

การศึกษาปรากฏการณ์ดินเหลวที่เกิดจากแผ่นดินไหวในจังหวัดเชียงราย พ.ศ.2557 A Study of Soil Liquefaction Caused by the 2014 Earthquake in Chiang Rai Province

เศรษฐพงศ์ เศรษฐบุปผา^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

E-mail address: sethapongs@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ดินเหลวที่มีสาเหตุจากแผ่นดินไหวขนาด 6.3 ในจังหวัดเชียงรายเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 โดยการสำรวจชั้นดินด้วยการเจาะทะลวงแบบมาตรฐานและการเจาะทะลวงแบบคุนเซลสแตป และเก็บตัวอย่างดินไปทดสอบในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมธรณีเทคนิค และวิเคราะห์ศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลวที่บริเวณต่างๆ เหล่านั้น ซึ่งพบว่าทุกจุดที่เกิดสภาวะดินเหลวจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังกล่าวนั้นมีองค์ประกอบหลัก 3 ประการ ได้แก่ 1) เป็นดินที่มีเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นทราย (Sandy soils) ที่อยู่ในสภาพค่อนข้างหลวมมาก หรือหากผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่าร้อยละ 35 จะเป็นดินที่มีดัชนีพลาสติกต่ำ (Low-plasticity silts or clays) ที่มีความชื้นในดินประมาณร้อยละ 90 หรือมากกว่า ของค่าดัชนีพลาสติก 2) ทุกจุดที่เกิดสภาวะดินเหลวจะมีระดับน้ำใต้ดินสูงกว่าชั้นดินดังกล่าวในข้อแรก และ 3) สามารถประเมินได้ว่าชั้นดินที่เกิดสภาวะดินเหลวเหล่านั้นได้ด้วยความเร่งสูงสุดของพื้นดิน 0.20g-0.25g

คำสำคัญ: แผ่นดินไหว, สภาวะดินเหลว, ศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว

Abstract

This article presents results from a study of liquefaction induced by the 6.3 magnitude earthquake occurred in Chiang Rai Province on May 5th, 2014 by conduction subsoil investigation using standard penetration test and Kunzelstab penetration, soil sample, and analysis of liquefaction potential at those investigated spots. The analysis reveals that all the points liquefied by that earthquake event consisted of 3 main factors which are 1) composed of loose sandy soil with grain size distribution of less than 35% passing sieve no. 200 or low-plasticity silts or clays with moisture content of 90% or more of the soils' liquidity index, 2) groundwater table at all those liquefied point was above the soil layers indicated in 1), and 3)

peak ground acceleration of 0.20g-0.25g was sufficient to find that those liquefied ground were liquefiable.

Keywords: Earthquake, Liquefaction, Liquefaction potential

1. บทนำ

การเกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.3 ที่จังหวัดเชียงรายเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 นั้น ได้สร้างความตระหนักถึงภัยจากแผ่นดินไหวเป็นอย่างมากในประเทศไทย มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและก่อสร้างอาคารและสิ่งก่อสร้างต่างๆ เพื่อป้องกันหรือลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้จากแผ่นดินไหว ถึงแม้ว่าเหตุการณ์ดังกล่าวจะผ่านไปแล้วเป็นเวลา 8 ปี แต่ก็ยังมีประเด็นต่างๆ ให้ศึกษาอีกมากมาย และบางประเด็นก็ยังไม่มีการศึกษามากนักเท่าที่ควร การเกิดสภาวะดินเหลว (Soil liquefaction) เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นทั่วไปในเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังกล่าว ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถือว่าการเปลี่ยนแปลงใหม่สำหรับวงการวิศวกรรมโยธาในประเทศไทยเนื่องจากต้องมีแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่รุนแรงมากพอ ซึ่งโดยทั่วไปนั้นเป็นที่ทราบกันดีในผู้ที่สนใจเรื่องนี้ว่าการเกิดสภาวะดินเหลวจะพบได้เมื่อมีแผ่นดินไหวที่มีขนาดประมาณ 5.5 ขึ้นไป และสามารถพบการเกิดสภาวะดินเหลวได้ในรัศมีที่จำกัดตามขนาดของแผ่นดินไหวด้วยเท่านั้น ถึงแม้ว่าจะไม่เคยมีรายงานว่าการเกิดสภาวะดินเหลวทำให้เกิดอันตรายจนถึงแก่ชีวิต แต่ก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงแก่บ้านเรือน สิ่งปลูกสร้างตลอดจนทรัพย์สินต่างๆ ได้ ดังนั้นหากสามารถระบุได้ก่อนเกิดเหตุแผ่นดินไหวว่าพื้นที่หรือบริเวณใดที่อาจเกิดสภาวะดินเหลวขึ้นได้ ก็จะทำให้ดำเนินการเพื่อป้องกันหรือลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในภายหลังได้

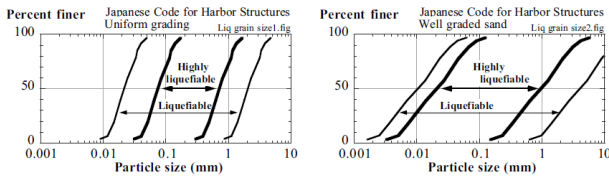
2. องค์ประกอบและแนวทางในการประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว

ในการศึกษาปรากฏการณ์การเกิดสภาวะดินเหลวเนื่องจากแผ่นดินไหวในจังหวัดเชียงรายครั้งนี้ ได้เน้นองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการดังต่อไปนี้

2.1 ชนิดและสภาวะของดิน

เป็นดินที่ไม่มีแรงยึดเกาะ (Non-cohesive soils) หรือหากจะมีก็น้อยมาก เช่น ดินทราย ซึ่งถือว่าเป็นดินที่มีเม็ดดินหยาบ หากนำดินที่เกิดสภาวะดินเหลวมาทำการวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีการร่อน

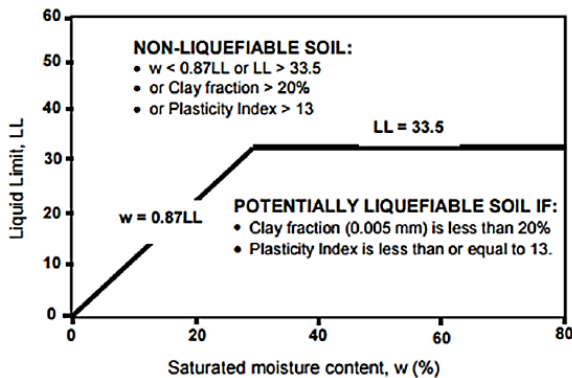
ตะแกรง (Sieve analysis) จะได้เส้นการกระจายขนาดของเม็ดดินอยู่ในช่วงของกราฟแสดงการกระจายขนาดของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) ดินที่มีการกระจายขนาดโคลงไม่ตี (ข) ดินที่มีการกระจายขนาดคลละเอียด

รูปที่ 1 ช่วงการกระจายขนาดของเม็ดดินที่มีโอกาสเกิดภาวะดินเหลวได้โดย Japanese Seismic Code for Harbor Structures [1]

นอกจากนั้นยังพบว่าสภาวะดินเหลวจากแผ่นดินไหวสามารถเกิดกับดินประเภททรายแป้งที่มีดัชนีพลาสติกต่ำ (Low plastic silt) รวมทั้งดินเหนียวที่มีดัชนีพลาสติกต่ำ (Low-plastic clay) เช่นกัน โดย Perlea และคณะ [2] ได้เสนอกราฟที่ใช้ประเมินศักยภาพในการเกิดภาวะดินเหลวของดินเหนียวและทรายแป้งโดยใช้คุณสมบัติทางพลาสติกและปริมาณน้ำในดินไว้ตั้งแต่ปี 1999 ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 สภาพความชื้นและพิกัดเหลวของทรายแป้งและดินเหนียวที่มีศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว [2]

2.2 ระดับน้ำใต้ดิน

เนื่องจากแรงดันน้ำในโพรงดินเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการเกิดสภาวะดินเหลวเนื่องจากแผ่นดินไหว และดินนั้นต้องอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นดินตามหัวข้อ 2.1 ที่อยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำใต้ดินจึงเป็นดินที่สามารถเกิดสภาวะดินเหลวได้

2.3 แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

เมื่อชั้นดินตามหัวข้อ 2.1 และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินตามหัวข้อ 2.2 แล้ว ก็พร้อมที่จะเกิดสภาวะดินเหลวได้หากได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่รุนแรงและนานพอ ซึ่งความรุนแรงในการสั่นสะเทือนนั้นมักจะประเมินจากความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Maximum ground acceleration; a_v)

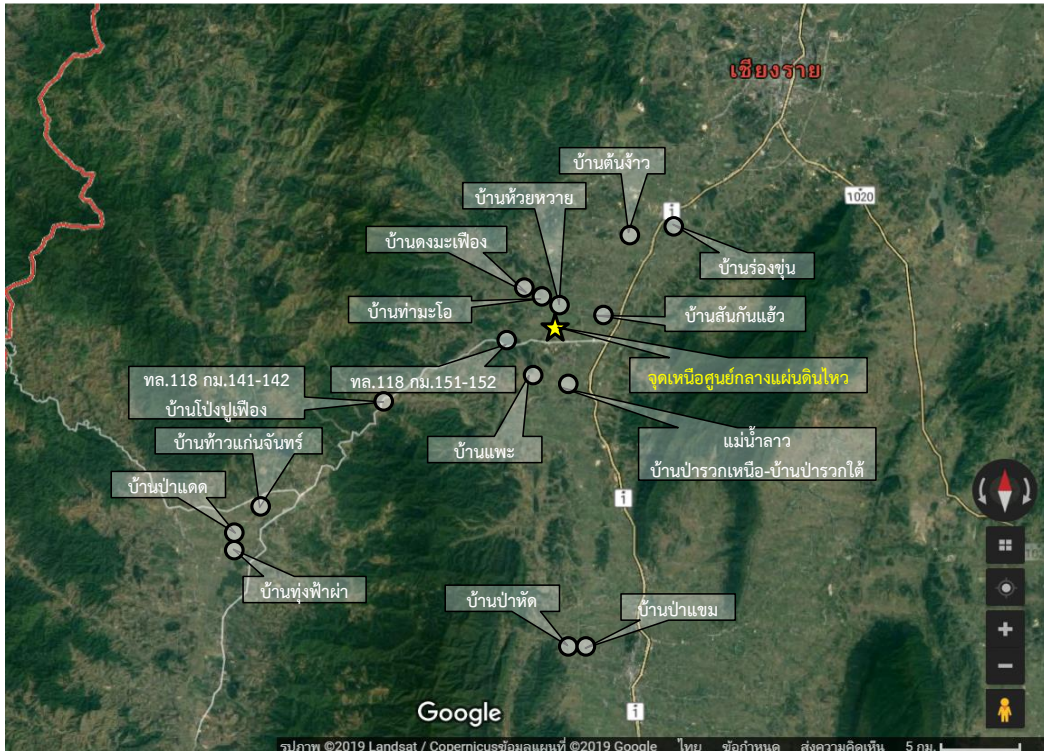
2.4 แนวทางในการประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว

แนวทางในการประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลวของชั้นดินมีอยู่ด้วยกันหลายแนวทาง แต่ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการคำนวณหาสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลว (Factor of safety against liquefaction) ซึ่งมีหลายวิธีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 50 ปีแล้ว สำหรับวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากคือวิธีที่คำนวณจากผลการทดสอบดินในสนามด้วยการเจาะทะลวงแบบมาตรฐาน (SPT-based method) ที่ถูกนำเสนอครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ.1967 [3] ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการประเมินศักยภาพในการเกิดดินเหลวในดินที่ไม่มีแรงเชื่อมแน่นและถูกใช้มาเป็นระยะเวลาถึง 45 ปี เป็นสมการเชิงประจักษ์และยังมีการพัฒนาค่าปรับแก้อย่างต่อเนื่องจนปัจจุบันสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ดินเหลวที่นำเสนอในบทความนี้ใช้การคำนวณที่มีการพัฒนาค่าปรับแก้โดย Boulanger and Idriss ที่เสนอในปี ค.ศ.2014 [4] ซึ่งประเมินใช้ผลการทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (Standard penetration test) เป็นหลัก

3. กระบวนการศึกษา

การศึกษาองค์ประกอบของปรากฏการณ์ดินเหลวที่จังหวัดเชียงใหม่ที่นำเสนอในบทความฉบับนี้ได้เริ่มดำเนินการระหว่างปี พ.ศ.2557-2565 โดยประกอบด้วยกิจกรรมดังต่อไปนี้

1. การเจาะสำรวจชั้นดินด้วยวิธีเจาะทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard penetration test: SPT) หรือด้วยวิธีเจาะทะลวงแบบคุนเซลสแต็บ (Kunzelstab penetration test: KPT) ที่พื้นดินบริเวณที่เกิดสิ่งกีดขวางที่บ่งบอกว่าอาจจะเกิดสภาวะดินเหลวขึ้น ได้แก่ เกิดทรายเป็นดิน เกิดรอยแยกบนพื้นดิน ซึ่งอาจจะมีทรุดตัวบริเวณรอยแยกเหล่านั้น เกิดรอยแตกหรือการวิบัติของพื้นถนน และฐานรากของบ้านเรือนเกิดการทรุดตัว เป็นต้น สำหรับระดับน้ำใต้ดินนั้น ได้จากทั้งการเจาะสำรวจชั้นดินและการสอบถามข้อมูลน้ำใต้ดินที่มีระดับขึ้นและลงทั้งปีจากประชาชนในพื้นที่
 2. การจำแนกประเภทของดินด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมธรณีเทคนิค ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบพื้นฐานทั่วไป ได้แก่ การหาความชื้นในดิน การประมาณหน่วยน้ำหนัก การทดสอบหาการกระจายขนาดโคลงของดิน การหาพิกัดอัตราเบร์ก เป็นต้น
 3. การคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลว (Factor of safety against liquefaction) ตามวิธีการที่ระบุในหัวข้อ 2.4 โดยมีสมมติฐานว่า ความหนาแน่นของชั้นดินในสนามก่อนและหลังการเกิดปรากฏการณ์ดินเหลวอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเล็กน้อยก็ได้ ดังที่ได้เคยมีผู้ศึกษาไว้หลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่นิอากาตะ (Niigata) ประเทศญี่ปุ่น ในปี ค.ศ.1964 [5]
- สำหรับบริเวณที่ได้ทำการสำรวจนั้น ได้เลือกสถานที่ที่ต่างๆ ทั้งที่ปรากฏและไม่ปรากฏลักษณะที่อาจจะเกิดสภาวะดินเหลวจำนวน 15 แห่งดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 สถานที่ที่ได้ดำเนินการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ดินเหลวในจังหวัดเชียงใหม่

สถานที่ 15 แห่งนั้น ได้แก่บริเวณหมู่บ้านต่างๆ และถนนเรียงลำดับจากบนลงล่างในรูปที่ 3 ดังต่อไปนี้

1. บ้านร่องซุ่น ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมืองเชียงใหม่ บริเวณริมฝั่งแม่น้ำลาว อยู่ทางทิศตะวันออกของทางหลวงหมายเลข 1 บริเวณนี้ไม่พบว่ามีปรากฏการณ์ดินเหลว
2. บ้านต้นง้าว ต.บัวสลี อ.แม่ลาว หน้าโรงเรียนบ้านต้นง้าวซึ่งมีอาคารเรียนได้รับความเสียหาย บริเวณนี้ไม่พบว่ามีร่องรอยของการเกิดสภาวะดินเหลวบนผิวดิน แต่พบว่ามีทรายฟูในบ่อน้ำในหมู่บ้านใกล้เคียง
3. บ้านดงมะเฟือง ต.จอมหมอกแก้ว อ.แม่ลาว พบว่ามีทรายผุดขึ้นตามพื้นดินหลายแห่งในบริเวณหมู่บ้านนี้
4. บ้านท่ามะโอ ต.จอมหมอกแก้ว อ.แม่ลาว พบว่าบ้านหลังที่อยู่ริมสุดของหมู่บ้านล้มพังบดทั้งหลัง พื้นดินบริเวณบ้านมีรอยแยกคดเคี้ยวเป็นทางยาว
5. บ้านห้วยห้วย ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว พบว่าถนนส่วนที่ผ่านหน้าวัดน้ำล้อมในหมู่บ้านเกิดรอยแตกเสียหาย
6. บ้านสันกันแฮ้ว ต.จอมหมอกแก้ว อ.แม่ลาว พบว่ามีทรายเป็นทรายผุดขึ้นหลายแห่งในหมู่บ้าน และมีเสาไฟฟ้าต้นหนึ่งที่มีหม้อแปลงเกิดการทรุดตัว
7. ทางหลวงหมายเลข 118 กม.151-152 ในพื้นที่ ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว ซึ่งบริเวณนี้เกิดการทรุดตัวของคันทางยาวประมาณ 200 เมตร ซึ่งเป็นข่าวโด่งดังไปทั่วประเทศในช่วงเวลานั้น

8. บ้านพะ ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว เป็นหมู่บ้านที่พบว่ามีทรายฟูในบ่อน้ำที่ความลึกประมาณ 3-5 เมตรจากผิวดิน แต่ไม่มีร่องรอยของทรายผุดตามผิวดินหรือรอยแตกบนผิวดิน
9. ในแม่น้ำลาว ใกล้สะพานข้ามระหว่างบ้านป่ารวกเหนือ ต.ดงมะดะ อ.แม่ลาว กับบ้านป่ารวกใต้ ต.ธารทอง อ.พาน เป็นบริเวณที่ไม่พบร่องรอยของการเกิดสภาวะดินเหลว
10. ทางหลวงหมายเลข 118 กม.141-142 ใกล้บ้านโป่งปูเฟือง ในพื้นที่ ต.แม่สรวย อ.แม่สรวย บริเวณนี้เกิดรอยแตกหลายรอยบนผิวดินและสฟลิตคอกกรีต รอยแตกส่วนใหญ่เป็นแนวยาวตามแนวถนน
11. บ้านท้าวแก่นจันทร์ ต.ป่าแดด อ.แม่สรวย ซึ่งในหมู่บ้านนี้เกิดทรายเป็นทรายผุดขึ้นตามรอยแยกบนพื้นดิน และมีทรายฟูขึ้นจากบ่อน้ำสูง 4-5 เมตร
12. บ้านป่าแดด ต.ป่าแดด อ.แม่สรวย เป็นหมู่บ้านที่ไม่พบร่องรอยการเกิดสภาวะดินเหลวบนพื้นดิน แต่มีทรายฟูในบ่อน้ำที่ความลึกประมาณ 4-5 เมตร
13. บ้านทุ่งฟ้าผ่า ต.แม่พริก อ.แม่สรวย เป็นหมู่บ้านที่พบปัญหาจากการเกิดสภาวะดินเหลวที่ค่อนข้างรุนแรง พบรอยแยกบนพื้นดินหลายแห่งในหมู่บ้านและมีทรายเป็นทรายผุดขึ้นจากรอยแยกเหล่านั้น มีทรายฟูในบ่อน้ำและสระน้ำขึ้นมาเหนือพื้นดิน ด้วยความสูงหลายเมตร เช่นเดียวกับที่บ้านท้าวแก่นจันทร์ มีบ้านเรือน อาคารโรงเรียนและโรงงานในหมู่บ้านเกิดความเสียหายหลายหลัง

14. บ้านป่าหัด ต.ป่าหุง อ.พาน มีบ้านหลายหลังที่อยู่ท้ายหมู่บ้าน ใกล้คลองชลประทานเกิดการทรุดตัว มีรอยแยกและทรายผุดขึ้นมาตามรอยแยก

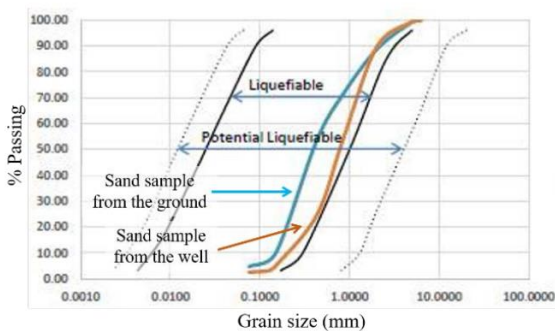
15. บ้านป่าแหม ต.ป่าหุง อ.พาน เป็นหมู่บ้านที่อยู่ติดกับบ้านป่าหัด และปรากฏความเสียหายในลักษณะเดียวกัน นอกจากนั้นยังพบว่ายังมีบ่อเกรอะที่ทำจากท่อคอนกรีตสำเร็จรูปเกิดการระเบิดเบาๆ มีของเสียและทรายเหลวพุ่งขึ้นมา

4. ผลการศึกษา

จากกระบวนการศึกษาที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3 ได้พบหลายประเด็นที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

4.1 ทรายฟูในบ่อน้ำ

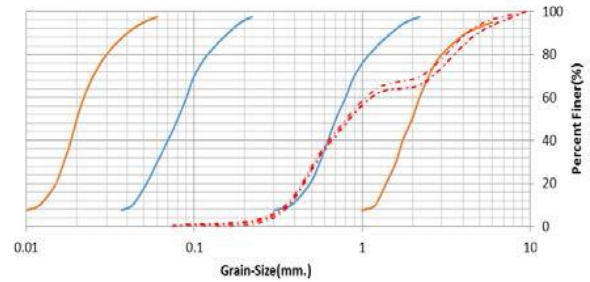
เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนั้นทำให้เกิดปรากฏการณ์ทรายฟูขึ้นในบ่อน้ำในหลายหมู่บ้านที่ได้ทำการสำรวจ (ทรายฟูหมายถึงทรายปนน้ำที่พุ่งขึ้นมาเหนือพื้นดินได้ถึงระดับสูงพอสมควรจนดูเหมือนน้ำฟู ส่วนทรายผุดหมายถึงทรายปนน้ำที่ไหลขึ้นมาจากผิวดิน ไม่พุ่งขึ้นสูงจนดูเหมือนน้ำฟู) พบว่าขนาดผลของทรายฟูที่เก็บจากพื้นดินและในบ่อน้ำในหลายหมู่บ้านนั้นมีการกระจายของขนาดผลที่อยู่ในขอบเขตที่เกิดสภาวะดินเหลวได้ดังตัวอย่างทรายผุดบนพื้นดิน (on the ground) และทรายฟูในบ่อน้ำ (in the well) แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งทั้งสองมีขนาดผลไม่ต่างกันมากนักและมีลักษณะการกระจายขนาดผลที่ไม่ดีตามขอบเขตที่แนะนำโดย Japanese Seismic Code for Harbor Structures ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีเม็ดทรายที่พบนั้นมีขนาดประมาณ 0.2-2 มิลลิเมตรเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 4 การกระจายขนาดผลของทรายผุดบนพื้นดินและทรายฟูในบ่อน้ำที่บ้านหัวแค้นจันทร์

อย่างไรก็ตาม เมื่อได้เก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 2-3 เมตรจากหลุมเจาะใกล้บ่อน้ำ จะพบการกระจายของตัวอย่างดินที่มีลักษณะเป็นกราฟขาดช่วงดังรูปที่ 5 ซึ่งขนาดของเม็ดทรายในช่วงที่หายไปนั้นมีขนาดประมาณ 0.5-2.0 มิลลิเมตร แสดงว่าเม็ดทรายที่มีขนาดประมาณไม่เกิน 2 มิลลิเมตรเท่านั้นที่สามารถไหลไปได้กับน้ำใต้ดินที่มีแรงดันสูงขึ้นจากการเกิดสภาวะดินเหลว ในขณะที่เดียวกันก็พบว่าทรายฟูในบ่อน้ำในหลายหมู่บ้านนั้นมีลักษณะคล้ายน้ำโคลน ซึ่งพบว่าเป็นดินจำพวก

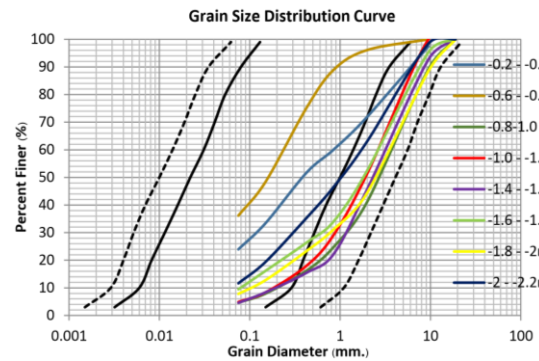
Low- plasticity silt ปนอยู่กับทรายละเอียดด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลังในบทความนี้



รูปที่ 5 การกระจายขนาดผลของทรายจากหลุมเจาะใกล้บ่อน้ำที่เกิดทรายฟู

4.2 การประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว

เป็นที่น่าสังเกตว่า ทุกแห่งที่พบทรายผุดขึ้นมาตามรอยแยกบนผิวดินนั้น มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ค่อนข้างตื้น ประมาณ 1.0-1.5 เมตรจากผิวดิน ถึงแม้ว่าจะทำการสำรวจในราวเดือนธันวาคม-เดือนกุมภาพันธ์ก็ตาม ชนิดของดินที่อยู่ต่ำกว่าน้ำใต้ดินดังกล่าวนี้มักจะเป็นดินทรายปนทรายแป้ง (SM) บ้าง หรือเป็นทรายปนดินเหนียว (SC) ที่มีสัดส่วนของดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่ถึงร้อยละ 30 ดังรูปที่ 6 หรืออาจจะมีบ้างที่เกือบเป็นทรายล้วนหรือทรายสะอาด (clean sand) และที่สำคัญ ชั้นดินเหล่านี้นั้นมีค่าต้านทานการตอกทะลวงด้วยวิธี SPT หรือ KPT ต่ำมาก ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 6 การกระจายขนาดผลของตัวอย่างดินจากบ้านท่ามะโอ

เส้นกราฟแสดงการกระจายขนาดผลของตัวอย่างดินในรูปที่ 6 เป็นตัวอย่างดินที่เก็บจากหลุมเจาะโดยใช้ข้อเกอร์มือ (Hand auger) ในการเก็บตัวอย่างรวมกับการสำรวจความแข็งแรงของชั้นดินโดย KPT ซึ่งเก็บข้อมูลทุกความลึก 0.20 เมตรอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงเป็นค่า N-KPT ในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงค่าดังกล่าวร่วมกับชนิดของตัวอย่างดินที่ถูกจำแนกประเภทในระบบ Unified soil classification system และทางขวาสุดของตารางเป็นค่าสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลว (Factor of safety against liquefaction: FSL) ซึ่งคำนวณด้วย Stress-based approach ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งในการคำนวณนั้นได้ใช้ความแรงสูงสุดของพื้นดินตั้งแต่ 0.15g-0.30g ซึ่งเป็นค่าที่เป็นไปได้จากเหตุแผ่นดินไหวดังกล่าว

ตารางที่ 1 บันทึกการตอกทะลวงด้วยวิธี KPT ชนิดของดินและผลการคำนวณสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลวของชั้นดินที่บ้านท่ามะโอ

Depth (m.)	N-KPT	(N ₁) _{60CS}	(N ₁) _{60CS}	SOIL	Typical Name	PL	LL	% of grains < 0.075	FSL
-0.2	-	-		-	-	-	-	-	
-0.4	13	8		SC	Clayey Sand	22.15	29.89	23.96	
-0.6	12	7		SC	Clayey Sand	22.85	31.1	28.220	
-0.8	11	6		SC	Clayey Sand	24.47	54.68	36.170	
-1	12	7		SC	Clayey Sand	30.06	37.41	4.650	
-1.2	11	6		SC	Clayey Sand	31.13	38.77	4.890	
-1.4	7	4		SC	Clayey Sand	25.36	35.69	4.590	
-1.6	5	3		SC	Clayey Sand	24.2	28.7	9.490	
-1.8	3	2		SP	Poorly graded Sand	29.2	36.98	7.820	
-2	7	4		SC	Clayey Sand	30.76	38.93	11.660	
-2.2	5	3		SC	Clayey Sand	-	-	-	
-2.4	8	5		SC	Clayey Sand	-	-	-	
-2.6	10	6		SC	Clayey Sand	-	-	-	
-2.8	11	6		SC	Clayey Sand	-	-	-	
-3	9	5		SC	Clayey Sand	-	-	-	
-3.2	9	5		SC	Clayey Sand	-	-	-	
-3.4	10	6		SC	Clayey Sand	-	-	-	
-3.6	15	9		SC	Clayey Sand	-	-	-	
-3.8	24	14		SC	Clayey Sand	-	-	-	

เนื่องจากในการคำนวณ FSL นั้นจะต้องใช้ค่า N จากการทดสอบชั้นดินด้วยวิธี SPT มาปรับแก้ให้เป็นค่า (N₁)_{60CS} แต่ในการศึกษาตามบทความนี้ได้ใช้การทดสอบชั้นดินด้วยวิธี KPT ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบด้วยวิธีทั้งสองเปรียบเทียบกับกันเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N-KPT กับค่า (N₁)_{60CS} ตามสมการ (1) ที่ได้จากการทดลองใช้ SPT คู่กับ KPT ในการสำรวจชั้นดินที่เป็นชนิด sandy soils หลายแห่งในจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งพบว่า

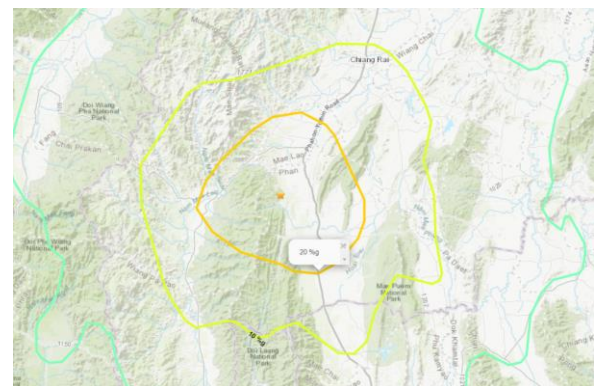
$$(N_1)_{60CS} = 0.583N-KPT \quad (1)$$

ค่า (N₁)_{60CS} ที่ได้จะถูกนำไปคำนวณผ่านขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนตามวิธี Stress-based approach [4] ซึ่งในที่สุดจะสามารถคำนวณค่า FSL ได้ดังที่ปรากฏในตารางที่ (1)

ผลการคำนวณค่า FSL ในตารางที่ 1 นั้น ได้มาจากการสมมติค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak ground acceleration: pga) ตั้งแต่ 0.15g-0.30g ดังกล่าวแล้ว ซึ่งค่า 0.30g นั้นเป็นค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินที่อาจเกิดขึ้นได้ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนั้นเมื่อพิจารณาจากแผนที่ของ USGS ในรูปที่ 7

จากผลการคำนวณในตารางที่ 1 จะเห็นว่า เมื่อใช้ค่า pga = 0.25g ในการคำนวณ จะพบว่าดินที่ระดับความลึก -1.4 เมตรถึง -3.5 เมตรนั้นมีค่า FSL น้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับ 1.00 ซึ่งหมายความว่าชั้นดินหนาประมาณ 2 เมตรที่ระดับที่กล่าวมานี้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสภาวะดิน

เหลวขึ้น และเมื่อใช้ค่า pga = 0.30g ในการคำนวณจะยิ่งพบว่าชั้นดินที่อาจเกิดสภาวะดินเหลวขึ้นได้นั้น อาจจะอยู่ที่ระดับ -1.0 เมตรลงไปถึงจนถึงระดับ -3.8 เมตรก็เป็นได้ (ความหนาของชั้นดินที่เกิดสภาวะดินเหลวประมาณ 2.8 เมตร)



รูปที่ 7 ความเร่งสูงสุดของพื้นดินในเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงใหม่ พ.ศ.2557 [6]

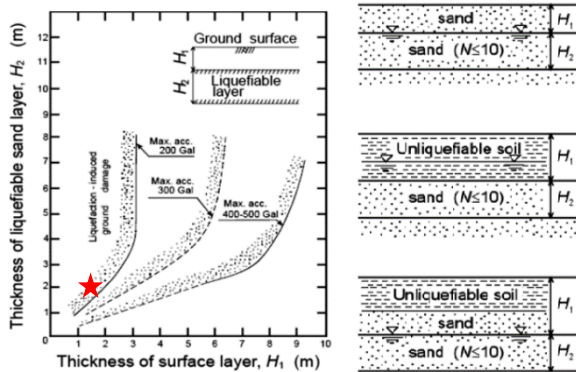
ด้วยเหตุที่ชั้นดินในบริเวณนี้อาจเกิดสภาวะดินเหลวได้หนาดัง 2 เมตรนี้เอง จึงพบรอยแยกบนพื้นดินบนลานบ้านหลังที่อยู่ข้างๆ ซึ่งเป็นสัญญาณว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสภาวะดินเหลวขึ้น และอาจเป็นสาเหตุหนึ่งส่งผลให้บ้านหลังที่ตั้งอยู่ข้างๆ บริเวณที่ทำการสำรวจชั้น

ดินตำแหน่งดังกล่าวนี้ เกิดการพังทลายจากการล้มพับของเสาได้โดยง่าย ดังรูปที่ 8 บ้านหลังดังกล่าวนี้มีได้เกิดปัญหาการทรุดตัวจากการเกิดดินเหลวเนื่องจากฐานรากตั้งอยู่เหนือระดับชั้นดินที่อาจเกิดสภาวะดินเหลวได้ประมาณ 1 เมตร แต่ชั้นดินที่อาจเกิดสภาวะดินเหลวได้นี้ อาจส่งผลให้เกิดการสั่นพ้องกับตัวบ้านที่มีเสาคอนกรีตยาวซึ่งมีสติฟเนสส์ (Column stiffness) ต่ำได้ [7] อีกทั้งระยะเวลาที่เกิดการสั่นไหวอย่างรุนแรงบนชั้นดินเหลวอาจจะนานกว่าบนชั้นดินแข็งอีกด้วย [8]



รูปที่ 8 บ้านเรือนราษฎรหลังหนึ่งในบ้านท่ามะโอที่เสาหักพังลงกับพื้นดิน [9]

ความเสียหายนี้สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้จากการใช้แผนภาพของ Ishihara ในรูปที่ 9 ซึ่งใช้คาดคะเนความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับพื้นดินในบริเวณที่ทำการสำรวจและวิเคราะห์ได้



รูปที่ 9 แผนภาพสำหรับคาดคะเนความเสียหายของพื้นดินของ Ishihara [10]

หากใช้ผลการคำนวณโดยกำหนดค่า p_{ga} = 0.25g ตามตารางที่ 1 ซึ่งจะให้ผลการประมาณว่า สภาวะดินเหลวจะเกิดขึ้นได้ที่ความลึก H₁ = 1.4 เมตรลงไป และความหนาของชั้นดินที่อาจจะเกิดสภาวะดินเหลว = 2.0 เมตร จะสามารถพล็อตจุดนี้ (ดาวสีแดง) ลงในแผนภาพในรูปที่ 9 ได้ตำแหน่งทางซ้ายมือของเส้น Max. acc. 250 Gal (เส้นนี้ควรอยู่ระหว่างเส้น 200 Gal กับ 300 Gal) ซึ่งหมายความว่าพื้นดินน่าจะเกิดความเสียหายขึ้นได้ ซึ่งก็คือเกิดรอยแยกบนพื้นลานบ้านนั่นเอง (หาก

พล็อตแล้วดาวสีแดงอยู่ทางขวาของเส้น Max. acc. ค่าที่ใช้คำนวณแสดงว่าไม่น่าจะเกิดความเสียหายกับพื้นดินได้)

4.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับทางหลวงหมายเลข 118

ทางหลวงหมายเลข 118 เป็นเส้นทางสายสำคัญสายหนึ่งในภาคเหนือ เนื่องจากเป็นเส้นทางหลักในการเดินทางจากจังหวัดเชียงรายไปยังจังหวัดเชียงใหม่ เส้นทางสายนี้ส่วนใหญ่ตัดผ่านภูเขา หลายช่วงมีแนวเส้นทางขนานกับลำน้ำ ไม่ว่าจะเป็นแม่น้ำกก (ในเขตจังหวัดเชียงใหม่ แม่น้ำลาว (ในเขตจังหวัดเชียงราย) บางส่วนก็เป็นลำธารเล็กๆ อยู่ข้างแนวเส้นทาง เมื่อเกิดแผ่นดินไหวในปี พ.ศ.2557 ได้เกิดความเสียหายขึ้นกับถนนสายนี้หลายช่วง แต่ที่ชัดเจนและสำคัญได้แก่ระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 141-142 และระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 151-152 ดังต่อไปนี้

4.3.1 การเกิดรอยแตกบนถนนระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 141-142

ทางหลวงหมายเลข 118 ช่วงนี้เป็นช่วงที่ขนานกับแม่น้ำลาว ห่างจากแม่น้ำลาวเพียงประมาณ 25-30 เมตรเท่านั้น โดยได้เกิดรอยแตกเป็นทางยาวไปตามแนวถนนดังแสดงในรูปที่ 10 โดยตามภาพนี้แม่น้ำลาวอยู่ทางซ้ายมือในภาพ (ทิศตะวันออกของถนน) ส่วนทางขวามือหลังแนวต้นไม้เป็นทุ่งนา ซึ่งเป็นที่ราบเชิงเขากว้างประมาณ 200 เมตร มีแนวลำน้ำธรรมชาติเล็กๆ จากทุ่งนาดังกล่าวลอดผ่านถนนบริเวณนี้ด้วยการวางท่อให้สามารถระบายน้ำจากภูเขาไปลงแม่น้ำลาวได้ ด้วยลักษณะทางภูมิประเทศเช่นนี้จึงคาดได้ไม่ยากว่าใต้ถนนบริเวณนี้จะเป็นแอ่งที่ราบสำหรับการตกตะกอนของดินที่ไหลมากับน้ำลงมาจากภูเขา



รูปที่ 10 รอยแตกบนผิวทางหลวงหมายเลข 118 กม.141-142 (ภาพโดยแขวงทางหลวงแม่สรวย)

ในการสำรวจชั้นดินข้างถนนได้พบว่า เป็นชั้นดินทรายปนโคลนดินเหนียว (SC) มีความต้านทานต่อการเจาะสำรวจด้วย KPT ต่ำมาก (ค่า N-KPT ต่ำ) และระดับน้ำใต้ดินก็ตื้นมาก ลึกไม่เกิน 1.0 เมตร (เท่ากับน้ำในลำน้ำ) ด้วยเหตุที่เป็นชั้นดินอ่อนในขณะที่ทำการสำรวจชั้นดินจึงสามารถรู้สึกถึงการสั่นไหวของพื้นได้อย่างชัดเจนเมื่อมียานพาหนะขนาดใหญ่วิ่งผ่านมา

ผลการประเมินค่า FSL พบว่า หากใช้ค่า $PGA = 0.20g$ ในการคำนวณจะได้ค่า FSL ประมาณ 1.2 จากผิวดินลงไปจนถึงความลึก 4.0 เมตร (ด้วยขีดจำกัดของอุปกรณ์ KPT) ซึ่งแสดงว่าไม่เกิดสภาวะดินเหลวขึ้น แต่ด้วยค่า FSL 1.2 นี้ หมายความว่าในชั้นดินมีแรงดันน้ำส่วนเกิน [11] เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้กำลังเฉือนของดินลดลง ด้วยเหตุนี้ชั้นดินใต้ถนนบริเวณนี้จึงอาจเกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายเมื่อถูกกระตุ้นจากคลื่นแผ่นดินไหวจนเกิดรอยแยกขึ้น แต่ก็ยังไม่รุนแรงมากจนเกิดการวิบัติหรือเลื่อนไถลลงแม่น้ำลาว

4.3.2 การทรุดตัวของคันทางระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 151-152

การทรุดตัวของคันทางระหว่างหลักกิโลเมตรที่ 151-152 นับเป็นความเสียหายทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่รุนแรงและชัดเจนที่สุดในเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนั้นดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 สภาพการทรุดตัวของคันทางหลวงหมายเลข 118 กม.151-152 (ภาพโดยแขวงทางหลวงแม่สรวย)

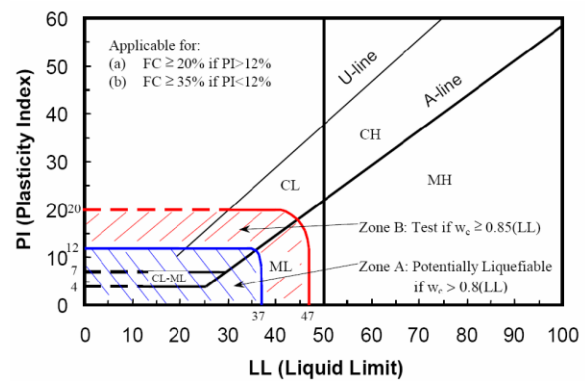
จากการสำรวจชั้นดินบริเวณไหล่ทางพบชั้นดินอ่อนที่สามารถเกิดปรากฏการณ์ดินเหลวได้ที่มีความลึกประมาณ -3.0 เมตรถึง -4.0 เมตรวัดจากผิวถนน เป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC) สลับกับดินเหนียวที่มีดัชนีพลาสติกต่ำ (CL) และมีค่า N-KPT ต่ำมากคือมีจำนวนครั้งที่ตอก 1-5 ครั้งต่อ 20 เซนติเมตร ดินส่วนนี้มีสีเทาและมียอนทรียวัตถุปนอยู่ คาดว่าน่าจะเป็นหน้าดินเดิมตั้งแต่เริ่มมีการถมไหล่เขาเพื่อสร้างคันทางข้างๆ ลาดคันทางที่เกิดการทรุดตัวนี้มีลำน้ำขานไปเป็นระยะทางประมาณ 500 เมตร และช่วงเวลาที่เกิดแผ่นดินไหวนั้น ระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าผิวทางไม่เกิน 1.50 เมตรเท่านั้น จึงถือว่าชั้นดินอ่อนดังกล่าวมีองค์ประกอบของดินและน้ำครบ และเมื่อมีค่า pga เพียง $0.25g$ (ทั้งๆ ที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวครั้งนั้นค่อนข้างมาก) มาใช้ในการคำนวณค่า FSL ก็พบว่าชั้นดินนี้เกิดสภาวะดินเหลวได้

4.4 การเกิดสภาวะดินเหลวของดินเหนียวที่มีดัชนีพลาสติกต่ำ

ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนั้นได้พบปัญหาการทรุดตัวของฐานรากของบ้านหลายหลังที่เป็นฐานแม่ที่บ้านป่าหัดและบ้านป่าแหม ต.ป่าหุง อ.พาน จากการสำรวจชั้นดินพบว่าเป็นดินเหนียวและดินเหนียวปนทรายแข็งที่มีค่าดัชนีพลาสติกต่ำ (Low-plasticity soils) ตั้งแต่ความลึก 0.7 เมตรจากผิวดินลงไปจนถึงความลึกอย่างน้อย 2 เมตร มีความชื้นในดินสูงมากคือประมาณร้อยละ 90 ของค่าพิกัดเหลวขึ้นไป

โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความลึกประมาณ 1.0-1.8 เมตรนั้นเป็นดินประเภท CL-ML มีความชื้นในดินมากกว่าค่าพิกัดเหลว ซึ่งตรงกับการเจาะหยังด้วย KPT ที่ตอกเพียงครั้งเดียวแต่ชุดอุปกรณ์ไหลลงไปได้ประมาณ 0.4-0.5 เมตร ซึ่งหากพิจารณาสภาพของดินในหลุมสำรวจจนแล้ว พบว่าเป็นเงื่อนไขที่สามารถเกิดดินเหลวได้ตามรูปที่ 2

นอกจากรูปที่ 2 แล้ว ยังมีแผนภาพของ Seed และคณะที่ได้เสนอไว้ใน ค.ศ.2003 [12] ว่า ดินที่สามารถพล็อตค่าพิกัดเหลว (LL) และดัชนีพลาสติก (PI) ลงในโซน A และ โซน B ตามแผนภาพในรูปที่ 12 แล้ว จะสามารถเกิดสภาวะดินเหลวได้ ซึ่งก็พบว่าดินที่ได้จากการเจาะสำรวจที่หมู่บ้านนั้น ทั้งหมดยุติในทั้งสองโซนและมีความชื้นมากกว่า 0.8(LL) จึงเข้าเงื่อนไขตามรูปที่ 12 นี้ด้วย



รูปที่ 12 แผนภาพคุณสมบัติของดินเหนียวที่อาจเกิดสภาวะดินเหลวได้ [12]

4.5 บริเวณที่ไม่เกิดสภาวะดินเหลว

ในการศึกษาครั้งนี้ได้พบว่าที่บ้านร่องขุน บ้านแพะ บ้านป่าแดด และกลางลำน้ำแม่ลาว (เฉพาะจุดที่ได้เจาะสำรวจชั้นดิน) นั้น ขาดองค์ประกอบที่จะทำให้เกิดสภาวะดินเหลวได้ดังต่อไปนี้

- ที่บ้านร่องขุน พบว่าชั้นดินจากผิวดินถึงความลึก 0.6 เมตรเป็นดินประเภททรายแข็งที่มีดัชนีพลาสติกต่ำ (ML) ซึ่งอาจเกิดสภาวะดินเหลวได้ แต่ดินส่วนนี้อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน ที่ความลึกเกินกว่า 0.6 เมตรลงไปจนถึง 3 เมตร พบว่าเป็นดินเหนียวที่มีดัชนีพลาสติกสูง (CH) ซึ่งดินประเภทนี้เกิดสภาวะดินเหลวได้ยากมาก และไม่พบน้ำใต้ดินเลย

- ที่บ้านแพะ ได้ทำการเจาะสำรวจถึงความลึกประมาณ 3.6 เมตรจากผิวดิน พบว่าตั้งแต่ผิวดินลงไปถึงความลึกประมาณ 2.2 เมตรเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) แต่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับ -2.0 เมตร จึงยากต่อการเกิดสภาวะดินเหลว สำหรับที่ความลึกประมาณ 2.2 ถึง 2.8 เมตร เป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC) ที่มีศักยภาพในการเกิดดินเหลวได้ ซึ่งตรงกับที่ชาวบ้านแจ้งว่ามีทรายฟูในบ่อน้ำในหมู่บ้าน แต่เนื่องจากชั้นหน้าดินข้างบนที่ไม่เกิดสภาวะดินเหลวได้นั้นหนากว่า 2 เมตร จึงไม่เกิดปัญหากับดินชั้นบน

- ที่บ้านป่าแดด พบว่าชั้นดินเป็นดินประเภทดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) มีค่า $LL=48$ และ $PI = 25$ ซึ่งพล็อตแล้วไม่อยู่ในโซน A หรือ B ตามรูปที่ 12 อีกทั้งดินยังแข็งมาก (ค่า N-KPT สูง) และไม่พบน้ำใต้ดินภายในความลึก 2.0 เมตร

- ที่กลางแม่น้ำลาว ข้างสะพานเชื่อมบ้านป่ารกเหนือและบ้านป่ารกใต้ เป็นจุดที่ไม่มีรายงานการเกิดสภาวะดินเหลวต่างๆ ที่ท้องน้ำเป็นทราย อาจจะเนื่องจากในเหตุการณ์แผ่นดินไหวนั้นน้ำในแม่น้ำขึ้นสูง และในการสำรวจก็ไม่สามารถเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ เนื่องจากได้พื้นทรายในท้องน้ำนั้นเป็นกรวดขนาดใหญ่

5. บทสรุป

องค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการสำหรับการเกิดสภาวะดินเหลวในเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงใหม่ในปี พ.ศ.2557 นั้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ประเภทของดินที่สามารถเกิดสภาวะดินเหลวได้นั้น นอกจากดินทรายสะอาดแล้ว ยังพบว่าดินทรายที่มีดินเหนียวหรือทรายแป้งปนอยู่ด้วย (SM, SC) ก็สามารถเกิดสภาวะดินเหลวได้ หากมีดินเหนียวหรือทรายแป้งปนอยู่มากก็อาจจะเกิดยากขึ้น ทั้งนี้ดินต้องอยู่ในสภาพที่หลวมพอสมควร ซึ่งสามารถประเมินได้จากการนำค่าที่ได้จากการทดสอบ SPT หรือ KPT ไปคำนวณหา FSL

ดินประเภทที่อาจเกิดสภาวะดินเหลวได้ก็คือ ML และ CL ที่มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 90 หรือมากกว่า เมื่อเทียบกับความชื้นที่พิกัดเหลวรูปที่ 2 หรือดินที่อยู่ในเงื่อนไขตามรูปที่ 12

2. บริเวณที่เกิดสภาวะดินเหลวในครั้งนี้ ทั้งหมดมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ค่อนข้างสูง พบว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ไม่ลึกเกิน 1.5 เมตร การเกิดสภาวะดินเหลวจนทำให้ผิวดินและสิ่งก่อสร้างเสียหายได้นั้น จะเป็นการเกิดสภาวะดินเหลวที่ระดับตื้นประมาณไม่เกิน 2 เมตรวัดจากผิวดินลงไป หากดินชั้นบนสุดที่ไม่เกิดสภาวะดินเหลวหนากว่า 2 เมตรแล้ว จะมีโอกาสน้อยที่จะสร้างรอยแยกบนผิวดินได้

3. พื้นที่ที่เกิดสภาวะดินเหลวในจังหวัดเชียงใหม่ครั้งนี้ อยู่ในบริเวณที่มีความเข้มของแผ่นดินไหวหรือความเร่งสูงสุดของพื้นดิน 0.20g ตามรูปที่ 7 ซึ่งระยะทางไกลที่สุดคือประมาณ 30 กิโลเมตรจากจุดเหนือศูนย์กลางแผ่นดินไหวใกล้บ้านหนองแก้อำเภอแม่ลาว ความเร่งสูงสุด 0.20g นี้ เป็นความเร่งที่ปกติใช้ในการคำนวณออกแบบแผ่นดินไหวในเขตเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวระดับ 2 (โซน 2g) ดังนั้น หากต้องการประเมินค่าสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลว (FSL) ในพื้นที่จังหวัดต่างๆ ก็อาจใช้ความเร่งสูงสุดของพื้นดินตามเขตเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่สนับสนุนทุนทำการศึกษาวิจัยนี้ผ่านโครงการพัฒนานักวิจัยรุ่นกลาง และขอขอบคุณนักศึกษาทั้งระดับปริญญาตรีและปริญญาโทจำนวนกว่า 20 คน ซึ่งเป็นจำนวนที่มากกว่าจะสามารถระบุชื่อได้ครบทุกคนในบทความนี้ ที่ได้เป็นทั้งเพื่อนร่วมการเดินทาง และช่วยดำเนินการสำรวจ ทดสอบดิน และวิเคราะห์ผล จนสำเร็จด้วยความเรียบร้อย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Towhata, I. (2008). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Springer-Verlag, pp.426.
- [2] Perlea, V.G., Koester, J.P., and Prakash, S. (1999). "How Liquefiable are Cohesive Soils?," *Proceedings of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, Portugal, Vol. 2, pp .611-618.
- [3] Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1967). "Soil Liquefaction in the Niigata Earthquake," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 93, No. SM3, Proc. May, 1967, pp. 83-108.
- [4] Boulanger, R.W., and Idriss, I.M. (2014). *CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*, Report No.UCD/CGM-14/01, University of California at Davis, Davis, California, USA, pp.8-18.
- [5] Towhata, I. (2008). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Springer-Verlag, pp.452.
- [6] United States Geological Survey. (2022). M 6.1 - 32 km SSW of Chiang Rai, Thailand [Interactive earthquake map]. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qack/map>
- [7] Day, R.W. (2002). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*, McGraw-Hill, pp.4.21-4.26.
- [8] Unjoh S., Kaneko, M., Kataoka, S., Nagaya, K., and Matsuoka, K. (2012). Effect of Earthquake Ground Motions on Soil Liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol.52 (5). pp.830-841.
- [9] ชาวไทยพีบีเอส. (2560, พฤษภาคม 5). ย้อนรอย 3 ปี "แผ่นดินไหว" 6.3 เชียงราย [ภาพประกอบบทความข่าว]. สืบค้นจาก <https://news.thaipbs.or.th/content/262175>
- [10] Ishihara, K. (1985). "Stability of Natural Deposits during Earthquakes," *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, USA, Vol. 1, pp. 321-376.
- [11] Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall. pp.387.
- [12] Boulanger, R.W., and Idriss, I.M. (2004). *Evaluating the Potential for Liquefaction or Cyclic Failure of Silts and Clays*, Report No.UCD/CGM-0 4 / 0 1 , University of California at Davis, Davis, California, USA, pp.1-5.