

การประยุกต์ใช้โครงข่ายใยประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ



นายอาชวี นิยมไทย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4520-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR ANALYZING PILE CAPACITY IN
BANGKOK SUBSOILS



Mr. Arch Niyomthai

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4520-6

อาชวี นิยมไทย : การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนัก
เสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ (AN APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR
ANALYZING PILE CAPACITY IN BANGKOK SUBSOILS) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.
บุญชัย อุกฤษฏาชน, 211 หน้า. ISBN : 974-17-4520-6

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์
หากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ และปริมณฑล

การวิจัยใช้ข้อมูลเสาเข็มทั้งเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะจำนวน 282 ตัวอย่าง โดยรวบรวมจาก
วิทยานิพนธ์และผลการทดสอบเสาเข็มจากบริษัทวิศวกรที่ปรึกษา ในระหว่าง พ.ศ. 2535-2545 มีข้อมูล
เสาเข็มตอก 173 ตัวอย่างและข้อมูลเสาเข็มเจาะ 109 ตัวอย่าง โดยใช้ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของ
เสาเข็มจากผลการทดสอบ ซึ่งหาได้จากการทดสอบถึงจุดวิบัติหรือหาจากวิธีของ Mazurkiewicz ข้อมูล
ทั้งหมดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนสำหรับสร้างแบบจำลอง ส่วนสำหรับทดสอบแบบจำลอง และส่วน
สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อนำมาสร้าง ทดสอบ และเปรียบเทียบกับสูตรการ
คำนวณเสาเข็มในสนามและวิธีการคำนวณทางสถิติที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย 2 แบบจำลองสำหรับเสาเข็มตอก และ 1 แบบจำลองสำหรับ
เสาเข็มเจาะ ตัวแปรด้านเข้าที่ใช้ในแบบจำลองมีจำนวน 8 ตัวแปรสำหรับเสาเข็มตอก และ 22 ตัวแปร
สำหรับเสาเข็มเจาะซึ่งถูกเลือกจาก ลักษณะของชั้นดิน ลักษณะของทางกายภาพของตัวเสาเข็ม และ
ปัจจัยจากวิธีการก่อสร้าง ในงานวิจัยพบว่า ความสามารถของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม
ขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นซ่อน จำนวนหน่วยประสาทในชั้นซ่อน จำนวนรอบการคำนวณ รูปแบบการเรียนรู้
(Back-Propagation, RPROP, Scaled Conjugate, Powell-Beale, Fletcher-Powell และ Polak-
Ribiere) และค่า α ใน activation function โดยมีแบบจำลองที่ดีที่สุดซึ่งเลือกจาก RMSE ที่ต่ำที่สุด คือ
จำนวนของชั้นซ่อน 2, จำนวนหน่วยประสาทในชั้นซ่อน 20, รอบการคำนวณ 2000 รอบ $\alpha=0.9$ สำหรับ
เสาเข็มตอก (MDP1) และจำนวนชั้นซ่อน 1 จำนวนหน่วยประสาทในชั้นซ่อน 20 รอบการคำนวณ 2000
รอบ $\alpha=1.0$ สำหรับเสาเข็มเจาะ (MBP1)

ผลการทดสอบการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักกับข้อมูลส่วนตรวจสอบความถูกต้องของ
แบบจำลองพบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำการวิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็วและ
แม่นยำ โดยให้ค่าผลการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่มีค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยต่ำกว่า
($R^2=0.78$ สำหรับเสาเข็มตอก $R^2=0.92$ สำหรับเสาเข็มเจาะ) ค่าที่ได้จากวิธีการคำนวณโดยใช้สูตรการ
ตอกเสาเข็ม ($R^2=0.24-0.64$) และการคำนวณแบบ static ของเสาเข็มเจาะ ($R^2=0.91$) ผลจากงานวิจัย
สรุปว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถใช้เป็นทางเลือกที่ดีกว่าในการวิเคราะห์กำลังรับ
น้ำหนักของเสาเข็ม โดยการนำไปใช้งานและค่าสัดส่วนความปลอดภัยขึ้นกับดุลพินิจของผู้ใช้งาน

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546.....

4470658021: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: PILE CAPACITY/ NEURAL NETWORK/ STATIC LOAD TEST

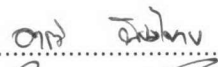
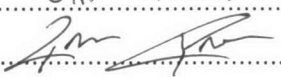
ARCH NIYOMTHAI : AN APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR ANALYZING PILE CAPACITY IN BANGKOK SUBSOILS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONCHAI UKRITCHON, Sc.D., 211 pp. ISBN:974-17-4520-6

The purpose of this thesis is an application of artificial neural network (ANN) for analyzing pile capacity in Bangkok subsoils for both driven piles and bored piles.

The thesis considered driven pile and bored pile database, totalling 282 records. The database were compiled from past theses and geotechnical consultant firms during the year 2535 to 2545. There were 173 records for driven piles and 109 for bored piles. The ultimate loads were obtained from reported static capacity or using Mazurkiewicz's method. The entire records were divided into 3 parts: 1) testing set, 2) training set, 3) validation set. The objectives are to train, test and evaluate the neural network and make comparisons with pile driven formula and static calculation method.

There were 2 neural network models for driven pile, 1 model for bored pile. The driven pile model had 8 inputs whereas bored pile model had 22 inputs. Model inputs were selected from geological conditions, pile geometry and construction factors. The sensitivity analyses found that the prediction capability of the ANN model was depended on number of hidden nodes, hidden layers, epochs, learning type of ANN models (Back-Propagation, RPROP, Scaled Conjugate, Powell-Beale, Fletcher-Powell and Polak-Ribiere) and α value used in activation function. The best ANN model was selected from the one giving the minimum RMSE value. Therefore, the best ANN consisted of 2 hidden layers, 20 hidden nodes in each layer and 2000 epochs $\alpha=0.9$ for driven pile model (MDP1), 1 hidden layer, 20 hidden nodes and 2000 epochs $\alpha=1.0$ for bored pile model (MBP1).

The results of ANN model with validation records showed that the model can predict the ultimate pile capacity very accurate and efficient. The results had average errors of pile capacity ($R^2=0.78$ for driven pile and $R^2=0.92$ for bored pile) much less than those of the driven pile formula ($R^2=0.24-0.64$) and those of static calculation method for bored pile ($R^2=0.91$). In conclusion, the artificial neural network provides a better and more accurate alternative for predicting ultimate pile capacity in practice. However, the design load should consider suitable factor of safety with careful engineering judgment.

Department Civil Engineering Student's signature..... 
Field of study Civil Engineering Advisor's signature..... 
Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ และเสียสละเวลาอันมีค่าจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน ที่กรุณาให้คำปรึกษาตรวจสอบ และแก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำ จนทำให้ผู้วิจัยทำความเข้าใจในวิทยานิพนธ์มากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ คุณณัฐมนต์ กัมปนานนท์ และเจ้าหน้าที่บริษัทเอสทีเอส เอ็นจิเนียริง คอนซัลแทนท์จำกัด, คุณชูเลิศ บริษัทอินเตอร์-คอนซัลท์จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการวิจัย และขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และบุคคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

และเนื่องจากงานวิจัยนี้ ส่วนหนึ่งได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้อำลัใจผู้วิจัย และสนับสนุนด้านการเงินจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 คำนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
แนวคิดและทฤษฎีของการหาค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม.....	4
2.1 การคาดคะเนความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม.....	4
2.2 วิธีสมมูลกลศาสตร์ (Static Method).....	4
2.2.1 เสาเข็มในชั้นดินเหนียว.....	6
2.2.2 เสาเข็มในชั้นดินทราย.....	10
2.3 วิธีทางพลศาสตร์ (Dynamic Method).....	15
2.3.1 ที่มาของสูตรการตอกเสาเข็ม.....	15
2.3.2 ที่มาโดยใช้หลักการของพลังงาน.....	17
2.3.3 สูตรการตอกเสาเข็ม.....	18
2.4 วิธีคาดคะเนจากผลการทดสอบ (Load test)	22
2.4.1 วิธีหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติจากการทดสอบ.....	22

บทที่	หน้า
2.5 วิธีใช้และผลการวิเคราะห์จาก CAPWAPC	32
บทที่ 3 แนวคิดและทฤษฎีของโครงข่ายใยประสาทเทียม	36
3.1 ระบบประสาทของสิ่งมีชีวิต.....	37
3.2 แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	37
3.3 ชนิดของแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	41
3.3.1 โครงสร้างแบบ feedforward.....	41
3.3.2 โครงสร้างแบบ recurrent.....	44
3.4 การเรียนรู้ของแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	46
3.4.1 การเรียนรู้แบบมีการควบคุม (supervised learning).....	47
3.4.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการควบคุม (unsupervised learning).....	47
3.5 กระบวนการเรียนรู้แบบเพอร์เซพตรอน.....	47
3.6 กระบวนการเรียนรู้แบบเกรเดียนต์เดสเซนต์ (Gradient descent learning).....	48
3.7 กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายความผิดพลาดย้อนกลับ.....	49
3.8 จำนวนของชั้นซ่อนในแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	54
3.9 จำนวนของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลอง.....	55
3.10 การสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เกินจริง.....	56
3.10.1 เพิ่มปริมาณข้อมูลที่นำมาใช้สร้างแบบจำลอง.....	56
3.10.2 จำกัดจำนวนชั้นซ่อนและหน่วยประสาทในชั้นซ่อน.....	57
3.10.3 จำกัดจำนวนรอบของการคำนวณ.....	57
บทที่ 4 วิธีการทดสอบและวิจัย.....	58
4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	58
4.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ.....	58
4.1.2 การรวบรวมข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม.....	59
4.1.3 สร้างฐานข้อมูลรายละเอียด และการทดสอบของเสาเข็ม.....	60
4.1.4 การแปลผลการทดสอบเสาเข็ม เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก เสาเข็ม.....	62

บทที่	หน้า
4.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	65
4.2.1 การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	65
4.2.2 สร้างแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	70
4.2.3 ทดสอบแบบจำลอง.....	71
4.2.4 ผลกระทบต่อความแม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม..	72
4.2.5 ผลการทดสอบแบบจำลอง.....	72
ก) แบบจำลองสำหรับเส้าเข็มตอก.....	72
ข) แบบจำลองสำหรับเส้าเข็มเจาะ	96
บทที่ 5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	122
5.1 การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของเส้าเข็มด้วยแบบจำลอง โครงข่ายใยประสาทเทียม.....	122
5.1.1 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเส้าเข็มตอก.....	123
5.1.2 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักของเส้าเข็มเจาะ.....	123
5.2 วิเคราะห์ผลของแบบจำลองสำหรับเส้าเข็มตอก.....	124
5.2.1 การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักโดยใช้สูตรเส้าเข็มตอก.....	125
5.2.2 การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักโดยใช้แบบจำลอง โครงข่ายใยประสาทเทียม.....	128
5.2.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างแบบจำลอง โครงข่ายใยประสาทกับสูตรเส้าเข็มตอก.....	131
5.3 วิเคราะห์ผลของแบบจำลองสำหรับเส้าเข็มเจาะ.....	134
5.3.1 การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักสำหรับเส้าเข็มเจาะ โดยวิธีสมดุทธ์ทางกลศาสตร์.....	134
5.3.2 การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักโดยใช้แบบจำลอง โครงข่ายใยประสาทเทียม.....	135
5.3.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายใยประสาท กับวิธีกำลังรับน้ำหนักของเส้าเข็มแบบ static approach.....	138

บทที่	หน้า
5.4 แบบจำลองสำหรับเสาเข็มตอกโดยใช้ชั้นดิน.....	139
5.4.1 การวิเคราะห์หาค่าลึรับน้ำหนักโดยใช้แบบจำลองโครงข่าย ใยประสาทเทียม.....	161
5.4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างแบบจำลองโครงข่ายใยประสาท กับสูตรเสาเข็มตอก.....	162
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	163
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	163
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มต่อไปในอนาคต.....	164
6.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง.....	164
6.2.2 กระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลอง.....	165
รายการอ้างอิง.....	166
ภาคผนวก	169
ภาคผนวก ก.....	170
ภาคผนวก ข.....	176
ภาคผนวก ค.....	184
ภาคผนวก ง.....	192
ภาคผนวก จ.....	199
ภาคผนวก ฉ.....	201
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	211

สารบัญตาราง

๗

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 Adhesion factors สำหรับ bored piles ในชั้น Clay.....	8
ตารางที่ 2.2 ค่าออกแบบสำหรับ adhesion factor ในชั้น stiff cohesive soils.....	9
ตารางที่ 2.3 Coefficient of earth pressure (Ks) (Broms,1966).....	14
ตารางที่ 2.4 แสดงค่า CAPWAPC Variables (CAPWAPC Manual, 1993).....	33
ตารางที่ 4.1 แหล่งที่มาข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม.....	59
ตารางที่ 4.2 จำนวนเสาเข็มแต่ละชนิดที่ใช้ในการวิจัย.....	60
ตารางที่ 4.3 วิธีการทดสอบเสาเข็ม.....	60
ตารางที่ 4.4 ชนิดของเสาเข็มตอก.....	61
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลเสาเข็มตอก.....	61
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลเสาเข็มเจาะ.....	61
ตารางที่ 4.7 การแบ่งกลุ่มของข้อมูล.....	62
ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองเสาเข็มตอก.....	66
ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองเสาเข็มเจาะ.....	68
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับเสาเข็มตอก.....	82
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบกระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลองสำหรับเสาเข็มตอก.....	89
ตารางที่ 4.12 ปรับเปลี่ยนค่า α ของแอกติเวชันฟังก์ชันของแบบจำลองสำหรับเสาเข็มตอก....	96
ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับเสาเข็มเจาะ.....	106
ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบกระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลองสำหรับเสาเข็มตอก.....	110

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.15 ปรับเปลี่ยนค่า α ของแอกติเวชันฟังก์ชันของแบบจำลองสำหรับเสาชิมเจาะ....	119
ตารางที่ 4.16 แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุด.....	121
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบจากสูตรเสาชิมตอก.....	127
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาชิมตอก.....	129
ตารางที่ 5.3 ค่าถ่วงน้ำหนักของแบบจำลองสำหรับหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาชิมตอก.....	130
ตารางที่ 5.4 ความสำคัญของแต่ละตัวแปรของแบบจำลองเทียบเป็น (%).....	131
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาชิมตอก.....	131
ตารางที่ 5.6 งานวิจัยที่เกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้างใยประสาทเทียม.....	133
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาชิมเจาะด้วยแบบจำลอง.....	136
ตารางที่ 5.8 ค่าถ่วงน้ำหนักของแบบจำลองสำหรับหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาชิมเจาะ.....	137
ตารางที่ 5.9 ความสำคัญของแต่ละตัวแปรของแบบจำลองเทียบเป็น (%).....	137
ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาชิมเจาะ.....	138
ตารางที่ 5.11 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองเสาชิมตอก.....	140
ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับเสาชิมตอก.....	150
ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบกระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลองสำหรับเสาชิมตอก.....	154
ตารางที่ 5.14 ปรับเปลี่ยนค่า α ของแอกติเวชันฟังก์ชันของแบบจำลองสำหรับเสาชิมตอก...	160
ตารางที่ 5.15 ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาชิมตอก.....	162
ตารางที่ 5.16 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาชิมตอก.....	162
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลเสาชิมตอกที่ใช้ในงานวิจัย.....	171

ตาราง	หน้า
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเสาเข็มเจาะที่ใช้ในงานวิจัย.....	177
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลเสาเข็มตอกที่ใช้ในงานวิจัย.....	185
ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบหาค่าลึรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก.....	200
ตารางที่ จ.2 ผลการทดสอบหาค่าลึรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก กับข้อมูลทั้งหมด.....	200
ตารางที่ จ.3 ผลการทดสอบหาค่าลึรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะ.....	200
ตารางที่ จ.4 ผลการทดสอบหาค่าลึรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะ กับข้อมูลทั้งหมด.....	200
ตารางที่ ฉ.1 แบบจำลองสำหรับสร้าง load-settlement curve.....	202
ตารางที่ ฉ.2 สรุปค่า R^2 สำหรับแบบจำลองสร้างกราฟ load-settlement curve.....	203
ตารางที่ ฉ.3 แบบจำลองสำหรับสร้าง load-settlement curve.....	207
ตารางที่ ฉ.4 สรุปค่า R^2 สำหรับแบบจำลองสร้างกราฟ load-settlement curve.....	207

รูป

หน้า

รูปที่ 2.1 Adhesion factor สำหรับ sand และ gravel stiff to very stiff cohesive soils (Tomlinson, 1970).....	7
รูปที่ 2.2 Adhesion factor สำหรับ stiff to very stiff clay without overlying strata (Tomlinson, 1970).....	8
รูปที่ 2.3 ค่าของ Z_c/d และ $K_s \tan \phi'_a$ สำหรับเข็มในชั้นทราย (Poulos and Davis 1980).....	10
รูปที่ 2.4 Bearing capacity factor for circular deep foundation in sand.....	11
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_q และ ϕ°	12
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT N value กับ angle of shearing resistance.....	13
รูปที่ 2.7 Correction เนื่องจาก effective overburden pressure ที่มีต่อ SPT.....	13
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of earth pressure K_s และ angle of internal friction ϕ' (Meyerhof, 1976).....	14
รูปที่ 2.9 Davisson's method.....	23
รูปที่ 2.10 Chin's method.....	24
รูปที่ 2.11 De Beer's method.....	25
รูปที่ 2.12 Brinch Hansen 90% method.....	26
รูปที่ 2.13 Brinch Hansen 80% method.....	27
รูปที่ 2.14 Mazurkiewicz's method.....	28
รูปที่ 2.15 Fuller&Hoy's method และ Butler&Hoy's method.....	29

รูป	หน้า
รูปที่ 2.16 Van der Veen's method.....	30
รูปที่ 3.1 เซลล์ประสาทของสิ่งมีชีวิต.....	37
รูปที่ 3.2 เซลล์ประสาทเทียม.....	37
รูปที่ 3.3 Threshold หรือ Step function.....	39
รูปที่ 3.4 Liner function.....	39
รูปที่ 3.5 Sigmoid function.....	40
รูปที่ 3.6 Tangent sigmoid function.....	40
รูปที่ 3.7 Sigmoid function ในค่าความชัน (w) แตกต่างกัน.....	41
รูปที่ 3.8 Feedforward network (Multi-layer perceptron).....	42
รูปที่ 3.9 Learning vector quantization network.....	42
รูปที่ 3.10 CMAC module.....	43
รูปที่ 3.11 GMDH network.....	44
รูปที่ 3.12 Hopfield network.....	45
รูปที่ 3.13 Elman network.....	45
รูปที่ 3.14 Jordan network.....	46
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟของ Mazurkiewicz แบบเดิม.....	63
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟของวิธี Mazurkidwicz ที่ใช้โปรแกรมของ ว.ส.ท.....	63
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างภาพ static load test ที่ test จนถึงจุดวิบัติ.....	64
รูปที่ 4.4 ตัวแปรสำหรับแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	66

รูป	หน้า
รูปที่ 4.5 ตัวแปรสำหรับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับเสาเข็มตอก.....	67
รูปที่ 4.6 ตัวแปรสำหรับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับเสาเข็มเจาะ.....	69
รูปที่ 4.7 โครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับ วิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอก.....	71
รูปที่ 4.8 BP Tan-Sig (10-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	73
รูปที่ 4.9 BP Tan-Sig (20-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	73
รูปที่ 4.10 BP Tan-Sig (30-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	74
รูปที่ 4.11 BP Tan-Sig (10-10-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	74
รูปที่ 4.12 BP Tan-Sig (20-20-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	75
รูปที่ 4.13 BP Tan-Sig (30-30-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	75
รูปที่ 4.14 BP Tan-Sig (10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	76
รูปที่ 4.15 BP Tan-Sig (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	76
รูปที่ 4.16 BP Tan-Sig (30-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	77
รูปที่ 4.17 BP Tan-Sig (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	77
รูปที่ 4.18 BP Tan-Sig (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	78
รูปที่ 4.19 BP Tan-Sig (30-30-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing)	78

รูป	หน้า
รูปที่ 4.20 BP Tan-Sig (10-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	79
รูปที่ 4.21 BP Tan-Sig (20-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	79
รูปที่ 4.22 BP Tan-Sig (30-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	80
รูปที่ 4.23 BP Tan-Sig (10-10-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	80
รูปที่ 4.24 BP Tan-Sig (20-20-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	81
รูปที่ 4.25 BP Tan-Sig (30-30-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing)	81
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง RMSE กับรอบของการคำนวณใน กลุ่มชุดข้อมูลสร้างแบบจำลอง.....	83
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง RMSE กับรอบของการคำนวณใน กลุ่มชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลอง.....	83
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง RMSE กับจำนวนหน่วยประสาทใน กลุ่มชุดข้อมูลสร้างแบบจำลอง.....	84
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง RMSE กับจำนวนหน่วยประสาทในกลุ่มชุดข้อมูลทดสอบ แบบจำลอง.....	85
รูปที่ 4.30 BP Tan-Sig (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	86
รูปที่ 4.31 RPROP (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	87
รูปที่ 4.32 Powell-Beale Conjugate (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing)..	87
รูปที่ 4.33 Fletcher-Powell Conjugate (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	88

รูป	หน้า
รูปที่ 4.34 Polak-Ribiere Conjugate (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	88
รูปที่ 4.35 Scaled Conjugate Gradient (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	89
รูปที่ 4.36 Tansig $\alpha = 0.10$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	91
รูปที่ 4.37 Tansig $\alpha = 0.25$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	91
รูปที่ 4.38 Tansig $\alpha = 0.50$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	92
รูปที่ 4.39 Tansig $\alpha = 0.75$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	92
รูปที่ 4.40 Tansig $\alpha = 0.90$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	93
รูปที่ 4.41 Tansig $\alpha = 1.00$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	93
รูปที่ 4.42 Tansig $\alpha = 2.00$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	94
รูปที่ 4.43 Tansig $\alpha = 3.00$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	94
รูปที่ 4.44 Tansig $\alpha = 4.00$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	95
รูปที่ 4.45 Tansig $\alpha = 10.00$ (20–20–1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	95
รูปที่ 4.46 BP Tansig (10–1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	97
รูปที่ 4.47 BP Tansig (20–1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	97
รูปที่ 4.48 BP Tansig (30–1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	98
รูปที่ 4.49 BP Tansig (10-10–1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	98

รูป	หน้า
รูปที่ 4.50 BP Tansig (20-20-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	99
รูปที่ 4.51 BP Tansig (30-30-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	99
รูปที่ 4.52 BP Tansig (10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	100
รูปที่ 4.53 BP Tansig (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	100
รูปที่ 4.54 BP Tansig (30-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	101
รูปที่ 4.55 BP Tansig (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	101
รูปที่ 4.56 BP Tansig (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	102
รูปที่ 4.57 BP Tansig (30-30-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	102
รูปที่ 4.58 BP Tansig (10-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	103
รูปที่ 4.59 BP Tansig (20-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	103
รูปที่ 4.60 BP Tansig (30-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	104
รูปที่ 4.61 BP Tansig (10-10-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	104
รูปที่ 4.62 BP Tansig (20-20-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	105
รูปที่ 4.63 BP Tansig (30-30-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	105
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่าง RMSE กับรอบของการคำนวณในกลุ่ม	
ชุดข้อมูลสร้างแบบจำลอง.....	107
รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่าง RMSE กับรอบของการคำนวณในกลุ่ม	
ชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลอง.....	107

รูป	หน้า
รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่าง RMSE กับจำนวนหน่วยประสาทในกลุ่ม	
ชุดข้อมูลสร้างแบบจำลอง.....	108
รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่าง RMSE กับจำนวนหน่วยประสาทในกลุ่ม	
ชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลอง.....	109
รูปที่ 4.68 BP Tansig (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	110
รูปที่ 4.69 RPROP (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	111
รูปที่ 4.70 Powell-Beale Conjugate (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	111
รูปที่ 4.71 Fletcher-Powell Conjugate (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing)....	112
รูปที่ 4.72 Polak-Ribiere Conjugate (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	112
รูปที่ 4.73 Scaled Conjugate Gradient (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing)..	113
รูปที่ 4.74 BP Tansig a=0.10 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	114
รูปที่ 4.75 BP Tansig a=0.25 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	114
รูปที่ 4.76 BP Tansig a=0.50 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	115
รูปที่ 4.77 BP Tansig a=0.75 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	115
รูปที่ 4.78 BP Tansig a=0.90 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	116
รูปที่ 4.79 BP Tansig a=1.00 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	116
รูปที่ 4.80 BP Tansig a=2.00 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	117
รูปที่ 4.81 BP Tansig a=3.00 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	117
รูปที่ 4.82 BP Tansig a=4.00 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	118

รูป	หน้า
รูปที่ 4.83 BP Tansig a=10.00 (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	118
รูปที่ 5.1 ผลทดสอบ static load test กับ Engineering news formula.....	126
รูปที่ 5.2 ผลทดสอบ static load test กับ Janbu's formula.....	126
รูปที่ 5.3 ผลทดสอบ static load test กับ Hiley's formula.....	127
รูปที่ 5.4 ผลทดสอบ static load test กับ ANN (20-20) ที่ 2000 รอบการคำนวณ กับข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็ม 93 ต้น.....	128
รูปที่ 5.5 ผลทดสอบ static load test กับ ANN (20-20) ที่ 2000 รอบการคำนวณ กับข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็ม 67 ต้น.....	129
รูปที่ 5.6 ผลทดสอบ static load test กับวิธีคำนวณแบบ static calculation.....	135
รูปที่ 5.7 ผลทดสอบ static load test กับ ANN (20) รอบการคำนวณที่ 2000 รอบ กับข้อมูลเสาเข็มจำนวน 47 ต้น.....	136
รูปที่ 5.8 ตัวแปรสำหรับแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียมสำหรับเสาเข็มตอก.....	139
รูปที่ 5.9 BP Tansig (10-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	141
รูปที่ 5.10 BP Tansig (20-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	141
รูปที่ 5.11 BP Tansig (30-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	142
รูปที่ 5.12 BP Tansig (10-10-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	142
รูปที่ 5.13 BP Tansig (20-20-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	143
รูปที่ 5.14 BP Tansig (30-30-1) Epoch = 1000 (Training) และ (Testing).....	143

รูป	หน้า
รูปที่ 5.15 BP Tansig (10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	144
รูปที่ 5.16 BP Tansig (20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	144
รูปที่ 5.17 BP Tansig (30-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	145
รูปที่ 5.18 BP Tansig (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	145
รูปที่ 5.19 BP Tansig (20-20-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	146
รูปที่ 5.20 BP Tansig (30-30-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	146
รูปที่ 5.21 BP Tansig (10-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	147
รูปที่ 5.22 BP Tansig (20-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	147
รูปที่ 5.23 BP Tansig (30-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	148
รูปที่ 5.24 BP Tansig (10-10-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	148
รูปที่ 5.25 BP Tansig (20-20-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	149
รูปที่ 5.26 BP Tansig (30-30-1) Epoch = 3000 (Training) และ (Testing).....	149
รูปที่ 5.27 BP Tan-Sig (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	151
รูปที่ 5.28 RPROP (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	151
รูปที่ 5.29 Powell-Beale Conjugate (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).	152
รูปที่ 5.30 Fletcher-Powell Conjugate (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	152
รูปที่ 5.31 Polak-Ribiere Conjugate (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing)	153

รูป	หน้า
รูปที่ 5.32 Scaled Conjugate Gradient (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	153
รูปที่ 5.33 Tansig $\alpha = 0.10$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	155
รูปที่ 5.34 Tansig $\alpha = 0.25$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	155
รูปที่ 5.35 Tansig $\alpha = 0.50$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	156
รูปที่ 5.36 Tansig $\alpha = 0.75$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	156
รูปที่ 5.37 Tansig $\alpha = 0.90$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	157
รูปที่ 5.38 Tansig $\alpha = 1.00$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	157
รูปที่ 5.39 Tansig $\alpha = 2.00$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	158
รูปที่ 5.40 Tansig $\alpha = 3.00$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	158
รูปที่ 5.41 Tansig $\alpha = 5.00$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	159
รูปที่ 5.42 Tansig $\alpha = 10.00$ (10-10-1) Epoch = 2000 (Training) และ (Testing).....	159
รูปที่ 5.43 ผลทดสอบ static load test กับ ANN (10-10) ที่ 2000 รอบการคำนวณ กับข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็ม 67 ต้น.....	161
รูปที่ ง.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB v6.1.....	196
รูปที่ ง.2 ข้อมูลตัวแปรด้านเข้าของแบบจำลอง กรอกข้อมูลโดยใช้ MATLAB.....	196
รูปที่ ง.3 ตัวโปรแกรมแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทที่เขียนจาก MATLAB.....	197
รูปที่ ง.4 ขณะทำการสร้างแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	197

รูป	หน้า
รูปที่ ง.5 ทดสอบแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม.....	198
รูปที่ ฉ.1 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile1.....	203
รูปที่ ฉ.2 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile2.....	204
รูปที่ ฉ.3 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile3.....	204
รูปที่ ฉ.4 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile4.....	205
รูปที่ ฉ.5 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile5.....	205
รูปที่ ฉ.6 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile6.....	206
รูปที่ ฉ.7 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile1.....	208
รูปที่ ฉ.8 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile2.....	208
รูปที่ ฉ.9 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile3.....	209
รูปที่ ฉ.10 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile4.....	209
รูปที่ ฉ.11 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile5.....	210
รูปที่ ฉ.12 load-settlement curve สร้างจาก ANN ของ Pile6.....	210