

บทที่ 4

การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรม (การวิเคราะห์ปัญหากรณีที่ไม่เกิดการเสียรูปของมวลดิน)

4.1 บทนำ

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้หลักการของวิธีประยุกต์ใช้งานสำหรับ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งวิธีการวิเคราะห์ออกเป็น 2 แบบด้วยกัน คือ การวิเคราะห์ปัญหา กรณีที่ไม่เกิดการเสียรูปของมวลดิน หรือหลักทฤษฎีความเครียดน้อย (Small Strain, SSC) และ การวิเคราะห์ปัญหากรณีที่เกิดการเสียรูปของมวลดิน หรือหลักทฤษฎีความเครียดมาก (Large Strain, LSC) การวิเคราะห์ปัญหากรณี SSC จะพิจารณาให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพิกัดโครง ข่ายของชิ้นส่วนภายหลังจากเสร็จสิ้นการคำนวณในแต่ละวงรอบของการเพิ่มค่าทรุดตัว เนื่องจาก สมมติให้ปริมาตรของมวลดินไม่เปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตามจะมีการตรวจสอบค่าความคลาด เคลื่อนในแต่ละชิ้นส่วน เพื่อไม่ให้มีค่าเกินกว่าค่าที่ยอมให้ และทำการลดขนาดชิ้นส่วน ให้มีขนาด เล็กลง รวมทั้งปรับปรุงโครงข่ายชิ้นส่วนขึ้นใหม่ เพื่อให้ได้โครงข่ายชิ้นส่วนที่มีความเหมาะสมสำหรับ คำนวณในวงรอบต่อ ๆ ไป สำหรับรายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้ จะแสดงถึงตัวอย่างการวิเคราะห์ ปัญหากรณีที่ไม่เกิดการเสียรูปของมวลดินในลักษณะต่าง ๆ อาทิเช่น การวิเคราะห์ปัญหาฐานราก ต่อเนื่อง (Plane Strain Problem) การวิเคราะห์ปัญหาฐานรากวงกลม (Axisymmetric Problem) การวิเคราะห์ปัญหาการทดสอบโคนปลายแหลม (Cone Penetration) การวิเคราะห์ปัญหามวลดิน ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non Homogeneous) เป็นต้น ในส่วนของ การวิเคราะห์ ปัญหากรณี LSC และตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหากรณีที่เกิดการเสียรูปของมวลดิน จะได้กล่าวถึง ในบทถัดไป

4.2 ขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดิน

การวิเคราะห์ปัญหามวลดิน ที่ขนาดความกว้างฐานรองรับ $B = 2$ เมตร โดยโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์เพียงครึ่งหนึ่งของขนาดความกว้างฐานรองรับ $B' = 1$ เมตร และกำหนดให้ขอบเขตของปัญหา มีความกว้าง 20 เมตร และความลึก 20 เมตร สำหรับปัญหาที่มีค่าอัตราส่วน D/B ไม่เกิน 1 และกำหนดให้มีความกว้าง 20 เมตร และความลึก 25 เมตร สำหรับปัญหาที่มีค่าอัตราส่วน D/B มากกว่า 1 แต่ไม่เกิน 4 และกำหนดให้มีความกว้าง 20 เมตร และความลึก 30 เมตร สำหรับ

ปัญหาที่มีค่าอัตราส่วน D/B มากกว่า 4 ขึ้นไป การเพิ่มอัตราการทรุดตัวของฐานรองรับ $\Delta S/B = 0.0005$ ดังนั้นค่าการทรุดตัว ΔS เท่ากับ 0.001 เมตรต่อรอบ

คุณสมบัติของมวลดิน : ค่าความเชื่อมั่นแน่นของดิน $S_u = 1 \text{ kN/m}^2$, มุมเสียดทานภายในของดิน ϕ และ Dilation angle ψ เท่ากับ 0, ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น $E = 500 \text{ kN/m}^2$, ค่าอัตราส่วนปัวซอง $\nu = 0.495$ และ ค่า $k_0 = 1$ สำหรับค่าคุณสมบัติของมวลดินที่ใช้ในตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ได้ทำการสรุปไว้ในตารางที่ 4.1

การกำหนดขอบเขตของปัญหาภายในแบบจำลองของมวลดิน จะมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดินภายใต้ฐานรองรับ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ค่าขอบเขตที่ความกว้างและความลึกมากเพียงพอ สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาของมวลดิน ทั้งที่เป็นเนื้อเดียวกัน และไม่เนื้อเดียวกันโดยตลอด ภายในแบบจำลองของปัญหา

4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยที่ผ่านมา

โปรแกรมคำนวณผลการวิเคราะห์สำหรับปัญหาในรูปแบบต่าง ๆ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ๆ มา เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวโปรแกรม

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแฟคเตอร์ของฐานราก (Depth Factor) นำเสนอโดย Meyerhof (1963) และ Hansen (1970) รูปที่ 4.1 แสดงค่า Bearing Capacity factor, N_c ของ Embedded Footing (Skempton, 1951)

4.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหากรณีที่ไม่เกิดการเสียรูปของมวลดิน

การวิเคราะห์ปัญหากรณีที่ไม่เกิดการเสียรูปของมวลดิน (SSC) หรือ หลักการของทฤษฎีความเครียดน้อย จะหมายถึง การวิเคราะห์ปัญหาที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพิคัดโครงข่ายของชั้นส่วนในแต่ละวงรอบของการเพิ่มค่าการทรุดตัวของฐานรองรับ อันเนื่องมาจากการสมมติให้ปริมาตรของมวลดินมีค่าคงที่ แต่อย่างไรก็ตามจะมีการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน และทำการถ่ายโอนค่าตัวแปรสถานะทุกครั้งภายหลังจากการปรับปรุงขนาดของชั้นส่วนขึ้นมา

4.4.1 ตัวอย่างที่ 1 วิเคราะห์ปัญหาฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบกรณี Small Strain (SSC) โดยกำหนดให้มีค่าขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดินตามหัวข้อที่ 4.2 และกำหนดให้

ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน , $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ในส่วนการวิเคราะห์ปัญหา โปรแกรมจะทำการคำนวณโดยใช้โครงข่ายของสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ จากรูปที่ 4.2 แสดง Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่องที่ค่าอัตราส่วน D/B เท่ากับ 0, 0.075, 0.125, 0.175, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยที่ค่าผลเฉลยที่คำนวณได้ $F_{nct} / (B.S_u)$ (สำหรับวิธีการหาค่า F_{nct} แสดงไว้ในภาคผนวก ง) ในแต่ละค่าอัตราส่วน D/B จะมีค่าลู่อู่เข้าสู่ค่าคงที่ และให้ค่าตามลำดับดังนี้ 5.20, 5.51, 5.66, 5.79, 5.94, 6.29, 6.68, 7.21, 7.60, 7.75 และ 7.92 ค่าผลเฉลยต่าง ๆ เหล่านี้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า N_c ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ วิธี Empirical Method ของฐานรากต่อเนื่อง ผลที่ได้พบว่าค่า N_c ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับแต่ละค่าอัตราส่วน D/B มีแนวโน้มที่ต่อเนื่องเหมาะสมสำหรับการใช้งาน และให้ค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่นำเสนอโดย Skempton (1951) และ Hansen (1970) นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_c จากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปของค่าอัตราส่วน D/B ได้โดยวิธี Curve Fitting Regression Method ซึ่งแสดงในรูปสมการดังนี้

$$N_c = F_{nct} / B.S_u = (2 + \pi) * F_{cd} \quad \dots (4.1)$$

$$F_{cd} = 1 + k * \text{Tan}^{-1}(D/B) \quad \dots (4.2)$$

โดยผลจาก Regression Analysis สามารถแบ่งค่าผลเฉลยออกเป็น 2 ช่วง ได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 สำหรับค่า $D/B \leq 0.5$: ค่าคงที่ k มีค่าเท่ากับ 0.62

ค่า Coefficient of Correction, R^2 เท่ากับ 0.9568

ช่วงที่ 2 สำหรับค่า $D/B > 0.5$: ค่าคงที่ k มีค่าเท่ากับ 0.38.

ค่า Coefficient of Correction, R^2 เท่ากับ 0.9642

4.4.2 ตัวอย่างที่ 2 วิเคราะห์ปัญหาฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบกรณี Small Strain (SSC) โดยกำหนดให้มีค่าขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดินตามหัวข้อที่ 4.2 และกำหนดให้ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน , $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ในส่วนการวิเคราะห์ปัญหา โปรแกรมจะทำการคำนวณโดยใช้โครงข่ายของสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ จากรูปที่ 4.4 แสดง Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่องที่ค่าอัตราส่วน D/B เท่ากับ 0, 0.075, 0.125, 0.25, 0.5, 1 และ 3 โดยที่ค่าผลเฉลยที่คำนวณได้ $F_{nct} / (B.S_u)$ ในแต่ละค่าอัตราส่วน D/B จะมีค่าลู่อู่เข้าสู่ค่าคงที่ และให้ค่าตามลำดับดังนี้ 5.31, 5.66, 5.94, 6.02, 6.39, 6.87 และ 7.86

รูปที่ 4.5 – รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบ Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่อง ผิวเรียบ กรณี Small Strain (SSC) ระหว่างการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ และ 6 จุดต่อ สำหรับค่าอัตราส่วน D/B เท่ากับ 0, 0.075, 0.125, 0.25, 0.5, 1 และ 3 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าผลเฉลย N_c ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ ให้ค่าที่ค่อนข้างสูง ในทุก ๆ ช่วงอัตราส่วน D/B และในบางครั้งลักษณะกราฟยังมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจเนื่องมาจากชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ มีความยืดหยุ่นไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้โครงข่ายชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ เป็นหลักในการวิเคราะห์ปัญหามวลดินในลักษณะอื่น ในตัวอย่างต่อ ๆ ไป

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า N_c ระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้โครงข่ายชิ้นส่วน 6 จุดต่อ และ 15 จุดต่อ

4.4.3 ตัวอย่างที่ 3 วิเคราะห์ปัญหาฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบกรณี Small Strain (SSC) ที่ค่า $D/B = 0.5$ เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของฐานราก ระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ และ $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ตามลำดับ และกำหนดให้มีค่าขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดินตามหัวข้อที่ 4.2 จากรูปที่ 4.12 แสดงผลของ Unit Weight ที่มีต่อค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของฐานรากต่อเนื่อง จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิ, q_{net} สำหรับกรณี $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ และ $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าเท่ากับ 6.294 kN/m^3 ส่วนค่ากำลังรับน้ำหนักรวม, q_u สำหรับกรณี $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ มีค่าเท่ากับ 23.504 kN/m^3

การคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน q_u สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$q_u = q_{net} + \gamma D \quad \dots (4.3)$$

โดยที่ q_{net} คือ ค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน

γD คือ ค่า Initial Body Force ซึ่งเก็บข้อมูลไว้ในแฟ้มข้อมูล "Initial body forces"

จากผลการวิเคราะห์ปัญหาสำหรับ กรณี $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดินที่คำนวณได้ q_{net} มีค่าเท่ากับ 6.294 kN/m^3 และเมื่ออ่านค่า γD จากแฟ้มข้อมูล "Initial body forces" ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.210 kN/m^3 ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน q_u ได้เท่ากับ 23.504 kN/m^3 ส่วนกรณี $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ ค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินจะมีค่าเท่ากับกำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน เนื่องจากค่า γD มีค่าเท่ากับ 0 kN/m^3

จากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถหาพฤติกรรมของค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินที่รับได้ และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ปัญหาพฤติกรรมของมวลดินในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป เช่น กรณีที่ค่า $K_0 \neq 1$

4.4.4 ตัวอย่างที่ 4 วิเคราะห์ปัญหารูปร่างวงกลมผิวเรียบกรณี Small Strain (SSC) โดยกำหนดให้มีค่าขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดินตามหัวข้อที่ 4.2 และกำหนดให้ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ในส่วนการวิเคราะห์ปัญหา โปรแกรมจะทำการคำนวณโดยใช้โครงข่ายของสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ จากรูปที่ 4.13 แสดง Load-Settlement Curve ของรูปร่างวงกลมที่ค่าอัตราส่วน D/B เท่ากับ 0, 0.075, 0.125, 0.175, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยที่ค่าผลเฉลยที่คำนวณได้ $F_{nct} / (B.S_u)$ ในแต่ละค่าอัตราส่วน D/B จะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าคงที่ และให้ค่าตามลำดับดังนี้ 5.74, 6.68, 6.87, 7.07, 7.40, 8.09, 8.95, 10.26, 10.64, 11.02 และ 11.30 ค่าผลเฉลยต่าง ๆ เหล่านี้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3

จากวิทยานิพนธ์ฉบับก่อนหน้านี้ ของ นาย ดำรงฤทธิ์ พรหมณีวัฒน์ ซึ่งทำการวิเคราะห์ปัญหารูปร่างวงกลม โดยใช้โครงข่ายของชิ้นส่วน 6 จุดต่อ พบว่าเกิดปัญหาและอุปสรรคดังนี้

- 1) กราฟ Load-Settlement Curve มีแนวโน้ม ไม่ลู่เข้าสู่ค่าคงที่ กรณี D/B = 3
- 2) กราฟ Load-Settlement Curve ตัดกันเอง สำหรับกรณี D/B = 1, 3 และ 4

และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยเปลี่ยนแปลงการวิเคราะห์ปัญหาจากโครงข่ายชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ เป็นโครงข่ายชิ้นส่วนสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ เพื่อให้ชิ้นส่วนมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังได้เปลี่ยนแปลงแบบแผนการถ่ายโอนค่าตัวแปรสถานะจากวิธีที่ใช้อยู่เดิม ไปเป็นวิธี Superconvergent Patch Recovery (SPR) และมีการปรับปรุงโครงสร้างโปรแกรมในส่วนรายละเอียดปลีกย่อยอื่น ๆ เพื่อให้ได้ตัวโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณ และให้ค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำมากที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่าค่าผลเฉลยมีค่าลู่เข้าสู่ค่าคงที่สำหรับทุก ๆ ค่าอัตราส่วน D/B และกราฟไม่ตัดกันเอง รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่า N_c ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธี Empirical Method ของรูปร่างวงกลม โดยสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_c จากผลเฉลยของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในรูปของค่าอัตราส่วน D/B ได้โดยวิธี Curve Fitting Regression Method ซึ่งแสดงในรูปสมการดังนี้

$$N_c = F_{nct} / B.S_u = 6.025 * F_{cd} \quad \dots (4.4)$$

$$F_{cd} = 1 + k * \tan^{-1}(D/B) \quad \dots\dots (4.5)$$

โดยผลจาก Regression Analysis สามารถแบ่งค่าผลเฉลยออกเป็น 2 ช่วง ได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 สำหรับค่า $D/B \leq 0.5$: ค่าคงที่ k มีค่าเท่ากับ 0.80

ค่า Coefficient of Correction, R^2 เท่ากับ 0.9206

ช่วงที่ 2 สำหรับค่า $D/B > 0.5$: ค่าคงที่ k มีค่าเท่ากับ 0.62

ค่า Coefficient of Correction, R^2 เท่ากับ 0.9873

รูปที่ 4.15 – รูปที่ 4.25 แสดง Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ค่าอัตราส่วน D/B ต่าง ๆ

4.4.5 ตัวอย่างที่ 5 วิเคราะห์ปัญหาฐานรากวงกลมผิวเรียบกรณี Small Strain (SSC) ที่ค่า $D/B = 0.5$ เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของฐานราก ระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ และ $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ตามลำดับ และกำหนดให้มีค่าขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดินตามหัวข้อที่ 4.2 จากรูปที่ 4.26 แสดงผลของ Unit Weight ที่มีต่อค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของฐานรากวงกลม จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิ, q_{net} สำหรับกรณี $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ และ $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าเท่ากับ 8.096 kN/m^3 ส่วนค่ากำลังรับน้ำหนักรวม, q_u สำหรับกรณี $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ มีค่าเท่ากับ 25.313 kN/m^3

การคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน q_u สามารถหาได้เช่นเดียวกับสมการที่ (4.3) ดังที่กล่าวมาแล้ว และจากผลการวิเคราะห์ปัญหาสำหรับ กรณี $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ค่ากำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดินที่คำนวณได้ q_{net} มีค่าเท่ากับ 8.096 kN/m^3 และเมื่ออ่านค่า γD จากแฟ้มข้อมูล “Initial body forces” ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.217 kN/m^3 ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน q_u ได้เท่ากับ 25.313 kN/m^3 ส่วนกรณี $\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$ ค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดินจะมีค่าเท่ากับกำลังรับน้ำหนักสุทธิของมวลดิน เนื่องจากค่า γD มีค่าเท่ากับ 0 kN/m^3

4.4.6 ตัวอย่างที่ 6 วิเคราะห์ปัญหาฐานรากวงกลมผิวหยาบปลายแหลมมุม 60 องศา กรณี Small Strain (SSC) โดยกำหนดให้มีค่าขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดินตามหัวข้อที่ 4.2 และกำหนดให้ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน, $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ จากรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 แสดง Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลมผิวหยาบปลายแหลมที่ค่าอัตราส่วน

D/B เท่ากับ 1 และ 2.5 โดยที่ค่าผลเฉลยที่คำนวณได้ $F_{nct} / (B.S_u)$ สำหรับค่าอัตราส่วน D/B = 1 มีค่าเท่ากับ 8.94 และสำหรับค่าอัตราส่วน D/B = 2.5 มีค่าเท่ากับ 9.62

การวิเคราะห์ปัญหา โปรแกรมจะทำการคำนวณโดยใช้โครงข่ายของสามเหลี่ยม 15 จุดต่อผลเฉลยที่ได้มีค่าลู่ออกค่าคงที่ และให้ค่าที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่นำเสนอโดย Houlsby & Martin (2003) ซึ่งกำหนดให้ค่าผลเฉลยที่อัตราส่วน D/B=1 มีค่าเท่ากับ 8.18 และที่ค่าอัตราส่วน D/B=2.5 มีค่าเท่ากับ 9.39 สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน q_u สามารถหาได้จากสมการ $q_u = q_{nct} + \gamma D$ ซึ่งสำหรับกรณี D/B=1 มีค่า γD เท่ากับ 49.221 kN/m³ และสำหรับกรณี D/B=2.5 มีค่า γD เท่ากับ 100.138 kN/m³ ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักรวมของมวลดิน q_u ได้เท่ากับ 58.161 และ 109.758 kN/m³ ตามลำดับ

รูปที่ 4.29 แสดงอัตราการ Convergence ของ Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลมผิวหยาบปลายแหลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ D/B = 1 และ 2.5 ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า กราฟมีการลู่ออกค่าคงที่ โดยให้ค่า $(F_{i+1} - F_i) \times 100 / F_i$ เท่ากับ 0.18% ที่ S/B=0.15 (สำหรับกรณี D/B=1) และเท่ากับ 0.16% ที่ S/B=0.21 (สำหรับกรณี D/B=2.5)

4.4.7 ตัวอย่างที่ 7 วิเคราะห์ปัญหาฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบกรณี Small Strain (SSC) ที่ค่า D/B=0 เพื่อเปรียบเทียบค่า Bearing Capacity Factor, N_c และเวลาที่ใช้ในการคำนวณระหว่างการวิเคราะห์ โดยกำหนดให้มีค่า Tolerance ต่าง ๆ กัน ค่าขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดินกำหนดตามหัวข้อที่ 4.2

รูปที่ 4.30 แสดงผลของค่า Tolerance ที่มีต่อค่า Bearing Capacity Factor, N_c และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Execution Time) โดยให้ผลสรุปต่าง ๆ ดังนี้

ค่า Tolerance = 0.001	:	ค่า N_c = 5.16	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 45 นาที
ค่า Tolerance = 0.005	:	ค่า N_c = 5.17	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 25 นาที
ค่า Tolerance = 0.0075	:	ค่า N_c = 5.18	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 23 นาที
ค่า Tolerance = 0.01	:	ค่า N_c = 5.19	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ 22 นาที

ผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าเมื่อกำหนดให้ค่า Tolerance มีค่าน้อย ๆ ก็ยิ่งทำให้ได้ค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำมากขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ผล ดังตัวอย่างเช่น เมื่อกำหนดให้ค่า Tolerance เท่ากับ 0.001 ซึ่งให้ค่า N_c ที่มีความแม่นยำมากที่สุดก็ตาม แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณกลับมากเป็น 2 เท่าของกรณีที่ใช้ค่า Tolerance เท่ากับ 0.005 และค่าผลเฉลยที่ได้ก็ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหา

มวลดินรูปแบบต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ส่วนใหญ่จะกำหนดให้มีค่า Tolerance อยู่ระหว่าง 0.005 จนถึง 0.0075 แล้วแต่ความเหมาะสมในแต่ละปัญหา

การประมาณค่า เวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับค่า Tolerance อื่น ๆ สามารถประมาณได้จากกราฟลอกกาลิทึมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CPU Time และ Tolerance ซึ่งให้ผลที่อยู่ในรูป กิ่งเชิงเส้น เพื่อจะให้เป็นข้อมูลในการกำหนดค่า Tolerance ที่มีความเหมาะสมกับปัญหาในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป

4.4.8 ตัวอย่างที่ 8 วิเคราะห์ปัญหาฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบกรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหาของมวลดินที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งระบบ (Non-Homogeneous) และมีค่าอัตราส่วน $D/B=0$ โดยกำหนดให้มีค่าขอบเขตของปัญหา และคุณสมบัติของมวลดินตามหัวข้อที่ 4.2 ยกเว้นค่าความเชื่อมแน่นของดิน S_u และค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น E ที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 kN/m^2 และ 500 kN/m^2 ตามลำดับ ที่บริเวณผิวดิน และให้มีค่าเพิ่มขึ้นในรูปแบบเชิงเส้นไปตามความลึกของดิน และกำหนดให้ค่าน้ำหนักของมวลดิน $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ในส่วนการวิเคราะห์ปัญหา โปรแกรมจะทำการคำนวณโดยใช้โครงข่ายของสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ

รูปที่ 4.31 – รูปที่ 4.36 แสดง Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่องผิวเรียบกรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหา Non-Homogeneous โดยมีค่า $(\rho.B) / Su_0$ เท่ากับ 0.5, 1, 2, 4, 8 และ 16 โดยที่ ρ คือ อัตราการเพิ่มของค่าความเชื่อมแน่นของดินตามความลึก, B คือ ความกว้างของฐานรองรับ (= 2m) และ Su_0 คือ ค่าความเชื่อมแน่นของดินที่บริเวณผิวดิน (=1 kN/m^2) โดยที่ค่าผลเฉลยที่คำนวณได้ F_{nct} / B มีค่าลู่เข้าสู่ค่าคงที่ และให้ค่าตามลำดับดังนี้ 5.70, 5.99, 6.64, 7.76, 9.68 และ 12.99

ค่า Correction Factors, F และค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานราก, F_{nct} / B สำหรับปัญหาของมวลดินที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งระบบ (Non-Homogeneous) โดยการสอบถามจาก ผศ.ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F_{nct} / B = F[(2 + \pi) \cdot Su_0 + \rho B / 4] \quad \dots\dots (4.6)$$

$$F = \frac{(2 + \pi) + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho B}{Su_0} \right) + 0.7106 \left(\frac{\rho B}{Su_0} \right)^{0.6132}}{(2 + \pi) + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho B}{Su_0} \right)} \quad \dots\dots (4.7)$$

จากสมการที่ 4.7 พบว่าสามารถ Fit ได้ดีกับ Exact Solution ที่นำเสนอในงานวิจัยของ Davis and Booker และสามารถหาค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานราก สำหรับค่า $(\rho.B)/Su_0$ ต่าง ๆ ได้ดังนี้

ค่า $(\rho.B)/Su_0 = 0.5$:	ค่า $F = 1.088$	$F_{net}/B = 5.73$
ค่า $(\rho.B)/Su_0 = 1$:	ค่า $F = 1.124$	$F_{net}/B = 6.03$
ค่า $(\rho.B)/Su_0 = 2$:	ค่า $F = 1.188$	$F_{net}/B = 6.67$
ค่า $(\rho.B)/Su_0 = 4$:	ค่า $F = 1.268$	$F_{net}/B = 7.75$
ค่า $(\rho.B)/Su_0 = 8$:	ค่า $F = 1.355$	$F_{net}/B = 9.64$
ค่า $(\rho.B)/Su_0 = 16$:	ค่า $F = 1.425$	$F_{net}/B = 12.99$

จากการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อเปรียบเทียบค่าผลเฉลย F_{net}/B ระหว่างการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ Empirical Method ที่ได้จากการสอบถาม ผศ.ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน และเหมาะสมสำหรับการใช้งาน

รูปที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบค่า F_{net}/B ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธี Empirical Method ของฐานรากต่อเนื่อง กรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหา Non-Homogeneous

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติของมวลดินที่ใช้ในตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ (Small Strain)

ตัวอย่าง ที่	Homogeneous Case						Non-Homogeneous Case		
	C (kN/m ²)	E (kN/m ²)	ν	ϕ, ψ	k_0	γ (kN/m ³)	ρ (kN/m ³)	B (m)	Su_0 (kN/m ²)
1	1	500	0.495	0	1	17	-	-	-
2	1	500	0.495	0	1	17	-	-	-
3	1	500	0.495	0	1	0, 17	-	-	-
4	1	500	0.495	0	1	17	-	-	-
5	1	500	0.495	0	1	0, 17	-	-	-
6	1	500	0.495	0	1	17	-	-	-
7	1	500	0.495	0	1	17	-	-	-
8	-	-	0.495	0	1	17	0.25-8	2	1

หมายเหตุ :

- ตัวอย่างที่ 1 = ฐานรากต่อเนื่อง โครงข่ายชั้นส่วน 15 จุดต่อ
- ตัวอย่างที่ 2 = ฐานรากต่อเนื่อง โครงข่ายชั้นส่วน 6 จุดต่อ
- ตัวอย่างที่ 3 = ฐานรากต่อเนื่อง ที่ $D/B=0.5$ เปรียบเทียบระหว่างค่า $\gamma=0$ และ 17 kN/m^3
- ตัวอย่างที่ 4 = ฐานรากวงกลม โครงข่ายชั้นส่วน 15 จุดต่อ
- ตัวอย่างที่ 5 = ฐานรากวงกลม ที่ $D/B=0.5$ เปรียบเทียบระหว่างค่า $\gamma=0$ และ 17 kN/m^3
- ตัวอย่างที่ 6 = ฐานรากวงกลมปลายแหลมมุม 60 องศา
- ตัวอย่างที่ 7 = ฐานรากต่อเนื่อง ที่ $D/B=0$ เพื่อเปรียบเทียบค่า N_c และ CPU Time โดยใช้ค่า Tolerance ต่าง ๆ กัน
- ตัวอย่างที่ 8 = ฐานรากต่อเนื่อง ที่ $D/B=0$ กรณี Non-Homogeneous

ตารางที่ 4.2 ค่าแฟคเตอร์ความลึกของฐานรากต่อนื่อง (Depth Factor)

Factor	Relationship	Source
Depth $\phi = 0$	$F_{cd} = 1 + 0.2 \left(\frac{D_f}{B} \right)$ $F_{qd} = 1$ $F_{\gamma d} = 1$	Meyerhof (1963)
	<p>Condition : $\frac{D_f}{B} \leq 1$</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B} \right)$ $F_{qd} = 1$ $F_{\gamma d} = 1$	Hansen (1970)
	<p>Condition : $\frac{D_f}{B} > 1$</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)$ $F_{qd} = 1$ $F_{\gamma d} = 1$	
$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$ <p> $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ = Shape factor $F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$ = Depth factor $F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ = Load inclination factor N_c, N_q, N_γ = Bearing capacity factor The factor $\tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)$ is in radians. </p> <p> สำหรับกรณี $\phi = 0$, $N_c = (2 + \pi)$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$ ฐานรากต่อนื่อง $F_{cs} = F_{qs} = F_{\gamma s} = 1$ แรงกระทำอยู่แนวตั้ง $F_{ci} = F_{qi} = F_{\gamma i} = 1$ ดังนั้นจะได้ $q_u = cN_c F_{cd} + q$ </p>		

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปัญหา กรณี Small Strain (SSC)

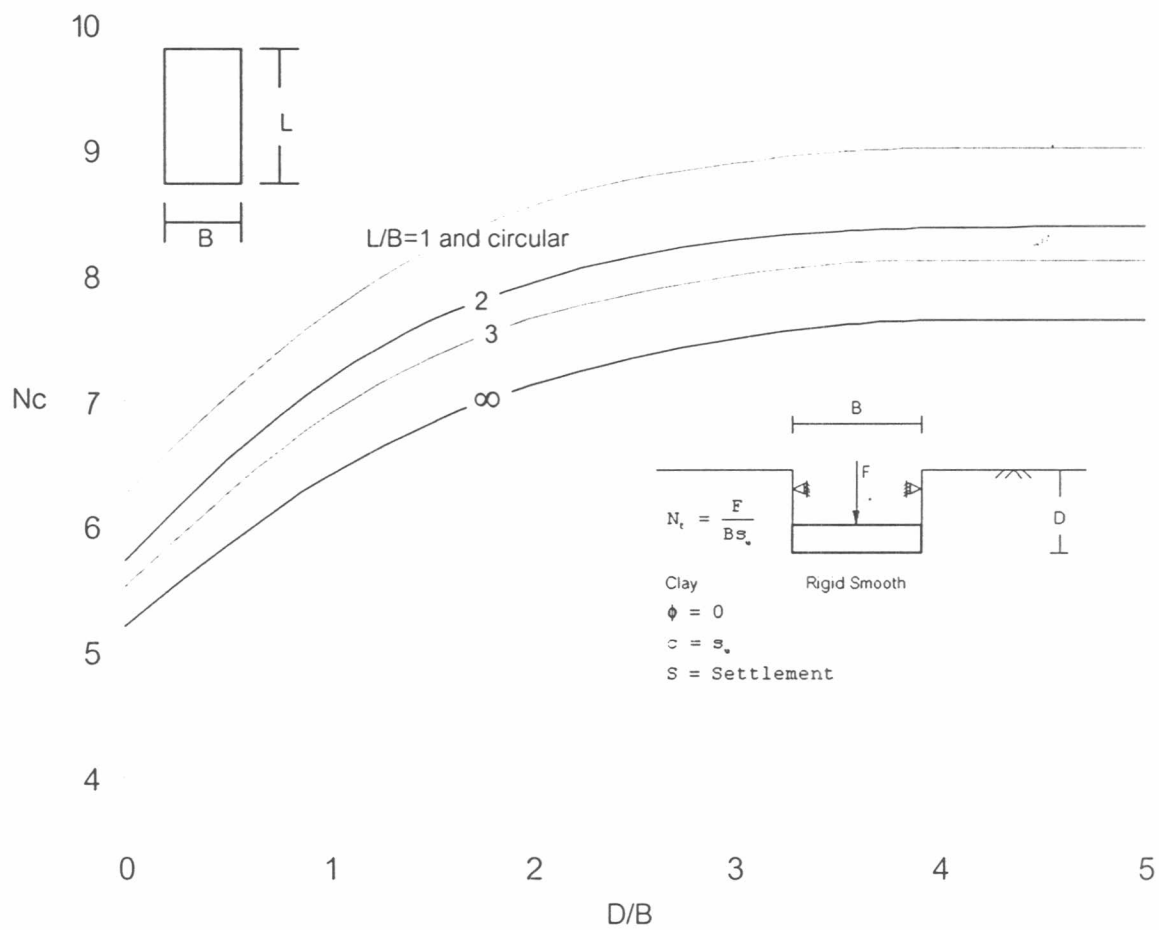
D/B	Nc (Strip footing)	Nc (Circular footing)	Factor Nc (Cir / Str)
0	5.20	5.74	1.10
0.075	5.51	6.68	1.21
0.125	5.66	6.87	1.21
0.175	5.79	7.07	1.22
0.25	5.94	7.40	1.25
0.5	6.29	8.09	1.29
1	6.68	8.95	1.34
2	7.21	10.26	1.42
3	7.60	10.64	1.40
4	7.75	11.02	1.42
5	7.92	11.30	1.43

สมการ Terzaghi 's Bearing Capacity (1943) กรณี $\phi = 0$; Factor Nc (Cir / Str) = 1.3
ตามเงื่อนไข $D/B \leq 1$

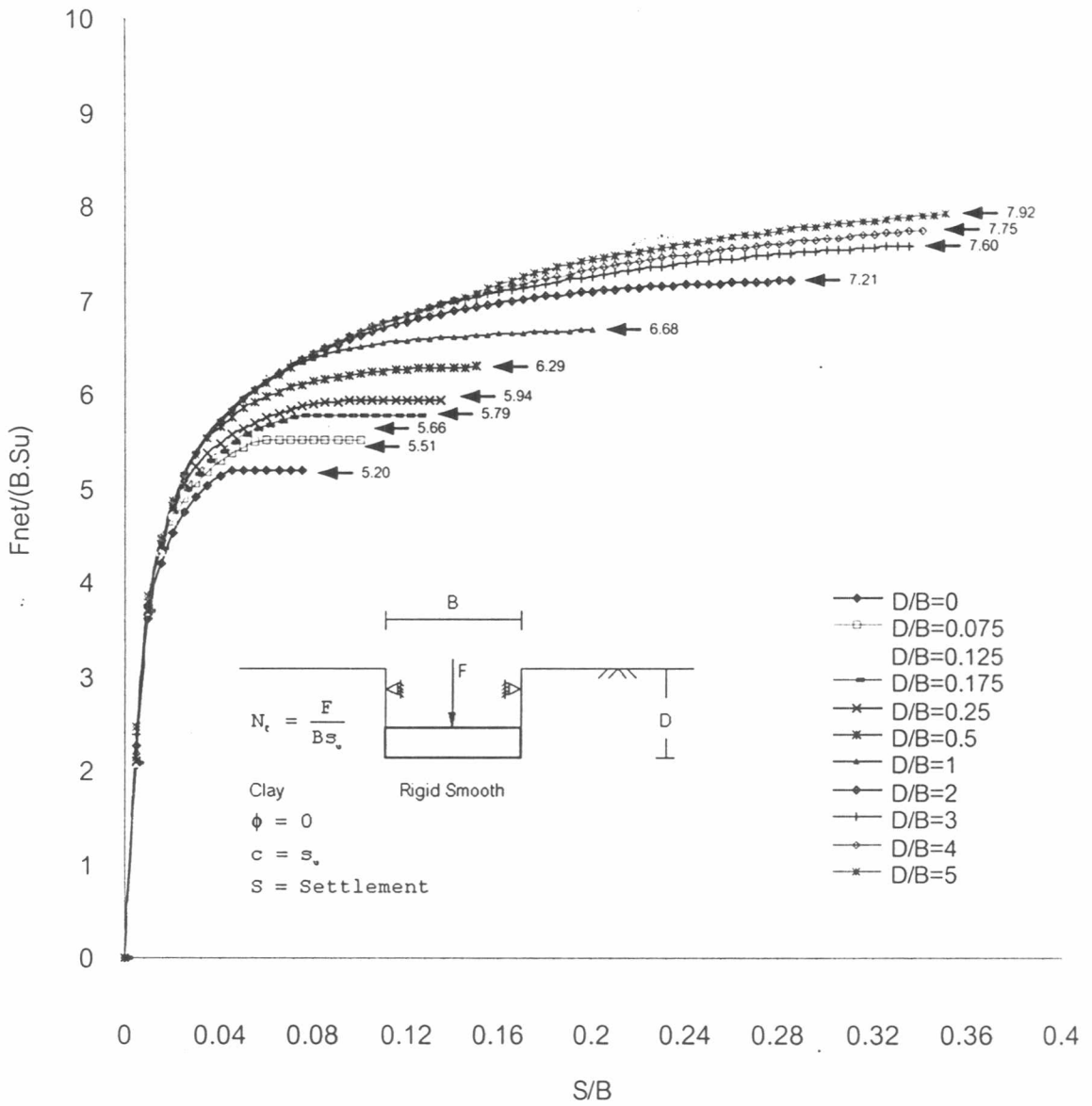
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่า N_c ระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้โครงข่ายชั้นส่วน 6 จุดต่อ และ 15 จุดต่อ

D/B	Nc		Error (%)
	6 Node	15 Node	
0	5.31	5.20	2.12
0.075	5.66	5.51	2.72
0.125	5.94	5.66	4.95
0.25	6.02	5.94	1.35
0.5	6.39	6.29	1.59
1	6.87	6.68	2.84
3	7.86	7.60	3.42

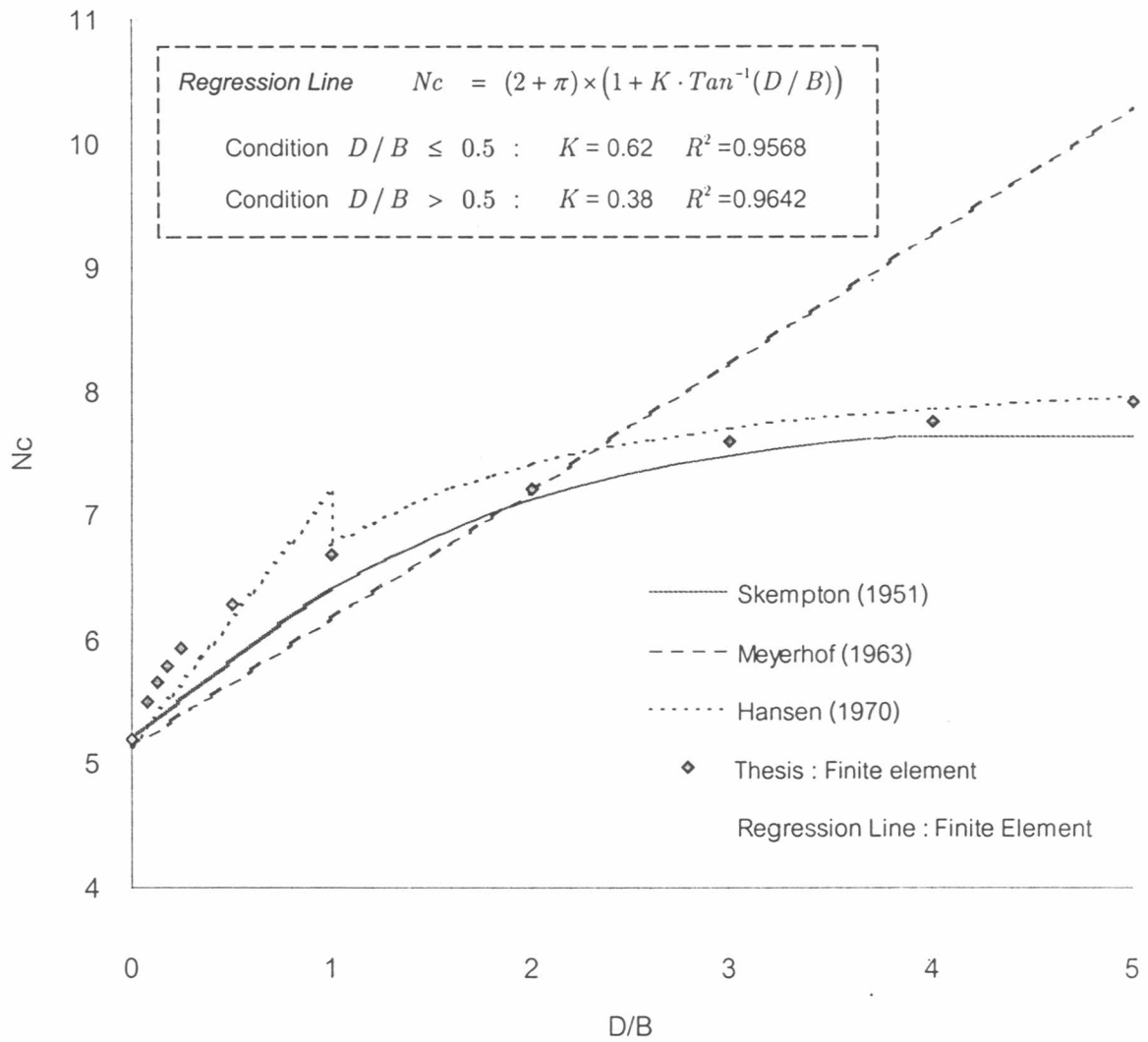
AVE. 2.71 %



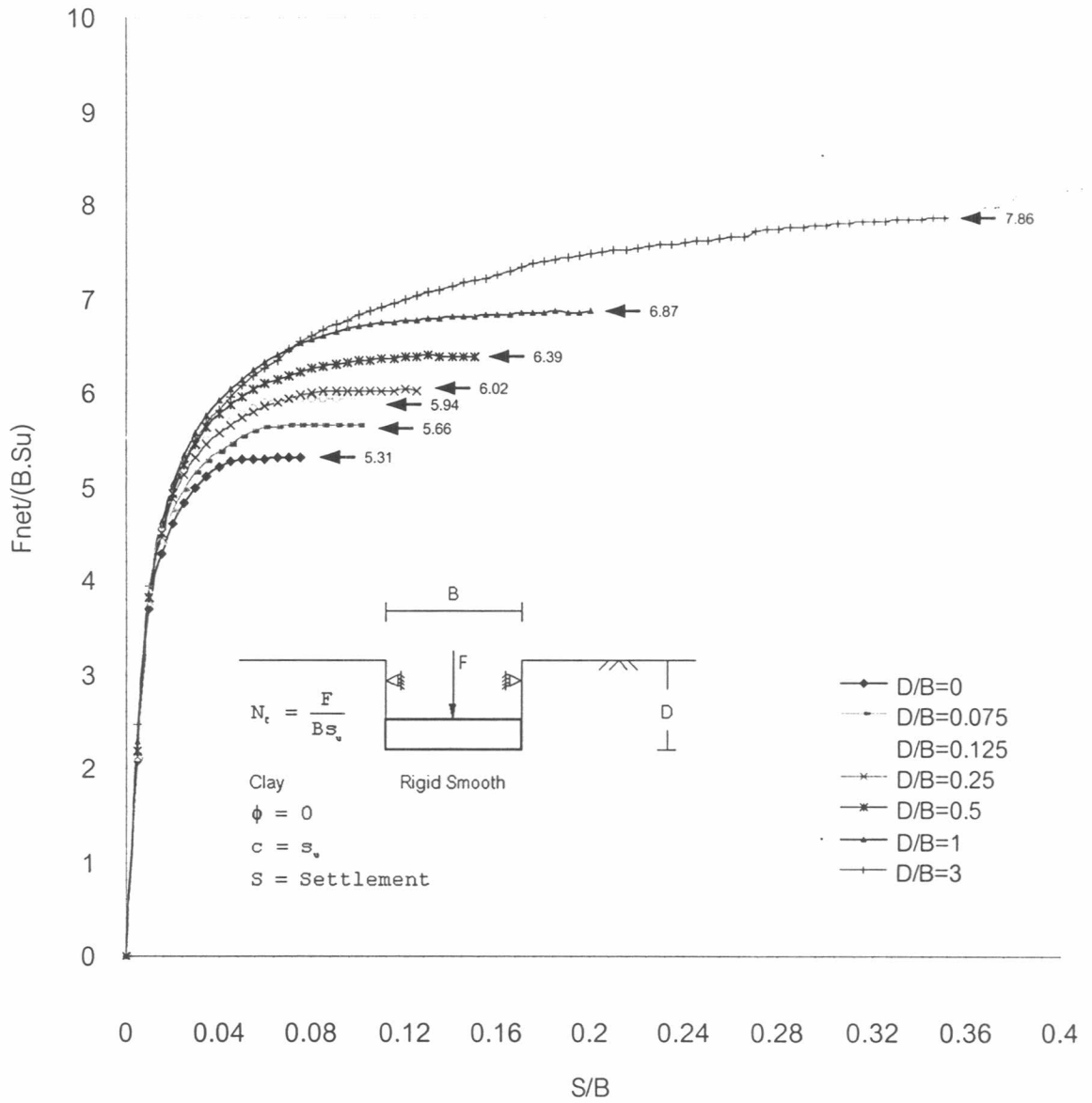
รูปที่ 4.1 ค่า Bearing Capacity Factor, N_c ของ Embedded Footing
(Skempton's equation, 1951)



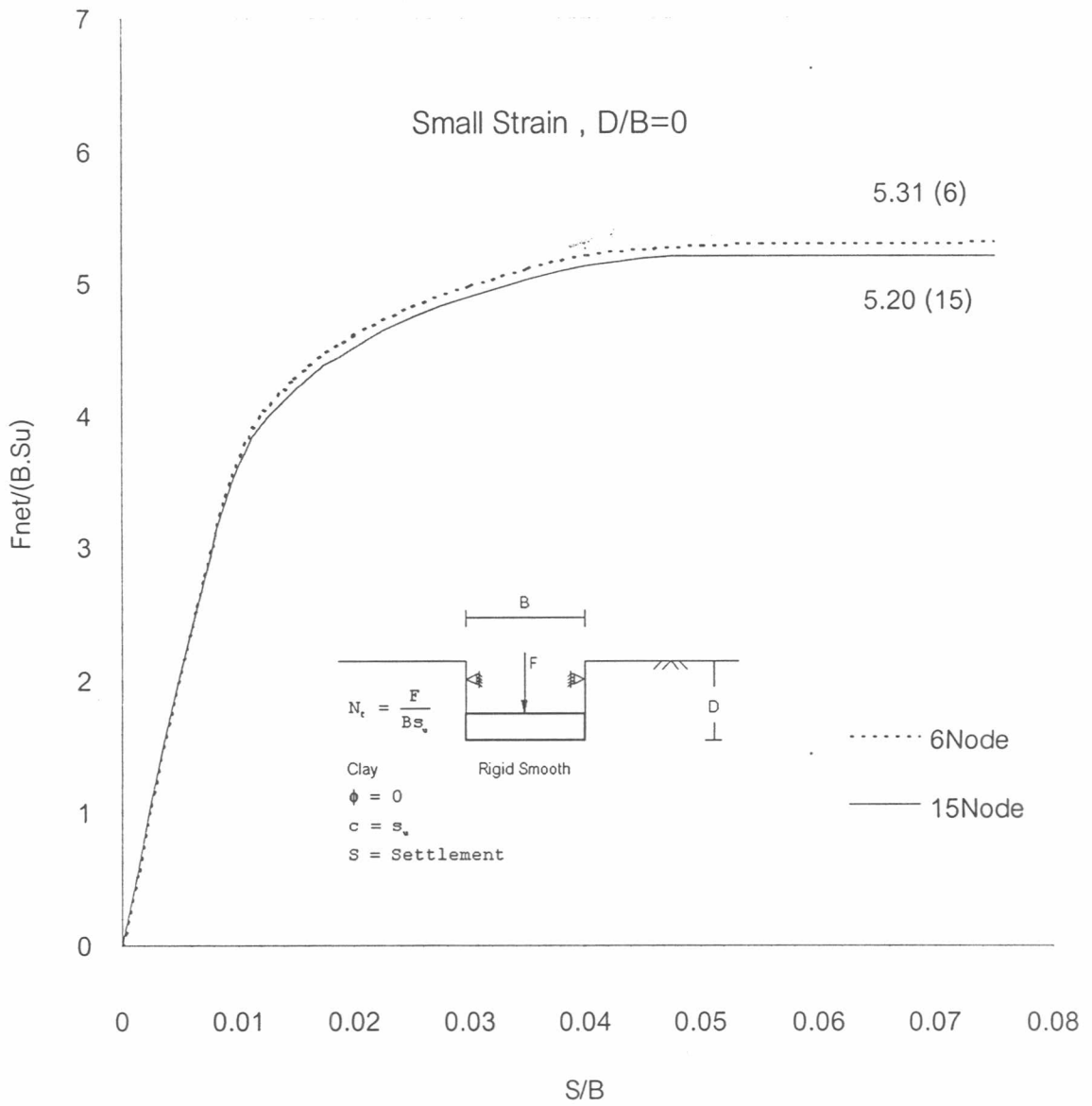
รูปที่ 4.2 Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื้อ กรณี Small Strain (SSC)
 คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



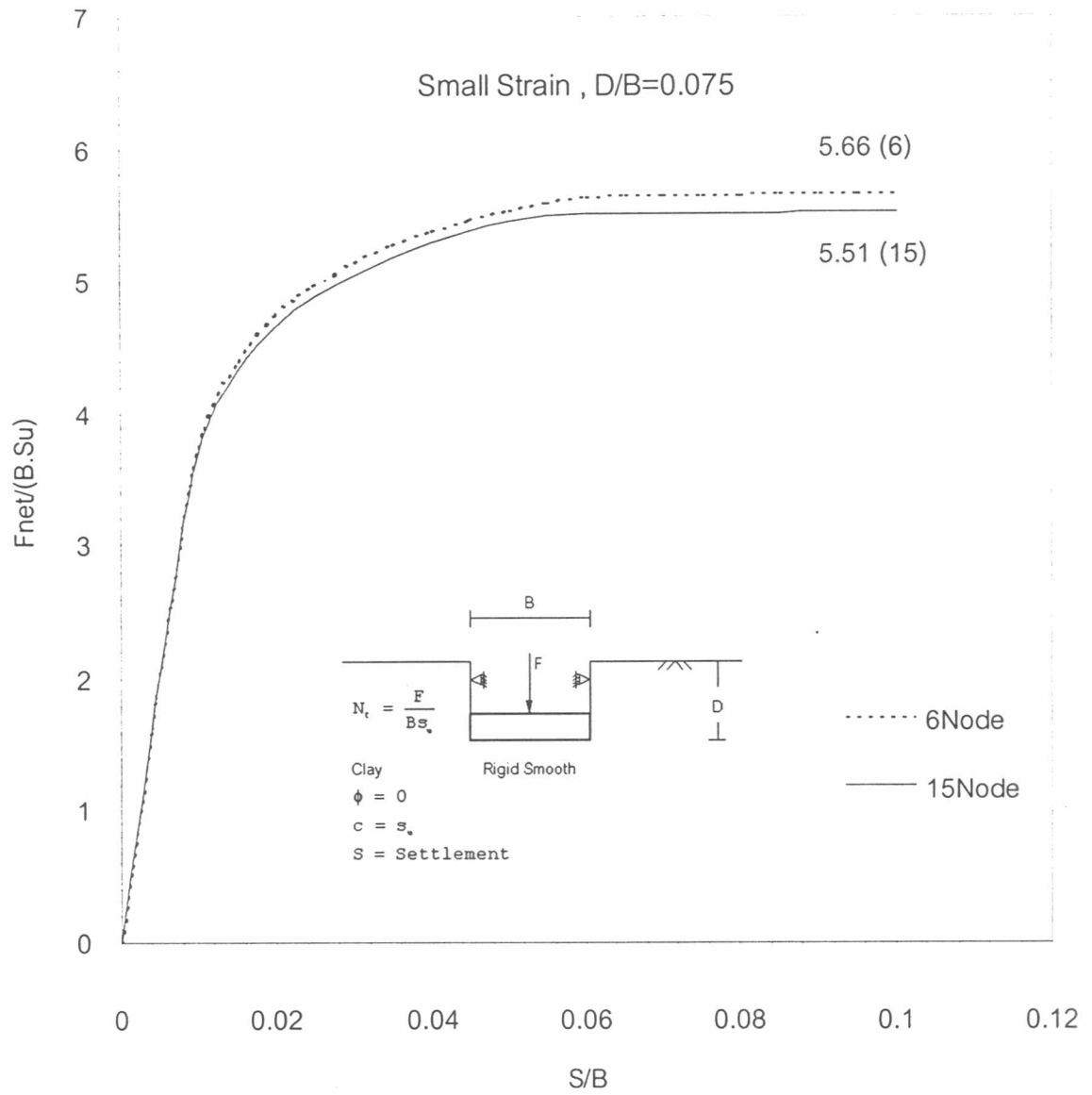
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า N_c ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ วิธี Empirical Method ของฐานรากต่อเนื่อง กรณี Small Strain (SSC)



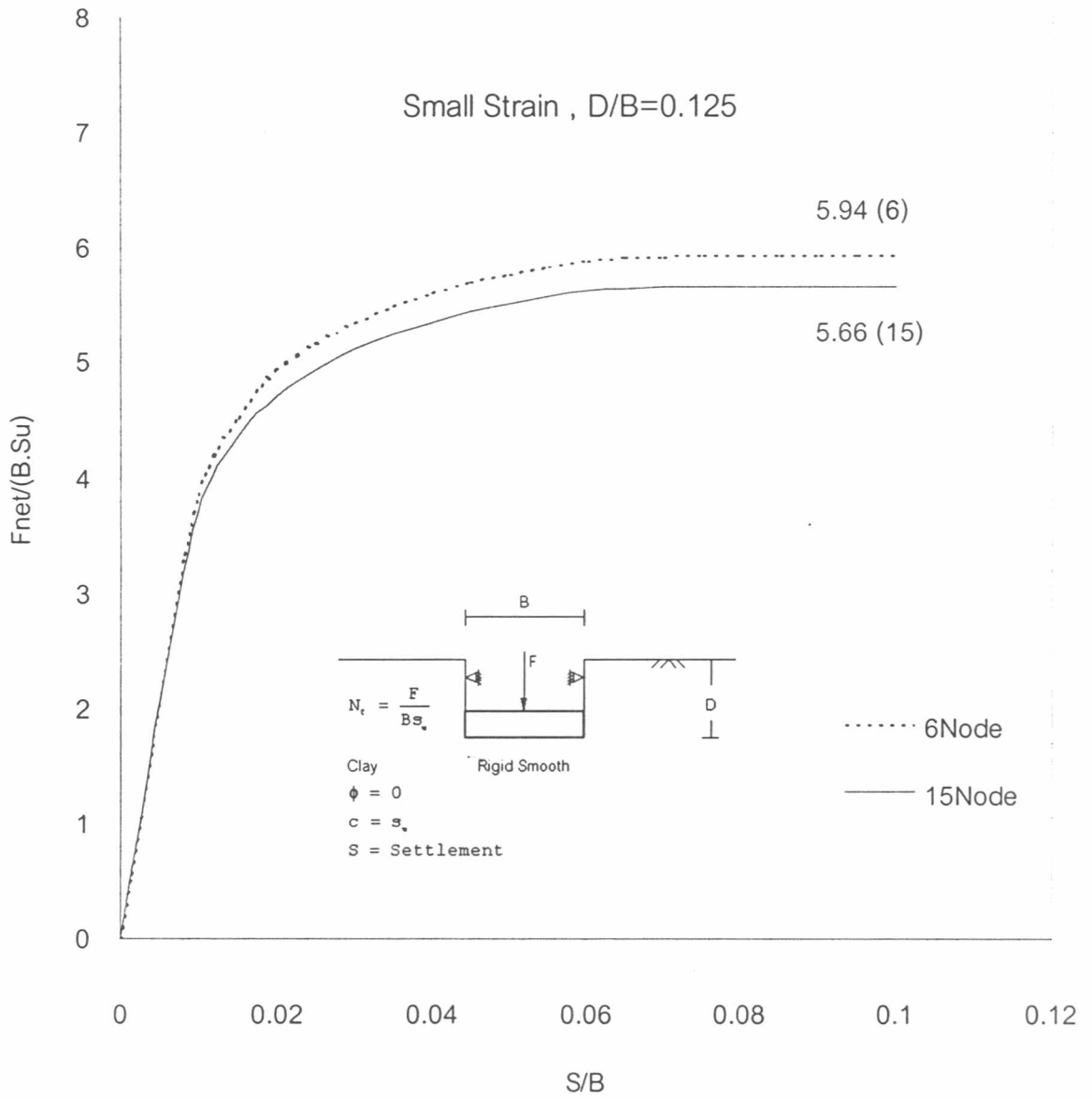
รูปที่ 4.4 Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื้อ กรณี Small Strain (SSC)
 คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ



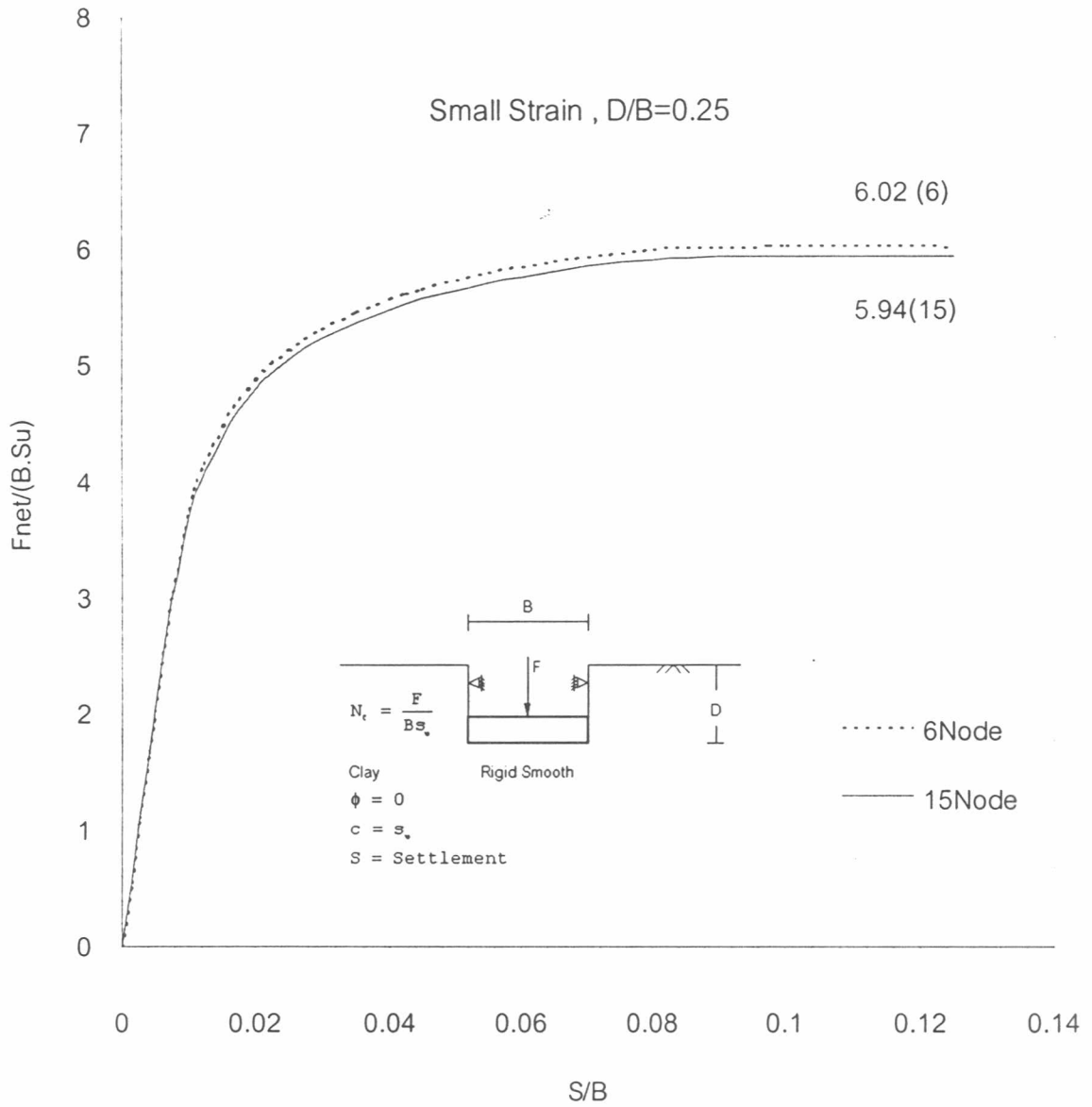
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบ Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่อง กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0$ ระหว่างการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15จุดต่อ และ 6 จุดต่อ



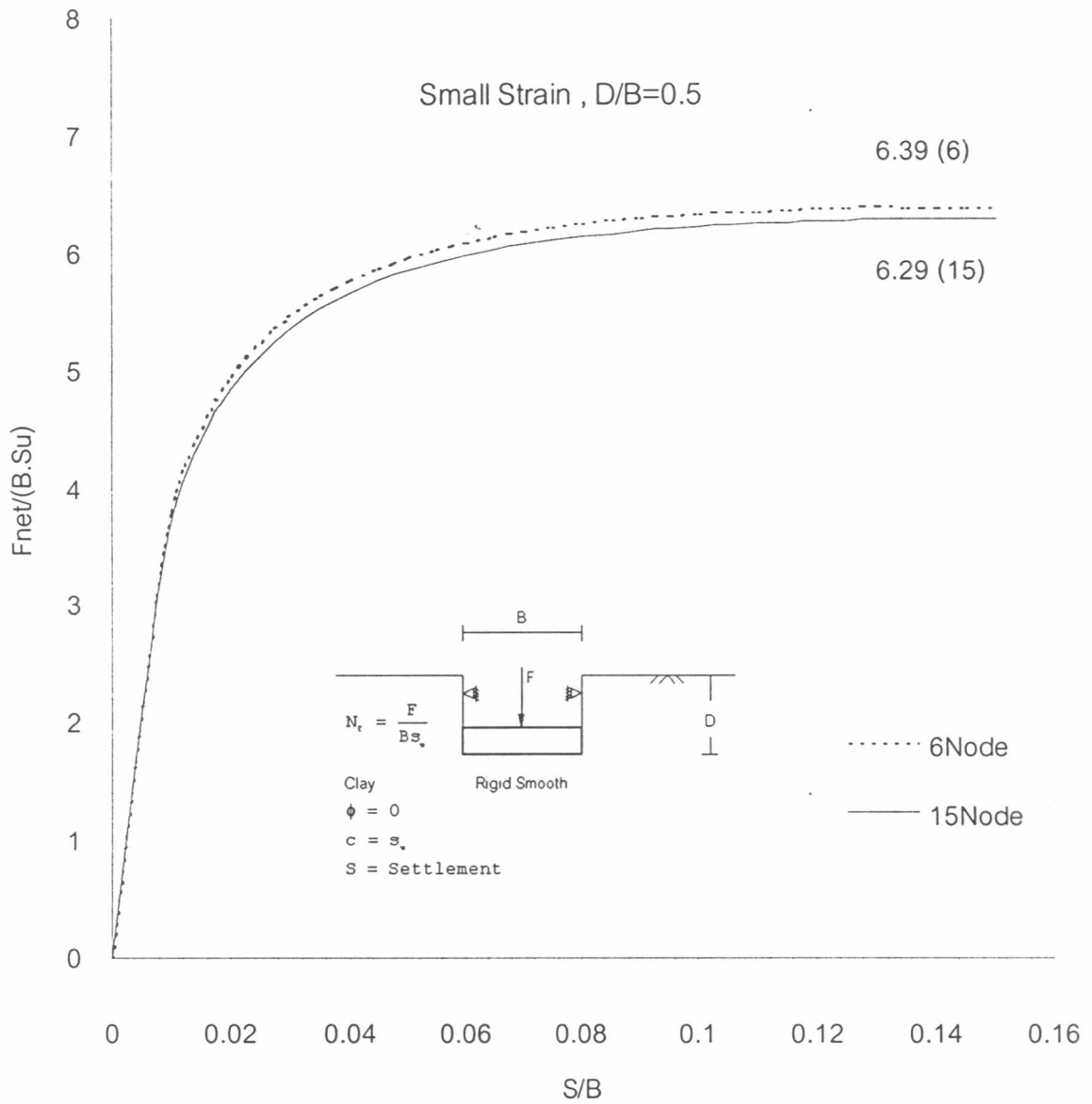
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบ Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อนิ่ง กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.075$ ระหว่างการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15จุดต่อ และ 6 จุดต่อ



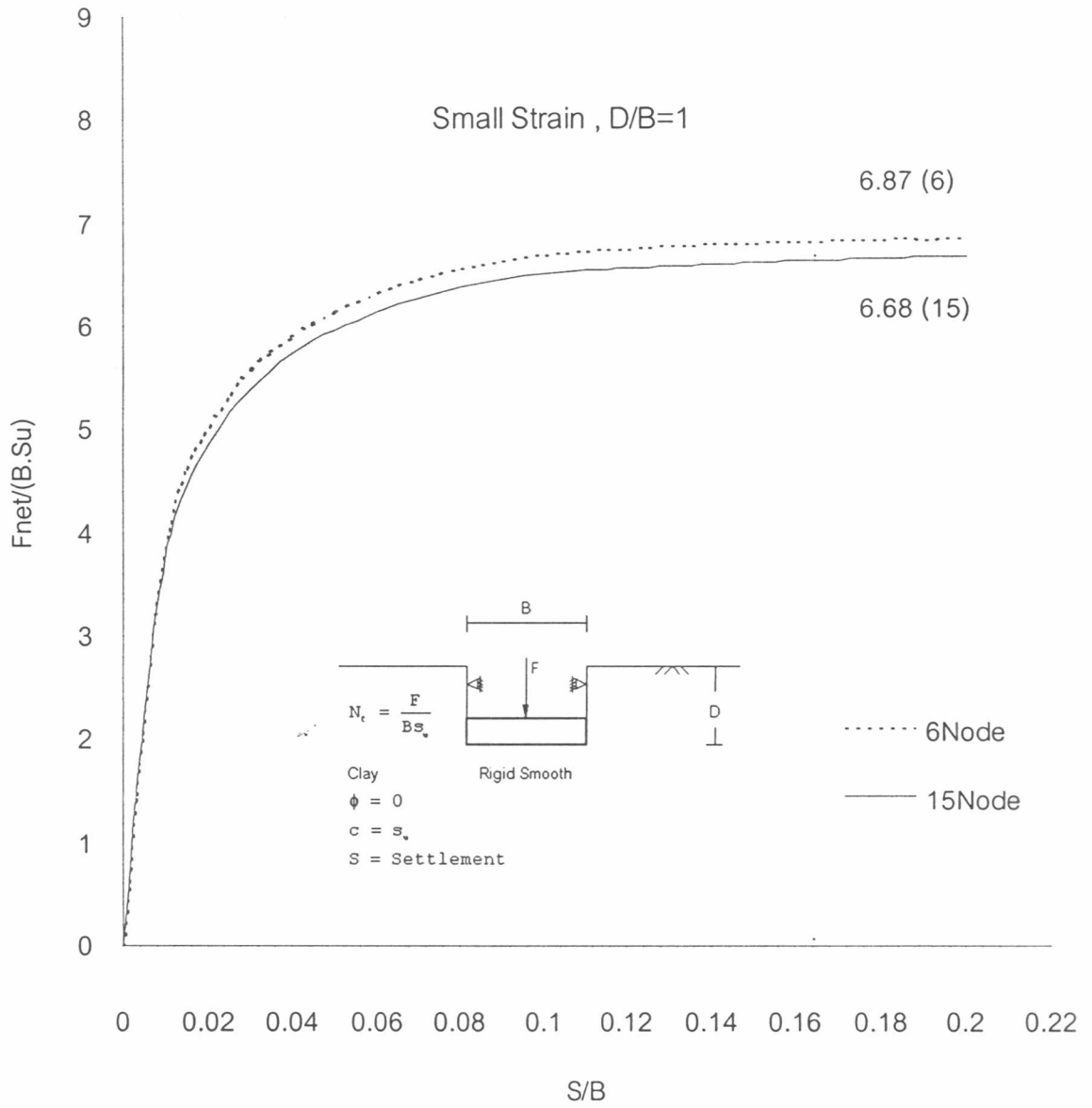
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบ Load-Settlement Curve ของฐานรากตอเนื่อง กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.125$ ระหว่างการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15จุดต่อ และ 6 จุดต่อ



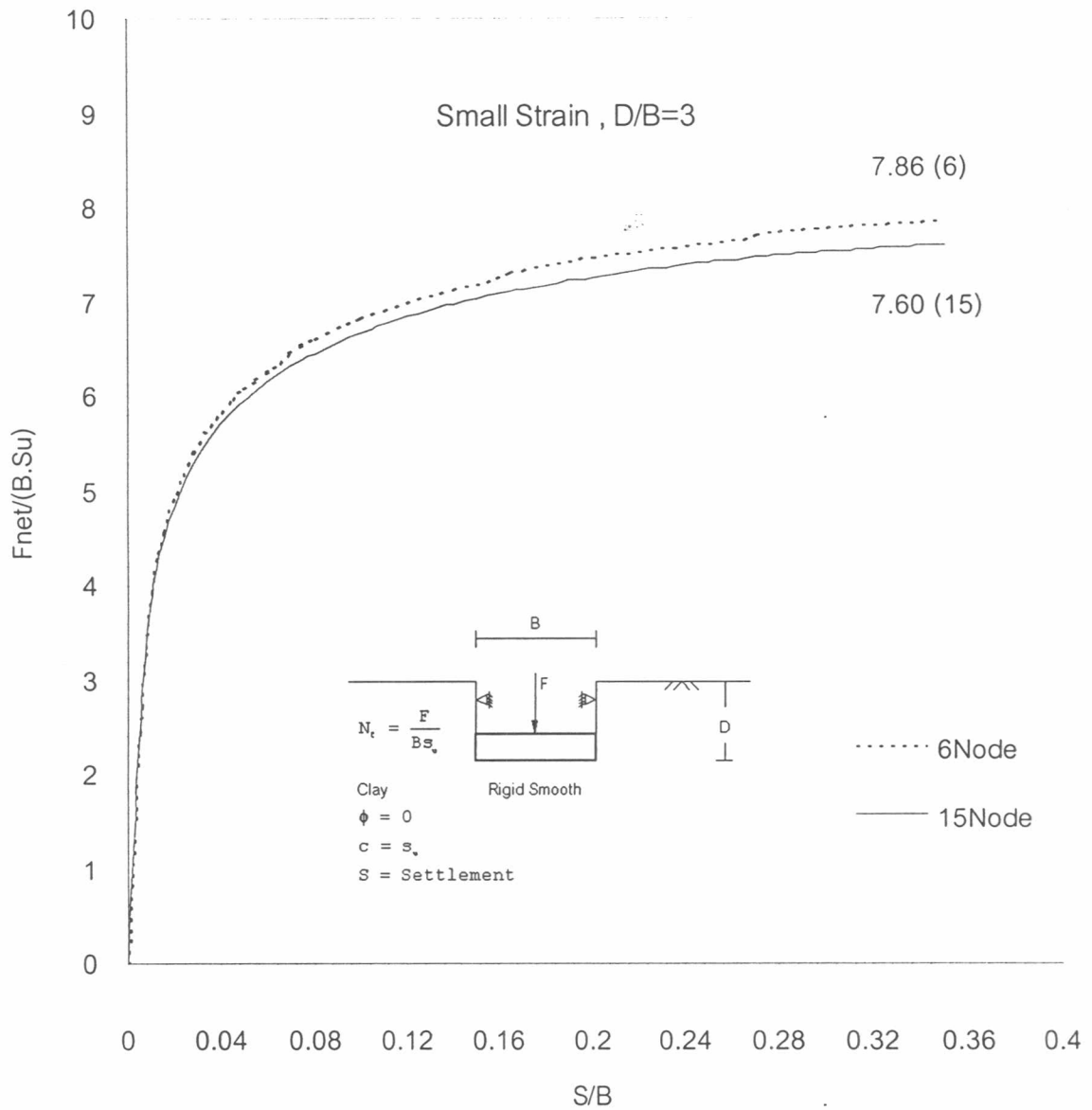
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบ Load-Settlement Curve ของฐานรากตอเนื่อง กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.25$ ระหว่างการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15จุดต่อ และ 6 จุดต่อ



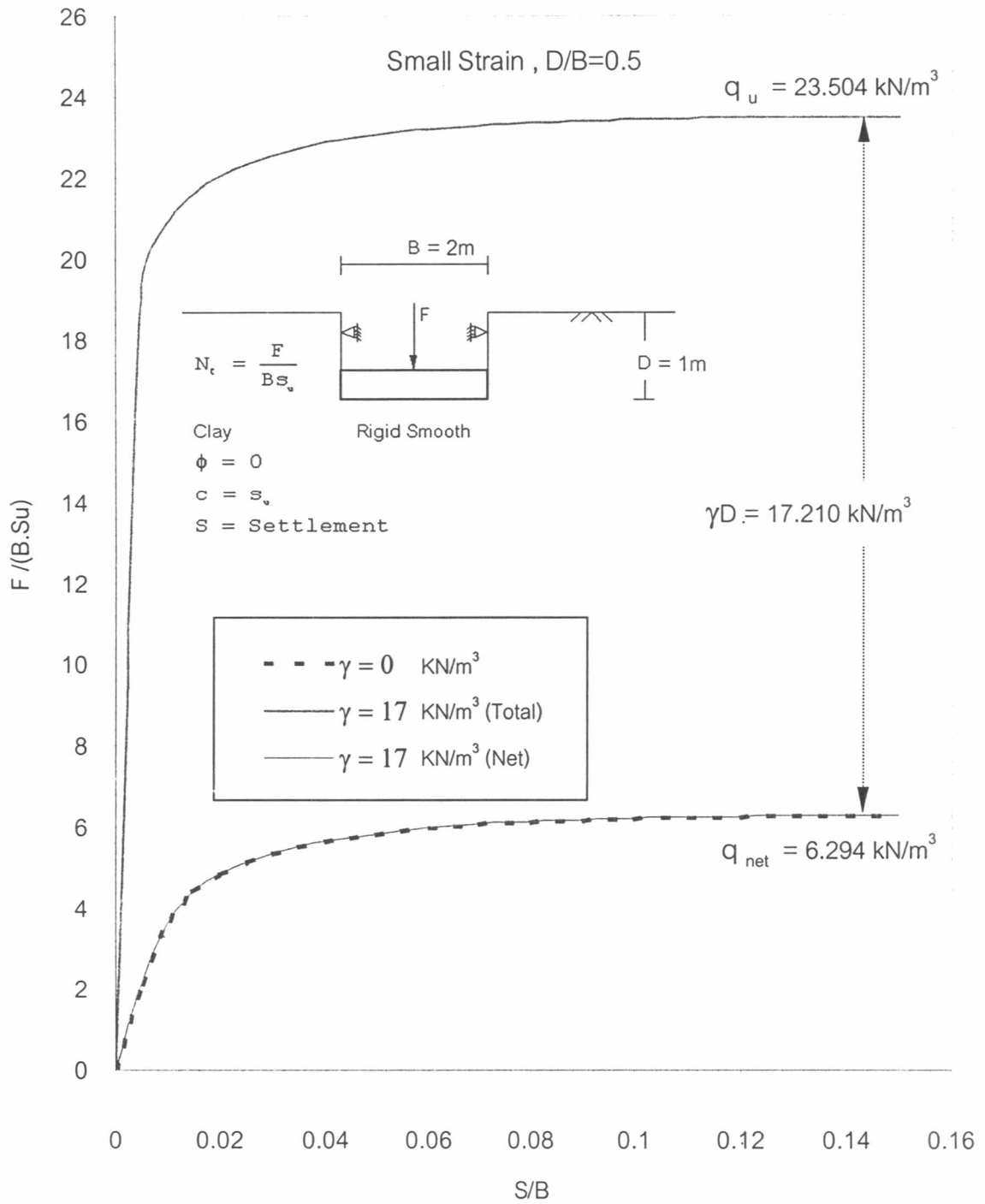
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบ Load-Settlement Curve ของฐานรากตอเนื่อง กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.5$ ระหว่างการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15จุดต่อ และ 6 จุดต่อ



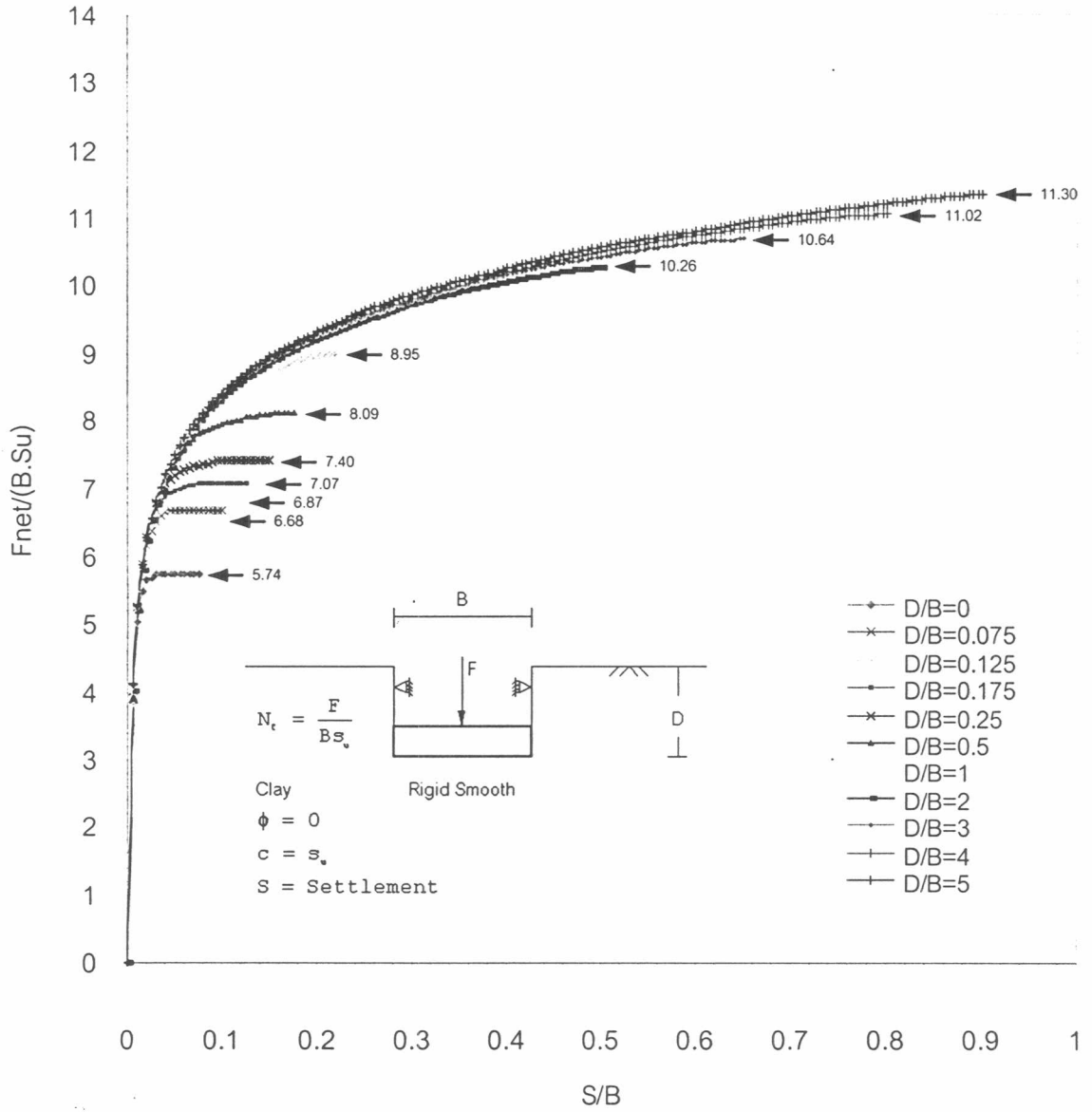
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบ Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อนิ่ง กรณี Small Strain (SSC) ที่ D/B=1 ระหว่างการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15จุดต่อ และ 6 จุดต่อ



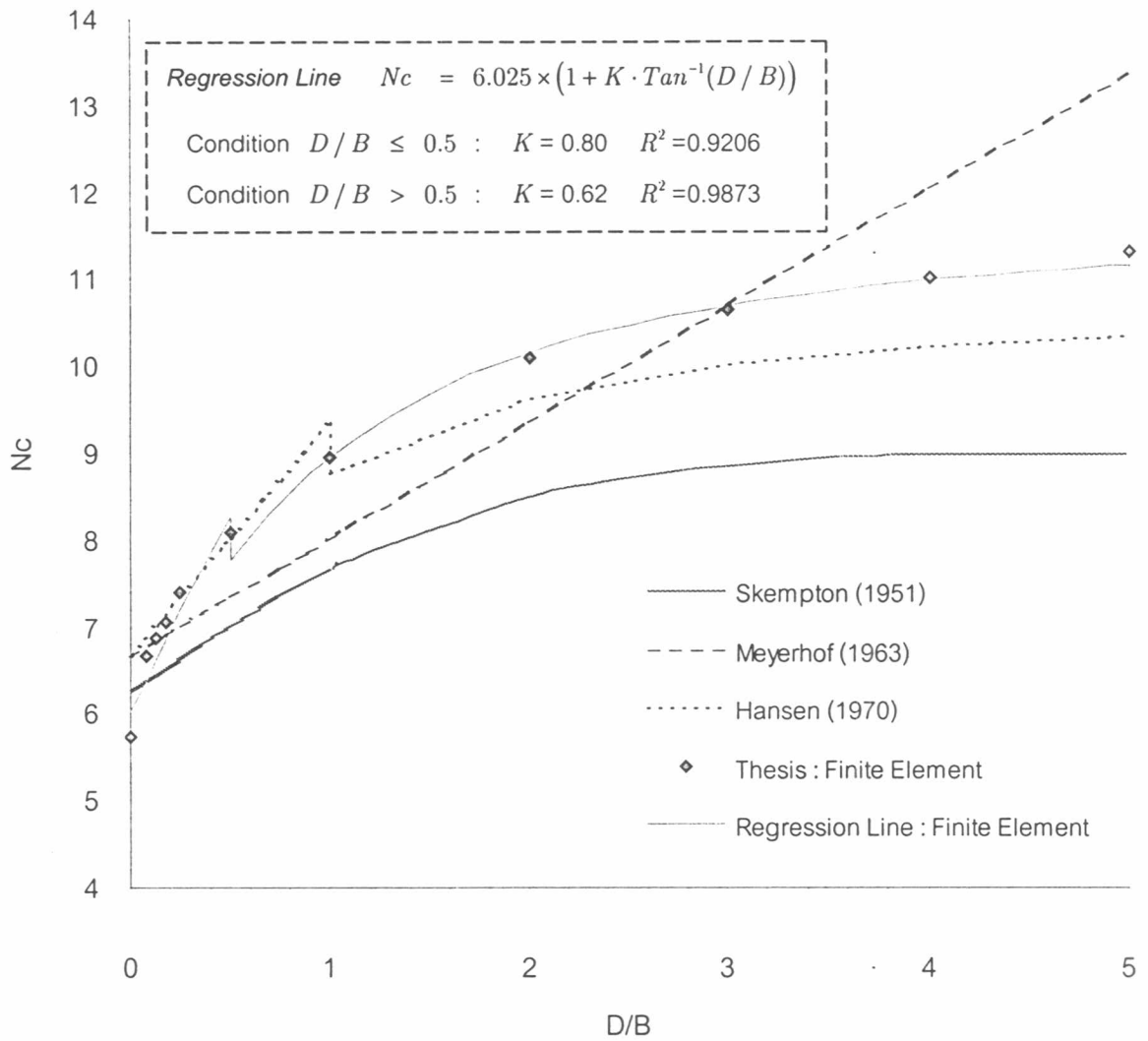
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบ Load-Settlement Curve ของฐานรากตอเนื้อ กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=3$ ระหว่างการคำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15จุดต่อ และ 6 จุดต่อ



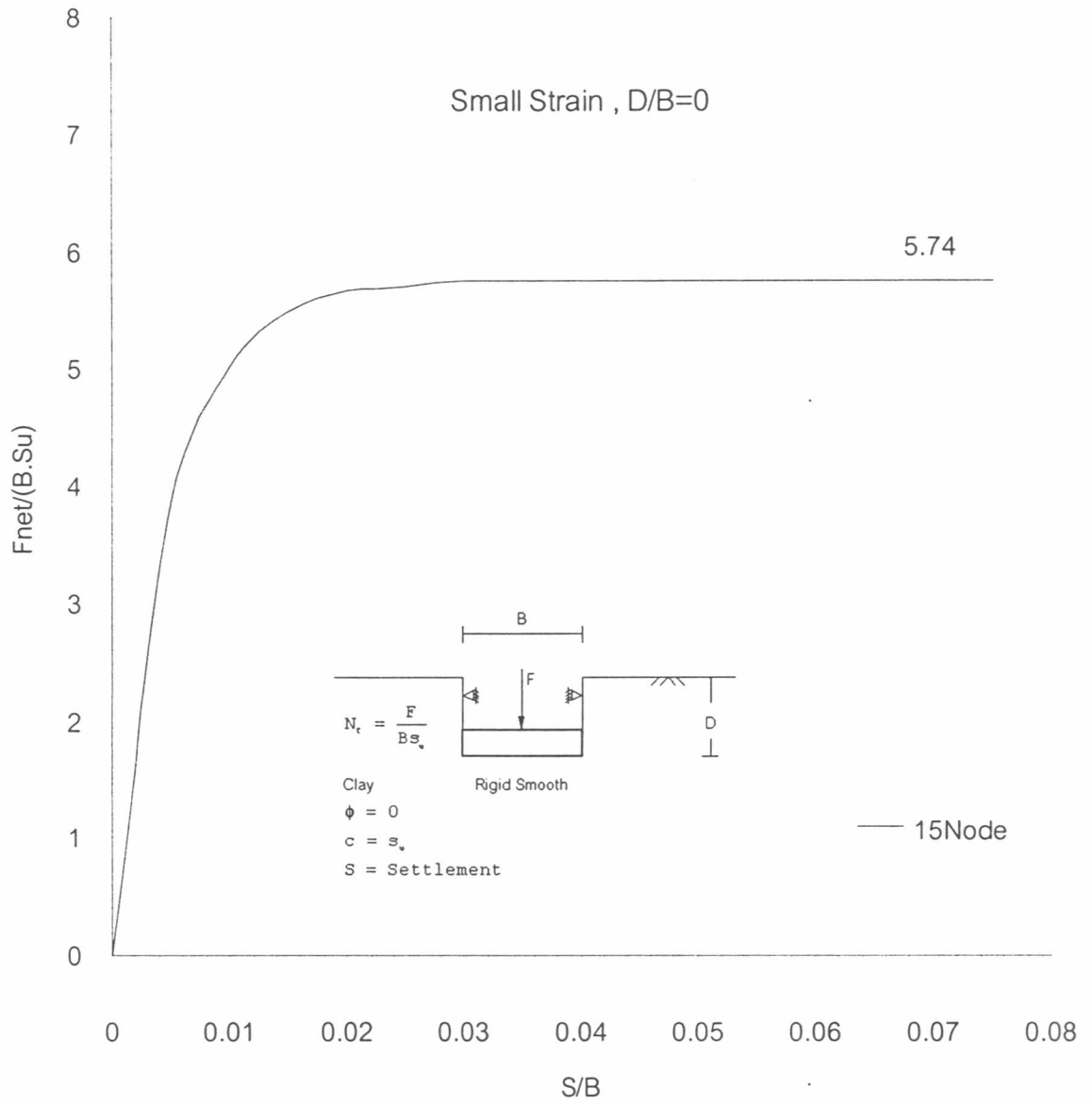
รูปที่ 4.12 ผลของ Unit Weight ที่มีต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานรากต่อเนื้อ
 กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.5$ (15 Node)



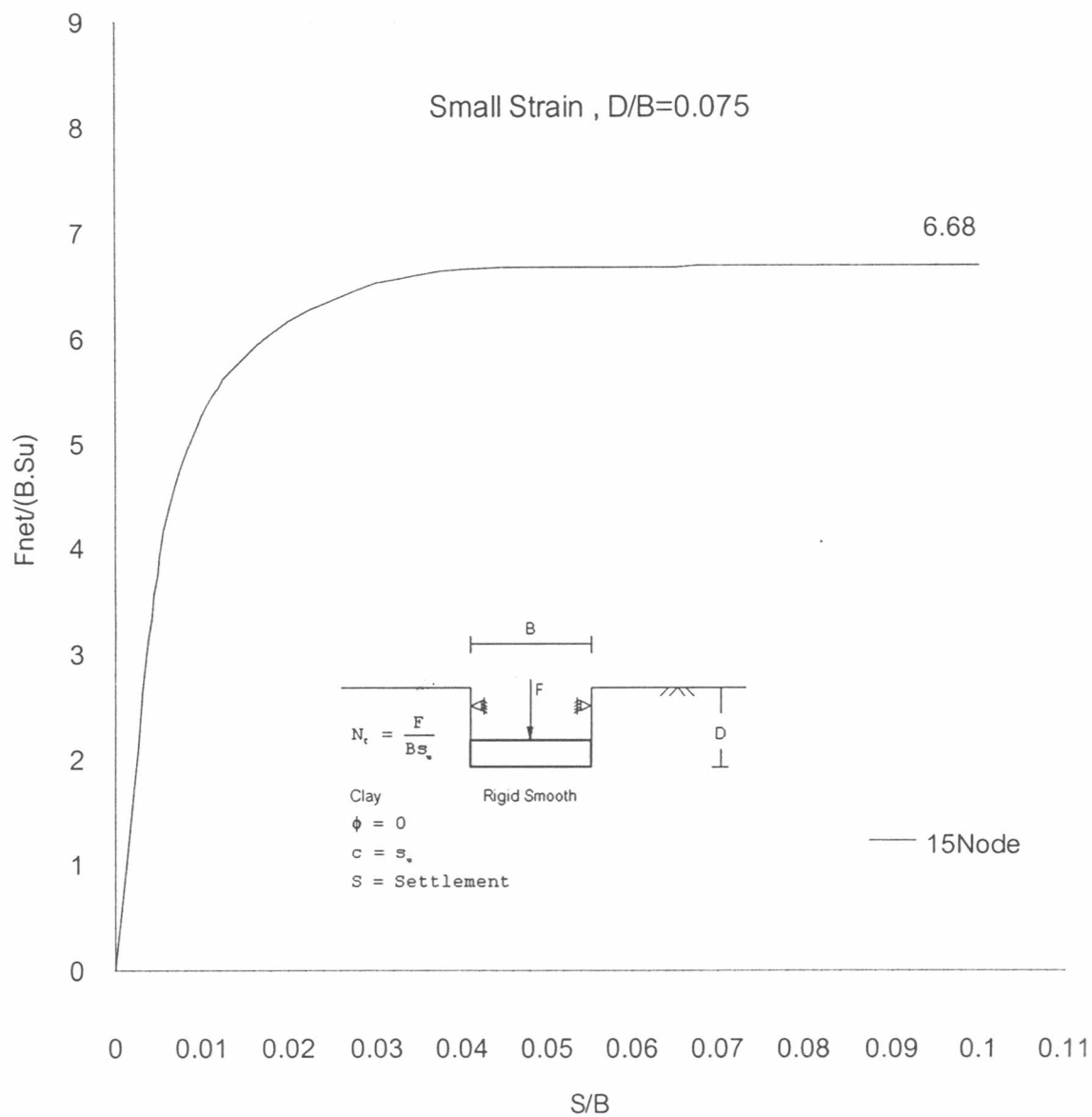
รูปที่ 4.13 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC)
 คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



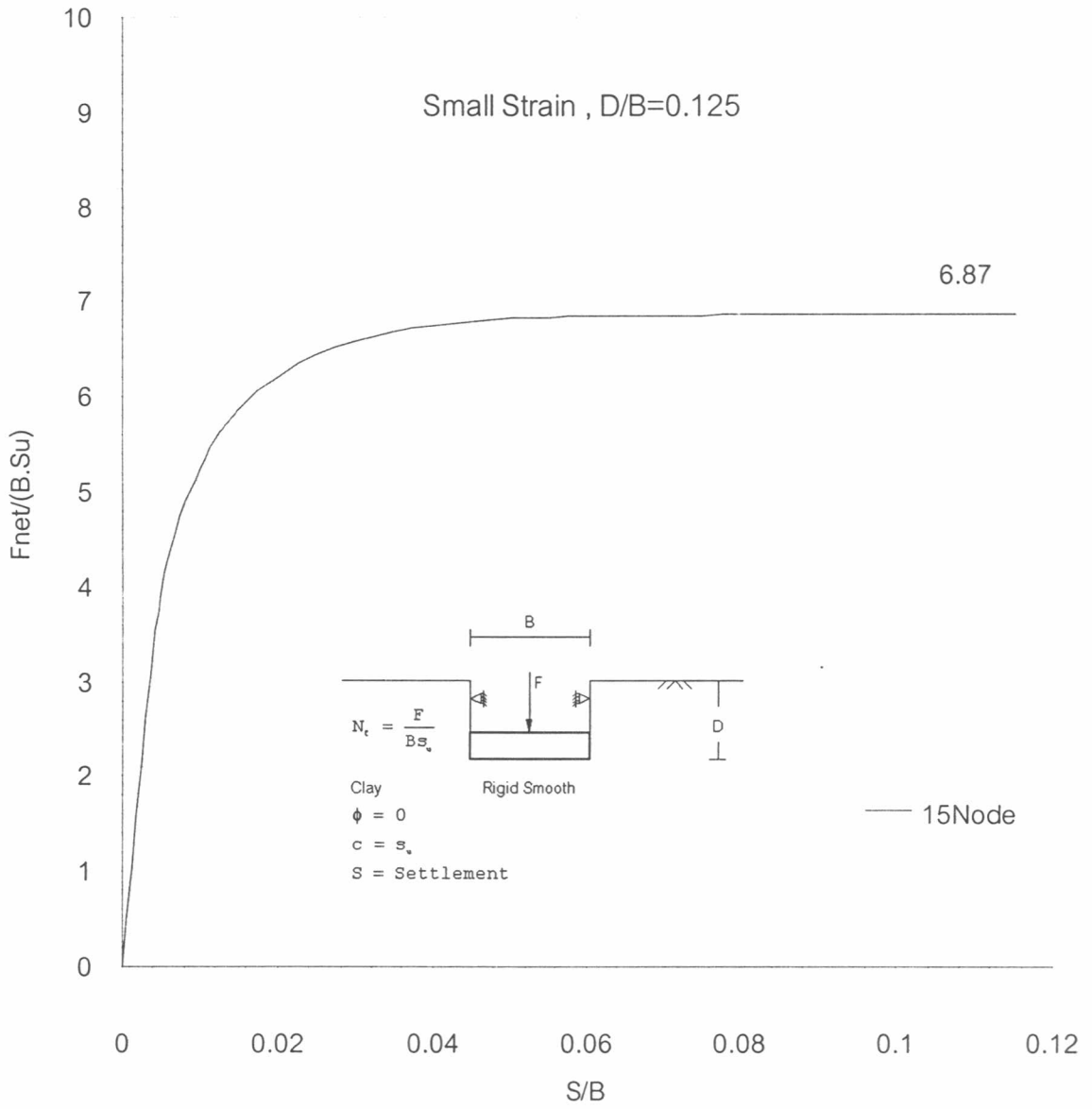
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่า N_c ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ วิธี Empirical Method ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC)



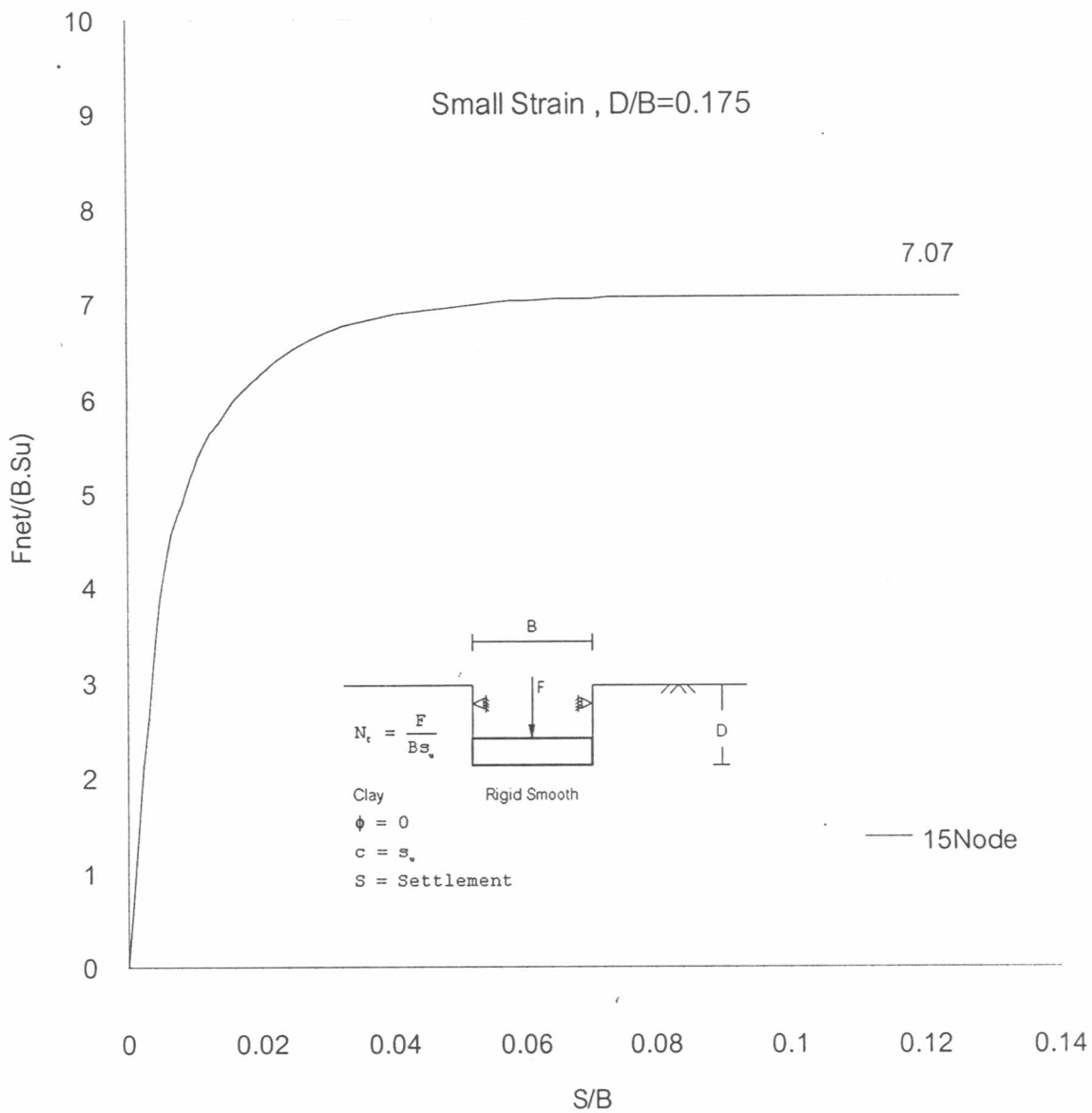
รูปที่ 4.15 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



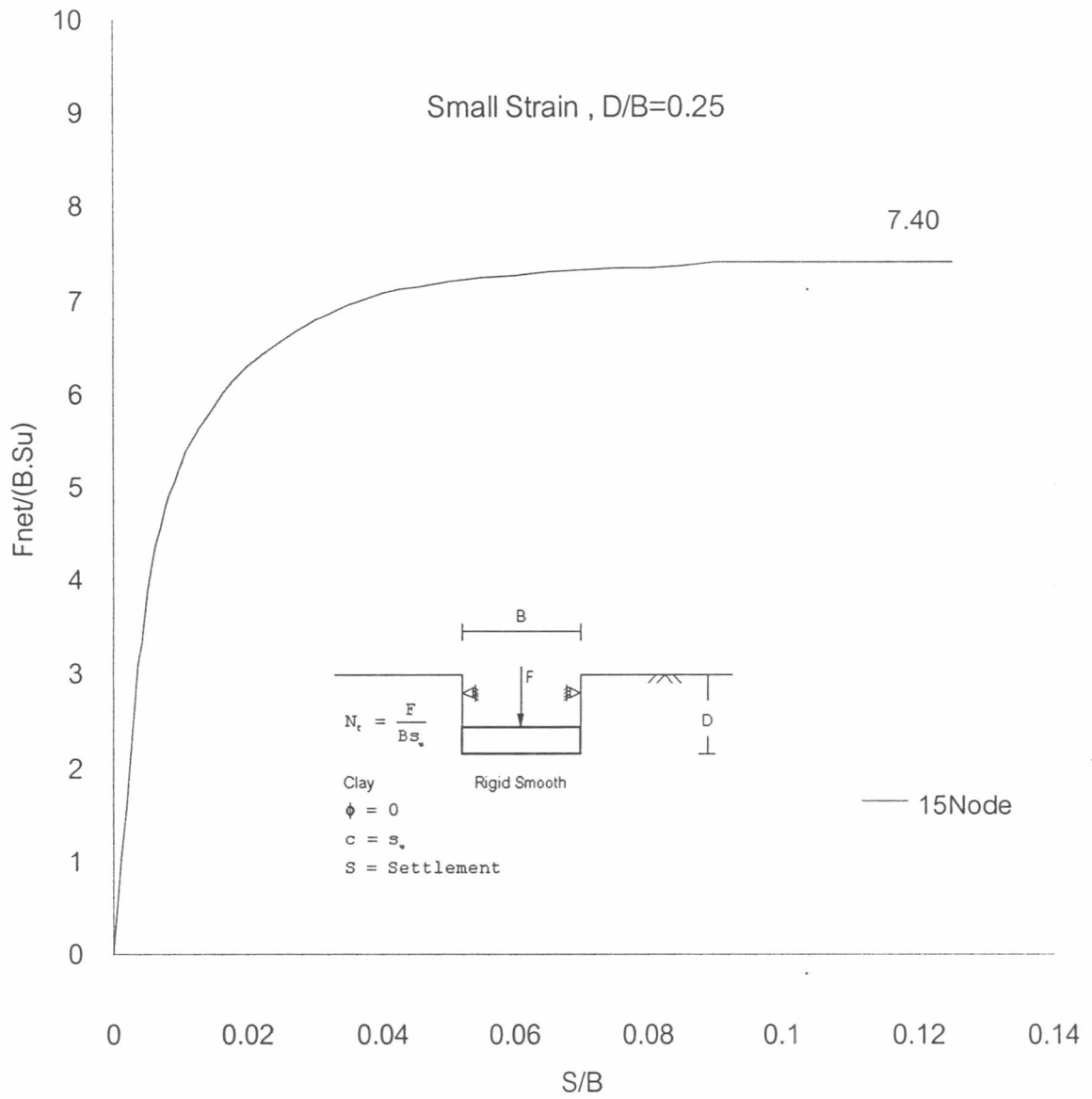
รูปที่ 4.16 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.075$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



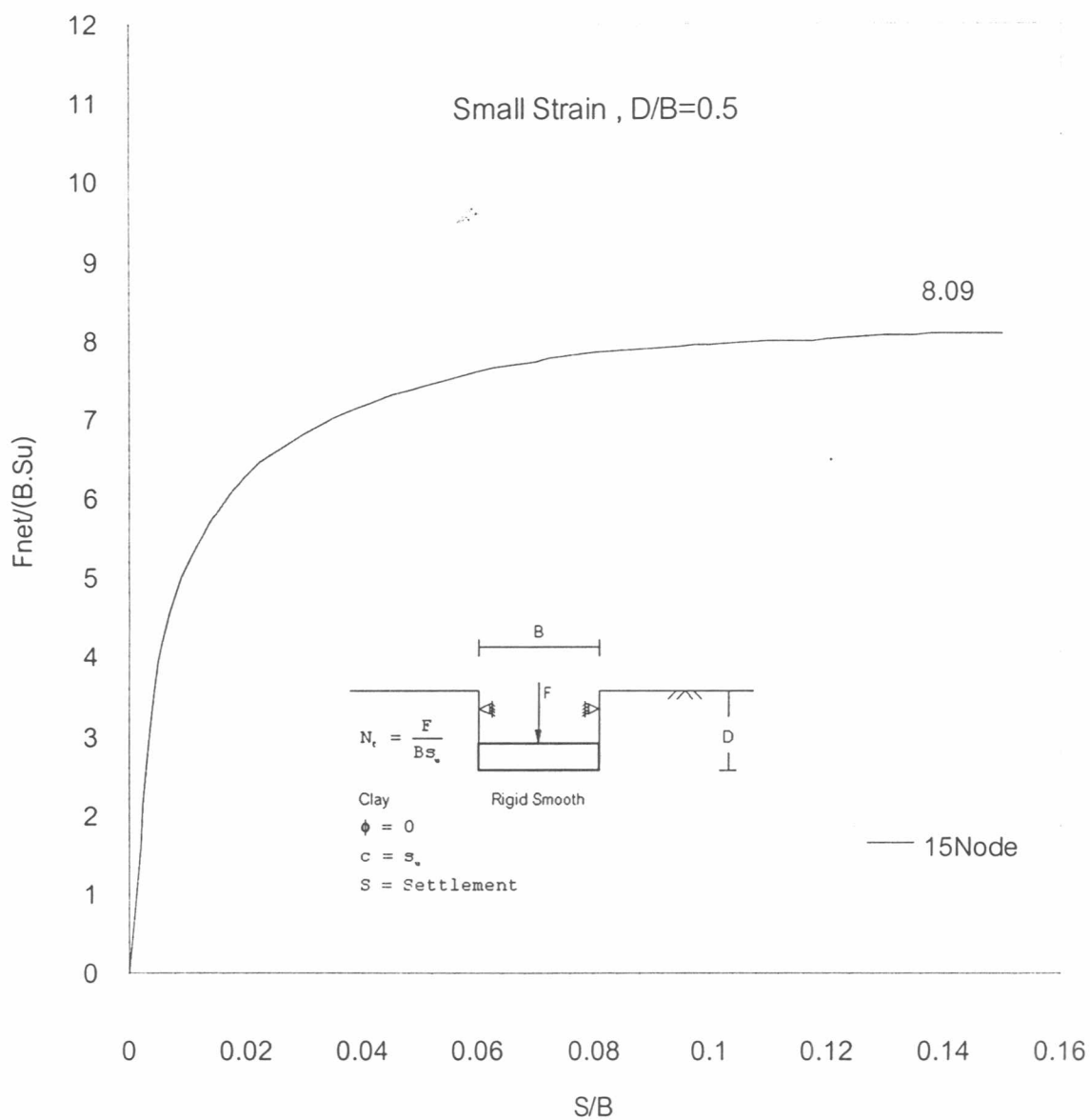
รูปที่ 4.17 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.125$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



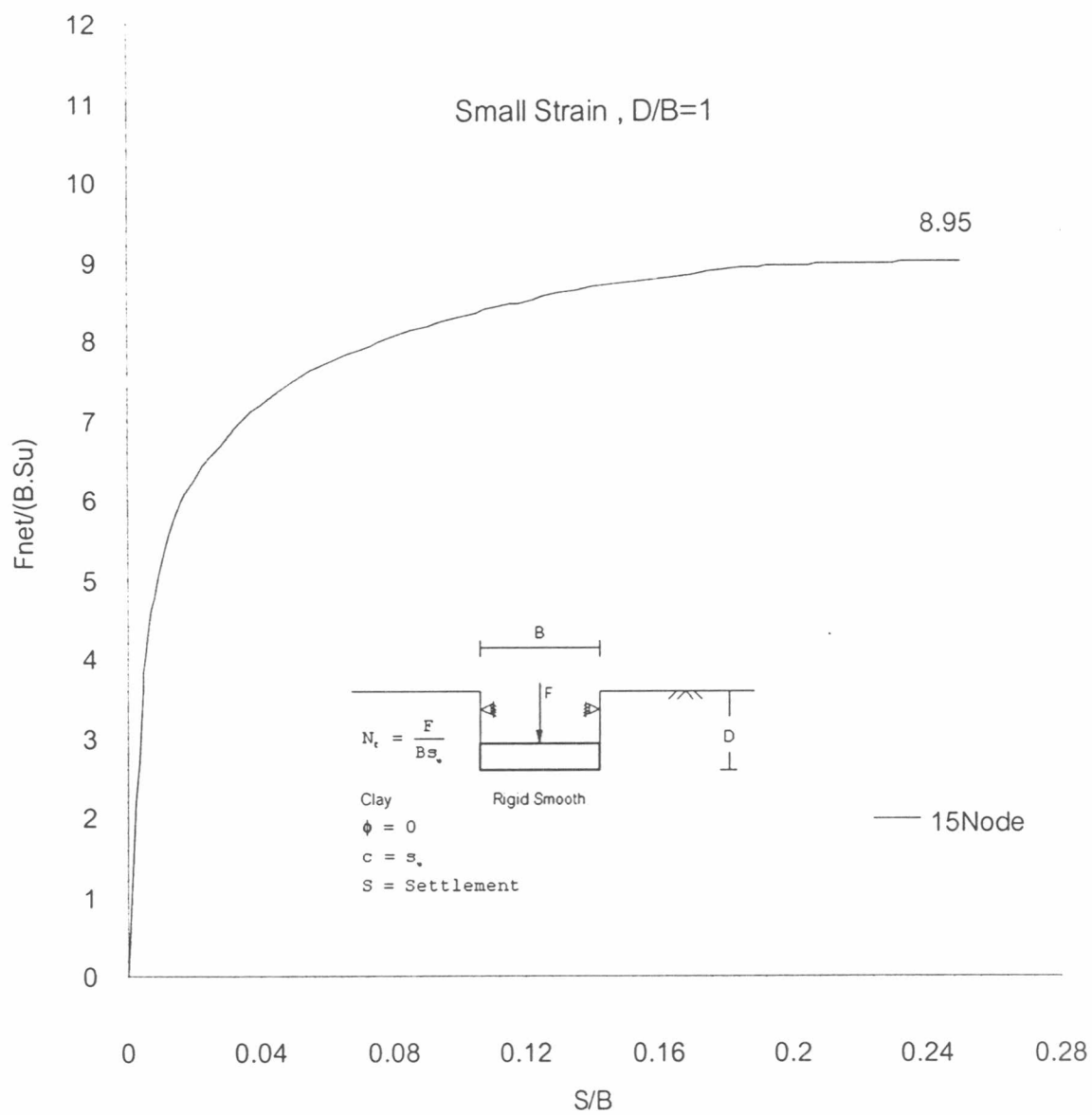
รูปที่ 4.18 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.175$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



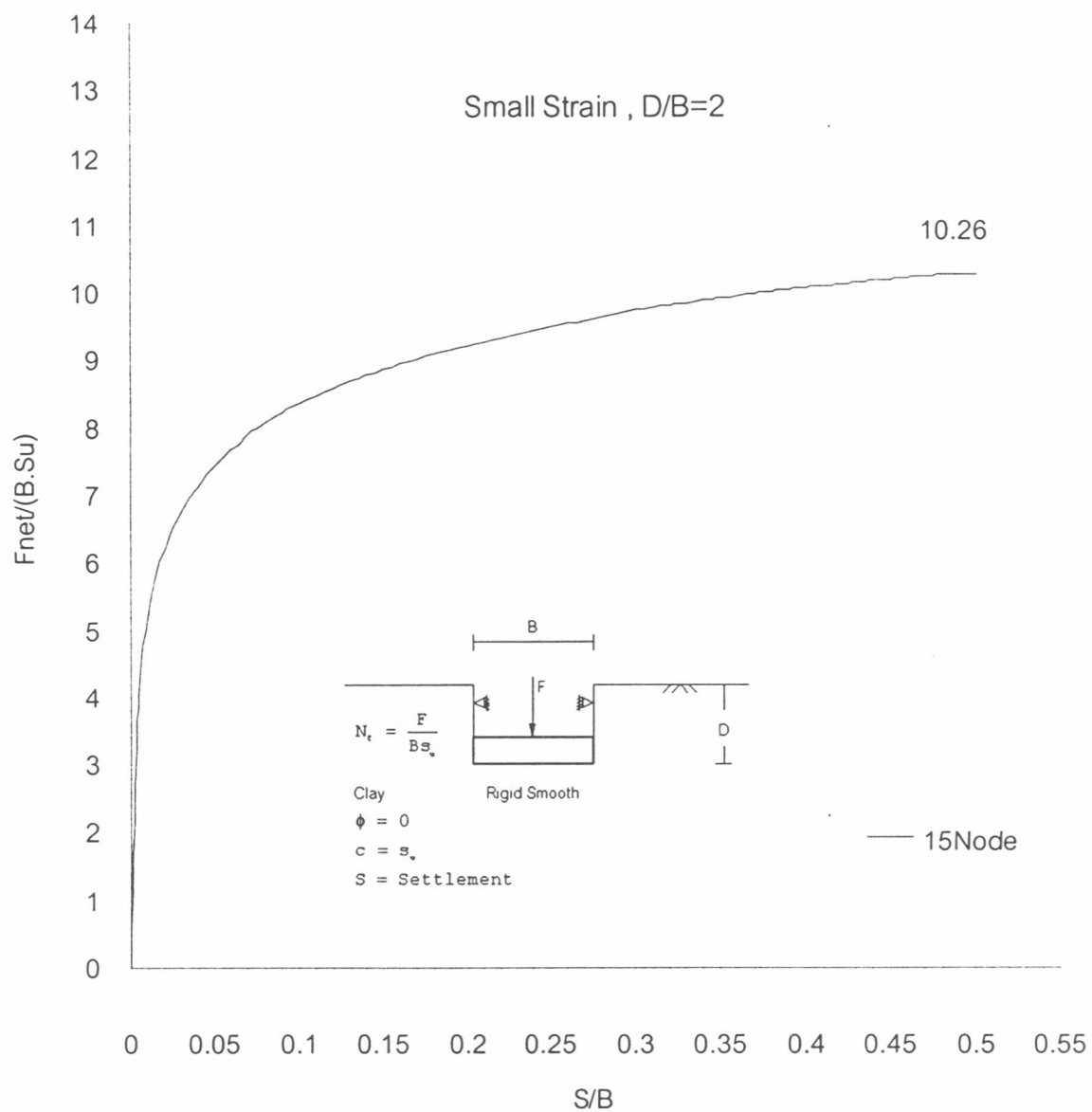
รูปที่ 4.19 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.25$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



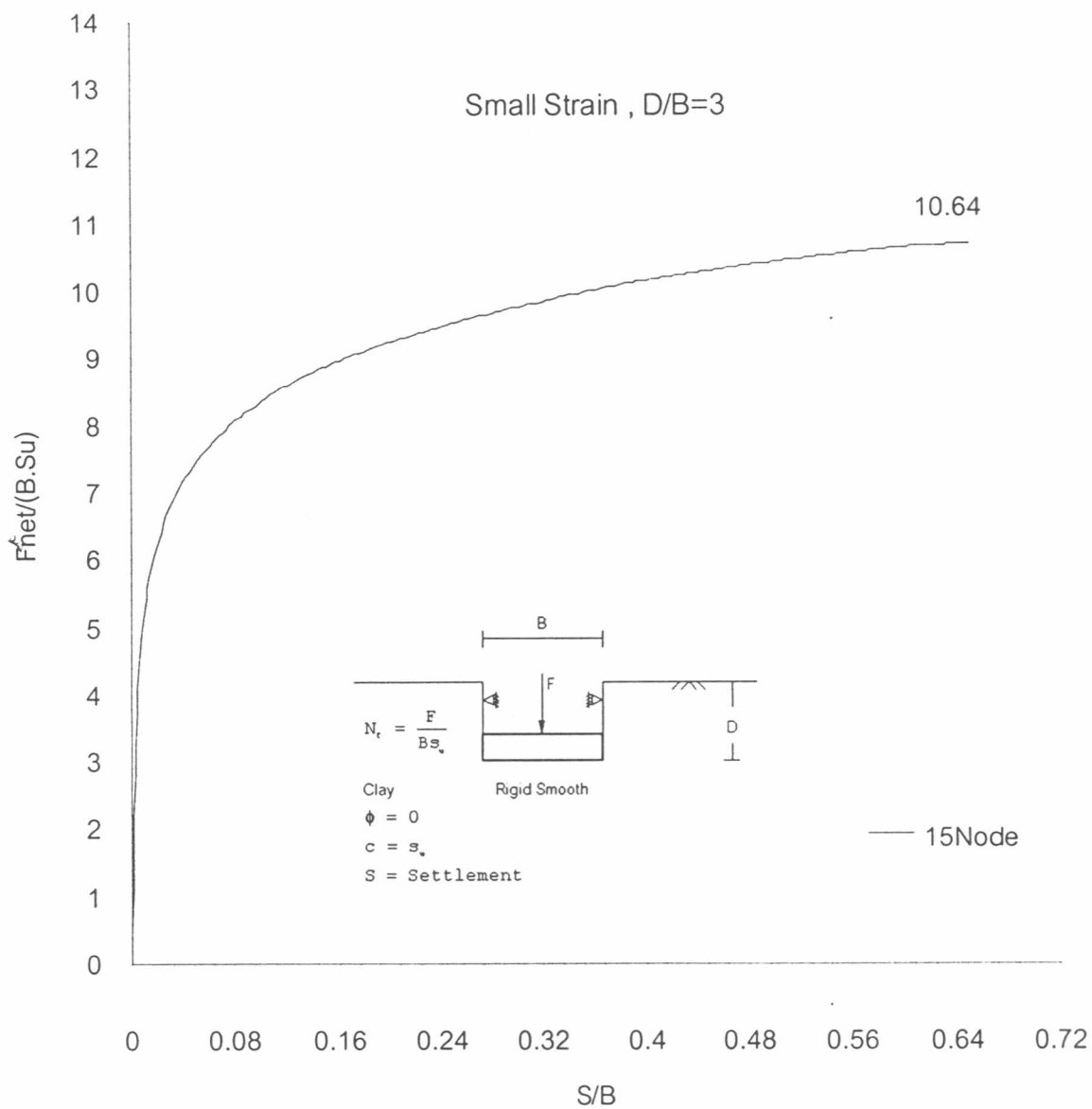
รูปที่ 4.20 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.5$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



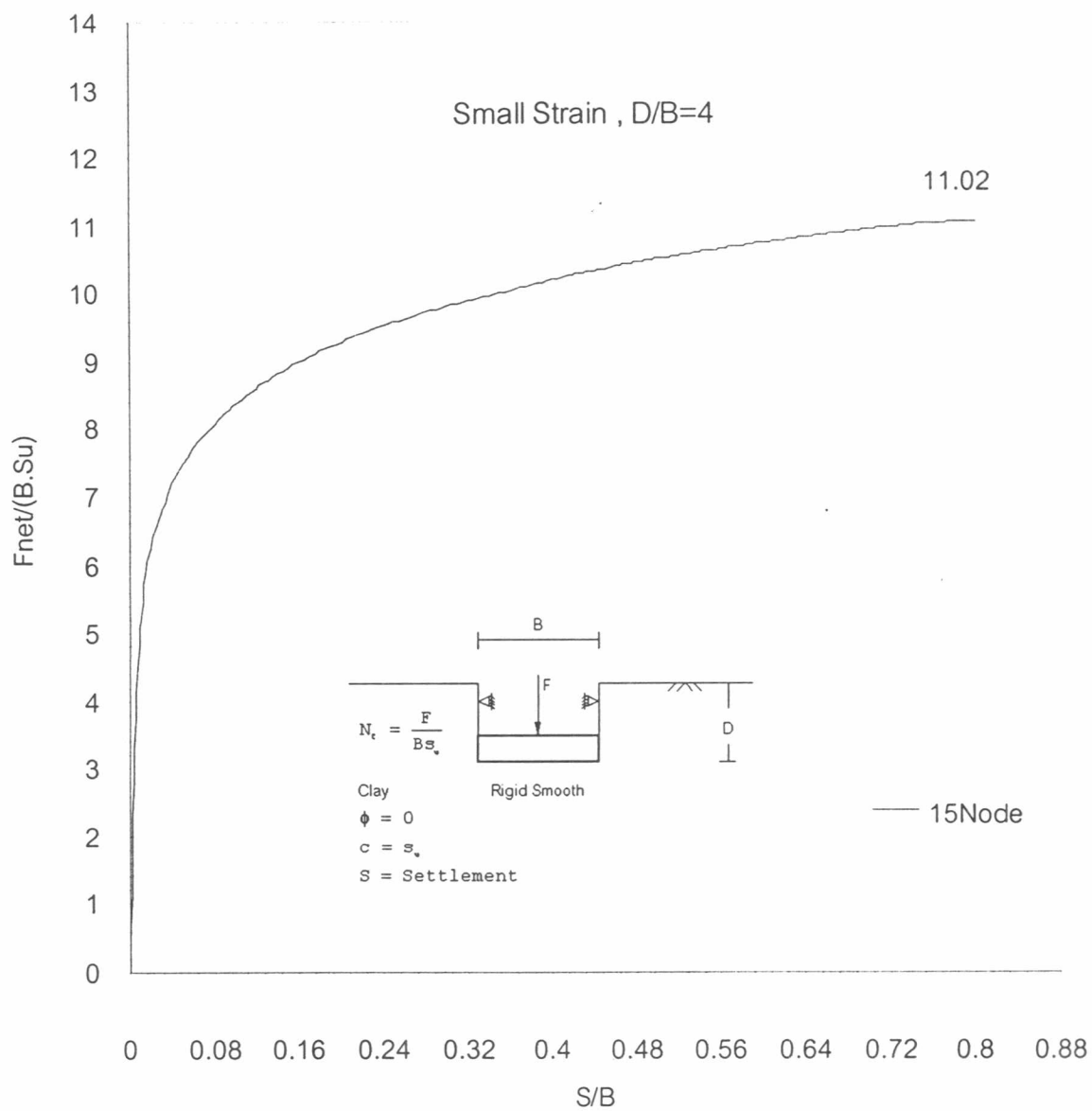
รูปที่ 4.21 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=1$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



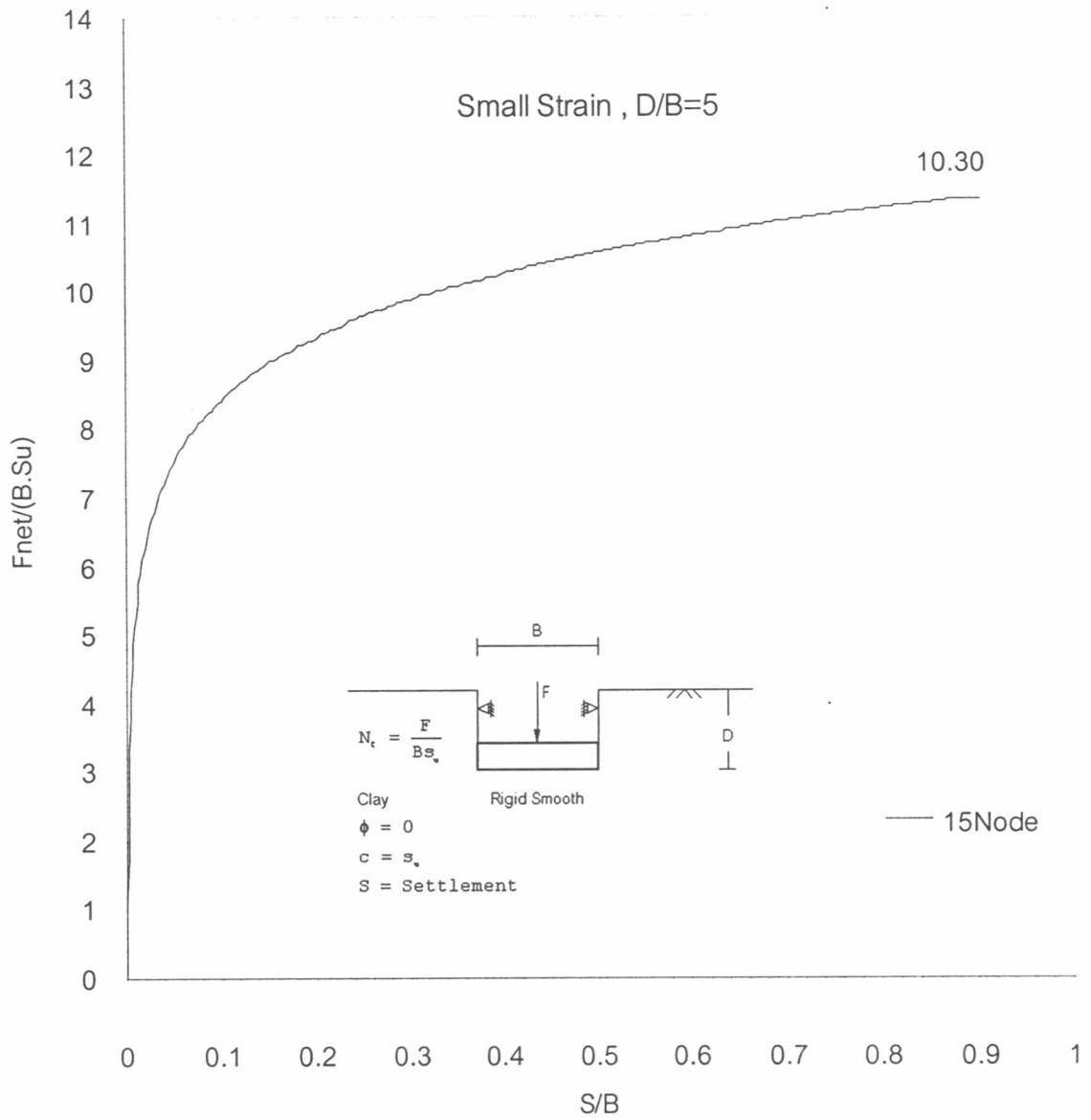
รูปที่ 4.22 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=2$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



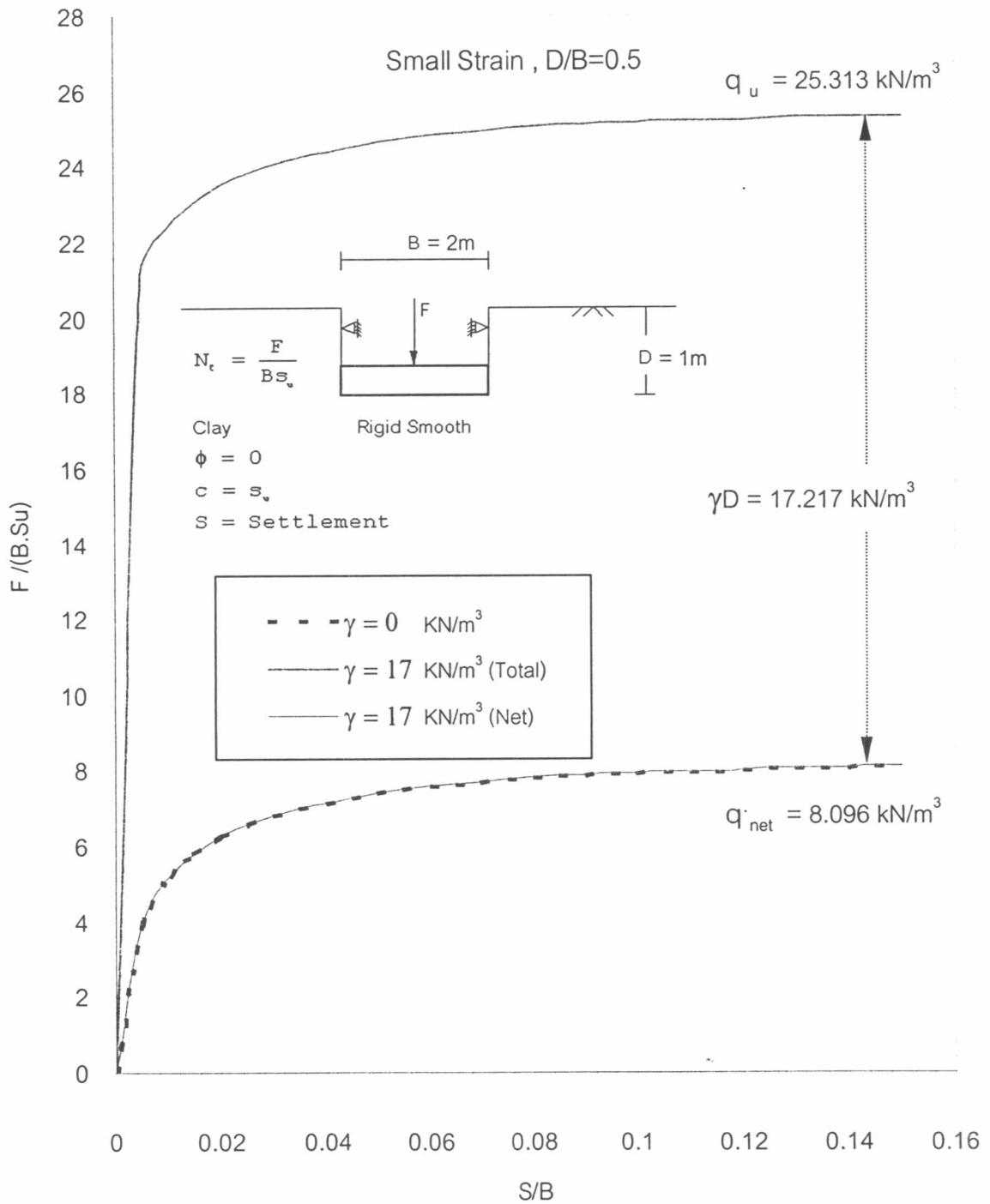
รูปที่ 4.23 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=3$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



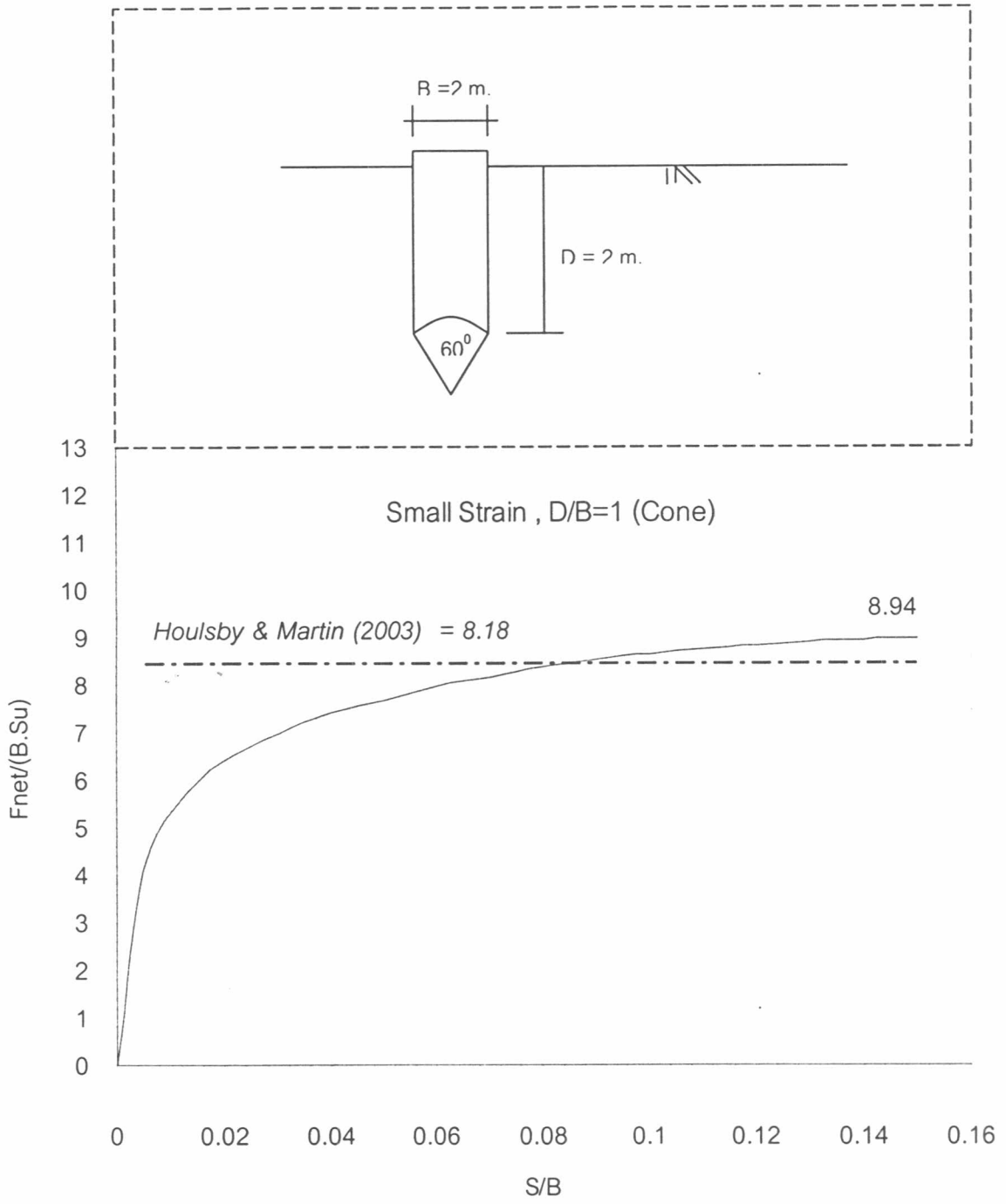
รูปที่ 4.24 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=4$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



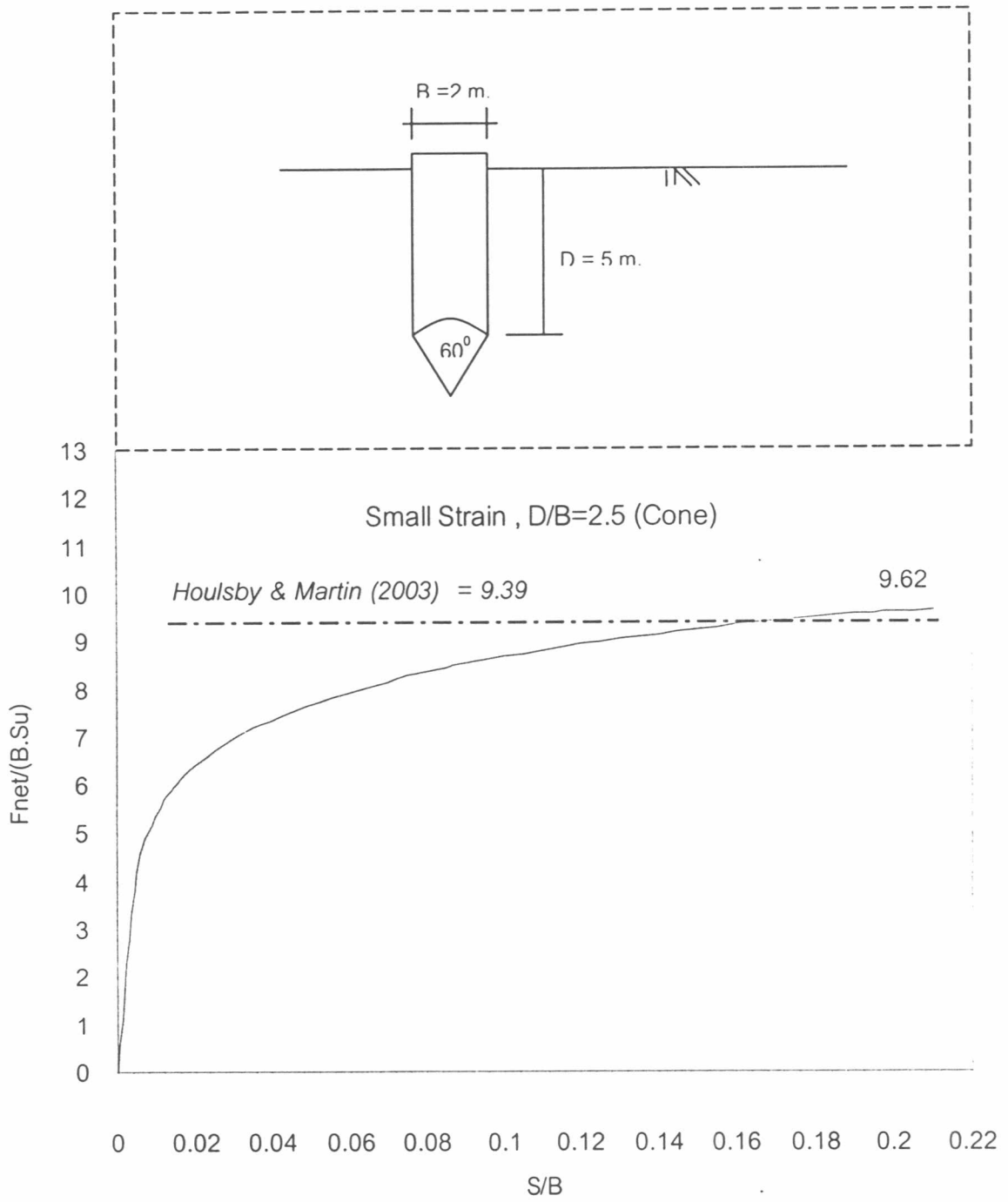
รูปที่ 4.25 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=5$ คำนวณโดยใช้โครงข่ายสามเหลี่ยม 15 จุดต่อ



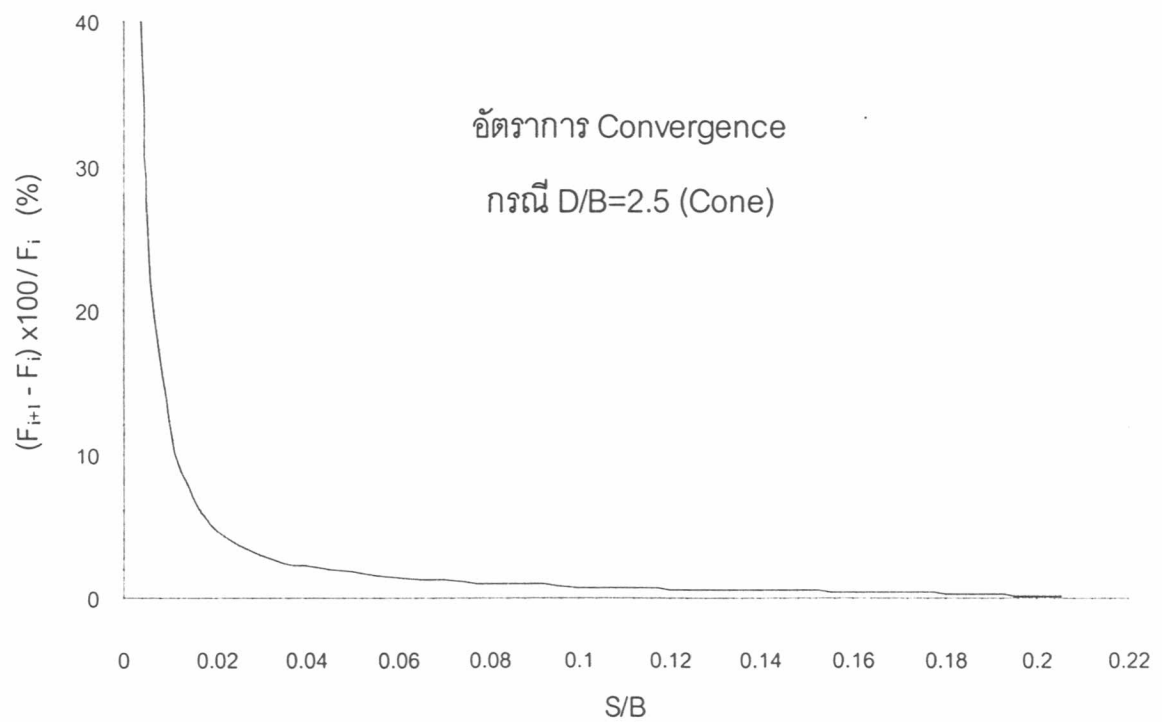
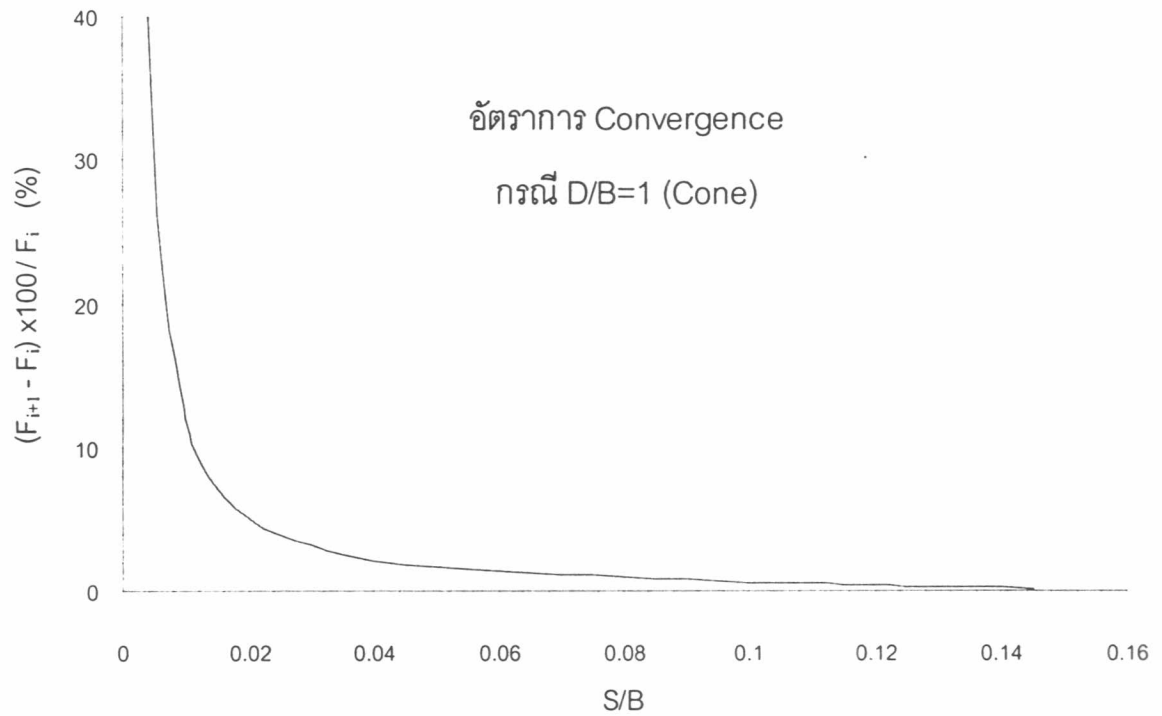
รูปที่ 4.26 ผลของ Unit Weight ที่มีต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานรากวงกลมกรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=0.5$ (15 Node)



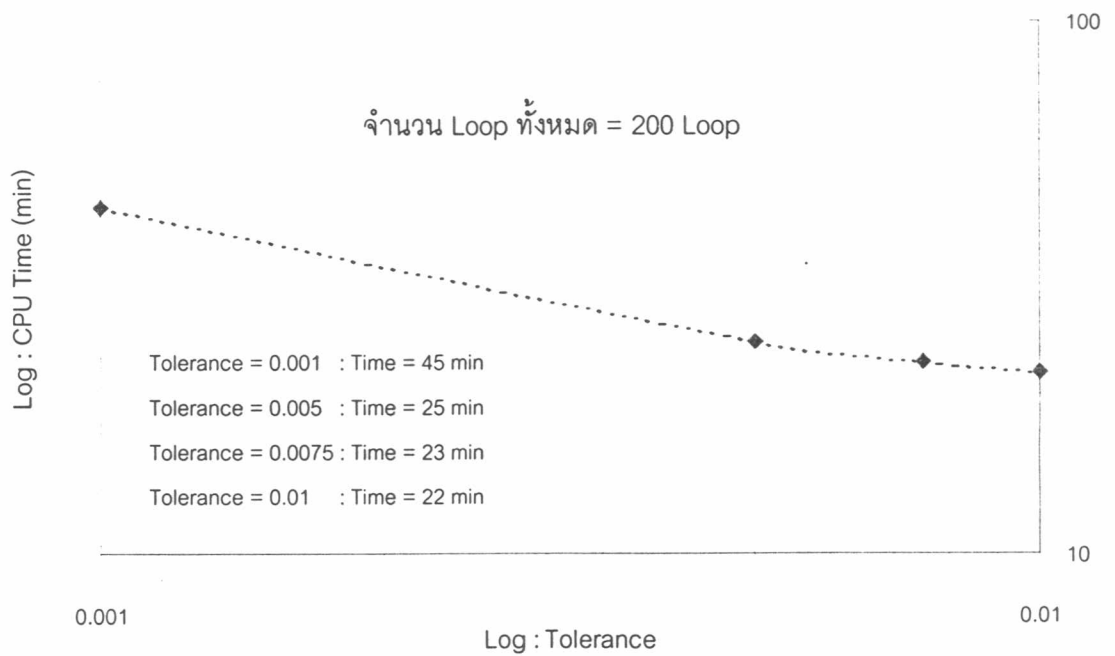
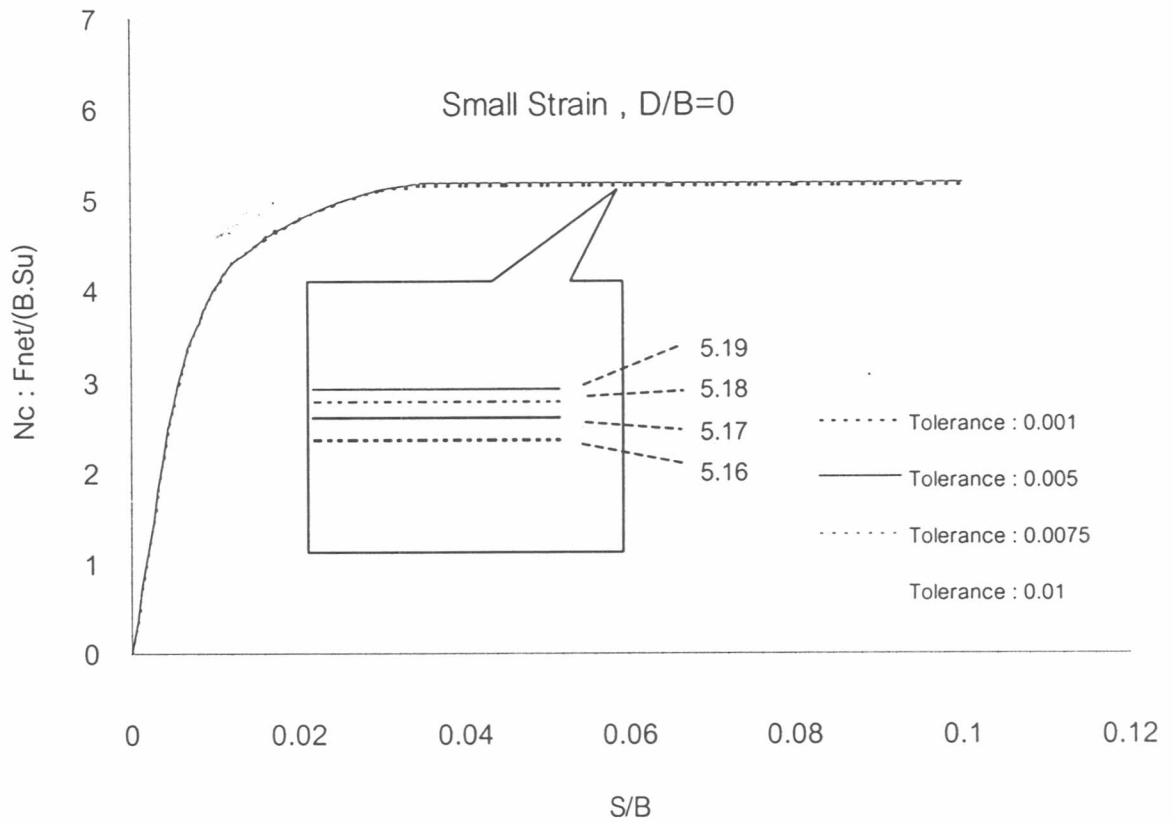
รูปที่ 4.27 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลมผิวหยาบปลายแหลม
กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=1$ (15 Node)



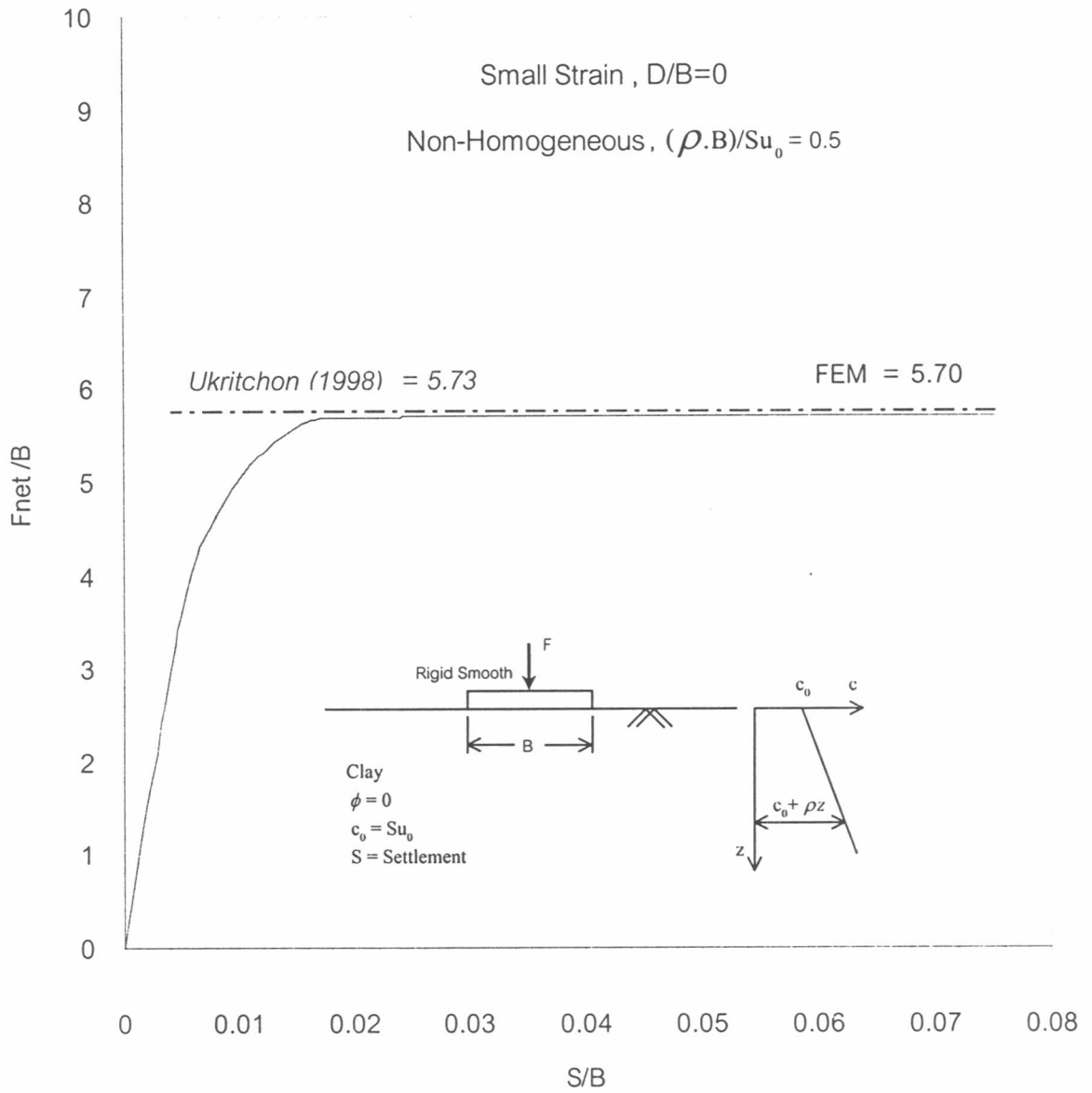
รูปที่ 4.28 Load-Settlement Curve ของฐานรากวงกลมผิวหยาบปลายแหลม
กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B=2.5$ (15 Node)



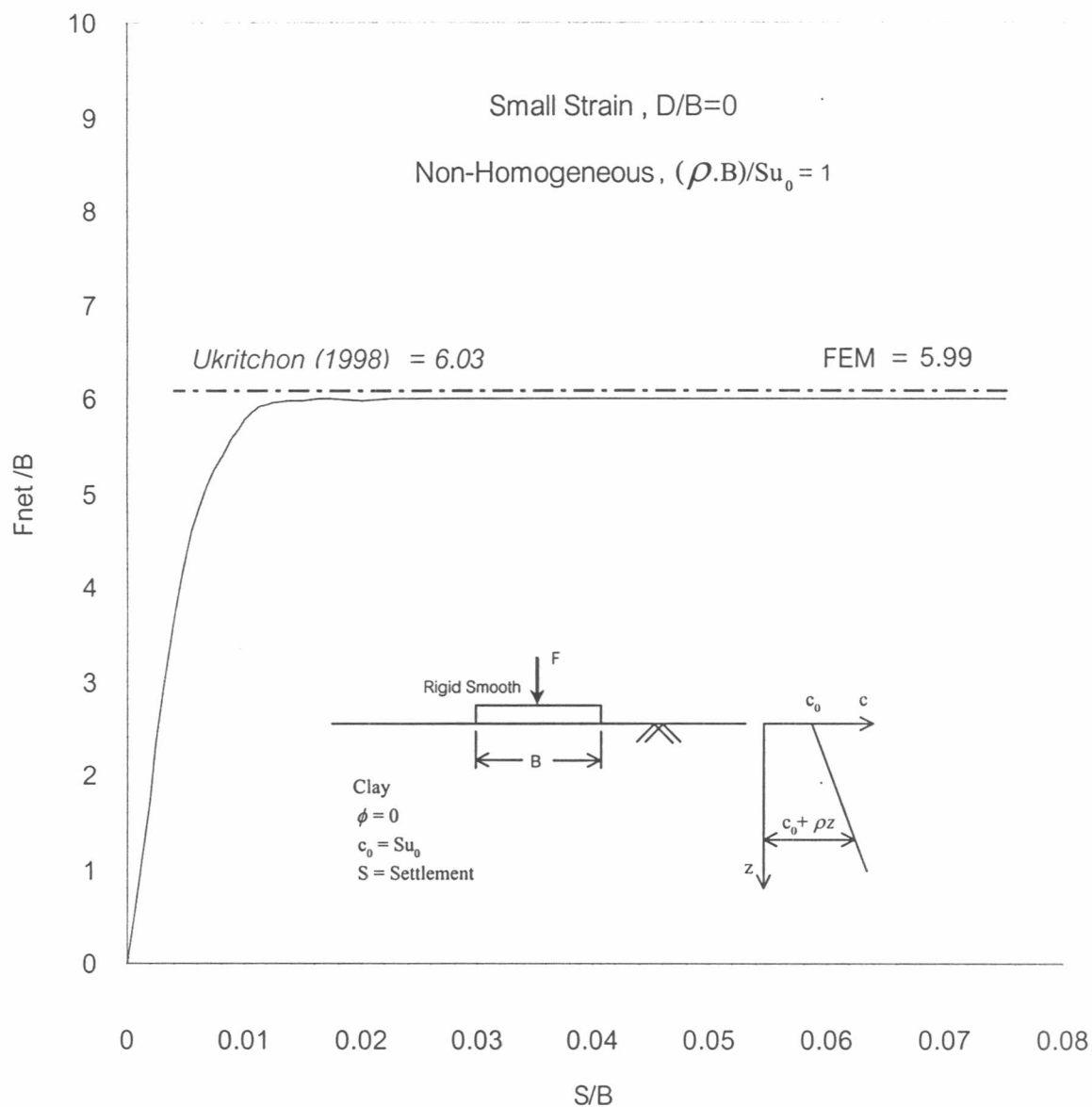
รูปที่ 4.29 อัตราการ Convergence ของ Load-Settlement Curve ของฐานราก
วงกลมผิวหยาบปลายแหลม กรณี Small Strain (SSC) ที่ $D/B = 1$ และ 2.5



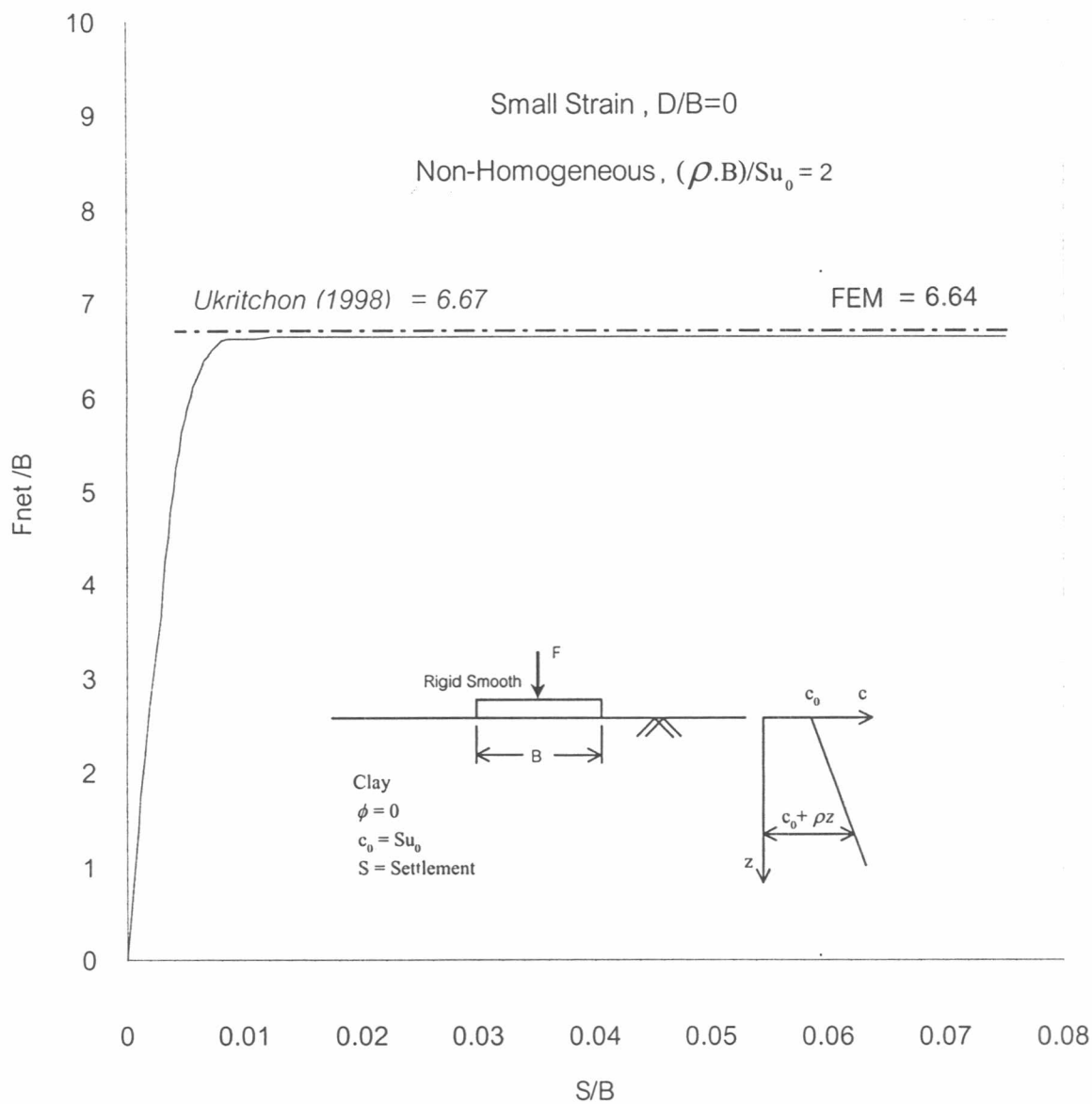
รูปที่ 4.30 ผลของค่า Tolerance ที่มีต่อค่า Bearing Capacity Factor, N_c และ เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Execution Time)



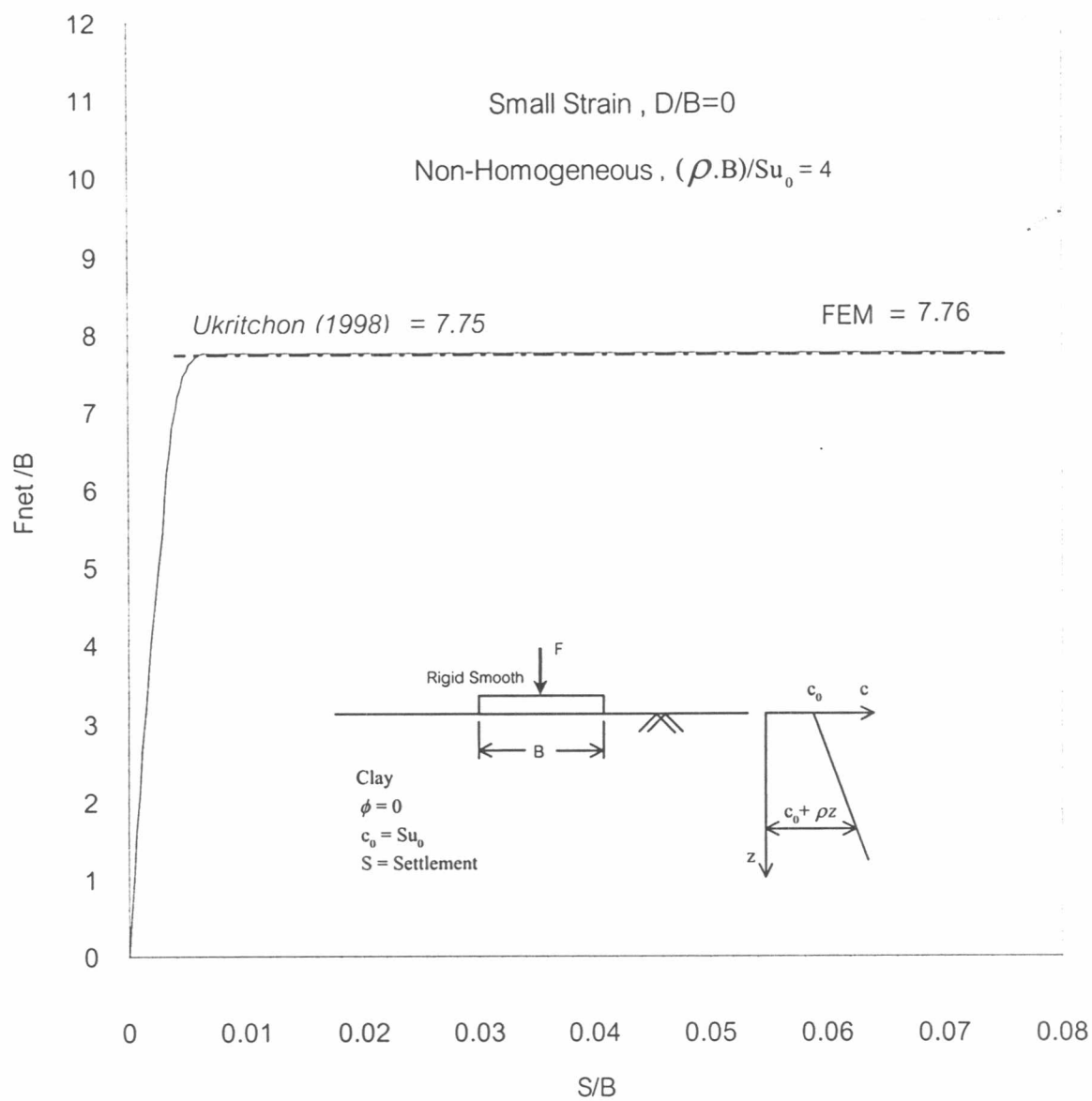
รูปที่ 4.31 Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื้อกรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหา Non-Homogeneous โดยมีค่า $(\rho \cdot B)/S_{u_0} = 0.5$



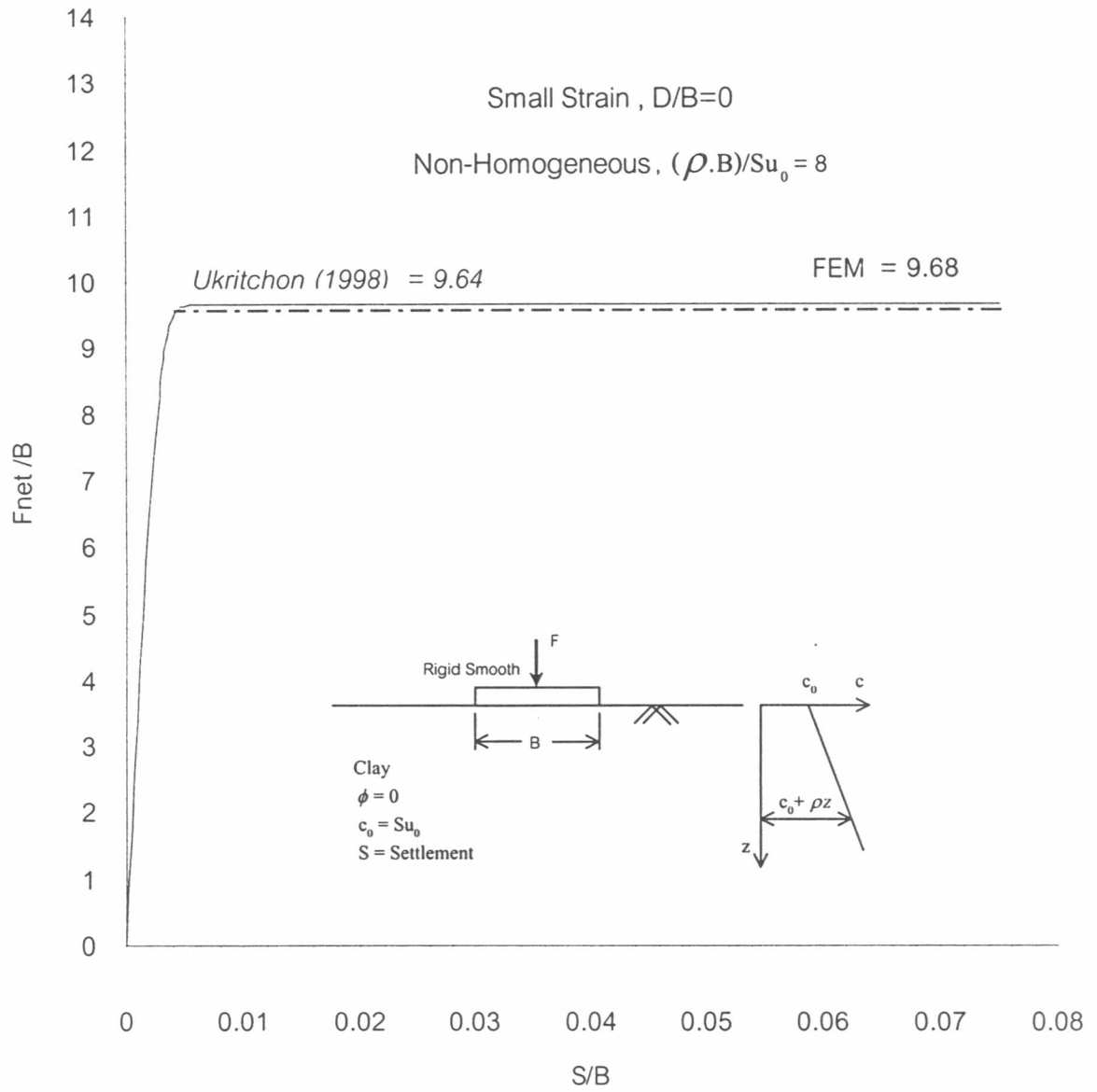
รูปที่ 4.32 Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื้อกรณี Small Strain (SSC)
สำหรับปัญหา Non-Homogeneous โดยมีค่า $(\rho \cdot B)/Su_0 = 1$



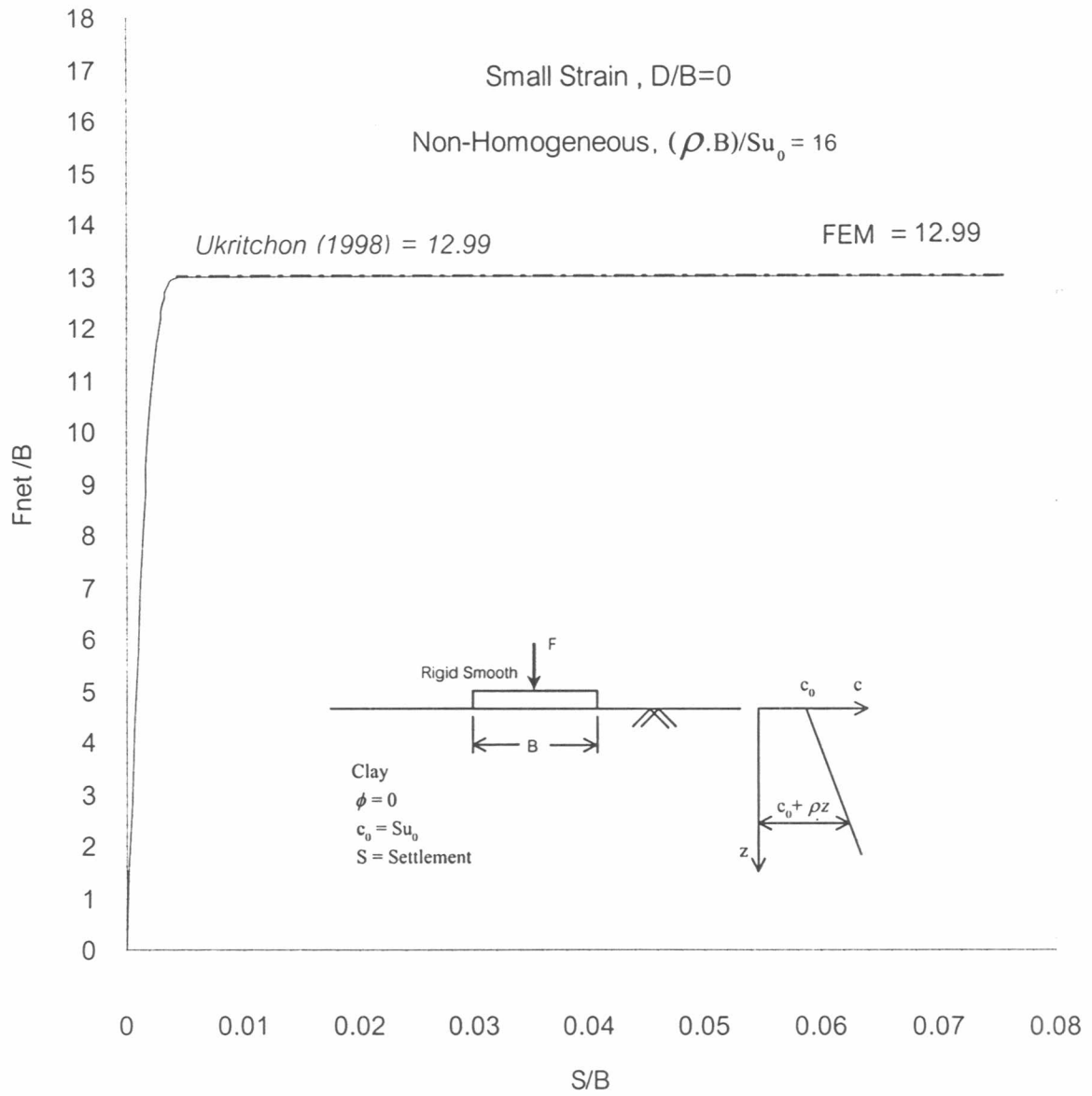
รูปที่ 4.33 Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื้อ กรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหา Non-Homogeneous โดยมีค่า $(\rho.B)/S_{u_0} = 2$



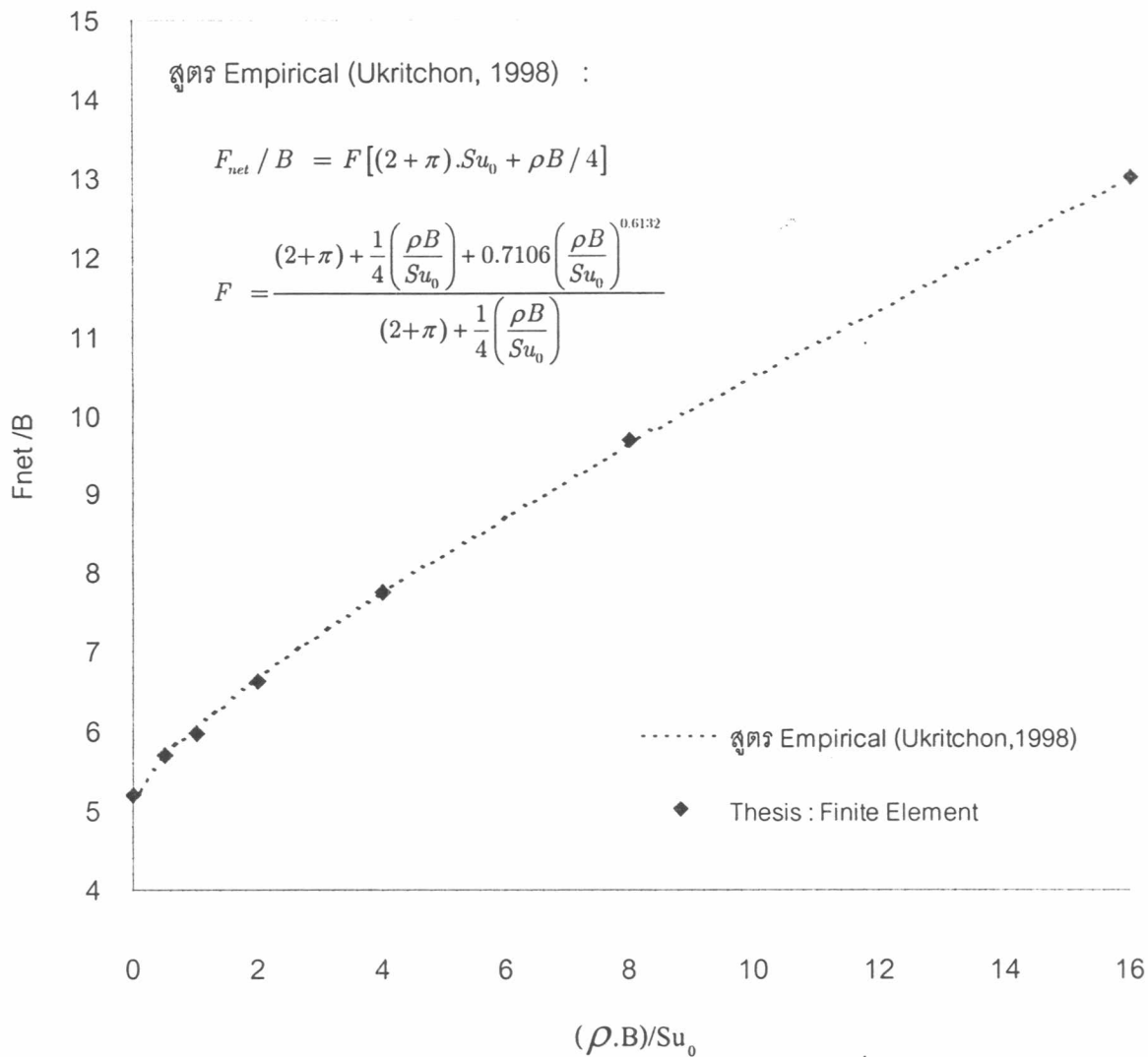
รูปที่ 4.34 Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื้อดิน กรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหา Non-Homogeneous โดยมีค่า $(\rho \cdot B)/Su_0 = 4$



รูปที่ 4.35 Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื้อ กรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหา Non-Homogeneous โดยมีค่า $(\rho \cdot B)/S_{u_0} = 8$



รูปที่ 4.36 Load-Settlement Curve ของฐานรากต่อเนื่อง กรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหา Non-Homogeneous โดยมีค่า $(\rho \cdot B)/S_{u_0} = 16$



รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบค่า F_{net} / B ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธี Empirical Method ของฐานรากต่อเนื่อง กรณี Small Strain (SSC) สำหรับปัญหา Non-Homogeneous