หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ในอดีตคอนกรีตกำลังสูงไม่มีความจำเป็นมากนัก เพราะโครงสร้างต่าง ๆ ยังมีขนาดช่วงสั้น และมีวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถใช้ได้อย่างเพียงพอ เช่น เมื่อสมัยสงครามโลกครั้งที่หนึ่งกำลังอัดของคอนกรีตโดยปกติธรรมดาจะอยู่ในช่วงประมาณ 200 กก/ซม^2. เมื่อมีความจำเป็นที่จะต้องลดขนาดของโครงสร้างลงและเพื่อความประหยัด คอนกรีตที่ผลิตก็เริ่มพัฒนาให้ได้กำลังสูงถึง 500 กก/ซม^2. ในปัจจุบันการก่อสร้างทั่วไปจะมีกำลังอยู่ระหว่าง 300-500 กก/ซม^2. หรือถ้าเป็นคอนกรีตที่ใช้กับการผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงจะมีค่าสูงถึง 450 กก/ซม^2. โดย ACI Committee-363[1] ได้ให้คำนิยามไว้ว่า คอนกรีตกำลังสูงคือคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่า 632 กก/ซม^2.

คอนกรีตกำลังสูงได้มีการเริ่มพัฒนา[2] โดยการลดค่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ลดลงต่ำ ทำให้เกิดปัญหาในด้านการทำงาน เนื่องจากความสามารถในการเท (Workability) ลดต่ำลง จึงได้มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อใช้ในการเพิ่มความสามารถในการเทคอนกรีต[3] ในกรณีที่ต้องลดปริมาณน้ำลงมาก

กรรมวิธีการผลิตคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้พัฒนามาตามลำดับ จนในปัจจุบันสามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยเมื่อ 28 วัน ได้เกินกว่า 1500 กก/ซม^2.[4] จึงสามารถทำให้นำคอนกรีตกำลังสูงไปใช้ในงานก่อสร้างตึกสูงและสะพานช่วงยาว[5,6] ได้มากขึ้น โดยสามารถลดขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้างทำให้เบาลง เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่ต้องรับแรงอัดหรือในอุตสาหกรรมคอนกรีตอัดแรงและยังเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุสำหรับงานหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูป

ทฤษฎีและมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้คอนกรีตธรรมดาทางด้านกำลังรับแรงเฉือนจะสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยหรือมีข้อจำกัดเพียงใด เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับคอนกรีตกำลังสูงมาก

1.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

1.1.1 คอนกรีตกำลังสูง

คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ Portland เป็นตัวเกาะประสาน ทำได้โดยการลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้น้อยลง ซึ่งเป็นผลให้ความสามารถในการเทลดลงจึงจำเป็นต้องผสมสารเคมีผสมเพิ่มประเภทที่ให้ความหล่อลื่นสูง (Superplasticizer) เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเทให้สูงขึ้น โดยคุณภาพของวัสดุและส่วนผสมต่าง ๆ ต้องควบคุมอย่างละเอียด

ซีเมนต์ที่ใช้ผสมคอนกรีตกำลังสูงมากนี้ Perenchio[7] พบว่า ซีเมนต์ที่มีความละเอียด (Fineness) มากที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะให้น้ำปูน (Cement Paste) ในส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังสูง ซึ่งซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากนี้จะเหมาะสำหรับคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงในเวลาอันสั้น นอกจากนี้ยังพบว่า ซีเมนต์ชนิดที่ 3 ซึ่งมีส่วนผสมของ Tricalcium Silicate (C_3S) สูงและความละเอียดมากจะให้กำลังคอนกรีตสูงสุดเมื่อสัดส่วนผสมอื่นใกล้เคียงกัน Saucier, Smith และ Tynes[8] พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 จะเหมาะสมกว่าชนิดที่ 3 เนื่องจากชนิดที่ 3 จะต้องการน้ำปริมาณมากกว่าเพื่อให้ได้การไหลที่ดีเท่ากันและนอกจากนี้ยังแข็งตัวเร็วในที่มีอากาศร้อน

Klieger[9] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Early High Strength Concrete for Prestressing และได้สรุปผลเกี่ยวกับความสำคัญของปริมาณน้ำในคอนกรีตไว้ว่า กำลังอัดของคอนกรีตสูงสุดก็ต่อเมื่อใช้น้ำในการผสมให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ และในระหว่างการบ่มนอกจากจะต้องป้องกันไม่ให้น้ำระเหยไปแล้วยังต้องเพิ่มเติมน้ำให้พอเพียงอีกด้วย ต่อมา Gilkey[10] ได้พยายามที่จะผลิตคอนกรีตกำลังสูงขึ้นมา โดยทดลองเกี่ยวกับสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพื่อสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์จะได้ลดลงและลดขนาดโตสุดของมวลรวมลงด้วยจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้น The Concrete Society[11] ได้ศึกษาปฏิกิริยาของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำพบว่า จะเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประมาณ 0.25 ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตจึงไม่ควรใช้สัดส่วนต่ำกว่านี้ Freedman[12] แนะนำว่าการผลิตคอนกรีตกำลังสูงควรใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วง 0.3-0.4

โดยสัดส่วนที่ต่ำกว่านี้จะทำให้กำลังคอนกรีตสูงขึ้นแต่ทำงานได้ยาก Perenchio[7] พบว่า สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำสุดที่จะทำให้ส่วนผสมมีความสามารถในการเทคือ 0.3 และสัดส่วนนี้ก็เพียงพอสำหรับปฏิกิริยาของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ

ผลกระทบจากมวลรวมมีความสำคัญเช่นกัน Thoman[13] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับมวลรวมที่มีลักษณะโครงสร้างของผิว (Texture Surface) ที่ต่างกันโดยใช้กรวดหินทรายและหินบะซอลท์ (Basalt) ที่มีขนาดโตสุดเท่ากับ 3/4" โดยสัดส่วนอื่นคงที่ พบว่าคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของหินบะซอลท์จะให้กำลังสูงสุด โดยให้เหตุผลว่า หินบะซอลท์มีความเป็นเนื้อเดียวกันและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดีกว่าซึ่งจะมีความสามารถพัฒนาแรงยึดเกาะระหว่างเนื้อปูนทราย (Cement Paste) กับหินได้สูง Gold Beck[14], Weymouth[15] และ McGreary[16] กล่าวในทำนองเดียวกันว่า ขนาดคละของมวลรวมจะมีความสำคัญน้อยลงในคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์สูง Walker[17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของขนาดโตสุดที่มีต่อกำลังของคอนกรีต กล่าวว่า ส่วนผสมที่ใช้มวลรวมขนาดเล็กลงจะทำให้ต้องการปริมาณน้ำสูงขึ้นเป็นผลให้การหดตัว (Shrinkage) เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับกำลังของคอนกรีตและยังกล่าวอีกว่า กำลังของคอนกรีตมีผลมาจากกำลังของปูนทราย (Mortar) แรงยึดเกาะ (Bond) ระหว่างปูนก่อกับมวลรวมหยาบและความแข็งของมวลรวมหยาบ Saucier, Smith และ Tynes[8] ได้ทดลองใช้ทรายธรรมชาติ และทรายที่ผลิตจากโรงงานเป็นส่วนผสมของคอนกรีต พบว่า ในส่วนผสมที่มีการยุบตัวและปริมาณซีเมนต์เท่ากันทรายธรรมชาติจะให้กำลังของคอนกรีตสูงกว่าทรายที่ผลิต โดยให้เหตุผลว่า ทรายธรรมชาติจะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่า เมื่อการยุบตัวเท่ากันเพราะทรายธรรมชาติมีลักษณะกลมและผิวเรียบมากกว่า Cordon และ Gillespie[18] ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับตัวแปรของมวลรวมที่มีผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์สูง (Lean Mix) จะให้กำลังสูงสุดเมื่อใช้มวลรวมขนาดโต แต่ในขณะเดียวกัน คอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ (Rich Mix) จะให้กำลังสูงสุดเมื่อใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมเล็ก ๆ Mather[19] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีน้ำหนักมาก เช่น แมกเนไตท์ (Magnetile) หรืออิลมิไนท์ (Ilmenite) ที่มีขนาดโตสุดครึ่งนิ้วเป็นส่วนผสมโดยมีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 580 กก/ม^3. และใช้สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.3 จะทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าสูงถึง 770 กก/ซม^2. ที่อายุ 28 วัน Morgan[20] ค้นพบว่า ทรายที่มีลักษณะกลมมนจะให้กำลังคอนกรีตสูงกว่าทรายที่มีลักษณะผิวขรุขระและแง่มุม

Perenchio[7] วิจัยพบว่า เมื่อใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ต่ำประมาณ 0.3 และส่วนผสมอื่นค่อนข้างคงที่แล้วหินที่มีขนาดโตสุด 3/8" จะให้กำลังคอนกรีตสูงสุดมากกว่า 900 กก/ซม^2 และยิ่งพบว่าสัดส่วนจำนวนคละของมวลรวมหยาบและละเอียดนั้นไม่มีผลต่อกำลังคอนกรีตในช่วงแรก Freedman[12] แนะนำว่า ทรายที่เหมาะสมกับการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมากควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดระหว่าง 2.7 ถึง 3.2 ปริมาณคละควรเป็นไปตาม ASTM C-33

สารผสมคอนกรีตลดปริมาณน้ำ (Water Reducing Admixture) หรือสารเพิ่มความไหลลื่น (Plasticizer Admixtures) ที่มีสารประกอบหลักพวกไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอกซิล (Carboxyl) เมทอกซี่ (Methoxy) และกลุ่มของกรดซัลโฟนิก (Sulphonic Acid Groups) จะช่วยลดปริมาณน้ำได้ประมาณ 5-15 % และสามารถเพิ่มความไหลลื่นให้แก่คอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้น Gaynor[3] ได้นำเอาน้ำยาผสมคอนกรีต (Admixture) ที่มีลิกนินเป็นสารหลักมาใช้กับงานคอนกรีตเพื่อทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทสูง แต่ยังประสบปัญหาเกี่ยวกับอัตราส่วนการใช้ Saucier, Smith และ Tynes[8] กล่าวว่าเมื่อใช้ในอัตรามากกว่าผู้ผลิตแนะนำจะทำให้กำลังคอนกรีตลดลง ในอายุเริ่มแรกแต่เมื่อมีอายุนานไปจะไม่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต Dodson และ Farkas[21] แนะนำว่า การใช้สารผสมให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้น ควรจะเติมสารผสมลงในคอนกรีตภายหลัง จากซีเมนต์ผสมกับน้ำแล้วและ Gaynor[22] พบว่า การใช้สารผสมคอนกรีตชนิดที่กักฟองอากาศ (Air-Entrained Admixtures) จะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงในอัตราที่สูงมาก เมื่อเทียบกับปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้น Blick, Petersen และ Michael[23] ค้นพบว่า เมื่อใช้สารผสมในอัตราที่สูงกว่าผู้ผลิตแนะนำไว้ควรจะทำการทดสอบผสมกับคอนกรีต แล้วหาคุณสมบัติเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เติมสารผสมและยังเตือนว่าเมื่อใช้สารผสมคอนกรีตจำพวกลิกโนซัลโฟเนท (Lignosulphonate) ที่อัตราสูงกว่าปกติจะทำให้เกิดฟองอากาศมากกว่า 3 % เป็นผลให้กำลังของคอนกรีตลดลง Yamamoto และ Ohira[24] ได้ทดลองเกี่ยวกับผลกระทบจากการใช้สารผสมในอัตราสูง พบว่าการใช้สารผสมคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพและประหยัดควรจะใช้ในอัตราต่ำกว่า 1 % โดยน้ำหนักซีเมนต์ Rixom[25,26] พบว่าปริมาณที่ใช้ในอัตราปกติ (Normal Dosage) จากการแนะนำของผู้ผลิตจะสามารถลดปริมาณน้ำได้ถึง 10 % กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นถึง 25 % ที่อายุ 7 และ 28 วันตามลำดับ โดยที่คอนกรีตนั้นออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 มีค่าการยุบตัว 76 มม. จะให้ประสิทธิ

ภาพมากที่สุดที่อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 6.5-7.0 ส่วนสารผสมคอนกรีตประเภทลดน้ำในอัตราสูง (High Range Water Reducing Admixture) หรือสารผสมเพิ่มความไหลลื่นสูง (Super-Plasticizer Admixture) ที่มีสารเคมีหลักพวกฟอร์มาลดีไฮด์และเขายังพบว่าเมื่อใช้สารนี้จะสามารถลดปริมาณน้ำได้สูงกว่าประเภทแรกถึง 10 เท่า Hewlett[27] พบว่าจะสามารถลดปริมาณน้ำได้ 20-33 % โดยกำลังของคอนกรีตจะสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของซีเมนต์ มวลรวมและอุณหภูมิเช่นเมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ 400 กก/ม^3. อัตราสารเคมี 4 ลิตร/ม^3. จะลดปริมาณน้ำได้ 24 % กำลังของคอนกรีตจะสูงขึ้น 87 % และ 53 % ที่อายุ 7 วันและ 28 วัน แต่ถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์ 500 กก/ม^3. จะลดปริมาณน้ำได้ 27 % กำลังที่เพิ่มจะเปลี่ยนเป็น 54 % และ 37 % ตามลำดับ ซึ่งอัตราการเพิ่มของกำลังคอนกรีตจะสูงที่อายุน้อยและปริมาณซีเมนต์ต่ำ

สำหรับคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของคอนกรีตกำลังสูงมากนั้นจะแตกต่างไปจากคอนกรีตธรรมดา Thoman และ Warren[13] พบว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด (Stress) และความเครียด (Strain) จะมีความชันน้อยลง ในขณะที่เส้นกราฟของคอนกรีตกำลังสูงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีความชันมากไปจนถึงระดับหน่วยแรงอัดประมาณ 50-60 % ของกำลังอัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) จะแปรตามมวลรวมที่ใช้โดยมวลรวมที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างกันจะให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่างกันและพบว่า โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น[8,9] Perera[28] ได้ทำการหาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตกำลังสูงพบว่า โมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังดึงแยกตัวจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับกำลังอัดคอนกรีตและยังพบว่า คอนกรีตกำลังสูงจะมีความต้านทานต่อกำลังแบกทาน (Bearing Strength) สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่สัดส่วนพัวซอง (Poisson's Ratio) ของคอนกรีตธรรมดาและกำลังสูงจะอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.23 และเช่นเดียวกัน ค่าโมดูลัสแตกร้าวก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น Nilson, Carrasquillo และ Slate[29] ได้ทดลองศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงกล่าวทำนองเดียวกับ Perera[28] เกี่ยวกับเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดและกล่าวว่าสาเหตุที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าสูงเนื่องจากความแข็งของปูนก่อและแรงยึดเกาะระหว่างปูนก่อกับมวลรวมที่สูงกว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยมากจะมีค่าอยู่ระหว่าง 4.0-5.0x10^5 กก/ซม^2.[4,28,30,31,32,33] และค่าความเครียดสูงสุดมีค่าประมาณ

0.002-0.003 Freedman[12] ได้สรุปผลจากงานวิจัยเกี่ยวกับการคืบตัวและการหดตัวในคอนกรีตว่าทั้งการคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีตจะลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น นอกจากนี้คุณสมบัติในการยึดเกาะกันกับเหล็กเสริมยังดีขึ้นในคอนกรีตกำลังสูง[9]

การวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตกำลังสูงในประเทศไทยก็มีเช่นกัน โดยสุพรรณ[30] ได้วิจัยเกี่ยวกับการผลิตและศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้สารผสมคอนกรีตเพิ่มความไหลลื่น (Plasticizer) ซึ่งได้จากน้ำเสียของขบวนการฟอกเยื่อกระดาษซึ่งมีสารหลักทางเคมีของลิกโนซิลโฟเนท (Lignosulphonate) โดยใช้หินขนาดโตสุด 3/4" มีค่าโมดูลัสความละเอียด 6.55 สัดส่วนของหินต่อมวลรวมทยาบทั้งหมด 62 % ทรายที่ใช้มีโมดูลัสความละเอียด 2.89 สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.26-0.321 ใช้สารผสมคอนกรีตไม่เกิน 6 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์เป็นปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แบบที่ 3 สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.30 เมื่อใช้ซีเมนต์ 550 กก/ลูกบาศก์เมตร จะทำให้กำลังของคอนกรีตเมื่ออายุ 28 วัน มีค่าสูงกว่า 700 กก/ซม^2.

สกุล[31] ได้ทดลองผสมเพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงไปใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แบบที่ 1 และ 3 ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตเพิ่มความไหลลื่นที่มี Lignosulphonate Acid และ Napthalene เป็นสารพื้นฐาน หินที่ใช้มีขนาดโตสุด 1/2" สัดส่วนคละ 4.97 ส่วนทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียด 3.10 และมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 0.23-0.40 พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงนั้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ควรใช้ประมาณ 0.25 หินที่ใช้มีปริมาณ 1500 กก. ในคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร ทรายที่ใช้ควรมีสัดส่วนอยู่ระหว่าง 38-40 % ของหินโดยน้ำหนัก ซึ่งปูนซีเมนต์ทั้งแบบที่ 1 และ 3 จะให้กำลังสูงสุดใกล้เคียงกัน โดยใช้ปริมาณ 550 กก. ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ส่วนสารผสมคอนกรีตที่มี Napthalene เป็นสารพื้นฐานในอัตรา 0.8 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์จะช่วยให้การไหลลื่นดีพอ สัดส่วนผสมคอนกรีตนี้จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มากกว่า 900 กก/ซม^2.

มานิต[32] ได้ทดลองผสมคอนกรีตกำลังสูงไปใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำจากคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้หินขนาดโตสุด 1/2"

มีค่าโมดูลัสความละเอียดเป็น 6.52 ทรายที่ใช้มีโมดูลัสความละเอียด 2.87 และปริมาณคละเป็นไปตามขีดจำกัดของ ASTM C-33 โดยใช้น้ำยาผสมคอนกรีตเพิ่มความไหลลื่นสูงที่มีสารประกอบของ Napthalene การทดลองผสมใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์จาก 0.24-0.30 พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.24 และอัตราส่วนน้ำยาต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก 2.378 % และอัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหิน มีค่า 1.00, 1.33 และ 2.17 ตามลำดับ จะให้กำลังคอนกรีตสูงประมาณ 780-890 กก/ซม^2

ฐิติ[33] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของเหล็กเสริมทางขวางต่อพฤติกรรมของเสาคอนกรีตทำจากคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้สัดส่วนการผสมตามมานิต[32] โดยได้เปลี่ยนแปลงบางอย่างเพื่อให้เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ โดยใช้หินขนาดโตสุด 1/2" มีค่าโมดูลัสความละเอียด 6.34 ทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.93 ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตเพื่อเพิ่มความไหลลื่นมีสารหลักคือ Napthalene Sulphate ที่มีชื่อว่า Sulphonated Napthalene Formaldehyde Condensates โดยใช้ในอัตรา 1.9 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังนั้นส่วนผสมคอนกรีตใน 1 ลูกบาศก์เมตรคือ ซีเมนต์ ทราย:หิน:น้ำ:น้ำยาผสม 575:765:1245:138:10.94 กก. ซึ่งให้กำลังคอนกรีตที่อายุ 28 วันประมาณ 800 กก/ซม^2.

ปรีชา[34] ก็ได้ทดลองผสมคอนกรีตกำลังสูงไปใช้ในงานวิจัยพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตกำลังสูงเสริมด้วยลวดกำลังดึงสูง โดยได้ใช้อัตราส่วน ซีเมนต์:ทราย:หิน 1.00:1.333:2.15 โมดูลัสความละเอียดของทราย 2.95 ขนาดโตสุดของหิน 1/2" ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.24 และอัตราส่วนผสมน้ำยา 2.4 % โดยน้ำหนักซีเมนต์ ได้กำลังคอนกรีตที่อายุ 70 วัน เท่ากับ 646 กก/ซม^2 โดยน้ำยาผสมคอนกรีตที่ใช้มีสารหลักคือ Napthalene Acid

ในส่วนของพฤติกรรมการดัด Bloem และ Gaynor[35] กับ Tognon, Ursella และ Coppetti[4] พบว่าเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดัดประลัยอย่างมาก โดย Tognon, Ursella และ Coppetti กล่าวว่า ผลของโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังทางกลที่สูงกว่าของคอนกรีตกำลังสูงจะไม่มีผลเสียต่อความเหนียว (Ductility) ของคาน Nedderman[36] ได้ศึกษาการกระจายของหน่วยแรงอัดในรูปของการกระจายเป็นรูป

สี่เหลี่ยมของคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วง 550-1000 กก/ซม^2. และได้แนะนำให้ใช้ค่า Parameter สำหรับคานคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 800 กก/ซม^2. แทนข้อบัญญัติ ACI (318-71) แต่ Wang, Shah และ Naaman[37] กล่าวในทางตรงข้ามว่าข้อบัญญัติของ ACI (318-71) สามารถทำนายน้ำหนักประลัยของคานคอนกรีต เสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงได้ใกล้เคียง เพียงพอแล้ว Leslie, Rajagopalan และ Everard[38] ทำการทดลองคานคอนกรีต เสริมเหล็กซึ่งมีกำลังอัดของคอนกรีต 652-825 กก/ซม^2. แนะนำให้ใช้การกระจายหน่วยแรงอัด เป็นรูปสามเหลี่ยมจะให้ผลที่ปลอดภัยกว่าการวิเคราะห์แบบอื่น และเนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงจะมีความเปราะ (Brittle) กว่าคอนกรีตธรรมดาจึงทำให้สูญเสียสภาวะปลาสติกเมื่อกำลังสูงขึ้น จึงเสนอแนะว่าสมควรจะมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดเพื่อเพิ่มความเหนียวให้เพียงพอ เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่า 560 กก/ซม^2. ส่วน Zia[39], Wang, Shah และ Naaman[37] ก็สรุปว่าค่าปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดโดยข้อบัญญัติ ACI ยังคงให้ค่าที่ปลอดภัยแต่อนุรักษ์ (Conservative) เกินไป รวมทั้ง Zia ยังแนะนำว่าปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัดต่ำสุดตามข้อบัญญัติของ ACI (318-77) ควรเพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันการวิบัติอย่างทันทีทันใด อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสแตกร้าว

1.1.2 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริมเหล็ก

ในราวปลายศตวรรษที่แล้ว Ritter[40] ได้ชี้ว่าแรงดึงในแนวทแยงคือบรรทัดฐานของการวิบัติจากแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริมเหล็ก แต่ก็มีนักวิจัยบางท่านได้เสนอแนวความคิดอื่นที่ว่า การวิบัติจากแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริมเหล็กมีสาเหตุมาจากแรงเฉือนในแนวราบ Mörsch[40] ชาวเยอรมันได้ทำการพิสูจน์ว่าการวิบัติจากแรงเฉือนจะเกิดจากแรงดึงในแนวทแยงไม่ใช่จากแรงเฉือนในแนวราบ โดยเสนอบทความที่ว่า เมื่ออยู่ในสภาวะหน่วยแรงเฉือนล้วนซึ่งหน่วยแรงเฉือนในแนวดิ่งและแนวราบเท่ากันนั้น ค่าหน่วยแรงดึงจะมีขนาดเท่ากันและจะกระทำบนระนาบที่ทำมุม 45^0 และกล่าวว่าเหล็กปลอก (Web Reinforcement) จะไม่สามารถส่งผ่านแรงไปยังคอนกรีตได้โดยการแบกทาน (Bearing) แต่จะส่งไปในรูปของแรงยึดเหนี่ยวซึ่งมีผู้วิจัยคนอื่น ๆ ให้ค่าสนับสนุน A.N. Talbot[40] ได้ศึกษาแรงดึงในแนวทแยงเพื่อรวบรวมข้อมูลเพื่อการก่อตั้งหลักการพื้นฐานและระบุว่า หน่วยแรงดึงในแนวทแยงจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเฉือนในแนวราบ ถ้าคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้ดังที่สมมุติในทฤษฎีมาตรฐาน (Standard Theory)

ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว (Longitudinal Reinforcement,ρ) มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก M.O. Withey[40] ได้ชี้ถึงความเป็นไปได้ของปฏิกริยาเดือย (Dowel Action) ของเหล็กเสริมตามยาวในการรับแรงเฉือนนอกเหนือจากคอนกรีตในบริเวณรับแรงอัดและเหล็กปลอก Talbot[40] กล่าวว่า เมื่อปริมาณเหล็กเสริมตามยาวเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของคานจะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับคานที่ไม่เสริมเหล็กปลอก Mathey และ Watstein[41] ได้รายงานการทดสอบคานที่เสริมด้วยเหล็กที่มีกำลังคลากสูงระหว่าง 2813-7032 กก/ซม^2. โดยมี a/d จาก 1.5 ถึง 3.8 กล่าวว่า ในคานที่มีอัตราส่วนช่วงคานต่อความลึกเดียวกัน กำลังรับแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวจากการดึงในแนวทแยงจะลดลงเป็นแบบเส้นตรงเมื่อค่าหน่วยแรงสูงสุดของเหล็กเสริมตามยาวเพิ่มขึ้น Rajagopalan และ Ferguson[42], Palaskas, Attiogbe และ Darwin[43] กล่าวว่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ถ้าปริมาณเหล็กเสริมตามยาวลดลงต่ำกว่า 1.2-1.5 %

จากการศึกษาผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (Shear Span:Effective Depth Ratios, a/d) Talbot[40] ได้สรุปว่า สำหรับคานที่ไม่เสริมเหล็กปลอก เมื่อลดช่วงของคานที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากัน ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้น Bresler และ Scordelis[44] Mathey และ Watstein[41] ได้ทำการทดลองและได้สร้างสูตรในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนประลัยของคานซึ่งจากสมการแสดงว่า เมื่อค่าอัตราส่วน a/d เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงเฉือนจะลดลง ต่อมา Zsutty[45] ได้รวบรวมข้อมูลจากการทดลองต่าง ๆ ในการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่ขณะนั้น แล้วใช้การวิเคราะห์การถดถอยทางสถิติ (Statistical Regression Analysis) ในการหาสูตรคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคานสำหรับคานที่มีค่า a/d มากกว่า 2.5 วิธีการดังกล่าวทำให้ได้สมการทำนายค่าหน่วยแรงเมื่อวิบัติในรูปของ $v = k(\rho f'_c\ d/a)^{1/3}$ ซึ่งสมการนี้จะทำให้ค่าความผิดพลาดในการทำนายกำลังรับแรงเฉือนมีค่าน้อยลง สำหรับช่วงกว้างของคุณสมบัติต่าง ๆ ของคานและแหล่งการทดลอง ซึ่งสมการของ ACI (318-63) ไม่สามารถจะทำนายพฤติกรรมจริงของผลการทดลองคานชลูด (Slender Beam) สำหรับคานที่ a/d < 2.5 จะได้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดเมื่อใช้สมการดังกล่าว โดยค่า k จะเปลี่ยนไปตามน้ำหนักที่ทำการทำนาย Kani[46] กล่าวว่าคานส่วนใหญ่ที่ทำการทดลองมัก

จะมีความลึกจาก 10-15 นิ้ว และสมการการทำนายกำลังรับแรงเฉือน ACI (318-63) ไม่มี Parameter ที่คิดถึงอิทธิพลของความลึกประสิทธิผลของคานโดยตรง เขาจึงทำการทดลองคาน 4 ชุด ซึ่งมีความลึก 6, 12, 24 และ 48 นิ้ว โดยค่า f'_c และ ρ มีค่าคงที่ สรุปได้ว่า อิทธิพลของความลึกสัมบูรณ์ (Absolute Depth) จะทำให้อัตราส่วนปลอดภัยของคานที่ใหญ่สุดลดลง 40 % จากคานขนาดเล็ก

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีต เพราะว่าการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนนั้นเกิดจากแรงดึงในแนวทแยงซึ่งกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตขึ้นกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต Talbot [40] กล่าวว่า กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่ไม่เสริมเหล็กปลอกจะเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต ซึ่งแสดงเป็นนัยว่าจะเพิ่มตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต Moretto [40] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเหล็กปลอก ณ มหาวิทยาลัย Illinois โดยทดลองคานที่เสริมเหล็กตามยาวเกินสมดุลย์ เพื่อให้เกิดการวิบัติจากแรงดึงในแนวทแยงและสรุปสมการในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนโดยมีส่วนที่ขึ้นโดยตรงกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต [30, 41, 42, 44, 45] แต่ Kani [47] ทำการทดลองคาน 11 ชุด ซึ่งมีหน้าตัดคงที่ โดยศึกษาอิทธิพลของ f'_c, ρ และ a/d สรุปได้ว่า กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่ได้ขึ้นกับกำลังของคอนกรีตเลย โดยค่า f'_c อยู่ระหว่าง 176 ถึง 352 กก/ซม^2. และ ρ = 0.5 ถึง 2.8 % Hiranmas [48] ทำการทดสอบคาน 12 ตัว ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงโดยมีค่า f'_c = 442-827 กก/ซม^2. และสรุปว่า สมการที่ใช้คำนวณหน่วยแรงเฉือนระบุ (Nominal Shear Stress) ของข้อบัญญัติ ACI (318-71) สมการที่ 11-4 ให้ค่าที่อนุรักษ์และจากการทดลองค่าคงที่ 176 ในสมการดังกล่าว เมื่อใช้กับคอนกรีตกำลังสูง ควรใช้ค่า 896-1318 สำหรับ ρ = 2 % และ 799-1741 สำหรับ ρ = 1 % แต่ก็กล่าวว่าข้อมูลที่มีอยู่ยังไม่เพียงพอในการหาค่าคงที่ที่จะเปลี่ยนค่าคงที่ดังกล่าว Mphonde และ Frantz [49] ได้ทำการทดลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ชุด โดยไม่เสริมเหล็กปลอก โดยในแต่ละชุดมีค่า a/d คงที่คือ 3.6, 2.5 และ 1.5 โดยกำลังอัดของคอนกรีตอยู่ในช่วง 211 ถึง 1055 กก/ซม^2. จากการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อ a/d = 3.6 สมการที่ (11-3) และ (11-6) ของ ACI (318-77) จะให้ค่าที่อนุรักษ์โดยอัตราส่วนของกำลังประลัยที่วัดได้ต่อกำลังที่คำนวณจะลดลงจาก 1.64 ถึง 1.20 เมื่อกำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

จาก 211 ถึง 1055 กก/ซม^2. และผลกระทบของกำลังอัดของคอนกรีตต่อกำลังรับแรงเฉือนจะยิ่งมีผลมากขึ้นเมื่อ a/d ลดลง

การเสริมเหล็กเพื่อช่วยรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก Ritter และ Mörsch[40] ได้เสนอให้ใช้วิธี Truss Analogies ในการออกแบบเหล็กปลอก โดยสมมุติให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรอยแตกร้าวแนวทแยงสามารถแทนด้วย Truss ที่มีจุดต่อแบบยึดหมุน (Hinge) โดยเหล็กปลอกจะถูกแรงดึงกระทำ Mörsch[40] ยังกล่าวว่าเหล็กปลอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถมีปฏิกริยาต่อแรงเฉือนในแนวราบเหมือนกับเหล็กรับแรงเฉือนในคานไม้ (Shear Keys) Talbot[40] ได้เตือนไว้ว่า ความบอบบางในการต้านทานแรงดึงในแนวทแยงเป็นสิ่งที่ไม่ปรารถนา เพราะอาจทำให้เกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน ดังนั้นอุปกรณ์ในการต้านทานแรงดึงในแนวทแยงจะต้องมีมากพอ และแนะนำให้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนเพียง 2 ใน 3 ส่วนของแรงเฉือนภายนอก ที่เหลือให้คอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดรับไป Bresler และ Scordelis[44] ได้ทำการทดลองคาน 12 ตัว โดยปริมาณการเสริมเหล็กปลอก rf_y = 0, 50, 75, 100 Psi และ a/d = 4, 5, 7 สรุปได้ว่าเพียงมีปริมาณเหล็กปลอกเพียงเล็กน้อย ก็มีประสิทธิภาพที่จะเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ รวมทั้งสามารถป้องกันการวิบัติในทันทีทันใดเนื่องจากแรงเฉือนได้ ทำให้คานสามารถมีระยะโก่งเพียงพอและมีกำลังรับแรงดัดได้เต็มที่ Kani[50] ได้ทำการทดลองคาน 44 ตัว โดยแปรผันชนิดของเหล็กปลอกและได้เสนอเหตุผลว่า จุดประสงค์ในการเสริมเหล็กปลอกคือเป็นการทำให้เกิดจุดรองรับสำหรับโครงสร้าง Arches ภายในรวมทั้งกล่าวว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันเลยระหว่างแรงเฉือนและความต้องการในการใช้เหล็กปลอก

1.2 วัตถุประสงค์และขอบข่ายการวิจัย

ในมาตรฐานการก่อสร้างโดยทั่วไป ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบที่มีผลต่อด้านกำลังและพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างมักจะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดของคอนกรีต[6] ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งได้มาจากผลของการทดลองและประสบการณ์ในอดีต โดยมากได้มาจากการ

ทดลองคอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่า 417 กก/ซม^2.[8] และเนื่องจากคุณสมบัติที่ต่างไปของคอนกรีตกำลังสูงมากจากคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดา[3,7] อาจทำให้พฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างแตกต่างกันออกไป จึงมีความจำเป็นที่ต้องการตรวจสอบความเป็นไปได้ของมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีต เสริมเหล็กทางด้านกำลังรับแรงเฉือน เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตกำลังสูงมาก

ข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษาจะทำให้ทราบพฤติกรรมของคานคอนกรีต เสริมเหล็กใช้คอนกรีตกำลังสูงมากภายใต้แรงดัดและแรงเฉือนกระทำและทำให้ทราบความแม่นยำในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของข้อบัญญัติในการออกแบบคานคอนกรีต เสริมเหล็กเมื่อใช้กับคานคอนกรีต เสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตกำลังสูงมาก เพื่อสรุปเป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีต เสริมเหล็กที่เหมาะสมกับคานคอนกรีต เสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตกำลังสูงมาก

การวิจัยจะศึกษาผลของกำลังอัดที่สูงขึ้นของคอนกรีตต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีและไม่มีเหล็กปลอก (Web Reinforcement) โดยมีพฤติกรรมของคานที่จะทำการศึกษาจะทดสอบจนถึงขั้นวิบัติคือ

1. น้ำหนักบรรทุก ณ จุดแตกร้าวและจุดวิบัติ
2. ความเครียดของคอนกรีตที่ผิวรับแรงอัด
3. ความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอก
4. ความเครียดของผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือน (Shear Span)
5. ความสัมพันธ์ของการโก่งตัวกับน้ำหนักบรรทุก
6. ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ

งานวิจัยนี้จะจำกัดเพียงหน้าตัดขนาดเดียว รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความยาวจำกัดเพียงขนาดเดียวที่ 230 ซม. โดยมีช่วงแรงเฉือน (a, Shear Span) เท่ากับ 90 ซม. และใช้สัดส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) มีค่าคงที่เท่ากับ 3.91 กำลังของคอนกรีตที่ใช้มีค่าระหว่าง 600-800 กก/ซม^2.