บทที่ 2

หลักการ ทฤษฎี และแนวความคิด

ในขบวนการผลิตคอนกรีต ต้องพยายามผลิตคอนกรีตให้ได้กำลังต้านและมีคุณภาพสม่ำเสมออยู่ในระดับมาตรฐานที่ยอมรับ แต่กำลังต้านทานของคอนกรีตขึ้นอยู่กับตัวแปรมากมายหลายอย่าง ซึ่งอาจจำแนกตัวแปรผันที่สำคัญได้คือ (ก)วัสดุที่ใช้ทำคอนกรีต เช่น ส่วนขนาดคละขนาดและรูปร่าง ปริมาณความชื้นในหินและทรายที่อาจเปลี่ยนไป รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และสารผสมเพิ่ม (ข)วิธีการทำคอนกรีต ตั้งแต่เครื่องตวงวัด เครื่องผสม วิธีการลำเลียง การเท การจี้เขย่าคอนกรีตตลอดจนผีมือการทำงาน ที่อาจมีส่วนทำให้เกิดการแปรผัน และ(ค)ขบวนการทดสอบ ซึ่งไปรวมถึงการสุ่มตัวอย่าง การทำการทดสอบ และวิธีการการทดสอบแท่งคอนกรีตตัวอย่าง ดังนั้นคอนกรีตที่ผลิตได้ในแต่ละชุดหรือแต่ละรุ่นที่ผสม หรือแม้แต่ในรุ่นที่มีส่วนผสมอย่างเดียวกัน จึงมีกำลังต้านทานแตกต่างกันออกไปอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตาม หากสามารถควบคุมให้การแปรเปลี่ยนต่างๆดังกล่าวน้อยลงและอยู่ในเกณฑ์กำหนดระดับหนึ่งที่ต้องการ ก็จะทำให้เกิดความมั่นใจแก่ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องว่า คอนกรีตที่ผลิตนั้น มีกำลังและคุณภาพใช้งานตามที่พึงประสงค์

2.1 <u>ทฤษฎีทางสถิติและความน่าจะเป็น</u>

สถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา(ACI214)ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการการควบคุมคุณภาพและการประเมินผลการทดสอบคอนกรีต โดยประยุกต์จากหลักวิชาทางสถิติและทฤษฎีของความน่าจะเป็น กล่าวคือ สมมุติให้การกระจายของผลการทดสอบกำลังต้านทานของคอนกรีต เป็นรูปเส้นโค้งของการแจกแจงความถี่แบบปกติ(Normal หรือ Gaussian Distribution)โดยมีตัวแปรหลัก 2 ค่า คือ ค่าเฉลี่ย(mean: $\bar{x}$)และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(standard deviation:σ)ซึ่งสมการของเส้นโค้งปกติดังกล่าว คือ

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}] \qquad -\infty \leq x \leq \infty$$

นั่นคือ ถ้าให้ $x_1,x_2,x_3,\ldots,x_n$ เป็นค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 วันหรือ 28 วัน จำนวน n ตัวอย่างหรือตัวอย่าง ฉะนั้นตามวิธีการทางสถิติ จะหาค่าต่างๆเหล่านี้ได้คือ

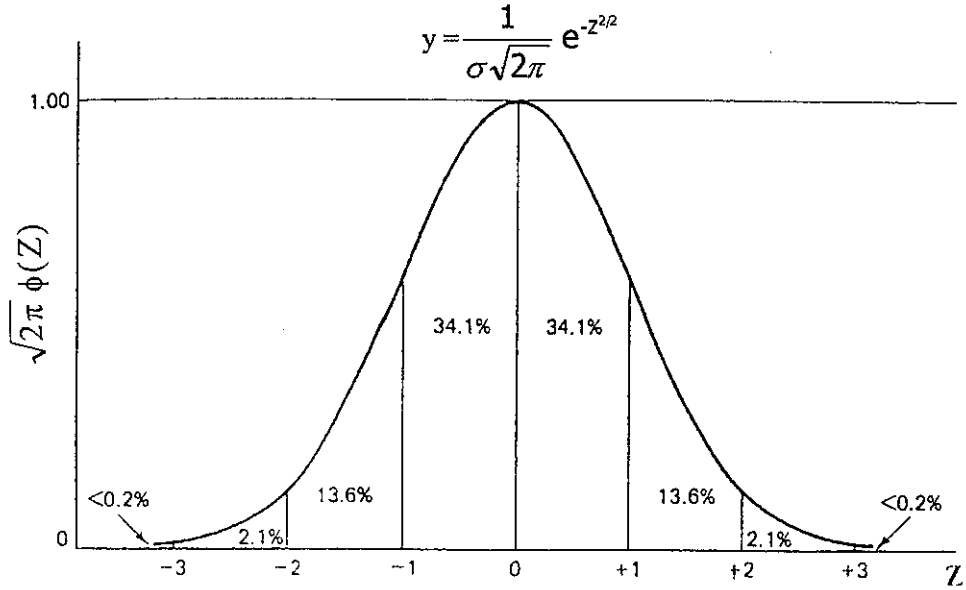
$$\text{ค่าเฉลี่ย}, \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \ldots\ldots x_n}{n} = \frac{\Sigma x}{n}$$

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน}, \sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(x-\bar{x})^2}{n-1}}$$

หรือ $$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x^2)}{n}}{n-1}}$$

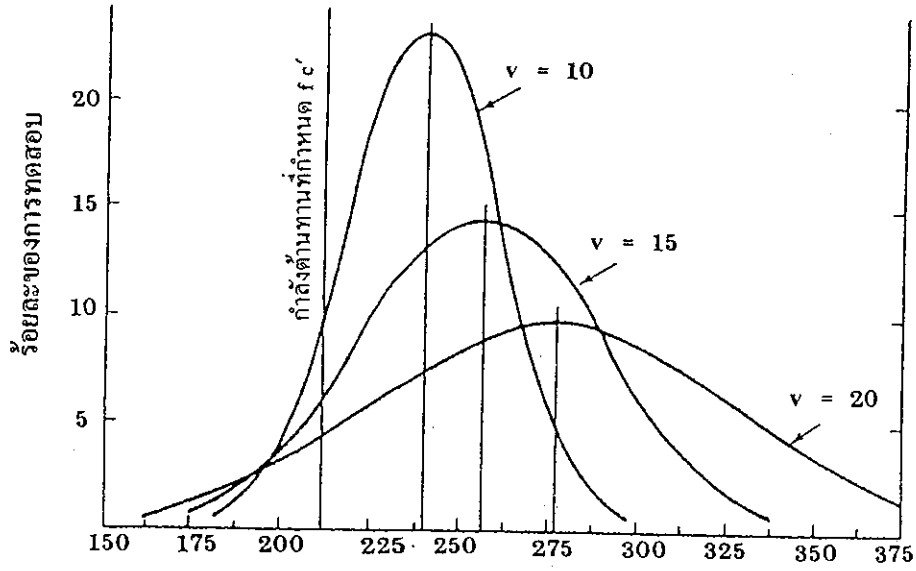
โดยที่ ความแปรปรวน(variance)มีค่าเท่ากับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง สัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน,V = $(\frac{\sigma}{\bar{x}} 100\%)$

ถ้าให้ $Z = (X - \bar{X})/\sigma$ เป็นค่าแจกแจงปกติมาตรฐาน(stand normal distribution)ซึ่งแสดงจำนวนเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่านั้นๆแตกต่างจากค่าเฉลี่ยดังนั้น จะเขียนสมการของเส้นโค้งของการแจกแจงความถี่แบบปกติได้เป็น



เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้เส้นโค้งปกติมาตรฐานเป็นรูประฆัง ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยค่าเฉลี่ยของ Z จะเท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Z = จะเท่ากับ 1 พื้นที่ทั้งหมดที่อยู่ใต้เส้นโค้งปกติมีค่าเท่ากับ 1 พื้นที่ทางขวามือของ Z = 0 และพื้นที่ทางซ้ายมือของ Z = 0 มีค่าเท่ากันคือ 0.5 การหาพื้นที่ใต้เส้นโค้งปกติมาตรฐานระหว่างค่า Z = 0 ถึง Z ใดๆ จะอาศัยตารางแสดงพื้นที่ให้เส้นโค้งปกติมาตรฐาน ซึ่งแสดงพื้นที่ใต้เส้นโค้งปกติระหว่างค่า Z = 0 และ Z = 0.00,0.01,...,3.88,3.89 เช่น พื้นที่ใต้เส้นโค้งปกติระหว่างค่า Z = 0 และ Z = 1 จะเท่ากับ 0.3413 หรือ 34.13% เป็นต้น

ตามทฤษฎีของความน่าจะเป็น พื้นที่ใต้เส้นโค้งปกติระหว่างจุดใดๆ สองจุดแสดงถึงโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่ข้อมูลใดๆ จะตกอยู่ในช่วงนั้น นั่นคือโอกาสที่กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตจะตกอยู่ภายในช่วง $\bar{X} \pm \sigma$ หรือ $\bar{X} \pm 2\sigma$ หรือ $\bar{X} \pm 3\sigma$ มีเท่ากับ 68.27% หรือ 95.45% หรือ 99.73% ตามลำดับ ซึ่งในทางกลับกันก็คือ โอกาสของแท่งคอนกรีตที่จะมีกำลังต่ำกว่าค่าเฉลี่ยที่กำหนดเท่ากับ 1 ใน 6.3 หรือ 1 ใน 44 หรือ 1 ใน 741 ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีช่วงของการพิจารณาพอเพียงสำหรับการควบคุมคุณภาพของคอนกรีต



รูปที่ 2 แสดงเส้นโค้งของการแจงแจงความถี่ปกติเมื่อสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนหรือความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าต่างๆกัน สำหรับงานก่อสร้างที่มีการควบคุมการผลิตคอนกรีตที่ดี ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน จะมีค่าน้อย นั่นคือ ค่ากำลังต้านทานที่ได้ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานเฉลี่ย(Average Strength) ซึ่งเส้นโค้งของการแจกแจงความถี่แบบปกติจะโค้งชันขึ้นและแคบลงแต่ถ้างานใดมีการควบคุมคุณภาพการผลิตไม่ดีนัก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตลอดจนสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน จะมีค่ามาก ทำให้เส้นโค้งของการแจกแจงความถี่ปกติเตี้ยลงและแบนกว้างออก

2.3 <u>การประยุกต์ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นกับกำลังต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการผลิต</u>

จากการนำวิธีการทางสถิติและทฤษฎีของความน่าจะเป็นมาประยุกต์ดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่า สำหรับมาตรฐานการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตในระดับหนึ่ง ค่ากำลังต้านทานของคอนกรีตที่ผลิตได้ อาจมีคอนกรีตจำนวนหนึ่งที่มีโอกาสให้ค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด แต่ค่าเฉลี่ยของกำลังต้านทานที่ผลิตได้ไม่ต่ำกว่าค่ากำลังที่กำหนด ดังนั้นในการที่จะผลิตคอนกรีตหรือหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต สถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา (ACI 214) จึงกำหนดให้พิจารณาจากกำลัง

ต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการ(Required Average Strength) โดยคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้ ซึ่งได้มาจากสมการของค่าแจกแจงปกติมาตรฐาน กล่าวคือ

$$f_{cr} = \frac{f_c'}{1 - tV}$$

$$f_{cr} = f_c' + t\sigma$$

ในเมื่อ f_{cr} = ค่ากำลังต้านทานโดยเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการผลิต

f_c' = ค่ากำลังต้านทานของคอนกรีตที่กำหนดใช้ในการออกแบบ

t = ค่ามาตรฐานซึ่งใช้ควบคุมโอกาสของแท่งทดสอบคอนกรีตที่จะมีกำลังต้านทานต่ำกว่าค่าที่กำหนด(f_c') ดังตารางที่

V = สัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน % (เพื่อความมั่นใจควรได้จากการทดสอบกำลังของแท่งคอนกรีตอย่างน้อย 30 ตัวอย่าง)

σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

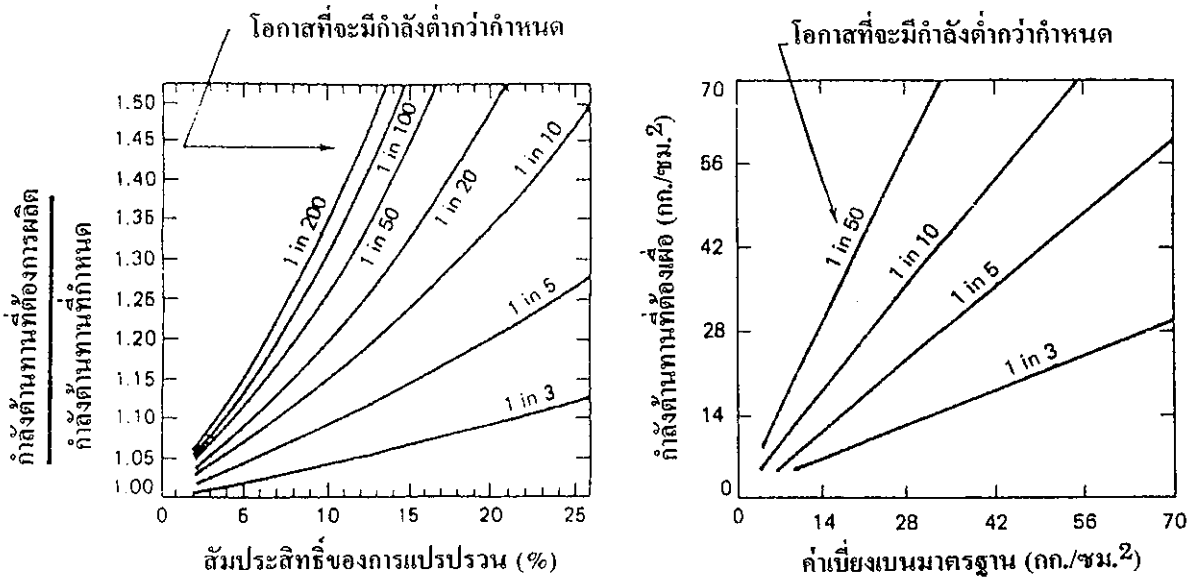
จากรูปที่ 2 ซึ่งแสดงการกระจายของกำลังต้านทานแรงอัด โดยสมมุติให้เป็นแบบเส้นโค้งปกติ เมื่อกำหนดค่ากำลังต้านทานแรงอัด (Specified Strength : f_c') เท่ากับ 210 กก. ต่อตาราง ซม. และสมมุติว่า แท่งคอนกรีตที่ทดสอบมีโอกาสที่จะให้กำลังต่ำกว่าค่าที่กำหนดเป็นจำนวน 1 ใน 10 (หรือ 10%) ถ้าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนเท่ากับ 10 , 15 และ 20% ตามลำดับ จะเห็นว่า กำลังต้านทานโดยเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องผลิตหรือที่จะนำไปใช้ออกแบบหาปฏิภาคส่วนผสม เมื่อคำนวณโดยใช้สมการ $f_{cr} = \frac{f_c'}{1 - tV}$ จะเท่ากับ 241, 260 , 282 กก.ต่อตาราง ซม. ตามลำดับ นั่นแสดงให้เห็นว่า หากมีการตรวจสอบและควบคุมการใช้วัสดุ และขบวนการทำคอนกรีตอย่างเข้มงวด กำลังของคอนกรีตที่ต้องผลิตก็เผื่อเพียงเล็กน้อยเท่าที่จำเป็น ในทำนองกลับกันหากการตรวจสอบและควบคุมขบวนการทำคอนกรีตไม่เข้มงวด กำลังของคอนกรีตที่จะต้องผลิตก็ต้องเผื่อมากขึ้นเกินความจำเป็น ทำให้เปลืองวัสดุมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้ราคาของคอนกรีตแพงขึ้นโดยใช่เหตุ ไม่เป็นการประหยัดเลย

ตารางที่ 1 ค่ามาตรฐาน t

ร้อยละของผลการทดสอบที่อยู่ในช่วง $\bar{X} \pm t\sigma$	โอกาสของแท่งคอนกรีตจะมีกำลังต่ำกว่าที่กำหนด	ค่า t*
40	3 ใน 10	0.52
50	2.5 ใน 10	0.67
60	2 ใน 10	0.84
68.27	1 ใน 6.3	1.00
70	1.5 ใน 10	1.04
80	1 ใน 10	1.28
90	1 ใน 20	1.65
95	1 ใน 40	1.96
95.45	1 ใน 44	2.00
98	1 ใน 100	2.33
99	1 ใน 200	2.58
99.73	1 ใน 741	3.00

*เมื่อจำนวนของแท่งทดสอบหรือชุดทดสอบเกินกว่า 30 แท่งหรือชุด

รูปที่ 3 เป็นกราฟสำเร็จสำหรับใช้หากำลังต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการผลิต(F_{CR}) ซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน หรือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและโอกาสของแท่งคอนกรีตที่จะมีกำลังต่ำกว่าค่าที่กำหนด(f_c')



ในกรณีที่มีข้อมูลเพียงพอเกี่ยวกับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนจากงานที่ได้กระทำมาในอดีต สถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา กำหนดให้ใช้ค่ามาตรฐาน t เท่ากับ 1.28 สำหรับการออกแบบอาการ คสล. โดยทฤษฎีกำลัง หรือคอนกรีตอัดแรง และใช้ค่า t เท่ากับ 0.84 สำหรับการออกแบบอาคาร คสล. โดยทฤษฎีใช้งาน นั่นคือให้หากำลังต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการผลิต โดยคิดว่าจะมีแท่งคอนกรีตตัวอย่าง 1 แท่งหรือ 2 แท่งใน 10 แท่งตัวอย่าง(นั่นคือ 10 % หรือ 20%)ที่จะมีโอกาสให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าค่าที่กำหนดได้ในการคำนวณออกแบบอาคาร คสล. ตามทฤษฎีกำลัง หรือตามทฤษฎีใช้งาน ตามลำดับ สำหรับงานก่อสร้างทั่วไปที่มีมาตรฐานการควบคุมคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ดี ค่าสัมประสิทธ์ของการแปรปรวนไม่ควรเกินกว่า 15% หรือค่าเบี่ยงเบนมาตบฐานไม่ควรเกินกว่า 42 กก./ซม.^{2}

1.ค่าเฉลี่ยของการทดสอบในแต่ละชุดที่ประกอบด้วยแท่งตัวอย่าง 3 แท่ง จะมีโอกาสให้กำลังต่ำกว่าที่กำหนด(f_c') ไม่เกิน 1 ใน 100 นั่นคือ

$$f_{CR} = f_c' + \frac{2.326\sigma}{\sqrt{3}} = f_c' + 1.3\sigma \text{ กก./ซม.}^2$$

2.ผลการทดสอบของแท่งตัวอย่างแต่ละแท่ง จะมีโอกาสให้กำลังต่ำกว่า f_c' - 35 กก./ซม.^{2} ไม่เกิน 1 ใน 100 นั่นคือ

$$f_{CR} = f_c' - 35 + 2.33\sigma \text{ กก./ซม.}^2$$

จากเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น พบว่า

ก)เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับหรือต่ำกว่า 35 กก./ซม.^{2} ให้หา f_{CR} จากสมการ

$$f_{CR} = f_c' + 1.34\sigma \text{ กก./ซม.}^2$$

ข)เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงกว่า 35 กก./ซม.^{2} ให้หา f_{CR} จากสมการ

$$f_{CR} = f_c' - 35 + 2.33\sigma \text{ กก./ซม.}^2$$

มาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของอเมริกา(ACI 318) ได้ให้ข้อกำหนดเพิ่มเติมว่า หากมีผลการทดสอบของแท่งตัวอย่างอย่างน้อยเท่ากับ 15 ตัวอย่าง แต่ไม่ถึง 30 ตัวอย่าง ให้คูณค่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่จะใช้สมการข้างต้นด้วยตัวเลขต่อไปนี้

เมื่อมีผลการทดสอบ 15 ตัวอย่างให้คูณค่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วย 1.16

เมื่อมีผลการทดสอบ 20 ตัวอย่างให้คูณค่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วย 1.08

เมื่อมีผลการทดสอบ 25 ตัวอย่างให้คูณค่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วย 1.03

เมื่อมีผลการทดสอบ 30 ตัวอย่างให้คูณค่าของความเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วย 1.00

ในกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบอยู่เลยหรือมีผลการทดสอบไม่ถึง 15 ตัวอย่างมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของอเมริกา (ACI 318)ได้ให้ข้อกำหนดเพื่อหากำลังต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการ ดังต่อไปนี้

ถ้ากำหนด f_c' ไม่เกิน 210 กก./ซม.^{2} กำลังต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการ

$f_{CR} = f_c' + 70$ กก./ซม.^{2}

ถ้ากำหนด f_c' ระหว่าง 210 ถึง 350 กก./ซม.^{2} กำลังต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการ

$f_{CR} = f_c' + 84$ กก./ซม.^{2}

ถ้ากำหนด f_c' เกินกว่า 350 กก./ซม.^{2} กำลังต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการ

$f_{CR} = f_c' + 98$ กก./ซม.^{2}

2.4 การวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่ได้กระทำอย่างต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการหรือในห้องทดสอบสนาม สามารถนำมาประเมินผลหรือวิเคราะห์ผลของการควบคุมการปฏิบัติงานว่ามีมาตรฐานการทำงานอยู่ในระดับใด โดยอาศัยข้อเสนอแนะของสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา(ACI 214)

แต่เดิมสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา(ACI 214) ได้กำหนดระดับมาตรฐานในการประเมินผลเพื่อควบคุมคุณภาพของคอนกรีตโดยอาศัยสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนเพียงอย่างเดียว ในปัจจุบัน สถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกาได้กำหนดระดับมาตรฐานในการประเมินการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตโดยใช้ทั้งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการแปรผันโดยรวมและใช้สัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนสำหรับการแปรผันในขบวนการทดสอบ ดังตารางที่ โดยรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานก่อสร้างหลายๆหน่วยงานที่ก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตเมื่อทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 2 มาตรฐานการควบคุมคุณภาพคอนกรีต (ACI 214)

การแปรผันโดยรวม(Overall Variation)					
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(กก.ต่อ ตารางซม.)					
ระดับการทำงาน	ดีเยี่ยม	ดีมาก	ดี	พอใช้	ใช้ไม่ได้
งานก่อสร้างทั่วไป	ต่ำกว่า 28	25-35	35-42	42-49	สูงกว่า 49
งานทดสอบในห้องปฏิบัติการ	ต่ำกว่า 14	14-18	18-21	21-25	สูงกว่า 25
การแปรผันในขบวนการทดสอบ(Within-Test Varivation)					
สัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน(%)					
ระดับการทำงาน	ดีเยี่ยม	ดีมาก	ดี	พอใช้	ใช้ไม่ได้
งานทดสอบในสนาม	ต่ำกว่า 3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	สูงกว่า 6.0
งานทดสอบในห้องปฏิบัติการ	ต่ำกว่า 2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	สูงกว่า 5.0

การวิเคราะห์และประเมินผลการแปรผันโดยรวม ได้จากการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดทั้งหมด แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดจากตารางที่ ส่วนการแปรผันในบวนการทดสอบ จะต้องพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบ

ก่อนโดยขึ้นกับค่าเฉลี่ยของพิสัย(Range)โดยรวมและจำนวนแท่งทดสอบในแต่ละชุด เมื่อได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบแล้วจึงจะคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนในขบวนการทดสอบนั้นๆได้

ถ้า R = พิสัย(Range) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละชุดของการทดสอบ (การทดสอบในแต่ละชุดอาจประกอบด้วยแท่งตัวอย่าง 2 หรือ 3 แท่ง)

ดังนั้น $\sigma_1 = \frac{1}{d_2}\bar{R}$

ซึ่งจะได้ $V_1 = \frac{\sigma_1}{\bar{X}} \times 100$

โดยที่ σ_1 = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบ

$1/d_2$ = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับจำนวนของแท่งทดสอบในแต่ละชุด ดังตาราง

$\bar{R}$ = ค่าเฉลี่ยของพิสัย(โดยรวม)

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของแท่งทดสอบ(โดยรวม)

V_1 = สัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนในขบวนการทดสอบ

ตารางที่ 3 เพื่อใช้คำนวณในขบวนการทดสอบ

จำนวนของแท่งทดสอบในแต่ละชุด	d_2	$1/d_2$
2	1.128	0.8865
3	1.693	0.5907
4	2.059	0.4857
5	2.326	0.4299
6	2.534	0.3946
7	2.704	0.3698
8	2.847	0.3512
9	2.970	0.3367
10	3.078	0.3249

อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์โดยใช้ตัวเลขเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอเพราะไม่สามารถเห็นภาพรวมของการแปรเปลี่ยนคุณภาพคอนกรีตได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการคำนวณทางตัวเลข จะได้แต่เพียงว่าคอนกรีตมีกำลังอัดเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์กำหนด แต่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากเกินกว่าเกณฑ์กำหนด หรือในทางกลับกันอาจคำนวณได้ว่าคอนกรีตกำลังอัดเฉลี่ยได้อยู่ในเกณฑ์กำหนด

แต่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์กำหนด เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถรู้ได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของงานในช่วงใดบ้างของการก่อสร้าง แต่หากทำการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องและนำผลมาเขียนกราฟจะทำให้ทราบถึงช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น ตลอดจนสาเหตุขอการแปรเปลี่ยนเมื่อได้ตรวจสอบเทียบกับระเบียนหรือรายงานที่ได้กระทำมาในขั้นการตรวจสอบหรือควบคุมงาน ทำให้สามารถดำเนินการแก้ไขข้อบกพร่องได้

กราฟควบคุมคุณภาพคอนกรีต(Quality Control Chart) มีทั้งสิน 3 แบบดังแสดงในรูปที่ ซึ่งเขียนแสดงความสัมพันธ์ต่างๆกับจำนวนของแท่งทดสอบหรือการทดสอบ ที่เขียนทางแกนนอนของรูปที่แสดง

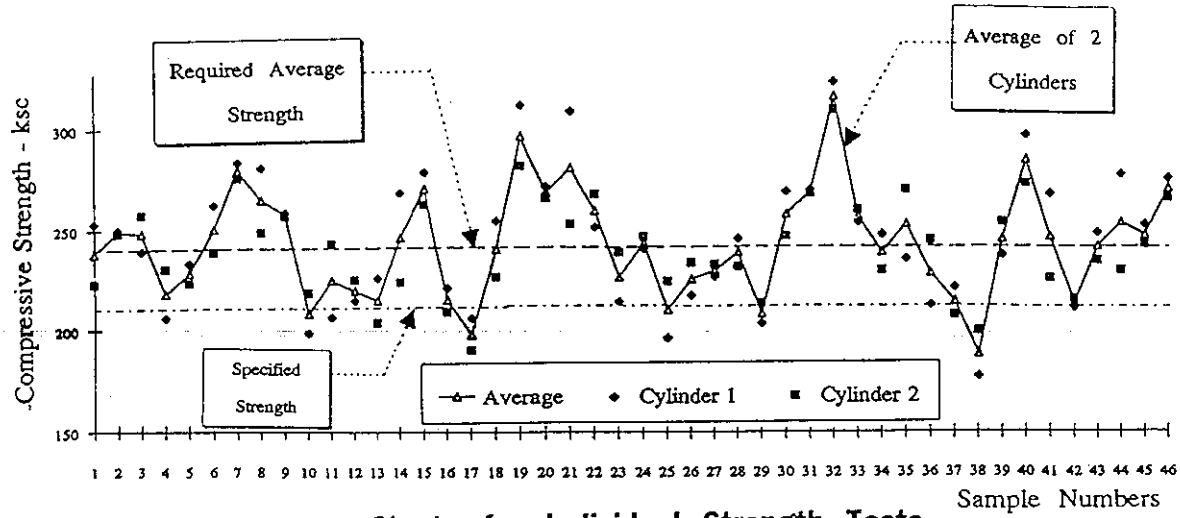
กราฟแบบที่ 1 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตแต่ละแท่งที่ทดสอบได้หรือกำลังอัดเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละชุดของการทดสอบ

กราฟแบบที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยของกำลังอัดสะสมที่ได้ทดสอบมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อแสดงแนวโน้มของค่าเฉลี่ยของกำลังอัด ตลอดจนช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัด

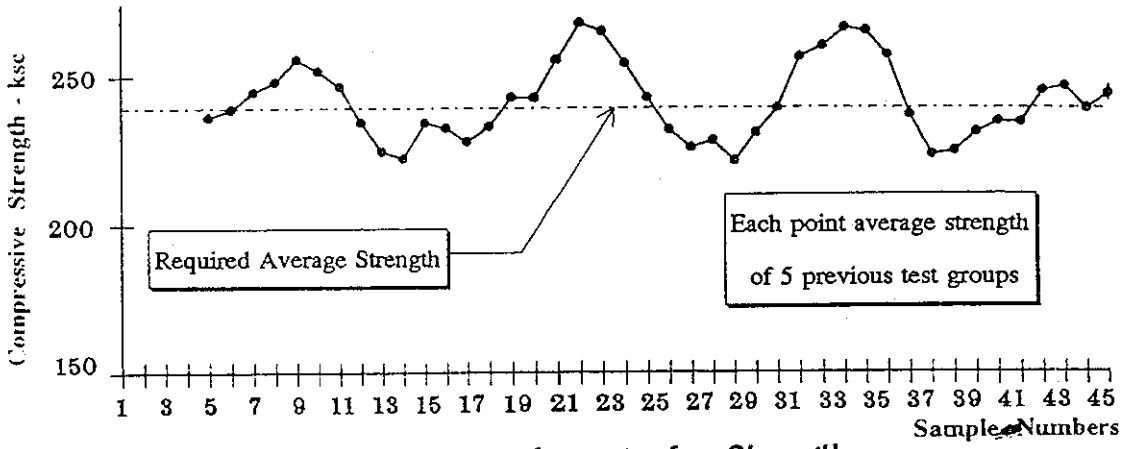
กราฟแบบที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยของพิสัยสะสมที่ได้ทดสอบมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อแสดงแนวโน้มของค่าเฉลี่ยของพิสัย ตลอดจนช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของขบวนการทดสอบ

จุดต่างๆที่ปรากฏในรูปที่ 4 (ก) เป็นค่ากำลังของคอนกรีตแต่ละแท่งที่ทดสอบได้ ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดในแต่ละชุดที่ทดสอบ(ในที่นี้ใช้ ตัวอย่าง 2 แท่ง) แสดงเป็นเส้นกราฟ ซึ่งจะเห็นว่ามีทั้งเส้นขึ้นและเส้นลงกระจัดกระจายทั่วไป ในรูปนี้ได้แสดงกำลังต้านทานของคอนกรีตที่กำหนดและกำลังต้านทานเฉลี่ยของคอนกรีตที่ต้องการไว้ด้วย ทำให้เห็นจำนวนที่แท่งทดสอบมีกำลังต่ำกว่าที่กำหนด อย่างไรก็ดีกราฟในรูปที่ มิได้แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงกำลังของคอนกรีตอย่างชัดเจน

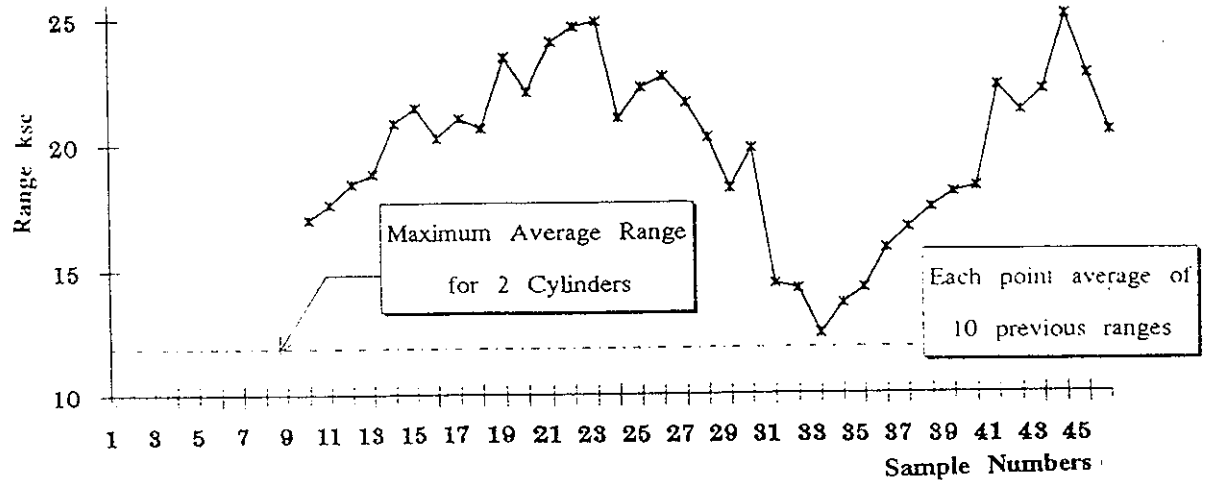
รูปที่ 4 (ข) เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของกำลังอัดสะสมเมื่อทดสอบต่อเนื่องโดยแต่ละจุดเป็นค่าลี่ยของกำลังอัดจำนวน 5 ค่าที่ทดสอบต่อเนื่องกัน(อาจพิจารณาโดยใช้ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดจำนวน 2 หรือ 3 ค่าที่ทดสอบต่อเนื่องกันก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนด) จะเห็นว่า กราฟที่ได้มีความต่อเนื่องกันโดยตลอด มีทั้งส่วนที่โค้งขึ้นซึ่งแสดงถึงกำลังของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและส่วนที่โค้งลงซึ่งแสดงว่ากำลังของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง ทำให้เห็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดคอนกรีตได้อย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อตรวจพบสาเหตุก็จะได้หาวิธีแก้ไขต่อไปในรูปนี้ค่ากำลังต้านทานของคอนกรีตที่กำหนดจะเป็นขีดจำกัดล่างและเมื่อลากเส้นแสดงกำลังต้านทานของคอนกรีตที่ต้องการก็จะทำให้สังเกตุได้ว่า คอนกรีตที่ผลิตได้มีคุณภาพเป็นอย่างไร จะต้องดำเนินการปรับปรุงแก้ไขหรือไม่



(ก) **Charts for Individual Strength Tests**



(ข) **Moving Average for Strength**



(ค) **Moving Average for Range**

รูปที่ 4 การควบคุมคุณภาพคอนกรีตด้วยกราฟ

รูปที่ 4 (ค) เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพิสัยสะสมเมื่อทดสอบอย่างต่อเนื่องโดยแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยของพิสัยจำนวน 10 ค่าที่ได้จากการทดสอบต่อเนื่องกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเส้นตรงที่แสดงถึงค่าที่ได้จากการทดสอบต่อเนื่องกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเส้นตรงที่แสดงถึงค่าที่ยอมให้ของพิสัยเฉลี่ยที่มากที่สุดสำหรับการควบคุมคุณภาพระดับหนึ่ง จะทำให้เห็นถึงขบวนการของการทดสอบว่าดีหรือไม่เพียงใด จะต้องพิจารณาดำเนินการปรับปรุงแก้ไขหรือไม่

ค่าพิสัยเฉลี่ยของคอนกรีตแต่ละชุดที่นำมาทดสอบเขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\overline{R_m} = f_{cr} V_1 d_2$$

ในเมื่อ $\overline{R_m}$ = พิสัยเฉลี่ยในขบวนการทดสอบ

V_1 = สัมประสิทธิ์ของการแปรปรวนในขบวนการทดสอบ

d_2 = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับจำนวนของแท่งทดสอบในแท่งทดสอบในแต่ละชุดตารางที่

ถ้าระดับมาตรฐานของการควบคุมขบวนการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ดี ค่า V_1 ไม่ควรเกินกว่า 5% ดังนั้นพิสัยเฉลี่ยควรเท่ากับ

$\overline{R_m} = (0.05 \times 1.128) f_{cr} = 0.0564 f_{cr}$ สำหรับคอนกรีต 2 แท่ง ต่อชุด

$\overline{R_m} = (0.05 \times 1.693) f_{cr} = 0.0846 f_{cr}$ สำหรับคอนกรีต 3 แท่ง ต่อชุด

หากผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า คอนกรีตมีคุณภาพไม่เป็นไปตามเกณฑ์กำหนด ให้ตรวจสอบเกี่ยวกับการสุ่มตัวอย่างและขบวน(เทคนิค)การทดสอบเป็นลำดับแรก กล่าวคือ การทดสอบอาจไม่เป็นไปตามมาตรฐานของการทดสอบ หรือไม่มีการปรับแก้เครื่องทดสอบก่อนดำเนินการทดสอบ หรือใช้เครื่องทดสอบไม่เหมาะสม ถ้าเป็นเพราะสาเหตุนี้และไม่มีเหตุผลอื่นที่จะไม่ยอมรับก็อาจทำการทดสอบคอนกรีตในที่ที่ก่อสร้างอีกครั้ง เพื่อให้เกิดความมั่นใจในคุณภาพ

ทำนองเดียวกัน ต้องตรวจสอบ วัสดุต่างๆและเครื่องตวงวัด เพื่อให้แน่ใจว่า วัสดุที่นำมาใช้เป็นไปตามข้อกำหนด การตวงวัดและส่วนผสมถูกต้อง ถ้าเป็นเพราะสาเหตุนี้ก็อาจปรับปรุงการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมมีการตรวจสอบและควบคุมการใช้วัสดุให้เข้มงวดขึ้น

ในกรณีที่ไม่อาจหาสาเหตุได้แน่ชัด ก็อาจจำเป็นต้องทำการทดสอบคอนกรีตของส่วนโครงสร้างนั้นๆ โดยอาจใช้การทดสอบโดยวิธีไม่ทำลายหรือโดยการเจาะคอนกรีตแล้วนำชิ้นตัวอย่างมาทดสอบหรือทำการทดสอบโครงสร้างโดยให้รับน้ำหนักบรรทุกจริง