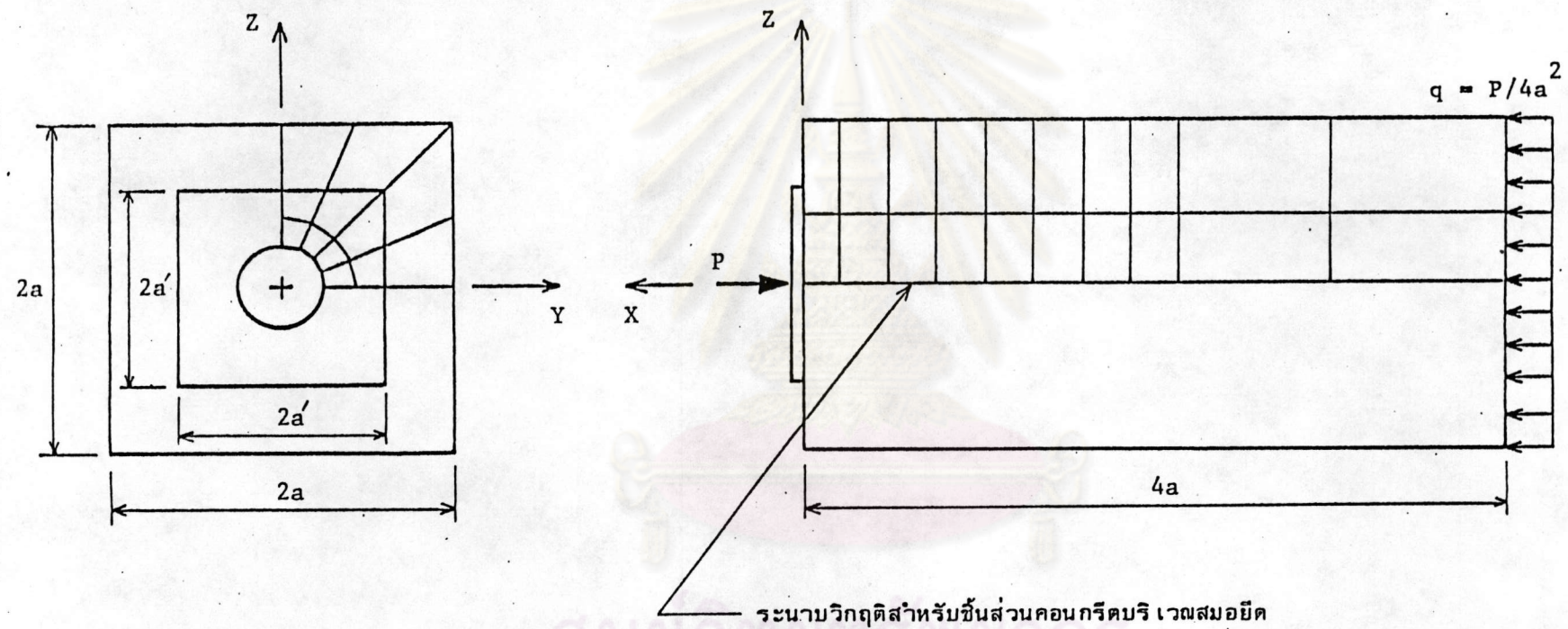


ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบผลการทดสอบ

ในบทนี้จะเสนอถึงผลที่ได้จากการใช้ไฟไนต์เอเลเมนต์ในการวิเคราะห์ผลจากรูปร่างทางเรขาคณิตของสมอียดและเหล็กเสริมโอบรัดแบบบล็อกเกลียวที่มีต่อพฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนคอนกรีตบรีเวนสมอียด โดยจะพิจารณาการกระจายของความเค้นระเบิดบนระนาบวิกฤติของชิ้นส่วนคอนกรีตบรีเวนสมอียด เนื่องจากเมื่อมีการถ่ายแรงอัดเข้าไปภายในองค์อาคารโดยผ่านสมอียด แรงแบกทานซึ่งกระทำบนพื้นที่แบกทานอันจำกัดจะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดที่มีค่าสูงในแนวแรงบรีเวนได้ผ่านแบกทานของสมอียด มีผลทำให้ชิ้นส่วนคอนกรีตบรีเวนสมอียดเกิดการขยายตัวจากแนวแรงออกโดยรอบตามแนวรัศมีของหน้าตัด พัฒนาให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในบรีเวนถัดจากด้านหลังของสมอียด และต่อเนื่องไปตามความยาวของลวดอัดแรง กระทำตามขวางบนระนาบที่ผ่านแนวลวดอัดแรง โดยจะเป็นหน่วยแรงอัดที่บรีเวนหลังสมอียด แล้วมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นหน่วยแรงดึง ณ ตำแหน่งถัดมาตามแนวลวดอัดแรง แต่เนื่องจากหน่วยแรงดึงตามขวางหรือ "ความเค้นระเบิด" นี้ กระทำตามขวางบนระนาบทุกระนาบที่ผ่านแนวลวดอัดแรง ดังนั้น บนระนาบที่มีเนื้อคอนกรีตห่อหุ้มที่ร้อยลวดอัดแรงอยู่น้อยที่สุด ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ คือระนาบที่ผ่านแนวแกนของชิ้นส่วนคอนกรีตบรีเวนสมอียดและตั้งฉากกับผิวข้างของชิ้นส่วน ก็จะเป็นระนาบวิกฤติ (Critical plane) หรือระนาบซึ่งมีพื้นที่ในการรับแรงเค้นระเบิดน้อยกว่าระนาบอื่น อันจะทำให้เกิดความเค้นระเบิดขึ้นสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งค่าความเค้นระเบิดบนระนาบวิกฤติที่ได้จากการวิเคราะห์จะพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ การกระจายของความเค้นระเบิดบนระนาบวิกฤติที่เกิดภายใน กับการกระจายของความเค้นระเบิดบนระนาบวิกฤติที่เกิดบรีเวนผิวของชิ้นส่วนคอนกรีตบรีเวนสมอียดที่ระยะต่าง ๆ โดยที่ทั้งค่าความเค้นระเบิดและระยะทางจะถูกทำให้เป็นทอมไร์หน่วย ด้วยการหารค่าความเค้นระเบิดด้วยหน่วยแรงอัดสม่ำเสมอ (Uniform compressive stress) และทำค่าระยะทางให้อยู่ในทอมของระยะความลึกของชิ้นส่วนบรีเวนสมอียด (2a) ทั้งนี้เพื่อจัดปัญหาทางด้านมิติในการเปรียบเทียบแนวโน้มของการกระจายความเค้นระเบิดทั้งกับงานวิจัยอื่น ๆ และระหว่างสมอียดขนาดต่าง ๆ กัน



ระนาบวิกฤตสำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด

รูปที่ 3.1 ระนาบวิกฤตของความเค้นระเบิดในชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด



### 3.1 ผลจากรูปร่างทางเรขาคณิตของสมอียด

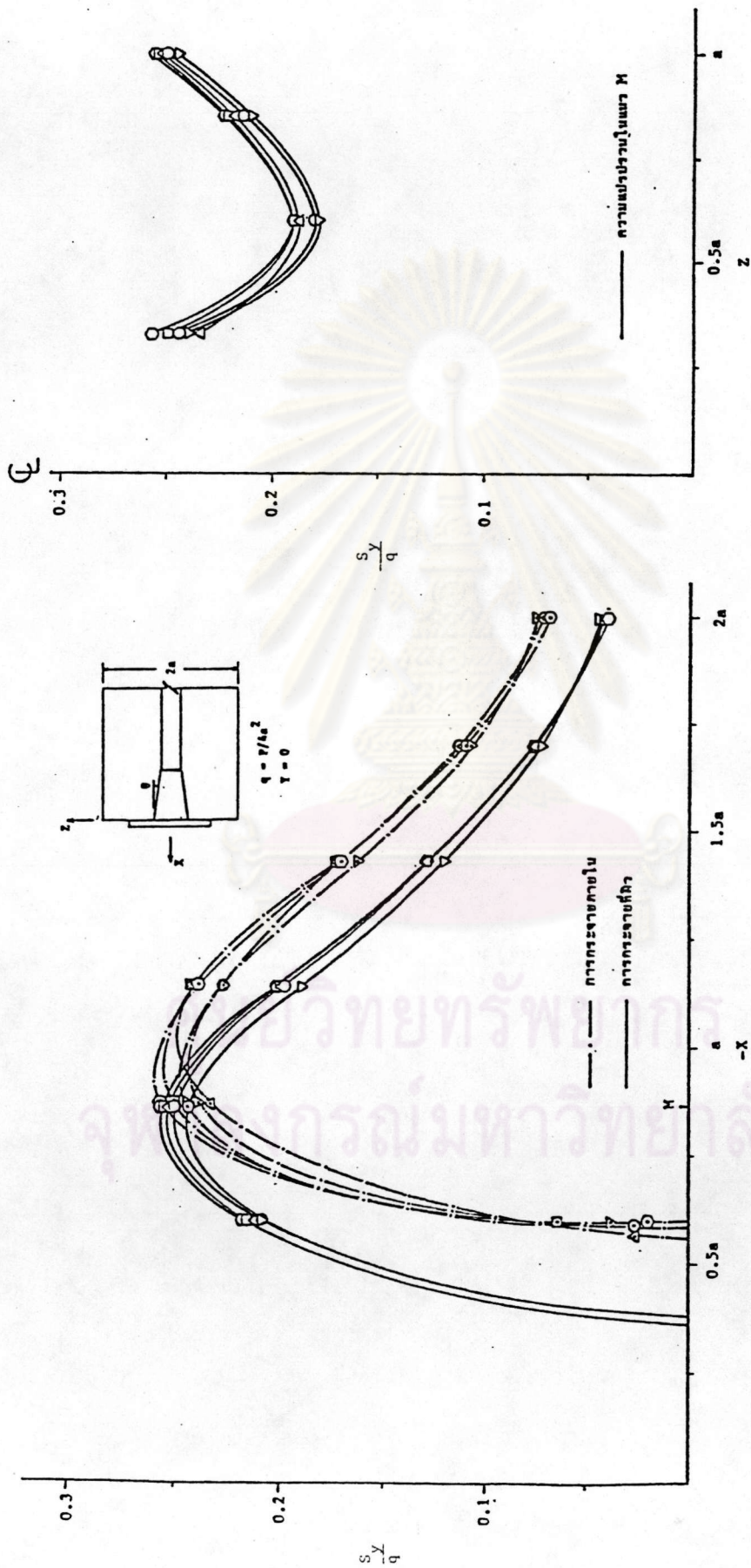
ด้วยการถ่ายแรงอัดเข้าไปภายในองค์อาคารสำหรับระบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงลวดภายหลัง จะอาศัยการยึดลวดที่ดึง เข้ากับสมอียดที่ติดตั้งบนหน้าตัดของชิ้นส่วนคอนกรีต ทำให้เกิดการถ่ายแรงจากสมอียดกระจายเข้าสู่ชิ้นส่วนคอนกรีต ลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของสมอียดจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะการถ่ายแรงเข้าสู่ชิ้นส่วนคอนกรีต ยังผลให้การกระจายของความเค้นระเบิดที่เกิดขึ้นแตกต่างกันออกไป

#### 3.1.1 กรณีความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียดเป็น 2 ถึง 10 องศา

แรงอัดที่ถูกถ่ายผ่านสมอียด เข้าสู่คอนกรีตบริเวณสมอียดส่วนหนึ่งจะถูกถ่ายผ่านกรวยร้อยลวดสมอียด ดังนั้น ความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียดจึงมีผลต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในและการเสียรูปของชิ้นส่วนบริเวณสมอียด เนื่องจากเมื่อความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียดมากขึ้น ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายทั้งสองของกรวยร้อยลวดสมอียดคงที่ พื้นที่ผิวของกรวยร้อยลวดจะลดลง ทำให้หน่วยแรงในส่วนที่ถ่ายผ่านร้อยลวดมีความเข้มข้นมากขึ้น นอกจากนี้ ลักษณะรูปร่างของกรวยร้อยลวดสมอียดที่มีความลาดชันมากขึ้น จะมีลักษณะคล้ายลิ้ม มีส่วนในการเสริมการเสียดของรูปชิ้นส่วนในลักษณะที่ป้องกันตัวออกโดยรอบมากขึ้น เมื่อมีแรงอัดกระทำผ่านสมอียด ค่าความเค้นระเบิดจึงเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาถึงการกระจายของความเค้นระเบิดเมื่อความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียดแปรเปลี่ยนไป ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในสมอียดขนาด 180 ต้น เมื่อพิจารณาความเค้นระเบิดให้อยู่ในเทอมไร้หน่วยแล้ว การกระจายความเค้นระเบิดจะมีแนวโน้มเดียวกันทั้งหมด แต่จะให้ค่าความเค้นระเบิดสูงสุดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 กล่าวคือ ความเค้นระเบิดในเนื้อคอนกรีตบริเวณรอบผิวของท่อร้อยลวดอัดแรงบนระนาบวิกฤติ จะเริ่มเกิดขึ้นที่ระยะตามแนวลวดอัดแรงประมาณ 0.6a จากหน้าตัดซึ่งมีแรงอัดกระทำ แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงสุดระยะประมาณ 0.9a หลังจากนั้น ค่าความเค้นระเบิดจะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่ระยะเท่ากับความลึกของหน้าตัดชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียด ซึ่งถัดจากรยะนี้ออกไป แม้ว่าค่าความเค้นระเบิดจะไม่ใช่ศูนย์แต่ก็จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจาก หน่วย





$\nabla \delta = 2$  ซม.  $\circ \delta = 4$  ซม.  $\Delta \delta = 6$  ซม.  $\square \delta = 8$  ซม.  $\otimes \delta = 10$  ซม.

รูปที่ 3.2 การกระจายความเค้นระบัดเมื่อกรวยรอยลวดมีความลาดชันต่าง ๆ ในสมมติขนาด 180 ตัน



แรงดึงนี้ มีค่าลดลงจนน้อยกว่าค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีต และเมื่อพิจารณาแนวโน้มการกระจายของความเค้นระเบิดบนระนาบวิกฤติจากบริเวณรอบ ๆ ท่อร้อยลวดอัดแรงไปบนระนาบวิกฤติตามแนวตั้งฉากกับเส้นลวดอัดแรงจนถึงบริเวณผิวของชั้นส่วนคอนกรีต ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนแนวลวดอัดแรง ซึ่งจะขอเรียกย่อ ๆ ว่า "การแปรปรวนทางด้านข้าง" พบว่าค่าความเค้นระเบิดจะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ระยะประมาณ  $0.6a$  จากนั้นจะกลับค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนค่าความเค้นระเบิดที่ผิวของชั้นส่วนบริเวณสมอียดมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเค้นระเบิดบริเวณใกล้เส้นลวดอัดแรง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณใกล้แนวท่อร้อยลวดอัดแรงจะมีหน่วยแรงอัด เข้มข้นอันเป็นผลเนื่องมาจากการอัดแรง ยังผลให้ค่าความเค้นระเบิดในบริเวณนี้มีค่าสูง แต่เมื่อ ห่างออกมาจากบริเวณนั้น ความเข้มข้นของหน่วยแรงอัดในแนวแกนจะลดลง ทำให้ค่าความเค้นระเบิดค่อย ๆ ลดลง แต่เมื่อถึงระยะที่เข้าใกล้ผิวของชั้นส่วนซึ่งมีคอนกรีตหุ้มโอบอยู่น้อยลง การเบ่งตัวออกทางด้านข้างจะง่ายขึ้น ทำให้ค่าของความเค้นระเบิดกลับเพิ่มสูงขึ้นอีก ซึ่งเมื่อพิจารณาการกระจายของความเค้นระเบิดตามแนวลวดอัดแรงระนาบวิกฤติในคอนกรีตที่ผิวของชั้นส่วนบริเวณสมอียดก็พบว่า มีแนวโน้มการกระจายคล้ายคลึงกับการกระจายความเค้นระเบิดภายในชั้นส่วน โดยจะเริ่มเกิดที่ระยะตามแนวลวดอัดแรงประมาณ  $0.4a$  จากหน้าตัดที่มีการอัดแรง และค่อยเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของความเค้นระเบิดภายในที่ระยะประมาณ  $0.8a$  แล้วหลังจากระยะนี้ ค่าความเค้นระเบิดที่ผิวจะค่อย ๆ ลดลงด้วยแนวโน้มคล้ายคลึงกับการกระจายของความเค้นระเบิดภายใน แต่มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นระเบิดภายในที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นที่น่าสังเกตว่า การกระจายของความเค้นระเบิดที่ผิวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการกระจายภายใน เพียงแต่ต่างกันที่ ตำแหน่งที่เริ่มเกิดความเค้นระเบิดของคอนกรีตบริเวณผิวชั้นส่วนจะอยู่ใกล้หน้าตัดซึ่งมีการถ่ายแรงอัดมากกว่าตำแหน่งที่เริ่มเกิดความเค้นระเบิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตรอบท่อร้อยลวดอัดแรง เนื่องจากเมื่อมีแรงแบกทานของสมอียดกระทำบนหน้าตัดของชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียด หน้าตัดนั้นจะมีการแอ่นตัวเป็นรูปแอ่งกะทะ อันจะทำให้ชั้นส่วนเวกสมอียดเกิดการเสียรูป (Deformation) ในลักษณะที่เบ่งตัวออกทุกทิศทุกทาง แผ่ขยายออกจากแนวแกนกลางของหน้าตัดตามแนวรัศมี ไปงอกเป็นลักษณะคล้ายมีแอ่งตรงกลางเช่นกัน จะพัฒนาให้เกิดปรากฏการณ์ของความเค้นระเบิดภายในเยื้องออกจากความเค้นระเบิดที่ผิวดังกล่าว

จากการพิจารณาแนวโน้มการกระจายความเค้นระเบิดในชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียด



ที่มีความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียดต่าง ๆ กัน พบแนวโน้มที่เห็นได้ชัดเห็นว่า ค่าความเค้น  
 ระเบิดทั้งบริเวรรอบท่อร้อยลวดอัดแรงและที่ผิวของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวรสมอียดซึ่งกรวยร้อยลวด  
 มีความลาดชันมาก จะสูงกว่าค่าความเค้นระเบิด ณ ตำแหน่งเดียวกันในชิ้นส่วนบริเวรสมอียดซึ่ง  
 มีกรวยร้อยลวดที่ชันน้อยกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความเค้นระเบิดสูงสุดซึ่งเป็นส่วนสำคัญใน  
 การกำหนดความแข็งแรงของชิ้นส่วนบริเวรสมอียด พบว่าก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อกรวยร้อย  
 ลวดสมอียดมีความลาดชันเพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 10 องศา โดยจะเพิ่มขึ้นประมาณ 9% อย่างไรก็ตาม  
 ตาม ค่าความเค้นระเบิดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีผลต่อพฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนคอนกรีต  
 บริเวรสมอียดเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแรงอัดส่วนที่ถ่ายผ่านกรวยร้อยลวดสมอียดมีค่าน้อยเมื่อ  
 เทียบกับแรงอัดในส่วนที่ผ่านแผ่นแบกทาน กล่าวคือมีค่าประมาณ 10% ของส่วนที่ผ่านแผ่นแบกทาน  
 เท่านั้น นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสังเกตว่า ที่ความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียดต่ำ ๆ ค่าความ  
 เค้นระเบิดสูงสุดจะเกิดที่บริเวรผิวของชิ้นส่วนบริเวรสมอียด แต่เมื่อความลาดชันของกรวยร้อย  
 ลวดสมอียดเพิ่มมากขึ้น ค่าความเค้นระเบิดภายในจะกลับมากกว่าค่าที่ผิวของชิ้นส่วน ทั้งนี้สืบ  
 เนื่องจากหน่วยแรงที่ถ่ายผ่านกรวยร้อยลวดสมอียดจะมีความเข้มข้นมากขึ้นเมื่อความลาดชันของ  
 กรวยร้อยลวดสมอียดมีค่ามากขึ้นและมีส่วนในการพัฒนาหน่วยแรงดึงทางขวางบริเวรนั้นให้เพิ่มขึ้น  
 ด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สามารถจะ  
 เพิ่มขึ้นได้อีกหรืออีกนัยหนึ่งความยาวของกรวยร้อยลวดสมอียดสามารถหดสั้นเข้ามาได้ เพื่อให้  
 กรวยร้อยลวดสมอียดมีขนาดกะทัดรัด สะดวกแก่การทำงาน และเป็นการประหยัดเนื้อวัสดุที่ใช้ใน  
 การผลิตสมอียด โดยมีผลต่อการเพิ่มของความเค้นระเบิดเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อ  
 ความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียดเพิ่มมากขึ้น แรงเสียดทานที่เกิดจากการดึงลวดอัดแรง  
 เสียดสีกับกรวยร้อยลวดสมอียดจะมากขึ้นอันจะส่งผลให้ต้อง ใช้กำลังในการดึงลวดมากขึ้นและลวด  
 อัดแรงอาจเกิดการสึกกร่อน นอกจากนี้แล้วแรงดันออกโดยรอบบริเวรปลายของกรวยร้อยลวด  
 ซึ่งเกิดจากลวดอัดแรงในส่วนที่เดินผ่านออกจากท่อร้อยลวดและนำซึ่งจากปลายของกรวยร้อย  
 ลวดด้านที่ติดกับท่อร้อยลวดไปยังจำปาที่จับยึดลวดอัดแรงนั้น จะมีค่าสูงขึ้นด้วย จึงต้องระมัดระวัง  
 ความแข็งแรงและเสถียรภาพของปลายกรวยร้อยลวดด้านที่ติดกับท่อร้อยลวด โดยอาจจะเพิ่มวง  
 แหวนโอบรอบปลายของกรวยร้อยลวดเพื่อรับแรงดันออกโดยรอบดังกล่าว มิฉะนั้นแล้วสมอียดอาจ  
 จะวิบัติ อันอาจเป็นผลสืบเนื่องทำให้โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงเกิดความเสียหายขึ้นได้



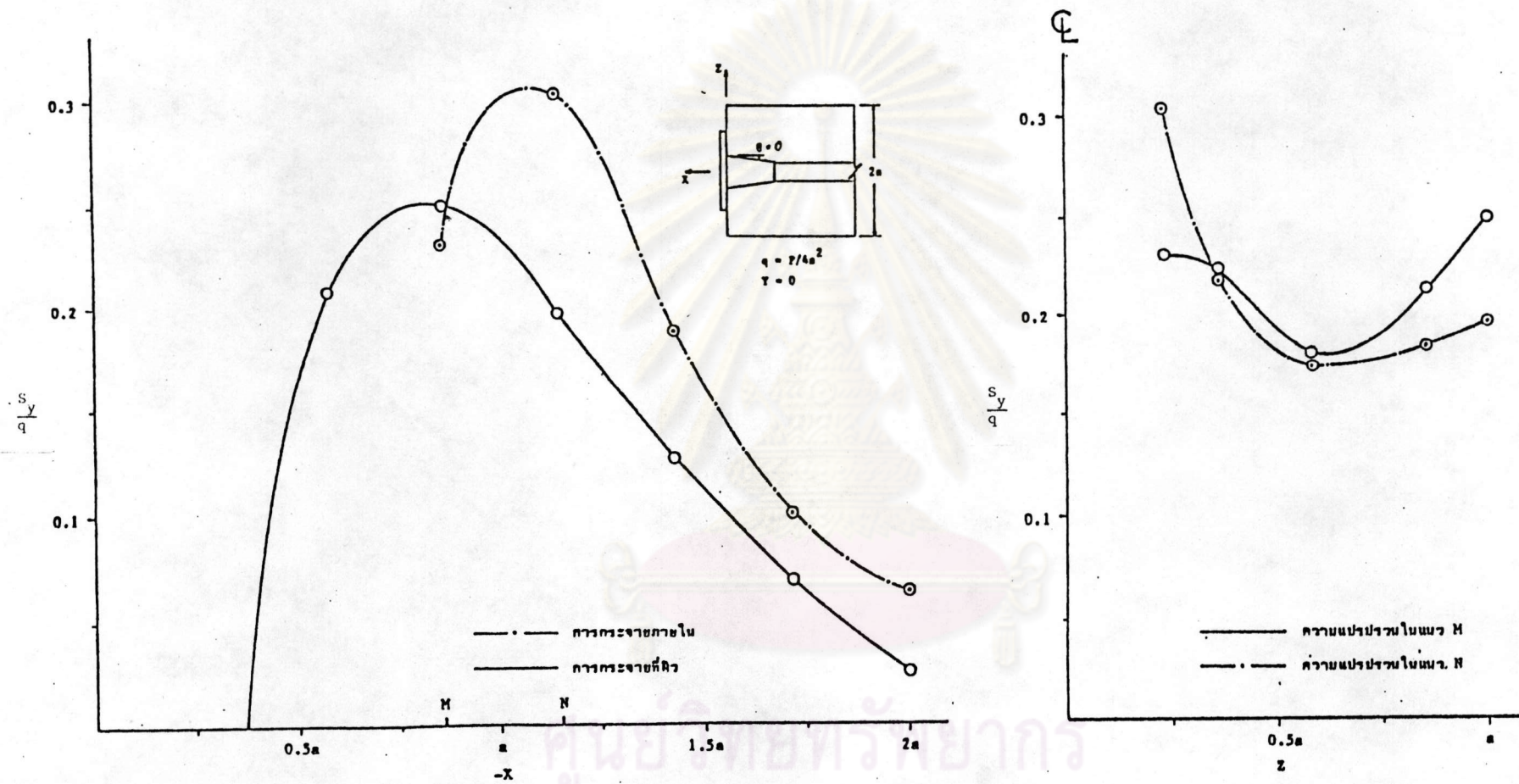
### 3.1.2 กรณีความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัดเป็น 0 องศา

เนื่องจากความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัดก่อให้เกิดสภาพล้ม ต้นคอนกรีตที่สัมผัสกับผิวของกรวยร้อยลวดให้แยกออกโดยรอบ อันเป็นส่วนเสริมการเสีรูปร่างของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยัด งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงการกระจายความเค้นระเบิดในกรณีความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัดเป็น 0 องศา ในสมอยัดขนาด 180 ต้น เพื่อจะลดสภาพล้มดังกล่าว พบว่าค่าความเค้นระเบิดภายใน บริเวณถัดจากผิวของท่อร้อยลวดเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยค่าความเค้นระเบิดสูงสุดเพิ่มจากกรณีที่ความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัดเป็น 2 องศาถึง 24% และเมื่อห่างจากบริเวณนั้นออกมาตามแนวรัศมีของหน้าตัดชิ้นส่วน ค่าสูงสุดดังกล่าวจะค่อย ๆ ลดลงจนสอดคล้องกับการกระจายความเค้นระเบิดในกรณีความลาดชันต่าง ๆ ที่บริเวณผิวของชิ้นส่วนบริเวณสมอยัด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าจะลดสภาพล้มของกรวยร้อยลวดสมอยัดลงได้ แต่ทว่าการถ่ายแรงจากสมอยัดสู่คอนกรีตในส่วนที่ถ่ายผ่านกรวยร้อยลวดจะไปรวมอยู่บริเวณที่กระบอกร้อยลวดสมอยัดเปลี่ยนเส้นผ่าศูนย์กลางอย่างทันทีทันใด เพื่อให้ขนาดที่ปลายกระบอกร้อยลวดสอดคล้องกับขนาดของท่อร้อยลวด ทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการถ่ายแรงอัดลดลงกว่ากรณีที่กรวยร้อยลวดสมอยัดมีความลาดชัน คอนกรีตบริเวณนั้นจึงต้องรับหน่วยแรงที่เข้มข้นขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่กรวยร้อยลวดมีความลาดชันแล้วเปรียบเสมือนว่าการถ่ายแรงของกรวยร้อยลวดจะมีการกระจายแผ่สม่ำเสมอ ส่วนในกรณีที่กรวยร้อยลวดสมอยัดมีความชันเป็น 0 องศา การถ่ายแรงจะเข้มข้นเฉพาะที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จึงทำให้การกระจายของความเค้นระเบิดในบริเวณนั้นสูงตามไปด้วย ยังผลให้คอนกรีตบริเวณนั้นเกิดการแตกร้าวได้ง่าย

### 3.1.3 การเปรียบเทียบการกระจายความเค้นระเบิดกับผลจากงานวิจัยอื่น ๆ

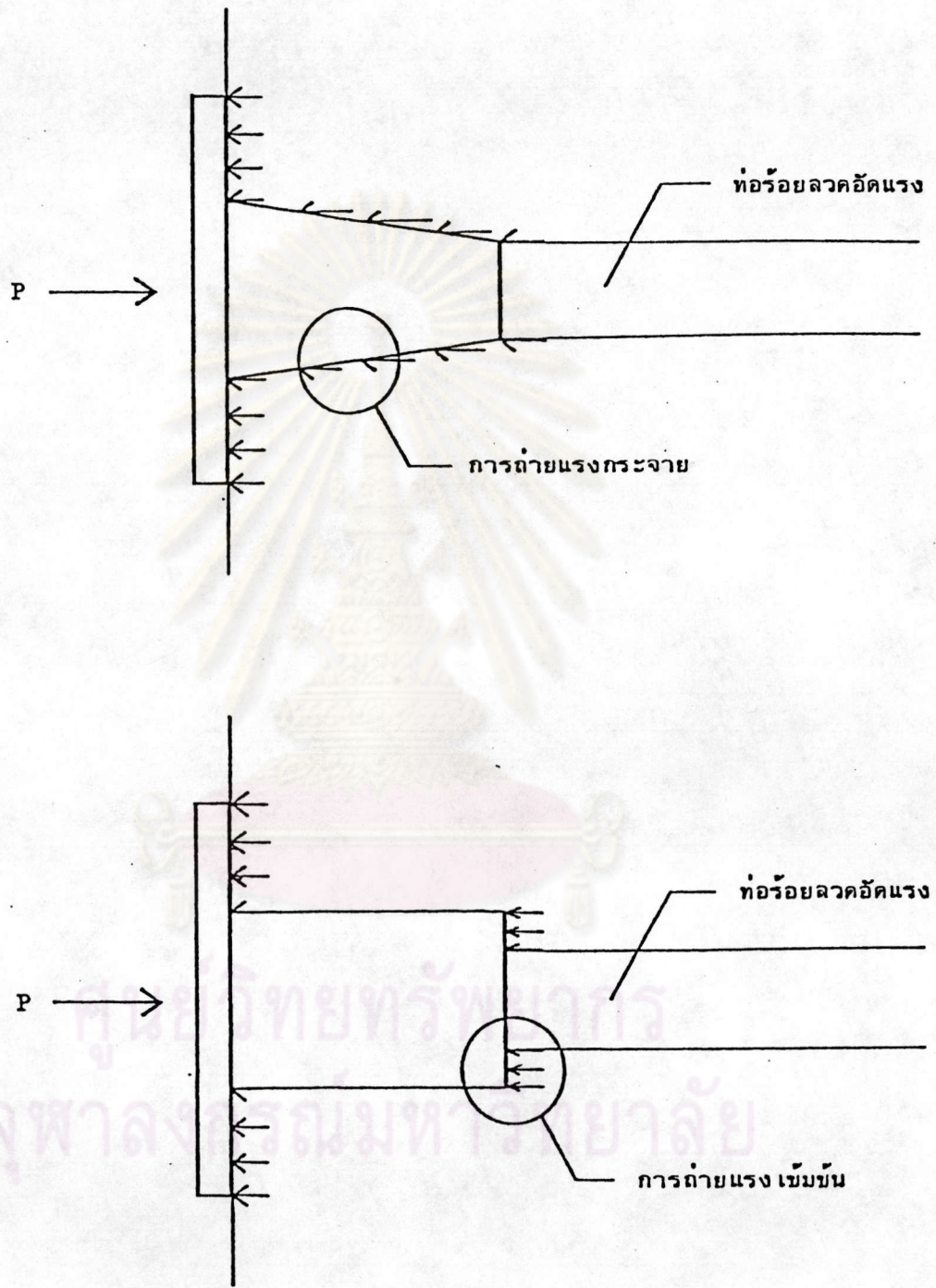
เมื่อเปรียบเทียบการกระจายของความเค้นระเบิดในชิ้นส่วนบริเวณสมอยัดขนาด 180 ต้นซึ่งความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัดเป็น 4 องศาที่ได้จากงานวิจัยนี้ กับผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา เมื่อปรับสัดส่วนของขนาดแผ่นแบกทานของสมอยัดต่อขนาดของชิ้นส่วนบริเวณสมอยัดให้เท่ากันคือ 0.6 โดยการปรับค่าด้วยวิธี Interpolate แล้วพบว่า แนวโน้มการกระจายของความเค้นระเบิดที่ผิวในงานวิจัยนี้สอดคล้องกันดีกับงานวิจัยของ Yettram และ Robbins [6]





รูปที่ 3.3 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อกรวยร้อยลวดสมอียดไม่มีความลาดชัน ในสมอียดขนาด 180 ตัน





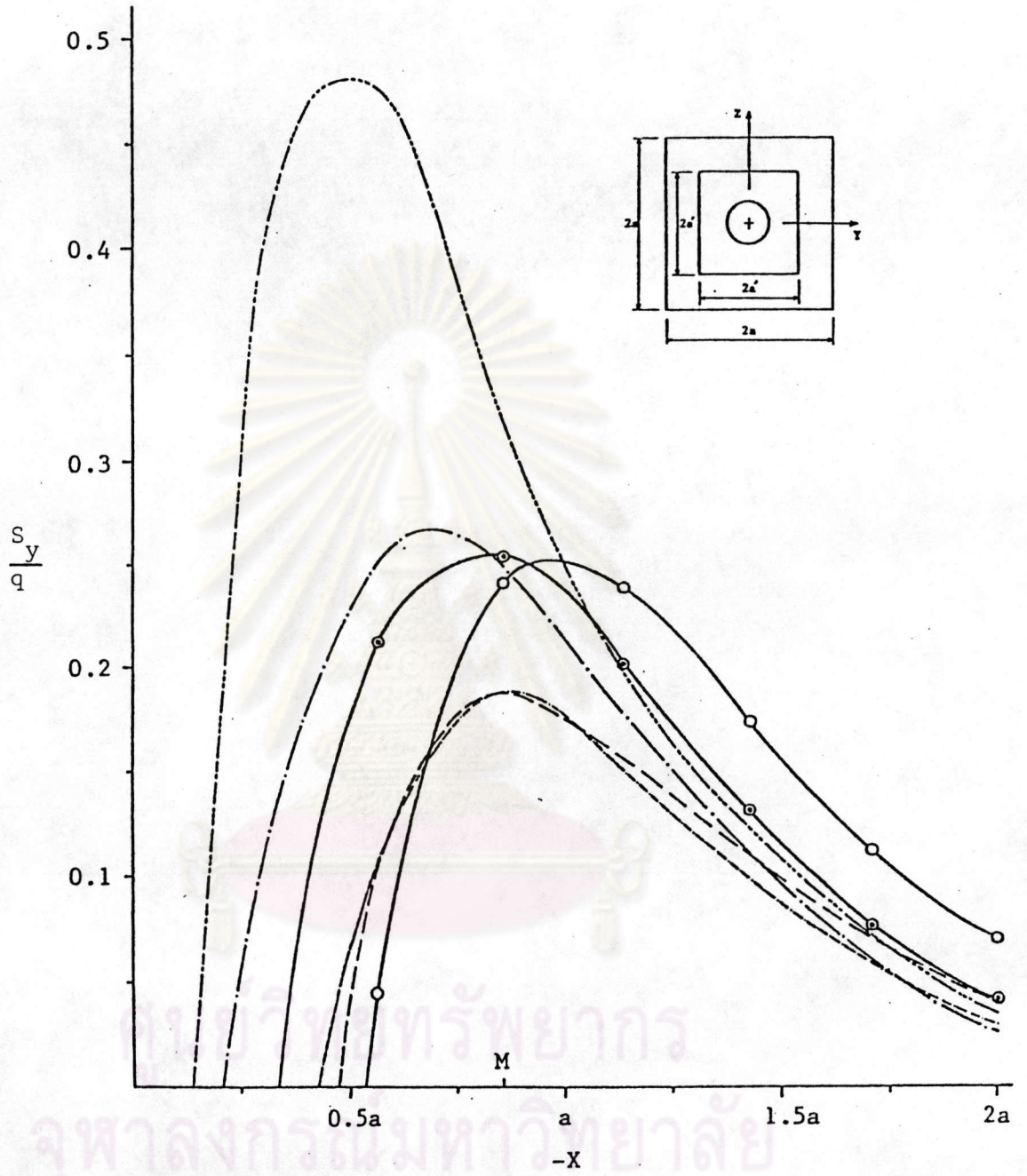
รูปที่ 3.4 การถ่ายแรงจากสมอขิดเมื่อกรวยร้อยลวดสมอขิดมีความลาดชัน และไม่มี ความลาดชัน



แต่มีค่าความเค้นระเบิดสูงสุดต่ำกว่าของ Yettram และ Robbins เล็กน้อย ส่วนค่าความเค้นระเบิดสูงสุดที่แนวแกนกลางของชิ้นส่วนบริเวณสมอยึดจากผลการทดสอบของ Yettram และ Robbins นั้น ค่อนข้างจะต่ำกว่าค่าความเค้นระเบิดสูงสุดในการกระจายความเค้นระเบิดบริเวณรอบท่อร้อยลวดของงานวิจัยนี้มาก ดังรูปที่ 3.5 แล้วเมื่อห่างออกมาจากแนวแกนกลางไปตามแนวรัศมี ค่าความเค้นระเบิดจากงานของ Yettram และ Robbins จึงจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่บริเวณผิวของชิ้นส่วนบริเวณสมอยึด ดังแสดงในรูปที่ 3.6

สืบเนื่องจาก Yettram และ Robbins ได้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้แต่ไม่ได้จำลองกรวยร้อยลวดและท่อร้อยลวดอัดแรงในแนวแกนกลาง รวมเข้าไว้ในแบบจำลอง ทำให้แบบจำลองของเขามีลักษณะเป็นแท่งคอนกรีตตัน หน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริงของชิ้นส่วนบริเวณสมอยึด ในขณะที่งานวิจัยนี้คำนึงถึงสภาพจริงของชิ้นส่วนโดยจำลองกรวยร้อยลวดและท่อร้อยลวดเข้าไว้ในแบบจำลองทำให้ชิ้นส่วนมีลักษณะเป็นรูกลวงตลอดแนวแกนกลางของชิ้นส่วน ยังผลให้ความแข็งแรงภายในน้อย ค่าความเค้นระเบิดภายในจึงค่อนข้างสูงกว่าของ Yettram และ Robbins และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการกระจายของความเค้นระเบิดจากงานวิจัยของ Guyon [2] จะเห็นว่า ค่าความเค้นระเบิดในแนวแกนกลางจากงานวิจัยของ Guyon จะต่ำกว่าค่าจากงานวิจัยนี้ แต่จะสอดคล้องกับความเค้นระเบิดในแนวแกนกลางของ Yettram และ Robbins เนื่องจาก Guyon ใช้สมการทางอีลาสติกในการวิเคราะห์ โดยจำลองให้ชิ้นส่วนบริเวณสมอยึดมีสภาพเป็น 2 มิติ จึงมีสมรรถนะที่จะคำนึงถึงผลของท่อร้อยลวดอัดแรงและกรวยร้อยลวดสมอยึดได้ นอกจากนั้น Guyon ยังมิได้เสนอการกระจายความเค้นระเบิดซึ่งกลับจะมีค่าสูงขึ้นที่บริเวณของชิ้นส่วนบริเวณสมอยึดอีกด้วย ส่วนการกระจายของความเค้นระเบิดที่ได้จากการวิจัยของ Zielinski และ Rowe [3] ซึ่งได้มาจากผลการทดสอบชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดโดยใช้เกจวัดความเครียดเชิงกล วัดความเครียดที่ผิวของตัวอย่างทดสอบ จะเห็นได้ว่า มีแนวโน้มแตกต่างไปจากผลจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น ๆ มาก โดยมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นระเบิดที่ได้จากงานวิจัยอื่น ๆ ถึงเกือบเท่าตัว ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก ในความเป็นจริง คอนกรีตมิได้มีคุณสมบัติทางอีลาสติกอย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ภายใต้แรงอัดสูง ๆ คอนกรีตก็จะมีพฤติกรรมไร้เชิงเส้นมากขึ้น นอกจากนั้น การใช้เกจวัดความเครียดเชิงกลในการวัด จะต้องมีการหยุดอัดการเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกและแช่น้ำหนักไว้ในระหว่างการทดสอบ เพื่อที่จะใช้เกจในการวัดความเครียดในแต่ละจุด อันอาจยังผล

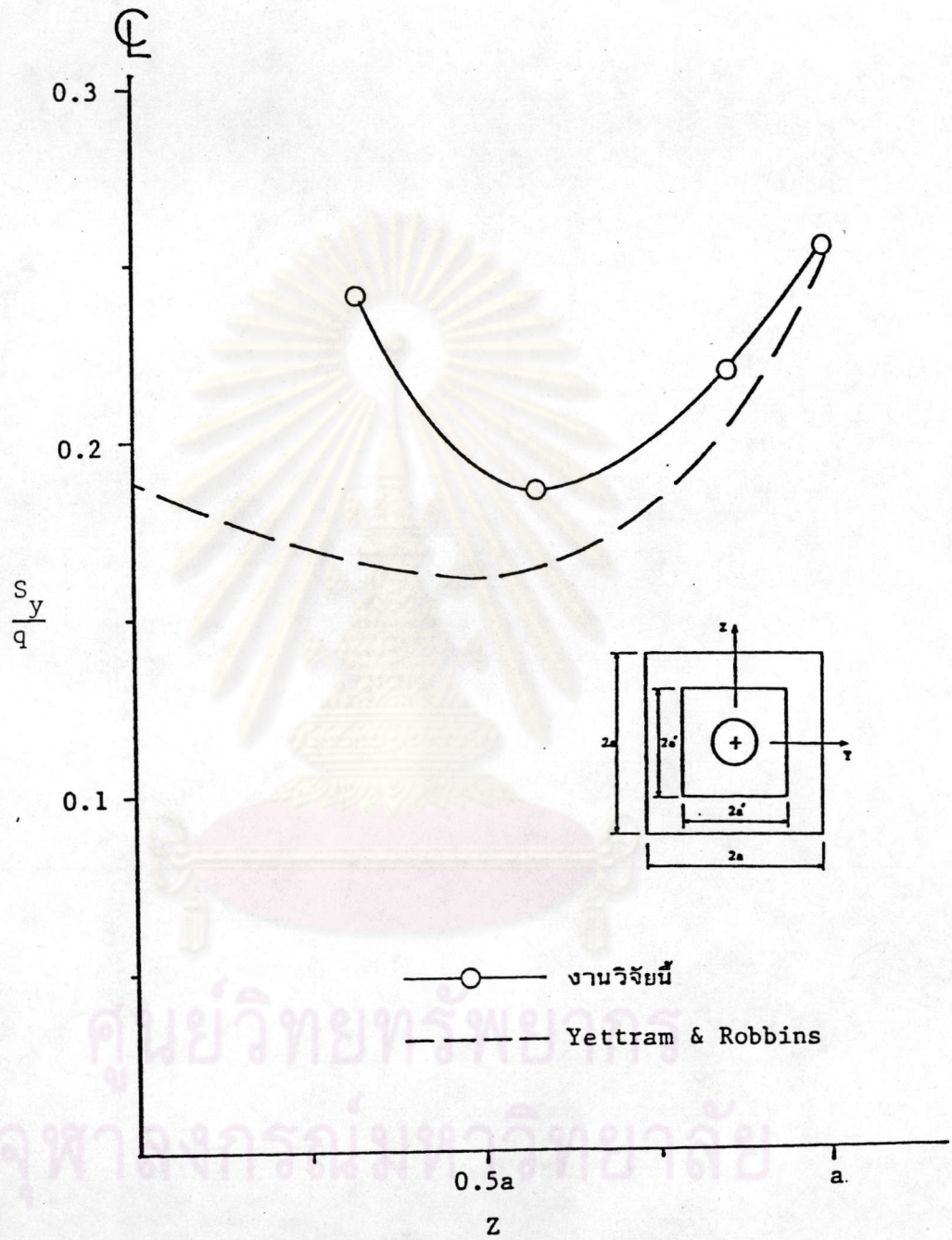




- งานวิจัยนี้ (การกระจายภายใน)
- ⊙— งานวิจัยนี้ (การกระจายที่ผิว)
- Guyon
- - - Zielinski & Rowe
- - - Yettram & Robbins (centroid)
- · - Yettram & Robbins (surface)

รูปที่ 3.5 การกระจายความเค้นระบเปิดจากงานวิจัยต่าง ๆ





รูปที่ 3.6 ความแปรปรวนทางด้านข้างของความเค้นระเบิดตามแนว M ในรูปที่ 3.5



ให้คอนกรีตเกิดการล้า (Creep) และระหว่างการทดสอบ อาจเกิดรอยแตกร้าวขนาดย่อม (Microcrack) ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา ชั้นผิวของแท่งตัวอย่างทดสอบ ทำให้วัดความเครียดได้มากกว่าความเป็นจริง ซึ่งถึงแม้ว่า วิธีการออกแบบเหล็กเสริมบริเวณสมอยึดตามการแนะนำของ Zielinski และ Rowe จะเป็นที่แพร่หลายกันอยู่ทั่วไปในหมู่วิศวกรผู้ออกแบบ แต่สำหรับในแวดวงของนักวิชาการแล้ว ก็ยังเป็นที่ได้แย้งกันมากกว่า การใช้ค่าการกระจายความเค้นระเบิดนี้ในการออกแบบตามทฤษฎีอิลาสติก จะทำให้สิ้นเปลืองมากเกินไป

### 3.2 ผลจากเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว

ผลจากการอัดแรงเข้าไปภายใน ทำให้คอนกรีตบริเวณสมอเกิดเกิดการเสียรูปในลักษณะป่องตัวออกทุกทิศทุกทางจากแนวแกนกลางของชิ้นส่วน ส่งผลให้มีการพัฒนาหน่วยแรงตามขวาง เรียกว่า "ความเค้นระเบิด" ขึ้น ซึ่งหากหน่วยแรงดึงตามขวางนี้มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต คอนกรีตบริเวณนั้นจะเกิดรอยแตกร้าว อันจะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเพิ่มสมรรถนะทางโครงสร้างของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด ซึ่งการใช้เหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวในชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากวิธีหนึ่ง ด้วยเหล็กเสริมจะทำหน้าที่โอบรัดคอนกรีตที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวทุกทิศทุกทางตามแนวรัศมีอย่างสม่ำเสมอ การที่คอนกรีตภายในวงปลอกเกลียวพยายามจะขยายตัวเมื่อมีการถ่ายแรงอัดเข้าไปภายในชิ้นส่วนคอนกรีต ก็จะช่วยเพิ่มแรงในเหล็กเสริมให้เกิดการโอบรัดมิให้คอนกรีตขยายตัวออก มากยิ่งขึ้น จึงทำให้ช่วยลดการเสียรูปและควบคุมการกระจายของความเค้นระเบิดได้

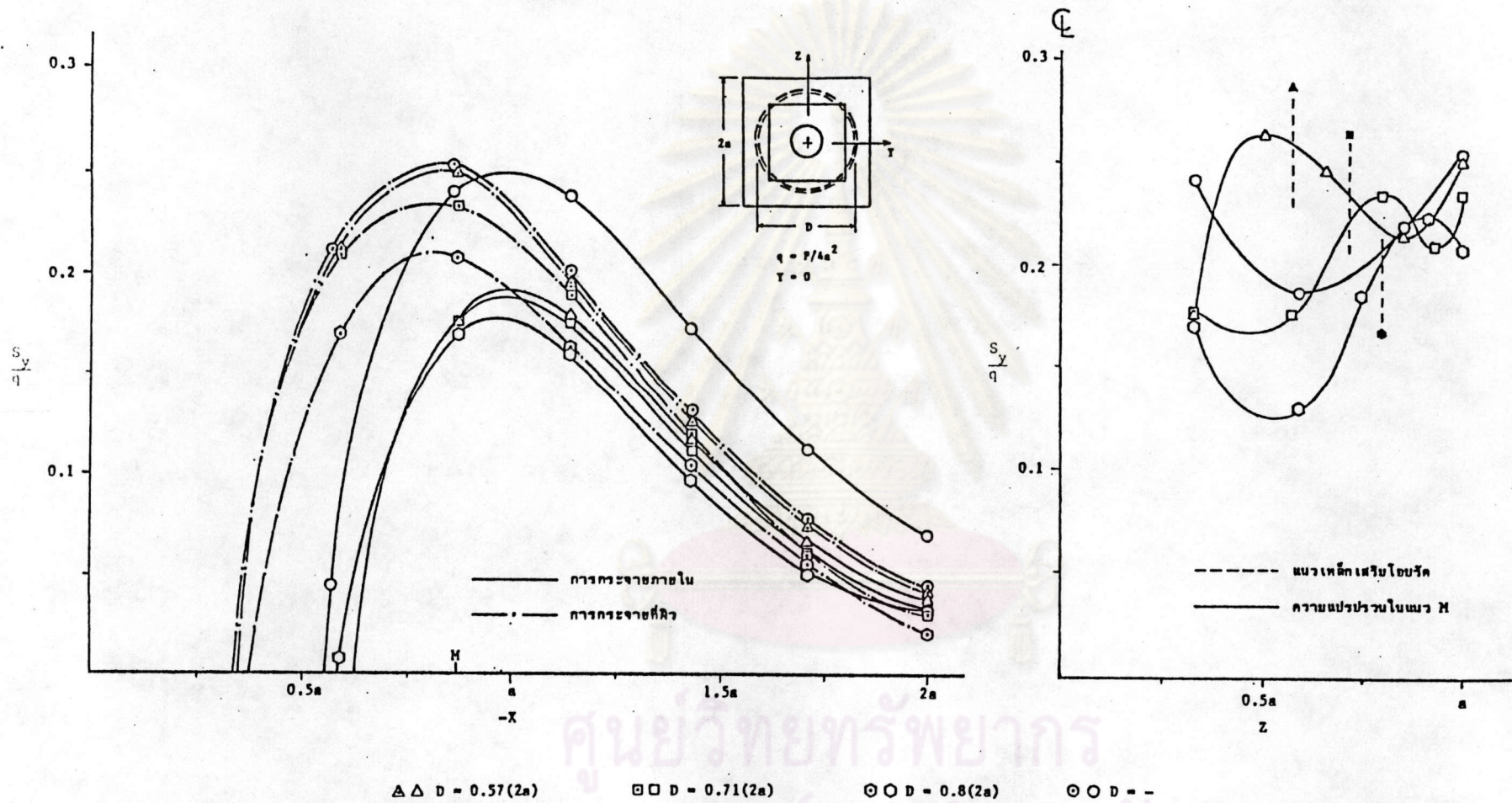
#### 3.2.1 เมื่อแปรเปลี่ยนขนาดของวงปลอกเกลียว

ในขั้นแรก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลจากขนาดวงปลอกเกลียวของเหล็กเสริมโอบรัดที่มีต่อการกระจายของความเค้นระเบิดเมื่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมและระยะห่างของวงปลอกเกลียวคงที่ โดยได้ทำการวิจัยในสมอยึดขนาด 180 ตัน แล้วเปรียบเทียบกับระหว่างการกระจายของความเค้นระเบิดกรณีที่มีเหล็กเสริมโอบรัดซึ่งมีขนาดวงปลอกเกลียวเป็น 0.57, 0.71, และ 0.8 เท่าของความลึกของหน้าตัดชิ้นส่วนบริเวณสมอยึด กับกรณีไม่มีเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่



3.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเสริมเหล็กเข้าไปในชิ้นส่วน ความเค้นระเบิดสูงสุดในคอนกรีตบริเวณถัดจากท่อร้อยลวดจะลดลงจากกรณีที่ไม่มีเหล็กเสริมอย่างเห็นได้ชัด แต่จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละขนาดของวงปลอกเกลียว โดยค่าความเค้นระเบิดสูงสุดจะต่ำลงเล็กน้อยเมื่อขนาดของวงปลอกเกลียวใหญ่ขึ้น ส่วนค่าความเค้นระเบิดที่ผิวของตัวอย่างทดสอบนั้น แม้ว่าจะมีแนวโน้มเดียวกับค่าความเค้นระเบิดภายในคือวงปลอกเกลียวขนาดใหญ่จะช่วยลดค่าความเค้นระเบิดได้มากกว่าวงปลอกเกลียวขนาดเล็ก แต่ก็พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแล้ว เหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวจะช่วยลดความเค้นระเบิดที่ผิวได้น้อยกว่าที่ช่วยลดความเค้นระเบิดบริเวณแกนกลาง ทำให้ค่าความเค้นระเบิดที่ผิวของตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กโอบรัดแบบปลอกเกลียวจะสูงกว่าค่าความเค้นระเบิดภายใน ณ ตำแหน่งตามแนวลวดอัดแรงเดียวกัน และเมื่อพิจารณาการแปรปรวนทางด้านข้างพบว่าแนวโน้มการกระจายความเค้นระเบิดจะเปลี่ยนแปลงไปจากการกระจายความเค้นระเบิดของตัวอย่างที่ไม่มีเหล็กเสริม คือเมื่อใช้เหล็กเสริมโอบรัดที่มีวงปลอกเกลียวขนาดเล็ก ค่าความเค้นระเบิดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงสุดบริเวณใกล้แนวเหล็กเสริมแล้วลดลงเล็กน้อยที่ผิวของชิ้นส่วน ซึ่งค่าความเค้นระเบิดสูงสุดนี้กลับจะมีค่ามากกว่าค่าความเค้นระเบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนคอนกรีตไม่มีการเสริมเหล็กเสียอีก และสำหรับกรณีที่ใช้วงปลอกเกลียวขนาดกลางค่าความเค้นระเบิดจะค่อย ๆ ลดลง แล้วกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกลียว ส่วนในกรณีวงปลอกเกลียวขนาดเล็กที่บริเวณนอกแนวของวงเหล็กเสริมปลอกเกลียว ส่วนในกรณีวงปลอกเกลียวขนาดใหญ่สุด ค่าความเค้นระเบิดจะลดต่ำลงมากจนถึงที่ระยะประมาณกึ่งหนึ่งก่อนที่จะถึงแนวเหล็กเสริม ค่าความเค้นระเบิดจึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่บริเวณนอกแนวเหล็กเสริม แล้วจะกลับลดลงอีกเล็กน้อยบริเวณผิวของชิ้นส่วน โดยที่ทั้ง 3 ตัวอย่างจะเห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่าบริเวณที่เกิดความเค้นระเบิดสูงสุดจะอยู่ใกล้แนวเหล็กเสริมโอบรัด สืบเนื่องจากคอนกรีตบริเวณนั้นถูกรัดเค้นจากเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวที่พยายามต้านทานการขยายตัวออกโดยรอบของคอนกรีตภายในวงปลอกเกลียว จากแนวโน้มที่เห็นได้ชัด เจนดังกล่าวแล้วว่าเมื่อขนาดวงปลอกเกลียวใหญ่ขึ้น จะสามารถควบคุมความเค้นระเบิดที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าเมื่อเหล็กเสริมโอบรัดมีขนาดวงปลอกเกลียวเท่ากับขนาดแผ่นแบกทาน สืบเนื่องจากปริมาณคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะมีมากกว่า ทำให้ลดการขยายตัวออกโดยรอบได้ดีกว่า ดังนั้น การที่บริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายสมอยิตบางแห่งแนะนำให้ใช้เหล็กเสริมโอบรัดที่มีขนาดวงปลอกเกลียวเท่ากับขนาดของแผ่นแบกทาน จึงมิได้ก่อให้เกิดอรรถประโยชน์สูงสุด เหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอก





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.7 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อแปรเปลี่ยนขนาดของวงปลอกเกลียว ในสมอยัดขนาด 180 ตัน



เกลียวในชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดควรมีขนาดวงปลอกเกลียวใหญ่ที่สุดเท่าที่ระยะหุ้มคอนกรีตน้อยที่สุดจะยอมให้ เพื่อให้การควบคุมการกระจายของความเค้นระเบิดมีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 3.2.2 เมื่อแปรเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาถึงผลของปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวที่มีต่อการกระจายความเค้นระเบิดในชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดขนาด 180 ตัน เมื่อขนาดและระยะห่างของวงปลอกเกลียวคงที่ โดยใช้ขนาดวงปลอกของเหล็กเสริมโอบรัดใหญ่ที่สุดเท่าที่ระยะหุ้มของคอนกรีตจะยอมให้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการกระจายของความเค้นระเบิดบริเวณรอบท่อร้อยลวดของชั้นส่วนคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวกับของชั้นส่วนคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่าค่าความเค้นระเบิดสูงสุดในชั้นส่วนคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมโอบรัดจะต่ำกว่าค่าความเค้นระเบิดสูงสุดในชั้นส่วนคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม โดยที่เหล็กเสริมโอบรัดที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่า จะทำให้เกิดความเค้นระเบิดสูงสุดต่ำกว่าเหล็กเสริมที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มหน้าตัดเหล็กเสริม จะเปรียบเสมือนเพิ่มแรงโอบรัดคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียว ทำให้ลดการขยายตัวออกโดยรวม และเมื่อพิจารณาการแปรปรวนทางด้านข้าง จะเห็นว่า เมื่อห่างออกมาจากแนวท่อร้อยลวด ค่าความเค้นระเบิดจะค่อย ๆ ลดลง จนมีค่าต่ำสุดที่ระยะประมาณครึ่งหนึ่ง ก่อนที่จะถึงแนวเหล็กเสริม หลังจากนั้น ค่าความเค้นระเบิดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงสุดในคอนกรีตส่วนที่โอบหุ้มอยู่นอกแนวเหล็กเสริม แล้วลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกัน ที่ผิวของชั้นส่วนบริเวณสมอยึด โดยที่ค่าความเค้นระเบิดสูงสุดในชั้นส่วนคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมโอบรัดหน้าตัดใหญ่กว่า จะมีค่ามากกว่าในชั้นส่วนที่มีเหล็กเสริมหน้าตัดเล็กกว่า ทั้งนี้สืบเนื่องจากที่บริเวณใกล้กับแนวเหล็กเสริม คอนกรีตที่รับความเค้นของหน่วยแรงอัดที่เกิดจากการอัดแรงจะพยายามแบ่งตัวขยายออกในขณะที่เหล็กเสริมก็จะทำหน้าที่โอบรัดคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียว คอนกรีตบริเวณนั้นจึงถูกรัดเค้น ทำให้หน่วยแรงในบริเวณนั้นกลับสูงขึ้น โดยที่เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่จะมีแรงเค้นต่อคอนกรีตมากกว่าเหล็กเสริมขนาดเล็ก นอกจากนี้แล้วการใช้เหล็กเสริมโอบรัดขนาดใหญ่จะทำให้ผิวสัมผัสต่อเนื้อระหว่างคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวกับคอนกรีตที่โอบหุ้มอยู่โดยรวมลดลง อันจะมีผลทำให้

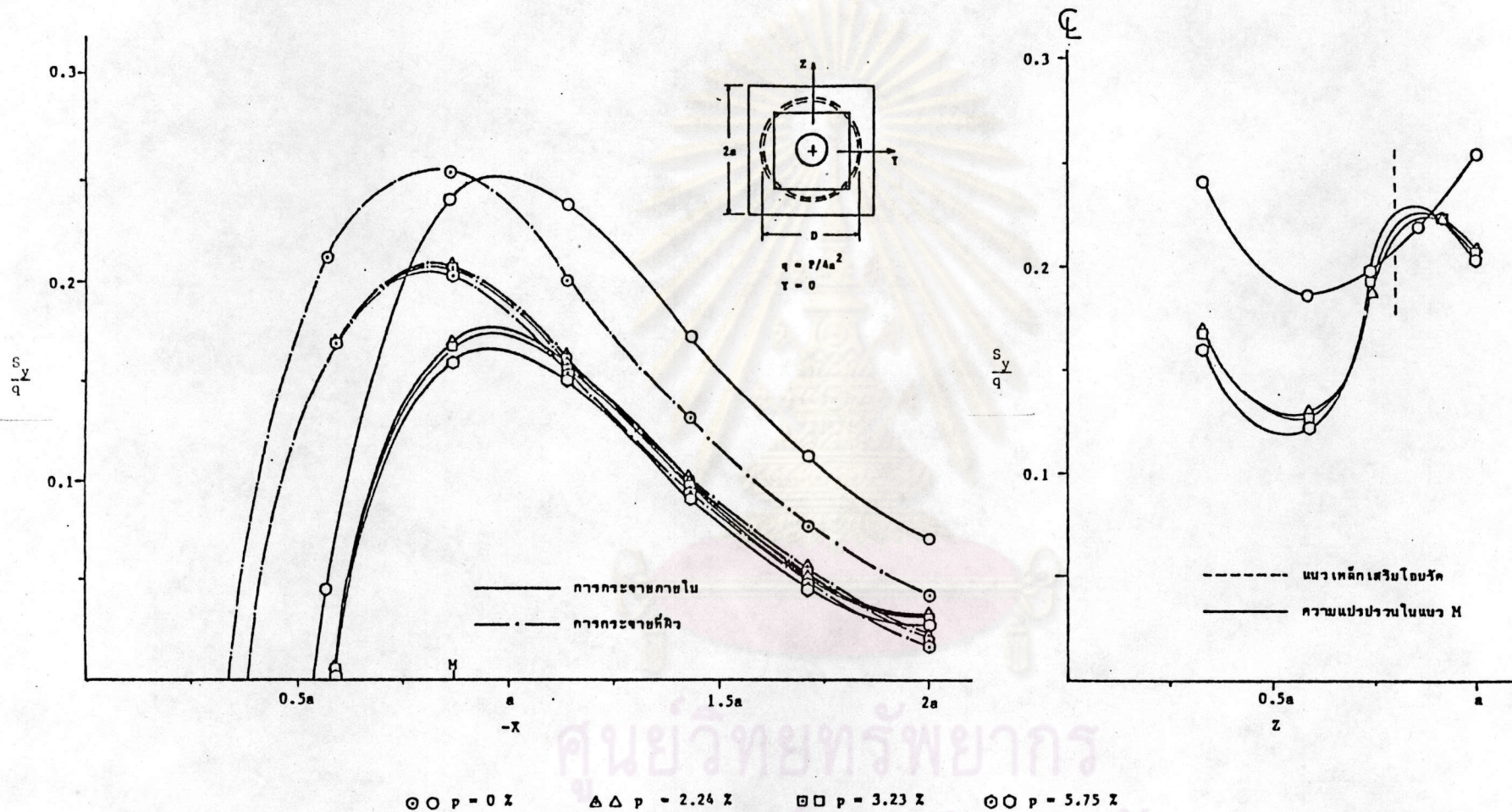


คอนกรีตส่วนที่โอบหุ้มเกิดความเปราะบางมากขึ้น และการขยายตัวออกวงของปลอกเกลียวที่เกิดจากแรงดันของคอนกรีตในส่วนที่อยู่ในวงปลอกเกลียวก็จะไปดันคอนกรีตส่วนที่โอบหุ้มอยู่โดยรอบวงปลอกเกลียวซึ่งเป็นส่วนที่เปราะบางเนื่องจากไม่มีการโอบรัดช่วย จึงทำให้หน่วยแรงดึงในส่วนเปลือกของคอนกรีตมีค่าสูง เมื่อแรงอัดเพิ่มมากขึ้นจนเกินกว่าความแข็งแรงของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดแล้ว คอนกรีตในส่วนเปลือกที่โอบหุ้มอยู่โดยรอบวงปลอกเกลียวนี้จะเริ่มปริแตกและอาจหลุดร่อนออก ซึ่งจากการเปรียบเทียบการกระจายของความเค้นระเบิดรูปที่ 3.8 จะเห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมโดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดนั้น จะช่วยลดความเค้นระเบิดภายในได้ แต่จะกลับเป็นการเพิ่มความเค้นระเบิดในบริเวณเปลือกของคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมปลอกเกลียวอยู่ ดังนั้น เหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวในชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด ควรจะใช้เหล็กเสริมซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็ก และมีระยะห่างระหว่างวงปลอกเกลียวน้อยเพื่อให้แรงโอบรัดคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ แต่ทั้งนี้ต้องไม่น้อยกว่าระยะห่างน้อยที่สุดที่ยอมให้ เพื่อมิให้เป็นอุปสรรคระหว่างปฏิบัติการเทคอนกรีต

### 3.2.3 การเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการทดสอบตัวอย่าง

ในการศึกษาผลของเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวที่มีต่อพฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดนั้น นอกเหนือไปจากการศึกษาโดยการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์สามมิติแล้ว ยังได้มีการทดสอบตัวอย่างชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอเลเมนต์ โดยนายสายันต์ ศิริมนตรี ได้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับผลการโอบรัดจากเหล็กเสริมที่มีต่อกำลังของบริเวณสมอยึด โดยทดสอบตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่าง ๆ กัน (ตามตารางที่ 3.1) ในชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดขนาด 180 ตัน อันเป็นขนาดซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตความสามารถของเครื่องมือทดสอบ ที่จะทดสอบจนถึงกำลังประลัยของชิ้นส่วนบริเวณสมอยึดได้ ดังนั้นตอนและรายละเอียดวิธีการทดสอบที่แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์ของ นายสายันต์ ศิริมนตรี ซึ่งในการทดสอบตัวอย่างชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดนี้ ได้มีการวัดความเครียดที่ผิวของตัวอย่างทดสอบ เพื่อศึกษาถึงความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตส่วนที่โอบหุ้มเหล็กเสริมอยู่โดยรอบ โดยทำการวัดการหดตัวในแนวแกนตามน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ





รูปที่ 3.8 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว ในสมอียดขนาด 180 ตัน



ตารางที่ 3.1 รายละเอียดแบบจำลองและตัวอย่างทดสอบในการศึกษาผลของเหล็กเสริม  
โอบรัดแบบปลอกเกลียว

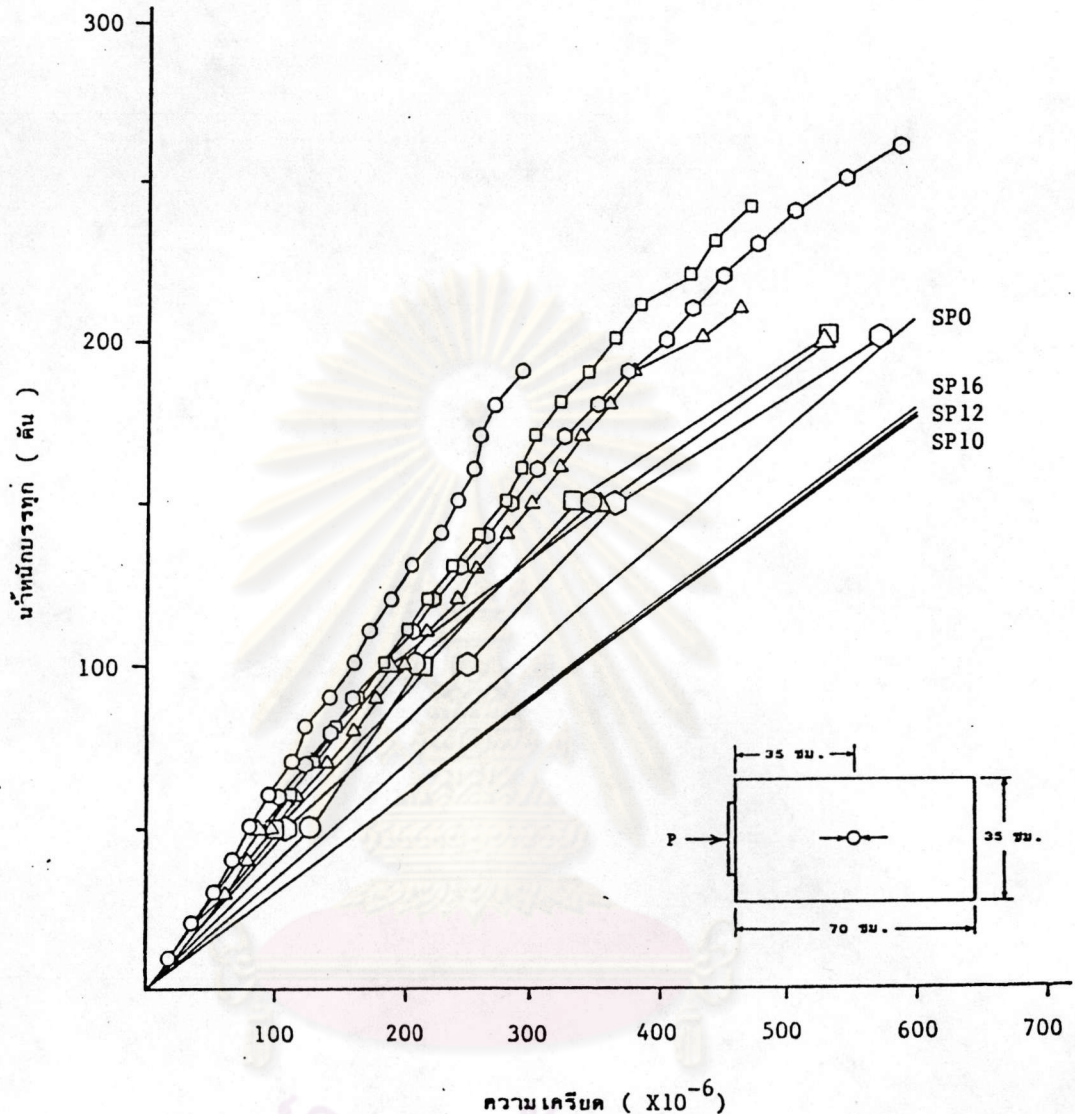
แบบจำลอง	ตัวอย่างทดสอบ	2a (ซม)	2a (ซม)	เหล็กเสริม โอบรัดแบบปลอกเกลียว			
				วงปลอกเกลียว (ซม)		หน้าตัด (มม.)	ปริมาณ (%)
				ขนาด	ระยะห่าง		
K180SP0	SP0	35	21	28	5	-	0
K180SP10	SP10	35	21	28	5	10	2.24
K180SP12	SP12	35	21	28	5	12	3.23
K180SP16	SP16	35	21	28	5	16	5.75



ทำด้วยเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าร่วมกับเกจวัดความเครียดเชิงกลซึ่งติดที่บริเวณกึ่งกลางของผิวข้างทั้ง 2 ด้านซึ่งตรงข้ามกัน และใช้เกจวัดความเครียดเชิงกลวัดการยืดตัวตามแนวราบหรือการปองตัวของตัวอย่างทดสอบที่ผิวของชิ้นส่วนทดสอบซึ่งห่างจากปลายด้านที่มีการถ่ายแรงเป็นระยะ 15 และ 30 มม. โดยที่การใช้เกจวัดความเครียดเชิงกลวัดความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทั้งในตัวอย่างที่มีและไม่มีเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวนั้น จะกระทำในช่วงก่อนเกิดรอยแตกร้าวที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายอันอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการวิบัติของแท่งตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ยังได้มีการวัดความเครียดของเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวโดยใช้เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าติดที่ผิวของเหล็กเสริมโอบรัด ที่ระยะ 10, 15, 20, 25 และ 35 มม. จากปลายด้านที่มีการอัดแรงตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงการโอบรัดคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวที่ระยะต่าง ๆ โดยละเอียด ซึ่งค่าความเครียดที่วัดได้จะมีความถูกต้องค่อนข้างมากเนื่องจากเป็นการวัดความเครียดของวัสดุที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับพฤติกรรมของวัสดุอิลาสติกเชิงเส้น (Linearly elastic materials) และไม่เกิดรอยแตกร้าวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น เช่นคอนกรีตอีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแท่งตัวอย่าง กับความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9, 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ พบว่า ความเครียดในทิศทางตามแนวลาดอัดแรงที่ผิวของคอนกรีตซึ่งวัดได้จากการทดสอบในทุก ๆ ตัวอย่าง ค่อนข้างจะน้อยกว่าความเครียดในบริเวณเดียวกัน ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ก็มีแนวโน้มที่ค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงไปโดยตลอดจนเกิดรอยแตกร้าวที่สังเกตเห็นได้ที่ผิวของตัวอย่างทดสอบ และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กล่าวคือที่น้ำหนักบรรทุกเท่าเดียวกัน ความเครียดของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กเสริมจะน้อยที่สุด ในขณะที่ความเครียดของตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมโอบรัด 10 มม. จะมากที่สุด และความเครียดดังกล่าวจะลดลงอีกเล็กน้อยเมื่อขนาดเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น สืบเนื่องจากการถ่ายแรงอัดในตัวอย่างไม่มีการเสริมนั้นจะเข้มข้นบริเวณตามแนวแกนกลางของตัวอย่างทดสอบ แต่เมื่อมีการเสริมเหล็กเข้าไปในตัวอย่างเป็นปลอกเกลียวเหล็กเสริมโอบรัดจะช่วยถ่ายแรงอัดกระจายเข้าไปทั่วทั้งหน้าตัดของชิ้นส่วนได้มากกว่า ทำให้ความเครียดที่ผิวของตัวอย่างที่มีเหล็กเสริมมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีเหล็กเสริม และเมื่อขนาดเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น มีผลสืบเนื่องทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวเพิ่มขึ้น





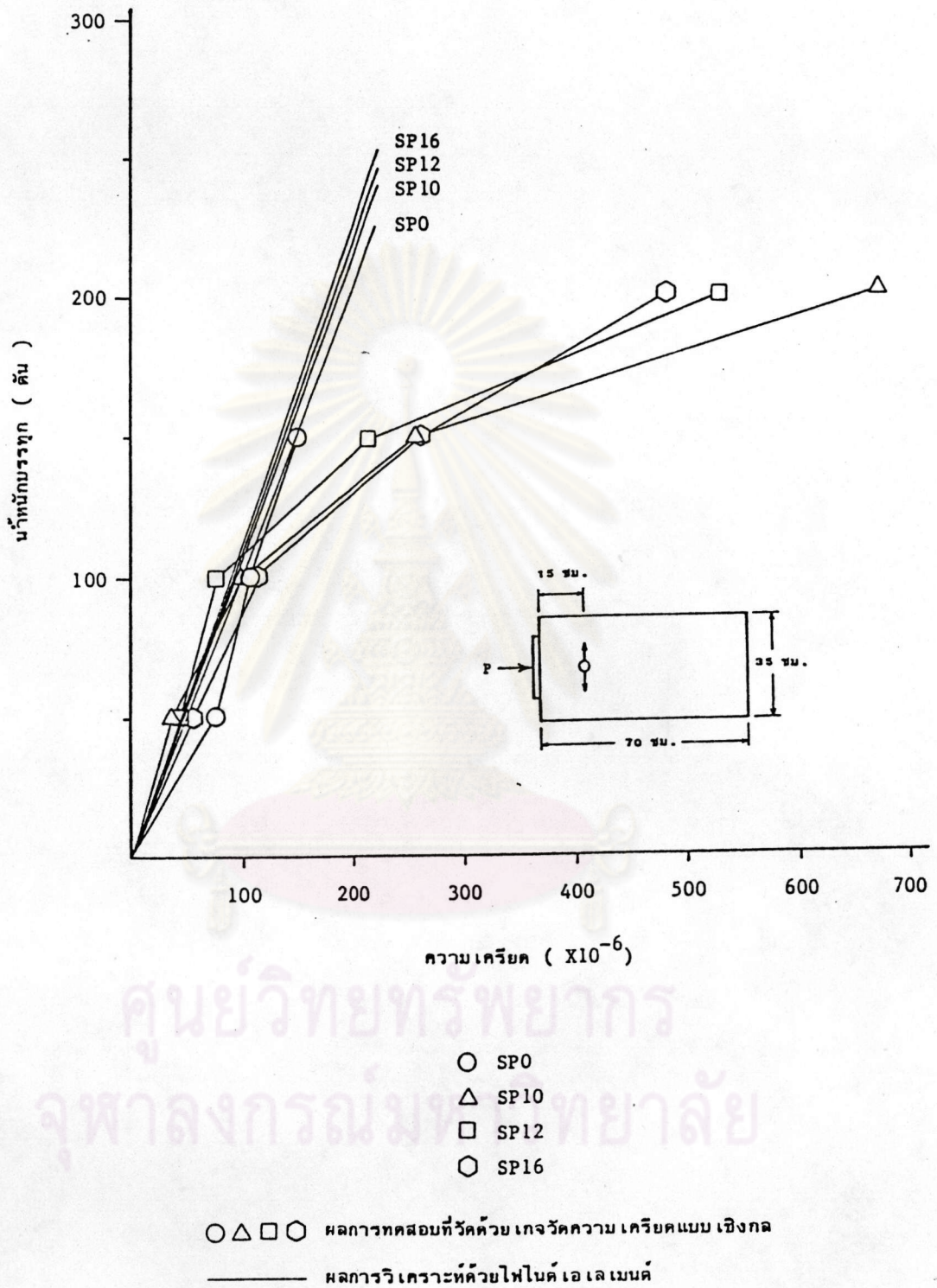
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ○ SP0
- △ △ SP10
- □ SP12
- ○ SP16

- △ □ ○ ผลการทดสอบที่วัดด้วย เกจวัดความ เคียดแบบไฟฟ้า
- △ □ ○ ผลการทดสอบที่วัดด้วย เกจวัดความ เคียดแบบ เชิงกล
- ผลการวิเคราะห์ด้วยโฟโนค เอ เลเมนต์

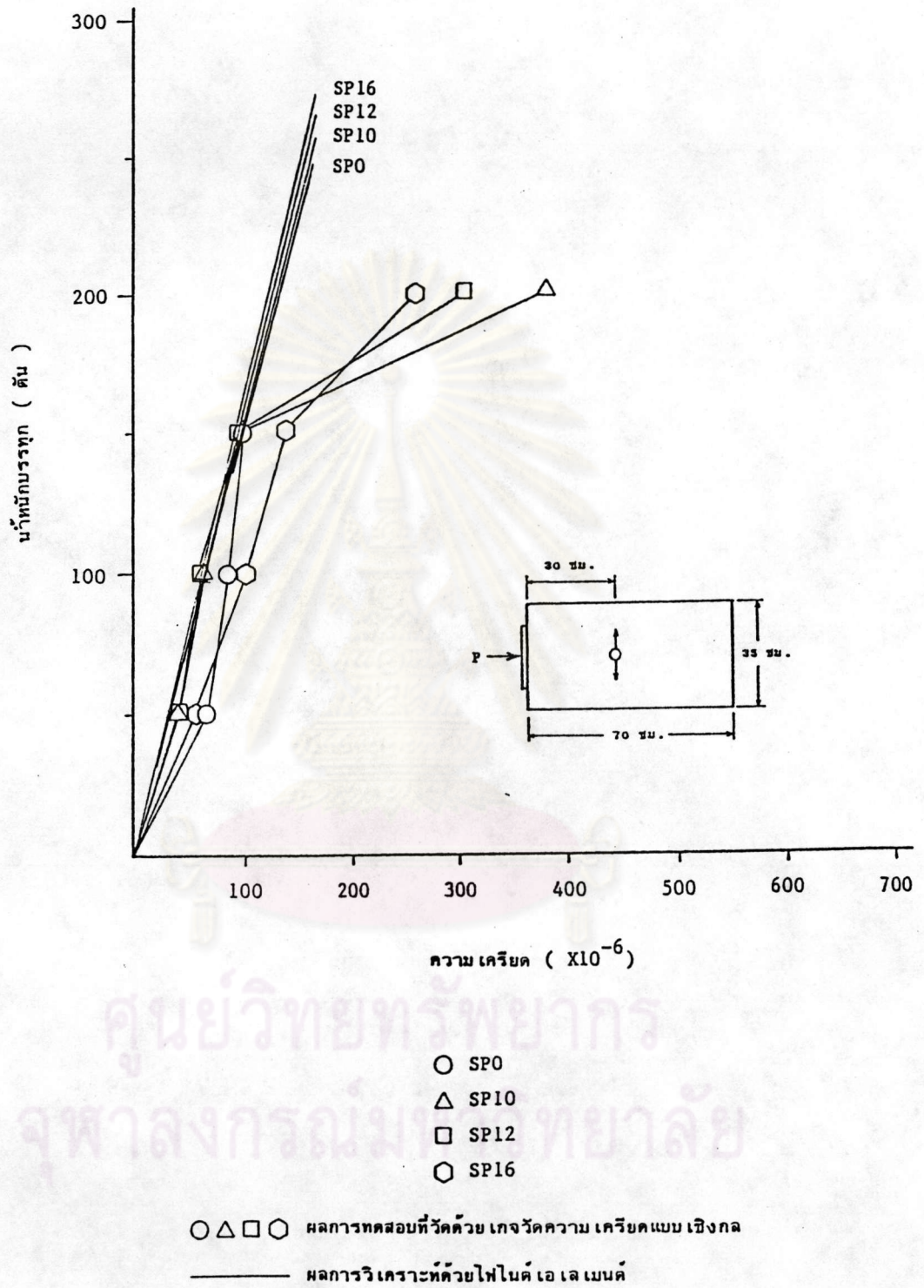
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุกับความเคียดในทิศทางตามแนวหลอดอัดแรงที่กึ่งกลางผิวข้างของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด





รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุกับความเครียดตามแนวขวาง บริเวณผิวข้างของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดซึ่งห่างจากปลายที่มีการอัดแรง 15 ซม.





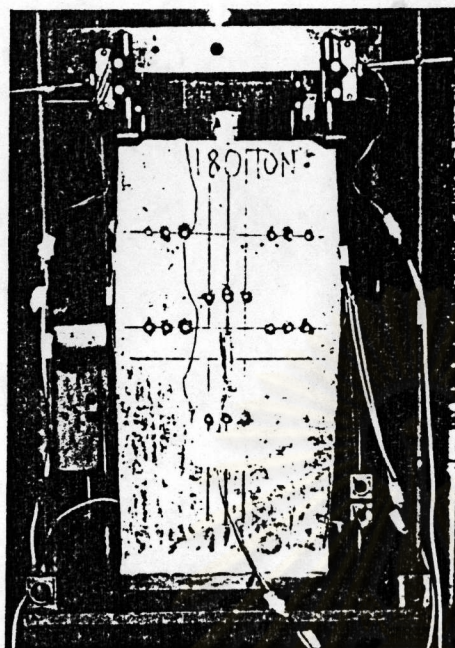
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบวกรวมกับความเครียดตามแนวขวาง บริเวณผิวข้างของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียดซึ่งห่างจากปลายที่มีการอัดแรง 30 ซม.



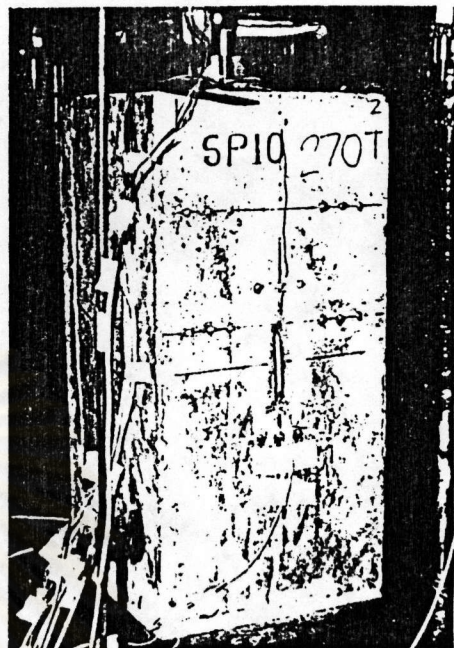
ความเครียดในทิศทางตามแนวแรงจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดตามแนวขวางทั้งที่ระยะ 15 และ 30 ซม. จากหน้าตัดที่มีแรงกระทำนั้น ในช่วงแรกมีแนวโน้มค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ แต่ในตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นถึง 100 ตัน ความเครียดตามแนวขวางบริเวณผิวของตัวอย่างที่ระยะ 15 ซม. จากหน้าตัดที่เริ่มมีการถ่ายแรง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ระบุว่าเป็นตำแหน่งที่เกิดความเค้นระเบิดขั้นสูงสุด จะเริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรง และความเครียดตามขวางที่ระยะ 30 ซม. อันเป็นตำแหน่งที่ความเค้นระเบิดมีค่าน้อยกว่า จะเริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 150 ตัน ซึ่งการเบี่ยงเบนดังกล่าว อาจเป็นผลเนื่องมาจาก เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น อาจเกิดรอยแตกร้าวขนาดย่อม กอปรกับการขยายตัวออกทางด้านข้างซึ่งแสดงอยู่ในรูปอัตราส่วนปัวซองจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น มิได้คงที่ดังที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจากการที่การเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงจะเกิดขึ้น เฉพาะในความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในแนวขวาง ในขณะที่ความสัมพันธ์ของความเครียดตามแนวน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงตลอด พอดีจะเป็นเครื่องบ่งชี้ได้ว่ารอยแตกร้าวขนาดย่อมที่อาจเกิดขึ้นนั้น จะวางตัวอยู่ในทิศทางขนานกับแนวการกระทำของน้ำหนักบรรทุก จึงทำให้วัดความเครียดในแนวขวางได้ในอัตราที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นยังเป็นที่น่าสนใจว่า ในตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กเสริม ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดตามแนวขวางจะไม่เบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงเลยจนเริ่มเกิดรอยแตกร้าวที่มองเห็นเป็นแนวยาวบริเวณกลางผิวข้าง ที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 175 ตัน ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสอดคล้องกันกับตำแหน่งและทิศทางที่เกิดความเค้นระเบิดสูงสุดบริเวณผิวของชิ้นส่วนบนระนาบวิกฤติที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวนี้ก็แพร่ขยายเพิ่มมากขึ้นจนถึงขั้นวิบัติแบบทันทีทันใด ดังรูปที่ 3.13 ที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 226 ตัน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 3.14 ถึง 3.18 พบว่า มีแนวโน้มในช่วงแรกค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริม ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดสูงสุดคือที่ระยะประมาณ 15 ซม. จากหน้าตัดที่มีการถ่ายแรง จะให้ค่าความเครียดที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการ





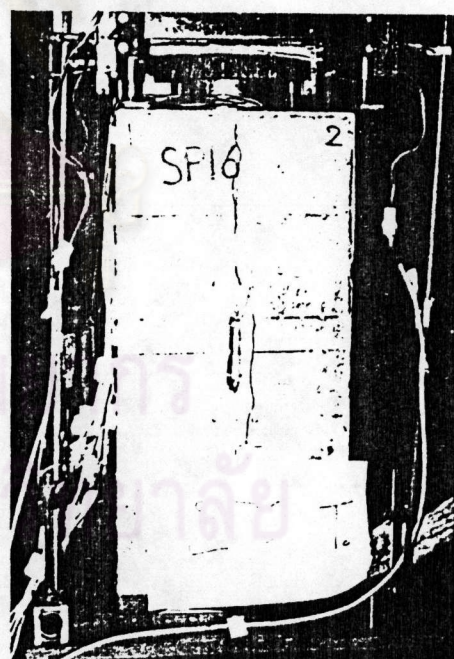
SPO ที่ 180 ตัน



SP10 ที่ 270 ตัน



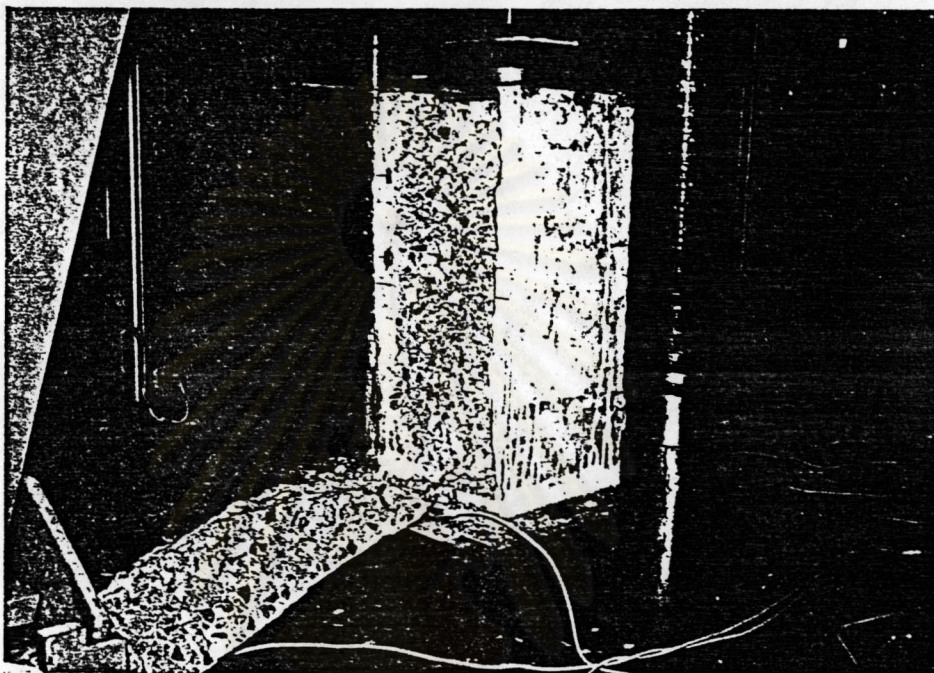
SP12 ที่ 250 ตัน



SP16 ที่ 270 ตัน

รูปที่ 3.12 รอยแตกริ้วเริ่มแรกของตัวอย่างทดสอบต่าง ๆ

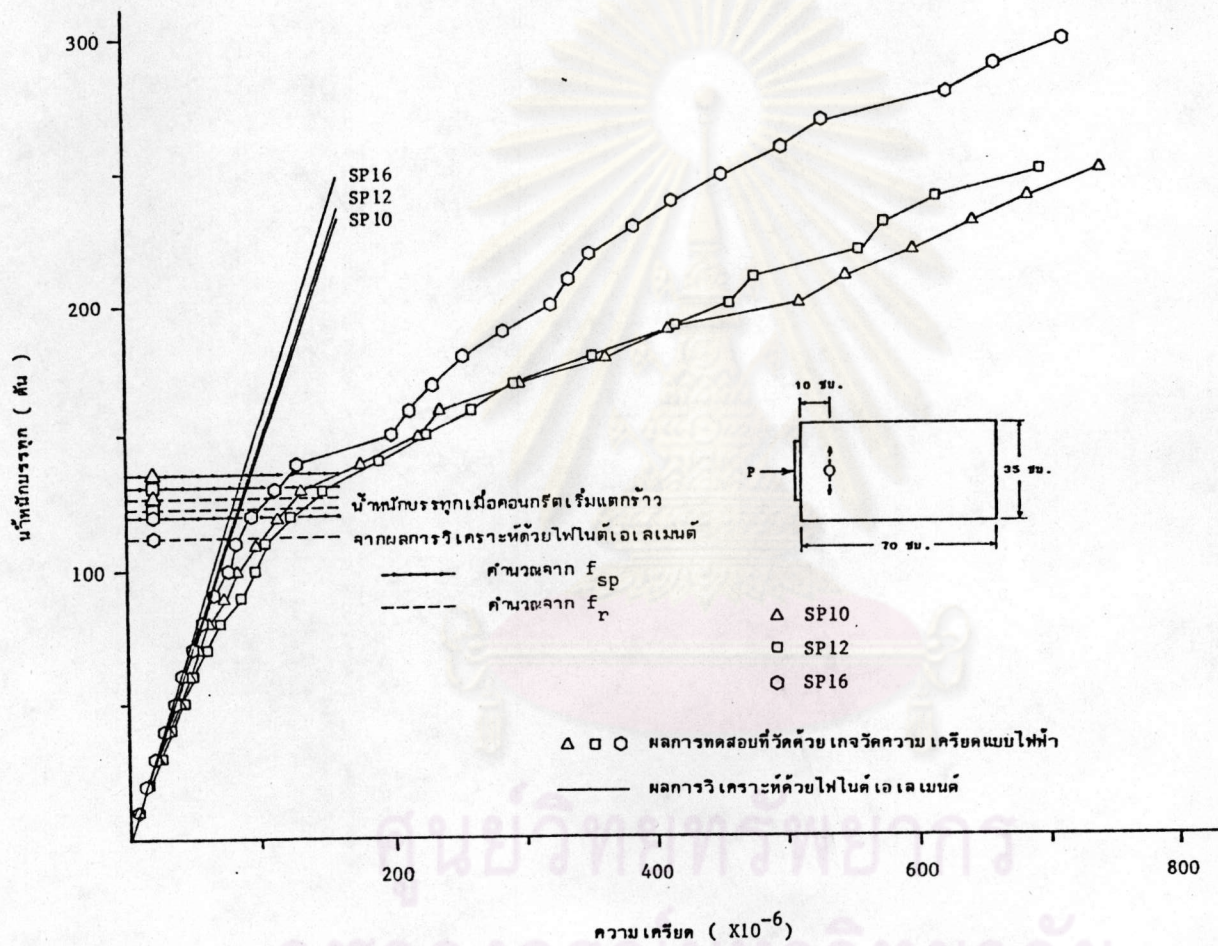




รูปที่ 3.13 ผลจากการวิบัติแบบกันที่กันใดของแท่งตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการเสริมเหล็ก

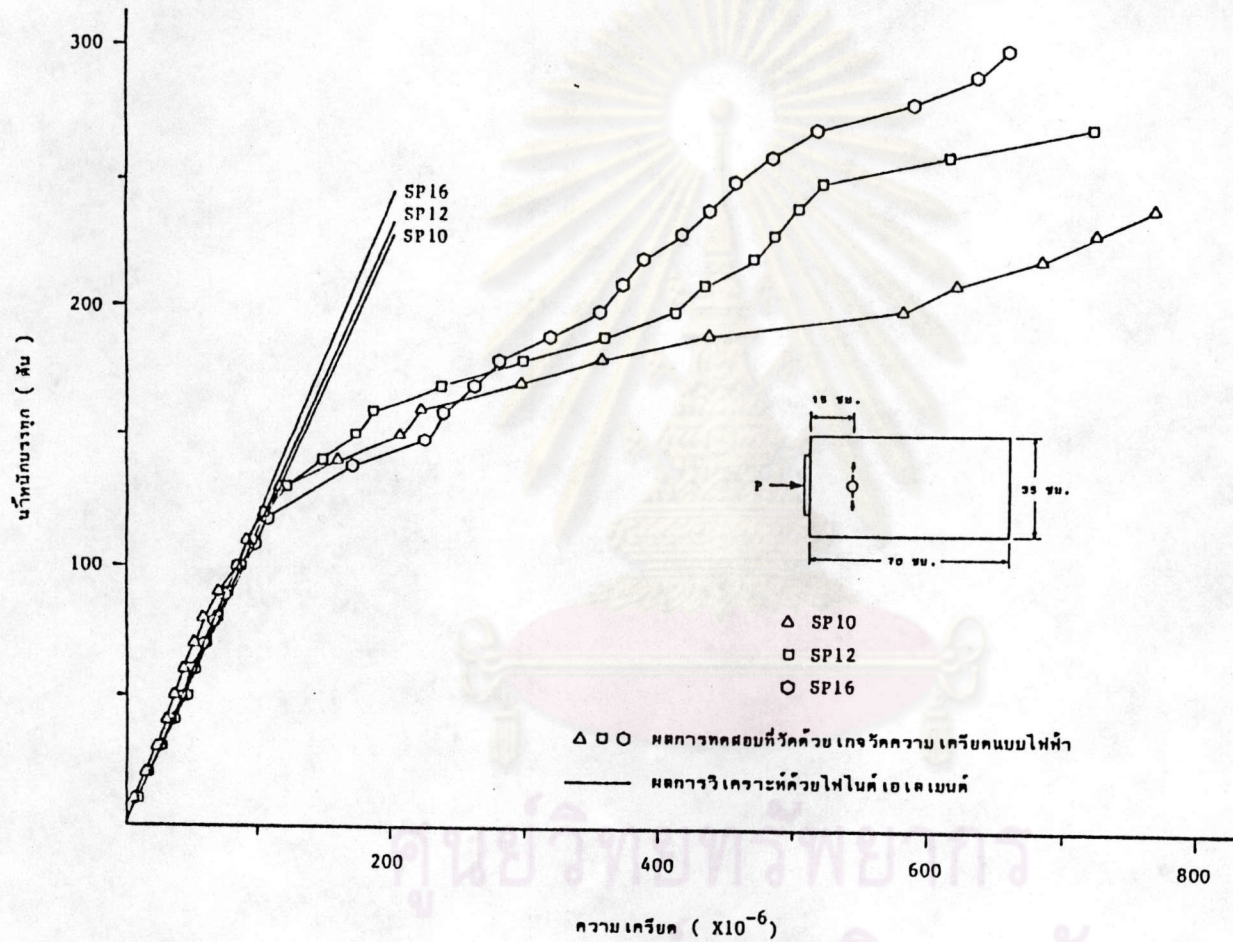
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





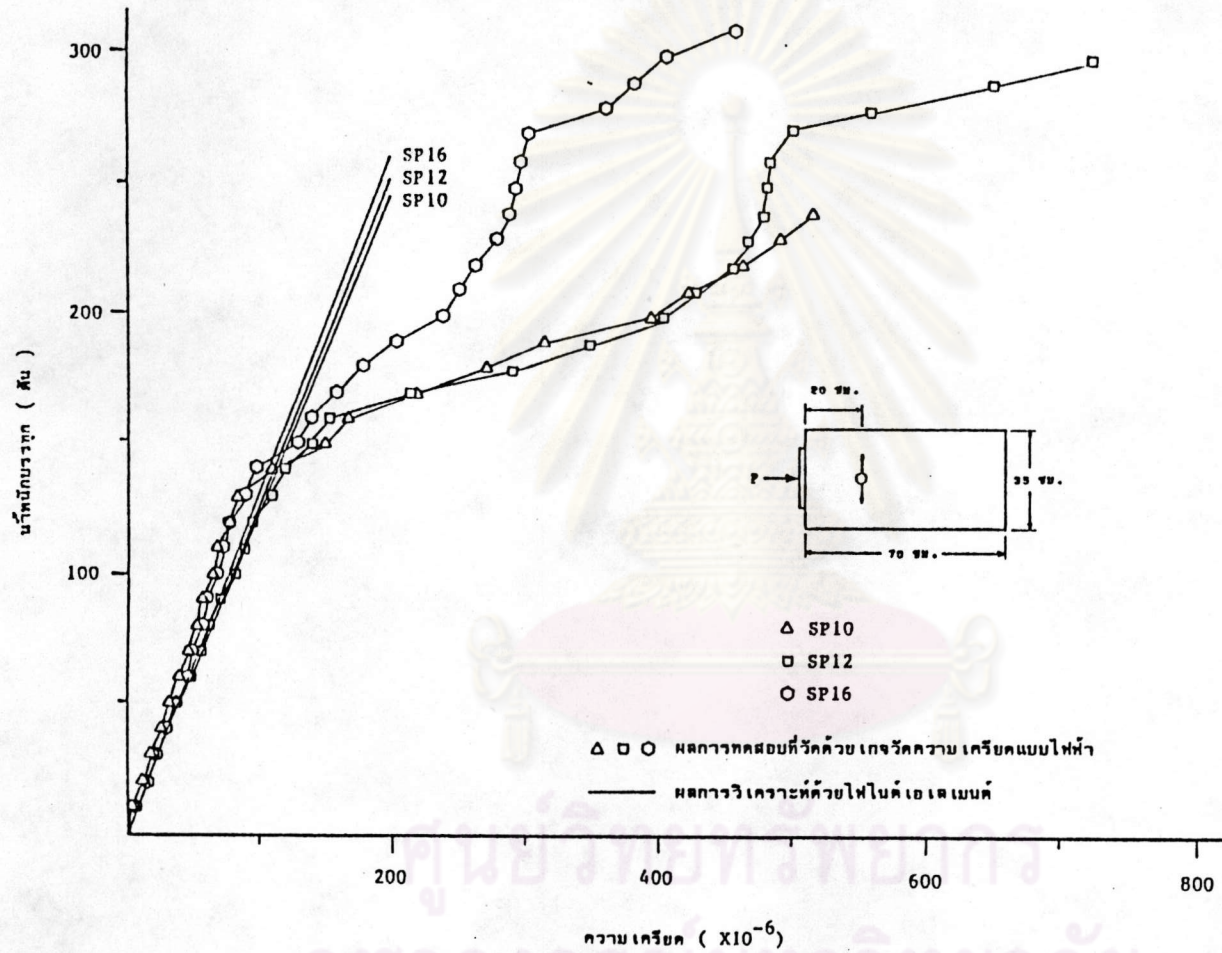
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบดรทุกกับความเคียวคในเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว ณ ตำแหน่งซึ่งห่างจากปลายด้านที่มีการอัดแรง 10 ซม.





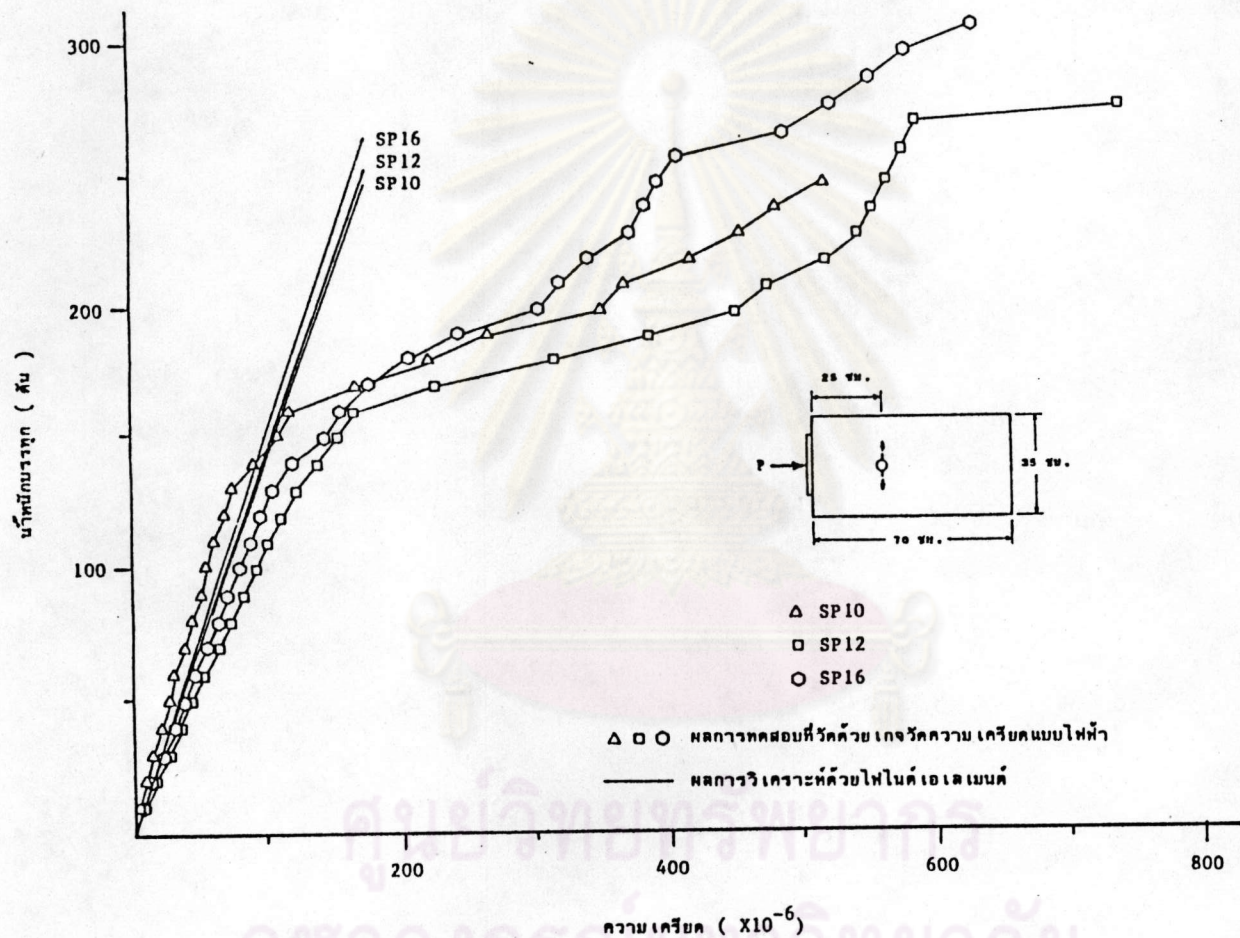
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว ณ ตำแหน่งซึ่งห่างจากปลายด้านที่มีการอัดแรง 15 ซม.



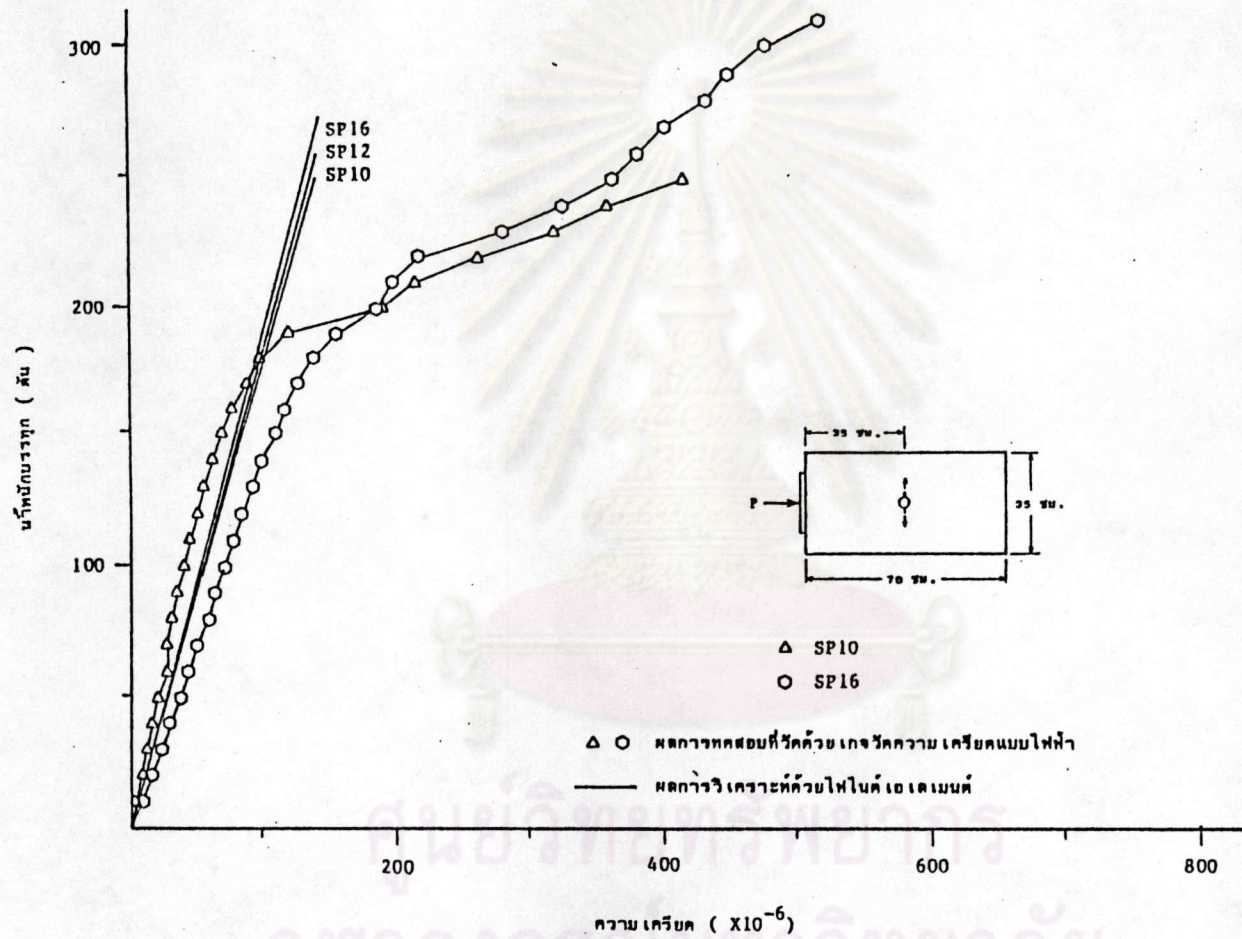


รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่ซึมบรกรกกับค่าความเครียดในเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว ณ ตำแหน่งซึ่งห่างจากปลายด้านที่มีการอัดแรง 20 ซม.





รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่แทรกซึมกับความเครียดในเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว ณ ตำแหน่งซึ่งห่างจากปลายด้านที่มีการอัดแรง 25 ซม.



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่ดูดซับกับความเครียดในเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว ณ ตำแหน่งซึ่งห่างจากปลายด้านที่มีการอัดแรง 35 ซม.



วิเคราะห์มาก แต่เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนถึง 130 ตันโดยประมาณ แนวโน้มของความสัมพันธ์ก็จะเริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงอันเนื่องมาจากคอนกรีตเริ่มสูญเสียพฤติกรรมเชิงเส้นและขยายตัวออกโดยรอบมากขึ้นและอาจจะเกิดรอยแตกร้าวขนาดย่อมภายในคอนกรีตในทิศทางที่ขนานกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ มีผลทำให้ความเครียดในเหล็กเสริมที่โอบรัดคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น และพบว่า น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ค่าความเค้นหลักสูงสุดซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงดึงแยกและโมดูลัสของการแตกร้าวของคอนกรีต ให้ค่าที่สอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกที่แนวโน้มของความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบเริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรง ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งในช่วงนี้คอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวก็จะถูกโอบรัดจากเหล็กเสริม ทำให้ลดการขยายตัวออกทางด้านข้าง จึงสามารถรับแรงได้เพิ่มมากขึ้น แต่คอนกรีตส่วนเปลือกที่โอบหุ้มอยู่โดยรอบ ซึ่งเป็นส่วนที่เปราะบางกว่าเนื่องจากไม่มีการโอบรัดช่วย ก็จะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวซึ่งสังเกตเห็นเป็นแนวยาวบริเวณกลางผิวข้างตัวอย่างทดสอบ ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งหลังจากนี้ความเครียดในแนวเหล็กเสริมจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากคอนกรีตในส่วนเปลือกที่โอบหุ้มเหล็กเสริมอยู่เกิดการแตกร้าว ไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป จึงทำให้เหล็กเสริมโอบรัดต้องต้านทานความพยายามที่จะขยายตัวออกทางด้านข้างของคอนกรีตภายในวงปลอกเกลียวอย่างเต็มที่ แต่เพียงลำพัง จนกระทั่งเกิดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ รอยแตกร้าวจะกระจายทั่วไป ดังรูปที่ 3.19 และเมื่อทำการกระแทกคอนกรีตที่แตกร้าวภายหลังจากที่เสร็จสิ้นการทดสอบ พบว่าคอนกรีตส่วนที่โอบหุ้มวงเหล็กเสริมปลอกเกลียว จะหลุดร่อนออกมาได้โดยง่าย (ดังรูปที่ 3.20 และผลการทดสอบทั้งหมดได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 3.2) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ที่ระบุว่า ความเค้นบนระนาบวิกฤติในส่วนเปลือกของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดที่มีเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวจะสูงกว่าความเค้นในส่วนอื่น ดังนั้นการแตกร้าว จะเกิดขึ้นในคอนกรีตส่วนนี้ก่อนดังที่สังเกตเห็นได้ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวกับระยะที่ทำการวัดที่น้ำหนักบรรทุก 50 ตันและ 100 ตันของแท่งตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง กับผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดที่วัดได้ มีแนวโน้มสมเหตุสมผลและสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ แล้วเมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงสถิติดังแสดงในตารางที่ 3.3 ค่าความเครียดที่วัดได้จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์แตกต่างกันประมาณ 15% โดยที่กลุ่มข้อมูลมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 15% ซึ่งจัดว่าผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์-

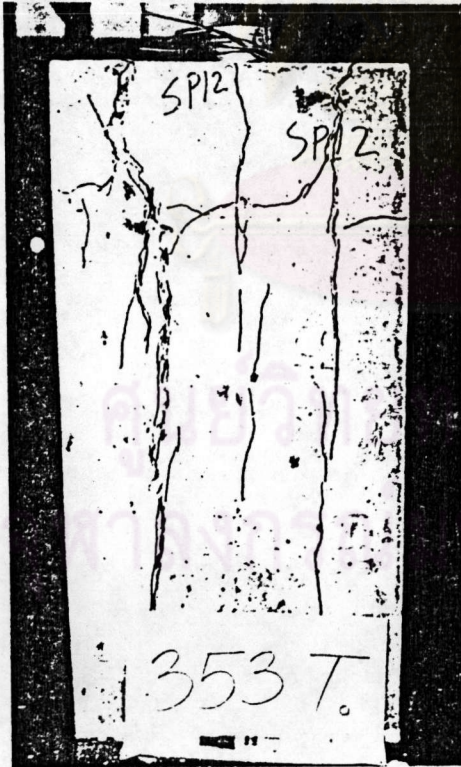




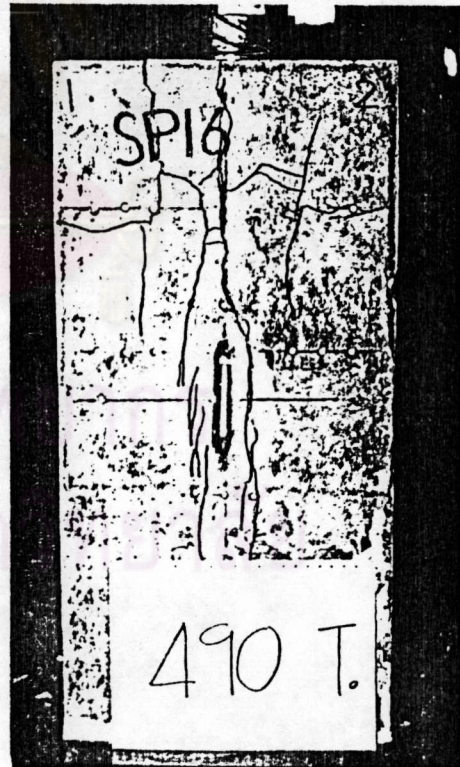
SPO ที่ 226 ตัน



SP10 ที่ 328 ตัน



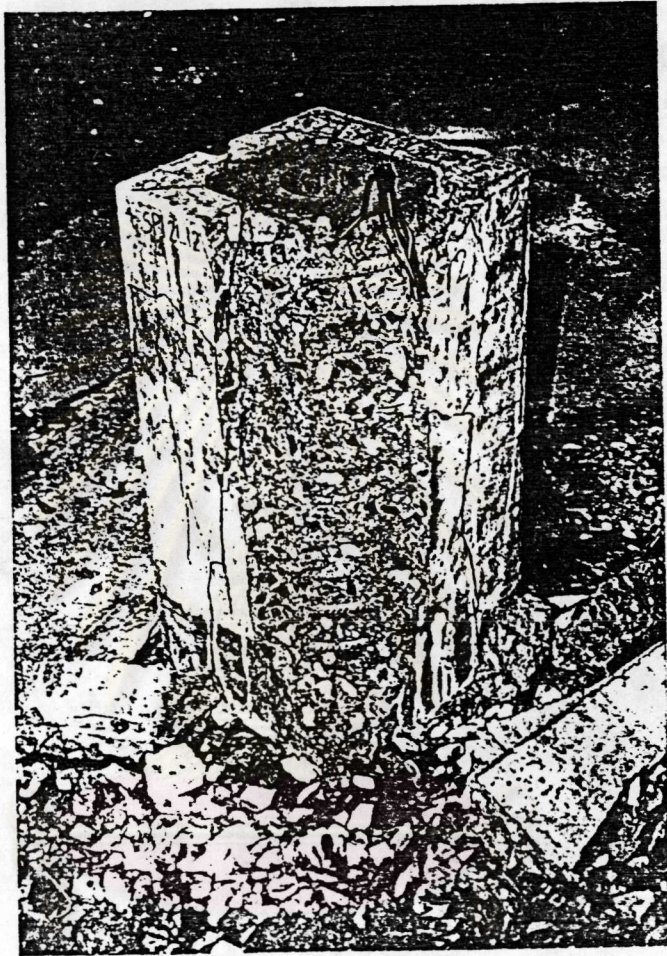
SP12 ที่ 353 ตัน



SP16 ที่ 490 ตัน

รูปที่ 3.19 ลักษณะการแตกร้าวภายหลังการวิบัติของแท่งตัวอย่างทดสอบ





รูปที่ 3.20 การหลุดร่อนออกโดยง่ายของคอนกรีตส่วนที่โอบหุ้มวงเหล็กเสริมปลอกเกลียว

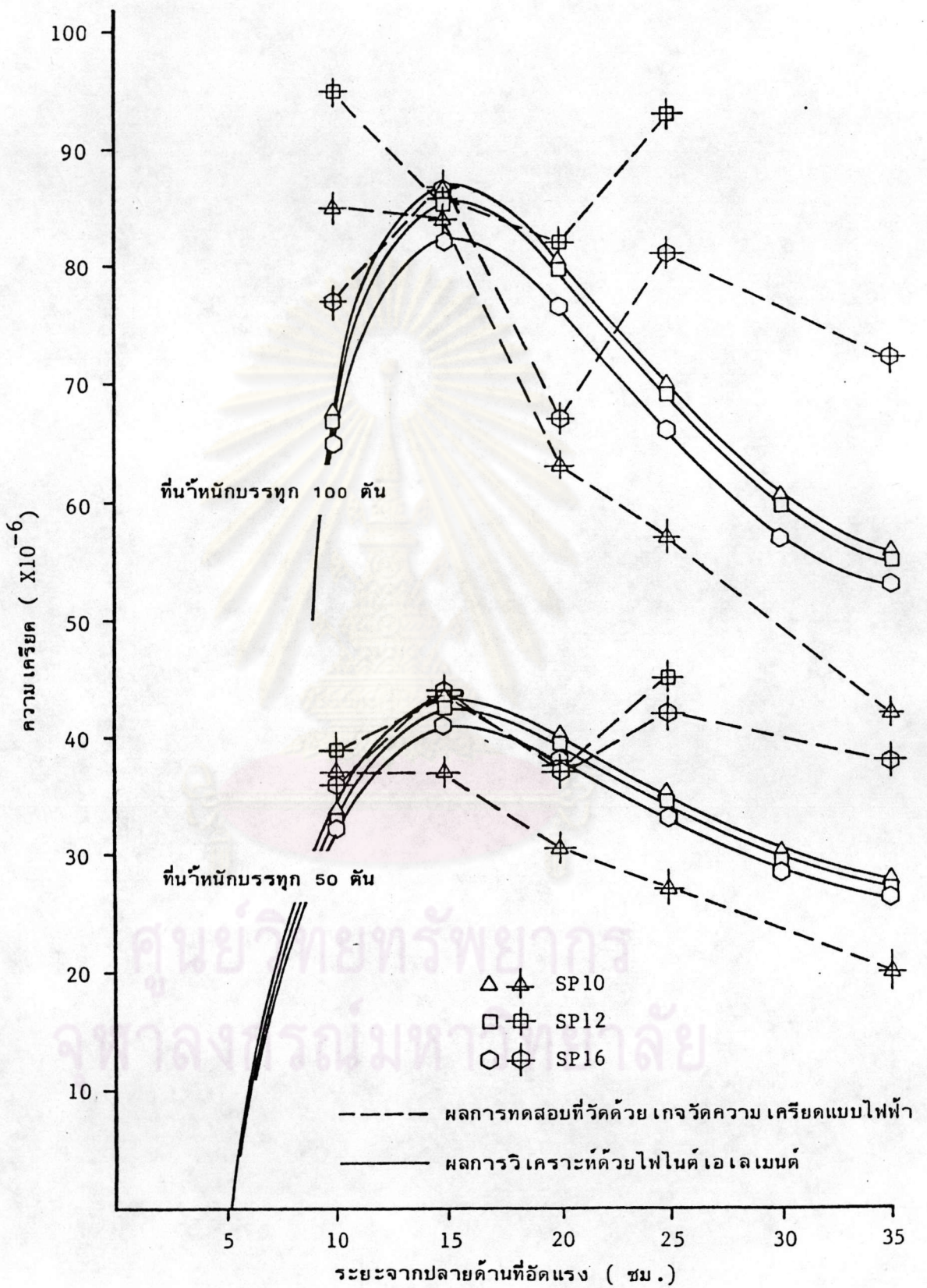


ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบตัวอย่างชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด

ตัวอย่างทดสอบ	$P_{cr}$ (T)	$P_{ult}$ (T)	$f'_c$ (ksc)	$f_{sp}$ (ksc)
SP0	175	226	478	48
SP10	270	328	466	53
SP12	250	353	499	44
SP16	270	490	476	39

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.21 การเปรียบเทียบความเคียดในเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่หน้าขั้วบรทุก 50 ตันและ 100 ตัน



ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์เชิงสถิติสำหรับความเครียดในเหล็กเสริม  
ที่น้ำหนักบรรทุก 50 และ 100 ตัน

ตัวอย่างทดสอบ	ระยะ (ซม)	น้ำหนักบรรทุก 50 ตัน			น้ำหนักบรรทุก 100 ตัน		
		$e_p$	$e_a$	$e_p/e_a$	$e_p$	$e_a$	$e_p/e_a$
SP10	10	33.8	36	0.94	67.6	85	0.80
	15	43.0	37	1.16	86.3	84	1.03
	20	40.0	31	1.29	80.5	63	1.27
	25	35.0	27	1.29	69.9	57	1.23
	35	27.8	20	1.39	55.7	42	1.32
		$\bar{X}$		1.21	$\bar{X}$		1.13
		S.D.		0.17	S.D.		0.21
SP12	10	33.5	39	0.86	67.0	95	0.71
	15	42.6	43	0.99	85.2	86	0.99
	20	39.8	37	1.07	79.7	82	0.97
	25	34.6	45	0.77	69.2	93	0.74
		$\bar{X}$		0.92	$\bar{X}$		0.85
		S.D.		0.13	S.D.		0.14
SP16	10	32.5	36	0.90	64.9	77	0.84
	15	41.0	44	0.93	82.1	87	0.94
	20	38.0	37	1.02	76.5	67	1.14
	25	33.0	42	0.79	66.0	81	0.81
	35	26.5	38	0.70	52.9	72	0.73
		$\bar{X}$		0.87	$\bar{X}$		0.89
		S.D.		0.12	S.D.		0.15



เอเลเมนต์สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบตัวอย่างชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดในช่วงก่อนเกิดการแตกร้าว

### 3.2.4 การประเมินกำลังเริ่มแตกร้าวชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของแท่งตัวอย่างทดสอบพร้อมทั้งลักษณะและตำแหน่งที่เกิดรอยแตกร้าว เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ สรุปได้ว่า ผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบตัวอย่างชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด ในช่วงก่อนเกิดรอยแตกร้าว ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริมซึ่งเป็นเครื่องแสดงให้เห็นถึงการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเหล็กเสริม โอบรัดคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียว จะมีการเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงของผลการวิเคราะห์ ก่อนเกิดรอยแตกร้าวที่สังเกตเห็นได้ อันเป็นผลเนื่องมาจากเหล็กเสริมโอบรัดต้องต้านทานการขยายตัวของคอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวซึ่งเริ่มสูญเสียพฤติกรรมทางอีลาสติกเชิงเส้นและเกิดรอยแตกร้าวขนาดย่อมขึ้นภายในแต่การโอบรัดของเหล็กเสริมจะช่วยให้คอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวนั้นยังสามารถรับแรงอีกต่อไปได้ คอนกรีตส่วนที่อยู่ภายในวงปลอกเกลียวจึงมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างออกไป แต่คอนกรีตส่วนเปลือกที่โอบหุ้มเหล็กเสริมอยู่โดยรอบ มิได้มีพฤติกรรมดังเช่นคอนกรีตภายในวงปลอกเกลียวเนื่องจากไม่มีการโอบรัดของเหล็กเสริมช่วย ดังจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่วัดตามแนวแกนของชิ้นส่วนคอนกรีตซึ่งจะให้แนวโน้มที่ค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงไปโดยตลอด จนเกิดรอยแตกร้าวขึ้นที่ผิวของตัวอย่างทดสอบ ดังนั้นการประเมินกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวในคอนกรีตส่วนเปลือกที่โอบหุ้มเหล็กเสริมอยู่โดยรอบ จากค่าความเค้นระเบิดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ซึ่งสมมติให้คุณสมบัติของวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติกเชิงเส้นนั้น จึงน่าจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีหนึ่ง ซึ่งคอนกรีตส่วนเปลือกนี้ จะเป็นส่วนสำคัญในการป้องกันการผุกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากการกัดกร่อนจากสภาพภูมิอากาศโดยรอบ ดังนั้นกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวจึงเป็นตัวแปรสำคัญต่อความปลอดภัยของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดตัวแปรหนึ่ง เพราะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะเป็นสัญญาณอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับเหล็กเสริม ซึ่งอาจมีผลสืบเนื่องทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเสียหายได้



การแตกร้าวของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด จะปรากฏเมื่อความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าความเครียดกำลังดึงสูงสุด (Maximum tensile strain) ที่คอนกรีตจะต้านทานได้ การประเมินกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดในงานวิจัยนี้ จึงจะอาศัยค่าความเครียดสูงสุดขณะเกิดการแตกร้าวที่หาได้จากการเทียบสัดส่วนระหว่างกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบแท่งตัวอย่างกับค่าความเครียดในแนวขวางบนระนาบวิกฤติ ณ ตำแหน่งที่เกิดความเค้นระเบิดสูงสุด ที่น้ำหนักบรรทุก 100 ตัน ที่คำนวณจากผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์-เอลิเมนต์โดยคำนึงถึงอิทธิพลของอัตราส่วนปัวซองนี้เป็นปัจจัย ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.4 ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า แม้ค่าความเค้นระเบิดที่กระทำตามขวางบนระนาบวิกฤติบริเวณเปลือกคอนกรีตสำหรับแบบจำลองประเภทมีเหล็กเสริมดังที่แสดงในตาราง จะมีแนวโน้มที่มิได้ลดลงเมื่อใช้เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ภายใต้เงื่อนไขที่ให้ขนาดและระยะห่างของวงปลอกเกลียวคงที่ แต่ว่าการใช้เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนี้จะเพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) ตามแนวแกนกลางของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึด ทำให้หน่วยแรงอัดในทิศทางขนานกับแนวแกนกลาง ณ ตำแหน่งนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง และส่งผลให้ค่าความเครียดในแนวขวางที่ได้จากการคำนวณภายใต้อิทธิพลของอัตราส่วนปัวซองมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อปริมาณเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณค่าความเครียดสูงสุดขณะเกิดการแตกร้าว พบว่าค่าความเครียดสูงสุดที่คำนวณได้จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะของตัวอย่างทดสอบคือประเภทไม่มีเหล็กเสริมโอบรัด มีค่าเท่ากับ  $171 \times 10^{-6}$  ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากงานวิจัยของ Stone และ Breen [9] ซึ่งได้ค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ  $172 \times 10^{-6}$  และประเภทมีเหล็กเสริมโอบรัดซึ่งมีค่าความเครียดสูงสุดขณะเกิดการแตกร้าวเฉลี่ยเป็น  $223 \times 10^{-6}$  ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $10 \times 10^{-6}$  เนื่องด้วย จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ากลไกการแตกร้าวของตัวอย่างทั้งสองประเภทนั้นแตกต่างกัน โดยที่ชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดประเภทไม่มีเหล็กเสริมนั้น จะเกิดการแตกร้าวที่ผิวของชิ้นส่วน แต่ชิ้นส่วนประเภทมีเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวบริเวณเปลือกคอนกรีตที่โอบหุ้มเหล็กเสริมอยู่โดยรอบ

จากค่าความเครียดสูงสุดเมื่อเริ่มแตกร้าวดังกล่าว สามารถนำไปใช้ในการประเมินกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวจากผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการเทียบสัดส่วนจากค่าความเครียดสูงสุดขณะเกิดการแตกร้าว ซึ่งสำหรับตัวอย่างประเภทมีเหล็กเสริมโอบรัดจะใช้ค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ  $222 \times 10^{-6}$  ทั้งนี้เพื่อให้การประเมินกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวยู่ที่ขอบเขตล่าง



ตารางที่ 3.4 การคำนวณความเครียดสูงสุดของคอนกรีตบริเวณสมอยึดเมื่อเริ่มแตกร้าว

ประเภทตัวอย่าง	ชื่อตัวอย่าง	ผลจากการวิเคราะห์				$\epsilon_{y(max)}$ ( $\times 10^{-6}$ )
		$F_x$	$F_y$	$F_z$	$\epsilon_y$	
ไม่มีเหล็กเสริม	SPO	-57.6	20.7	0.70	97.9	171
มีเหล็กเสริมโอบรัด แบบปลอกเกลียว	SP10	-59.2	18.2	1.80	90	243
	SP12	-58.0	18.2	2.31	89	222
	SP16	-54.4	18.2	3.70	86	232
$\bar{X}$						232
S.D.						10

หมายเหตุ วิเคราะห์ที่น้ำหนักบรรทุก 100 ตัน

$$\epsilon_{y(max)} = \epsilon_y P_{cr} / 100$$

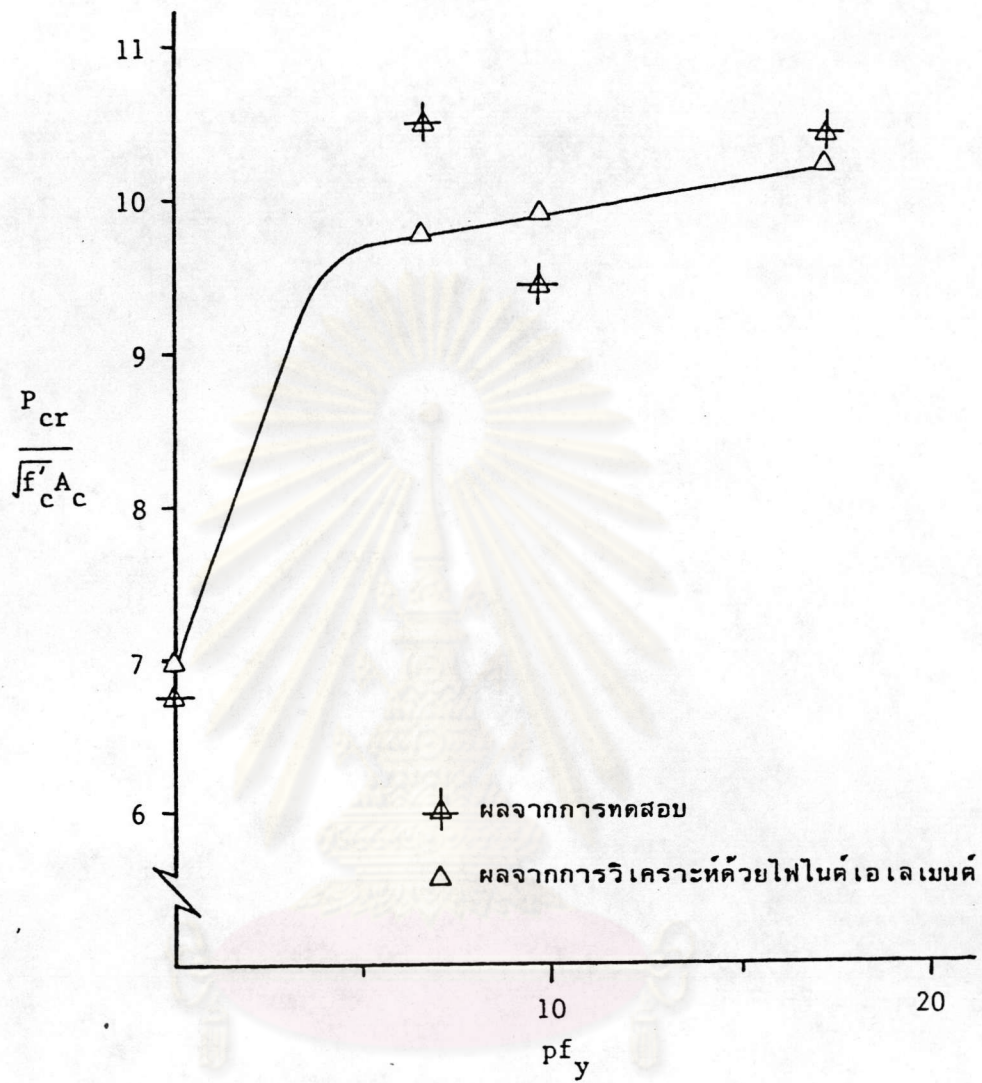


ของการแปรปรวนที่ได้อาจเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม กลไกการแตกร้าวของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณ สมอียิตมีความสัมพันธ์กันอย่างลึกซึ้งกับกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ดังนั้นการพิจารณากำลังเมื่อ เริ่มแตกร้าวของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียิตจากค่ากำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวอย่างทดสอบ จึงต้อง คำนึงถึงผลจากกำลังของคอนกรีตในแต่ละตัวอย่างทดสอบที่แตกต่างกัน โดยอาจพิจารณาได้จาก กำลังแรงดึงของคอนกรีตที่ได้จากทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกโดยตรง หรือจากกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตทางอ้อม โดยกำหนดให้อยู่ในทอมของรากที่สองของกำลัง รับแรงอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก  $(\sqrt{f'_c})$  ซึ่งวิธีนี้จะสะดวกต่อการนำไปใช้งานมากกว่า และจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่า การคำนึงถึงผลของกำลังที่แตกต่างกันโดยใช้ค่า  $\sqrt{f'_c}$  เป็นตัวหารกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าว จะให้ค่าที่มีแนวโน้มสมเหตุสมผลและสอดคล้องกับผลจาก การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์ นอกจากนี้ ยังได้มีการคำนึงถึงมิติที่แตกต่างกันของ ชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียิตแต่ละขนาด โดยทำการหารค่ากำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวของคอนกรีต ด้วยพื้นที่สัณฐานของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียิตเพื่อให้เป็นทอมไว้ท่วย แล้วสร้างความสัมพันธ์ กับผลคูณของปริมาตรเหล็กเสริมและกำลังดึงที่จุดคดงของเหล็กเสริมเนื่องจากกำลังดึงจุดคดงนี้ เป็นขีดความสามารถสูงสุดของการโอบรัดโดยเหล็กเสริม ปรากฏผลความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเสริมเหล็กโอบรัดเข้าไปภายในชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียิต จะช่วยลดการขยายตัวออกโดยรอบ ทำให้สามารถประวิงการเกิดรอยแตกร้าวเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น อันเป็นผลทำให้สามารถเพิ่มกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวของชิ้นส่วนได้ แต่การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริม ให้มากขึ้น จะสามารถเพิ่มกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะแสดงผลมาก ในด้านกำลังประลัยและความเหนียว (Ductility) ของชิ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอียิต

### 3.3 การศึกษาในสมอียิตหลายขนาด

ในงานวิจัยนี้ นอกจากจะได้มีการศึกษาผลจากรูปร่างทางเรขาคณิตของสมอียิตและผล จากเหล็กเสริมโอบรัดแบบลอมเกลียว ในสมอียิตขนาด 180 ตันแล้ว ยังได้มีการศึกษาในสมอียิต ขนาด 100, 250, 400, 550 และ 825 ตัน โดยการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอเลเมนต์สามมิติ เพื่อศึกษาแนวโน้มของการกระจายความเค้นระเบิดที่อาจแตกต่างออกไปในสมอียิตแต่ละขนาดด้วย สัดส่วนระหว่างขนาดของแผ่นแบกทานต่อขนาดของชิ้นส่วนบริเวณสมอียิตเท่ากับ 0.6 โดยที่ผลจาก





รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวกับปริมาณเหล็กเสริมในชิ้นส่วนคอนกรีต  
บริเวณสมอยัดขนาด 180 ตัน

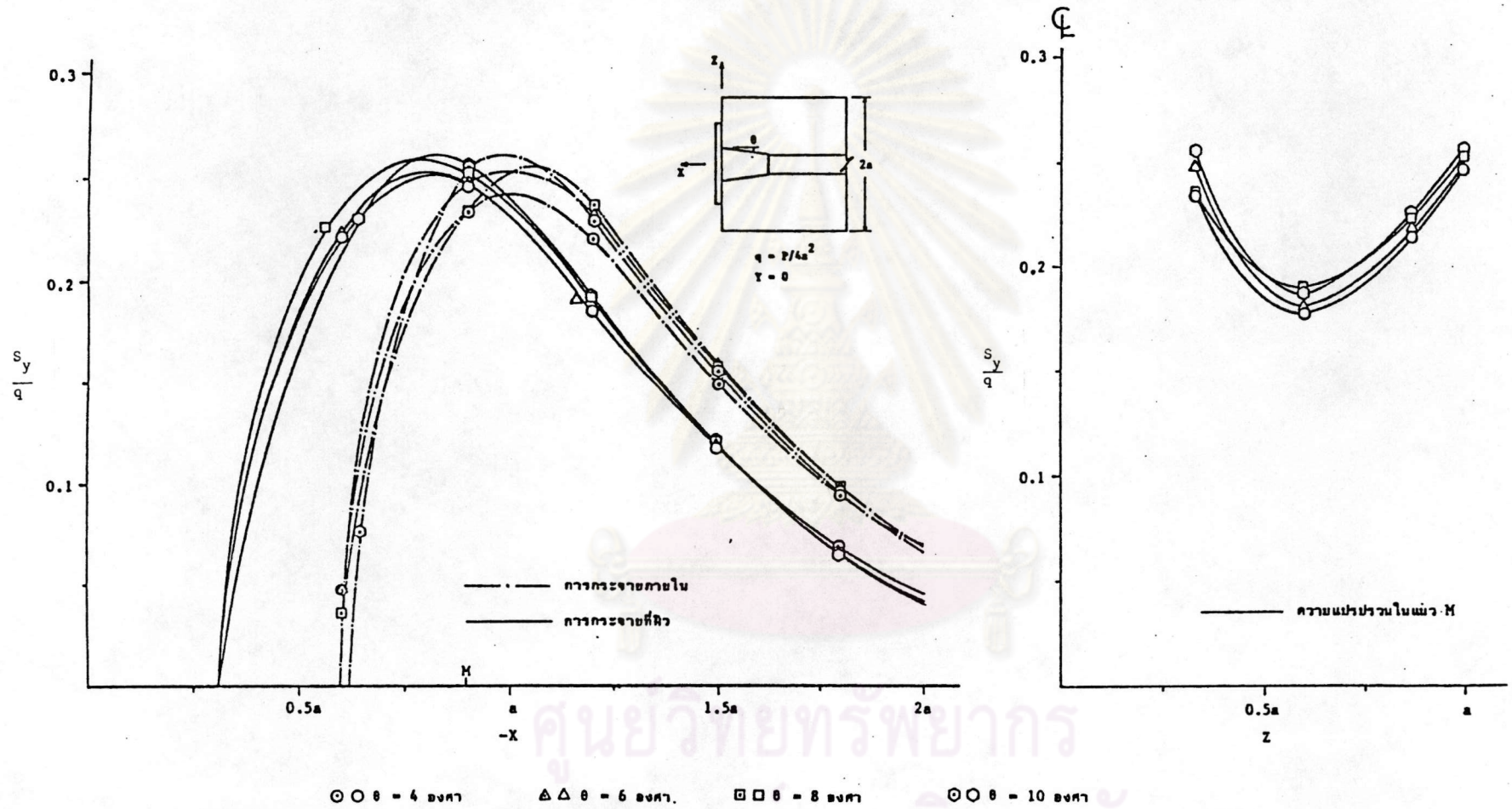


การวิเคราะห์ในแต่ละขนาดสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากมีการทำให้ความเค้นระเบิดอยู่ในเทอมที่ไร้หน่วย และระยะต่าง ๆ ของการกระจายความเค้นระเบิดก็จะถูกทำให้อยู่ในเทอมความลึกของหน้าตัดชั้นส่วนบริเวณสมอยัด

### 3.3.1 ผลจากรูปร่างทางเรขาคณิตของสมอยัด

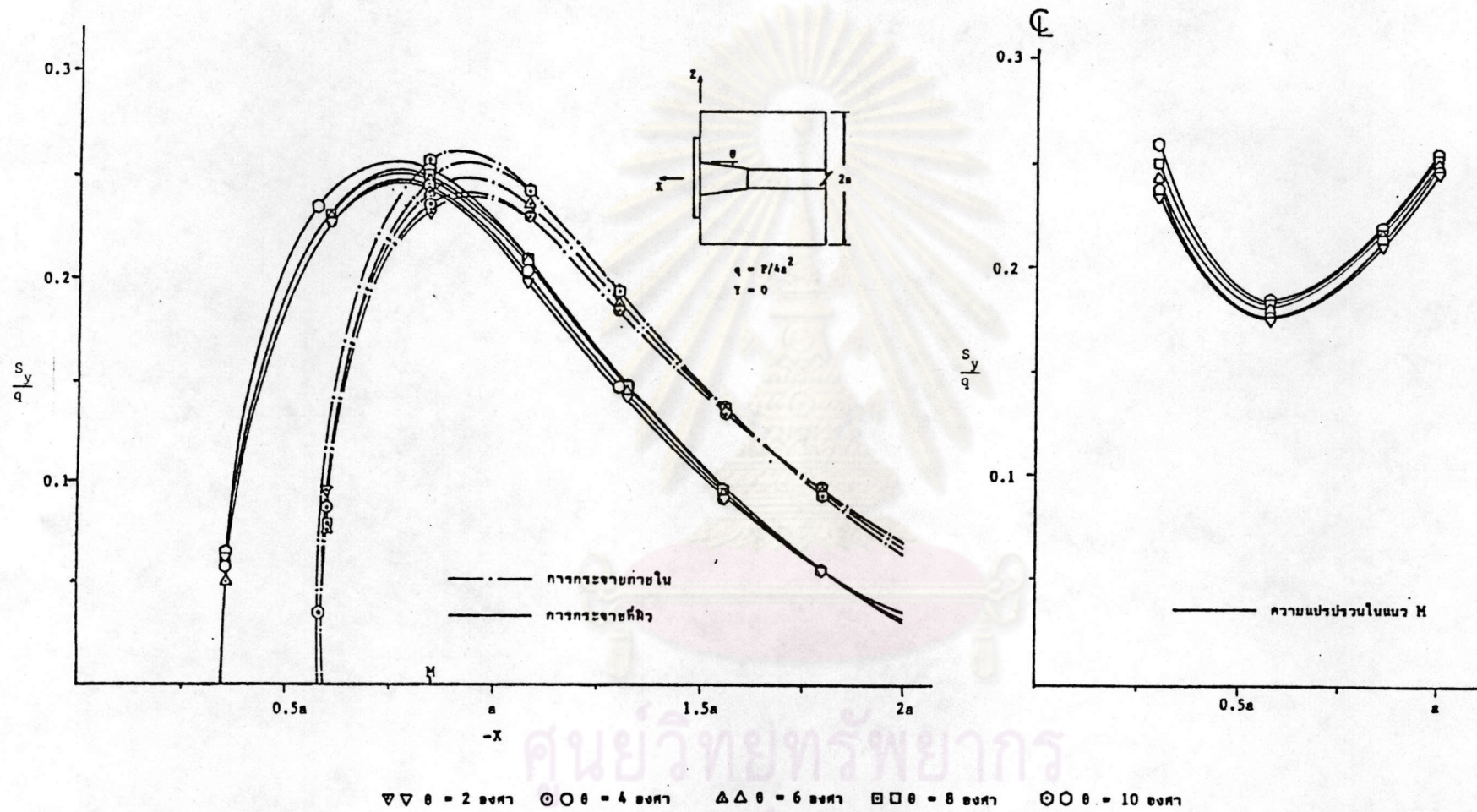
ได้มีการศึกษาถึงผลจากความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัดที่แปรเปลี่ยนจาก 2 ถึง 10 องศา ที่มีต่อพฤติกรรมทางโครงสร้างของชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยัด ในด้านการกระจายความเค้นระเบิด ในสมอยัดขนาด 100, 250, 400, 550 และ 825 ตัน ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 3.23 ถึง 3.27 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อให้การกระจายของความเค้นระเบิดอยู่ในเทอมไร้หน่วยที่สามารถเปรียบเทียบกันได้แล้ว แนวโน้มของการกระจายความเค้นระเบิดในสมอยัดทุกขนาดจะไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือมีแนวโน้มที่ชัดเจนในทุกขนาดว่า เมื่อเพิ่มความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัดแล้ว ค่าความเค้นระเบิดจะเพิ่มขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามค่าความเค้นระเบิดสูงสุดทั้งที่บริเวณรอบท่อร้อยลวดและที่ผิวของชั้นส่วน จะมีค่าต่างกันเล็กน้อยในสมอยัดแต่ละขนาดเมื่อความลาดชันของกรวยร้อยลวดแปรเปลี่ยนไป ดังที่รวบรวมไว้ในรูปที่ 3.28 และ รูปที่ 3.29 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัด ค่าความเค้นระเบิดสูงสุดบริเวณรอบท่อร้อยลวดอัดแรงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนมากกว่าค่าความเค้นระเบิดสูงสุดที่ผิวของชั้นส่วนซึ่งก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก อันเป็นผลเนื่องมาจากความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยัดที่เพิ่มมากขึ้นนี้ จะส่งผลโดยตรงต่อคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อห่างออกจากบริเวณรอบท่อร้อยลวดอัดแรงมายังผิวของชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยัด ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่าความเค้นระเบิดสูงสุดบริเวณรอบท่อร้อยลวดในสมอยัดขนาด 550 ตัน จะมีค่าต่ำสุด ส่วนสมอยัดขนาดอื่น ๆ จะมีค่าความเค้นระเบิดสูงสุดใกล้เคียงกัน และค่าความเค้นระเบิดสูงสุดที่ผิวของชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยัด ในสมอยัดขนาด 550 ตัน ก็จะมีค่าต่ำสุดเช่นเดียวกัน ในขณะที่ ในสมอยัดขนาด 825 ตัน จะให้ค่าความเค้นระเบิดที่ผิวสูงกว่าในทุก ๆ ขนาด แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความเค้นระเบิดสูงสุดดังกล่าวก็มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก





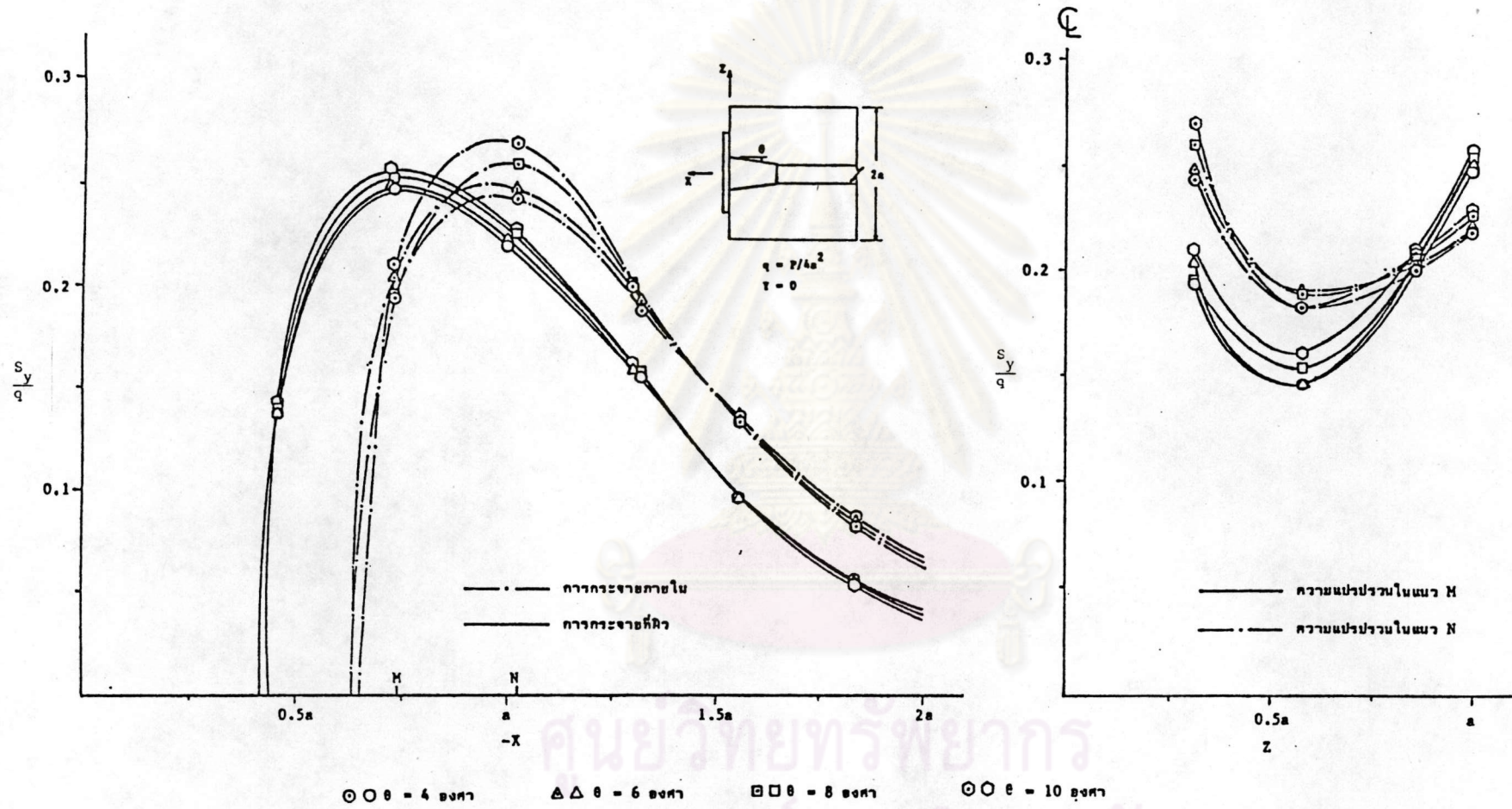
รูปที่ 3.23 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อกรวยร้อยลวดมีความลาดชันต่าง ๆ ในสมอยัดขนาด 100 ตัน





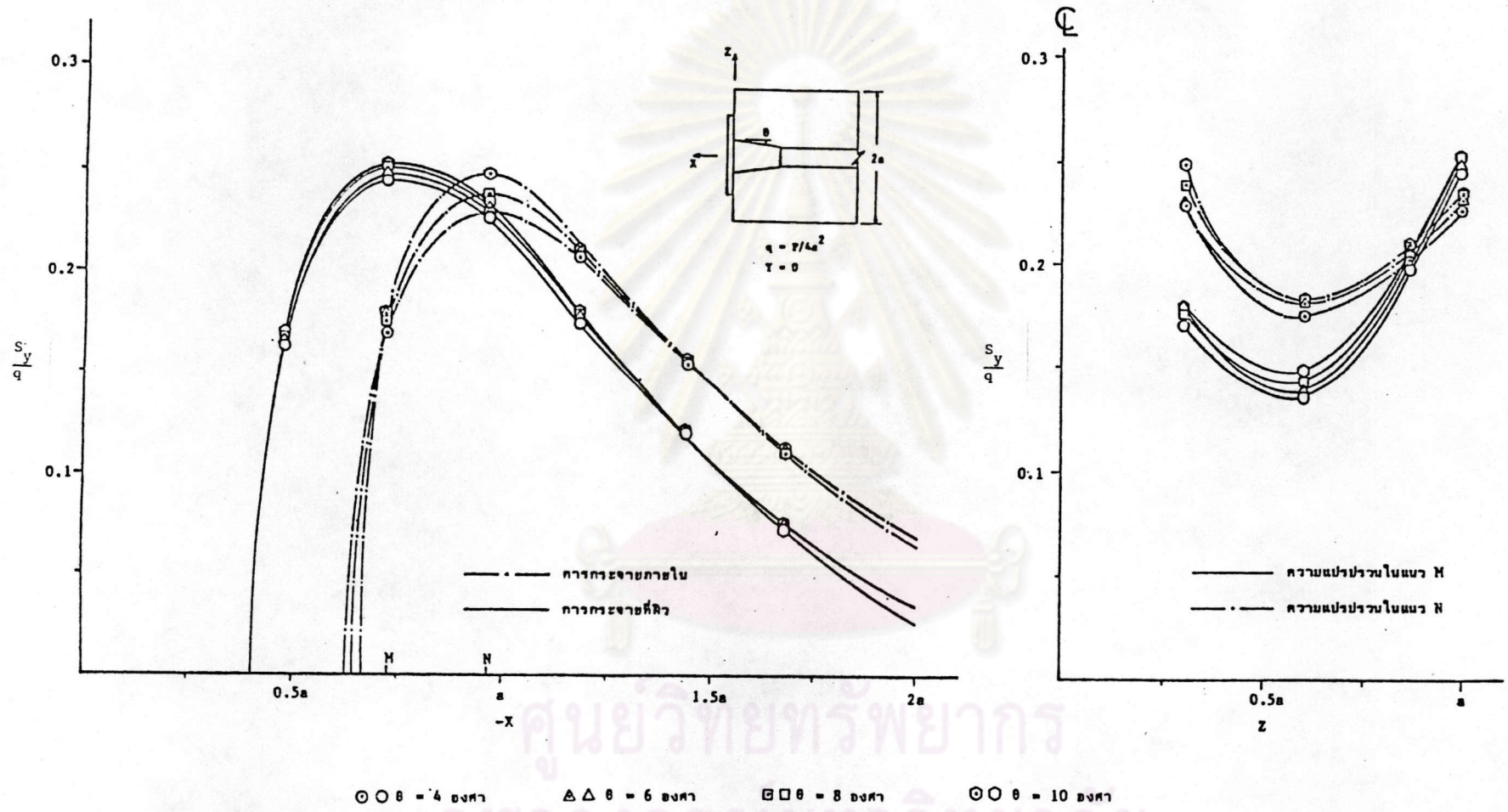
รูปที่ 3.24 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อกรวยร้อยลวดมีความลาดชันต่าง ๆ ในสมอียดขนาด 250 ตัน



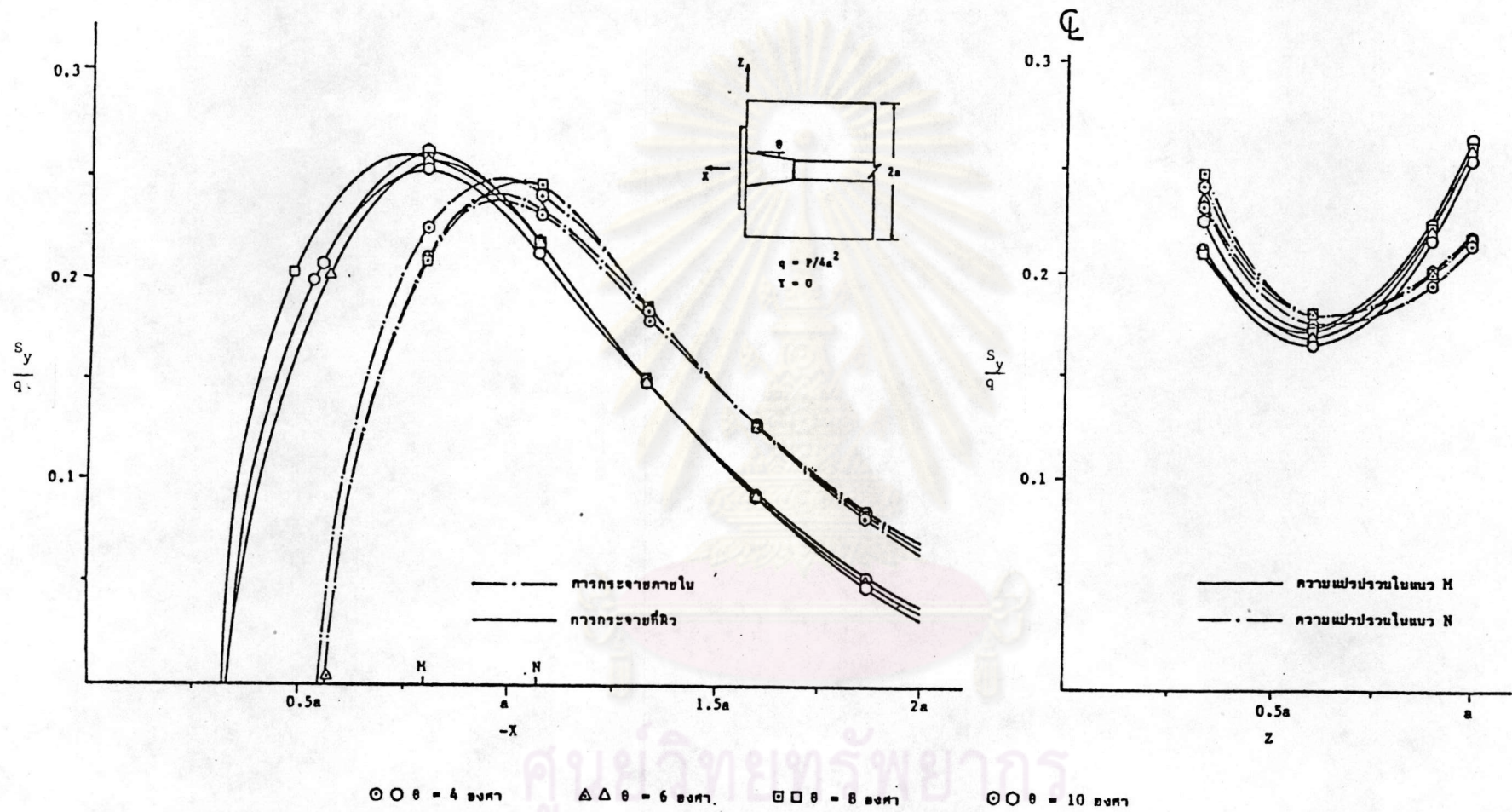


รูปที่ 3.25 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อกรวยร้อยลวดมีความลาดชันต่าง ๆ ในสมอชนิดขนาด 400 ตัน



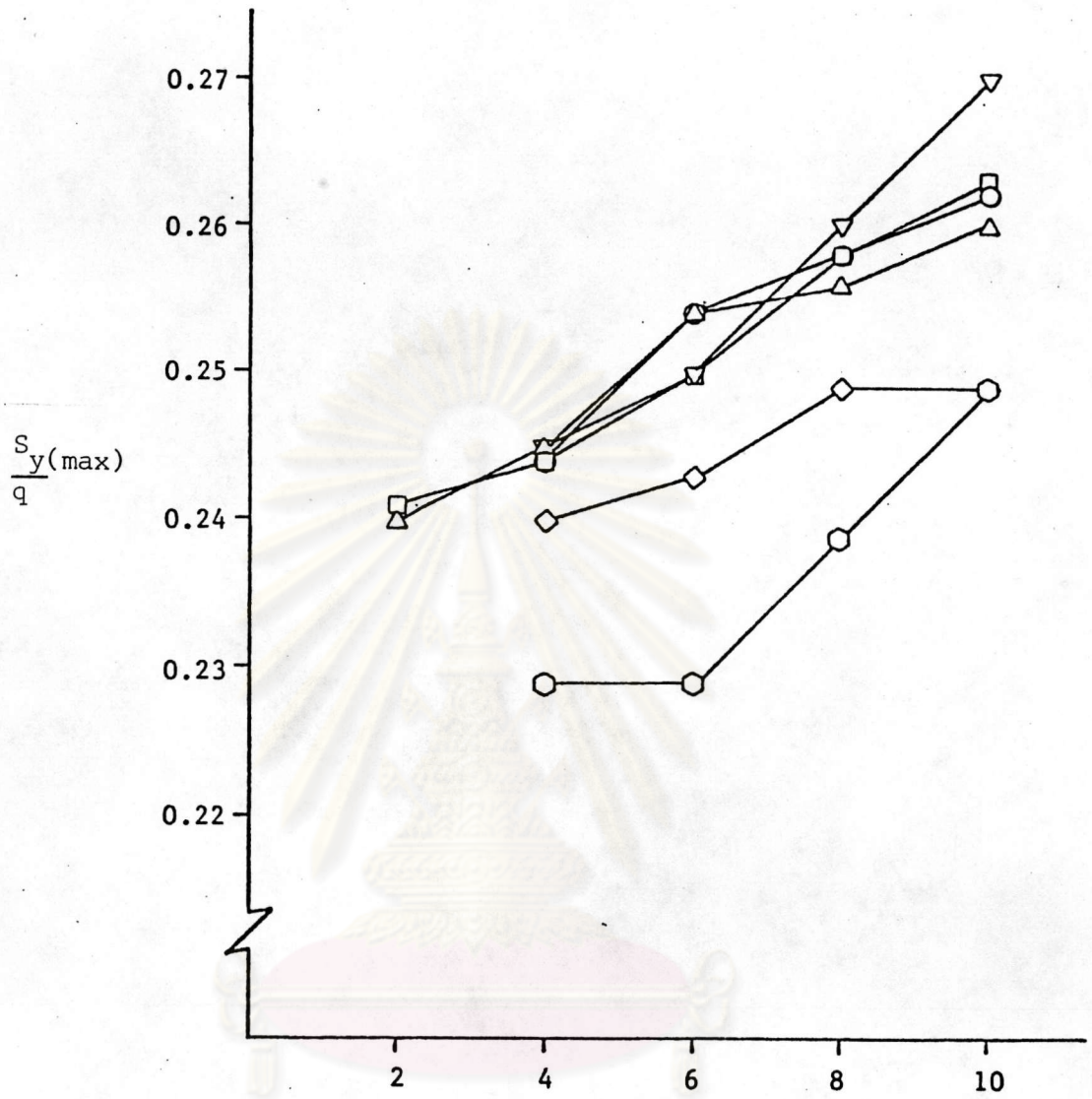


รูปที่ 3.26 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อกรวยร้อยลวดมีความลาดชันต่าง ๆ ในสมอียดขนาด 550 ตัน



รูปที่ 3.27 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อกรวยร้อยลวดมีความลาดชันต่าง ๆ ในสมยัดขนาด 825 ตัน

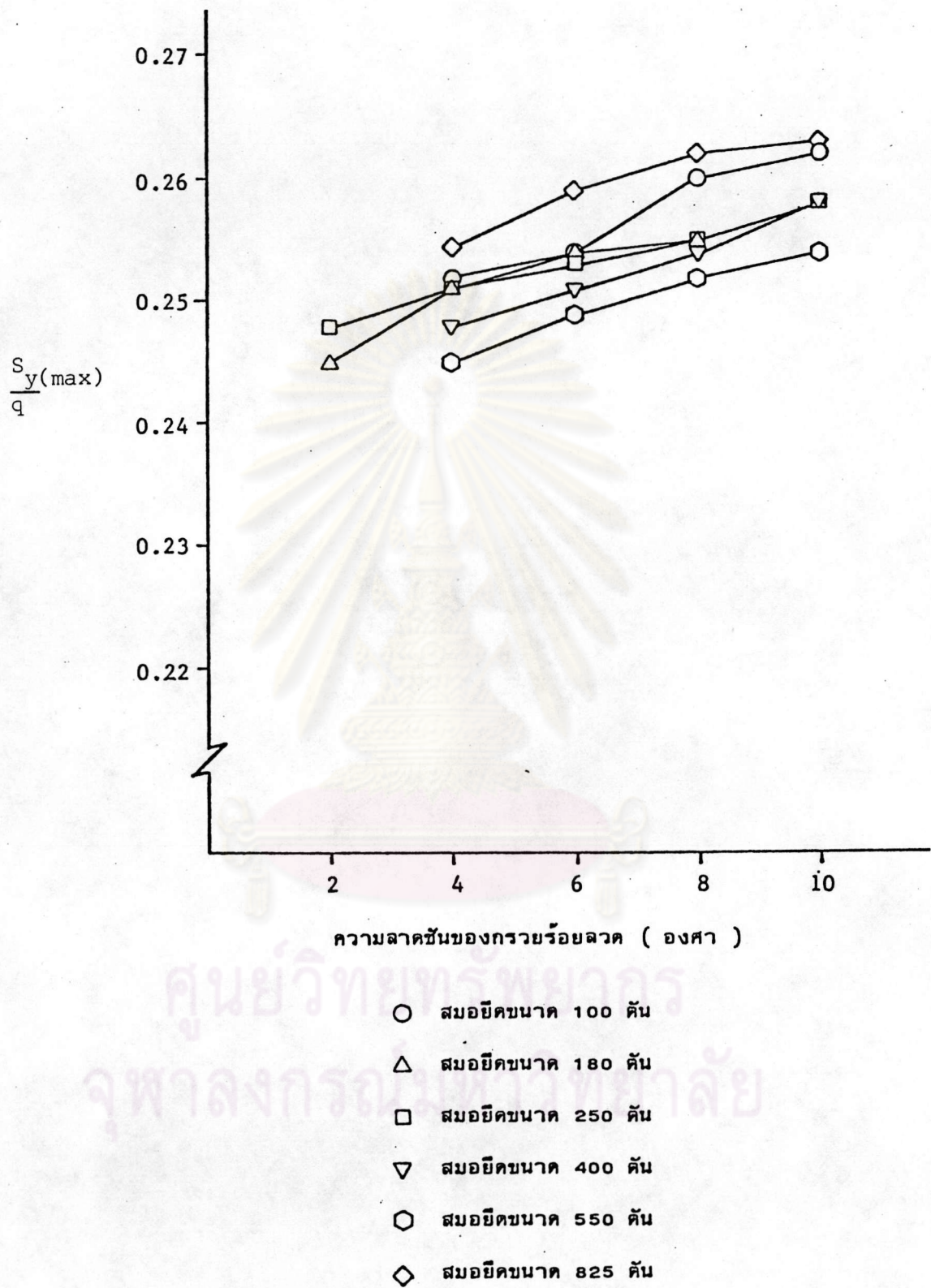




ความลาดชันของกรวยร้อยลวด ( องศา )

- สมอียคขนาด 100 คืบ
- △ สมอียคขนาด 180 คืบ
- สมอียคขนาด 250 คืบ
- ▽ สมอียคขนาด 400 คืบ
- สมอียคขนาด 550 คืบ
- ◇ สมอียคขนาด 825 คืบ

รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นระเบิดสูงสุดบริเวณรอบท่อร้อยลวด กับความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอียค



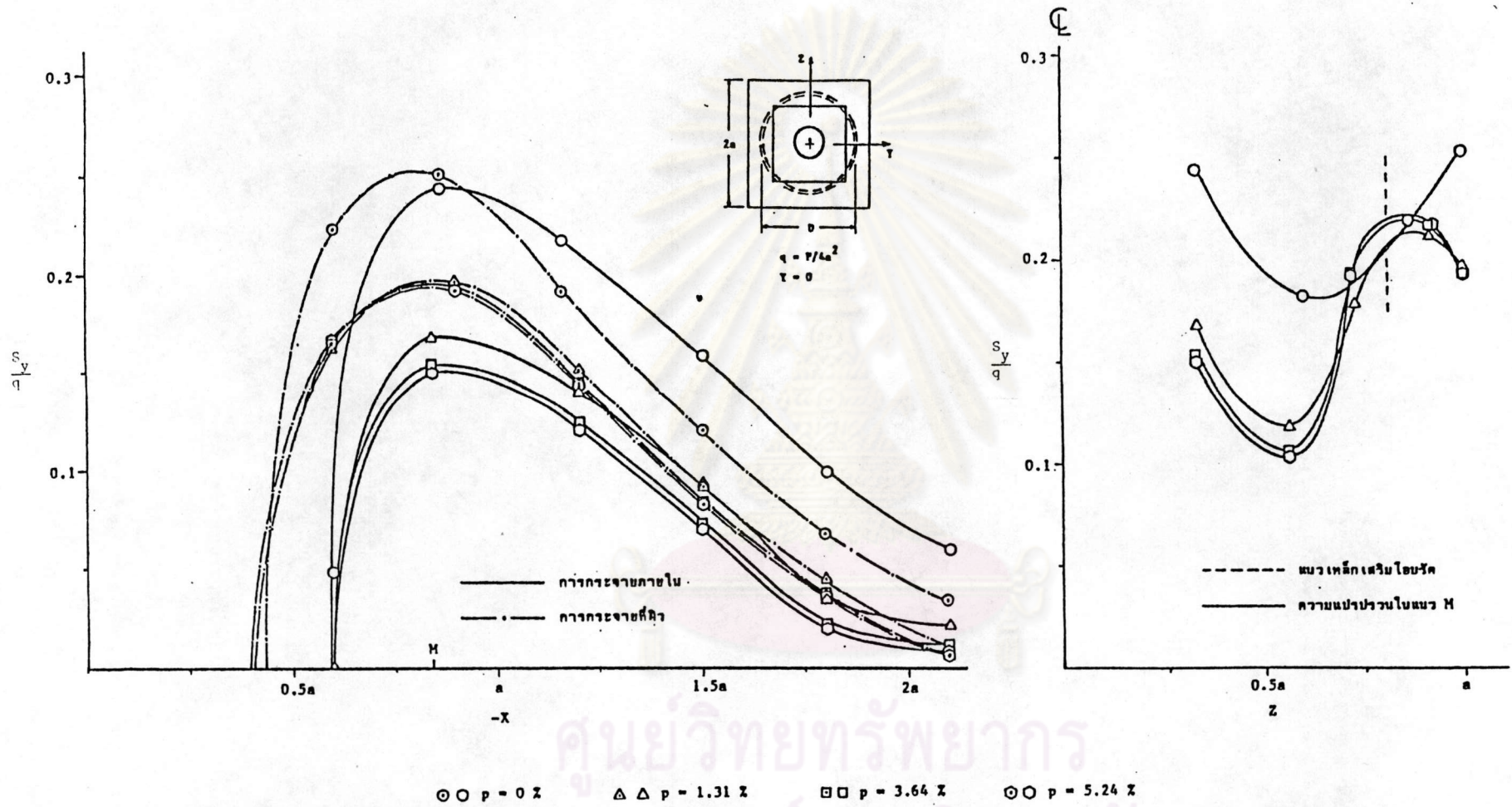
รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นระเบิดสูงสุดที่ผิวของชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยืดกับความลาดชันของกรวยร้อยลวดสมอยืด



### 3.3.2 ผลจากเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว

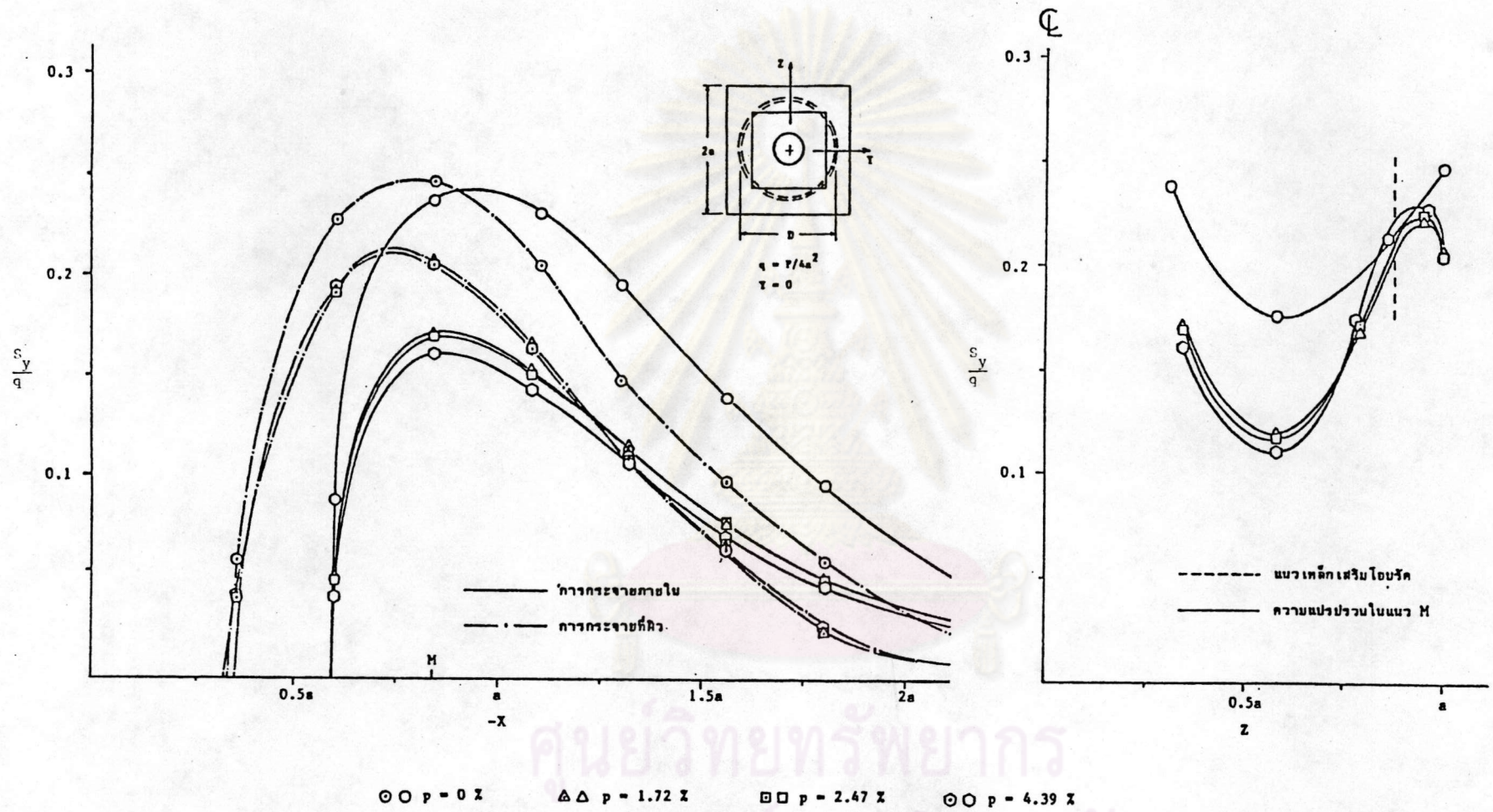
ในงานวิจัยนี้ นอกจากจะได้ศึกษาผลจากขนาดของเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวที่มีต่อการกระจายความเค้นระเบิดในสมอยึดขนาด 180 ตันแล้ว ยังได้มีการศึกษากว้างออกไปในสมอยึดขนาด 100, 250, 400, 550 และ 825 ตัน ซึ่งเกินขอบเขตความสามารถของเครื่องมือทดสอบที่จะทำการทดสอบได้ โดยในการวิเคราะห์สมอยึดทุกขนาด ได้มีการแปรเปลี่ยนเหล็กเสริมตั้งแต่ ไม่มีเหล็กเสริม และมีเหล็กเสริมโอบรัดขนาดต่าง ๆ อีก 3 ขนาด ซึ่งทำให้การกระจายความเค้นระเบิดในแต่ละขนาดแปรเปลี่ยน ดังแสดงในรูปที่ 3.30 ถึง 3.34 จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาความเค้นระเบิดให้อยู่ในเทอมไร้หน่วยแล้ว การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริมในสมอยึดทุกขนาด จะมีแนวโน้มเดียวกันหมด กล่าวคือ ปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดที่เพิ่มขึ้น จะช่วยลดความเค้นระเบิดภายในได้ แต่กลับจะไปเพิ่มความเค้นระเบิดในคอนกรีตส่วนเปลือกที่โอบหุ้มเหล็กเสริมโอบรัดอยู่ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นระเบิดสูงสุด ทั้งที่บริเวณรอบท่อร้อยลวดอัดแรงและบริเวณเปลือกคอนกรีต ในชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดขนาดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.35 จะเห็นแนวโน้มที่ชัดเจนในสมอยึดทุกขนาดว่า เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมโอบรัด จะทำให้ค่าความเค้นระเบิดภายในสูงสุดมีค่าลดลง แต่ความเค้นระเบิดสูงสุดในคอนกรีตส่วนเปลือกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ในสมอยึดขนาด 825 ตัน จะมีค่าสูงสุด แต่ก็ไม่แตกต่างกับค่าความเค้นระเบิดสูงสุดในสมอยึดขนาดอื่น ๆ มากนัก

จากค่าความเค้นระเบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดแต่ละขนาด จะสามารถคำนวณกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวที่ปริมาณเหล็กเสริมต่าง ๆ ได้ โดยใช้ค่าความเค้นระเบิดสูงสุด  $171 \times 10^{-6}$  สำหรับชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดประเภทไม่มีเหล็กเสริม และ  $222 \times 10^{-6}$  สำหรับชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดประเภทมีเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวที่ได้ขจัดปัญหาทางด้านมิติและความแตกต่างด้านกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตแล้ว กับปริมาณเหล็กเสริมในสมอยึดขนาดต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.36 จะเห็นได้ว่า เมื่อเสริมเหล็กโอบรัดแบบปลอกเกลียวเข้าไปในชั้นส่วน จะสามารถเพิ่มกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวของคอนกรีตได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดโดยการเพิ่มขนาดของเหล็กเสริม จะทำให้กำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย โดยที่กำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวในชั้นส่วนคอนกรีตบริเวณสมอยึดขนาด 400 ตัน และ 550 ตัน จะมีค่าสูงกว่า



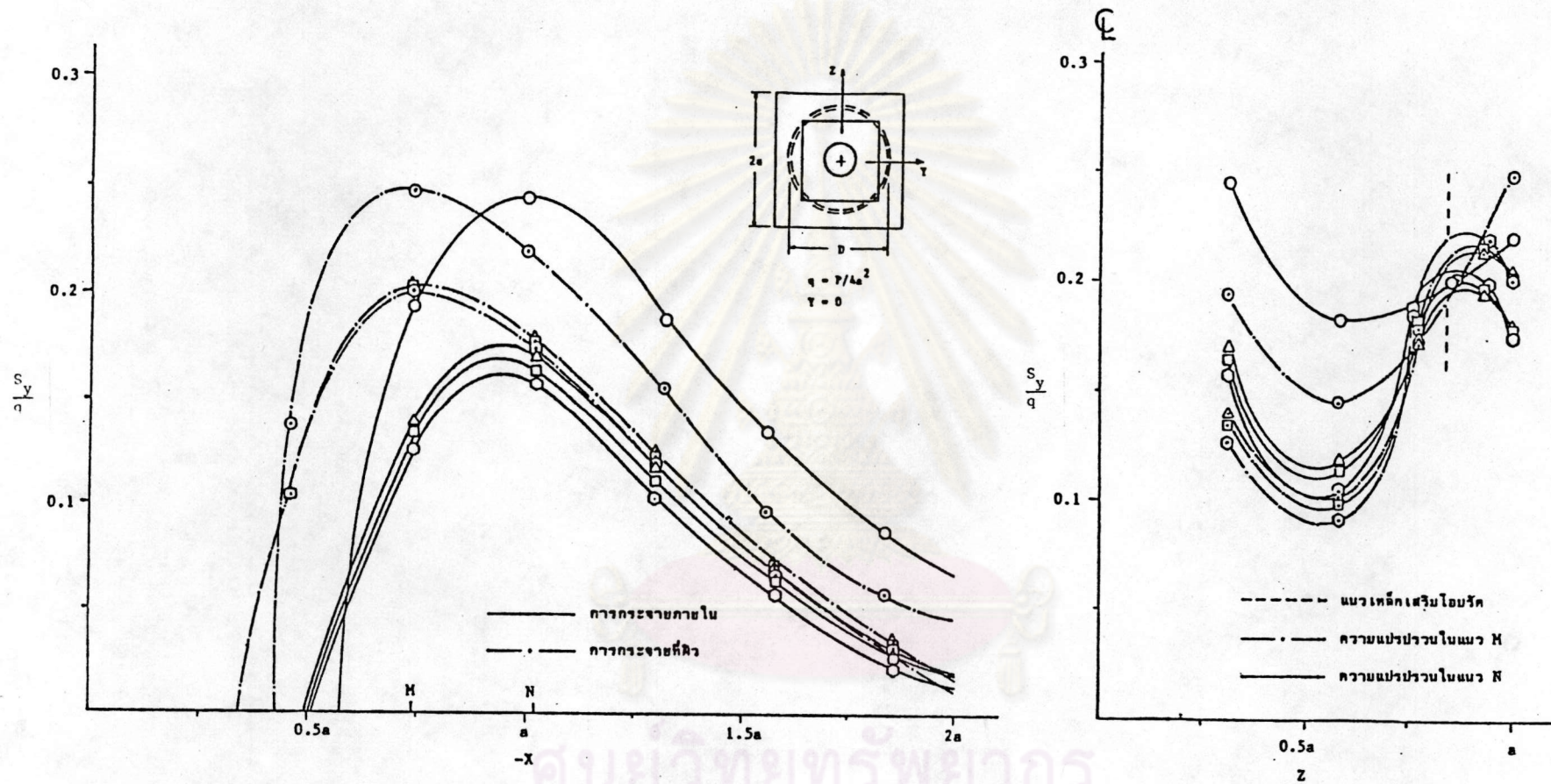
รูปที่ 3.30 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดแบบปlovakเกลียว  
ในสมอยัดขนาด 100 ตัน





รูปที่ 3.31 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว  
ในสมอยัดขนาด 250 ตัน

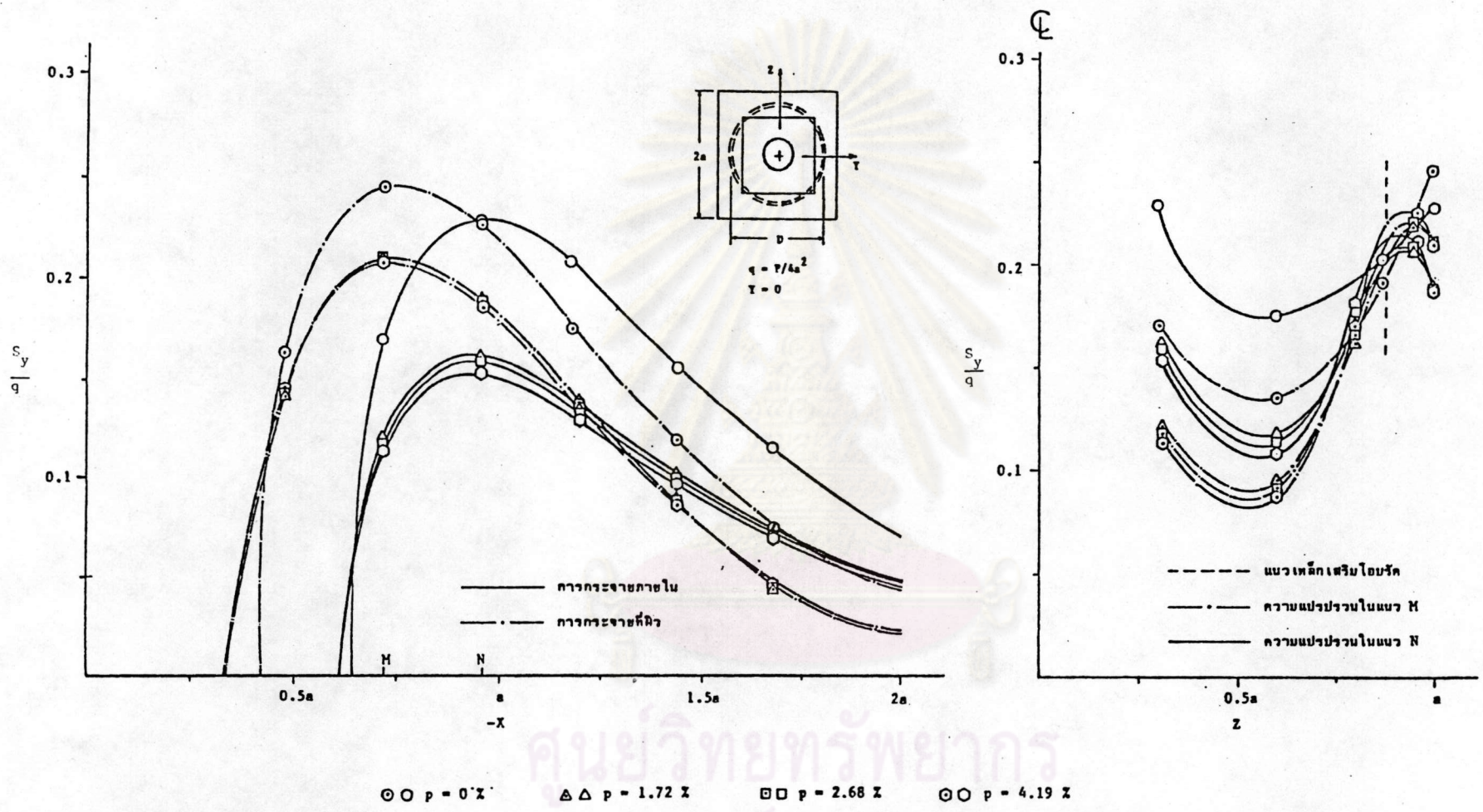




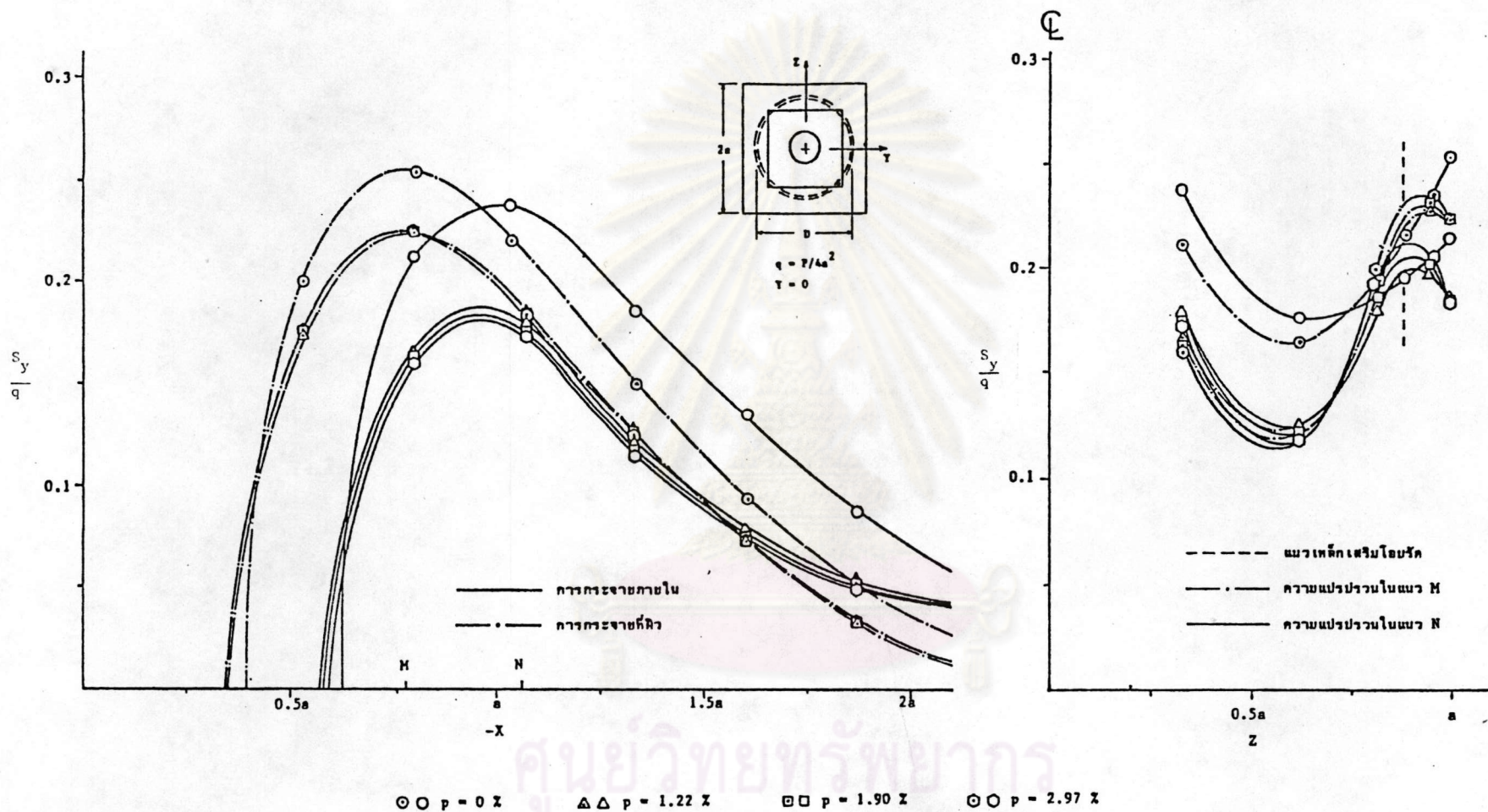
$\circ \circ p = 0 Z$      $\Delta \Delta p = 1.54 Z$      $\square \square p = 2.74 Z$      $\odot \odot p = 4.27 Z$

รูปที่ 3.32 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริม โอบรัดแบบปลอกเกลียว ในสมอยัดขนาด 400 ตัน



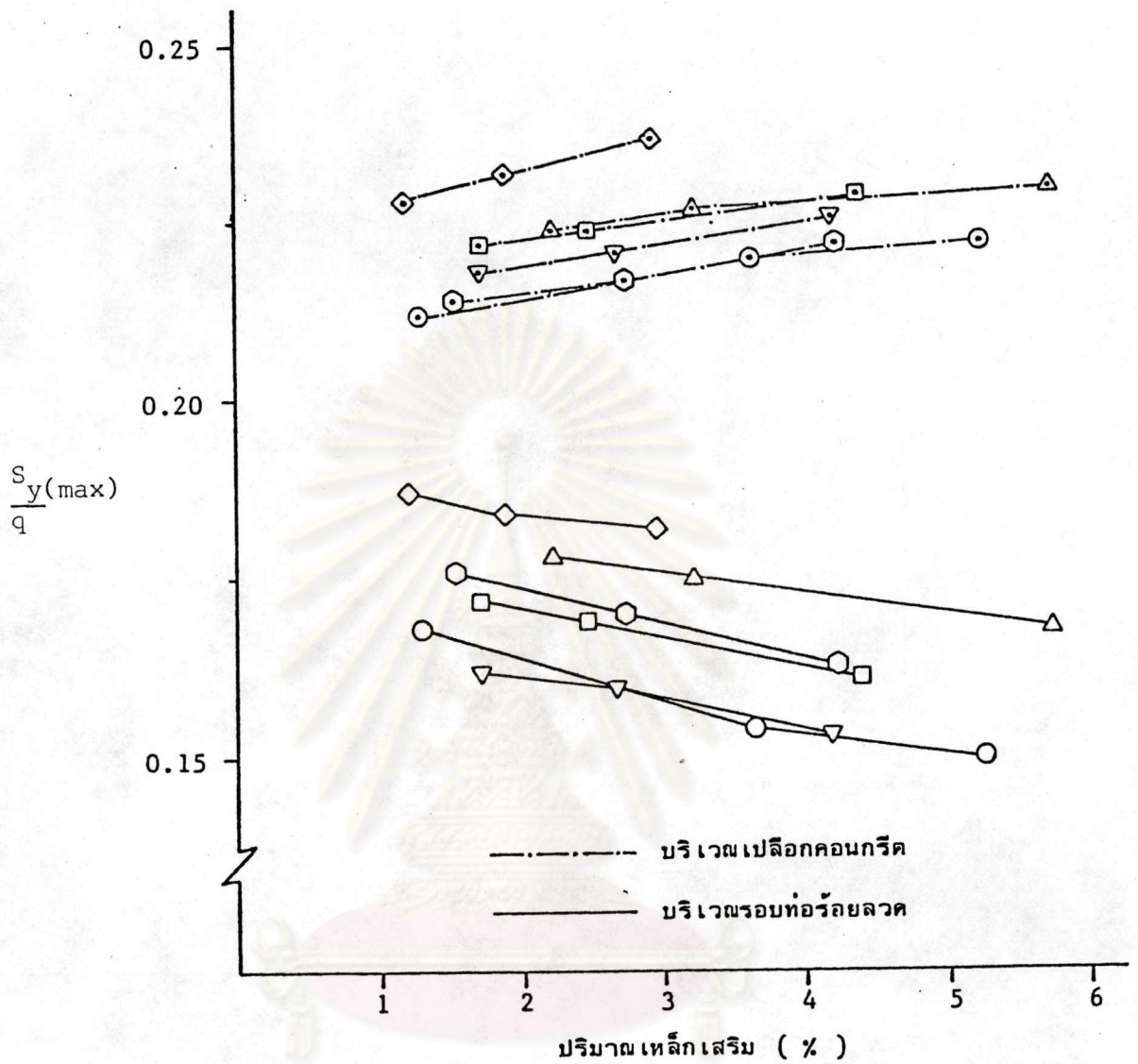


รูปที่ 3.33 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริมโบริคแบบปลอกเกลียว  
ในสัณยิตขนาด 550 ตัน

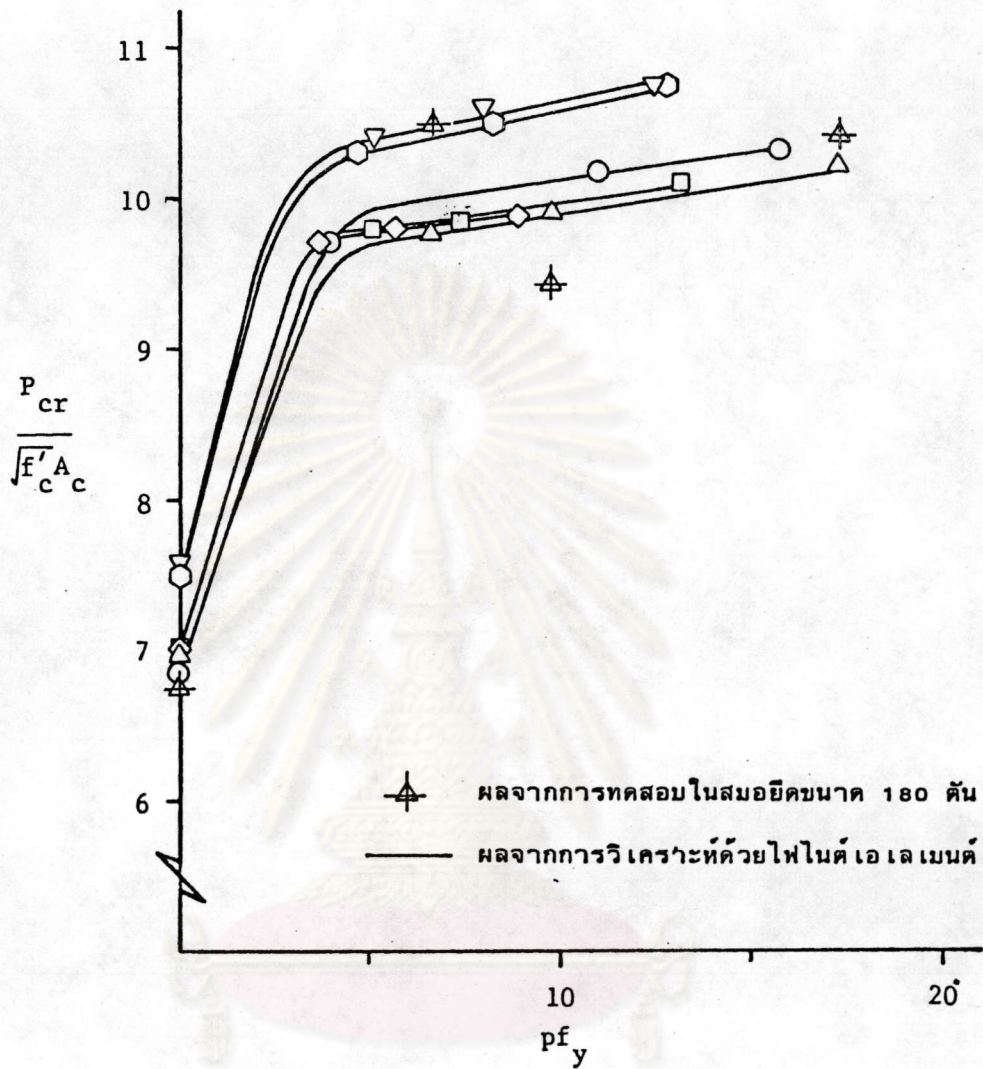


รูปที่ 3.34 การกระจายความเค้นระเบิดเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว  
ในสมลยิตขนาด 825 ตัน





รูปที่ 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นระเบิดสูงสุดกับปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว



- สมอียคขนาด 100 ตัน
- △ สมอียคขนาด 180 ตัน
- สมอียคขนาด 250 ตัน
- ⬡ สมอียคขนาด 400 ตัน
- ▽ สมอียคขนาด 550 ตัน
- ◇ สมอียคขนาด 825 ตัน

รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวกับปริมาณเหล็กเสริมในชั้นส่วนคอนกรีต บริเวณสมอียคขนาดต่าง ๆ



ในสมอยิตขนาดอื่น ๆ เล็กน้อย ส่วนในสมอยิตขนาดอื่น ๆ นอกเหนือจากนี้ จะมีกำลังเมื่อเริ่ม  
แตกข้าวแทบจะไม่แตกต่างกัน ที่เปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมเดียวกัน



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย