การประมาณค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานด้วยดัชนีสมบัติของดินที่มีความเชื่อมแน่น

Estimation of Standard Penetration Number with Index Properties of Cohesive Soil

ฐิติศักดิ์ ชัชวาล[1] อัศนัย ทาเภา[1] อภิชิต คำภาหล้า[2,*] ภานุมาส เรื่องทิพย์[2] โกมิลย์ ชัยรัตนงามเดช[3] และ อนุกูล อ่างบุญตา[4]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จ.ขอนแก่น

[2] สถาบันระบบรางแห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

[3] บริษัท เอ็ม เอ เอ คอนซัลแตนท์ จำกัด จ.กรุงเทพมหานคร

[4] สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 4 (เพชรบุรี) กรมทางหลวงชนบท จ.เพชรบุรี

**Corresponding author; E-mail address: apichit.ku@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบตอกทะลุทะลวงมาตรฐาน ซึ่งเป็นการทดสอบหนึ่งในการเจาะสำรวจชั้นดินทางวิศวกรรม ค่าตัวเลขทะลุทะลงมาตรฐานสามารถนำไปแบ่งประเภทของชั้นดินตามความแข็งหรืออ่อน และ แน่นหรือหลวม สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นและดินไม่มีความเชื่อมแน่น ตามลำดับ ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานสามารถแปลงเป็นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ กำลังรับแรงแบกทานของชั้นดิน หรือ ค่าการทรุดตัว ของฐานรากได้อย่างคร่าว ๆ บทความนี้ นำเสนอการประมาณค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานของดินที่มีความเชื่อมแน่นด้วยดัชนีสมบัติ โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์ และ วิธีทางสถิติ ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานมีความสัมพันธ์กับดัชนีสมบัติอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากการศึกษาสามารถประมาณค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานจากดัชนีสมบัติของดินได้อย่างแม่นยำ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.996

คำสำคัญ: ตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน, ดัชนีสมบัติ, การเจาะสำรวจชั้นดินทางวิศวกรรม, ความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์, การถดถอยเชิงเส้นพุหุคูณ

Abstract

The standard penetration number is obtained from the standard penetration test, which is one of the soil engineering investigations. The standard penetration number can be used to classify soil according to soft or hard and loose or dense for cohesive and cohesionless soil, respectively. In addition, it can approximately represent the undrained shear strength, bearing capacity, and settlement of the foundations. This article presents the estimations of the standard penetration number of cohesive soil with standard properties, using empirical relationships and statistical methods. The results show that the standard penetration number has a statistically significant relationship with basic soil properties. Also, this study can successfully and precisely estimate the standard penetration number with an R-squared of 0.996

Keywords: Number standard penetration, Index properties, Soil engineering investigations, Empirical relationship, Multiple regression analysis

1. บทนำ

ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (Number Standard Penetration, N_{SPT}) ได้จากการทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) เป็นค่าที่สามารถรู้ความแข็ง อ่อน ของชั้นดินได้ทันที อีกทั้งยังสามารถแปลงเป็นค่ากำลังของดิน โดยความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์ (Empirical relationship) สำหรับนำไปใช้ออกแบบฐานราก เช่น ความสัมพันธ์ระหว่าง กับกำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำของดินเหนียว [1] ความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่าง N_{SPT} กับดัชนีความข้นเหลว (CI), กำลังอัดแกนเดียว (q_u) [2], ความสัมพันธ์ระหว่าง N_{SPT} กับโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำ, ความสัมพันธ์ระหว่าง N_{SPT} กับโมดูลัสแบบระบายน้ำ [3] ความสัมพันธ์ระหว่าง N_{SPT} กับค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวเชิงปริมาตร [4] และความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_{SPT} กับมุมเสียดทานภายในของดิน(Angle of internal friction) [5] เป็นต้น นอกจากนี้ มีหลายความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์ ที่สามรถคำนวณหาได้จากค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (Number Standard Penetration, N_{SPT}) เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดด้านข้างของดิน [6] และการประมาณกำลังรับแรงแบกทาน [5,7] เป็นต้น

ในงานก่อสร้างที่มีปริมาณมาก เช่น งานถนน หรืองานทางรถไฟ จำเป็นต้องมีการเจาะสำรวจเป็นจำนวนมาก ตลอดเส้นทางการก่อสร้าง ทำให้การเก็บข้อมูลคุณสมบัติของดินในแต่ละหลุม อย่างละเอียดตลอดความลึก เป็นไปได้ยาก บางครั้ง เพื่อความรวดเร็วในการเจาะสำรวจ จึงใช้วิธีทำ

การทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐานเมื่อเปลี่ยนลักษณะของชั้นดิน แทนการทดสอบทุกระยะ 1.0-1.5 เมตร ในขณะที่สามารถเก็บตัวอย่างดินแปรสภาพได้ตลอดความลึกของการเจาะสำรวจ ดังนั้น หากทำการประมาณค่าในความลึกที่ไม่ได้ทำการทดสอบ ด้วยพารามิเตอร์พื้นฐาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการประมาณค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานด้วยดัชนีสมบัติ(Index properties of soil) ได้แก่ หน่วยน้ำหนัก (Unit weight, γ) ความชื้นหรือปริมาณน้ำในมวลดิน (Water Content, w) ขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, LL) ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) ดัชนีพลาสติก (Plastic Index, PI) ดัชนีความข้นเหลว (Consistency Index, CI) เป็นต้น ผลจากการวิจัยนี้ จะทำให้สามารถประมาณค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานได้จากพารามิเตอร์พื้นฐานที่สามารถหาได้จากการทดสอบในตัวอย่างแปรสภาพ ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินแบบแปรสภาพตลอดความลึก

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเจาะสำรวจชั้นดิน

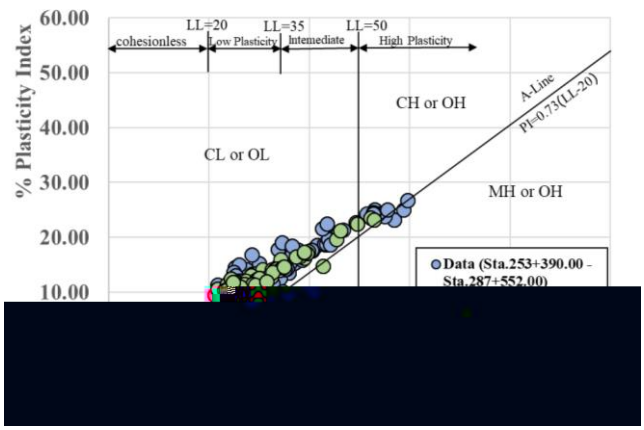
การศึกษาใช้ผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (boring log) จากโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน ระยะที่สอง ช่วงจังหวัดนครราชสีมา – หนองคาย ตั้งแต่ Sta 253+030 – Sta 326+052 เป็นระยะทางทั้งหมด 73.022 กิโลเมตร จำนวน 200 หลุมเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนที่โครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน ระยะที่สอง ช่วงจังหวัดนครราชสีมา – หนองคาย [8]

2.2 ประเภทของดิน

การจำแนกประเภทของดินตัวอย่างตลอดระยะทางหลุมเจาะและตลอดช่วงความลึกจะถูกจำแนกตามระบบ USCS โดยพบว่าดินตัวอย่างมีค่าขีดจำกัดเหลวอยู่ประมาณ 20 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำไปจำแนกโดยแผนภูมิ Casagrande จำแนกได้เป็นดินเหนียวบวมตัวต่ำ (CL) และดินเหนียวบวมตัวสูง (CH) (อยู่บนเส้น A-Line) นอกจากนี้ ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) ที่มีค่ามากกว่า 20 ยังเป็นตัวบ่งบอกว่าเป็นดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) ดังแสดงในรูปที่ 2

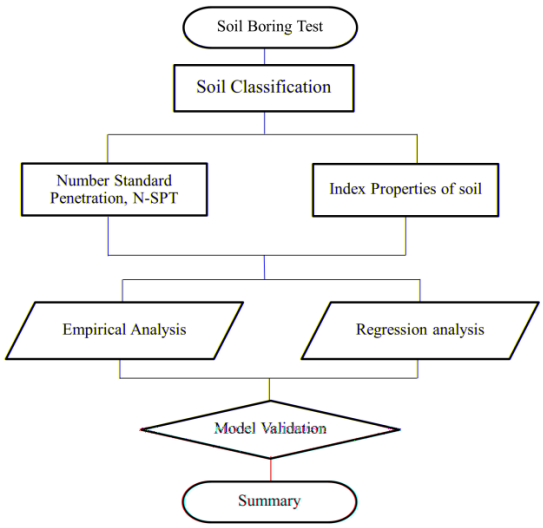


รูปที่ 2 แสดงผลการจำแนกดินด้วยแผนภูมิ Casagrande

2.3 การประมาณค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน

ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (N_{SPT}) ประมาณได้ด้วย 2 วิธี ได้แก่ 1. การประมาณค่าเชิงประสบการณ์ (Empirical estimation) และ 2. การวิเคราะห์ด้วยสมการการถดถอย (Regression for statistic estimation)

การสร้างสมการเชิงประสบการณ์และสมการการถดถอยของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน ประมาณได้จากข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของดินในช่วง Sta 253+930.00 ถึง Sta 287+552.00 จำนวน 266 ข้อมูล และใช้ข้อมูลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการในช่วง Sta 289+152.00 ถึง Sta 345+475.00 จำนวน 123 ข้อมูล และขั้นตอนวิธีการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 Flow Chart For N-SPT

2.4 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพุหุคูณ (Multiple regression analysis)

Multiple regression analysis (MLR) เป็นวิธีทางสถิติวิธีหนึ่ง โดยการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable) กับตัวแปรตาม (Dependent Variable) ตามสมการเชิงเส้นในข้อมูลที่สังเกตได้ โมเดล MLR คือ

$$y_i = b_0 + b_1(x_{i,1}) + b_2(x_{i,2}) + ... + b_k(x_{i,k}) + e_i \quad (1)$$

เมื่อ y_i คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable), $x_{i,1}$ คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable), b_k คือ the vector of regression coefficients, e_i คือ ความคลาดเคลื่อนจากการสุ่ม และ b_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย

2.5 การวัดประสิทธิภาพด้วยวิธีทางสถิติ (Performance Evaluation)

สมการที่ได้จากการวิเคราะห์ จะถูกนำมาวัดประสิทธิภาพด้วยวิธีทางสถิติ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2), ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) พารามิเตอร์เหล่านี้คำนวณได้ดังสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 4 ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(t_i - td_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(t_i - t)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(t_i - td_i)^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}\left[\left|\frac{t_i - td_i}{t_i}\right|\right]\right)x100 \quad (4)$$

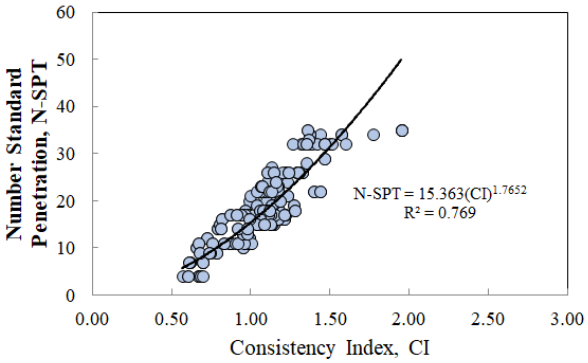
เมื่อ t_i คือ ผลการทดสอบค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (experimental), td_i คือ ผลการทำนายค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน (predicted), N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด, t คือ ค่าเฉลี่ยผลของการทำนาย (predicted) และ SD คือ ค่า standard deviation

3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานและค่าดัชนีความข้นเหลว (Consistency index) จากรูปพบว่า ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานมีค่าเพิ่มขึ้นตาม Consistency index ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเป็นส้นโค้ง ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานและค่า Consistency index สามารถประมาณได้จากสมการยกกำลัง มีค่าความแม่นยำ R^2 เท่ากับ 0.769 ดังแสดงในสมการที่ 5

$$N_{SPT} = 15.363(CI)^{1.765} \quad (5)$$

เมื่อ N_{SPT} คือ ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน และ CI คือ ดัชนีความข้นเหลว

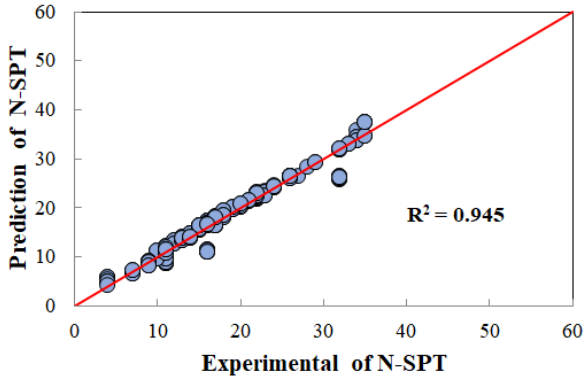


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-SPT และ CI

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า prediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ด้วยวิธีถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression analysis) จากรูปพบว่า ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับกับตัวแปรตามได้แก่ ขีดจำกัดเหลว, ขีดจำกัดพลาสติก, ปริมาณน้ำธรรมชาติ และหน่วยน้ำหนัก โดยสามารถอธิบายได้จากค่า P-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่าความแม่นยำ R^2 เท่ากับ 0.945 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรตามมีนัยสำคัญทางสถิติกับตัวแปรอิสระ [9-10] ดังแสดงในสมการที่ 6 ค่าทางสถิติแสดงในตารางที่ 1

$$N_{SPT} = 5.958(\gamma) + 0.371(PL) - 0.123(LL) - 0.200(w_n) - 97.003 \quad (6)$$

เมื่อ N_{SPT} คือ ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน, LL คือ ขีดจำกัดเหลว, PL คือ ขีดจำกัดพลาสติก, w_n คือ ปริมาณน้ำธรรมชาติ และ γ คือ หน่วยน้ำหนักหนัก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า prediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ด้วยวิธีถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression analysis)

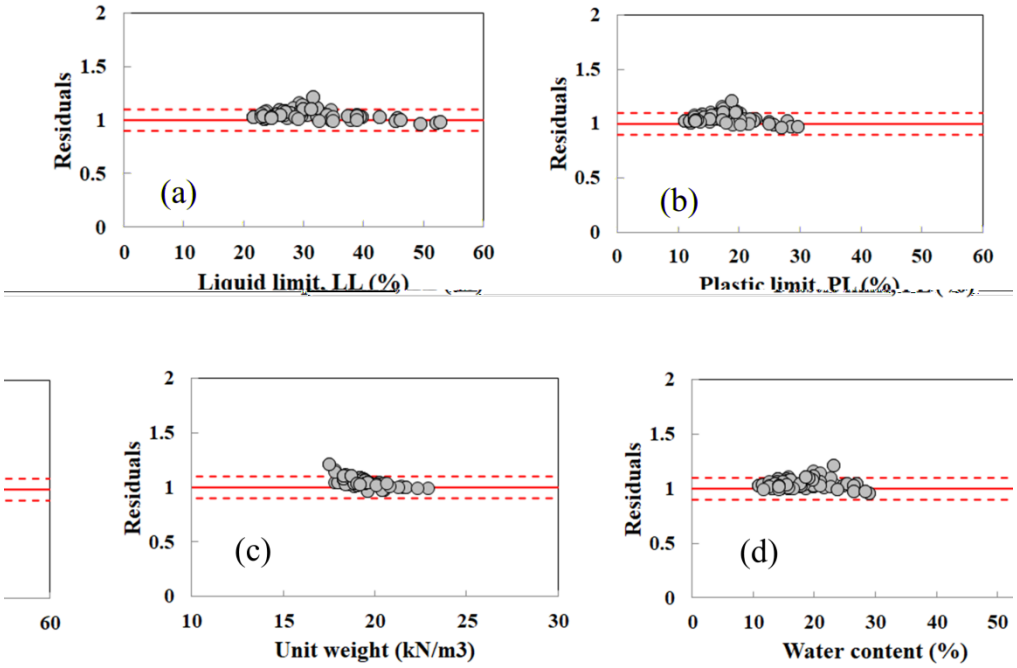
ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานทางสถิติด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพุหุคูณ

No	β_i	ตัวแปร	Unit	T-statistic	P-value< 0.05

1	-97.003	ค่าคงที่	-	-31.024	$1.53x10^{-89}$
2	-0.123	LL	%	-3.026	0.0027
3	0.371	PL	%	4.380	$1.72x10^{-5}$
4	-0.200	w_n	%	-4.815	$2.50x10^{-6}$
5	5.958	γ	kN/m^3	37.039	$6.50x10^{-106}$

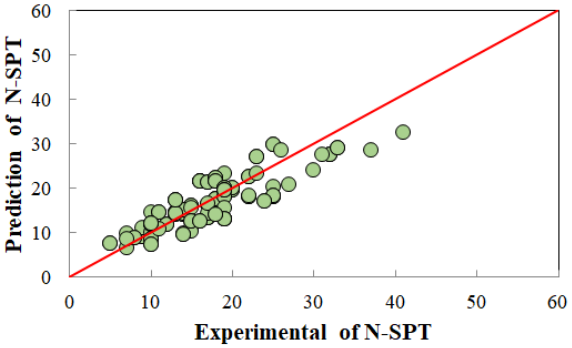
R^2=0.945, *Adj.* R^2= 0.944, F- statistic = 1131.83

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Residuals N_{predic}/N_{exp} และ (a) Liquid limit, (b) Plastic limit, (c) ค่า Unit weight และ (d) Water content จากรูปพบว่า เส้นแนวโน้มสำหรับชุดข้อมูลแต่ละชุดมีค่าเข้าใกล้ 1 โดยค่าสัดส่วนค่าทะลุทะลวงมาตรฐานจากสมการที่นำเสนอกับค่าทะลุทะลวงมาตรฐานจากการตรวจสอบ N_{predic}/N_{exp} มีค่า Percentile อยู่ที่ร้อยละ 10 นั่นหมายความว่า ค่า N_{predic}/N_{exp} มีมากกว่า 1 อยู่ร้อยละ 90 ทำให้สมการที่นำเสนอมีความใกล้เคียงกับค่าทดสอบและมีความปลอดภัยในการใช้งาน

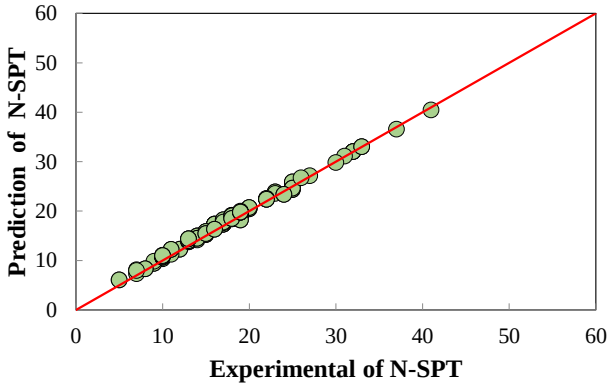


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Residuals N_{predic}/N_{exp} และ (a) Liquid limit, (b) Plastic limit, (c) ค่า Unit weight และ (d) Water content

รูปที่ 7(a) และ 7(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าprediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ของ Empirical estimation (7a) และ MLR (7b) จากรูปพบว่า สมการที่นำเสนอด้วยโมเดล MLR (สมการที่ 3) มีค่าตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานใกล้เคียงกับค่าที่นำมาตรวจสอบมากกว่าสมการเชิงประสบการณ์ (Empirical estimation) โดยโมเดล MLR มีค่าความแม่นยำ R^2 เท่ากับ 0.996 มากว่าสมการเชิงประสบการณ์ (R^2 เท่ากับ 0.723) จากลักษณะดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่า ดัชนีสมบัติของดิน (ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และปริมาณน้ำธรรมชาติ) เป็นเพียงพารามิเตอร์หนึ่งในการประมาณค่าทะลุทะลวงมาตรฐาน เพื่อให้สมการมีความถูกต้องแม่นยำควรใช้หน่วยน้ำหนักมาวิเคราะห์ร่วมกับดัชนีสมบัติของดิน โดยค่าทางสถิติระหว่างค่าการทำนายและค่าการตรวจสอบของ N-SPT แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 7(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าprediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ด้วยวิธีเชิงประสบการณ์



รูปที่ 7(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าprediction of N-SPT และ ค่า Experimental of N-SPT ด้วยโมเดล MLR

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ทางสถิติระหว่างค่าการทำนายและค่าการทดสอบของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐาน

Model	R-Squared	RMSE	MAPE
Empirical Equation	0.723	9.19	0.039
Regression analysis	0.996	5.89	0.025

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการประมาณค่าของตัวเลขทะลุทะลวงมาตรฐานด้วยดัชนีสมบัติของดินที่มีความเชื่อมแน่น สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ค่าทะลุทะลวงมาตรฐานสามารถประมาณได้จากดัชนีสมบัติของดิน เช่น ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก ปริมาณน้ำธรรมชาติ และหน่วยน้ำหนัก

2. การวิเคราะห์สมการการถดถอย (MLR) มีค่าทางสถิติแม่นยำกว่าสมการเชิงประสบการณ์

3. สมการที่นำเสนอสามารถนำไปประมาณค่าทะลุทะลวงมาตรฐานของดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) ที่มีค่า LL อยู่ระหว่าง 20 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และสถาบันระบบรางแห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Terzaghi, K. (1955). Evaluation of Coeffcients of Subgrade Re action, Géotechnique, Vol. 5, No. 4, pp. 297-326

[2] SZECHY, K., and VARGA, L. (1978). Foundation Engineering—Soil Exploration and Spread Foundation, Akademiai Kiado, Budapest, Hungary.

[3] Stroud, M.A. and Butler, F.G. (1975). The standard penetration test and the engineering properties of glacial materials, Conf. on theengineering behaviour of glacial materials, Univ. of Birmingham, pp. 124-135. U.K.

[4] Salgado, R. (2007). The Engineering of Foundation, MCGraw-Hill

[5] Meyerhof, G.G., 1956. Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.82, No. SM1, pp. 1-19.

[6] Terzaghi, K. (1955). Evaluation of Coeffcients of Subgrade Re action, *Géotechnique, Vol. 5, No. 4,* pp. 297-326

[7] Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H.,(1974). Foundation Engineering, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, NY.

[8] การรถไฟแห่งประเทศไทย. (2563). เอกสารข้อเท็จจริงโครงการ (Fact Sheet). เอกสารเบื้องต้นของโครงการ, หน้า 1-7

[9] Abrouguia, R., Gabsib, K., Mercatorisc, B., Khemisa, C., Amamia, R. and Chehaibia, S. (2019). Prediction of organic potato yield using tillage systems and soil properties artificial neural network (ANN) and multiple linear regressions (MLR). Soil & Tillage Research, 190, pp. 202–208

[10] Kottegoda, N. T & Rosso, R. (2008). Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers, Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1-405-17917-1