



แนวความคิด

ในการประกันคุณภาพคอนกรีตด้วยสถิติ

บุญรอด คุปดิทัฬหี

ผู้จัดการแผนกทดสอบและพัฒนาผลิตภัณฑ์

บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด

การประกันคุณภาพในที่นี้หมายถึง การดำเนินการทั้งปวงที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของวัตถุดิบสำหรับคอนกรีต และคุณภาพคอนกรีตเพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตใช้งานได้ตามที่ต้องการ การประกันคุณภาพเกิดจากปัจจัยสำคัญ 2 ประการ ได้แก่ *การควบคุมคุณภาพ (Quality Control)* ซึ่งเป็นหน้าที่ของผู้รับเหมา และ *การยอมรับในคุณภาพ (Quality Acceptance)* ซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับเจ้าของหรือตัวแทนฝ่ายเจ้าของ

การประกันคุณภาพในอดีตที่ผ่านมา เจ้าของงานส่วนมากทำการประกันคุณภาพโดยพึ่งความชำนาญประสบการณ์ของผู้ออกแบบและผู้รับเหมา ในปัจจุบันนี้งานก่อสร้างทางคอนกรีตสมัยใหม่ได้ก้าวหน้าไปเกินกว่าวิธีการที่เคยใช้ได้ ในอดีตจะตามได้ทัน นอกจากนี้ภาระหน้าที่ของผู้ออกแบบที่มีความชำนาญมีมากขึ้นจนต้องมอบหมายงานให้แก่ผู้ออกแบบอื่นๆ ที่มีความชำนาญในการตัดสินใจเฉพาะด้านไม่พอเพียง

ข้อกำหนด (Specification) ด้านงานคอนกรีตส่วนมากที่ผ่านมา มักจะกำหนดรายละเอียดวิธีการต่างๆ แทนที่จะกำหนดเป็นคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ บางครั้งยังกำหนดรายละเอียดการทำงานของผู้รับเหมา รวมไปถึงเครื่องมือที่ต้องใช้ในการผลิตคอนกรีต การที่ต้องระบุในข้อกำหนดเช่นนี้เนื่องจากยังไม่มีความรู้ที่เพียงพอในการนิยามคำว่าคุณภาพ ความรู้ในวิธีการทดสอบ วิธีการประเมินผลคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย

จากความพยายามที่จะกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายและค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการวัด โดยทั่วไปจะอาศัยประสบการณ์และดุลยพินิจมากกว่าจะใช้แนวคิดที่เป็นเหตุเป็น

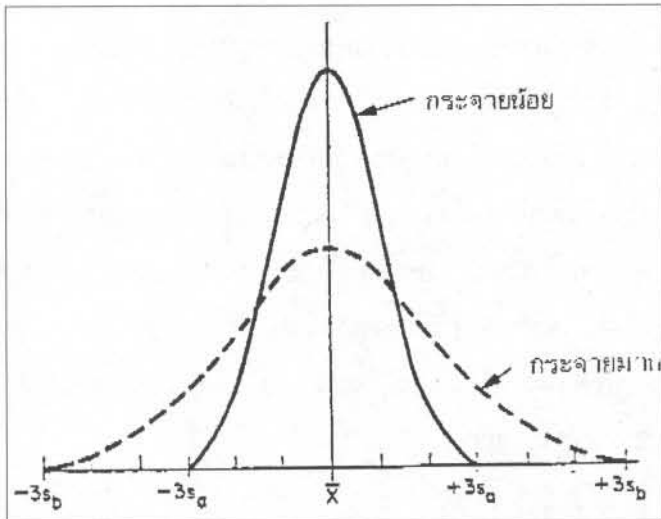
ผล อย่างไรก็ตามจากข้อกำหนดของงานบวักกับประสบการณ์อันชำนาญของผู้ออกแบบ และความร่วมมือของผู้รับเหมาเป็นผลให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีคุณภาพ แต่บางครั้งโครงสร้างที่ได้ก็มีคุณภาพต่ำกว่ากำหนด วิธีการตรวจสอบคุณภาพวัสดุในงานก่อสร้างทั่วไป มักจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างที่ถือเป็นตัวแทนของวัสดุในโครงสร้างนั้นๆ จากนั้นนำมาทดสอบและเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ หากผลทดสอบอยู่ในช่วงที่กำหนด ถือว่าวัสดุนั้นผ่านและยอมรับได้ แต่ถ้าผลทดสอบไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดวิศวกรจะต้องใช้ดุลยพินิจและตัดสินใจว่าวัสดุส่วนใหญ่ผ่านแบบยอมรับได้ (Substantially Comply) หรือวัสดุไม่ผ่านเกณฑ์อย่างแท้จริงจะต้องคัดทิ้ง (Reject) หรือจะต้องทดสอบใหม่ เนื่องจากการพิจารณาว่าวัสดุส่วนใหญ่ผ่านแบบยอมรับได้มักไม่มีเกณฑ์กำหนดที่แน่ชัด ดังนั้นจึงมีความเห็นแตกต่างกันระหว่างบุคคล หรือระหว่างงานประเภทต่างๆ ทำให้เกิดความสับสนและเกิดข้อโต้แย้งได้ จากงานวิจัยพบว่าโครงสร้างที่คุณภาพผ่านตามเกณฑ์โดยวิธีการควบคุมตามที่ปฏิบัติกันมาเมื่อตรวจสอบด้วยวิธีทางสถิติโดยการสุ่มเก็บตัวอย่างอย่างใกล้ชิด พบว่าโครงการถึงร้อยละ 30 ที่คุณภาพวัสดุอยู่นอกขอบเขตที่กำหนด

แนวความคิดการประกันคุณภาพด้วยสถิติ

สถิติเป็นเครื่องมือที่ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง สามารถใช้ประกอบการตัดสินใจภายใต้ระดับความมั่นใจที่กำหนด (Confidence level) สัญญาในการก่อสร้างสามารถใช้แนวคิดทางสถิติระบุคุณภาพที่ต้องการโดยกำหนดเป็นค่าเป้าหมาย

ให้แก่ผู้รับเหมา และระบุเกณฑ์การเป็นไปตามข้อกำหนด (Compliance Requirements) เป็นค่ามากกว่าหรือต่ำกว่า ค่าที่ยอมรับได้ (Tolerances) ค่ายอมรับได้ซึ่งกำหนดจากความต้องการของการออกแบบสามารถใช้สถิติเพื่อวิเคราะห์ความผันแปรของวัตถุดิบ กระบวนการ (Process) การเก็บตัวอย่าง (Sampling) ด้วยวิธีนี้ค่ายอมรับได้ที่กำหนดขึ้นจะถูกต้องตามความเป็นจริงและเป็นไปได้ในการปฏิบัติ สถิติสามารถใช้อธิบายสาเหตุของความผันแปรที่เกิดขึ้นตามปกติ รวมทั้งสามารถคาดการณ์การกระจายของผลทดสอบรอยค่าเฉลี่ยได้ด้วย ข้อกำหนดต่างๆ สามารถนำมาใช้ทั้งเพื่อการควบคุมให้อยู่ในระดับคุณภาพที่กำหนด และการควบคุมความผันแปรให้อยู่ในระดับที่กำหนด

สัญญาการก่อสร้างที่ใช้หลักสถิติใช้กันอย่างแพร่หลาย ในสหรัฐอเมริกาจนเริ่มเป็นสิ่งปกติทั่วไป การใช้วิธีทางสถิติอย่างเหมาะสม มีประโยชน์สำหรับโครงการที่ผลิตคอนกรีตปริมาณมากๆ หรือการผลิตวัสดุก่อสร้างอื่นๆ เช่น งานทางหลวง เชื้อขนขนาดใหญ่ พื้นสำหรับสนามบิน หากว่ามีการใช้สถิติอย่างเหมาะสมแล้วจะทำให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลอย่างมาก



ภาพที่ 1 เส้นโค้งปกติ

หลักสถิติเบื้องต้น

จากการวิจัยพบว่าเมื่อนำผลทดสอบวัสดุในงานก่อสร้างมารวบรวมเข้ากัน พบว่ามีการกระจายเป็นโค้งระฆังคว่ำ โดย

จะสมมาตรรอบค่ากลางที่เรียกว่า ค่าเฉลี่ย การกระจายของข้อมูลมากหรือน้อยดูได้จากรูปโค้งปกติว่าเส้นโค้งมีฐานกว้างหรือแคบ ถ้าข้อมูลกระจายมากเส้นโค้งจะมีฐานกว้าง แต่ถ้ากระจายน้อยจะมีฐานแคบ ดังแสดงในภาพที่ 1

ค่าทางสถิติและสัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับงานคอนกรีตได้แก่

1. ค่าเฉลี่ย แทนด้วยสัญลักษณ์ \bar{X}

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

เมื่อ X คือ ค่าหรือข้อมูลแต่ละข้อมูล

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่พิจารณา

2. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

$$s = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

แสดงถึงการกระจายของข้อมูลมากหรือน้อย ถ้าระดับการควบคุมดีข้อมูลจะกระจายน้อย s จะมีค่าต่ำ ถ้าการควบคุมไม่ดี s จะมีค่ามาก

3. ค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (Coefficient of Variation)

$$V = \frac{100 s}{\bar{X}}$$

4. ค่าพิสัย (Range)

$$R = X_{max} - X_{min}$$

X_{max} คือ ข้อมูลที่มีค่าสูงสุดในกลุ่ม

X_{min} คือ ข้อมูลที่มีค่าต่ำสุดในกลุ่ม

5. กำลังอัดประลัยที่ใช้ออกแบบ ใช้สัญลักษณ์ f'_c โดยทั่วไปจะเป็นกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แต่สามารถระบุเป็นอายุอื่น ๆ ได้
6. กำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการ ใช้สัญลักษณ์ f_{cr} ค่านี้กำหนดขึ้นมาเพื่อประกันว่ากำลังอัดคอนกรีต จะมีจำนวนคอนกรีตที่กำลังอัดต่ำกว่าที่ยอมให้ไม่เกินจำนวนที่ระบุ

การประยุกต์ใช้เส้นโค้งปกติกับงานคอนกรีต

ในโครงสร้างคอนกรีต ผลทดสอบกำลังอัดคอนกรีตต่ำ อาจพบได้เป็นครั้งคราว โดยที่สามารถยอมรับในค่านั้นได้หากกำลังอัดไม่ต่ำมากเกินไป (ต่ำเกินกว่า 35.2 กก./ตร.ซม. จากค่ากำลังอัดที่ออกแบบ f'_c) หรือคอนกรีตส่วนนั้นไม่ใช่โครงสร้างที่เป็นส่วนที่สำคัญตามที่ผู้ออกแบบกำหนด ในอีกด้านหนึ่งผลทดสอบกำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์กำหนดก็ไม่ใช่อุปสรรคว่าคอนกรีตในโครงสร้างทั้งหมดจะมีคุณภาพตามกำหนด เนื่องจากอาจจะมีคอนกรีตที่มีคุณภาพต่ำกว่าเกณฑ์แต่ไม่ได้สัมผัสตัวอย่างเพื่อทดสอบก็เป็นได้

ในการทดสอบหาลำลังอัดคอนกรีตจากการสุ่มเก็บตัวอย่างและนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ บอกให้ทราบถึงแนวโน้มคุณภาพคอนกรีตที่ผลิตและจัดส่งมาถึงหน่วยงานก่อสร้างเท่านั้น เทคนิคการทดสอบคอนกรีต การจัดคอนกรีตให้แน่น การบ่มคอนกรีต ก็มีผลต่อคุณภาพคอนกรีตในโครงสร้างด้วยเช่นกัน ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติจำนวนข้อมูลกำลังอัดคอนกรีตควรใช้ไม่ต่ำกว่า 30 ข้อมูลสำหรับคอนกรีตแต่ละส่วนผสม จากนั้นนำมาคำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อใช้คำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการ (f_{cr}) สำหรับการควบคุมงานคอนกรีต

ในส่วนของผู้ผลิตคอนกรีตมีหน้าที่ในการปรับส่วนผสมคอนกรีตให้มีกำลังอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ผลิตได้สูงกว่าค่าเฉลี่ย (f_{cr}) ที่ต้องการ เพื่อให้มั่นใจว่าคอนกรีตส่วนที่ได้เทไปแล้วในโครงสร้างคุณภาพรับได้ เมื่อนำผลทดสอบที่ใช้ในการควบคุมโครงการ

นั้นๆ มาเทียบกับค่าที่กำหนดในสัญญาก่อสร้าง

ในส่วนของผู้ควบคุมงาน คำนวณค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีต ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและสัมประสิทธิ์ความผันแปร (จากข้อมูลผลทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ผ่านๆ มา) โดยหากต้องการคำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการ (f_{cr}) เพื่อการตรวจสอบเทียบกับค่าที่ผู้ผลิตคอนกรีตคำนวณจะต้องใช้ข้อมูลกำลังอัดคอนกรีตที่ผลิตจากโรงงานแห่งเดียวกัน โดยเฉพาะค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัดเดียวกัน

เกณฑ์อ้างอิงในสัญญาที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ ACI 318 :

Building Code Requirements for Reinforced Concrete ซึ่งกล่าวไว้ว่า การผลิตคอนกรีตที่มีผลทดสอบอ้างอิงจากกำลังอัดที่ต่อเนื่องกันอย่างน้อย 10 ข้อมูล ภายใต้วัสดุและเงื่อนไขการผลิตเดียวกัน ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานใหม่จะต้องมีกำลังอัดเฉลี่ยเป็นไปตามค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการ (f_{cr}) โดยเป็นไปตามค่าที่มากกว่าเมื่อคำนวณด้วยสูตร ดังนี้

$$f_{cr} \geq f'_c + 1.34s$$

$$f_{cr} \geq f'_c + 2.33s - 35.2$$

- เมื่อ f'_c = กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ออกแบบ (กก./ตร.ซม)
- f_{cr} = กำลังอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
- s = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)

สมการข้างต้นกำหนดค่ากำลังอัดสูงกว่าที่ออกแบบไว้ โดยอาศัยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกำลังอัดคอนกรีตจากผลทดสอบที่ผ่านมา เพื่อใช้คาดเดาลำลังอัดคอนกรีตสำหรับโครงการใหม่ให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ เมื่อทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในขณะที่ก่อสร้าง สมการข้างต้นยังมาจากข้อกำหนดใน ACI 318 ในประเด็นที่ว่ากำลังอัดเฉลี่ยจากตัวอย่างทุกชุดของการทดสอบตัวอย่าง 3 ครั้งติดต่อกันจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ออกแบบ (f'_c) และจะต้องไม่มีตัวอย่างใด (ค่าเฉลี่ยจากตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง) ที่กำลังอัดต่ำกว่ากำลังอัดที่ใช้ออกแบบ (f'_c) เกินกว่า 35.2 กก./ตร.ซม.

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกำลังอัดคอนกรีตเกิดจากความผันแปรของหลายปัจจัยที่สำคัญๆ ได้แก่ ความผันแปรจากวิธี

ตารางที่ 1 มาตรฐานค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการควบคุมกำลังอัดคอนกรีต (ACI 214)

มาตรฐานการควบคุม	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม (กก./ตร.ซม.)	
	ทดสอบจากตัวอย่างจากหน่วยงาน	การทดสอบส่วนผสมใน Lab
ควรปรับปรุง	สูงกว่า 49.2	สูงกว่า 24.6
พอใช้	สูงกว่า 42.2 ถึงเท่ากับ 49.2	สูงกว่า 24.6 ถึงเท่ากับ 21.1
ดี	สูงกว่า 35.2 ถึงเท่ากับ 42.2	สูงกว่า 21.1 ถึงเท่ากับ 17.6
ดีมาก	สูงกว่า 28.1 ถึงเท่ากับ 25.2	สูงกว่า 17.6 ถึงเท่ากับ 14.1
ดีเลิศ	ต่ำกว่า 28	ต่ำกว่า 14.1

ตารางที่ 2 มาตรฐานสัมประสิทธิ์ความผันแปรจากการทดสอบ

มาตรฐานการควบคุม	ค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (ร้อยละ)	
	ควบคุมการทดสอบที่หน่วยงาน	การทดลองส่วนผสมใน Lab
ควรปรับปรุง	สูงกว่า 60	สูงกว่า 5.0
พอใช้	สูงกว่า 5.0 ถึงเท่ากับ 6.0	สูงกว่า 4.0 ถึงเท่ากับ 5.0
ดี	สูงกว่า 4.0 ถึงเท่ากับ 5.0	สูงกว่า 3.0 ถึงเท่ากับ 4.0
ดีมาก	สูงกว่า 3.0 ถึงเท่ากับ 4.0	สูงกว่า 2.0 ถึงเท่ากับ 3.0
ดีเลิศ	ต่ำกว่า 3.0	ต่ำกว่า 2.0

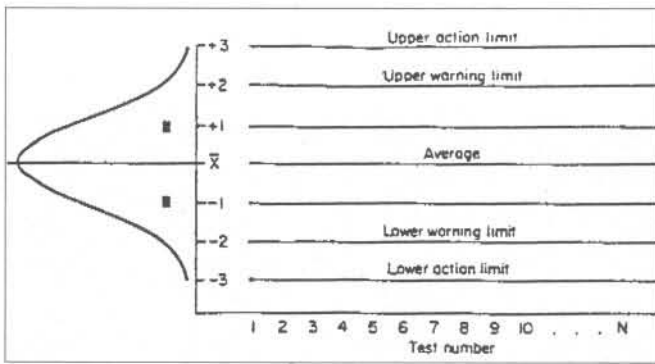
การสุ่มเก็บตัวอย่าง ความผันแปรจากวิธีการทดสอบ ความผันแปรจากวัสดุเอง ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ ดังนี้

$$s_o^2 = s_s^2 + s_t^2 + s_m^2$$

- เมื่อ s_o เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม
 - s_s เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดจากการสุ่มเก็บตัวอย่าง
 - s_t เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดจากการสุ่มการทดสอบ
 - s_m เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดจากคุณสมบัติวัสดุ
- ค่าที่ใช้ในการควบคุมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับกำลังอัดคอนกรีตแสดงในตารางที่ 1 และ 2

การใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับงานคอนกรีต

แผนภูมิควบคุม (Control Chart) เป็นเครื่องมือเบื้องต้นสำหรับประมวลผลทดสอบทั้งของคอนกรีตและวัสดุสำหรับงานคอนกรีต ลักษณะแผนภูมิทั่วไปจะเป็นกราฟในแนวนอน โดยจะมีเส้นแนวนอนต่างๆ กันหลายเส้น เส้นศูนย์กลางจะเป็นค่าเฉลี่ย เหนือเส้นกลางขึ้นไปเป็นระยะเท่ากับค่าที่ยอมรับได้ เรียกว่า เส้นขอบเขตบนที่ยอมรับได้ (Upper Acceptance Limit) เส้นที่อยู่ใต้เส้นกลางเป็นระยะเท่ากับค่าที่ยอมรับได้เรียกว่า เส้นขอบเขตล่างที่ยอมรับได้ (Lower Acceptance Limit)



ภาพที่ 2 แผนภูมิควบคุม

แผนภูมิลักษณะนี้ใช้สำหรับการคัดออกหรือยอมรับคุณภาพวัสดุก่อสร้าง สำหรับแผนภูมิควบคุมที่ใช้ควบคุมกระบวนการผลิตเนื่องจากเส้นค่าเฉลี่ยจะมีเส้นอีก 2 เส้น และข้างใต้จะมีเส้น 2 เส้น (ภาพที่ 2) เส้นบนและล่างที่ใกล้กับเส้นค่าเฉลี่ยใช้เป็นขอบเขตในการเตือน (Warning Limits) และเส้นถัดออกไปเป็นเส้นปฏิบัติการ (Action Limits) เส้นเหล่านี้จะห่างจากเส้นค่าเฉลี่ยเป็นจำนวนเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) สำหรับคอนกรีตโดยทั่วไปมักจะสนใจค่าต่ำสุด ดังนั้นเส้นขอบเขตการเตือนมีค่าเป็น

$$f_c' \text{ (หรือ } f_{cr} - 1.34s)$$

และเส้นปฏิบัติการมีค่าเป็น

$$f_c' \text{ (หรือ } f_{cr} - 2.33s + 35.2)$$

จากภาพที่ 2 จะเห็นว่าเส้นขอบเขตต่างๆ สัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) โดยทั่วไปเมื่อทำการลงจุด (ผลทดสอบ) บนแผนภูมิ และพบว่าจุดนั้นตกนอกเส้นการเตือน (Warning

Line) ผู้ผลิตจะต้องตรวจสอบกระบวนการที่ทำให้เกิดความผันแปรและแก้ไข แต่ถ้าปรากฏว่าจุดเลยเส้นปฏิบัติการ (Action Line) ผู้ผลิตจะต้องหยุดกระบวนการนั้น และปรับปรุงเพื่อตั้งให้กระบวนการเข้าสู่การควบคุม แผนภูมิการควบคุมสามารถบอกได้เพียงแต่ว่าเกิดปัญหาขึ้นแล้วในกระบวนการ แต่ไม่สามารถบอกถึงสาเหตุของปัญหาและเกิดปัญหาที่จุดใด (อ่านเพิ่มเติมได้จากหนังสือการแก้ไขปัญหาแบบ QC)

ACI 214 ใช้แผนภูมิควบคุมสำหรับกำลังอัดคอนกรีต เพื่อควบคุมคุณภาพคอนกรีต และควบคุมความผันแปรจากการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3

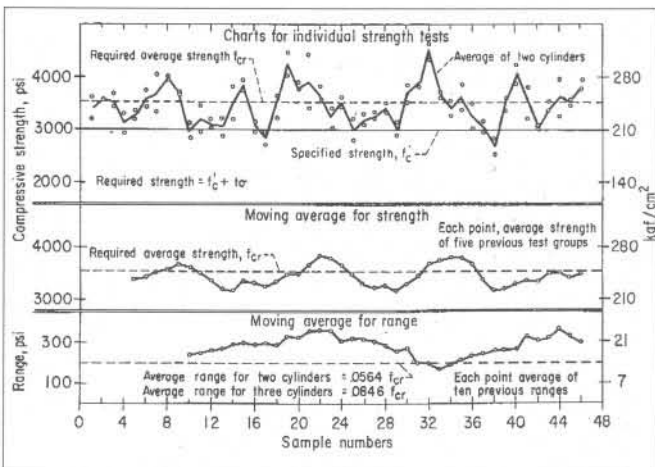
นอกจากนี้ ยังสามารถใช้แผนภูมิควบคุมคุณภาพในการผลิตหิน-ทราย ในงานคอนกรีตได้ด้วย

สรุป

บทความนี้กล่าวถึงเพียงแนวความคิดในการนำสถิติมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีต ซึ่งสถิติเป็นวิธีที่แพร่หลายสำหรับอุตสาหกรรมในทุกๆ ประเภทและอุตสาหกรรมคอนกรีตในต่างประเทศ แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในงานคอนกรีตสำหรับบ้านเรา หากมีการนำสถิติมาใช้ที่เหมาะสมแล้ว จะเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจสำหรับผู้ควบคุมงาน รวมทั้งสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตของผู้ผลิตวัสดุก่อสร้างอีกด้วย รายละเอียดผู้อ่านสามารถอ่านจากเอกสารอ้างอิงท้ายบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) วิธีทางสถิติ เพื่อการพัฒนาคุณภาพ
2. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) จากการแก้ปัญหาแบบคิวซี
3. American Concrete Institute, ACI 214-77-Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete



ภาพที่ 3 แผนภูมิควบคุมสำหรับงานคอนกรีต (จาก ACI 214-77)