หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การวิเคราะห์เชิงสถิติของสูตรการรับแรงเฉือน V_{ci} ตามมาตรฐาน ACI และสูตรการรับแรงเฉือน V_{cip} ที่เสนอ สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่ใช่คานเชิงประกอบ

เพื่อให้ทราบว่าสูตรการรับแรงเฉือน V_{ci} ตามมาตรฐาน ACI 318-71 (และแก้ไขเปลี่ยนแปลงปี ค.ศ. 1973 และ 1974) และสูตรการรับแรงเฉือน V_{cip} ที่เสนอจะทำนายการรับแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน จากการทดลองได้ถูกต้องเพียงไร จึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองกับสูตรการรับแรงเฉือนดังกล่าวดังนี้

3.1 แหล่งที่มาของข้อมูล

ข้อมูลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ได้จากการทดลองที่มหาวิทยาลัย Illinios เมื่อปี ค.ศ. 1952-1956 สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน[23] และปี ค.ศ. 1957-1965 สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน[20]

3.2 ลักษณะของข้อมูล

คานทุกคานที่นำมาวิจัยมีการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน ซึ่งแยกออกได้ดังนี้

3.2.1 คานคอนกรีตอัดแรงประเภทที่ไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือนเป็นคานช่วงเดียวธรรมดา จำนวน 88 คาน ขนาดรูปหน้าตัดภายนอกกว้างประมาณ 6 นิ้ว สูงประมาณ 12 นิ้ว มีช่วงคาน 9 ฟุต จำนวน 84 คาน และช่วงคาน 7 ฟุต จำนวน 4 คาน เหล็กเสริมอัดแรงวางอยู่ในแนวเส้นตรง ประกอบด้วยคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 39 คาน รูปตัว I มีอกคานหนา 3 นิ้ว จำนวน 30 คาน และมีอกคานหนา 1.75 นิ้วจำนวน 19 คาน คอนกรีตมีกำลังประลัยตั้งแต่ 1750 ถึง 7990 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนเหล็กเสริม

อัตราแรงแปรค่าตั้งแต่ 0.0010 ถึง 0.0096 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมแรงดึงสูงมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 136,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบเป็นจุด (1 จุดหรือ 2 จุด) อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนแปรค่าระหว่าง 2.4 ถึง 5.4 คุณสมบัติต่าง ๆ ของคานตามตารางที่ ก.1 - ก.2 และรูปที่ ก.1

3.2.2 คานคอนกรีตอัดแรงประเภทที่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือนเป็นคานช่วงเดียวธรรมดา จำนวน 67 คาน ขนาดของรูปหน้าตัดภายนอกกว้างประมาณ 6 นิ้ว สูงประมาณ 12 นิ้ว ทั้งหมดมีช่วงคาน 9 ฟุต เหล็กเสริมอัดแรงวางอยู่ในแนวเส้นตรงประกอบด้วยคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 4 คาน คานรูปตัว I ที่มีอกคานหนา 3 นิ้ว จำนวน 42 คาน และอกคานหนา 1.75 นิ้ว จำนวน 21 คาน คอนกรีตมีกำลังประลัยตั้งแต่ 2420 ถึง 7620 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนเหล็กเสริมอัดแรงแปรค่าตั้งแต่ 0.047 ถึง 0.713 เปอร์เซนต์ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมแรงสูงมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 128,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด (1 จุดหรือ 2 จุด) อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนแปรค่าระหว่าง 2.3 ถึง 5.4 คุณสมบัติต่าง ๆ ของคานแสดงไว้ในตารางที่ ก.3 - ก.4 และรูปที่ ก.1

3.3 <u>การวิเคราะห์เชิงสถิติของการรับแรงเฉือนจากการทดลองเปรียบเทียบกับการรับแรงเฉือนจากการคำนวณตามสูตรของมาตรฐาน ACI ฯลฯ และสูตรที่เสนอ</u>

จากข้อมูลผลของการทดลองดังกล่าวได้นำค่าการรับแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่า จากสูตร V_{ci} ตามสมการ (2.8) และสูตร V_{cip} ตามสมการ (2.15) โดยวิเคราะห์หาค่าเชิงสถิติและแผนภูมิแจกแจงความถี่ฮิสโตกรัม (Histogram)

ค่าเชิงสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้มีค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและสัมประสิทธิการผันแปร ซึ่งหาได้ดังนี้

ให้ x เป็นค่าของอัตราส่วนของแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน จากการทดลอง V_{cr} ต่อแรงเฉือนที่คำนวณจากสูตร V_{ci} หรือ V_{cip}

ให้ $\bar{x}$ เป็นค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน ที่ได้จากการทดลอง V_{cr} ต่อแรงเฉือนที่คำนวณจากสูตร V_{ci} หรือ V_{cip}

นั่นคือ $\bar{X} = \frac{\Sigma X_n}{n}$ ..... (3.1)

โดยที่ n เป็นจำนวนข้อมูล

ให้ SD เป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใช้วัดการกระจายออกของอัตราส่วนของแรงเฉือน V_{cr} ต่อแรงเฉือนที่คำนวณจากสูตร V_{ci} หรือ V_{cip}

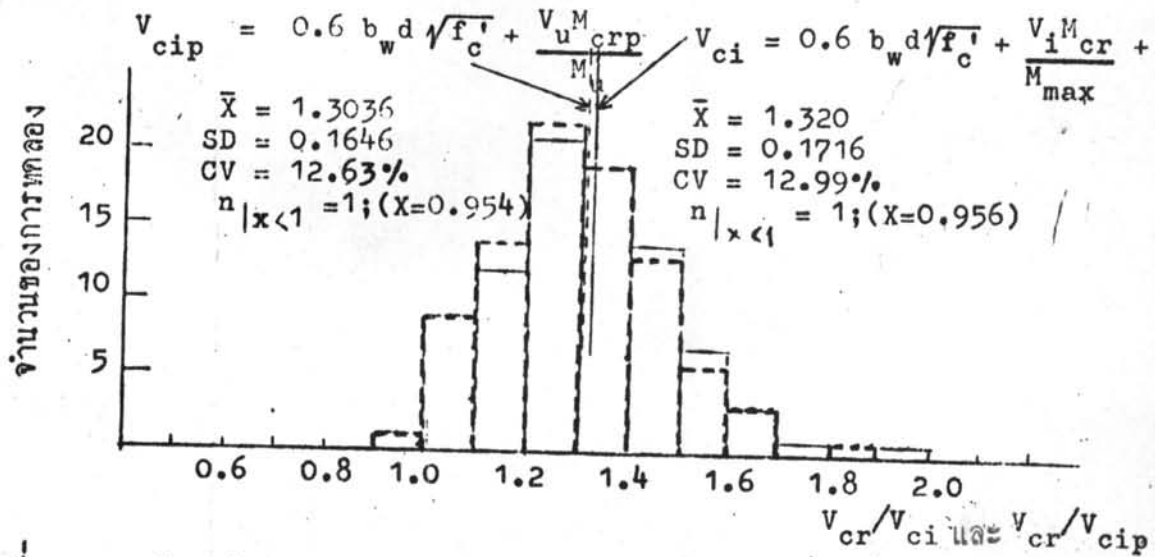
นั่นคือ $SD = \sqrt{\frac{\Sigma X^2}{n} - \bar{X}}$ ..... (3.2)

ให้ CV เป็นค่าสัมประสิทธิการผันแปร คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคิดเป็นร้อยละของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของแรงเฉือน V_{cr} ต่อแรงเฉือนที่คำนวณจากสูตร V_{ci} หรือ V_{cip}

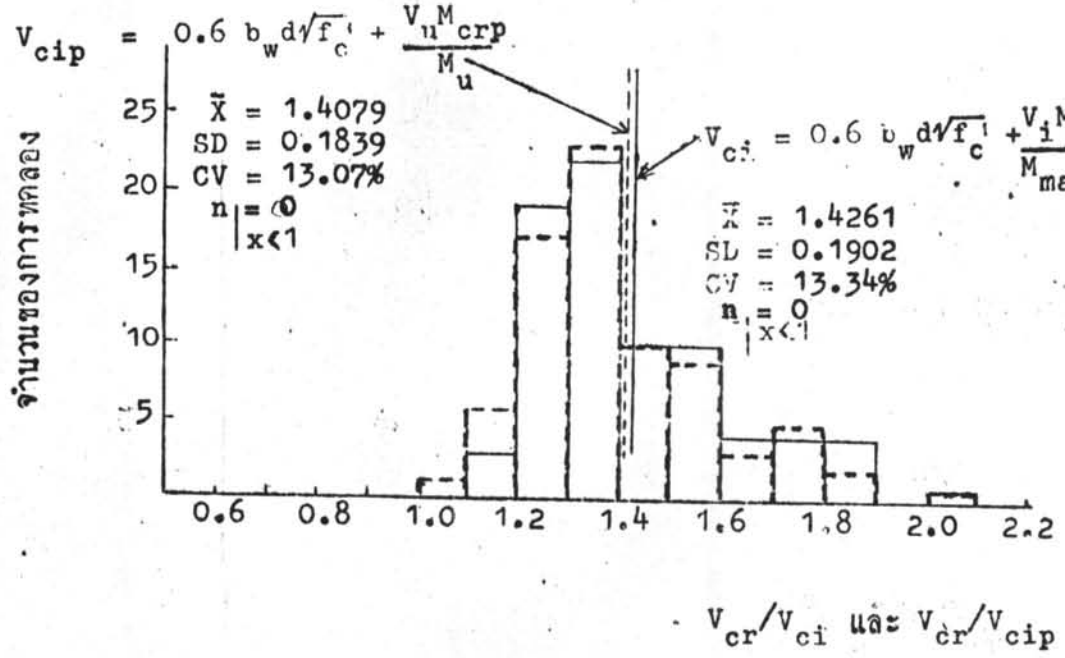
นั่นคือ $CV = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100$ .....(3.3)

และ $n_{|x<1}$ คือจำนวนของ x ที่มีค่าน้อยกว่า 1

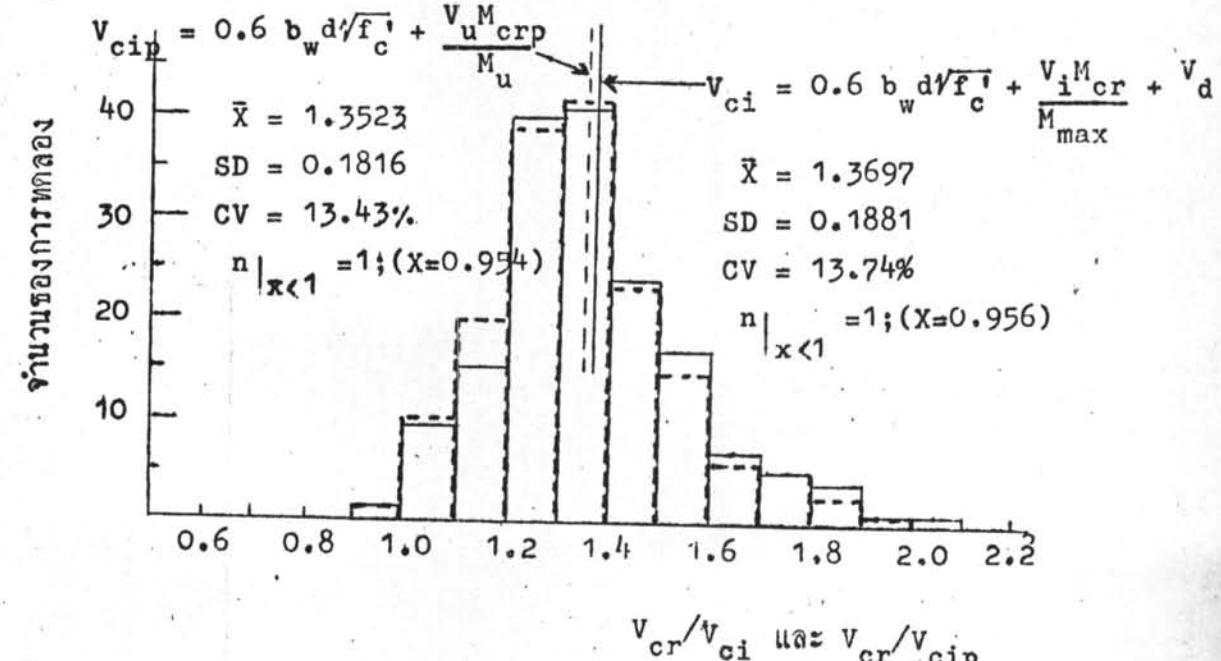
ผลของการวิเคราะห์นำมาเขียนเป็นรูปฮิสโตกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 - 3.3 พร้อมทั้งค่าเชิงสถิติที่วิเคราะห์ได้



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบผลของการทำนายการรับแรงเฉือน V_{cr} ต่อ V_{ci} (เส้นทึบ) หรือ V_{cip} (เส้นประ) สำหรับคานคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบผลของการทำนายการรับแรงเฉือน V_{cr} ต่อ V_{ci} (เส้นทึบ) หรือ V_{cip} (เส้นประ) สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีเหล็กเสริมตานแรงเฉือน



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบผลของการทำนายการรับแรงเฉือน V_{cr} ต่อ V_{ci} (เส้นทึบ) หรือ V_{cip} (เส้นประ) สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงทั้งที่มีและไม่มีเหล็กเสริมตานแรงเฉือน

ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ สูตรของ ACI ตามสมการ (2.8) และสูตรที่เสนอตามสมการ (2.15) สามารถทำนายการรับแรงเฉือนได้ใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ทำนายได้เกือบจะเป็นค่าต่ำสุด ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองจะสูงกว่าค่านี้ แต่ในกรณีที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน มีคาน 1 ตัวที่มีค่าการทดลองน้อยกว่าค่าการทำนายของทั้งสองสูตร โดยมีค่า $\frac{V_{cr}}{V_{ci}} = 0.956$ และ $\frac{V_{cr}}{V_{cip}} = 0.954$ ซึ่งถือได้ว่าจัดอยู่ในค่าขอบเขตต่ำสุด ผลการวิเคราะห์ของทั้งสองสูตรได้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองต่อการทำนายของสูตรอยู่ระหว่าง 1.3 - 1.4 สัมประสิทธิ์ของการผันแปรอยู่ระหว่าง 12.5 - 13.5 เปอร์เซนต์

3.4 เปรียบเทียบสูตรการรับแรงเฉือนเนื่องการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน ตามมาตรฐาน ACI - 318-71 กับสูตรที่เสนอ

เพื่อให้ทราบว่าสูตรที่เสนอจะให้ผลลัพธ์ของการทำนายค่าแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือนแตกต่างกับสูตรการรับแรงเฉือน V_{ci} ตามมาตรฐาน ACI 318-71 ฯลฯ อย่างไรบ้าง จึงได้นำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์เชิงสถิติเปรียบเทียบระหว่างสูตรการรับแรงเฉือน V_{ci} กับสูตรที่เสนอ V_{cip} ผลของการเปรียบเทียบมีดังนี้

จากข้อมูลของคานคอนกรีตอัดแรงประเภทไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน

ค่าเฉลี่ยของ $\frac{V_{ci}}{V_{cip}}$ = 0.9878

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.0095

สัมประสิทธิ์การผันแปร = 0.960%

จากข้อมูลของคานคอนกรีตอัดแรงประเภทที่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน

ค่าเฉลี่ยของ $\frac{V_{ci}}{V_{cip}}$ = 0.9876

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.0095

สัมประสิทธิ์การผันแปร = 0.966%

เมื่อรวมข้อมูลของคานคอนกรีตอัดแรงทั้งประเภทที่ไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน

และมีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน

ค่าเฉลี่ยของ $\frac{V_{ci}}{V_{cip}}$ = 0.9876

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.0104

สัมประสิทธิ์การผันแปร = 1.056%

ผลของการเปรียบเทียบแรงเฉือนจากสูตรที่เสนอ (V_{cip}) สามารถทำนายค่าแรงเฉือนที่รับโดยเนื้อคอนกรีตเนื่องจากเกิดการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือนได้ใกล้เคียงกับค่าแรงเฉือน (V_{ci}) ตามมาตรฐาน ACI 318-71 ฯลฯ มาก

3.5 การวิเคราะห์เชิงสถิติโดยอาศัยข้อมูลจากผลการทดลองเพื่อปรับปรุงสูตรการรับแรงเฉือน V_{cip} ที่เสนอ

เพื่อที่จะปรับปรุงสูตรการรับแรงเฉือน V_{cip} ตามสมการ (2.15) ให้สามารถทำนายการรับแรงเฉือนได้ถูกต้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองยิ่งขึ้น ได้พิจารณาแปรค่าสัมประสิทธิ์เพื่อแปรค่าตัด (intercept) และค่าความลาดเอียง (Slope) ของเส้นตรงที่ใช้ทำนายค่าแรงเฉือน V_{cip} ดังนี้

$$V_{cip} = C\, b_w d\, f_c' + S\, \frac{V_u M_{crp}}{M_u} \quad \text{.....(3.4)}$$

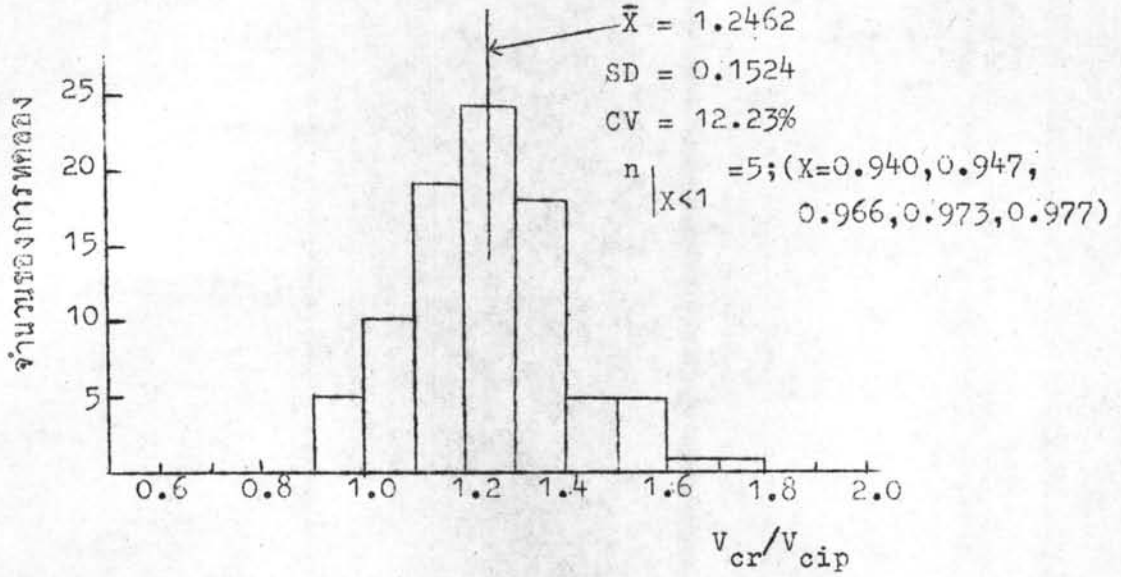
โดยที่ C และ S เป็นค่าตัวแปร

ได้นำผลการทดลองการรับแรงเฉือนที่มีการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือนมาวิเคราะห์เชิงสถิติเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสูตร V_{cip} (สมการ 3.4) โดยแปรค่าสัมประสิทธิ์ C ตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.0 และค่าสัมประสิทธิ์ S ตั้งแต่ 0.8 ถึง 1.2 ผลที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.5 - 3.7 และรูปที่ 3.5 - 3.7

ตารางที่ 3.1 แสดงผลของการเปลี่ยนค่าตัวแปร c และ s ต่อค่าเชิงสถิติของอัตราส่วน V_{cr}/V_{cip} สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน

s \ c	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.8		$\bar{X}$ =1.5247 SD=0.1853 CV=12.16% n=0	$\bar{X}$ =1.4488 SD=0.1778 CV=12.27% n=0	$\bar{X}$ =1.3813 SD=0.1752 CV=12.69% n=3	$\bar{X}$ =1.3207 SD=0.1754 CV=13.28% n=5	$\bar{X}$ =1.2659 SD=0.1771 CV=13.99% n=8
0.9	$\bar{X}$ =1.4791 SD=0.1913 CV=12.93% n=0	$\bar{X}$ =1.4052 SD=0.1732 CV=12.32% n=0	$\bar{X}$ =1.3396 SD=0.1628 CV=12.15% n=1	$\bar{X}$ =1.2809 SD=0.1576 CV=12.30% n=4	$\bar{X}$ =1.2278 SD=0.1557 CV=12.68% n=8	
1.0	$\bar{X}$ =1.3679 SD=0.1838 CV=13.43% n=1	$\bar{X}$ =1.3036 SD=0.1646 CV=12.63% n=1	$\bar{X}$ =1.2462 SD=0.1524 CV=12.23% n=5	$\bar{X}$ =1.1946 SD=0.1452 CV=12.16% n=8		
1.1	$\bar{X}$ =1.2725 SD=0.1776 CV=13.96% n=3	$\bar{X}$ =1.2161 SD=0.1583 CV=13.01% n=6	$\bar{X}$ =1.1655 SD=0.1450 CV=12.44% n=1			
1.2	$\bar{X}$ =1.1899 SD=0.1723 CV=14.48% n=9	$\bar{X}$ =1.1399 SD=0.1531 CV=13.43% n=15				

ค่าตัวแปร c และ s ที่สมควรจะพิจารณาได้แสดงโดยแผนภูมิแจกแจงความถี่รูปฮิสโตกรัม ดังนี้

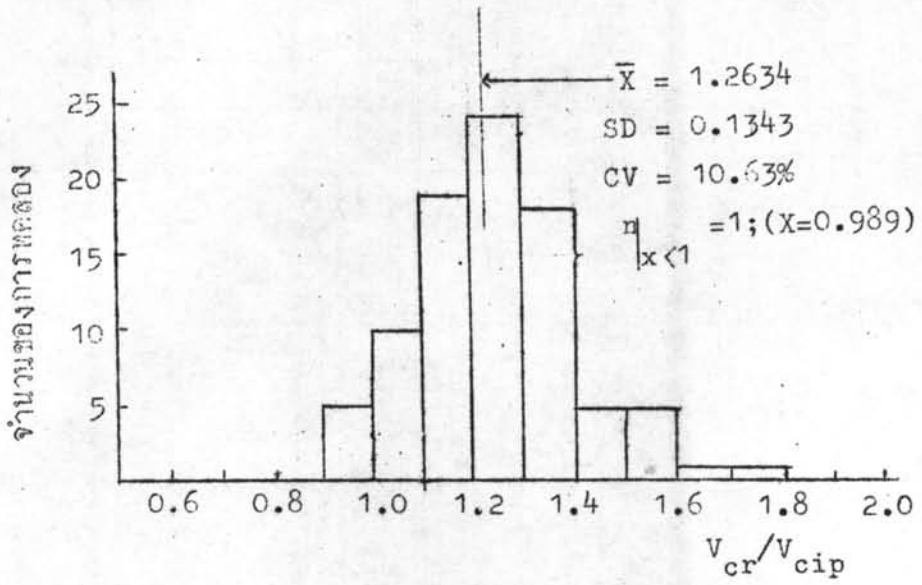


รูปที่ 3. แผนภูมิแจกแจงความถี่รูปฮิสโตกรัมของแรงเฉือน V_{cr} ต่อ V_{cip} (สมการ 3.4) ที่มีค่า C = 0.7 และ S = 1.0

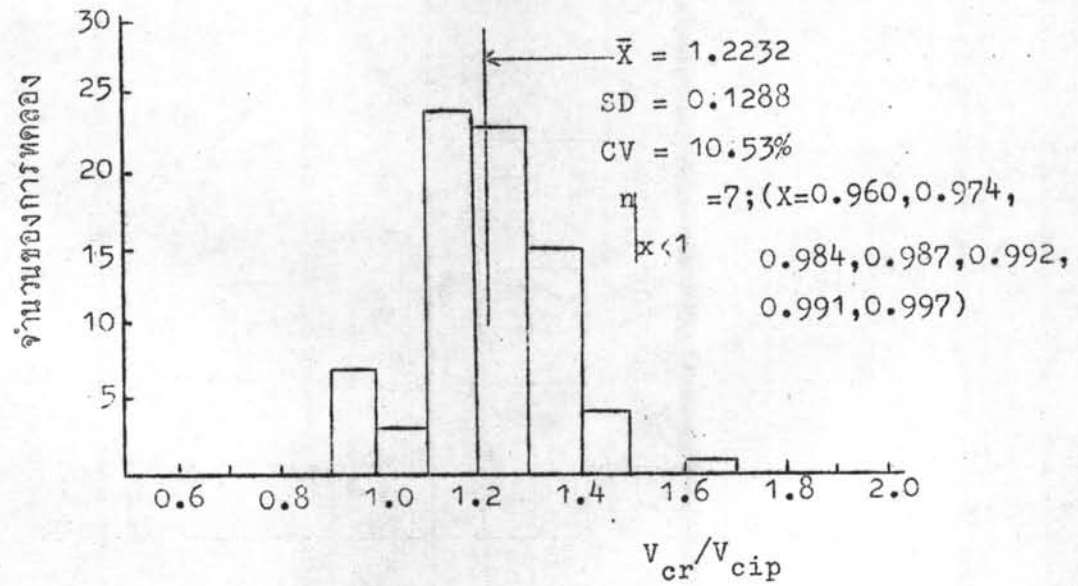
ตารางที่ 3.2 แสดงผลของการเปลี่ยนค่าตัวแปร c และ s ต่อค่าเชิงสถิติของอัตราส่วน V_{cr}/V_{cip} สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน

s \ c	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.8			$\bar{X}$ =1.5925 SD=0.1705 CV=10.70% n=0	$\bar{X}$ =1.5290 SD=0.1610 CV=10.53% n=0	$\bar{X}$ =1.4715 SD=0.1582 CV=10.75% n=0	$\bar{X}$ =1.4190 SD=0.1594 CV=11.23% n=0
0.9		$\bar{X}$ =1.5246 SD=0.1861 CV=12.20% n=0	$\bar{X}$ =1.4638 SD=0.1638 CV=11.19% n=0	$\bar{X}$ =1.4090 SD=0.1501 CV=10.65% n=0	$\bar{X}$ =1.3591 SD=0.1432 CV=10.53% n=0	$\bar{X}$ =1.3134 SD=0.1406 CV=10.71% n=0
1.0	$\bar{X}$ =1.4667 SD=0.2165 CV=14.76% n=0	$\bar{X}$ =1.4079 SD=0.1839 CV=13.07% n=0	$\bar{X}$ =1.3551 SD=0.1605 CV=11.84% n=0	$\bar{X}$ =1.3072 SD=0.1444 CV=11.05% n=0	$\bar{X}$ =1.2634 SD=0.1343 CV=10.63% n=1	$\bar{X}$ =1.2232 SD=0.1288 CV=10.53% n=7
1.1	$\bar{X}$ =1.3597 SD=0.2134 CV=15.70% n=0	$\bar{X}$ =1.3083 SD=0.1822 CV=19.93% n=0	$\bar{X}$ =1.2619 SD=0.1585 CV=12.56% n=1	$\bar{X}$ =1.2196 SD=0.1413 CV=11.58% n=3	$\bar{X}$ =1.1808 SD=0.1292 CV=10.94% n=7	$\bar{X}$ =1.1451 SD=0.1215 CV=10.61% n=9
1.2	$\bar{X}$ =1.2676 SD=0.2100 CV=16.57% n=1	$\bar{X}$ =1.2222 SD=0.1804 CV=14.76% n=1	$\bar{X}$ =1.1811 SD=0.1572 CV=13.31% n=7	$\bar{X}$ =1434 SD=0.1395 CV=12.20% n=10		

ค่าตัวแปร c และ s ที่สมควรจะพิจารณาได้แสดงโดยแผนภูมิแจกแจงความถี่รูปฮิสโตกรัม ดังนี้



รูปที่ 3. แผนภูมิแจกแจงความถี่รูปฮิสโตกรัมของแรงเฉือน V_{cr} ต่อ V_{cip} (สมการ 3.4) ที่ค่า C = 0.9 และ S = 1.0



รูปที่ 3. แผนภูมิแจกแจงความถี่รูปฮิสโตกรัมของแรงเฉือน V_{cr}/V_{cip} (สมการ 3.4) ที่ค่า C = 1.0และ S = 1.0

ตารางที่ 3.3 แสดงผลของการเปลี่ยนค่าตัวแปร c และ s ต่อค่าเชิงสถิติของอัตราส่วน V_{cr}/V_{cip} สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงทั้งประเภทไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือนและมีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน

s \ c	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.8			$\bar{X}$ =1.5159 SD=0.1887 CV=12.45% n=0	$\bar{X}$ =1.4502 SD=0.1843 CV=12.71% n=3	$\bar{X}$ =1.3911 SD=0.1838 CV=13.21% n=5	$\bar{X}$ =1.3373 SD=0.1856 CV=13.88% n=8
0.9		$\bar{X}$ =1.4609 SD=0.1890 CV=12.94% n=0	$\bar{X}$ =1.3975 SD=0.1747 CV=12.5% n=1	$\bar{X}$ =1.3406 SD=0.1670 CV=12.46% n=4	$\bar{X}$ =1.2891 SD=0.1637 CV=12.70% n=8	
1.0	$\bar{X}$ =1.4140 SD=0.2058 CV=14.55% n=1	$\bar{X}$ =1.3523 SD=0.1816 CV=13.43% n=1	$\bar{X}$ =1.2970 SD=0.1650 CV=12.76% n=5	$\bar{X}$ =1.2471 SD=0.1554 CV=12.46% n=8		
1.1	$\bar{X}$ =1.3132 SD=0.2001 CV=15.23% n=3	$\bar{X}$ =1.2591 SD=0.1761 CV=13.98% n=6	$\bar{X}$ =1.2104 SD=0.1591 CV=13.14% n=12			
1.2	$\bar{X}$ =1.2261 SD=0.1948 CV=15.89% n=10	$\bar{X}$ =1.1783 SD=0.1715 CV=14.55% n=16				

จากการวิเคราะห์เชิงสถิติที่ปรากฏในตารางและแผนภูมิรูปฮิสโตกรัมสำหรับ

คานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน สมการที่นำจะใช้ได้ควรมีค่าสัมประสิทธิ์ C = 0.7 และ S = 1.0 ซึ่งจะให้ค่า V_{cr}/V_{cip} ที่ต่ำกว่า 1 อยู่ 5 ตัวจากคาน 88 ตัว และตัวที่ต่ำสุดมีค่า X = 0.940 ซึ่งค่อนข้างปลอดภัยที่จะนำไปใช้ในงานออกแบบ สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีเหล็กเสริมต้านแรงเฉือน สมการที่นำจะใช้ได้ควรมีค่าสัมประสิทธิ์ C = 1 และ S = 1 ซึ่งจะให้ค่า V_{cr}/V_{cip} ที่ต่ำกว่า 1 อยู่ 7 ตัว จากคาน 67 ตัว และตัวที่ต่ำสุดมีค่า X = 0.960