้าที่แทนไม้แบบกันคอนกรีตบดอัดทั้งด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ



รูปที่ 2.30 แสดงการทำสลิปท์ฟอร์ม

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีดบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก



รูปที่ 2.31 แสดงการทำสลิปท์ฟอร์มด้วยเครื่อง
ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

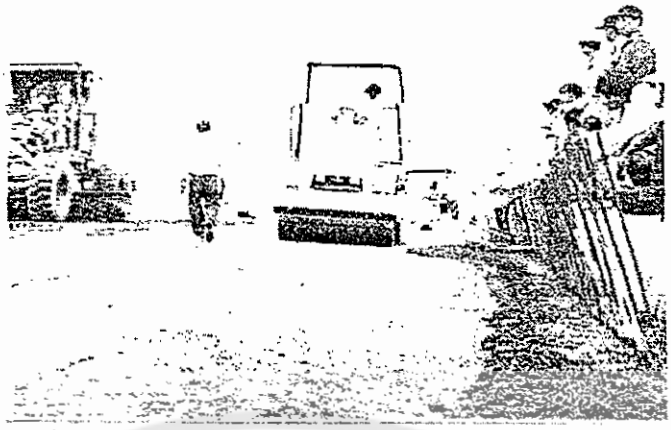
2.7.8 เครื่องจักรกลงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด

A. เครื่องจักรและเครื่องมือในการบดอัด

1) รถบดล้อเหล็กผิวเรียบ (Smooth Wheel Rollers) มีทั้งชนิดล้อหน้าล้อเดียว 2 ล้อ และ 3 ล้อ ในการใช้งานมักจะต้องระบุน้ำหนัก หรือแรงกดต่อความกว้างตามแนวแกนล้อมีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 20 ตัน สามารถใช้งานได้ดีกับดินทราย อิฐ หินคลุก ลักษณะการบดอัดเป็นแบบ Static Compaction

2)รถบดอัดสั่นสะเทือน(Vibrating Rollers) โดยติดเครื่องยนต์ทำให้สั่นไว้บน Smooth Wheel Rollers ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งมีความถี่ของการสั่นตั้งแต่ 1000 ถึง 5000 ครั้งต่อนาที ซึ่งเหมาะมากสำหรับการบดอัดหิน ทราย และดินปนทราย

3)เครื่องดบดิน (Vibrating Rammer) เป็นเครื่องบดอัดขนาดเล็กที่ต้องใช้คนถือบังคับ ใช้ในกรณีบดอัดในที่จำกัด ซึ่งเครื่องจักรใหญ่ไม่สามารถจะเข้าไปบดอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

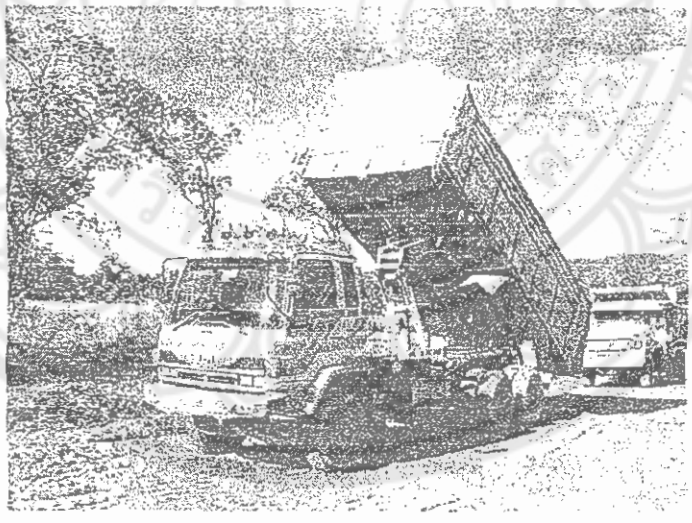


รูปที่ 2.32 รถบอล้อเหล็กผิวเรียบ

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

B. เครื่องจักรในการขนส่งวัสดุ

1) รถบรรทุกเทท้าย (Dump Truck) ใช้เฉพาะในการขนย้ายวัสดุ โดยต้องมีรถตักและรถเกลี่ย ช่วยในการทำงานให้สมบูรณ์ และสามารถบรรทุกได้ในระยะไกลได้ประหยัด ดังนั้นในงานเขื่อนมักจะใช้รถบรรทุกประเภทนี้ ซึ่งควรมีความจุถึง 30 ลูกบาศก์เมตรต่อคัน

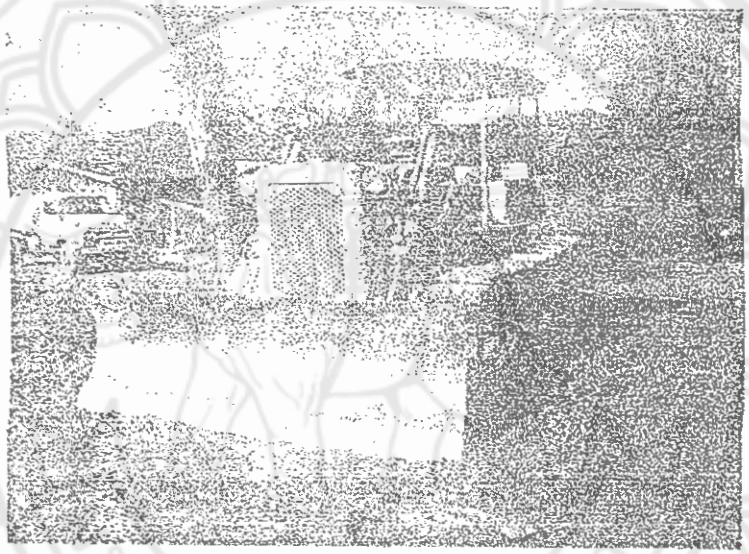


รูปที่ 2.33 รถบรรทุกเทท้าย

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

C. เครื่องจักรใช้ดันดิน , ปาด , แต่งและกราด

1) รถแทรกเตอร์(Bulldozer) ใช้ประโยชน์หลายลักษณะงาน เช่น ถากถาง บุกเบิกพื้นที่, ดัน เคลื่อนย้ายดิน, ช่วยดันหรือดึง เกลี่ย, ปาดแต่งดินและหินขนาดที่ใช้งานมีตั้งแต่ 40 แรงม้าถึง 750 แรงม้า สามารถติดตั้งอุปกรณ์ประกอบลักษณะตามความเหมาะสมของงานแต่ละอย่าง เช่น แม้กระทั่งตัวตีนตะขาบเองก็มีหลายแบบให้เหมาะสมกับพื้นที่ทำงาน สำหรับงานเขื่อนส่วนมากจะใช้ในการขุดถากร่องแกน ไถเกลี่ยดินเพื่อบดอัดแต่งลาด บดอัดส่วนหินทิ้ง และทำทางลำลอง สำหรับขนวัสดุ เป็นต้น

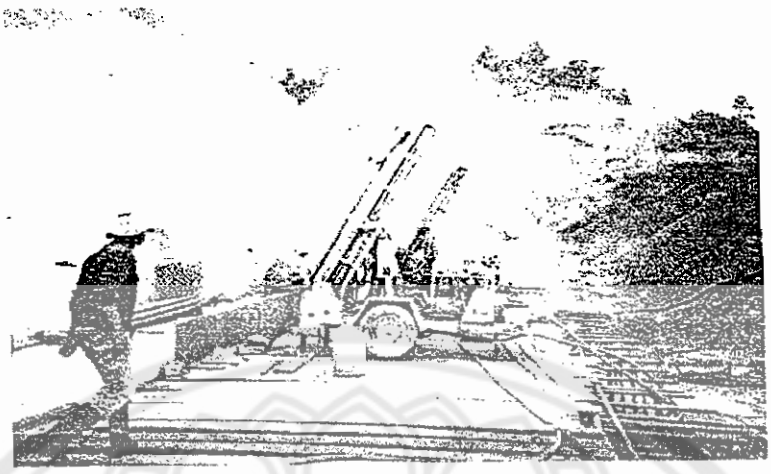


รูปที่ 2.34 รถแทรคเตอร์

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

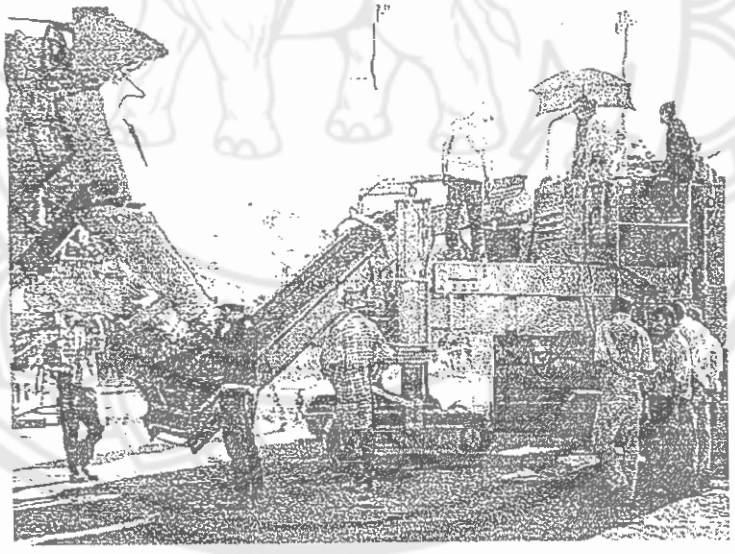
D. เครื่องจักรกลอื่นๆ ที่ใช้งานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด

1) เครื่องทำ Slip Form
2) เครื่องเขย่าคอนกรีต
3) เครื่องเจาะคอนกรีต



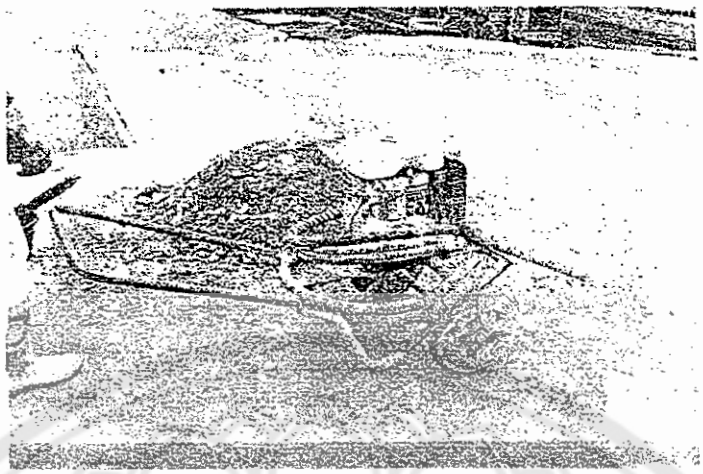
รูปที่ 2.35 เครื่องเจาะ

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก



รูปที่ 2.36 เครื่องทำสลิปท์ฟอร์ม

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก



รูปที่ 2.37 เครื่องเขย่าคอนกรีต

ที่มา เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จ.นครนายก

2.8 การประยุกต์ใช้ดินแทนหินและทรายในคอนกรีตบดอัด

การนำเอาคอนกรีตบดอัดมาประยุกต์ใช้ในการบดอัดดินคันทางดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมจากการใช้หินและทรายมาเป็นดินเหนียวเหมือนกับการปรับปรุงคุณภาพดินให้สามารถรับแรงได้มากขึ้นหลังจากทำการบดอัดแล้วซึ่งตามมาตรฐานของกรมทางหลวงได้ระบุไว้ว่าดินคันทางนั้นหลังจากทำการบดอัดแล้วควรที่จะสามารถรับแรงได้ 25 ksc. ขึ้นไปแต่ถ้าหากนำเอาทฤษฎีคอนกรีตบดอัดมาประยุกต์ใช้แล้วดินคันทางก็จะสามารถรับแรงได้มากกว่า 25 ksc. ซึ่งนอกจะใช้เป็นดินคันทางแล้วก็ยังสามารถนำไปใช้เป็นถนนที่ใช้รับแรงไม่มากนักเช่นถนนในสนามกอล์ฟ

คอนกรีตบดอัดที่มีส่วนผสมของดินเหนียวแทนหินนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างจากคอนกรีตบดอัดโดยทั่วไปเนื่องจากเมื่อมีการนำเอาดินเหนียวมาแทนหินและทราย น้ำที่ใช้ในการผสมจะต้องเพิ่มปริมาณมากขึ้นเนื่องจากดินเหนียวมีการดูดซึมน้ำเมื่อทำการผสมคอนกรีตสดก่อนทำการบดอัด ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ได้ยึดเอาหลักการของวิศวกรรมงานดินมาใช้คือ ดินเหนียวที่ผ่านการบดอัดแล้วจะสามารถรับแรงได้สูงสุดเมื่อมีน้ำที่ใช้ในการบดอัดมีปริมาตรที่เหมาะสมนั่นก็คือที่จุด Optimum Moisture Content

ในการทำให้คอนกรีตบดอัดที่มีส่วนผสมของดินเหนียวมีเนื้อแน่นใช้หลักการเดียวกับการบดอัดดินคันทางโดยทั่วไปซึ่งมีการใช้รถบดอัดแต่ในการทำก้อนทดสอบในห้องทดสอบนั้นการบดอัดกระทำโดยวิธี Standard Proctor Test ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

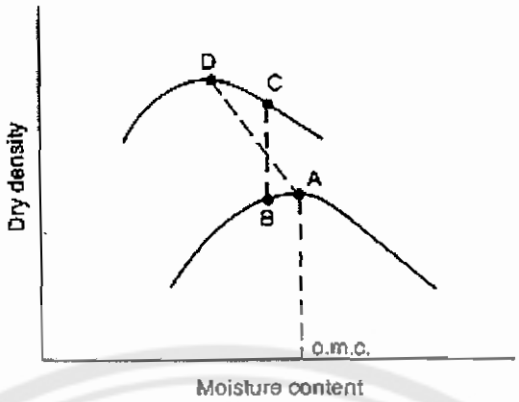
2.9 วัสดุผสมและการออกแบบส่วนผสม

2.9.1 วัสดุผสมคอนกรีดบดอัด

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
2) เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง
3) ดินในแถบจังหวัดพิษณุโลก
4) น้ำประปาที่ปราศจากสีและกลิ่น

2.9.2 การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมนั้นในการทำการทดสอบในโครงงานชิ้นนี้ผู้จัดทำได้แบ่งอัตราส่วนระหว่างดินและวัสดุเชื่อมประสาน(ดิน : วัสดุเชื่อมประสาน) ที่อัตราส่วน 50 : 50 , 60 : 40 , 70 : 30 และ 80 : 20 และกำหนดอัตราส่วนของวัสดุเชื่อมประสาน (ซีเมนต์ : เถ้าลอย) ที่ 90 : 10 , 80 : 20 และ 70 : 30 ซึ่งอัตราส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสานที่กำหนดมานั้นได้อ้างอิงมาจากการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีดมวลเบาที่ได้มีการทำมาแล้วก่อนหน้านี้ ซึ่งอัตราส่วนของซีเมนต์และเถ้าลอยของคอนกรีดมวลเบาที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดนั้นอยู่ที่ 90 : 10 และ 70 : 30 น้ำที่ใช้ในการผสมนั้นกำหนดให้ใช้ที่จุด Optimum Moisture Content ซึ่งจะได้หลังจากที่ทำการทดสอบหาค่า Optimum Moisture Content จากการทดสอบ Standard Proctor Test โดยที่ใช้ดินเหนียวเพียงอย่างเดียวการบดอัด



รูปที่ 2.38 จุด Optimum Moisture Content

ที่มา http://sbe.napier.ac.uk/projects/compaction/chapter3c.htm

2.9.3 ขั้นตอนการออกแบบ

จากอัตราส่วนที่กำหนดไว้ข้างต้นเราสามารถแปลงให้อยู่ในรูป ดิน : ซีเมนต์ : เถ้าลอย ได้ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 2.7 การออกแบบส่วนผสม

อัตราส่วนดินกับวัสดุเชื่อมประสาน	อัตราส่วน ดิน : ซีเมนต์ : เถ้าลอย
50 : 50	50 : 45 : 05 50 : 40 : 10 50 : 35 : 15
60 : 40	60 : 36 : 04 60 : 32 : 08 60 : 28 : 12
70 : 30	70 : 27 : 03 70 : 24 : 06 70 : 21 : 09
80 : 20	80 : 18 : 02 80 : 16 : 04 80 : 14 : 06

โดยมีการกำหนดปริมาณน้ำที่จุด Optimum Moisture content และ ปริมาตรคอนกรีดบดอัดต่อการบดอัด 1 ครั้งเท่ากับ 5 กิโลกรัม

ขั้นตอนการคำนวณ

อัตราส่วน 50 : 45 : 05

ดิน = 5 x 0.05 = 2.05 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.45 = 2.25 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.05 = 0.25 kg.

อัตราส่วน 50 : 40 : 10

ดิน = 5 x 0.5 = 2.5 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.4 = 2.0 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.1 = 0.5 kg.

อัตราส่วน 50 : 35 : 15

ดิน = 5 x 0.05 = 2.5 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.35 = 1.75 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.15 = 0.75 kg.

อัตราส่วน 60 : 36 : 04

ดิน = 5 x 0.06 = 3.0 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.36 = 1.8 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.04 = 0.2 kg.

อัตราส่วน 60 : 32 : 08

ดิน = 5 x 0.06 = 3.0 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.32 = 1.6 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.08 = 0.4 kg.

อัตราส่วน 60 : 28 : 12

ดิน = 5 x 0.06 = 3.0 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.28 = 1.4 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.12 = 0.6 kg.

อัตราส่วน 70 : 27 : 03

ดิน = 5 x 0.07 = 3.05 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.27 = 1.35 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.05 = 0.15 kg.

อัตราส่วน 70 : 24 : 06

ดิน = 5 x 0.07 = 3.5 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.24 = 1.2 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.06 = 0.3 kg.

อัตราส่วน 70 : 21 : 09

ดิน = 5 x 0.05 = 3.05 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.21 = 1.05 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.09 = 0.45 kg.

อัตราส่วน 80 : 18 : 02

ดิน = 5 x 0.08 = 4.0 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.18 = 0.9 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.02 = 0.1 kg.

อัตราส่วน 80 : 16 : 04

ดิน = 5 x 0.08 = 4.0 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.16 = 0.8 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.04 = 0.2 kg.

อัตราส่วน 80 : 14 : 06

ดิน = 5 x 0.08 = 4.0 kg.

ซีเมนต์ = 5 x 0.14 = 0.7 kg.

เถ้าลอย = 5 x 0.06 = 0.3 kg.

2.10 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตบดอัด(อ้างอิงมาจาก สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย)

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตบดอัดขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัสดุที่ใช้ สัดส่วนการผสมและการบดอัด อย่างไรก็ตามจะขึ้นอยู่กับวัสดุผสม (Aggregates) ได้แก่ Elasticity และคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Property) เช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไป แต่กำลังแข็งแรงขึ้นอยู่กับระดับความแน่นของการบดอัดมากกว่าสัดส่วนการผสม ดังนั้น คอนกรีตที่บดอัดแน่นกว่า มีช่องว่างระหว่างวัสดุ (Void) น้อยกว่า ก็จะมีกำลังแข็งแรงมากกว่า อย่างไรก็ตามส่วนผสมที่มีวัสดุมวลหยาบ (Course Aggregates) มากจะทำให้เกิดมีช่องว่างระหว่างวัสดุมากกว่า ทำให้ความแน่นและกำลังแข็งแรงต่ำ ซึ่งจากการทดสอบเขื่อนคอนกรีตบดอัดทั่วไปมีข้อมูลพอสรุปได้ดังนี้

(1) Compressive Strength ที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตบดอัดที่ทดสอบจากการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดทั่วไปที่เคยก่อสร้างจะอยู่ในเกณฑ์ดังนี้

- ทดสอบจากแท่งทดสอบ 25-240 กก/ตร.ซม.
- ทดสอบจากแท่งเจาะจากคอนกรีตบดอัด 80-145 กก/ตร.ซม.
- ทดสอบจากเขื่อนปากมูล 100-225 กก/ตร.ซม.

(2) Tensile Strength จากการทดสอบโดยวิธี Splitting Tension Test จากแท่งเจาะจากคอนกรีดพบว่า

- คอนกรีตทั่วไปมี Tensile Strength เฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ของ Compressive Strength
- คอนกรีตบดอัด มี Tensile Strength ร้อยละ 11 ถึง 14 ของ Compressive Strength **จึงพอสรุปได้ว่า คอนกรีดบดอัดมี Tensile Strength สูงกว่าคอนกรีดทั่วไป**