

การตรวจสอบการพังทลายของพระพุทธรูปขนาดใหญ่ที่อยู่ระหว่างการก่อสร้างที่ วัดแม่สรวยหลวง จังหวัดเชียงราย

An Investigation of Collapsing of an Under-Construction Large Buddha Statue at Mae Sruay Luang Temple, Chiang Rai Province

เศรษฐพงศ์ เศรษฐบุปผา^{1,*}, นิธิวิญญ์ เตียวสุรินทร์², ศุภวิญญ์ บุญลี², สามารณ กาบแก้ว² และอภิสิทธิ์ จินดาหลวง²

¹ อาจารย์ ² นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

*Corresponding author; E-mail address: sethapon66@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการสำรวจชั้นดินบริเวณพระพุทธรูปหลวงพ่อ เชียงแสน วัดแม่สรวยหลวง จังหวัดเชียงราย ซึ่งได้รับผลกระทบจาก แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ที่มีจุดศูนย์กลางในอำเภอแม่ลาว เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ส่งผลให้ฐานองค์พระเอียงและแตกร้าวขึ้น จนกระทั่งเกิดการพังทลายในอีกหลายวันต่อมา การศึกษานี้ดำเนินการด้วยการเจาะสำรวจ ทดสอบชั้นดินด้วยวิธีเจาะหยั่งด้วย Kunzelstab Penetration Test และ วิเคราะห์คุณสมบัติดินโดยการเก็บตัวอย่างดินด้วยเครื่องเจาะมือหมุน นำ ตัวอย่างดินมาวัดค่าความชื้น การร่อนตะแกรง และการประเมินพิสัยอัด เตอร์เบิร์ก นอกจากนี้ยังได้ประเมินศักยภาพในการเกิดสถานะดินเหลวด้วย แนวทางวิเคราะห์ความเค้น (stress-based approach) ผลการทดสอบทั้ง ในสนามและในห้องปฏิบัติการ พบว่าชั้นหน้าดินลึกประมาณ 1.5 เมตรเป็น ดินเหนียวอ่อน วางตัวอยู่บนชั้นทรายปนดินเหนียวอิมัวที่สามารรถเกิด สถานะดินเหลวเนื่องจากแผ่นดินไหวได้ โดยผลการคำนวณสัดส่วนปลดปล่อย ต่อการเกิดดินเหลวได้ต่ำกว่า 1.0 ตั้งแต่ผิวดินจนถึงความลึก 2.0 เมตร ด้วย การใช้ความเร่ง 0.2g ซึ่งตรงกับการเกิดทรายเป็นจริง ผลการศึกษานี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการออกแบบฐานรากให้เหมาะสมกับสภาพดินใน พื้นที่เสี่ยงแผ่นดินไหว เช่น ใช้ฐานรากเสาเข็ม เพื่อลดโอกาสเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในอนาคต และควรมีการศึกษาพฤติกรรมการอ่อนตัว ของดินเหนียวที่มีดัชนีพลาสติกต่ำเมื่อมีแรงกระทำจากแผ่นดินไหวต่อไปอีก ด้วย

คำสำคัญ: แผ่นดินไหว, การเกิดสถานะดินเหลว, การอ่อนตัวของดินเหนียว จากแรงกระทำวนซ้ำ

This article presents the results of a soil survey conducted at the Luang Pho Chiang Saen Buddha statue, located at Wat Mae Suai Luang in Chiang Rai Province. The statue was affected by the 6.3 M_L earthquake, with its epicenter located in Mae Lao District, on May 5, 2014, which caused its base to tilt and develop cracks, eventually leading to its collapse in the following days. The study involved subsurface investigations using Kunzelstab Penetration tests and soil property analyses through hand auger sampling. Laboratory tests were performed to determine moisture content, grain size distribution, and Atterberg limits. Additionally, the potential for soil liquefaction was assessed using a stress-based approach. Field and laboratory test results indicated that the uppermost 1.5 meters of soil consists of soft clay, underlain by a

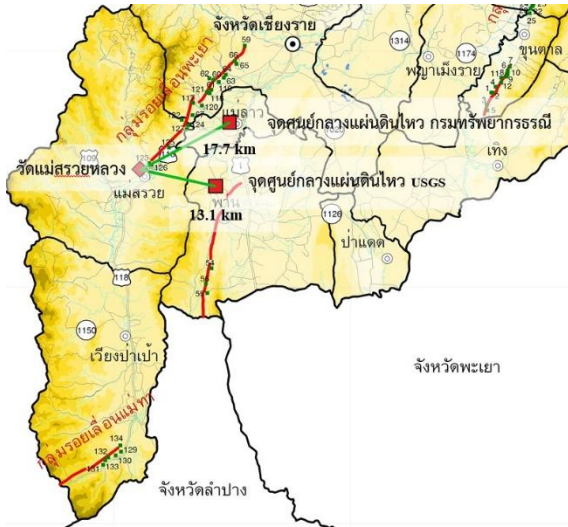
saturated sandy clay layer susceptible to liquefaction during an earthquake with the factor of safety against liquefaction less than 1.0, which aligns with observed sand boils at the site. These findings highlight the importance of designing foundations suitable for earthquake-prone areas, such as pile foundations, to minimize structural damage. Furthermore, future studies should investigate the softening behavior of low-plasticity clay under seismic loading.

Keywords: earthquake, soil liquefaction, softening of clay, cyclic softening of soft clay

1. บทนำ

ปรากฏการณ์แผ่นดินไหวเป็นภัยธรรมชาติที่ส่งผลกระทบอย่างรุนแรง ต่อชีวิต ทรัพย์สิน และโครงสร้างพื้นฐาน เป็นปรากฏการณ์ที่อาจทำให้ดินทั้ง ดินทราย (ทราบกันโดยทั่วไป) และดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (ซึ่ง โดยทั่วไปไม่ค่อยทราบ) อาจสูญเสียความสามารถในการรับแรงเฉือนชั่วคราว และเกิดพฤติกรรมคล้ายของเหลว (soil liquefaction) ส่งผลให้โครงสร้างที่ ตั้งอยู่บนชั้นดินดังกล่าวเกิดความเสียหายหรือล้มพังได้ เหตุการณ์ แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาประมาณ 18.08 น. ของวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 6.3 มีจุดศูนย์กลางที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย [1] เป็นกรณีศึกษาที่แสดงให้เห็นถึงปัญหาของดิน 2 ชนิดดังกล่าว ได้เกิดปัญหา กำลังแบกทานน้ำหนักบรรทุกลดลงหรือสูญเสียไป เนื่องจากแรงสั่นสะเทือน ของแผ่นดินไหวที่รุนแรงพอ เหตุการณ์เกิดขึ้นที่วัดแม่สรวยหลวง ซึ่งตั้งอยู่ใน อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยวัดนี้ตั้งอยู่ห่างจาก จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวตามทรีบูโดยกรมอุตุนิยมวิทยา ว่าอยู่ในอำเภอแม่ ลาวดังกล่าวข้างต้นไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นระยะทางประมาณ 17.7 กิโลเมตร แต่หากเทียบกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่ United States Geological Survey (USGS) ได้ระบุไว้ว่าอยู่ใน ตำบลทรายขาว อำเภอพาน [2] วัดนี้จะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางดังกล่าวไปทางทิศตะวันตก ก่อนไปทางเหนือเล็กน้อย เป็นระยะทางเพียงประมาณ 13.1 กิโลเมตร เท่านั้น เหตุการณ์ในกรณีศึกษานี้เกิดขึ้นกับพระพุทธรูปหลวงพ่อเชียงแสนซึ่ง มีขนาดหน้าตักกว้าง 15 เมตร สูง 25 เมตร (รูปที่ 2) ได้เอียงไปทางทิศ ตะวันออกและมียรอยแตกร้าวบริเวณฐานร่วมกับการพบทรายเป็นดินขึ้นมา บริเวณลานวัด ซึ่งเป็นหลักฐานบ่งชี้การเกิดดินเหลว หลังจากนั้น ยังเกิด แผ่นดินไหวตามขนาด 5.0 ขึ้นไปถึง 7 ครั้ง และขนาดเล็กกว่า 5.0 รวม ทั้งสิ้นอีกหลายร้อยครั้ง [1] อีกทั้งยังมีพายุและฝนตกหนักติดต่อกันหลาย ชั่วโมง จนกระทั่งเวลาประมาณ 19.35 น. ของวันที่ 30 พฤษภาคม องค์พระ

ได้พังทลายลง โดยมีรอยหักพับที่ช่วงเอว และในเวลาต่อมาทางวัดได้สร้างหลังคาคลุมซากองค์พระเอาไว้เพื่อเป็นอนุสรณ์ (รูปที่ 3)



รูปที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งของวัดแม่สรวยทองบนแผนที่รอยเลื่อนในจังหวัดเชียงราย



รูปที่ 2 พระพุทธรูปที่อยู่ระหว่างการก่อสร้างก่อนการพังทลาย
(<https://www.komchadluek.net/amulet/185617>)



รูปที่ 3 พระพุทธรูปที่พังทลายลง (ถ่ายภาพเมื่อ พ.ศ.2564)

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้แสดงให้เห็นปัญหาที่สำคัญทางวิศวกรรมอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวคือ การเอียงขององค์พระพุทธรูปที่ยังอยู่ในระหว่างการก่อสร้างนั้น น่าจะเกิดจาก 2 องค์ประกอบที่สำคัญคือ 1) การโยก (rocking) ของตัวพระพุทธรูป ซึ่งทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกทุกเยื้องศูนย์กลางขึ้น

และ 2) การสูญเสียกำลังของชั้นดินในการแบกทานน้ำหนักบรรทุก อันเนื่องมาจากแผ่นดินไหว เมื่อองค์ประกอบทั้ง 2 ประการมารวมกัน จึงเป็นเหตุให้องค์พระเกิดการเอียงในตอนแรก สำหรับการพังทลายในเวลาต่อมา นั้น น่าจะเกิดจากน้ำฝนที่ตกหนักสะสมอยู่ในองค์พระจากการเกิดรอยร้าวจนแรงดันน้ำมากพอและทำให้เกิดการพังทลายลงมา ดังเช่นที่มักเกิดขึ้นกับเจดีย์ที่มีอายุมาก ๆ ทำจากอิฐก่อและมีรอยร้าวเกิดขึ้น และมักจะพังเมื่อเกิดฝนตกหนักติดต่อกันเป็นเวลานานๆ ปัญหานี้เป็นประเด็นทางวิศวกรรมโครงสร้าง ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในบทความนี้

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงขอเสนอผลการสำรวจและวิเคราะห์ชั้นดินที่อยู่ใกล้กับองค์พระพุทธรูปที่พังลงมานี้ ว่ามีแนวโน้มหรือศักยภาพที่จะเกิดปัญหามากหรือน้อยเพียงใดหากเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อจะได้เป็นกรณีศึกษาสำหรับการก่อสร้างศาสนสถานหรือศาสนวัตถุ รวมถึงอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว เพื่อจะได้หาแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างที่เหมาะสมต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดสภาวะดินเหลว

ปรากฏการณ์ดินเหลว (soil liquefaction) คือสภาวะที่ดินซึ่งมีความอิ่มตัวด้วยน้ำ สูญเสียความสามารถในการรับแรงเฉือนและเกิดพฤติกรรมคล้ายของเหลวชั่วคราว เมื่อได้รับแรงกระตุ้นจากการสั่นสะเทือน เช่น แผ่นดินไหว หรือแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ ในช่วงเวลาสั้น ดินที่มีความอ่อนไหวสูงต่อการเกิดดินเหลวส่วนใหญ่จะเป็นดินประเภททรายหยาบทรายแข็ง หรือดินเม็ดละเอียดที่มีค่าดัชนีพลาสติกต่ำ (low plasticity) ซึ่งโครงสร้างภายในของชั้นดินไม่แน่น และมีช่องว่างที่น้ำสามารถแทรกตัวได้

กระบวนการเกิดดินเหลวเริ่มต้นขึ้นเมื่อแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวหรือแรงกระทำภายนอกอื่น ๆ ทำให้โครงสร้างของชั้นดินเกิดการจัดเรียงตัวใหม่และบีบอัดลง น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (pore water) ไม่สามารถระบายออกได้ทันตามการบีบอัด ทำให้แรงดันน้ำในช่องว่าง (pore water pressure) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีค่าที่ใกล้เคียงกับความเค้นรวม (total stress) ภายในดิน เมื่อความเค้นประสิทธิภาพลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ ดินจะสูญเสียความแข็งแรงในการรับแรงเฉือนและความมั่นคงในทันที ส่งผลให้ชั้นดินแสดงพฤติกรรมคล้ายของเหลว ทำให้เกิดการทรุดตัว การเคลื่อนตัวของดิน และน้ำปนทรายสามารถพุ่งขึ้นสู่ผิวดินผ่านรอยแตกหรือรอยแยกในชั้นดินได้ ซึ่งประชาชนทั่วไปที่พบเห็นเหตุการณ์นี้เรียกว่า "ทรายพุ" หรือ "ทรายผุด"

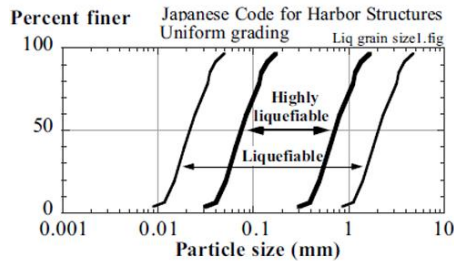
ปรากฏการณ์ดินเหลวส่งผลให้โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนชั้นดินนั้นเกิดการทรุดตัวหรือความเสียหายได้อย่างรุนแรง ไม่ว่าจะเป็นอาคาร สะพาน ถนน หรือโครงสร้างระบบราง เนื่องจากฐานรากสูญเสียความสามารถในการรองรับน้ำหนัก อีกทั้งยังอาจทำให้เกิดการลอยตัวของโครงสร้างได้ดิน

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดดินเหลว

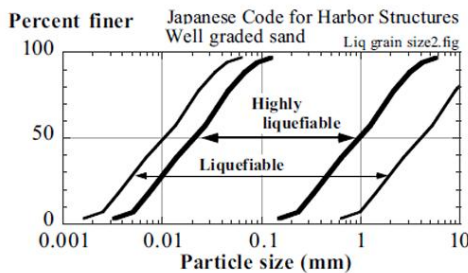
ในการศึกษาปรากฏการณ์การเกิดสภาวะดินเหลวอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวในจังหวัดเชียงรายครั้งนี้ ได้ให้ความสำคัญกับองค์ประกอบหลัก 3 ประการ ได้แก่

1) ชนิดและสภาวะของดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความไวในการเกิดดินเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ดินประกอบด้วยดินที่ไม่มีแรงยึดเกาะ (non-cohesive soils) หรือมีแรงยึดเกาะเพียงเล็กน้อย เช่น ดินทราย ดินทรายแข็ง และดินที่มีเม็ดดินขนาดเล็กละเอียดต่ำ หากเก็บตัวอย่างดินจากบริเวณที่เกิดสภาวะดินเหลวและนำมาวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีการร่อนตะแกรง (sieve analysis) จะพบว่าเส้นการกระจายขนาดของเม็ดดินจะอยู่ในช่วงขนาดที่เหมาะสมต่อการเกิดดินเหลว

ซึ่งมักปรากฏอยู่ในบริเวณของกราฟแสดงการกระจายขนาดเม็ดดินที่แสดงในรูปที่ 4 และ 5 โดยมีลักษณะเด่นคือ มีสัดส่วนของทรายละเอียดถึงทรายเป็นกลางที่มีความสม่ำเสมอสูง (uniform graded) และมีปริมาณเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ในระดับต่ำถึงปานกลาง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้โครงสร้างของดินมีความหลวมและมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดสภาวะดินเหลวเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

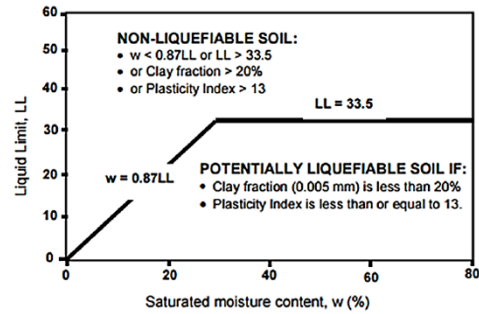


รูปที่ 4 ช่วงการกระจายขนาดของเม็ดดินที่มีโอกาสเกิดสภาวะดินเหลวกรณีดินทรายที่มีการกระจายขนาดโคลงไม่ตี [3]



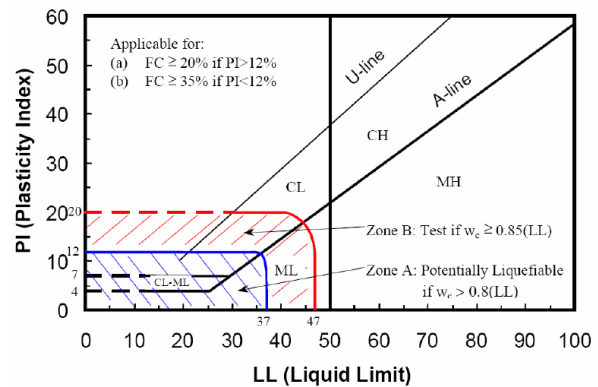
รูปที่ 5 ช่วงการกระจายขนาดของเม็ดดินที่มีโอกาสเกิดสภาวะดินเหลวกรณีดินทรายที่มีการกระจายขนาดโคลงดี [3]

นอกจากทรายแล้ว ยังพบว่าสภาวะดินเหลวจากแผ่นดินไหวสามารถเกิดในดินประเภททรายแป้งที่มีดัชนีพลาสติกต่ำ (low-plastic silt) รวมถึงดินเหนียวที่มีดัชนีพลาสติกต่ำ (low-plastic clay) ได้อีกด้วย โดยดินกลุ่มนี้มีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนต่ำหรืออ่อนตัวเมื่อได้รับแรงกระทำแบบวนซ้ำ (cyclic softening) หรือเข้าสู่สภาวะดินเหลวภายใต้แรงสั่นสะเทือนที่มีความรุนแรง ในเรื่องนี้ Wang [4] ได้รายงานไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1979 ซึ่งใกล้เคียงกับเงื่อนไขของลักษณะดินที่ Perlea และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาวิจัยและเสนอกราฟสำหรับการประเมินศักยภาพการเกิดสภาวะดินเหลวในดินเหนียวและทรายแป้ง โดยอาศัยคุณสมบัติทางพลาสติก (plasticity index) และปริมาณน้ำในดิน (water content) เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ซึ่งได้เผยแพร่มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 โดยกราฟดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 และได้ถูกนำมาใช้อ้างอิงอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมปฐพีเพื่อการประเมินความเสี่ยงการเกิดดินเหลวในดินเหนียวและทรายแป้งที่มีค่าพลาสติกต่ำ



รูปที่ 6 สภาพความชื้นและพิกัดเหลวของทรายแป้งและดินเหนียวที่มีศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว [5]

นอกจากนั้น ยังมีรายงานลักษณะของดินประเภททรายแป้งและดินเหนียวที่มีศักยภาพในการเกิดดินเหลวหรือการวิบัติจากแรงกระทำแบบวนซ้ำ (liquefaction or cyclic failure) ของดิน โดย Seed และคณะ ในปี 2003 [6] โดยพิจารณาจากปริมาณน้ำในดินร่วมกับขีดพิกัดเหลวและดัชนีพลาสติกของดินดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งบ่งบอกว่าดินที่มีดัชนีพลาสติกต่ำร่วมกับมีค่าพิกัดเหลวต่ำ จะเกิดปัญหากลายเป็นสภาวะดินเหลวได้หากมีปริมาณความชื้นในดินถึงร้อยละ 80 ของพิกัดเหลว



รูปที่ 7 กราฟแสดงคุณสมบัติของทรายแป้งและดินเหนียวที่อาจเกิดสภาวะดินเหลวได้ [6]

นอกจากนั้น ยังมีวิธีประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลวหรือการวิบัติภายใต้แรงกระทำแบบวนซ้ำของดินทรายแป้งและดินเหนียว ที่รายงานไว้โดย Boulanger และ Idriss ในปี ค.ศ. 2004 [7] ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากทรายแล้ว ทรายแป้งและดินเหนียวก็ยังมีศักยภาพในการเกิดดินเหลวได้

2) ระดับน้ำใต้ดินเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อการเกิดสภาวะดินเหลว เนื่องจากแรงดันน้ำในโพรงดิน (pore water pressure) เป็นปัจจัยที่สามารถสะสมและเพิ่มขึ้นภายใต้แรงกระทำจากการสั่นสะเทือน จนทำให้ความเค้นประสิทธิภาพในดินลดลงจนใกล้ศูนย์ ส่งผลให้ดินสูญเสียความแข็งแรงชั่วขณะและแสดงพฤติกรรมคล้ายของเหลวได้ ดังนั้น ชั้นดินที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ที่อยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำใต้ดินหรืออยู่ในสภาวะอิ่มน้ำเต็มที่ (fully saturated condition) จึงเป็นชั้นดินที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดสภาวะดินเหลวเมื่อได้รับแรงกระตุ้นจากภายนอก เช่น แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ลุ่ม น้ำท่วมถึง หรือพื้นที่สะสมตะกอนตามร่องน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีแนวโน้มที่ระดับน้ำใต้ดินจะอยู่ตื้น

3) แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เมื่อชั้นดินที่มีคุณสมบัติตามที่กล่าวไปก่อนหน้านี้และอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินแล้ว การเกิดสภาวะดินเหลวจะ

ขึ้นอยู่กับขนาดและระยะเวลาของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหว โดยความรุนแรงของแรงสั่นสะเทือนนั้นมักประเมินจากค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration; a_v หรือ PGA) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดหลักที่ใช้ในการประเมินศักยภาพการเกิดดินเหลว ค่า PGA ที่สูงและมีระยะเวลาการสั่นสะเทือนที่ยาวนาน จะเพิ่มความเป็นไปได้ที่แรงดันน้ำในโพรงดินจะสะสมจนดินสูญเสียความแข็งแรงได้ งานวิจัยของ Seed และ Idriss [8] ยืนยันว่าการเกิดสภาวะดินเหลวนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับ PGA และลักษณะการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ทั้งนี้ โดยทั่วไปค่า PGA จะขึ้นอยู่กับขนาดแผ่นดินไหว (magnitude), ระยะทางจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว (epicentral distance) และคุณสมบัติการขยายแรงสั่นสะเทือนของชั้นดิน (site amplification) ก็ล้วนเป็นปัจจัยร่วมที่ต้องพิจารณาอย่างรอบด้านในการประเมินความเสี่ยงของการเกิดสภาวะดินเหลวในพื้นที่ก่อสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่ ทั้งนี้ จากผลการศึกษาของ Ambraseys [9] ที่ถูกกล่าวถึงโดย Kramer [10] แสดงให้เห็นว่า เป็นไปได้ที่แผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงรายครั้งนั้น ซึ่งมีขนาด 6.3 อาจส่งผลให้เกิดสภาวะดินเหลวได้ไกลถึง 30 กิโลเมตรจากจุดศูนย์กลาง ซึ่งสอดคล้องกับผลการประมวลข้อมูลจากหลายแหล่งของ Towhata [3] pp.386

2.2 วิธีในการประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว

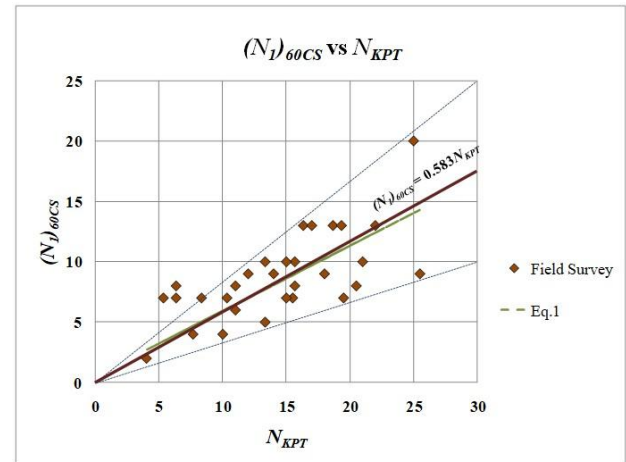
การประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว (liquefaction potential) เป็นกระบวนการสำคัญในการศึกษาความมั่นคงของดินในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวหรือแรงกระทำแบบวนซ้ำ โดยมีแนวทางการประเมินที่ได้รับการพัฒนาและนำมาใช้มากมายในช่วงกว่า 50 ปีที่ผ่านมา หนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมและยอมรับอย่างแพร่หลาย คือการคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลว (factor of safety against liquefaction, FSL) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าชั้นดินมีความปลอดภัยหรือมีความเสี่ยงต่อการเกิดดินเหลวภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหว

วิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด คือวิธีที่อาศัยผลการทดสอบในสนามด้วยการเจาะทะลวงมาตรฐาน หรือ standard penetration test (SPT-based method) วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Seed และ Idriss ในปี ค.ศ. 1967 [11] และได้ถูกพัฒนาต่อเนื่องมาตลอดหลายทศวรรษ เป็นสมการเชิงประจักษ์ ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลภาคสนามขนาดใหญ่ โดยเชื่อมโยงค่าความต้านทานของดินที่มีต่อหัวเจาะของ SPT (N-value) กับพฤติกรรมการเกิดดินเหลวจริงจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในหลายประเทศ

วิธี SPT-based method ใช้ค่า cyclic stress ratio (CSR) ที่เกิดจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว เปรียบเทียบกับ cyclic resistance ratio (CRR) ซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการเกิดดินเหลวของชั้นดิน ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจึงคำนวณได้จากอัตราส่วนของ CRR ต่อ CSR โดยหาก FS น้อยกว่า 1.0 ถือว่าชั้นดินนั้นมีความเสี่ยงสูงในการเกิดดินเหลว ต่อมามีการเพิ่มค่าปรับแก้ (correction factors) หลายประการ เช่น ค่าความลึก ระดับน้ำใต้ดิน ขนาดเม็ดดิน (fine content correction) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และการปรับตามขนาดของแผ่นดินไหว (magnitude scaling factor: MSF)

สำหรับการศึกษาในบทความนี้ได้เลือกใช้วิธีการที่กล่าวมานี้ โดยใช้การพัฒนาสูตร กราฟ และค่าปรับแก้ล่าสุดจาก Boulanger และ Idriss ในปี 2014 [12] ซึ่งได้ทำการรวบรวมข้อมูลภาคสนามจำนวนมาก ปรับสมการให้มีความเหมาะสมสำหรับดินประเภทต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินทรายแป้ง และดินที่มีสัดส่วนดินเม็ดละเอียดสูง รวมทั้งแนะนำวิธีการแปลงค่าผลการทดสอบจากค่า N_{SPT} ให้เป็นค่า $(N_1)_{60CS}$ ที่สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่า FSL ได้ในที่สุด อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Sethabouppha [13] ได้พบว่า การทดสอบชั้นดินด้วยวิธีเจาะหยั่งแบบคุนเซลสแตป (Kunzelstab

penetration test) ก็สามารถใช้ทดแทนวิธีเจาะหยั่งแบบมาตรฐานได้ เพียงแต่ต้องปรับเทียบค่า N_{KPT} ให้เป็น $(N_1)_{60CS}$ ตามกราฟในรูปที่ 8 ดังนี้



รูปที่ 8 กราฟสำหรับปรับเทียบค่า N_{KPT} ให้เป็น $(N_1)_{60CS}$ [13]

ดังนั้น ในการวิเคราะห์ ในการวิจัยนี้ จึงได้ทำการสำรวจชั้นดินด้วยการเจาะหยั่งแบบคุนเซลสแตป ประกอบกับการเก็บตัวอย่างดินด้วยออเกอร์มือ (hand auger) ซึ่งมีข้อดีคือ มีจำนวนอุปกรณ์น้อย น้ำหนักเบา สามารถทดสอบได้ในจุดที่นำเครื่องมือเจาะหยั่งแบบมาตรฐานเข้าไปได้ยาก ข้อเสียคือ การเจาะได้ความลึกจำกัด เนื่องจากก้านเจาะมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก การตอกลึกเกิน 4 เมตร ก้านเจาะจะเกิดการดุ้ง และอาจทำให้ได้ค่า N_{KPT} มากเกินกว่าที่ควร

3. กระบวนการศึกษา

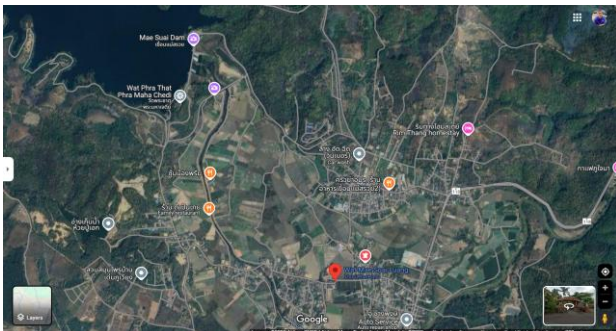
3.1 การสำรวจภาคสนาม

การสำรวจภาคสนามเริ่มตั้งแต่การศึกษาศาสนาที่ตั้งและลักษณะภูมิประเทศ บริเวณที่ก่อสร้างพระพุทธรูปหลวงพ่อยี่สิบแสน ณ วัดแม่สรวยหลวง จังหวัดเชียงราย เป็นพื้นที่ที่เกิดจากการถล่มดินยกระดับสูงกว่าพื้นที่เดิมซึ่งเคยเป็นท้องนา โดยมีความสูงจากระดับเดิมไม่เกิน 1 เมตร ลักษณะทางภูมิประเทศโดยรอบเป็นที่ลุ่มริมลำน้ำแม่สรวย โดยมีทุ่งนาอยู่ทั้งด้านหลังและด้านข้างของวัด (ดังแสดงในภาพที่ 9) และมีการทำนาต่อเนื่องเกือบตลอดทั้งปี อีกทั้งยังมีเขื่อนแม่สรวยตั้งอยู่ทางเหนือ ห่างจากวัดไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือประมาณ 1 กิโลเมตร (ภาพที่ 10) พื้นที่ลักษณะเช่นนี้จัดเป็นพื้นที่สะสมตะกอนน้ำพา (alluvial deposits) ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยดินทรายละเอียด ทรายแป้ง และดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกต่ำ

ตามหลักธรณีวิทยาวิศวกรรม ชั้นดินตะกอนสะสมที่เกิดจากการทับถมของแม่น้ำในพื้นที่ลุ่ม มักจะมีโครงสร้างเม็ดดินที่หลวมและมีระดับน้ำใต้ดินตื้น จึงมีความอ่อนไหวต่อการเกิดการอ่อนตัวภายใต้แรงกระทำแบบวนซ้ำ (cyclic softening) และสามารถเข้าสู่สภาวะดินเหลวได้หากได้รับแรงสั่นสะเทือนที่มีความรุนแรงเพียงพอจนแรงดันน้ำในโพรงดินสูงขึ้นจนเท่ากับแรงดันรวมในดิน (total stress) Ishihara [14] ได้อธิบายไว้อย่างชัดเจนว่าพื้นที่ที่มีชั้นดินทรายอมน้ำตื้นใต้ชั้นดินเหนียวอ่อน และมีค่าดัชนีพลาสติกต่ำ จะมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดสภาวะดินเหลวเมื่อได้รับแรงกระตุ้นจากแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง นอกจากนี้ Seed และ Idriss [11] ก็ได้ยืนยันว่าชั้นดินที่เกิดจากตะกอนน้ำพา โดยเฉพาะในพื้นที่ราบลุ่มและแอ่งที่มีน้ำท่วมถึง เป็นชั้นดินที่มีศักยภาพในการขยายแรงสั่นสะเทือน (site amplification) และมีความไวต่อการสูญเสียกำลังรับแรงเฉือนภายใต้แรงกระทำแบบวนซ้ำได้ง่าย



รูปที่ 9 บริเวณวัดแม่สรวยหลวง มีสภาพเป็นที่ลุ่ม รายล้อมด้วยทุ่งนาและพื้นที่เกษตรกรรม (ภาพจาก Google Streetview)



รูปที่ 10 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงตำแหน่งวัดแม่สรวยหลวงและพื้นที่โดยรอบใกล้ลำน้ำแม่สรวยและเขื่อนแม่สรวยทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (ภาพจาก Google Satellite)

เป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้ในการเก็บข้อมูลชั้นดินและประเมินความแข็งแรงของดินในพื้นที่จริง โดยทำการเจาะหยั่งชั้นดินจำนวน 2 หลุมเจาะ ห่างออกไปประมาณ 10 เมตร ในทุ่งนาด้านหลังฐานองค์พระที่ได้รับความเสียหายดังรูปที่ 11 สาเหตุที่ต้องเจาะสำรวจด้านหลังกองบริเวณวัดเนื่องจากในรั้ววัดบริเวณนี้เป็นพื้นที่ส่วนขยายของวัดซึ่งเดิมเป็นทุ่งนา และถูกถมด้วยดินปนหินที่ได้มาจากการก่อสร้างเขื่อนแม่สรวยเมื่อหลายปีก่อน จึงเป็นเหตุให้ไม่สามารถเจาะสำรวจด้วยเครื่องมือที่นำไปใช้ได้

การสำรวจได้ดำเนินการโดยมีการเจาะหยั่งทดสอบแบบคุนเซนส์แตป Kunzelstab penetration test (KPT) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เป็นวิธีการหยั่งดินที่ใช้ลูกตุ้มโลหะหนัก 10.9 กิโลกรัม ตกจากความสูง 67 เซนติเมตร กระแทกผ่านก้านเจาะลงไปในชั้นดิน โดยมีหัวเจาะรูปกรวยที่ปลาย ผลการทดสอบบันทึกเป็นจำนวนครั้งการตกในทุกระยะความลึก 20 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นตัวแทนค่าความแน่นและความต้านทานของชั้นดิน (N_{KPT}) ซึ่งสามารถนำไปแปลงเป็นค่า (N_1)_{60CS} สำหรับคำนวณค่า FSL ได้ดังที่กล่าวมาแล้ว

นอกจากนั้น ยังได้เก็บตัวอย่างดินด้วยเครื่องมือ Hand Auger ที่ความลึกต่าง ๆ สำหรับการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การร่อนตะแกรง ความชื้น และพิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก ทั้ง 2 หลุมถูกเจาะและเก็บตัวอย่างในช่วงความลึกถึง 2.5 เมตร แต่อย่างไรก็ตาม ได้พบว่าเกิดข้อผิดพลาดบางประการในการเก็บรักษาตัวอย่างดินที่ได้จากหลุม BH-1 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างดินจากหลุม BH-2 เท่านั้น



รูปที่ 11 ตำแหน่งที่ได้ดำเนินการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินหลังพระลัม (ภาพเขียนเพิ่มเติมจาก Google Satellite)

3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างดินที่เก็บจากบริเวณใกล้ฐานพระพุทธรูปหลวงพ่อเชียงแสน ณ วัดแม่สรวยหลวง จังหวัดเชียงราย ได้ถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM เพื่อให้ได้ข้อมูลสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ถูกต้อง สำหรับนำไปใช้ประกอบในการประเมินศักยภาพการเกิดสภาวะดินเหลว การทดสอบที่ดำเนินการประกอบด้วย

- 1) การทดสอบความชื้น (Moisture Content) โดยการนำตัวอย่างดินเข้าเตาอบที่อุณหภูมิคงที่ และชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการอบ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความชื้นของดินในแต่ละระดับความลึกที่เก็บตัวอย่าง
- 2) การทดสอบขนาดเม็ดดิน (Sieve Analysis) โดยใช้วิธีการร่อนผ่านชุดตะแกรงมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ ที่มีขนาดตั้งแต่ 3/4 นิ้ว จนถึง No.200 (0.075 มิลลิเมตร) ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน และจำแนกประเภทดินตามมาตรฐาน USCS
- 3) การทดสอบค่าพิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก (Atterberg Limits) เพื่อหาค่าขีดจำกัดสถานะของดิน ได้แก่ ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit: LL), ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit: PL) และคำนวณค่า Plasticity Index (PI) สำหรับการใช้จำแนกประเภทดินเพิ่มเติมตามระบบ USCS

3.3 การประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลวของชั้นดิน

ในการประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลวของชั้นดินนั้น ได้ใช้วิธี stress-based approach ที่เสนอโดย Boulanger และ Idriss ในปี 2014 [12] ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ สำหรับคำนวณค่า FSL ของดินที่ระดับความลึกต่างๆ มีกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน จึงไม่ได้นำมาแสดงไว้ในบทความนี้

4. ผลการสำรวจชั้นดิน การทดสอบ และวิเคราะห์ผล

4.1 ลักษณะชั้นดิน

จากผลการสำรวจหลุมเจาะหมายเลข BH-2 เมื่อวันที่ 18 ธันวาคม 2564 และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าลักษณะชั้นดินในพื้นที่ฐาน

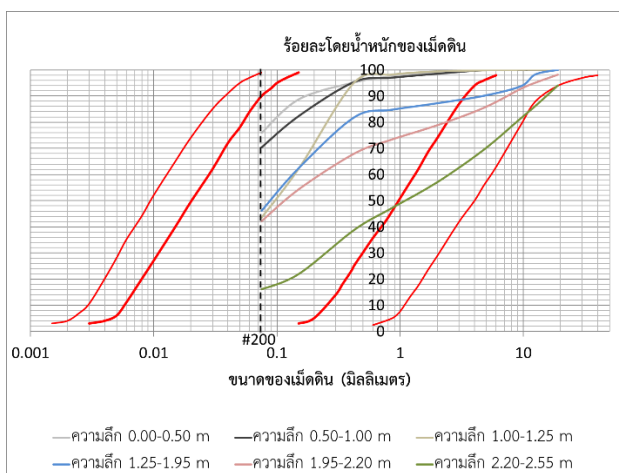
องค์พระพุทธรูปหลวงพ่อเชียงแสน ณ วัดแม่สรวยหลวง จังหวัดเชียงราย สามารถจำแนกได้ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ผลการจำแนกประเภทของดิน พิกัดอัตโนมัติเพอร์ค และความชื้นในดิน

ความลึก		USCS (% ผ่าน #200)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	ความชื้น	
จาก (m)	ถึง (m)					ในดิน (%)	% to LL
0.00	0.25	CL (75.83)	35.68	23.79	11.89	28.26	79.20
0.25	0.35					25.27	70.82
0.35	0.50					28.34	79.43
0.50	0.65	CL (70.42)	31.49	20.03	11.46	33.12	105.18
0.65	0.85					30.62	97.24
0.85	1.00					28.85	91.62
1.00	1.15	SC (43.64)	28.22	14.44	13.78	28.55	101.17
1.15	1.25					25.89	91.74
1.25	1.50					29.05	102.76
1.50	1.95	SC (46.22)	28.27	18.54	9.74	26.25	92.85
1.95	2.15					32.08	110.69
2.15	2.20					23.26	80.26
2.20	2.35	SM (16.18)	24.75	21.65	3.09	18.09	73.09
2.35	2.55					40.89	165.21

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ดินตั้งแต่ความลึก 0.50 เมตรลงไปนั้น เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำและมีความชื้นในดินสูงเกินร้อยละ 90 ของค่าพิกัดเหลว (LL) ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นดินเหนียวที่อาจเกิดสถานะดินเหลวหรืออ่อนกำลังลงจากการถูกกระทำด้วยแรงวนซ้ำได้ สิ่งที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งคือ การสำรวจชั้นดินครั้งนี้ได้กระทำในเดือนธันวาคม หลังการเกี่ยวข้าว ซึ่งชั้นหน้าดินค่อนข้างแห้ง (ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดินประมาณ 2.00 เมตร) แต่แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 นั้น พื้นที่รอบๆ วัดอยู่ในฤดูทำนาปรัง กอปรกับการมีฝนตกเกือบทุกวันในช่วงก่อนแผ่นดินไหวนั้น ดินชั้นบนสุด (0.5 เมตรแรก) จึงน่าจะมีความชื้นใกล้เคียงกับดินที่อยู่ลึกกว่า หรือไม่ก็อยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้มากที่ชั้นหน้าดินซึ่งหนา 0.5 เมตรจะตกอยู่ในสภาวะเดียวกันกับดินข้างล่าง

นอกจากนั้น หากพิจารณาการกระจายขนาดผลของเม็ดดินชั้นต่างๆ ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งมีการเปรียบเทียบกับขอบเขตการกระจายของดินที่มีศักยภาพในการเกิดดินเหลวในรูปที่ 4 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าชั้นดินที่ 2 (SC) และ 3 (SM) ซึ่งอยู่ที่ความลึกกว่า 1 เมตรลงไปนั้น อยู่ในขอบเขตค่อนข้างชัดเจน ส่วนชั้นดินที่ 1 (CL) ซึ่งเป็นความลึก 1 เมตรแรกจากผิวดินยังไม่ชัดเจน แต่แนวโน้มของกราฟอาจจะคาดได้ว่าประมาณร้อยละ 50 น่าจะอยู่ในบริเวณขอบข่ายสุดของเส้นขอบเขตในกราฟ



รูปที่ 12 การกระจายขนาดผลของเม็ดดินที่ความลึกต่างๆ ของหลุม BH-2

นอกจากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีผลการสำรวจชั้นดินด้วยคอนเซลสแตปที่แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งในตารางนี้ได้แสดงค่า N จากการทดสอบคอนเซลสแตป และปรับให้เป็นค่า $(N_1)_{60CS}$ จากการใช้กราฟในรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ดินชั้นบนที่เป็นดินเหนียวพลาสติกต่ำ (CL) ซึ่งลึกประมาณ 1.50 เมตรนั้นเป็นดินที่อ่อนกว่าดินชั้นล่างลงไป ชั้นดินค่อยๆ มีความต้านทานการตอกทะลวงเพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนเป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC) และความต้านทานการตอกทะลวงเมื่อลึกกว่า 2.50 เมตรจะเริ่มคงที่

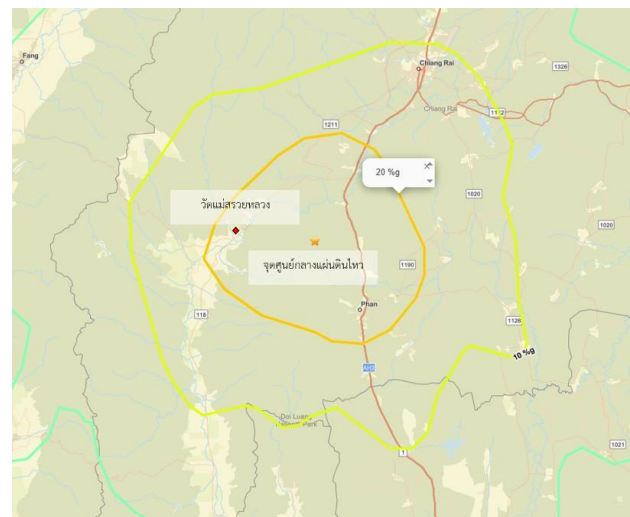
ผลการทดสอบทั้งหมดได้ถูกนำไปใช้ประกอบในการวิเคราะห์และคำนวณค่าสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลว (FSL) โดยใช้วิธีการ stress-based approach และนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบภาคสนาม เพื่อยืนยันความถูกต้อง ในขั้นตอนถัดไป

ตารางที่ 2 บันทึกผลการตอกทะลวงด้วย KPT (N) และปรับเป็นค่า $(N_1)_{60CS}$

Depth (m.)	N	$(N_1)_{60CS}$	$(N_1)_{60CS}$	Soil	Typical name
-0.20	4	9	0.00 0 20 30 -0.50 -1.00 -1.50 -2.00 -2.50 -3.00 -3.50 -4.00	CL	low plasticity clay
-0.40	4	9		CL	low plasticity clay
-0.60	3	8		CL	low plasticity clay
-0.80	2	7		CL	low plasticity clay
-1.00	3	8		CL	low plasticity clay
-1.20	4	9		CL	low plasticity clay
-1.40	5	10		SC	Clayey sand
-1.60	5	10		SC	Clayey sand
-1.80	9	15		SC	Clayey sand
-2.00	9	15		SC	Clayey sand
-2.20	13	19	-2.50 -3.00 -3.50 -4.00	SC	Clayey sand
-2.40	20	24		SM	Silty sand
-2.60	23	27		SM	Silty sand
-2.80	20	27		SM	Silty sand
-3.00	19	27		SM	Silty sand
-3.20	16	27		SM	Silty sand
-3.40	16	27		SM	Silty sand

4.2 การประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลว (Liquefaction Potential Assessment)

ค่า $(N_1)_{60CS}$ ในตารางได้ถูกนำไปคำนวณค่า FSL ตามวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยในการคำนวณนั้นมีตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งคือ ค่าความแรงสูงสุดของพื้นดิน แต่เนื่องจากไม่มีเครื่องมือตรวจวัดสัญญาณคลื่นแผ่นดินไหวที่บริเวณวัดแม่สรวยหลวง จึงได้ใช้วิธีประมาณจากแผนที่การสั่นสะเทือนของพื้นดินของหน่วยงานสำรวจทางธรณีวิทยาของสหรัฐอเมริกา (USGS Shakemap) ตามรูปที่ 11 ดังต่อไปนี้

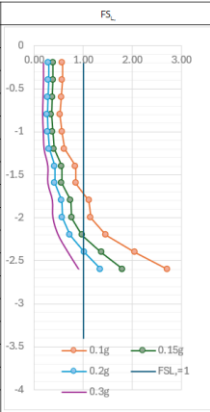


รูปที่ 13 ตำแหน่งของวัดแม่สรวยหลวงเทียบกับแผนที่ USGS Shakemap [15]
(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000qack/map>)

ซึ่งพบว่าตำแหน่งของวัดแม่สรวยหลวงอยู่ในเส้นคอนทัวร์ของ 0.2g ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ค่าระหว่าง 0.10g ถึง 0.30g และได้ผลการคำนวณค่า FSL ที่ความเร่งต่างๆ ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลวของชั้นดินวัดแม่สรวยหลวง

Depth (m.)	Soil	$F_{SL,0.1g}$	$F_{SL,0.15g}$	$F_{SL,0.2g}$	$F_{SL,0.3g}$
-0.20	CL	0.58	0.39	0.29	0.19
-0.40	CL	0.58	0.39	0.29	0.19
-0.60	CL	0.56	0.37	0.28	0.19
-0.80	CL	0.53	0.35	0.27	0.18
-1.00	CL	0.57	0.38	0.28	0.19
-1.20	CL	0.62	0.41	0.31	0.21
-1.40	SC	0.85	0.56	0.42	0.28
-1.60	SC	0.85	0.57	0.42	0.28
-1.80	SC	1.12	0.75	0.56	0.37
-2.00	SC	1.15	0.77	0.58	0.38
-2.20	SC	1.47	0.98	0.73	0.49
-2.40	SM	2.06	1.37	1.03	0.69
-2.60	SM	2.71	1.81	1.36	0.90
-2.80	SM	-	-	-	-
-3.00	SM	-	-	-	-
-3.20	SM	-	-	-	-
-3.40	SM	-	-	-	-



จากผลการคำนวณในตารางที่ 3 พบว่า เมื่อใช้ค่า PGA เท่ากับ 0.1g ในการคำนวณ จะเห็นได้ว่าชั้นดินที่ระดับความลึกระหว่าง -0.2 เมตร ถึง -1.6 เมตร มีค่าสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดสภาวะดินเหลวต่ำกว่า 1.00 ซึ่งบ่งชี้ว่าชั้นดินในช่วงความลึกดังกล่าวมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดสภาวะดินเหลวภายใต้แรงสั่นสะเทือนที่พิจารณา นอกจากนี้ หากใช้ค่า PGA ที่มากกว่า 0.1g ในการคำนวณ จะพบว่าชั้นดินที่มีความลึกระหว่าง -0.2 เมตร ถึง -2.0 เมตร มีแนวโน้มที่จะเข้าสู่สภาวะดินเหลวได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นดินชั้นนี้ในพื้นที่ดังกล่าวมีความอ่อนไหวสูงต่อแรงสั่นสะเทือน และอาจส่งผลกระทบโดยตรงต่อความมั่นคงของโครงสร้างฐานรากองค์พระหากเกิดแผ่นดินไหวหรือแรงสั่นสะเทือนในระดับที่สูงกว่า 0.1g

5. บทสรุป

1) ชั้นดินที่รองรับองค์พระพุทธรูปเชียงแสนที่กำลังอยู่ในระหว่างการก่อสร้างในกรณีนั้น เป็นตัวอย่างที่ชัดเจนว่า ปัญหาการทรุดตัวเกิดขึ้นได้จากการเกิดสภาวะดินเหลวของชั้นดินตั้งแต่ผิวดินลงไป สำหรับดินชั้นบนสุดซึ่งจัดเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (low plastic clay: CL) หรือแม้กระทั่งทรายแป้งที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (low plastic silt: ML) นั้น อาจไม่เป็นที่ทราบกันทั่วไปนัก ว่าสามารถเกิดสภาวะดินเหลวได้ ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวมาข้างต้นแล้ว อาจเรียกเป็นอย่างอื่นด้วย เช่น การอ่อนกำลังจากแรงกระทำวนซ้ำ (cyclic softening) หรือการวิบัติจากแรงกระทำวนซ้ำ (cyclic failure) ซึ่งไม่น่าแปลกใจเนื่องจากดินที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ ก็คือดินที่มีแรงยึดเกาะ (cohesion) น้อย เมื่อจับดูจะพบว่าอนุภาคดินไม่เหนียวติดมือ ลักษณะเป็นทรายที่เม็ดละเอียดมาก

จากผลการคำนวณค่า FSL ในตารางที่ 3 นั้น บ่งบอกว่าชั้นทรายที่ระดับความลึกมากกว่า 2.00 เมตรลงไป มีศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลวมากกว่าดินเหนียวพลาสติกต่ำที่อยู่ข้างบนเสียด้วยซ้ำ ทั้งนี้ปัจจัยที่ทำให้ค่า FSL สูงกว่าก็คือ ชั้นทรายมีค่าด้านทานการตอกทะลุมากกว่าชั้นดินเหนียวข้างบน อย่างไรก็ตาม การเจาะสำรวจชั้นดินนี้ได้ดำเนินการหลังจากเกิดแผ่นดินไหวแล้ว (post-liquefaction study) ชั้นดินทรายข้างล่างอาจอยู่ในสภาพที่แน่นกว่าก่อนเกิดแผ่นดินไหวก็เป็นได้

2) การใช้วิธีประเมินศักยภาพในการเกิดดินเหลวด้วยวิธี stress-based approach ให้ผลค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจ สามารถประเมินค่า FSL ได้ทั้งชั้นดินทรายและดินเหนียวหรือทรายแป้งที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ ของวิธีที่ใช้ในการศึกษาโครงการนี้ [12] มีเส้นกราฟสำหรับดินเหนียวหรือดินที่มีสัดส่วนของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (fine content) แยกออกจากทรายเกือบทุกค่า

ดังนั้น ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การประเมินศักยภาพในการเกิดสภาวะดินเหลวของชั้นดินจำเป็นต้องพิจารณาในชั้นดินเหนียวและทรายแป้งที่มีความเป็นพลาสติกต่ำด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากชั้นดินเหล่านี้มีความชื้นสูงตั้งแต่ประมาณร้อยละ 90 ขึ้นไปเมื่อเทียบกับค่าพิคตเหลว ควรต้องพิจารณาใช้ฐานรากลึกสำหรับก่อสร้าง เช่นเสาเข็ม หรืออาจต้องพิจารณาใช้การปรับปรุงดิน

อย่างไรก็ตามประเด็นที่ควรต้องทำการศึกษาวิจัยอย่างละเอียดต่อไปว่า พฤติกรรมการเกิดสภาวะดินเหลวหรือการอ่อนกำลังภายใต้แรงกระทำแบบวนซ้ำของดินเหนียวหรือทรายแป้งที่มีพลาสติกต่ำนั้น สามารถป้องกันปัญหาการอ่อนกำลังได้อย่างไร โดยอาจจะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของดิน การเลือกใช้เสาเข็ม ตลอดจนถึงการศึกษาวิเคราะห์ผลจากการอ่อนตัวของดินชนิดนี้ว่าจะเกิดขึ้นกับโครงสร้างอาคารหรือสิ่งก่อสร้างที่ตั้งอยู่ข้างบน เช่น การขยายขนาดการสั่นไหว (amplification) ของสิ่งก่อสร้าง เพื่อจะได้ออกแบบสิ่งก่อสร้างให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา. (2557). รายงานการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม 2557 เวลา 18.08 น. เอกสารวิชาการ เลขที่ 550.341-01-2557. (ออนไลน์ <https://earthquake.tmd.go.th/documents/file/ดาวน์โหลด20เมษายน2568>).
- [2] United States Geological Survey (USGS). (2014). Earthquake event page: M6.1 - 9km SSW of Mae Lao, Thailand. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000qack/executive>
- [3] Towhata, I. (2008). Geotechnical Engineering, Springer-Verlag, pp.426.
- [4] Wang, W.S. (1979). Some Findings in Soil Liquefaction. Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1979.
- [5] 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.
- [6] Seed, R.B., Cetin, K.O., Moss, R.E.S., Kammerer, A., Wu, J., Pestana, J., Riemer, Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., and Faris, A. (2003). Recent Advances in Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework. Keynote present at 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar. Long Beach, CA, USA.
- [7] Boulanger, R.W., and Idriss, I.M. (2004). Evaluating the Potential for Liquefaction or Cyclic Failure of Silts and Clays, Report No. UCD/CGM-04/01, The University of California at Davis, CA, USA.

- [8] Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(SM9), 1249–1273.
- [9] Ambraseys, N.N. (1988). *Engineering Seismology. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 17, pp. 1-105.
- [10] Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, pp.353
- [11] 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.
- [12] Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis.
- [13] Sethabouppha, S. (2020). An Experience of Using Dynamic Cone Test to Evaluate Liquefaction Potential of Liquefied Subsoil Layers. 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan, September 13-18, 2020. Paper No. C001574.
- [14] Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford University Press.
- [15] United States Geological Survey (USGS). (2014). *Earthquake event page: M6.1 - 9km SSW of Mae Lao, Thailand*. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000qadc/map>