ปัญหาจากดินทรายแป้งที่อาจเป็นไปได้จากแรงกระทำวนซ้ำจากการวิ่งของรถไฟ
Possible Problems of Silty Soils Caused by Cyclic Loading from Train Operations

นีรวิชญ์ เดียวสุรินทร์[1,*] และเศรษฐพงศ์ เศรษฐบุปผา[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่
**Corresponding author; E-mail address: neerawich_d@cmu.ac.th*

บทคัดย่อ

ดินทรายแป้งในสภาวะปกติเป็นดินที่มีความแข็งแรงพอประมาณ แต่ในบางสภาวะก็อาจเกิดปัญหาการอ่อนตัวขึ้นได้โดยเฉพาะเมื่อได้รับแรงกระทำแบบวนซ้ำ บทความปริทัศน์นี้รวบรวมและวิเคราะห์ความรู้ในปัจจุบันเกี่ยวกับแนวโน้มพฤติกรรมของดินทรายแป้งภายใต้แรงกระทำวนซ้ำจากการวิ่งของรถไฟซึ่งอาจส่งผลให้ระบบโครงสร้างของทางรถไฟเกิดการวิบัติ โดยเฉพาะทางรถไฟที่สร้างใหม่ จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงกลของดินและการเกิดสภาวะดินเหลวของดินทรายแป้ง ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของฐานรากทางรถไฟ ได้แก่ คุณสมบัติเบื้องต้นของดิน การมีค่าดัชนีพลาสติกต่ำ ความถี่และขนาดของแรงกระทำแบบวนซ้ำ และการมีน้ำใต้ดิน กอปรกับการเป็นแหล่งสะสมตะกอนของทรายแป้งในพื้นที่จังหวัดเชียงราย ซึ่งได้เกิดสภาวะดินเหลวเนื่องจากแผ่นดินไหวในปี พ.ศ.2557 มาแล้ว และขณะนี้ได้มีการก่อสร้างทางรถไฟจากอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ ไปจนถึงอำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย จึงอาจเกิดปัญหาการอ่อนตัวของทรายแป้งในเส้นทางรถไฟใหม่ดังกล่าวได้ จึงเห็นควรต้องมีการศึกษาวิจัยพฤติกรรมของทรายแป้งในเส้นทางรถไฟดังกล่าว ภายใต้แรงกระทำแบบวนซ้ำจากการวิ่งของรถไฟบนเส้นทางที่ถูกสร้างใหม่และมีแนวโน้มที่จะพบทรายแป้งได้ เพื่อจะได้หาทางป้องกันหรือแก้ไขปัญหาต่อไป

คำสำคัญ: ดินทรายแป้ง, แรงกระทำวนซ้ำ, โครงสร้างทางรถไฟ, การอ่อนกำลังของดิน

Abstract

Silty soils are generally moderately strong under normal conditions, but they can weaken in certain situations, especially when subjected to repeated loading. This review article compiles and analyzes current knowledge on the behavior of silty soils under cyclic loading caused by train operations, which may result in failure of railway structural systems, particularly in newly constructed railways. Studies indicate that several factors influence the mechanical changes in silty soils and the potential for liquefaction, which affects the stability of railway foundations. These factors include the soil's inherent properties, low plasticity index, frequency and magnitude of cyclic loading, and groundwater presence. Additionally, silty soil deposits are found in Chiang Rai Province, where liquefaction occurred due to an earthquake in 2014. With the ongoing construction of a railway from Den Chai District, Phrae Province, to Chiang Khong District, Chiang Rai Province, there is concern that silty soils along the route may weaken. Therefore, further research is needed to study the behavior of silty soils in this railway section under cyclic loading from train operations. The findings will help develop preventive or corrective measures to mitigate potential issues.

Keywords: silt, cyclic loading, railway structures, cyclic softening of silty soils

1. บทนำ

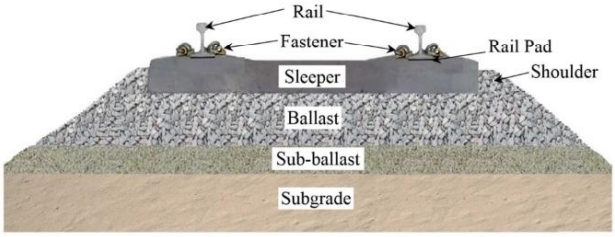
ในปัจจุบันประเทศไทยกำลังอยู่ในช่วงเวลาของการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งสาธารณะทางรางครั้งใหญ่ เพื่อให้ครอบคลุมทั่วถึงในแต่ละพื้นที่ของประเทศ ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยในอนาคต โดยโครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย-เชียงราย-เชียงของ นั้นเป็นส่วนหนึ่งของยุทธศาสตร์การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่งของไทยภายใต้แผนพัฒนาระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) ที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการขนส่งทั้งผู้โดยสารและสินค้า การก่อสร้างทางรถไฟในโครงการดังกล่าวถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่ต้องใช้องค์ความรู้ทางวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมธรณีเทคนิคในการออกแบบหรือวิเคราะห์ เพื่อคำนึงถึงความปลอดภัยและความมั่นคงของโครงสร้างทางรถไฟ [1]

ประเทศไทยนั้นมีความต้องการที่จะขยายโครงข่ายเส้นทางรถไฟให้มากขึ้น ทำให้มีการขยายการก่อสร้างไปในพื้นที่ใหม่ โดยการก่อสร้างรางรถไฟในพื้นที่ใหม่ที่ยังไม่เคยมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานมาก่อนถือเป็นความท้าทายทางวิศวกรรมที่ต้องการความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับสภาพดินและพฤติกรรมของดินในพื้นที่นั้นๆ เนื่องจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติดินในพื้นที่ที่ไม่เคยมีการพัฒนามาก่อน ทั้งในแง่ของคุณสมบัติดินและพฤติกรรมของดินเมื่อต้องรับแรงสั่นสะเทือนและแรงกระแทกจากรถไฟที่วิ่งผ่านอย่างต่อเนื่องซึ่งอาจแตกต่างจากพื้นที่ที่เคยทำการก่อสร้างทางรถไฟมาก่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการก่อสร้างในบางพื้นที่อาจพบกับดินทรายแป้ง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาการทรุดตัวหรือพฤติกรรมที่นำไปสู่การวิบัติของชั้นดินเดิม (subgrade) ในระยะยาว [2]

ในการก่อสร้างทางรถไฟนั้น ชั้นดินเดิมมีบทบาทสำคัญต่อความเสถียรของโครงสร้าง [3] แต่กลับมักถูกละเลยหรือไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร เพื่อให้การก่อสร้างทางรถไฟมีเสถียรภาพ ปลอดภัย และยั่งยืนในระยะยาว จำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติดินทรายแป้งและการตอบสนองของดินทรายแป้งต่อแรงวนซ้ำที่เกิดจากรถไฟ เพื่อเป็นแนวทางในการช่วยสนับสนุนให้การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมของประเทศเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนต่อไปในอนาคต

2. โครงสร้างฐานรากรางรถไฟ

องค์ประกอบโครงสร้างทั่วไปของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง (ballasted track) จะแสดงดังรูปที่ 1 โดยโครงสร้างทางรถไฟ (track structural component) นั้นจะประกอบด้วย โครงสร้างส่วนบนของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง (super-structure) และโครงสร้างส่วนล่างของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง (sub-structure) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างฐานรากทั่วไปของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง [4]

2.1 โครงสร้างส่วนบนของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง

โครงสร้างส่วนบนของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง ประกอบด้วย ราง (rail) แผ่นรองราง (rail pad) เครื่องยึดเหนี่ยวราง (fastener) และหมอนรองราง (sleeper)

2.2 โครงสร้างส่วนล่างของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง

โครงสร้างส่วนล่างของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง หมายถึงส่วนประกอบของทางรถไฟที่ต่ำกว่าหมอนรองราง ลงมา โดยหน้าที่หลักของโครงสร้างส่วนล่าง คือ รองรับและให้การยึดตัวโครงสร้างส่วนบนของทางรถไฟ กระจายน้ำหนักจากการจราจรจากโครงสร้างส่วนบนลงไปยังชั้นดินพื้นทาง และมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

ชั้นหินโรยทาง (ballast) หมายถึงชั้นที่อยู่บนสุดของโครงสร้างทางส่วนล่าง ก่อสร้างจากหินอนุภาคบดอัด มีช่องว่าง ระหว่างอนุภาคหิน ทำให้ระบายน้ำได้ดี

ชั้นหินรองฐาน (sub-ballast) หมายถึงชั้นที่อยู่ใต้ชั้นหินโรยทางและบนชั้นดินพื้นทาง ก่อสร้างจากหินและดิน อนุภาคบดอัด ทำหน้าที่แบ่งแยกและป้องกันไม่ให้ชั้นหินโรยทางแทรกตัวหรือจมลงไปในพื้นทาง

ชั้นดินเดิม (subgrade) หมายถึงส่วนของพื้นทางใต้ชั้นดินถมพื้นทางในกรณีทางถม และต่ำกว่าชั้นดิน ใต้หินโรยทางในกรณีทางตัดลงไปและจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักคงที่ (dead load) ของพื้นทาง และน้ำหนักจร (live load) [5]

3. ดินทรายแป้ง

ดินทรายแป้ง (silt soil) เป็นดินชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ซึ่งอยู่ระหว่างดินทรายและดินเหนียว คุณสมบัติพื้นฐานและเชิงกายภาพของดินชนิดนี้มีผลอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมทางวิศวกรรม โดยเฉพาะในการรองรับน้ำหนัก ความเสถียรของโครงสร้าง และการตอบสนองต่อแรงกระทำต่าง ๆ ของดิน ในอดีตการศึกษาพฤติกรรมของดินชนิดต่าง ๆ จะมุ่งเน้นในการศึกษาดินทรายและดินเหนียวเป็นหลัก โดย Lacasse และ Nadim [6] ได้ชี้ให้เห็นว่าประเด็นสำคัญในวิศวกรรมปฐพี คือ ความจำเป็นในการพัฒนาข้อมูลที่อธิบายพฤติกรรมแบบคงที่ (static behavior) และแบบวนซ้ำ (cyclic behavior) ของดินทรายแป้ง (silts) และดินทรายปนแป้ง (silty sands) ซึ่งได้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการทำความเข้าใจดินประเภทนี้ [6] เนื่องจากมีการตอบสนองที่ซับซ้อนภายใต้เงื่อนไขการรับน้ำหนักที่และสภาวะความชื้นหลากหลาย

3.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินทรายแป้ง

โดยทั่วไปดินทรายแป้งประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.002 ถึง 0.075 มิลลิเมตร [7] ซึ่งมีความละเอียดกว่าเม็ดทรายแต่หยาบกว่าดินเหนียว ขนาดอนุภาคนี้ทำให้ดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง แต่มีการระบายน้ำต่ำ คุณสมบัติในการระบายน้ำต่ำทำให้ดินชนิดนี้มีความเสี่ยงต่อการสะสมแรงดันน้ำในรูพรุน (pore water pressure) เมื่ออยู่ในสภาพที่อิ่มน้ำ ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาความไม่เสถียรของดินได้ [8] อีกทั้งคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ซึ่งอยู่ระหว่างดินทรายและดินเหนียวจึงทำให้มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่แตกต่างและคาดการณ์ได้ยาก ซึ่งมักมีคุณสมบัติที่ไม่ค่อยคงที่เมื่อเผชิญกับแรงหรือการเปลี่ยนแปลงของความชื้น

นอกจากนี้ ดินทรายแป้งยังมีความสามารถในการระบายน้ำที่ต่ำกว่าดินทรายแต่สูงกว่าดินเหนียว คุณสมบัตินี้ทำให้ดินสามารถกักเก็บน้ำได้ในระดับหนึ่ง แต่ไม่เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดแรงดันน้ำในรูพรุน เมื่อถูกแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง สภาวะเช่นนี้อาจลดความเค้นประสิทธิผล (effective stress) และทำให้ดินสูญเสียกำลังต้านทานแรงเฉือน ส่งผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ [9]

ในด้านความชื้นและการอุ้มน้ำ เนื่องจากดินทรายแป้งมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งความสามารถนี้ทำให้ดินมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำอย่างมาก เมื่อดินทรายแป้งมีความชื้นหรือระดับน้ำที่สูง ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนจะลดลงอย่างรวดเร็ว [10] ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบฐานรากและโครงสร้างพื้นฐาน หากดินไม่สามารถรองรับน้ำหนักได้เพียงพอ จะเสี่ยงต่อการทรุดตัวหรือพังทลายของโครงสร้าง อีกทั้งการเพิ่มปริมาณดินตะกอนแป้งมักลดกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินทรายลง [11]

3.2 ปัญหาที่เกิดจากดินทรายแป้งในอดีต

คุณสมบัติทางกายภาพของดินทรายแป้งที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นและแรงกระทำภายนอก ส่งผลให้ดินชนิดนี้มีพฤติกรรมที่ไม่เสถียร โดยเฉพาะเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว การสั่นสะเทือนจากเครื่องจักร หรือแรงกระทำแบบวนซ้ำ (cyclic loading) ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างเด่นชัด คือ ความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะดินเหลว (liquefaction) ซึ่งเป็นภาวะที่ดินสูญเสียความสามารถในการรองรับน้ำหนัก และแสดงพฤติกรรมคล้ายของเหลว ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงสร้างพื้นฐาน เช่น อาคาร สะพาน ถนน และระบบสาธารณูปโภค [12]

ในอดีตมีหลายเหตุการณ์สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความอ่อนไหวของดินทรายแป้งต่อสภาวะดินเหลวและสร้างความเสียหายอย่างรุนแรง ตัวอย่างปัญหาที่เกิดขึ้น ได้แก่

- เหตุการณ์เขื่อน San Fernando Dam ตอนล่าง รัฐแคลิฟอร์เนีย ปี 1971: เกิดการสไลด์ในมวลดินที่มีองค์ประกอบของดินทรายแป้งและทรายในสัดส่วนใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อเขื่อน [13]
- เหตุการณ์ที่ Nerlerk Berm ประเทศแคนาดา ปี 1983: เกิดการสไลด์อันเนื่องมาจากสภาวะดินเหลวในชั้นทรายที่มีปริมาณดินทรายแป้งสูง ทำให้โครงสร้างขอบเขื่อนพังทลาย [14]
- เหตุการณ์แผ่นดินไหวในชิลี ปี 1985: การตรวจสอบหลังเหตุการณ์พบว่าสภาวะดินเหลวเกิดขึ้นในชั้นดินทรายปนดิน

ทรายแป้ง (silty sand) ซึ่งถูกใช้เป็นวัสดุถมไฮดรอลิก ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและสิ่งก่อสร้างโดยรอบ [15]

- เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ Saguenay, Quebec ประเทศแคนาดา ปี 1988: พบการเกิดสภาวะดินเหลวในชั้นดินทรายปนดินทรายแป้ง (silty sand) และดินทรายแป้งปนทราย (sandy silt) ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินและความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง [16]
- เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ Superstition Hills, California ปี 1987: สภาวะดินเหลวเกิดขึ้นในดินทรายปนดินทรายแป้งและดินทรายแป้งปนทราย ส่งผลให้เกิดการยุบตัวและเคลื่อนตัวของชั้นดินในวงกว้าง [17]
- กรณีศึกษาในบริเวณ Yellow River Subaqueous Delta ประเทศจีน: มีหลักฐานชัดเจนว่าดินทรายแป้งเกิด สภาวะดินเหลวใต้แรงกระทำจากคลื่นทะเลรุนแรง ทำให้เกิดปัญหา เช่น การเอียงของโครงสร้างนอกชายฝั่ง การสไลด์ของพื้นทะเล และการเกิดหลุมลึกใต้ทะเล (pits) [18–21]

จากเหตุการณ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าดินทรายแป้งเป็นดินที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดสภาวะดินเหลวซึ่งสร้างความเสียหายได้ทั้งในเขตโครงสร้างพื้นฐาน บริเวณชายฝั่ง และในพื้นที่ใกล้แหล่งน้ำ แม้ว่าการศึกษาพฤติกรรมของดินทรายแป้งในต่างประเทศจะมีความก้าวหน้าและแพร่หลาย แต่สำหรับประเทศไทยยังมีการศึกษาที่จำกัด ดังนั้น การวิจัยและการทำความเข้าใจพฤติกรรมของดินทรายแป้งภายใต้สภาวะต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาแนวทางป้องกันและออกแบบโครงสร้างให้มีความปลอดภัยในอนาคต

3.3 พฤติกรรมทางกลของดินทรายแป้งภายใต้แรงกดและแรงเฉือน

ดินทรายแป้งเป็นดินที่มีโครงสร้างอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งแสดงพฤติกรรมทางกลที่มีความซับซ้อนภายใต้แรงกดและแรงเฉือน โดยเมื่อดินทรายแป้งรับแรงกด จะเกิดกระบวนการอัดตัว (compression) ทั้งในรูปแบบการอัดตัวทันที (immediate compression) ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคดินเพื่อลดช่องว่าง (void ratio) และการอัดตัวตามเวลา (consolidation) อันเป็นผลมาจากแรงดันน้ำในรูพรุนที่เพิ่มขึ้นและระบายออกอย่างช้า ๆ ดินที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีแนวโน้มอัดตัวได้มากกว่าดินที่มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากมีช่องว่างภายในมากกว่า

เมื่อดินทรายแป้งถูกกระทำด้วยแรงเฉือน พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเริ่มต้น ระดับความชื้น และอัตราการเฉือน โดยในช่วงแรกของการเฉือนมักเกิดการหดตัว (contractive behavior) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อนุภาคปรับเรียงตัวเพื่อลดช่องว่างภายใน ส่งผลให้แรงดันน้ำในรูพรุนเพิ่มขึ้นและความเค้นประสิทธิผลลดลง ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม เมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นต่อไป โดยเฉพาะในดินที่มีความหนาแน่นสูง จะเกิดพฤติกรรมการขยายตัว (dilative behavior) ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนผ่านการลดแรงดันน้ำในรูพรุนและเพิ่มความเค้นประสิทธิผล [22] และแรงเฉือนเกินระดับวิกฤติ ดินจะแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุที่ไม่มีความต้านทานแรงเฉือน ($\emptyset = 0$) และเหลือเพียงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (c) ในขณะที่กรณีที่ต่ำกว่าระดับวิกฤติ ดินจะมีทั้งค่าความยึดเหนี่ยวและมุมแรงเสียดทานภายในเช่นเดียวกับดินเหนียวปกติ [23] อีกทั้งยังพบว่าดินทรายแป้งที่ผ่านการบดอัดปกติ (normally consolidated silts) สามารถมีพฤติกรรมขยายตัวได้เมื่อถูกเฉือน และค่ามอดูลัสเฉือน (shear modulus) จะลดลงอย่างมากเมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสัญญาณของการอ่อนตัว (softening) ที่อาจนำไปสู่การวิบัติแบบเฉียบพลัน (sudden failure) ได้ [13]

นอกจากนี้ ดินทรายแป้งยังมีความไวต่อการถูกรบกวนสูง ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อถูกรบกวน เมื่อเทียบกับดินเหนียวหลายชนิด ดังนั้น การเตรียมตัวอย่างและการลดการถูกรบกวนในระหว่างการทดสอบจึงมีความสำคัญยิ่ง เพื่อให้ค่ากำลังต้านทานที่ได้มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติ [23]

3.4 พฤติกรรมของดินทรายแป้งเมื่อรับแรงวนซ้ำ

ดินทรายแป้ง มีพฤติกรรมที่ซับซ้อนภายใต้แรงกระทำแบบวนซ้ำ ที่เกิดจากแรงสั่นสะเทือน เช่น แผ่นดินไหว การจราจร หรือเครื่องจักรต่างๆ พฤติกรรมเหล่านี้มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ความมั่นคงของโครงสร้าง เนื่องจากแรงกระทำซ้ำ ๆ อาจทำให้โครงสร้างดินเสื่อมสภาพ สูญเสียความสามารถในการรองรับน้ำหนัก และนำไปสู่การวิบัติในที่สุด [8] การศึกษาที่ผ่านมาได้ระบุถึงพฤติกรรมหลักที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำวนซ้ำ ดังนี้

3.4.1 การสะสมความเครียดพลาสติก

ภายใต้แรงกระทำวนซ้ำ ดินทรายแป้งจะเกิดการสะสมความเครียดพลาสติก (plastic strain) เนื่องจากอนุภาคภายในดินปรับเรียงตัวใหม่อย่างต่อเนื่อง แม้ว่าแรงในแต่ละรอบจะไม่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการวิบัติทันที แต่การสะสมความเสียรูปนี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ และอาจนำไปสู่ความเสียหายแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) ที่ยากต่อการคาดการณ์ และสร้างความเสี่ยงต่อความมั่นคงของโครงสร้างที่อยู่เหนือดิน [13]

3.4.2 การพัฒนาแรงดันน้ำในรูพรุน

แรงกระทำแบบวนซ้ำจะกระตุ้นให้แรงดันน้ำในรูพรุน สะสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในดินที่อิ่มน้ำ ซึ่งส่งผลให้ความเค้นประสิทธิผลลดลง หากแรงดันน้ำเพิ่มจนความเค้นประสิทธิผลเป็นศูนย์ ดินจะเข้าสู่ภาวะดินเหลวซึ่งสูญเสียความสามารถในการรองรับน้ำหนัก [14,24] ซึ่งความถี่และความเร็วในการกระทำของแรงวนซ้ำยังมีผลต่ออัตราการสะสมแรงดันน้ำ โดยความถี่ที่สูงทำให้ระยะเวลาสำหรับการระบายแรงดันน้ำลดลง เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะดินเหลว [10,25]

3.4.3 การอ่อนตัวลงของดินทรายแป้ง

จำนวนรอบของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มอดูลัสเฉือน ของดินทรายแป้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อแรงกระทำมีขนาดสูง การลดลงของมอดูลัสเฉือนนี้เป็นสัญญาณบ่งชี้ถึงการอ่อนตัวของดิน และชี้ให้เห็นว่าดินกำลังสูญเสียความแข็งแรงในการต้านทานแรงเฉือน [26]

3.4.4 การปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในดิน

พฤติกรรมของดินทรายแป้งภายใต้แรงวนซ้ำขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเริ่มต้นและโครงสร้างของดิน (density and fabric) ตัวอย่างดินที่หลวมจะมีแนวโน้มลดปริมาตร (volumetric contraction) ขณะที่ดินที่หนาแน่นจะเกิดการเพิ่มปริมาตรหรือขยายตัว (dilatancy) ส่งผลให้ดินหนาแน่นมีความต้านทานต่อแรงซ้ำได้ดีกว่า [24] โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงแรก แต่จะชะลอลงเมื่อเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพ [10,27]

3.4.5 ผลกระทบจากดัชนีความเป็นพลาสติก

ดัชนีพลาสติก (plasticity index: PI) ของดินทรายแป้งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพภายใต้แรงกระทำซ้ำ ดินทรายแป้งที่มีค่า PI สูงจะมีความเหนียวแน่นและสามารถดูดซับแรงกระทำได้มากกว่า ทำให้เสื่อมสภาพช้ากว่าดินทรายแป้งที่มีค่า PI ต่ำ [26] ดินทราย

แป้งที่มีค่า PI ต่ำจะแสดงพฤติกรรมอ่อนตัวลงอย่างรวดเร็ว (rapid softening) และสูญเสียกำลังต้านทานแรงเฉือนได้เร็วขึ้น โดยเฉพาะเมื่อได้รับแรงซ้ำที่มีความเร็วสูง ซึ่งแตกต่างจากดินทรายแป้งที่มีค่า PI สูงซึ่งมีความเสถียรและปรับตัวได้ดีกว่า [12]

พฤติกรรมของดินทรายแป้งภายใต้แรงกระทำแบบวนซ้ำเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีความซับซ้อน โดยมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การสะสมความเครียดพลาสติก การพัฒนาแรงดันน้ำในรูพรุน การอ่อนตัวของดิน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน และอิทธิพลจากดัชนีความเป็นพลาสติก ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ล้วนมีบทบาทสำคัญที่อาจนำไปสู่การเกิดภาวะดินเหลว ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในงานวิศวกรรมปฐพี การเข้าใจพฤติกรรมเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมให้มั่นคงและปลอดภัยในระยะยาว

4. แรงกระทำต่อชั้นดินเดิมที่เกิดจากโครงสร้างทางและการวิ่งของรถไฟ

ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟ จำเป็นต้องพิจารณาแรงกระทำต่างๆ โดยแรงกระทำที่มีความสำคัญพื้นฐานสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ แรงสถิตยศาสตร์ (static load) และ แรงพลศาสตร์ (dynamic load)

1. แรงสถิตยศาสตร์ หมายถึงแรงที่กระทำต่อโครงสร้างทางรถไฟอย่างถาวรหรือกึ่งถาวร ซึ่งรวมถึงน้ำหนักของส่วนประกอบหลักต่างๆ เช่น ตัวรางรถไฟ, หมอนรองราง และโครงสร้างส่วนล่างของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง นอกจากนี้ น้ำหนักของขบวนรถไฟที่อยู่ในสภาวะหยุดนิ่งหรือจอดนิ่งบนรางก็จัดเป็นแรงสถิตยศาสตร์เช่นกัน แรงเหล่านี้มีความสำคัญต่อการออกแบบรองรับน้ำหนักถาวร และช่วยกำหนดค่ากำลังรับแรงของโครงสร้างในระยะยาว

2. แรงพลศาสตร์ หมายถึงแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟบนราง ซึ่งมีลักษณะเป็นแรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่ง โดยแรงพลศาสตร์ประกอบด้วยแรงแนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักขบวนรถไฟขณะเคลื่อนที่ [28-29]

ในการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากรางรถไฟ สิ่งสำคัญ คือ ต้องทราบประเภท ขนาดของแรง และความเครียดที่กระทำต่อส่วนประกอบต่างๆ ของระบบรางอย่างชัดเจน ซึ่งแรงและความเครียดเหล่านี้เกิดจากทั้งแรงสถิตยศาสตร์ และแรงพลศาสตร์ที่ถ่ายทอดผ่านชั้นรางลงสู่โครงสร้างรองรับ

4.1 แรงที่กระทำจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ

โดยทั่วไป รถไฟธรรมดาจะมีน้ำหนักเพลา (axle load) ค่อนข้างสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดความเค้นในชั้นดินเดิมที่รองรับ ในช่วงที่ระบบรางอยู่ระหว่างการใช้งาน (in-service tracks) ความเค้นที่ถ่ายลงสู่ชั้นดินมักอยู่ในช่วงประมาณ 20–30 กิโลปาสคาล ในขณะที่สำหรับทางรถไฟที่ได้รับการออกแบบใหม่หรือได้รับการปรับปรุง (new and modernized tracks) ค่าแรงกระทำดังกล่าวอาจสูงขึ้นและอยู่ในช่วง 20–60 กิโลปาสคาล

จากข้อมูลการทำสอบในภาคสนามของทางรถไฟฝรั่งเศส ซึ่งเป็นระบบรางที่ใช้หินโรยทาง พบว่ารถจักรดีเซลที่มี 4 เพลา โดยมีน้ำหนักเพลาประมาณ 221 กิโลนิวตันต่อเพลา และรถบรรทุกสินค้าที่มีน้ำหนักเพลาประมาณ 180 กิโลนิวตัน เมื่อเดินรถด้วยความเร็วระหว่าง 50–200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินรองรับได้ใกล้เคียงกับค่าช่วงความเค้นที่กล่าวมา โดยหัวรถจักรซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าจะก่อให้เกิดความเค้นสูงกว่ารถพ่วงบรรทุก

นอกจากนี้ ในกรณีของรถไฟบรรทุกหนัก (heavy freight train) ที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงมาก มีการตรวจวัดความเค้นที่ผิวชั้นดินเดิมสูงถึงประมาณ 95 กิโลปาสคาล และพบว่าความเค้นจะลดลงตามความลึก โดยที่ระดับความลึกประมาณ 0.8 เมตร ความเค้นจะลดลงเหลือประมาณ 48 กิโลปาสคาล ซึ่งสอดคล้องกับหลักการกระจายความเค้นในดินตามทฤษฎีของ Boussinesq ที่ความเค้นจะลดลงในแนวดิ่งและกระจายออกด้านข้างเมื่อระยะความลึกเพิ่มขึ้น [30]

4.2 ความถี่ของแรงที่เกิดจากรถไฟ

หนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อความมั่นคงของโครงสร้างทางรถไฟ คือ แรงกระทำแบบวนซ้ำ ซึ่งเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของล้อรถไฟ แรงดังกล่าวมีความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วของรถไฟและระยะห่างระหว่างล้อ ความถี่เหล่านี้ไม่เพียงส่งผลต่อการสะสมของแรงดันน้ำในรูพรุนและความเครียดในชั้นดินเดิม แต่ยังอาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุในโครงสร้างพื้นฐาน เช่น หินโรยทาง และชั้นรองพื้นหิน หากไม่ได้รับการตรวจสอบหรือควบคุมอย่างเหมาะสม จึงมีความจำเป็นในการพิจารณาอัตราการกระทำของแรง (ความถี่ของรอบแรง - cyclic frequency) ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ

ตามทฤษฎี ความถี่ (f) ของแรงที่ส่งผ่านลงไปยังชั้นดินเดิมจะประกอบด้วยชุดของความถี่ที่เกี่ยวข้องกับตัวรถไฟ ได้แก่

- ความเร็วของรถไฟ
- ระยะห่างระหว่างเพลาล้อใน โบกี้ (bogie) เดียวกัน
- ระยะห่างระหว่างโบกี้ที่อยู่ติดกัน
- ระยะห่างระหว่างเพลาหน้าของรถสองคันที่อยู่ติดกัน

การหาความถี่ของแรงที่เกิดจากล้อรถไฟ สามารถทำได้โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของรถไฟเช่นการจัดเรียงล้อของรถไฟดังรูปที่ 5 และความเร็วในการเคลื่อนที่ของล้อบนราง สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f = \left(\frac{v}{D}\right) \tag{1}$$

โดยที่

f คือ ความถี่ของแรงที่เกิดจากล้อรถไฟ (Hz)
v คือ ความเร็วของรถไฟ (เมตร/วินาที)
D คือ ระยะห่างระหว่างล้อหรือล้อ (เมตร)

โดยทั่วไป แรงที่เกิดจากรถไฟธรรมดานั้นมีความถี่อยู่ในในช่วง 8 ถึง 10 Hz โดยมีระยะห่างระหว่างเพลาล้อใน โบกี้ประมาณ 2.6 เมตร และความเร็วอยู่ในช่วง 75 ถึง 94 กม./ชม. อย่างไรก็ตาม ในกรณีของรถไฟความเร็วสูงความถี่เหล่านี้สามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 30 Hz [31]

5. การเกิดสภาวะดินเหลว

ปรากฏการณ์ดินเหลว คือ สภาวะที่ดินอิ่มน้ำรับแรงกระทำจากภายนอกสูญเสียความแข็งแรงและความต้านทานแรงเฉือนอย่างรุนแรง จนมีพฤติกรรมคล้ายของเหลวชั่วคราว สาเหตุหลักเกิดจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในรูพรุนซึ่งสัมพันธ์กับความเค้นประสิทธิผลที่ลดลง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเมื่อดินอยู่ในสภาพอิ่มน้ำและได้รับแรงกระทำซ้ำ ๆ เช่น แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว หรือแรงจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหนัก มวลดินจะพยายามจัดเรียงตัวใหม่ให้มีความหนาแน่นมากขึ้น (densification) ส่งผลให้เกิดความพยายามในการลดปริมาตร (volume reduction) อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม น้ำในรูพรุนไม่สามารถระบายออกได้ทัน ทำให้แรงดันน้ำในรูพรุนเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีค่าประมาณเท่ากับความเค้นประสิทธิผลแนวดิ่ง (effective vertical stress) ณ จุดนี้ ความเค้นที่

โครงสร้างเม็ดดินรับอยู่จะลดลงเหลือศูนย์ ส่งผลให้ดินสูญเสียความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนและแสดงพฤติกรรมคล้ายของเหลว

5.1 กลไกการเกิดสภาวะดินเหลว

กระบวนการเกิดสภาวะดินเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะหลัก ดังต่อไปนี้ [32]

(1) การกระตุ้นด้วยแรงสั่นสะเทือนหรือแรงกระทำวนซ้ำ ซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคดิน

(2) การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในรูพรุน เนื่องจากการอัดตัวของโครงสร้างเม็ดดินไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทันที จึงส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินสะสมสูงขึ้น และความเค้นประสิทธิผลจะลดลง

(3) การสูญเสียความเค้นประสิทธิผล ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแรงดันน้ำในรูพรุนเพิ่มขึ้นใกล้เคียงหรือเท่ากับความเค้นแนวดิ่ง ทำให้มวลดินสูญเสียความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนอย่างสิ้นเชิงและดินจะเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นของเหลว

5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสภาวะดินเหลวในดินทรายแป้ง

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าดินทรายแป้งมีความไวต่อการเกิด สภาวะดินเหลวสูง โดยมีปัจจัยสำคัญดังนี้

5.2.1 ชนิดของดิน

ดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (cohesionless) อย่างดินทรายแป้ง จัดอยู่ในกลุ่มที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะดินเหลวสูง ดินประเภทนี้มีลักษณะเป็นอนุภาคที่ไม่ยึดติดกันด้วยพันธะทางเคมีและมีช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ตรงข้ามกับดินที่มีปริมาณดินเหนียวสูง (clay-rich soils) ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยว (cohesion) สำหรับการใช้งานทางวิศวกรรมปฏิบัติ ดินเม็ดละเอียดที่มีดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) มากกว่า หรือเท่ากับประมาณ 7 จะจัดว่าเป็น ดินที่มีพฤติกรรมคล้ายดินเหนียว (clay-like) และถือว่าไม่เกิดสภาวะดินเหลวในทางตรงกันข้าม ดินที่มีปริมาณดินเหนียวน้อยหรือมีดัชนีความเป็นพลาสติกต่ำ เช่น ดินทรายปน ดินทรายแป้ง (silty sands) หรือดินทรายแป้งที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (low-plasticity silts) จะมีพฤติกรรมคล้ายทราย (sand-like) และสามารถเกิดสภาวะดินเหลว เนื่องจากดินที่มีค่า PI ต่ำมีความไวต่อการเสื่อมสภาพและเกิดดินเหลวได้เร็ว [12]

5.2.2 ความแน่นสัมพัทธ์

ความหนาแน่นของดินเป็นปัจจัยสำคัญ ดินที่มีความหลวมจะมีแนวโน้มที่จะอัดแน่นหรือยุบตัวภายใต้แรงสั่นสะเทือนได้ง่าย ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินสูง และมีความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะดินเหลวมากกว่าดินที่มีความหนาแน่นสูง ดินทรายแป้งที่มีความหนาแน่นสูงเมื่อถูกเฉือน จะมีพฤติกรรมขยายตัว (dilation) หรือมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถลดแรงดันน้ำในรูพรุนและช่วยป้องกันการเกิดดินเหลวได้ แต่ในบางกรณีดินทรายอิ่มน้ำที่มีความหนาแน่นสูงอาจเกิดแรงดันลบ (suction) ชั่วคราวภายใต้การเฉือนอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเค้นที่มีผลและความต้านทานการเสียรูป [12,22]

จากข้อมูลในอดีต ส่วนใหญ่การเกิดปรากฏการณ์ดินเหลวมักพบในตะกอนใหม่ที่มีความหลวม เช่น ดินทับถมจากแม่น้ำ (recent alluvium) หรือชั้นทรายในหุบเขา และวัสดุถมที่ไม่ได้อัดแน่น (uncompacted fills) ดินที่มีอายุน้อยในทางธรณีวิทยามักยังไม่ถูกอัดแน่นด้วยแรงกดทับในระยะยาวหรือกระบวนการซีเมนต์ ทำให้ยังคงอยู่ในสภาพหลวมและมีพฤติกรรมหดตัว (contractive) พื้นที่เสี่ยงมักพบในบริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ ชายหาดใหม่ หรือพื้นที่ถมใหม่ (reclaimed land) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีชั้นทรายหลวมอิ่มน้ำโดยธรรมชาติ

5.2.3 ความอิ่มน้ำ

ระดับความอิ่มตัวสมบูรณ์หรือเกือบสมบูรณ์ของรูพรุนดินด้วยน้ำเป็นเงื่อนไขสำคัญต่อการเกิดสภาวะดินเหลว น้ำในรูพรุนทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับการสะสมแรงดันน้ำส่วนเกิน หากดินอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (มีอากาศในรูพรุน) จะสามารถช่วยลดหรือระบายแรงดันที่สะสมได้ ทำให้ไม่เกิดสภาวะดินเหลวอย่างสมบูรณ์ (แม้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนปริมาตรเล็กน้อยหรือการอ่อนตัวจากแรงกระทำวนซ้ำได้ก็ตาม) ดังนั้น สภาวะดินเหลวมักเกิดขึ้นในชั้นดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน พื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดินตื้น เช่น บริเวณชายฝั่ง ริมแม่น้ำ หรือพื้นที่ชุ่มน้ำที่ถูกถมใหม่ จะมีความเสี่ยงสูงในการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว

5.2.4 แรงกระทำภายนอก

โดยทั่วไปแล้วแรงสั่นสะเทือนแบบวนซ้ำจากแผ่นดินไหว เป็นตัวกระตุ้นที่พบมากที่สุด เนื่องจากเป็นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในสภาวะไม่ระบาย (undrained condition) ซึ่งน้ำไม่สามารถระบายออกทันกับการกระทำของแรง นอกจากนี้แรงกระทำอื่น ๆ ที่รวดเร็ว เช่น การสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรที่ของรถไฟ ก็สามารถกระตุ้นให้สภาวะดินเหลวได้เช่นกัน สิ่งสำคัญ คือ ขนาดและความถี่ของแรงกระทำแบบวนซ้ำต้องมากพอที่จะทำให้ดินไม่สามารถระบายน้ำออกในระหว่างรับแรง ทำให้ความแข็งแรงลดลงอย่างต่อเนื่องในแต่ละรอบเนื่องจากแรงดันน้ำส่วนเกินที่สะสม โดยระยะเวลาการสั่น (จำนวนรอบของแรงที่กระทำ) ก็ยังส่งผลต่อการเกิดสภาวะดินเหลวเช่นกัน แรงสั่นสะเทือนที่ยาวนานและมีความรุนแรงสูง จะมีแนวโน้มก่อให้เกิดดินเหลวมากกว่าการสั่นที่เบาและระยะเวลาสั้น [27,32-33]

5.3 ผลกระทบของการเกิดสภาวะดินเหลวต่อโครงสร้างทางรถไฟ

การเกิดสภาวะดินเหลวส่งผลกระทบโดยตรงต่อความมั่นคงและเสถียรภาพของโครงสร้างทางรถไฟ โดยเฉพาะในบริเวณชั้นดินเดิมที่รองรับน้ำหนักจากโครงสร้างทางและการวิ่งผ่านของขบวนรถไฟ เมื่อเกิดปรากฏการณ์ดินเหลว ความสามารถในการรองรับน้ำหนักจะลดลงอย่างรวดเร็ว [34] ส่งผลให้โครงสร้างทางเกิดการทรุดตัวหรือเกิดความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งนำไปสู่การบิดเบี้ยวและเสียรูปของรางรถไฟ [35]

นอกจากนี้ยังส่งผลให้ชั้นหินโรยทางและชั้นรองพื้นทางเกิดความเสียหาย ทั้งในรูปแบบการเคลื่อนตัว การสูญเสียความแน่น หรือการปนเปื้อนของดินที่ไหลเข้าไปในชั้นโครงสร้างดังกล่าว ซึ่งล้วนมีส่วนทำให้เสถียรภาพของรางลดลง [36] ปรากฏการณ์นี้เพิ่มความเสี่ยงต่อความไม่ปลอดภัยในการเดินรถไฟอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความบิดเบี้ยวของแนวรางและการทรุดตัวไม่สม่ำเสมออาจนำไปสู่การตกรางหรืออุบัติเหตุร้ายแรงได้ [37]

ดังนั้น ในกระบวนการออกแบบและบำรุงรักษาทางรถไฟ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องประเมินความเสี่ยงจากการเกิดสภาวะดินเหลวอย่างรอบคอบ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีประวัติการเกิดแผ่นดินไหว หรือพื้นที่ที่มีชั้นดินอ่อนซึ่งมีแนวโน้มเกิดความสูญเสียความแข็งแรงภายใต้การกระตุ้นซ้ำ

6. บทสรุป

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมในหัวข้อต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดินทรายแป้ง พบว่าดินประเภทนี้มีพฤติกรรมทางกลที่มีความซับซ้อนและมีความอ่อนไหวสูงต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำภายนอก

โดยเฉพาะเมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำวนซ้ำ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้นในระบบทางรถไฟ ดินทรายแป้งที่มีค่าความหนาแน่นต่ำ ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (PI) ต่ำ การกระจายขนาดคละไม่ดี และมีสภาวะอิ่มน้ำเต็มที่ จะมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดสภาวะดินเหลวและการอ่อนตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดจากการสะสมแรงดันน้ำในรูพรุนที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากการกระตุ้นซ้ำ ส่งผลให้ค่าความต้านทานภายในดินลดลงอย่างฉับพลันจนใกล้ศูนย์ ความไม่เสถียรดังกล่าวส่งผลให้โครงสร้างทางรถไฟเกิดการทรุดตัวไม่สม่ำเสมอ การเสียรูปแบบถาวรของชั้นโครงสร้าง รวมถึงความบิดเบี้ยวของแนวรางซึ่งเป็นอันตรายโดยตรงต่อความปลอดภัยของการเดินรถ การศึกษาจากเหตุการณ์ในอดีตทั้งในต่างประเทศและประเทศไทย เช่น เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงรายเมื่อปี พ.ศ. 2557 ยืนยันให้เห็นถึงความเปราะบางของชั้นดินทรายแป้งที่อิ่มน้ำ และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐานที่วางอยู่บนชั้นดินเหล่านี้

สำหรับเส้นทางรถไฟสายเด่นชัย - เชียงของ ซึ่งอยู่ระหว่างการก่อสร้างและผ่านพื้นที่ที่มีความเสี่ยงพบชั้นดินทรายแป้ง ความจำเป็นในการประเมินพฤติกรรมเชิงกลภายใต้แรงกระทำซ้ำจึงถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ไม่ควรมองข้ามการออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์มาตรฐานทั่วไป โดยไม่ศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของดินในพื้นที่ อาจส่งผลให้เกิดปัญหาความเสียหายหลังการก่อสร้าง หรือปัญหาเชิงเสถียรภาพในระยะยาวได้ ทั้งนี้การประเมินความเสี่ยงจากการเกิดดินเหลวหรือการอ่อนตัวของดินทรายแป้งอย่างรอบด้านควรให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์สำคัญหลายประการ ได้แก่

1) ค่า Plasticity Index (PI) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการรักษาโครงสร้างภายในของดินภายใต้แรงกระทำวนซ้ำ

2) การกระจายขนาดคละ (gradation) ที่มีผลโดยตรงต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ และความสามารถในการต้านทานการอ่อนตัว ดินที่มีการกระจายขนาดไม่ดีจะมีแนวโน้มให้เกิดโพรงและสะสมแรงดันน้ำในรูพรุนได้รวดเร็วขึ้น

3) ระดับความอิ่มตัว (degree of saturation) ซึ่งเป็นตัวกำหนดว่าดินสามารถพัฒนาแรงดันน้ำในรูพรุนได้มากเพียงใด ในดินที่อิ่มน้ำเต็ม 100% การเกิดดินเหลวสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้แรงกระตุ้นเพียงเล็กน้อย

4) ดินที่มีส่วนผสมของเม็ดละเอียด (fines content) ในช่วง 15–35% จะมีความอ่อนไหวสูงและอยู่ในช่วงวิกฤตที่ต้องประเมินอย่างรอบคอบ [38]

5) แรงกระทำจากการเดินรถไฟ (axle load และ dynamic loading) ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นที่สำคัญ การวิ่งผ่านของรถไฟที่มีความถี่และความเร็วสูง ทำให้เกิดแรงวนซ้ำที่สั่งสมในชั้นดินเดิม และอาจเร่งให้เกิดสภาวะอ่อนตัวก่อนที่ความเค้นจะถึงค่าที่เคยออกแบบไว้

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น บทความนี้จึงเห็นว่ามีความจำเป็นเร่งด่วนที่จะต้องดำเนินการศึกษาเชิงทดลองทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามอย่างต่อเนื่อง เพื่อรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณสำหรับพารามิเตอร์ดังกล่าวอย่างเป็นระบบ อีกทั้งควรสนับสนุนการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical modeling) ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของดินทรายแป้งภายใต้สภาวะที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงนอกจากนี้ ยังควรส่งเสริมให้มีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับข้อมูลภาคสนาม เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงแนวทางการออกแบบ และการกำหนดข้อกำหนดเชิงมาตรฐานสำหรับการก่อสร้างทางรถไฟในประเทศไทยต่อไป ด้วยความตระหนักถึงความสำคัญของเสถียรภาพเชิงโครงสร้างต่อความปลอดภัยของผู้โดยสารและระบบขนส่งมวลชนในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมการขนส่งทางราง (2561) ยุทธศาสตร์การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่งของไทย ระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) กระทรวงคมนาคม

[2] Loh, B. H. (2011). *Behaviour of railway track subgrade under cyclic loading* (Doctoral dissertation, Curtin University, Department of Civil Engineering).

[3] อินธนู ฐ., ชุบอุปการ ธ., เฉลิมยานนท์ ธ., & มานะกุล ช. (2023). พฤติกรรมของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟภายใต้แรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักรถไฟ. *การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, *28*, GTE07–1.

[4] Abu Sayeed and Mohamed A. Shanin. (2017). Design of ballasted railway track foundations using numerical modelling. Part I: Development. Canadian Geotechnical Journal. 55(3), pp.353-368.

[5] กองมาตรฐานความปลอดภัยและบำรุงทาง (2566) มขร. – C – 007 -2566 มาตรฐานการออกแบบทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง (Ballasted Track Design) กรมการขนส่งทางราง

[6] Lacasse, S. and Nadim, F. (1994). Reliability issues and future challenges in geotechnical engineering for offshore structures. *NGI publication no. 19, Oslo, Norway.*

[7] Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

[8] Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses.* University of California, Berkeley.

[9] Ishihara, K., (1993). Liquefaction and flow failure during earthquake. *Geotechnique,* 43(3): pp.351-415.

[10] Shaoli, Y., Sandven, R & Grande, L. (2002). Undrained behaviour of silt under static and cyclic loading. *J Ocean Univ. China 1,* pp.176–182.

[11] Yang, J., & Sze, H. (2006). Cyclic behavior and resistance of saturated sand under non-uniform stresses. *Soils and Foundations*, 46(3), pp.368-377.

[12] Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2004). *Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays* (Report No. UCD/CGM-04/01). Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis.

[13] Ishihara, K., (1993). Liquefaction and flow failure during earthquake. *Geotechnique,* 43(3): pp.351-415.

[14] Sladen, J.A., R.D. D' Hollander, and J. Krahn, (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: pp.564-578.

[15] Poran, J.C., and J.A. Rodriguez, (1989). Large ground deformations induced by the 1985 earthquake in port facilities in Chile. In: *Proceedings from the Second US-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines*, T.D. O' Rourke, and M. Hamada, eds., Technical Report NCEER-89-0032, pp. 118-130.

[16] Troncoso, J.H., (1988). Evaluation of seismic behavior of hydraulic fill structures. *Geotechnical Special Publication*, 21: pp.475-491.

[17] Tuttle, M., T. Law, L. Seeber, and K. Jacop, (1989). Liquefaction and ground failure in Ferland, Quebec triggered by the 1988 Saguenay earthquake. In: *Proceedings from the Second US-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines*, T. D. O' Rourke, and M. Hamada eds., Technical Report NCEER-89-0032. pp. 102-117,

[18] Chen, W.M., Yang, Z.S., D.B. Prior, Zeng, Z., Zhang, Q., et al., (1991). The research of slope stability on the old Huanghe subaqueous delta. In: *Collected Works of River Mouth Sedimentary Dynamics, Instability of the Huanghe Mouth Subaqueous Slope*, Yang, Z.S., and Shen, W.Q., eds., Qingdao, China, pp.43-56.

[19] Feng, X.L., (1992). The Engineering Geologic Characters of Sediments on the Modern Huanghe Subaqeous Delta and Their Stability Analysis. M.D. dissertation. Ocean Uni- versity of Qingdao, Qingdao, China.

[20] Zhang, Q., (1993). *On the Mechanics of Submarine Alope In- stability on the Mordern Huanghe Delta*, China. M. Sc. Thesis. Louisiana State University, Baton Rouge, USA.

[21] Yang, S.L., Shen, W.Q., and Yang, Z.S., (1995). The mechanism analysis of seafloor silt liquefaction under wave loading. *China Ocean Engineering*, 9(4): pp.375-386

[22] Penman, A.D M. (1953). Shear characteristics of a saturated silt, measured in triaxial compression. *Geotechnique,* 1.3 (8), pp. 312-329

[23] N. Fleming Lorraine and M. Duncan James (1990). Stress-Deformation Characteristics of Alaskan Silt. *Journal of Geotechnical Engineering* 1990 Vol. 116 Issue 3 pp.377-393.

[24] Seed, H. B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,* 92(6), pp.105-134.

[25] Vucetic, M. (1994). Cyclic threshold shear strains in soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12), pp.2208-2228.

[26] Ishihara, K. (1985). Stability of Natural Deposits During Earthquakes. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.321–376.

[27] Seed, H. B., Idriss, I. M., & Arango, I. (1975). Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. Journal of Geotechnical Engineering Division, 101(GT4), pp.423–438.

[28] D.Li and E.T. Selig (1995). Evaluation of railway subgrade problems. *Transportation Research Record, 1489*, pp.17-25.

[29] Zhai, W., Xia, H., Cai, C., Guo, X., Lv, S., & Zhang, N. (2019). Vehicle–track coupling dynamics: a review. Vehicle System Dynamics,57(7), pp.984–1027.

[30] Jankowski, W., & Sołkowski, J. (2022). *The modelling of railway subgrade strengthening foundation on weak soils*. Engineering and Information Technology, 11(1), pp.26–34.

[31] B. Aursudkij, G. R. McDowell and A. C. Collop (2009). Cyclic loading of railway ballast under triaxial conditions and in a railway test facility. *Granular Matter* 2009 Vol. 11 Issue 6 pp.391-401.

[32] A. El Takch, A. Sadrekarimi and H. El Naggar (2016). Cyclic resistance and liquefaction behavior of silt and sandy silt soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2016, Vol. 83 pp.98-109.

[33] Polito, C. P., & Martin, J. R. (2001). Effects of Non-Plastic and Plastic Fines on Liquefaction Resistance of Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(5), pp.408–415.

[34] Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.

[35] Selig, E. T., and Waters, J. M. (1994). Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford, London, UK.

[36] Anderson, W. F., et al. (2019). *Ballast and sub-ballast performance under dynamic loading*. Transportation Research Record, 2673(5), pp.120–130.

[37] Huang, H., Tutumluer, E., & Hashash, Y. M. A. (2017). *Effects of subgrade stiffness degradation due to cyclic loading on track geometry*. Transportation Infrastructure Geotechnology, 4, pp.41–57.

[38] Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2006). *Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(11), pp.1413–1426.