

หลักการและแนวทางการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วยระบบดูดสุญญากาศ Principle and Quality Control of Soft Ground Improvement by Vacuum Consolidation

ดร.นิพนธ์ อีระชัยกุลพานิช^{1,*} นายวุฒิชัย ชื่นศิริ²

¹ กรรมการผู้จัดการ บริษัท ไทย มารูยามา อินดัสทรี จำกัด

² กรรมการผู้จัดการ บริษัท จีโอ-สตรัค เอ็นจิเนียริง ดีไซน์ แอนด์ คอนซัลแตนท์ จำกัด

*Corresponding author; E-mail address: nipon@maruyama-ind.com

บทคัดย่อ

เทคนิคปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศเริ่มมีการนำมาใช้งานในประเทศไทยในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา อาทิเช่น งานก่อสร้างลานจอด ลานขับ ทางวิ่งสนามบิน และงานก่อสร้างในหมู่บ้านจัดสรร บางโครงการ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวยังถือว่าเป็นเทคนิคใหม่ต่อวิศวกรรมไทยและบุคคลที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องในรูปแบบภาษาไทยนั้นยังมีย่อยอยู่ค่อนข้างจำกัด ผู้เขียนมีความตั้งใจจัดทำบทความนี้ขึ้นเพื่อรวบรวมองค์ความรู้และประสบการณ์แสดงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับหลักการและองค์ประกอบที่สำคัญของงานปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศเบื้องต้น ปัจจัยต่างๆที่สามารถส่งผลต่อคุณภาพของงานปรับปรุงคุณภาพดินในกรณีที่ใช้เทคนิคนี้เข้าช่วยในงานก่อสร้าง รวมถึงแนวทางการควบคุมคุณภาพ ที่กลั่นกรองมาจากความรู้และประสบการณ์ตลอด 17 ปีที่ผ่านมาของผู้เขียน จากทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อให้ผู้ที่สนใจหรือบุคคลที่เกี่ยวข้องได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางพิจารณาเลือกใช้งานให้เหมาะสมและเงื่อนไขของแต่ละโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้งานที่ตรงตามความต้องการ การคัดเลือกผู้ติดตั้งระบบ รวมไปถึงการควบคุมงานก่อสร้าง ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เกิดประโยชน์สูงสุด

คำสำคัญ: ปรับปรุงคุณภาพดิน, ระบบดูดสุญญากาศ, การควบคุมคุณภาพ

Abstract

Soft ground improvement by vacuum consolidation method has been gradually increasing to implement in serval kinds of projects in Thailand recently such as airport, road, and residential area project. However, this method still can be considered as a new technology for Thai Engineer as well as relevant person due to a lack of article or text book in Thai language. Therefore, this paper describes the principle and main components of vacuum consolidation method as well as the influential factors effecting on vacuum consolidation work and quality control based on author's knowledge and experience during past 17 years in vacuum consolidation projects both in Thailand and overseas. The authors hope this paper will be benefit for Thai Engineers and interested persons who work in the construction project where vacuum consolidation method is utilized and to have a basic knowledge and able to make a decision how to implement vacuum consolidation, design

planning and construction planning together with a quality control in order to achieve the good result of ground improvement corresponding to a design objective.

Keywords: Ground Improvement, Vacuum Consolidation, Quality Control

1. บทนำ

พื้นที่ราบลุ่มปากแม่น้ำมักจะเป็นบริเวณที่มนุษย์สร้างบ้านเรือนที่อยู่อาศัยและประกอบกิจกรรมต่างๆนับตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากพื้นที่บริเวณดังกล่าวมักจะมีคุณสมบัติดินอ่อนและสภาพดินที่อ่อนแอต่อการทำการเกษตรกรรม ส่งผลให้พื้นที่เหล่านั้นแปลงสภาพเป็นพื้นที่อยู่อาศัยและที่ประกอบอาชีพต่างๆ ดังนั้นพื้นที่ราบลุ่มในบริเวณต่างๆของโลกนี้จึงถูกพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่แล้วลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณพื้นที่ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยชั้นดินตะกอนที่มีความอ่อน ส่งผลให้การก่อสร้างต่างๆบนชั้นดินอ่อนนั้นประสบปัญหาต่างๆ ดังนั้นวิศวกรจำเป็นต้องให้ความสำคัญตั้งแต่ในขั้นตอนของการสำรวจออกแบบ การก่อสร้าง ตลอดจนถึงการบำรุงรักษาระหว่างใช้งาน เพื่อให้สิ่งปลูกสร้างต่างๆบนพื้นที่ดังกล่าวมีความมั่นคงแข็งแรง ปลอดภัย มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนและส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด

ปัญหาหลักที่วิศวกรต้องเผชิญเมื่อทำการก่อสร้างสิ่งต่างๆบนพื้นที่ดินอ่อน ได้แก่ ปัญหาเสถียรภาพของชั้นดินฐานราก เนื่องจากชั้นดินฐานรากมีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ ทำให้เกิดอุปสรรคตั้งแต่เริ่มต้นทำงาน ไม่ว่าจะเป็นเคลื่อนย้ายเครื่องจักร วัสดุ อุปกรณ์ เข้าไปยังพื้นที่ก่อสร้าง และปัญหาการทรุดตัวของชั้นดินระหว่างการก่อสร้างและภายหลังการก่อสร้างที่มากขึ้นไป ส่งผลให้สิ่งปลูกสร้างเกิดความเสียหายและก่อให้เกิดความไม่สะดวกต่อการใช้งาน ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนก่อนการก่อสร้างจึงเป็นวิธีการที่สามารถช่วยแก้ไขและลดปัญหาที่กล่าวไว้ข้างต้นได้

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนนั้นมีหลากหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละเทคนิคนั้นได้ถูกคิดค้นและพัฒนาให้เหมาะสมตามแต่ละประเภทของดิน ในปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วยระบบดูดสุญญากาศ (Vacuum Consolidation) เริ่มมีการนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้นในแถบพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในฐานะที่ผู้เขียนได้มีโอกาสทำงานในด้านนี้มาเป็นระยะเวลาประมาณ 17 ปี และเห็นว่าประเทศไทยได้เริ่มนำระบบนี้เข้ามาเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน ผู้เขียนได้ทราบถึงปัญหาต่างๆในบางโครงการ อาทิเช่น ค่าแรงดูดสุญญากาศมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ตำแหน่งตรวจวัดแรงดูดสุญญากาศเลือกใช้เฉพาะบริเวณที่มีค่าสูงไม่สะท้อนความเป็นจริง ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่คาดการณ์ออกแบบ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพไม่พัฒนาขึ้นไปตามทฤษฎีตลอดชั้นความลึกของดินที่ปรับปรุง และการพิจารณาเพื่อสิ้นสุด

การปฏิบัติการสุญญากาศที่ขาดประสิทธิภาพเป็นต้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงและบริหารจัดการได้หากผู้ที่เกี่ยวข้องมีความเข้าใจรายละเอียดที่เกี่ยวข้องของหลักการและแนวทางในการควบคุมคุณภาพของงานปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศ จึงมีวัตถุประสงค์ในการจัดทำบทความขึ้นเพื่อรวบรวมองค์ความรู้และประสบการณ์ แสดงรายละเอียดที่สำคัญสำหรับวิศวกรหรือผู้ที่สนใจทั่วไป ให้มีความเข้าใจในหลักการพื้นฐาน องค์ประกอบ และปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพของงานปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศ เพื่อใช้เป็นแนวทางตั้งแต่นั้นขึ้นตอนคัดเลือกผู้ชำนาญการ การควบคุมงาน และการตรวจสอบคุณภาพให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์และเกณฑ์ที่ได้ออกแบบไว้

2. หลักการปรับปรุงดินอ่อนด้วยระบบดูดสุญญากาศ

การปรับปรุงดินอ่อนด้วยระบบดูดสุญญากาศ (Vacuum Consolidation Method) นั้นอาศัยหลักการของการลดแรงดันบรรยากาศภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน ส่งผลให้เกิดแรงกระทำต่อชั้นดินอ่อนเนื่องจากส่วนต่างของแรงดันบรรยากาศระหว่างภายนอกและภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน แรงดังกล่าวที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดกระบวนการยุบตัวของน้ำแบบรอบทิศทาง (isotropic consolidation) ต่อมาดิน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วแรงดันบรรยากาศจะสามารถลดลงได้สูงสุด 100 กิโลปาสกาล หรือเทียบเท่าประมาณ 10 ตันต่อตารางเมตร แต่ในทางปฏิบัติในภาคสนามแล้วค่าแรงดูดสุญญากาศที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า

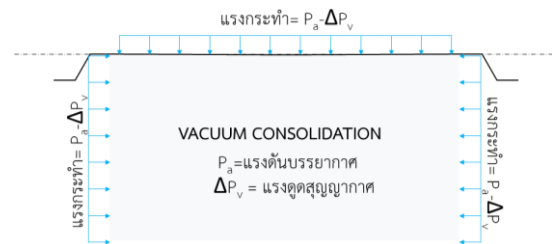
ในปี ค.ศ. 1952 วิศวกรชาวสวีเดนนาม Kjellman ได้นำเสนอเทคนิคนี้ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 ระบบดังกล่าวประกอบด้วยชั้นทรายระบายน้ำ (Filter) แผ่นระบายน้ำในแนวดิ่ง (Drain) แผ่นหีบอากาศ (Membrane) คลุมปิดพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน ขอบของแผ่นหีบอากาศฝังลงไปชั้นดินทั้งหมดโดยรอบ เพื่อป้องกันมิให้อากาศจากภายนอกรั่วไหลเข้าไปในพื้นที่ปรับปรุงดินได้ในขณะเปิดปั๊มสุญญากาศ

ในทางปฏิบัติแรงดูดสุญญากาศตรวจวัดที่ปั๊มสุญญากาศส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ระหว่าง 80-90 kPa และภายใต้แผ่นหีบอากาศจะอยู่ที่ประมาณ 70-80 kPa ซึ่งในบางครั้งอาจสูงได้ถึง 90 kPa หากติดตั้งระบบได้อย่างสมบูรณ์และมีรอยรั่วซึมของอากาศที่ต่ำ แรงดูดสุญญากาศที่กระทำต่อชั้นดินมีค่าเทียบเท่ากับน้ำหนักของดินถมบดอัดแน่นความสูงประมาณ 4 เมตร ทั้งนี้แรงดูดสุญญากาศถือเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกส่วนเกิน (Surcharge) ซึ่งเป็นแรงกระทำชั่วคราวระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดิน เพราะแรงกดกระทำนี้จะหายไปเมื่อปั๊มสุญญากาศหยุดทำงาน อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการน้ำหนักบรรทุก (Surcharge load) ที่มากกว่านี้ สามารถใช้วัสดุถมเพิ่มเติมบนระบบสุญญากาศที่ได้ติดตั้งไว้แล้ว จากนั้นค่อยดำเนินการขุดออกออกภายหลังจากการปิดปั๊มสุญญากาศ องค์ประกอบหลักโดยทั่วไปของงานก่อสร้างที่ใช้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3

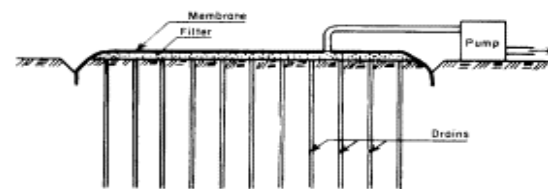
วิศวกรหรือบุคคลที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องมีความเข้าใจที่ถูกต้องในองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อชั้นดิน เข้าใจว่าแรงใดเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่ถาวร แรงใดเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกส่วนเกินซึ่งมีสภาวะเพียงชั่วคราวเพื่อให้ดินที่ต้องการปรับปรุงมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ ถ้าหากองค์ประกอบใดประกอบหนึ่งคลาดเคลื่อนไปในขั้นตอนการออกแบบและก่อสร้างจะส่งผลต่อคุณภาพงาน เช่น เข้าใจว่าใช้แรงดูดสุญญากาศเพียงอย่างเดียวและไม่ได้ดำเนินการถมดินระหว่างที่เปิดปั๊มสุญญากาศ แต่ภายหลังเมื่อทำการปิดปั๊มสุญญากาศแล้วพบว่า ระดับที่ต้องใช้ในการก่อสร้างต่ำกว่าที่ต้องการอันเนื่องจากการทรุดตัวของชั้นดินที่เกิดขึ้นระหว่างการเปิดปั๊มสุญญากาศ โดยไม่ได้คำนึงถึงส่วนที่ต้องถมเพื่อชดเชยการทรุดตัวในระหว่างเปิดปั๊มสุญญากาศ แล้วจึงมาดำเนินการถมดิน

ภายหลัง กรณีเช่นนี้จะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวภายหลังจากการก่อสร้างมากกว่าที่ได้วิเคราะห์ออกแบบไว้เพราะขั้นตอนการ pre-loading นั้นไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ เป็นต้น แนวทางที่เหมาะสมนั้นควรดำเนินการถมดินให้แล้วเสร็จทั้งหมดทุกส่วนในระหว่างการปฏิบัติการสุญญากาศ และไม่ทำการถมเพิ่มในปริมาณมากในภายหลังการปิดปั๊มสุญญากาศแต่สามารถยอมให้มีการปรับเกลียระดับเพียงเล็กน้อยได้ อย่างไรก็ตามหากมีความจำเป็นต้องดำเนินการถมเพิ่มภายหลังการปิดปั๊มสุญญากาศและไม่สามารถเปิดปั๊มสุญญากาศได้แล้ว ควรประเมินค่าการทรุดตัวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายหลังการก่อสร้างใหม่และวางแผนการบำรุงรักษาให้ครบถ้วน

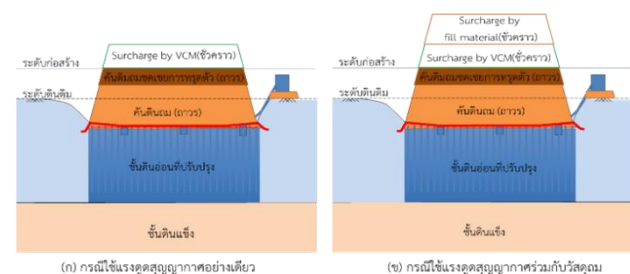
แรงดูดสุญญากาศมีข้อดีกว่าแรงกระทำจากวัสดุถมหลายประการ อาทิเช่น แรงดูดสุญญากาศสามารถกระจายลงไปในชั้นดินระดับลึกได้ดีกว่าแรงจากน้ำหนักวัสดุถมบนผิวดิน เนื่องจากแรงดูดสุญญากาศสามารถส่งผ่านจากปั๊มสู่แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งไปยังชั้นดินในระดับลึกได้โดยมีอัตราการสูญเสียของแรงที่น้อย ซึ่งแตกต่างจากแรงกระทำจากวัสดุถมบนผิวดินด้านบนซึ่งมีค่าลดลงตามความลึกของชั้นดินอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้



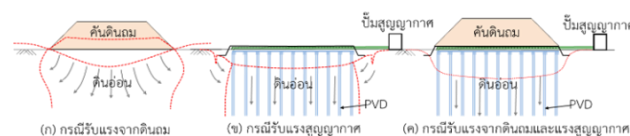
รูปที่ 1 หลักการของ Vacuum Consolidation



รูปที่ 2 ระบบดูดสุญญากาศของ Kjellman (1952)



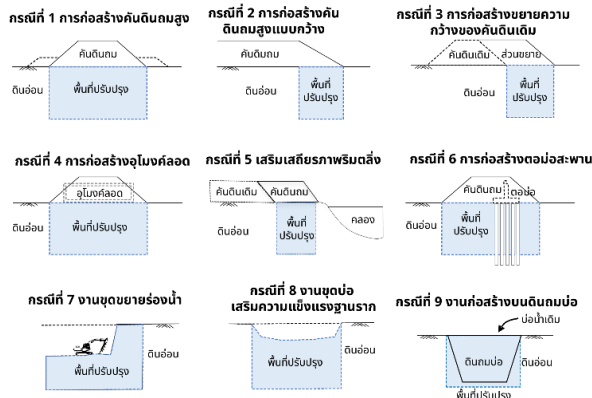
รูปที่ 3 องค์ประกอบของแรงกระทำต่อชั้นดินฐานรากภายใต้ระบบดูดสุญญากาศ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นดินภายใต้แรงกระทำแบบต่างๆ

นอกจากนี้แรงกระทำจากวัสดุถมเป็นแรงกระทำหลักในแนวดิ่ง ส่งผลให้ชั้นดินฐานรากเกิดการยุบตัวลงและดันให้ดินไหลออกด้านข้าง หากอัตราเร็วในการถมดินนั้นสูงเกินกว่าที่กำลังของชั้นดินฐานรากที่จะรับได้ ดัง

แสดงในรูปที่ 4 (ก) ซึ่งตรงกันข้ามกับแรงดูดสุญญากาศที่เป็นแรงกระทำแบบรอบทิศทางทำให้เกิดเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและแนวราบโดยรอบพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) ดังนั้นแรงดูดสุญญากาศจึงส่งผลต่อเสถียรภาพของชั้นดินฐานราก ซึ่งเมื่อนำมาใช้ร่วมกับงานก่อสร้างที่ต้องมีการถมดินด้วยจะสามารถควบคุมการเคลื่อนตัวของบริเวณข้างเคียงได้ดีกว่าในกรณีที่มีถมดินเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4 (ค) ส่งผลให้สามารถดำเนินการถมดินได้เร็วกว่ากรณีที่ไม่มีการดูดสุญญากาศประกอบทำให้ช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้างมากขึ้น



รูปที่ 5 การนำระบบดูดสุญญากาศไปใช้ในงานก่อสร้างประเภทต่างๆ

การเร่งกระบวนการการทรุดตัวในแนวดิ่งเป็นเป้าหมายหลักของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีนี้ เพื่อปรับปรุงให้ดินฐานรากมีความแข็งแรง มีความแน่นมากขึ้น ช่วยลดการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นในภายหลังการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามการเคลื่อนตัวของดินข้างเคียงของชั้นดินนั้นก็เป็นส่วนที่ต้องให้ความสำคัญด้วยเช่นกัน เนื่องจากอาจจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงได้ เช่น หากมีสิ่งปลูกสร้างหรือสาธารณูปโภคต่างๆ ที่อาจเกิดความเสียหายได้ อันเนื่องจากการเคลื่อนตัวของชั้นดินทั้งแนวดิ่งและแนวราบ ทั้งนี้หากเกิดการเคลื่อนตัวมากเกินไปจนเกิดอันตราย ไม่อาจจะอยู่ในทิศทางเข้าหรือออกจากพื้นที่ปรับปรุงดินนั้น อาจจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงได้ ดังนั้นวิศวกรที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจและสามารถกำหนดขอบเขตพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน ความลึกของแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่ง อัตราเร็วในการให้แรงดูดสุญญากาศและอัตราเร็วในการถมเพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวของดินข้างเคียงของดินไม่ให้ส่งผลกระทบต่อบริเวณข้างเคียง ทั้งนี้การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของชั้นดินในแนวราบจึงมีความสำคัญสำหรับวิศวกรหรือผู้ที่เกี่ยวข้องในการติดตามการเคลื่อนตัวของชั้นดินในระหว่างการก่อสร้าง เพื่อใช้ในการประเมินและประกอบการตัดสินใจควบคุมอัตราเร็วในการถมดินในแต่ละชั้นเพื่อรักษาเสถียรภาพของชั้นดินไม่ให้เกิดการวิบัติ

ระบบดูดสุญญากาศมีข้อดีหลายประการอาทิเช่น สามารถติดตั้งระบบได้อย่างรวดเร็ว ลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายโดยรวม ลดการเคลื่อนตัวของพื้นที่ข้างเคียง นอกจากนี้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากช่วยลดปริมาณการใช้วัสดุถม ทำให้ปริมาณรถบรรทุกที่ใช้ในการขนส่งดินลดลง ลดผลกระทบต่อชุมชน ลดปริมาณการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ ลดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไม่มีปัญหาน้ำใต้ดินปนเปื้อนเนื่องจากไม่มีใช้สารเคมีใดๆผสมลงในชั้นดิน

อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้กับดินบางประเภทและลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละพื้นที่ เทคนิคนี้จะใช้ได้กับดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) เช่นดินเหนียวอ่อน (Clay), ดินพีท (Peat) หรือดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) แต่ไม่เหมาะกับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น เช่น ดินทรายหรือกรวด (Sand or Gravel) นอกจากนี้ใน

กรณีที่มีชั้นทรายหนาแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน อาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบดูดสุญญากาศนั้นลดลงเนื่องจากแรงดันบรรยากาศภายนอกจะสามารถไหลผ่านทางชั้นทรายได้ง่ายทำให้เกิดการสูญเสียแรงดูดสุญญากาศในบริเวณที่ต้องการปรับปรุงดิน แรงดูดสุญญากาศอาจมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้แนวทางแก้ปัญหาดังกล่าวอาจจะพิจารณาใช้เทคนิคอื่นเข้าร่วมด้วยเช่นการสร้างกำแพงทึบน้ำ (Slurry wall) ติดตั้งล้อมรอบบริเวณพื้นที่ที่ต้องการปรับปรุงไปเพื่อตัดแยกชั้นทรายที่เชื่อมต่อกันระหว่างภายนอกและภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินให้ขาดจากกัน ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจึงควรนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินแบบอื่นเพื่อหาความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการใช้งานระบบดูดสุญญากาศสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างแบบต่างๆได้อย่างหลากหลาย ดังแสดงในรูปที่ 5

3. องค์ประกอบหลักของระบบดูดสุญญากาศ

ระบบดูดสุญญากาศที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่รูปแบบที่ไม่ใช้แผ่นทึบอากาศ (membraneless system) ซึ่งจะกล่าวถึงในทีนี้เนื่องจากไม่ใช่ระบบแบบดั้งเดิมและไม่แพร่หลายเท่ากับรูปแบบใช้แผ่นทึบอากาศ (membrane system) ซึ่งได้รับการพัฒนาปรับปรุงจากระบบดั้งเดิมที่นำเสนอโดย Kellman 1952 ตลอดเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมาทั้งในยุโรป จีน และญี่ปุ่น เป็นต้น จึงส่งผลให้รายละเอียดปลีกย่อยของแต่ละผู้พัฒนาระบบมีความแตกต่างกันบ้าง แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบหลักพื้นฐานที่สำคัญของเทคนิคปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศนั้นยังมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.1 ชั้นทรายระบายน้ำ (Sand working platform)

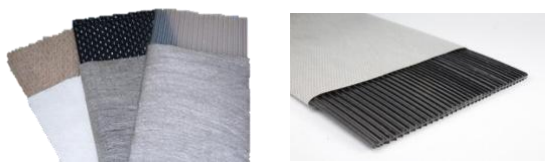
มีหน้าที่รองรับน้ำหนักเครื่องจักรระหว่างการติดตั้งระบบดูดสุญญากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อรองรับน้ำหนักเครื่องติดตั้งแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งที่มีน้ำหนักมาก ให้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางกระจายแรงดูดสุญญากาศให้ครอบคลุมตลอดทั่วพื้นผิวด้านบนของพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพอีกด้วย ชั้นทรายระบายน้ำนี้จะต้องมีความแข็งแรงอย่างรวดเร็วยกหลังจากเปิดปั๊มสุญญากาศเปรียบเทียบกับคล้ายคลึงกับถุงบรรจุข้าวสารแบบสุญญากาศที่แน่นและแข็ง ส่งผลให้สามารถรองรับน้ำหนักของดินถมและกระจายแรงสู่ชั้นดินฐานรากได้อย่างสม่ำเสมอแตกต่างจากกรณีไม่มีแรงดูดสุญญากาศ

3.2 แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่ง (Prefabricated Vertical drain)

มีหน้าที่ส่งผ่านแรงดูดสุญญากาศและช่วยเร่งระบายแรงดันน้ำส่วนเกินในมวลดินให้ระบายออกไปภายนอกได้อย่างรวดเร็วขึ้น แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งประกอบด้วยแกนพลาสติก (Core) ห่อหุ้มด้วยแผ่นกรองเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคของดินที่มีขนาดใหญ่เกินมาตรฐานไหลผ่านเข้ามาอุดตันในแกนกลางที่ใช้ระบายน้ำ แกนกลางของแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งมีหลายรูปแบบตามแต่ละผู้ผลิตดังแสดงในรูปที่ 6 อย่างไรก็ตามรูปแบบก้างปลา (Fishbone) เป็นรูปแบบมาตรฐานที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งรูปแบบมาตรฐานมีความกว้างอยู่ที่ 100 มิลลิเมตร และความหนาตั้งแต่ 4-7 มิลลิเมตร มีผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งการทรุดตัวของชั้นดินภายใต้ระบบดูดสุญญากาศกับแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ที่มีความหนาแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยความหนาของแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการเร่งการทรุดตัวได้ดีกว่าแผ่นที่มีขนาดบางกว่า

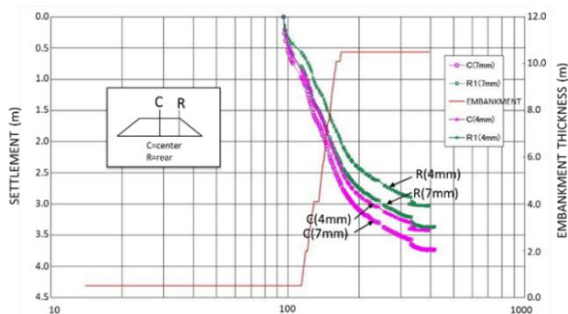
เนื่องจากแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งจะต้องรับแรงกระทำจากแรงดันดินด้านข้างและแรงดูดสุญญากาศ ดังนั้นควรเลือกใช้แผ่นระบายน้ำ

สังเคราะห์ที่มีความหนาและความแข็งแรงเพียงพอในการรับแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการติดตั้งและระหว่างการใช้งาน เพื่อคงประสิทธิภาพที่ดีในการกระจายแรงดูดสุญญากาศและการระบายน้ำ เนื่องจากระหว่างการทรุดตัวของชั้นดิน แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์จะเกิดการย่นตัวโค้งบิดงอส่งผลให้ประสิทธิภาพของการระบายน้ำได้ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 8 ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานที่กำหนดของความหนาของแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งและรูปแบบของแกนพลาสติก ดังนั้นการพิจารณาเลือกแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งจึงควรตรวจสอบว่ามีประวัติการใช้งานกับระบบดูดสุญญากาศในโครงการอื่นก่อนนำมาหรือไม่ ประสิทธิภาพการปรับปรุงและผลลัพธ์การปรับปรุงคุณภาพดินเป็นอย่างไร มีความเหมาะสมกับสภาพชั้นดิน ความลึกและแรงที่จะถูกกระทำจากชั้นดินและน้ำหนักบรรทุกจากดินถมหรือไม่



(ก) PVD แบบต่างๆ (ข) PVD แบบมาตรฐาน

รูปที่ 6 แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งแบบต่างๆ



รูปที่ 7 การทรุดตัวของชั้นดินระหว่าง PVD หนา 4 และ 7 มิลลิเมตร



รูปที่ 8 สภาพของแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์แนวดิ่งภายหลังการทรุดตัวในดินพีท

3.3 แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวนอน (Horizontal drain)

แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวนอนใช้ติดตั้งเชื่อมต่อปลายส่วนบนของแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งที่ติดตั้งไว้เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 9(ก) แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวนอนใช้เพื่อเป็นตัวกลางในการส่งผ่านแรงดูดสุญญากาศ ช่วยระบายน้ำและอากาศที่ถูกดูดออกจากชั้นดินที่ไหลผ่านแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งเข้าสู่ระบบระบายน้ำที่พื้นผิวดินสู่

ท่อระบายน้ำเจาะรูรอบ (Perforated drainage pipe) ปกติแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวนอนที่ผลิตอยู่ในท้องตลาดส่วนใหญ่จะมีความกว้างตั้งแต่ 20-30 เซนติเมตร ความหนา 8-10 มิลลิเมตร ซึ่งเดิมทีแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวนอนรูปแบบนี้ผลิตออกมาเพื่อใช้ร่วมกับแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งร่วมกับคันดินถม เพื่อทดแทนชั้นทรายระบายน้ำเนื่องจากในบางพื้นที่อาจจะไม่มีแหล่งทรายที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเพียงพอต่อการใช้เป็นชั้นทรายระบายน้ำ แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์แนวนอนมีหลากหลายรูปแบบเดียวกันกับแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งตามแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตในแต่ละราย ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการใช้แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์แนวดิ่งวางประกบกัน 2 ชั้น มีความหนารวม 10 มิลลิเมตร ร่วมกับระบบดูดสุญญากาศ พบว่าได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นกันเนื่องจากความสามารถในการระบายน้ำที่เพียงพอเหมาะสมกับชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

3.4 ท่อระบายน้ำเจาะรูรอบ (Perforated drainage pipe)

ท่อระบายน้ำเจาะรูรอบทำจากท่อพีวีซีหรือพลาสติกแข็งชนิดอื่น ท่อหุ้มด้วยใยกรองเพื่อป้องกันเม็ดดิน เม็ดทราย ไหลเข้าไปอุดตันในท่อ ตัวอย่างรูปแบบท่อระบายน้ำเจาะรูรอบแสดงในรูปที่ 10 ท่อชนิดนี้ถือเป็นท่อหลักในการส่งแรงดูดสุญญากาศ เนื่องจากท่อระบายน้ำเจาะรูรอบนี้จะเชื่อมต่อไปยังปั๊มสุญญากาศ ขนาดท่อที่ใช้โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 2-3 นิ้ว โดยท่อจะวางฝังอยู่ในร่องโดยมีแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวนอนพาดผ่านดังแสดงในรูปที่ 9(ข) แนวท่อจะมีระยะห่างระหว่างกันประมาณ 20-30 เมตร ท่อจะต้องสามารถรับดูดสุญญากาศและแรงกดจากน้ำหนักดินถมได้โดยไม่แตกเสียหายหรือเสียรูปจนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการระบายน้ำและการส่งผ่านแรงดูดสุญญากาศออกไปยังแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งได้ กรณีใช้ท่อ PVC ในควรเลือกใช้ความหนาสูงสุดที่ 13.5 มม.

3.5 แผ่นป้องกันการฉีกขาด (Protection sheet) และแผ่นทึบอากาศ (Airtight sheet)

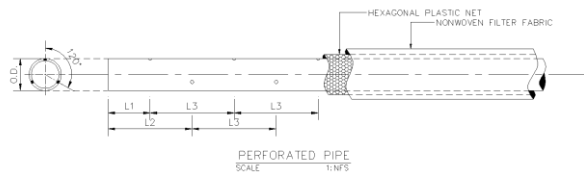
แผ่นป้องกันการฉีกขาดที่ทำจากผ้าใยสังเคราะห์ชนิดไม่ถักทอ (nonwoven fabric) ความหนาและความหนาแน่นไม่ควรน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร และ 150 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ใช้ปูครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดิน ก่อนติดตั้งแผ่นทึบอากาศ (Airtight sheet) เพื่อป้องกันเศษวัสดุ กรวดหินที่มีความคม ที่อาจจะหลงเหลือปะปนอยู่ในชั้นทราย ส่งผลให้แผ่นทึบอากาศเกิดการฉีกขาดได้ ดังแสดงในรูปที่ 11

แผ่นทึบอากาศที่ผลิตจากพลาสติกประเภท PVC หรือ HDPE จะถูกปูทับลงบนแผ่นป้องกันการฉีกขาด รอยต่อแผ่นทึบอากาศสามารถเชื่อมด้วยความร้อนหรือการประสาน ครอบคลุมบริเวณที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดินดังแสดงในรูปที่ 12(ก) ขอบแผ่นทึบอากาศจะถูกฝังกลบลงในดินเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าสู่พื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน และมีลักษณะดังรูปที่ 12(ข) ในขณะเปิดระบบดูดสุญญากาศ

การเชื่อมต่อแผ่นทึบอากาศและการฝังกลบขอบแผ่นทึบอากาศนั้นมีความสำคัญมาก เนื่องจากรอยรั่วเพียงไม่กี่ตารางเซนติเมตร สามารถส่งผลให้แรงดูดสุญญากาศในพื้นที่ปรับปรุงดินลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ไม่เป็นไปตามเกณฑ์การออกแบบ(แรงดูดสุญญากาศไม่น้อยกว่า 70 kPa) งานในส่วนนี้จึงต้องใช้ทักษะและความชำนาญในการติดตั้งเป็นอย่างสูง โดยปกติแล้วการตรวจสอบหารอยรั่วและซ่อมแซม เพื่อให้ระบบที่ติดตั้งสมบูรณ์จะดำเนินการในช่วง 1-2 สัปดาห์แรกหลังจากเริ่มเปิดระบบดูดสุญญากาศ เมื่อแรงดูดสุญญากาศได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว จึงสามารถเริ่มงานถมดินลงบนแผ่นทึบอากาศในขณะที่ระบบดูดสุญญากาศทำงานอยู่ได้ ซึ่งการถมดินลงบนแผ่นทึบอากาศสามารถทำได้โดยตรง หากวัสดุถมเป็นดินที่ไม่มี



รูปที่ 9 แผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวราบติดตั้งเข้ากับแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์แนวตั้ง (ก) และติดตั้งเข้ากับท่อระบายน้ำรูปวงรี (ข)



NO.	PERFORATED PIPE	HOLE SIZE(mm.)	L1(mm.)	L2(mm.)	L3(mm.)
1	STANDARD	8.0±0.5	100.00	200.00	200.00

รูปที่ 10 รูปแบบท่อระบายน้ำเจาะรูรอบทำจากท่อพีวีซี



รูปที่ 11 ลักษณะการติดตั้งแผ่นป้องกันการฉีกขาด



(ก) ลักษณะการติดตั้งแผ่นที่บอากาศ (ข) สภาพแผ่นที่บอากาศภายใต้แรงดูดสุญญากาศ

รูปที่ 12 ลักษณะแผ่นที่บอากาศก่อนและหลังเปิดปั๊มสุญญากาศ

เศษหินหรือเศษวัสดุที่ไม่พึงประสงค์อื่นเจือปน กรณีที่จำเป็นต้องใช้วัสดุเหลี่ยมมีคม เช่น หินคลุกถมลงบนแผ่นที่บอากาศนั้นจำเป็นต้องใช้แผ่นป้องกันการฉีกขาดที่มีความหนาที่เหมาะสมปูรองก่อนหรืออาจใช้ทรายถมเป็นชั้น มีความหนาชั้นไม่ต่ำกว่า 50 เซนติเมตร ปูรองในชั้นแรกก่อนดำเนินการถมด้วยหินคลุก

3.6 ปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์พ่วง (Vacuum pump and accessories)

ปั๊มสุญญากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลดแรงดันบรรยากาศภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน ปั๊มสุญญากาศมีใช้ปั๊มน้ำแต่อย่างใด แต่จะทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน ผลลัพธ์ที่ได้คือมีทั้งน้ำและอากาศไหลออกมาจากชั้นดิน ส่งผลให้ชั้นดินเกิดการทรุดตัว ซึ่งจะถึงแยกน้ำและอากาศ รวมถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องติดตั้งอยู่ร่วมกับปั๊มสุญญากาศ ปั๊มสุญญากาศมีหลากหลายรูปแบบและหลากหลายขนาด ปั๊มสุญญากาศแบบมาตรฐานจะสร้างแรงดูดได้ประมาณ 80-85 kPa และปั๊มชนิดแรงดูดสูงพิเศษจะสามารถสร้างแรงดูดสูงสุดได้มากถึง 90-95 kPa อย่างไรก็ตามแรงดูดสุญญากาศที่จะสามารถทำได้ภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินนั้นได้ขึ้นกับประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่ส่งผลให้แรงดูดสุญญากาศที่ปั๊มสุญญากาศและภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีที่ในระบบการมีการรั่วซึมที่น้อย แรงดูดสุญญากาศได้แผ่นที่บอากาศสามารถมีค่าสูงได้ถึง 85-90 kPa ในขณะที่แรงดูดสุญญากาศที่ปั๊มมีค่า 90-95 kPa เป็นต้น แต่ในกรณีที่มีการรั่วซึมของระบบมากขึ้น แรงดูดสุญญากาศได้แผ่นที่บอากาศอาจจะมีค่าเพียง 70-80 kPa ในขณะที่แรงดูดสุญญากาศที่ปั๊มมีค่า 80-85 kPa เท่านั้น ดังนั้นการใช้เกณฑ์ขั้นต่ำของแรงดูดสุญญากาศภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินจึงควรใช้ค่าไม่ต่ำกว่า 70 kPa ในการออกแบบเพื่อให้สามารถทำได้จริงในทางปฏิบัติ ในกรณีที่แรงดูดสุญญากาศภายใต้แผ่นที่บอากาศมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ถือว่าระบบที่ติดตั้งไม่ผ่านเกณฑ์ จำเป็นจะต้องดำเนินการหาสาเหตุและแก้ไข

4. ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงดูดสุญญากาศและแนวทางการ

ควบคุมคุณภาพ

จากการรวบรวมข้อมูลภาคสนามและองค์ความรู้จากประสบการณ์การทำงาน ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของการปรับปรุงคุณภาพดิน มีหลายปัจจัย อาทิเช่น

4.1 สภาพชั้นดินธรรมชาติ

เนื่องจากสภาพชั้นดินตามธรรมชาติในแต่ละพื้นที่นั้นมีความแตกต่างกัน เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศนั้นใช้ได้กับชั้นดินประเภทดินเหนียวอ่อน (soft clay) และดินพีท (Peat) แต่หากในบริเวณที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดินมีชั้นดินทรายหรือชั้นวัสดุอื่นแทรก เช่น ชั้นของขยะหรือเศษใบไม้ ต้นไม้ที่บดอยู่ด้านล่างในระดับลึกมากกว่าระดับผิวกบของแผ่นที่บอากาศ จะส่งผลให้แรงดูดสุญญากาศรั่วซึมออกไปภายนอกพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินโดยผ่านชั้นดินหรือวัสดุดังกล่าว แรงดูดสุญญากาศที่กระทำต่อชั้นดินต่ำกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการศึกษาประวัติของการใช้พื้นที่ว่าเคยใช้ทำอะไรมาก่อน ศึกษาข้อมูลตรวจสอบว่ามีระบบสาธารณูปโภคฝังอยู่ภายในพื้นที่หรือบริเวณข้างเคียงหรือไม่ วางแผนดำเนินการเจาะสำรวจชั้นดิน และทดสอบคุณสมบัติของดินให้ครอบคลุมเพียงพอ ในกรณีที่มิชั้นทรายพาดผ่านอยู่ในระดับลึกหรือชั้นทรายถมหนาอยู่ด้านบนอาจพิจารณาการใช้กำแพงดินน้ำ (slurry wall) หรือเสาเข็มเหล็กพืด (sheet pile wall) ร่วมด้วย โดยติดตั้งล้อมขอบเขตที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดินไว้ เพื่อป้องกันมิให้แรงดูดสุญญากาศไหลกระจายออกไปยังภายนอกพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน

4.2 คุณภาพของทรายที่นำมาใช้เป็นชั้นทรายระบายน้ำ

ควรเลือกใช้ทรายที่มีอนุภาคของดินเหนียวและดินทรายแบ่งเจือปนไม่เกิน 5% (%Finer) เพราะอนุภาคละเอียดเหล่านี้สามารถไหลมาพร้อมกับ

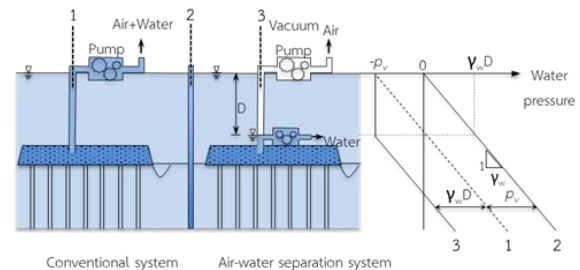
น้ำเข้าสู่ท่อระบายน้ำเจาะรูรอบ ส่งผลให้แผ่นรองเกิดการอุดตันได้ง่าย จึงควรเลือกใช้ทรายที่สะอาดในการทำชั้นทรายระบายน้ำเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จากประสบการณ์ของผู้เขียนพบว่าถ้านำทรายมาผสมน้ำเล็กน้อยแล้วสามารถปั้นเป็นทรงกลมขนาด 1 นิ้ว ได้ โดยไม่แตกออกได้โดยง่าย เมื่อนำไปทดสอบหาค่าปริมาณส่วนละเอียดแล้วมักจะมีค่ามากกว่า 5% วิธีการนี้สามารถใช้ตรวจสอบคัดกรองคุณภาพทรายเบื้องต้นได้อย่างสะดวกโดยง่าย ก่อนที่จะตัดสินใจคัดเลือกและนำตัวอย่างทรายไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.3 ระบบดูดสุญญากาศและผู้ชำนาญการ

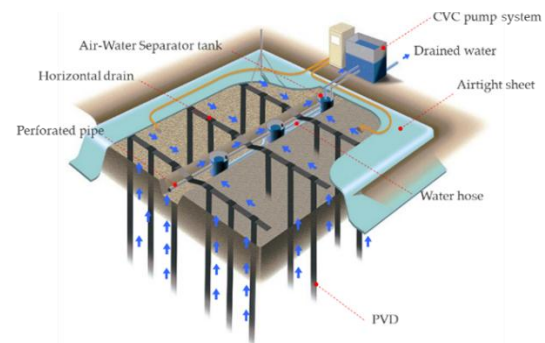
ระบบดูดสุญญากาศแบบดั้งเดิมของ Kjellman ได้ถูกนำไปปรับปรุงพัฒนา ส่งผลให้รายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์ และเทคนิคการติดตั้งต่างๆ ที่นำมาใช้ร่วมกันนั้นมีความแตกต่างกันไม่มากนักน้อยตามแต่ผู้พัฒนาในแต่ละแห่ง จึงไม่มีมาตรฐานที่ระบุได้อย่างชัดเจนและแน่นอน แต่การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศให้มีประสิทธิภาพนั้นมีได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเพียงอย่างเดียว อาทิเช่น การใช้ปั๊มดูดสุญญากาศที่มีประสิทธิภาพสูงหรือปั๊มขนาดใหญ่ ก็ได้เป็นการรับประกันได้ว่าจะได้คุณภาพงานปรับปรุงดินที่ดีเสมอไป ทั้งนี้ต้องประกอบด้วยองค์ประกอบหลายประการ ตั้งแต่ขั้นตอนการพิจารณาว่าชั้นดิน ณ สถานที่ก่อสร้างมีความเหมาะสมกับเทคนิคนี้หรือไม่ ความเข้าใจในสภาพชั้นดินของสถานที่ก่อสร้าง คุณภาพวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาติดตั้ง ความชำนาญของผู้ติดตั้งระบบในการควบคุมและบำรุงรักษาแรงดูดสุญญากาศ และแก้ปัญหาของผู้เชี่ยวชาญในกรณีที่เกิดแรงดูดสุญญากาศมีค่าลดลงระหว่างที่ดำเนินการเปิดระบบดูดสุญญากาศส่วนเกี่ยวข้องกับคุณภาพงาน ควรตรวจสอบประวัติความเป็นมาของผู้รับผิดชอบติดตั้งระบบดูดสุญญากาศว่ามีการพัฒนาระบบเองหรือลอกเลียนแบบผู้อื่น ผลงานในอดีตที่ทำแล้วเสร็จเป็นอย่างไร ผลการปรับปรุงคุณภาพดินบรรลุเป้าหมายตามที่วิเคราะห์ ออกแบบไว้หรือไม่ การทรุดตัวหลังการปรับปรุงคุณภาพดินอยู่ในเกณฑ์ที่ออกแบบไว้หรือไม่ เจ้าของงานมีความพึงพอใจในการดำเนินงานมากน้อยเพียงใด มีผลการเจาะสำรวจดินเพื่อตรวจสอบเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงคุณภาพดินจากหน่วยงานหรือสถาบันที่เชื่อถือไว้อ้างอิงหรือไม่ ปัจจัยเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความมั่นใจต่อเจ้าของโครงการได้ว่า ผู้รับผิดชอบระบบดูดสุญญากาศที่เลือกใช้มีความชำนาญและสามารถปรับปรุงคุณภาพดินได้อย่างมีประสิทธิภาพตามการออกแบบ มีหลายกรณีที่ผู้ติดตั้งระบบไม่มีความชำนาญอย่างแท้จริง แรงดูดสุญญากาศไม่เป็นไปตามเกณฑ์หรือลดลงตามเวลา ทำให้ต้องแก้ไขปัญหาลักษณะหน้าด้วยการถมดินเพื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำเพิ่มเติม เป็นต้น

ระบบดูดสุญญากาศแบบดั้งเดิมของ Kjellman นั้นมีข้อจำกัดของแรงดูดสุญญากาศในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากแรงดูดสุญญากาศจะมีค่าลดลงตามปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินที่เพิ่มมากขึ้น ศ.ดร. Imai (2005) ได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุและพบว่าแรงดูดสุญญากาศในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อระดับ (Elevation head) ของปั๊มดูดสุญญากาศที่และระดับผิวของพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 13 โดยทุกๆการทรุดตัวที่ 1 เมตร แรงดูดสุญญากาศจะลดลง 10 kPa ดังนั้นหากการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีค่า 2 เมตร ระบบก็จะสูญเสียแรงดูดสุญญากาศไปถึง 20 kPa เท่ากับว่าแรงดูดสุญญากาศที่ออกแบบไว้ที่ 70 kPa จะค่อยๆลดลงจนเหลือเพียง 50 kPa เท่านั้น จึงได้คิดค้นวิธีการการแก้ไขด้วยการใช้ถังแยกน้ำและอากาศ (Air-water separator tank) ฝังใต้แผ่นที่บออากาศ Teerachaikulpanich และคณะ (2013) ได้รายงานกรณีศึกษาทางก่อสร้างทางพิเศษที่มีการถมคันทางหนา 24 เมตร บนชั้นดินอ่อนที่ใช้ระบบดูดสุญญากาศที่มีการติดตั้งถังแยก

น้ำและอากาศฝังไว้ใต้แผ่นที่บออากาศ ดังแสดงในรูปที่ 14 จากข้อมูลการตรวจวัดในสนามในรูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าการทรุดตัวของชั้นดินมีค่ามากถึง 10 เมตร แต่แรงดูดสุญญากาศภายในพื้นที่ที่ปรับปรุงที่ติดตั้งถังแยกน้ำและอากาศ มีค่าสม่ำเสมอมากกว่า 80 kPa ตลอดระยะเวลาที่เปิดปั๊มสุญญากาศ ซึ่งเป็นไปตามที่ ศ.ดร. Imai ได้คิดค้นไว้



รูปที่ 13 แรงดันน้ำภายใต้ระบบดูดสุญญากาศแบบดั้งเดิมและระบบฝังถังแยกน้ำและอากาศ ปรับปรุงจาก Imai 2005



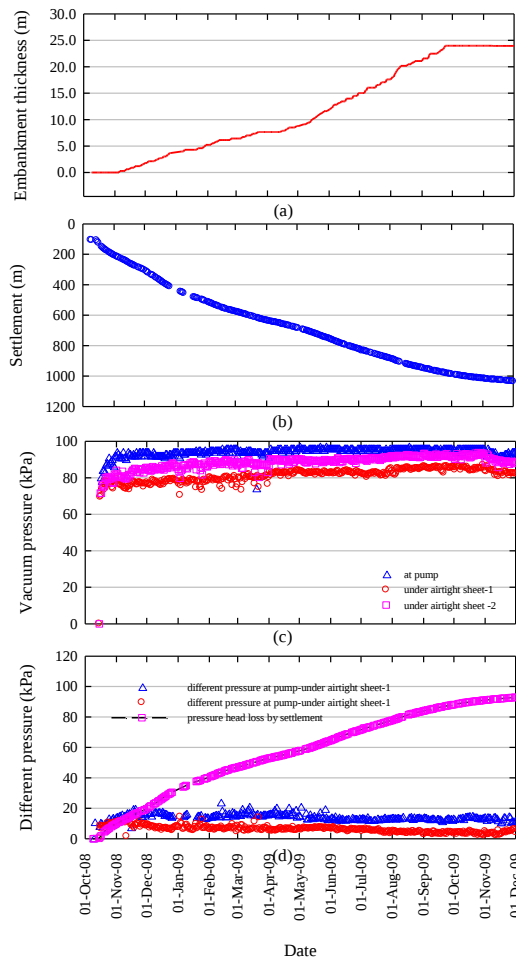
รูปที่ 14 Compact Vacuum Consolidation (CVC)

ที่มา: Vacuum Consolidation Technology Association, (2004)

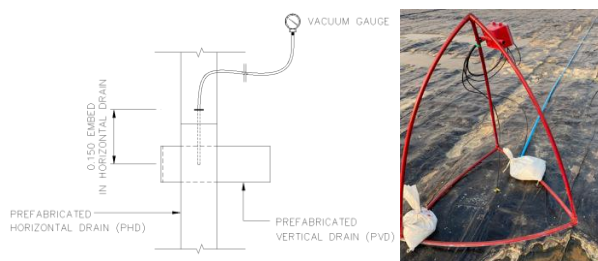
4.4 การควบคุมคุณภาพงานระหว่างการติดตั้งระบบดูดสุญญากาศ

แม้ว่าการติดตั้งระบบเป็นหน้าที่โดยตรงของผู้ชำนาญการ แต่ผู้ควบคุมงานหรือตัวแทนของผู้ว่าจ้างก็มีความสำคัญในการตรวจสอบ ดูแลให้การติดตั้งเป็นไปตามรายละเอียดและรูปแบบที่ได้รับการออกแบบไว้ ผู้ควบคุมงานควรดำเนินการส่วนต่างๆให้ครบถ้วน ดังนี้

- ศึกษารายละเอียดของแบบก่อสร้าง ขอบเขต จำนวน และตำแหน่งของวัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องติดตั้งในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศ
- ตรวจสอบเอกสารรับรองผลิตภัณฑ์และผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่สำคัญ เช่นแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งและแนวราบ ท่อระบายน้ำเจาะรูรอบ แผ่นป้องกันการฉีกขาด แผ่นที่บออากาศ เป็นต้น ตามที่ได้ระบุไว้ในแบบหรือรายละเอียดประกอบแบบ
- ตรวจสอบวัสดุที่นำเข้ามายังสถานที่ก่อสร้างว่าเป็นของใหม่ อยู่ในสภาพที่ถูกต้องตามที่ระบุไว้ในแบบหรือไม่
- ตรวจสอบว่าวัสดุติดตั้งถูกต้องครบถ้วนตามตำแหน่งที่ระบุไว้ในแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความลึกในการติดตั้งแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่ง ในกรณีพบอุปสรรคทำให้ไม่สามารถดำเนินการติดตั้งได้ตามแบบ จำเป็นต้องประสานงานกับผู้ออกแบบรับทราบและพิจารณาเห็นชอบหรือขอแนวทางแก้ไข



รูปที่ 15 ผลตรวจวัดภาคสนามของระบบดูดสุญญากาศที่ติดตั้งถังแยกน้ำและอากาศใต้แผ่นทับอากาศ (Teerachaikulpanich et al, 2005)



รูปที่ 16 การตรวจวัดแรงดูดสุญญากาศใต้แผ่นทับอากาศ

4.5 การควบคุมคุณภาพระหว่างปฏิบัติการสุญญากาศ

หลังจากที่ติดตั้งระบบดูดสุญญากาศแล้วเสร็จ ขั้นตอนต่อไปคือ ขั้นตอนของการปฏิบัติการสุญญากาศ ซึ่งถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อตรวจสอบว่าระบบที่ติดตั้งไว้มีประสิทธิภาพที่ติดตามที่กำหนดหรือไม่ โดยพิจารณาได้จากข้อมูลตรวจวัดต่างๆ ในภาคสนามดังต่อไปนี้

4.5.1 แรงดูดสุญญากาศที่ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pressure at pump)

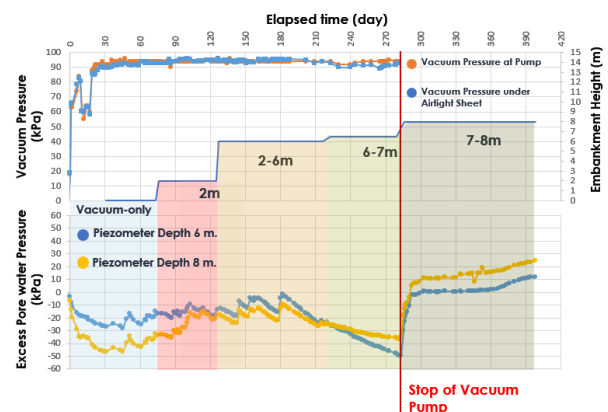
เป็นการตรวจวัดประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแรงดูดสุญญากาศ โดยทั่วไปแล้วแรงดูดสุญญากาศจะตรวจวัดได้จากมาตรวัดแบบเข็มหรือแบบดิจิทัล ใช้เพื่อตรวจวัดว่าปั๊มสุญญากาศทำงานปกติหรือไม่ โดยปกติแล้วจะมิวาล์วเปิด/ปิดระหว่างปั๊มสถานีดูดสุญญากาศกับท่อดูดที่ต่อเข้ากับ

พื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน แรงดูดสูงสุดของปั๊มดูดสุญญากาศสามารถตรวจวัดได้ในสภาวะที่เปิดปั๊มสุญญากาศ และปิดวาล์วกันเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศ อย่างไรก็ตามเมื่อเปิดวาล์วกันแล้ว แรงดูดสุญญากาศที่วัดได้จากมาตรวัดสุญญากาศบริเวณปั๊มจะมีค่าลดลงในช่วงแรก และจะค่อยๆ กลับสูงขึ้นภายในสัปดาห์แรกของการเปิดระบบดูดสุญญากาศ ในช่วงแรกของการเปิดระบบดูดสุญญากาศ จะเป็นช่วงที่ดำเนินการตรวจสอบรอยรั่วซึมและซ่อมแซม ภายหลังการซ่อมแซมรอยรั่วเสร็จเรียบร้อย แรงดูดสุญญากาศควรที่ปั๊มดูดสุญญากาศควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 80 kPa หากต่ำกว่านี้อาจเป็นไปได้ว่ายังคงมีการรั่วซึมของระบบดูดสุญญากาศคงเหลืออยู่หรือปั๊มสุญญากาศอาจจะมีขนาดเล็กเกินไปต่อพื้นที่ทั้งหมด ทั้งนี้เป็นหน้าที่ของผู้ติดตั้งระบบที่จะต้องตรวจสอบหาสาเหตุของปัญหาและดำเนินการแก้ไข

4.5.2 แรงดูดสุญญากาศในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน (Vacuum pressure under airtight sheet)

เนื่องจากการติดตั้งระบบดูดสุญญากาศนั้นไม่สามารถจะปิดกั้นการรั่วซึมได้ 100 % จึงมีการสูญเสียของแรงดูดสุญญากาศขึ้นในระบบบางส่วนไม่มากนักเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นแรงดูดสุญญากาศที่ตรวจวัดภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินจึงเป็นค่าที่สำคัญและจำเป็นต้องตรวจวัด เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดถึงแรงที่กระทำต่อชั้นดินที่แท้จริง ตำแหน่งที่เหมาะสมในการตรวจวัดแรงดูดสุญญากาศจะต้องเป็นตำแหน่งที่แรงดูดสุญญากาศส่งผ่านไปยังแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่ง เนื่องจากแรงดูดสุญญากาศที่กำเนิดโดยปั๊มสุญญากาศจะผ่านท่อดูดและท่อระบายน้ำเจาะรูรอบ ก่อนที่จะผ่านไปยังแผ่นระบายน้ำในแนวราบจนถึงบริเวณส่วนบนของแผ่นระบายน้ำในแนวดิ่ง นอกจากนี้ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดูดสุญญากาศในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินควรห่างจากแนวท่อระบายน้ำเจาะรูรอบมากที่สุดหรืออยู่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างท่อระบายน้ำเจาะรูรอบ ดังแสดงในรูปที่ 16

ในกรณีที่มีการติดตั้งมาตรวัดแรงดูดสุญญากาศกับถังแยกน้ำและอากาศ ท่อดูดหรือท่อระบายน้ำเจาะรูรอบโดยตรึงนั้นจะช่วยให้ค่าแรงดูดสุญญากาศที่สูงใกล้เคียงกับค่าที่ปั๊มดูดสุญญากาศ ซึ่งค่านี้ไม่สามารถยืนยันได้ว่าแรงดูดสุญญากาศที่จะส่งผ่านไปยังแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งคงเหลือเท่าไร ให้ถือว่าเป็นแรงดูดสุญญากาศเทียบเท่ากับที่ปั๊มสุญญากาศ เพราะสภาพที่แท้จริงแล้วแรงดูดสุญญากาศจะมีค่าลดลงระหว่างทางที่ไหลผ่านท่อระบายน้ำมีรูรอบและแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวราบเนื่องจากแรงเสียดทานภายในและความเสื่อมสภาพของวัสดุกรอง



รูปที่ 17 แรงดันน้ำส่วนเกินของชั้นดินระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศที่มีกรรมดินร่วม

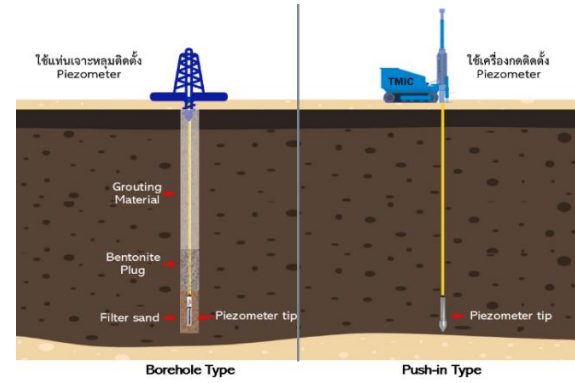
4.5.3 การทรุดตัวของชั้นดิน (Soil Settlement)

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวนั้นควรดำเนินการเจาะสำรวจชั้นดินในบริเวณที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดิน เก็บตัวอย่างดินคงสภาพ และนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานและทำการทดสอบกระบวนการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ตลอดช่วงชั้นความลึกของดินอ่อนที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อนำค่าคุณสมบัติดินที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นด้วยแรงกดสุญญากาศและน้ำหนักบรรทุกจากดินถมอื่นๆ ทั้งนี้แรงกระทำต่อชั้นดินฐานรากทั้งหมดนั้นจะประกอบด้วยแรงกดสุญญากาศ 70 kPa ที่ใช้ในการออกแบบ รวมทั้งน้ำหนักชั้นทรายระบายน้ำและน้ำหนักของดินถมที่จะดำเนินการทั้งหมดได้แก่ ค้นดินถมถาวร ส่วนที่ถมเพื่อชดเชยการทรุดตัว และส่วนที่เป็นน้ำหนักกระทำล่วงหน้าเพิ่มเติม (ถ้ามี) ความถูกต้องแม่นยำของการคาดการณ์การทรุดตัวนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความแปรปรวนของคุณสมบัติของชั้นดินในสนาม คุณภาพของการเก็บตัวอย่างดิน ขนาดของกระบอกเก็บตัวอย่างดิน และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆโดยผู้ทำการวิเคราะห์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าดินในธรรมชาติ นั้นมีความแปรปรวนอยู่ในระดับหนึ่ง เพราะฉะนั้นการคาดการณ์ปริมาณการทรุดตัวของชั้นดินจึงสามารถเกิดความคลาดเคลื่อนได้ในช่วงประมาณ $\pm 10\%$ ถึง 15% หากข้อมูลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวในสนามมีค่าใกล้เคียงอยู่ในเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเมื่อเทียบกับค่าในการวิเคราะห์แล้วก็สามารถถือว่าประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่หากการทรุดตัวมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณไว้มากเกินไปควรตรวจสอบหาสาเหตุ ทั้งนี้การตรวจสอบคุณสมบัติของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินอีกครั้ง เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากการคาดการณ์การทรุดตัวจากการคำนวณอาจจะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ เนื่องจากชั้นดินในสนามกับตัวอย่างดินที่ทดสอบได้นั้นอาจจะคลาดเคลื่อนแตกต่างกันได้หากชั้นดินมีความแปรปรวนสูง จึงควรเปรียบเทียบคุณสมบัติของชั้นดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพว่าเป็นไปอย่างที่ควรจะเป็นหรือไม่

4.5.4 แรงดันน้ำในมวลดิน (Pore water pressure)

แรงดันน้ำในมวลดินภายใต้สภาวะปกติ (Hydrostatic water pressure) จะมีค่าเท่ากับหน่วยน้ำหนักของน้ำคูณกับความสูงของระดับน้ำ ณ ตำแหน่งความลึกของดินที่พิจารณา เมื่อดินเหนียวอ่อนได้รับแรงกระทำจากภายนอก แรงดันน้ำในมวลดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นขึ้น ส่วนต่างระหว่างแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันน้ำภายใต้สภาวะปกติ จะเรียกว่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) ซึ่งในกรณีงานถมดินทั่วไปแล้วจะไม่ได้คำนึงถึงค่าแรงดันบรรยากาศเนื่องจากมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แรงดันน้ำส่วนเกินนี้จะมีค่าลดลงตามระยะเวลาเป็นไปตามหลักการของกระบวนการยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation process) แต่ในกรณีปรับปรุงดินด้วยระบบดูดสุญญากาศนั้น ค่าแรงดันบรรยากาศภายในมวลดินจะมีค่าลดลงตามเวลา การถมดินบนระบบปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศจะส่งผลให้แรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเพิ่มขึ้นและค่อยๆลดลงตามระยะเวลา ดังแสดงในรูปที่ 17 อัตราเร็วของการลดลงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น

- ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำของดิน (permeability) ในกรณีที่ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำต่ำ อัตราการลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกินก็จะช้ากว่าดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำที่สูงกว่า ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำของดินจะมีค่าสูงเมื่อดินอยู่ในสภาวะ Over consolidated state และจะมีค่าลดต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะ Normally consolidated state จากรูปที่ 17 จะเห็นว่าค่าแรงดันน้ำในมวลดินมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการเปิดระบบดูดสุญญากาศ และจะมีอัตราเร็วที่ลด



รูปที่ 18 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในดินอ่อนด้วยวิธีเจาะหลุมและแบบกดติดตั้งลงในชั้นดินโดยตรง

น้อยลงในภายหลังจากการเกิดการทรุดตัวไปในระดับหนึ่ง เนื่องจากดินมีความแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การระบายน้ำออกจากดินใช้เวลาเพิ่มมากขึ้น

- ระยะห่างของการติดตั้งแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่ง ส่งผลต่อความเร็วในการระบายแรงดันน้ำส่วนเกินออกจากมวลดิน ตัวอย่างเช่น การติดตั้ง PVD ที่ระยะห่าง 1.2 x 1.2 m ย่อมมีอัตราการลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกินช้ากว่าในกรณีที่ติดตั้งที่ระยะห่าง 1.0 x 1.0 m เป็นต้น เพราะระยะทางในการระบายน้ำที่ไกลกว่า อย่างไรก็ตามการติดตั้งแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ที่ระยะห่างกันน้อยเกินไปไม่ได้ส่งผลให้ความเร็วในการระบายน้ำส่วนเกินนั้นเร็วขึ้นตามสัดส่วนของระยะห่างที่ลดลง เนื่องจากในกระบวนการติดตั้งแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งนั้น ชั้นดินรอบๆท่อเหล็กนำ (Mandrel) นั้นเสียดสีกับชั้นดิน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การระบายน้ำบริเวณรอบๆแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งมีค่าลดลงเรียกว่า การรบกวนดิน (Smear Zone) โดยจะส่งผลให้ระยะเวลาในการปรับปรุงคุณภาพดินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งประเมินได้จากการนำเสนอของ Hansbo (1979) ดังนั้นผู้ออกแบบควรเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อสภาพชั้นดินในการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการสุญญากาศให้เพียงพอเพื่อให้กระบวนการยุบอัดตัวคายน้ำถึงเป้าหมายก่อนสิ้นสุดการปฏิบัติการสุญญากาศ โดย ในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศนั้นมักจะติดตั้งแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในช่วงระยะห่าง 0.8-1.2 เมตร โดยระยะห่างที่ 1.0 เมตร เป็นระยะตรงกลางที่นิยมใช้ในการออกแบบ เพื่อเร่งการทรุดตัวในดินเหนียวอ่อน

- อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในมวลดิน (Piezometer)

อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในมวลดิน (Piezometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันน้ำในมวลดิน ในกรณีที่มีการติดตั้งแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งนั้นจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในมวลดินที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างแผ่นระบายน้ำสังเคราะห์ในแนวดิ่งที่ติดตั้งไว้แล้ว การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในมวลดินจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าพิสัย (range) ของการตรวจวัดให้อยู่ภายในช่วงแรงดันน้ำที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดิน ตัวอย่างเช่น กรณีติดตั้งที่ความลึก 3 เมตร จากผิวดิน หากระดับน้ำใต้ดินเสมออยู่ที่ผิวดิน แรงดันน้ำปกติในธรรมชาติจะมีค่าไม่เกิน 30 kPa ระหว่างการปฏิบัติการสุญญากาศนั้นแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีโอกาสที่มีค่าต่ำกว่า 0 ในกรณีที่ไม่มีมีการถมดินเพิ่มเติมลงบนระบบดูดสุญญากาศ ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในมวลดินที่สามารถวัดค่าแรงดันด้านลบได้ แต่หากติดตั้งที่ความลึก 10 เมตร มีระดับน้ำใต้ดินเสมออยู่ที่ผิวดิน แรงดันน้ำปกติในธรรมชาติมีค่า 100 kPa ซึ่งระหว่างการใช้งานแรงดันน้ำจะไม่มีโอกาสติดลบ เนื่องจากแรงกดสุญญากาศมีค่าไม่เกิน 100 kPa เป็นต้น

วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 18 ได้แก่ รูปแบบที่ 1 คือวิธีเจาะหลุมนำแล้วหย่อนอุปกรณ์ลงไปติดตั้งในหลุม ซึ่งวิธีเจาะหลุมเพื่อติดตั้งนั้นจะต้องระมัดระวังในกรณีที่ติดตั้งและปิดหลุมได้ไม่ดี ส่งผลให้ค่าแรงดันน้ำที่วัดได้มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้นภายหลังจากการเปิดปั๊มสุญญากาศ ซึ่งค่าดังกล่าวไม่ถือเป็นค่าแรงดันน้ำในมวลดินที่แท้จริง ควรติดตั้งใหม่ทดแทนถ้าสามารถทำได้ รูปแบบที่ 2 คือการติดตั้งโดยการกดติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำที่ออกแบบมาโดยเฉพาะให้สามารถกดติดตั้งลงในชั้นดินอ่อนโดยตรง วิธีการนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องการรั่วซึมของการปิดหลุมติดตั้งอย่างในรูปแบบที่ 1 ค่าแรงดันน้ำในมวลดินที่ได้มีค่าที่น่าเชื่อถือมากกว่า แต่วิธีการนี้ยังมีข้อจำกัดตรงที่ไม่สามารถติดตั้งผ่านชั้นดินแข็งได้ และจะมีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นในระหว่างการติดตั้ง อาจจะต้องใช้เวลา 1-2 สัปดาห์เพื่อให้แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดจากการติดตั้งระบายออกสู่สมดุล

ค่าแรงดันน้ำในมวลดินนั้นเป็นเพียงค่าแรงดันน้ำ ณ จุด ๆ หนึ่ง ในมวลดินทั้งหมดที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ จึงควรพิจารณาติดตั้งในตำแหน่งที่วิกฤต (critical point) ก่อน เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาสูง เช่นติดตั้งในชั้นดินอ่อนมากที่สุดหรือในชั้นดินมีค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำต่ำสุด เพื่อติดตามพฤติกรรมของแรงดันน้ำในมวลดินที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะนำมาใช้ประโยชน์ในการใช้พิจารณาเพื่อควบคุมอัตราเร็วของการก่อสร้างคันดินถม เพื่อควบคุมเสถียรภาพของชั้นดินในระหว่างการถม และใช้ติดตามความก้าวหน้าของกระบวนการยุบอัดตัวคายน้ำว่าใกล้สิ้นสุดแล้วหรือไม่

4.5.5 การเคลื่อนตัวในแนวราบของชั้นดิน (Horizontal displacement)

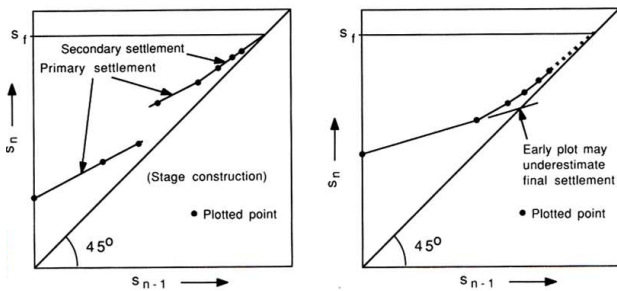
เนื่องจากแรงดูดสุญญากาศกระทำต่อชั้นดินแบบรอบด้าน (Isotropic consolidation) จึงก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวดิ่งและแนวราบยุบตัวรอบทิศทาง ทั้งนี้ปริมาณการยุบตัวจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินในสนามว่ามีหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) มากกว่าหรือต่ำกว่าแรงดูดสุญญากาศที่กระทำ ซึ่งดินเหนียวอ่อนจะมีความชื้นในมวลดินและช่องว่างในมวลดินสูง ส่งผลให้เกิดการยุบตัวมากกว่าดินที่แข็งกว่า การเคลื่อนตัวในแนวราบสามารถตรวจวัดได้โดยการติดตั้งท่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Inclinometer casing) ทั้งนี้ตำแหน่งการติดตั้งของท่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ตัวอย่างเช่น หากต้องการประเมินประสิทธิภาพของแรงดูดสุญญากาศก็มักจะติดตั้งท่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวที่บริเวณด้านข้างของพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน ค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบทิศทางเข้าหาพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินบ่งบอกถึงว่ามีแรงดูดสุญญากาศกระทำ ทำให้ดินยุบตัวในแนวราบ ในกรณีที่มีการถมดินบนระบบดูดสุญญากาศด้วยนั้น น้ำหนักดินถมที่กดทับลงบนระบบดูดสุญญากาศจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดูดสุญญากาศ ทั้งนี้ผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัวขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการถมดินและกำลังรับแรงเฉือนของดินระหว่างการปฏิบัติการสุญญากาศ การควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินให้ใกล้เคียงในสภาวะเริ่มต้นมากที่สุดนั้นสามารถดำเนินการได้โดยการตรวจวัดค่าและประเมินเพื่อกำหนดอัตราเร็วในการถมดินให้แรงในแนวราบสมดุลใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะต้องมีช่วงหยุดการถมเพื่อให้กำลังของดินได้พัฒนาระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนที่จะถมดินเพิ่มในชั้นถัดไป

ในกรณีที่ต้องการตรวจวัดผลกระทบต่อ การเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินบริเวณแนวเขตที่ดินที่ติดกับพื้นที่ของบุคคลอื่น จะต้องดำเนินการติดตั้ง Inclinometer ใกล้เคียงบริเวณที่ต้องการติดตามตรวจสอบพฤติกรรม การเคลื่อนตัวของชั้นดินบริเวณขอบเขตพื้นที่ ซึ่งหากการเคลื่อนตัวมีค่าน้อยใกล้เคียงศูนย์ก็บ่งชี้ได้ว่าแรงดูดสุญญากาศไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ใน

ตำแหน่งนั้น ทั้งนี้ควรทำการบันทึกภาพถ่ายพร้อมลงวันที่ของสภาพสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงก่อนและระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดินร่วมด้วย เว้นระยะห่างของขอบเขตพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศ และพื้นที่ไม่น้อยกว่า 1 เท่าของความลึกชั้นดินที่ปรับปรุงเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง

5. การพิจารณาปิดระบบดูดสุญญากาศ

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม และองค์ความรู้จากประสบการณ์ทำงาน ระยะเวลาของการเปิดระบบดูดสุญญากาศสามารถประเมินได้ในขั้นตอนของการวิเคราะห์และออกแบบว่าจะใช้ระยะเวลาเท่าใดตามทฤษฎีการระบายน้ำในแนวราบ อย่างไรก็ตามการดำเนินการในขั้นตอนต่างๆของภาคสนามอาจจะไม่ได้เป็นไปตามสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบ ดังนั้นระยะเวลาการเปิดระบบดูดสุญญากาศอาจมีความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปบ้างไม่มากนักย่น ตัวอย่างเช่น เมื่อเปิดระบบดูดสุญญากาศแล้วแรงดูดสุญญากาศในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดินมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ 70 kPa เนื่องจากการรั่วซึมของระบบมากเกินไป จำเป็นต้องใช้เวลารวบรวมและแก้ไขนานกว่าแผนกำหนดไว้ (โดยปกติไม่เกิน 1-2 สัปดาห์) หรือในกรณีที่อัตราการถมดินเป็นไปได้อย่างล่าช้ากว่าแผนเนื่องจากสภาพอากาศแปรปรวน ฝนตกหนัก น้ำท่วม ปัญหาเรื่องการขนส่งดินถมมายังสถานที่ก่อสร้าง หรือเกิดความเสียหายต่อแผ่นที่บอภาคระหว่างการถมดินต้องรื้อดิน คันหารอยรั่วและซ่อมแซม ความล่าช้าในสิ่งต่างๆเหล่านี้ส่งผลให้ระยะเวลาในการเปิดปั๊มสุญญากาศต้องขยายออกไปหรือแม้แต่ปัจจัยเรื่องค่าคุณสมบัติของชั้นดินที่อาจจะแตกต่างจากสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบคำนวณ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ระยะเวลาที่คำนวณออกแบบเพื่อกำหนดให้ปิดปั๊มสุญญากาศได้แบบตายตัว แต่จะนิยมใช้ค่าที่ตรวจวัดได้ในสนามได้แก่ปริมาณการทรุดตัว อัตราการทรุดตัว และอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในชั้นดิน เข้าร่วมพิจารณาในการประเมินหาระดับของกระบวนการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินภายใต้แรงกระทำที่เกิดขึ้นจริงในสนาม และทำนายค่าการทรุดตัวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นทั้งหมดจากข้อมูลสนามเพื่อกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์การยุบอัดตัวคายน้ำ (Degree of consolidation, %DOC) ด้วยวิธี Asaoka Method อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวก็มีข้อควรระวังในการใช้ เนื่องจากวิธีการนี้จะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากการเลือกช่วงระยะเวลา Δt ที่ใช้ทำนายค่าการทรุดตัวสุดท้าย ในกรณีที่ใช้ช่วงระยะเวลาห่างมากเกินไปจะส่งผลให้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้มีค่าต่ำ และมีระยะเวลาที่สั้นกว่าความเป็นจริง ดังนั้นแนะนำค่า Δt ที่ 7 วัน ในการวิเคราะห์เนื่องจากเป็นช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม ในกรณีของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบดูดสุญญากาศ นอกจากนี้ Holtz และคณะ พบว่าช่วงข้อมูลที่จะนำมาใช้นั้นมีผลต่อการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 19 กรณีใช้ข้อมูลช่วงต้นร่วมพิจารณาการทรุดตัวจะให้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายต่ำกว่าที่ควรจะเป็น แนะนำให้ใช้ข้อมูลการทรุดตัวในช่วงเดือนท้ายๆ (ประมาณ 2 เดือนก่อนปิดระบบดูดสุญญากาศ) มาวิเคราะห์หาค่า % DOC โดยเกณฑ์ที่นิยมใช้กันคือที่ 90% และจากการศึกษาของ Soralump และ คณะ (2023) พบว่า ในกรณีค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธี Asaoka Method มีความไม่สม่ำเสมอ ควรพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ควบคู่ประกอบการพิจารณาปิดระบบดูดสุญญากาศ เช่น การทรุดตัวขั้นสุดท้ายที่ได้จากพื้นที่หน้างาน ให้นำมาเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่ได้จาก Terzaghi หรือ วิธีเชิงประจักษ์อื่นๆ อัตราการทรุดตัวของดินในพื้นที่ปรับปรุง ≤ 2.0 มม./วัน เป็นต้น



รูปที่ 19 ผลการทำนายค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากช่วงข้อมูลการทรุดตัวที่แตกต่างกัน after Holtz et al. (1991)

ผู้ออกแบบ	ผู้ควบคุมงาน	ผู้รับจ้าง
- สำรวจและประเมินสภาพพื้นที่ดิน - กำหนดรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพดินด้วย Vacuum Consolidation Method - วิเคราะห์ และออกแบบระบบ Vacuum Consolidation Method - ประเมินความสูงและปริมาณงานดินถมในโครงสร้างและส่วนเชื่อมต่อการทรุดตัว - วิเคราะห์และออกแบบขั้นตอนการถมดินให้มีเสถียรภาพมั่นคงแข็งแรงและมีความปลอดภัย - ประเมินค่าการทรุดตัวระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดินและภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินไม่น้อยกว่า 5 ปี	- ควบคุมงานปรับปรุงคุณภาพดินให้เป็นไปตามแบบก่อสร้าง และรายละเอียดของระบบปรับปรุงคุณภาพดิน - ตรวจสอบค่าแรงและรูปแบบการติดตั้งแรงดูดสุญญากาศตามแบบก่อสร้างหรือตามที่ผู้ออกแบบกำหนด - ตรวจสอบการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดทางธรณีวิศวกรรมตามที่กำหนดไว้ในแบบ - ตรวจสอบและบันทึกค่าการตรวจวัดของเครื่องมือทางธรณีวิศวกรรม - ประเมินและสรุปผลการตรวจวัด	- ศึกษาแบบก่อสร้าง และรายละเอียดของระบบปรับปรุงคุณภาพดิน - จัดทำวัสดุและอุปกรณ์ที่มีคุณภาพดี ตามรายละเอียดแบบก่อสร้าง สำหรับงานติดตั้งระบบดูดสุญญากาศ - ดำเนินการติดตั้งระบบปรับปรุงคุณภาพดินให้เป็นไปตามแบบก่อสร้าง - ตรวจสอบและบำรุงรักษาระบบปรับปรุงคุณภาพดินให้มีแรงดูดสุญญากาศไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพดิน - ตรวจวัดและบันทึกค่าแรงดูดสุญญากาศตามมาตรฐาน

รูปที่ 20 แนวทางสำหรับผู้ดำเนินงาน

6. การตรวจสอบคุณสมบัติของดินภายหลังการปรับปรุง

ภายหลังจากที่ปิดปั๊มสุญญากาศแล้ว ชั้นดินจะมีการคลายตัว (Rebound) เนื่องแรงดูดสุญญากาศที่กดกระทำต่อชั้นดินจะคลายออกไป ระหว่างนี้ควรตรวจสอบค่าการทรุดตัว แรงดันน้ำในมวลดิน และการเคลื่อนตัวของชั้นดินอย่างต่อเนื่องไปอีกอย่างน้อย 1 เดือน เพื่อให้แน่ใจว่าแรงดูดสุญญากาศที่กระทำต่อดินได้คลายตัวออกไถ่หมดแล้ว จึงดำเนินการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินเพื่อทดสอบ เพราะหากดำเนินการในขณะที่แรงดูดสุญญากาศยังมีอยู่ในชั้นดินนั้น ตัวอย่างดินคงสภาพที่เก็บมาได้อาจจะยังมีแรงดูดสุญญากาศที่ค้างอยู่ ทำให้ตัวอย่างดินบวมตัวมากกว่าปกติได้ภายหลังจากที่ต้นตัวอย่างดินออกจากกระบอกเก็บตัวอย่าง ส่งผลให้ตัวอย่างดินเกิดการรบกวน (disturbed sample) ได้นอกจากนี้ควรเลือกบริษัทเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดินที่ได้มาตรฐานและเชื่อถือได้ ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของชั้นดินระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุงได้ คุณสมบัติที่ควรนำมาเปรียบเทียบได้แก่ ความชื้นในมวลดิน (w_n) และอัตราส่วนช่องว่างในมวลดิน (e_0) ที่ลดลง กำลังรับแรงเฉือนของดิน (S_u) และหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (p'_c) ของดินที่เพิ่มขึ้น

7. บทสรุป

เทคนิคปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วยระบบดูดสุญญากาศเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวอ่อนได้ดี โดยใช้หลักการสร้างความแตกต่างของแรงดันบรรยากาศระหว่างภายนอกและภายในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพดิน รูปแบบและรายละเอียดการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่นำมาประกอบเป็นระบบดูดสุญญากาศของผู้ชำนาญการแต่ละรายนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งต้องพิจารณาให้รอบคอบเนื่องจากสามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานปรับปรุงคุณภาพดินได้ ดังนั้นการเลือกระบบ

และเลือกผู้ชำนาญการ รวมถึงการตรวจสอบข้อมูลในสนามที่จำเป็นระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมคุณภาพงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดูดสุญญากาศที่วัดได้ผ่านทึบอากาศในระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดิน ท้ายที่สุดการเปรียบเทียบผลการเจาะสำรวจดินจะระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพจะเป็นวิธีการที่สามารถช่วยยืนยันผลการปรับปรุงคุณภาพดินว่ามีความสอดคล้องมีคุณภาพที่ได้ออกแบบคาดการณ์ไว้หรือไม่ ได้อย่างชัดเจนถูกต้องแท้จริง

8. ข้อเสนอแนะ

แนวทางสำหรับผู้ดำเนินงานปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน ด้วยระบบดูดสุญญากาศ (Vacuum Consolidation Method) ดังแสดงในรูปที่ 20

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Prof. Hideki Ohta, Mr. Kazuyoshi Nakakuma, Mr. Hiroshi Ichikawa, Mr. Toshiaki Kosaka, Mr. Mitsuki Toyota ที่ให้โอกาสให้ความรู้และสนับสนุนให้ผู้เขียนได้ทำงานในสายงานนี้ ทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย จนสามารถนำประสบการณ์และองค์ความรู้ที่มีเขียนบทความนี้ขึ้น เพื่อประโยชน์ต่อกับวิศวกรไทยและผู้สนใจ มา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- Holtz R. D., Jamiolkowski M., Lancellotta R. and Pedroni S. (1991). Prefabricated Vertical Drains: Design and Performance. Butterworth-Heinemann, CIRIA Ground Engineering Report: Ground Improvement. (In case of Book)
- Imai, G. (2005). For the Further Development of "Vacuum Induced Consolidation Method -Present Understandings of its Principle and Applications, *Journal of Construction management and Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Japan*, No.798/6 pp 1-16. (In case of Journal)
- Kjellman, W. (1952). Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure., *Proc. of the Conf. on Soil Stabilization*, Boston, Mass., June. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass, pp. 258-263. (In case of Articles from Conference Proceedings)
- Teerachaikulpanich, N., Kosaka T., and Kawaida M. (2013). Verification of air-water separation concept for vacuum consolidation method. *Geotechnics for Sustainable Development - Geotec Hanoi 2013*. (In case of Articles from Conference Proceedings)
- Vacuum Consolidation Technology Association, (2004). *Compact Vacuum Consolidation Technical Document* (in Japanese). pp.5 (In case of Book)
- Soralump S., Shah A. and Phakdimek S. (2023). Consideration of Multiple Factors for Quality Control of Improved Clay from Vacuum Consolidation Method. *Proceeding of the 21st Southeast Asian Geotechnical Conference and 4th AGSSEA Conference*. (In case of Articles from Conference Proceedings)