

การศึกษาอิทธิพลของการเกิดช่องว่างใต้ท่อที่ฝังใต้ดินที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

Influence of Void Formation Beneath Buried Pipes on Mechanical Behavior Using Three-Dimensional Finite Element Method.

ศุภนิดา เปียตระกูลสินธุ์^{1,*} เพิ่มพร บัวทอง²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*Corresponding author; E-mail address: supanida.yok@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การเกิดช่องว่างบริเวณใต้ท่อพีวีซีที่ฝังอยู่ใต้ดินสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น การไม่สม่ำเสมอของดินชั้นรองพื้นท่อและการชะล้างของน้ำใต้ดิน ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกร้าวของท่อได้ งานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติในการศึกษาอิทธิพลของขนาดช่องว่างใต้ท่อต่อพฤติกรรมทางกลของท่อ โดยเฉพาะในด้านการโก่งตัวในแนวตั้งและโมเมนต์ดัด นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์อิทธิพลของความลึกหลังท่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถม และค่าสตีฟเนสของท่อ ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อขนาดช่องว่างใต้ท่อที่เพิ่มขึ้น ค่าการโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของท่อจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความลึกหลังท่อ สามารถช่วยลดค่าการโก่งตัวและโมเมนต์ดัดลงได้ ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพของท่อในภาพรวม นอกจากนี้การลดค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถมและค่าสตีฟเนสของท่อจะส่งผลให้ค่าการโก่งตัวและโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นความสำคัญของการออกแบบฐานรากรองรับและวัสดุถมอย่างเหมาะสมเพื่อให้ท่อพีวีซีที่ฝังใต้ดินมีสมรรถนะเชิงโครงสร้างที่ดีในระยะยาว

คำสำคัญ: ช่องว่างใต้ท่อ, ท่อพีวีซีฝังใต้ดิน, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การโก่งตัว, โมเมนต์ดัด

Abstract

The formation of voids beneath buried PVC pipes can occur due to various factors, such as inconsistencies in the pipe bedding soil and groundwater erosion which may lead to pipe cracking. This study employs a three-dimensional finite element method to investigate the influence of void size on the mechanical behavior of the pipe, specifically in terms of vertical deflection and bending moment. Additionally, the effects of burial depth, backfill soil modulus, and pipe stiffness were examined. The results indicated that an increasing the size of void beneath the pipe significantly elevates both deflection and bending moment. However, increasing the burial depth effectively reduces these values, thereby enhancing pipe stability. Furthermore, decreasing the modulus of the backfill material and the pipe stiffness slightly increases deflection and bending moment. These findings highlight the importance of proper bedding and backfill design in maintaining the long-term structural performance of buried PVC pipes.

Keywords: Void formation, Buried PVC pipe, Finite element analysis, Deflection, Bending moment

1. คำนำ

ท่อจ่ายน้ำใต้ดินเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างพื้นฐานที่ช่วยจ่ายน้ำสะอาดให้กับผู้คนได้ใช้ในการอุปโภค บริโภคและใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ โดยท่อพีวีซี (polyvinyl chloride, PVC) เป็นท่อที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน มีความยืดหยุ่นสูง และติดตั้งได้ง่าย [1] อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของท่อในระยะยาวอาจได้รับผลกระทบจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อกับดินโดยรอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดโพรงใต้ท่อหรือมีการสูญเสียวัสดุชั้นรองพื้นท่อ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการชะล้างของดิน การถมกลับที่ไม่เหมาะสม การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน หรือการทรุดตัวที่ไม่สม่ำเสมอของชั้นดิน [2] ในภาคสนามช่องว่างใต้ท่อมักเกิดจากการชะล้างของดินและการบดอัดที่ไม่ได้มาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 1

การเกิดโพรงใต้ท่อหรือช่องว่างใต้ท่อพีวีซีที่ฝังอยู่ใต้ดิน สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกระจายความเค้นในตัวท่อและดินโดยรอบ การเกิดความไม่สม่ำเสมอของวัสดุรองรับใต้ท่อ ส่งผลให้ท่อเกิดการเสียรูปมากขึ้นไป เกิดความเค้นภายในท่อเพิ่มสูงขึ้น เกิดการแยกของข้อต่อ และอาจนำไปสู่การวิบัติของท่อในที่สุด [3] งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ท่อ (Invert) และบริเวณส่วนโค้งท่อ (Haunches) ส่งผลกระทบต่ออย่างมากต่อการเกิดโมเมนต์ดัดในท่อ [1] นอกจากนี้ ท่อพีวีซีจะเกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่าท่อคอนกรีตหรือท่อเหล็กเมื่อวัสดุรองใต้ท่อไม่สม่ำเสมอ [4]

โดยทั่วไปการศึกษาพฤติกรรมของท่อที่ฝังอยู่ใต้ดินมักใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ (Two-dimensional finite element method, 2D-FEM) แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้อาจยังไม่สามารถสะท้อนถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นแบบสามมิติได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ (Three dimensional finite element method, 3D-FEM) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการศึกษาผลกระทบของการเกิดโพรงหรือช่องว่างใต้ท่อพีวีซีโดยเฉพาะกรณีที่โพรงหรือช่องว่างใต้ท่อไม่ได้เกิดขึ้นตลอดความยาวท่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเกิดช่องว่างใต้ท่อพีวีซีที่ฝังอยู่ใต้ดินภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักจราจรด้วยการวิเคราะห์ 3D-FEM โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงการโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของท่อจากอิทธิพลของช่องว่างใต้ท่อ



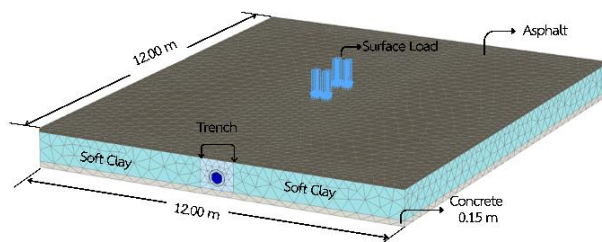
รูปที่ 1 การเกิดช่องว่างใต้ท่อ [5]

2. การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ (Finite element method, FEM)

ในการวิเคราะห์แบบจำลองนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิธีนี้เป็นการใช้เทคนิคทางวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมเทคนิคนี้ มีรายละเอียดดังนี้

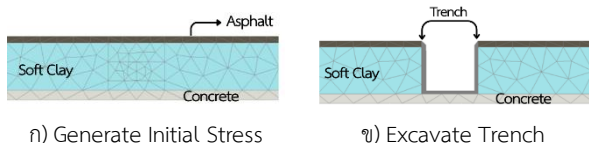
2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ มีขนาดความกว้าง 10 เมตร ยาว 12 เมตร และสูง 0.90 เมตร ตามแนวแกน X แกน Y และแกน Z ตามลำดับ โดยจำลองชั้นผิวบนของแบบจำลองเป็นแอสฟัลต์หนา 0.10 เมตร ด้านล่างของแบบจำลองเป็นพื้นคอนกรีตหนา 0.15 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเงื่อนไขของขอบเขตแบบจำลอง (Boundary Condition) ทางด้านล่างของแบบจำลองจะกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในแกน X, Y และ Z ขณะด้านข้างของแบบจำลองจะกำหนดให้มีการเคลื่อนที่เฉพาะตามแนวแกน Z และไม่พิจารณาระดับน้ำใต้ดิน



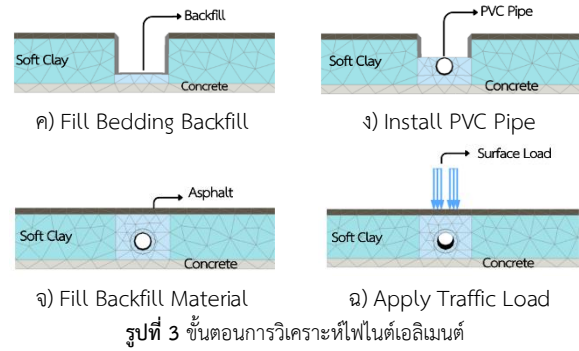
รูปที่ 2 แบบจำลองในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์จะจำลองขั้นตอนการก่อสร้างวางท่อพีวีซีได้ 6 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3



ก) Generate Initial Stress

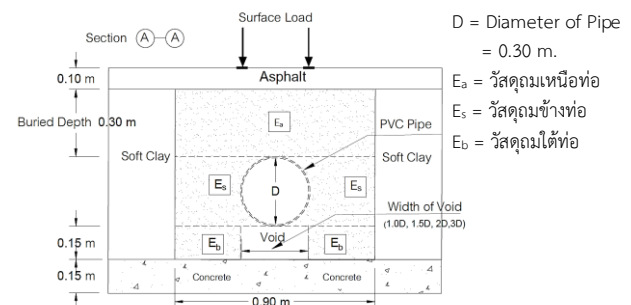
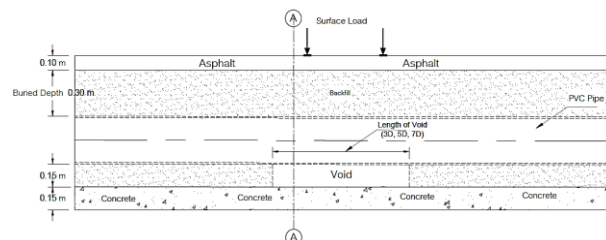
ข) Excavate Trench



รูปที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองท่อที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นท่อพีวีซี Class 8.5 ขนาด 300 มิลลิเมตร กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) 0.30 เมตร มีขนาดร่องขุดกว้าง 0.90 เมตร มีความหนาชั้นรองพื้นท่อ (Bedding) 0.15 เมตร และร่องขุดวางอยู่บนพื้นคอนกรีตด้านล่าง 0.15 เมตร การจำลองขนาดของช่องว่างใต้ท่อ (Void) จะกำหนดความกว้างเริ่มต้นเท่ากับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1.0 D (0.30 เมตร) ความยาว 3.0 D (0.90 เมตร) แสดงในรูปที่ 4

ในการกำหนดช่องว่างใต้ท่อใช้วิธีการ Deactivate บริเวณโซนใต้ท่อในลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง (Staged Construction) โดยพื้นที่ช่องว่างนั้นยังคงอยู่ใน mesh แต่ไม่ได้ถูกเปิดใช้งาน (Activated) จนถึงขั้นตอนที่ใส่วัสดุถมชั้นรองพื้นท่อ



รูปที่ 4 แบบจำลองร่องขุดในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2 การจำลองน้ำหนักรถจราจร

การวิเคราะห์พฤติกรรมของท่อพีวีซีใช้น้ำหนักจราจรจากรถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวม 25 ตัน โดยมีการกระจายน้ำหนักลงเพลารถบรรทุกจะคิดร้อยละ 20 ของน้ำหนักทั้งหมดลงเพลาน้ำหนัก และร้อยละ 80 ลงเพลาลัง การเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกแต่ละล้อจะเท่ากัน คือ ร้อยละ 10 ของน้ำหนักทั้งหมด ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะจำลองเฉพาะล้อชุดหลัง 4 ล้อ ดังแสดงในรูปที่ 5



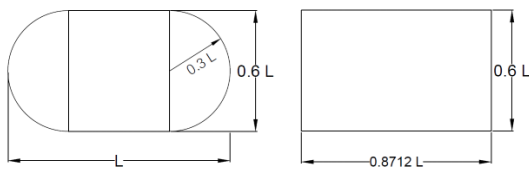
รูปที่ 5 การกระจายน้ำหนักจราจรลงแต่ละล้อ

พื้นที่ผิวสัมผัส (Contact Area) ระหว่างยางรถยนต์กับพื้นถนนสามารถแทนด้วยครึ่งวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาวเท่ากับ L และมีความกว้างเท่ากับ $0.6L$ ดังแสดงในรูปที่ 6ก) เพื่อสร้างการจำลองน้ำหนักบรรทุกที่กระทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ Huang [6] ได้เสนอวิธีการแปลงพื้นที่ผิวสัมผัส Contact Area ระหว่างล้อรถกับผิวแอสฟัลท์ให้เป็นพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่ $0.5227L^2$ และมีความกว้าง $0.6L$ ดังแสดงในรูปที่ 6ข) โดยพื้นที่ผิวสัมผัส (A_c) = $\pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227L^2$ หรือ

$$L = \sqrt{A_c / 0.5227} \quad (1)$$

เมื่อ A_c = น้ำหนักบรรทุก/แรงดันลมยาง

ขนาดที่ใช้ในแบบจำลองเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวสัมผัสแล้วมีขนาดกว้าง 0.14 เมตร ยาว 0.20 เมตร และมีน้ำหนักจราจรในแบบจำลอง (Traffic Load) 875.6 kN/m²



ก) Actual Area

ข) Equivalent Area

รูปที่ 6 การจำลองน้ำหนักบรรทุก

2.3 คุณสมบัติของวัสดุ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่วิธีที่ฝังใต้ดิน ท่อพีวีซีจะทำการจำลองแบบ Elastoplastic เพื่อดูพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของท่อที่เกิดการเสียรูปและคืนตัวได้จากช่วงยืดหยุ่น (Elastic Region) ไปสู่ช่วงเสียรูปถาวร (Plastic Region) ภายใต้แรงกระทำภายนอก เช่น การฝังกลบใต้ดินหรือน้ำหนักบรรทุก

แบบจำลองดินอ่อน (Soft Soil Model) เป็นการจำลองพฤติกรรมของดินในสถานะที่ดินมีความยืดหยุ่นหรืออ่อนตัวมีการยุบตัวสูง เช่น ดินเหนียวอ่อน ดินตะกอน ดินที่มีพฤติกรรมไหลหรืออัดแน่นแบบพลาสติกสูง มักจะใช้งานในวิศวกรรมศาสตร์และการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมฐานราก ซึ่งจะใช้ในแบบจำลองชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) และใช้แบบจำลองแบบยืดหยุ่น (Elastic Model) เพื่อจำลองพฤติกรรมของชั้นแอสฟัลท์ โดยเฉพาะสำหรับงานวิเคราะห์เชิงโครงสร้างเพื่อประเมินแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงในระยะสั้น

สำหรับวัสดุจะใช้แบบจำลองพฤติกรรมของดินมอร์-คูลอมป์ (Mohr-Coulomb Model, MCM) เป็นการจำลองพฤติกรรมดินแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นและพลาสติกแบบสมบูรณ์ (Linear Elastic – Perfectly Plastic) ที่นิยมถูกใช้ในการจำลองพฤติกรรมดินที่มีความแน่นปานกลางและถนน [7] โดยคุณสมบัติของโครงสร้างชั้นทาง วัสดุถมรองชุด ดินฐานรากและท่อพีวีซีสำหรับการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของท่อพีวีซีและคอนกรีตสำหรับการวิเคราะห์ [5]

	PVC Pipe	Concrete
--	----------	----------

Material model	Elastoplastic	Concrete
Unit weight (kN/m ³)	14.10	23.54
Poisson's ratio	0.30	0.30
Thickness (mm)	12.90	12.90
Tensile Yield stress (MPa)	49.56	49.56
Tensile Modulus Elasticity (MPa)	2,800	2.487x10 ⁶

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติของแอสฟัลต์ (Asphalt) ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) และดินถม (Backfill) [5]

	Soft Clay	Asphalt	Backfill
Material model	SSM	Elastic	MCM
Material behavior	Undrained	Drained	Drained
Unit weight (kN/m ³)	15.1	24	17.80
Modified Compression Index	0.120	-	-
Modified Swelling Index	0.046	-	-
Elastic modulus (MPa)	-	266	16.80

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติของแอสฟัลต์ (Asphalt) ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) และดินถม (Backfill) (ต่อ) [5]

	Soft Clay	Asphalt	Backfill
Poisson's ratio	0.35	0.30	0.33
Cohesion (kPa)	13.51	-	10
Friction angle (degree)	27.58	-	32.64
Over Consolidation Ratio (OCR)	1.05	-	-
Void Ratio	2.286	-	-
Permeability Coefficient (m/d)	1.2x10 ⁻⁵	-	-

2.4 กรณีการวิเคราะห์

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของท่อจะทำการศึกษา ขนาดช่องว่างใต้ท่อ ความลึกหลังท่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถมและค่าสติเฟนสของท่อ ดังตารางที่ 3 ถึง 7

ในกรณีความลึกหลังท่อจะกำหนดให้แบบจำลองมีช่องว่างใต้ท่อกว้างที่ความลึกหลังท่อต่าง ๆ โดยกำหนดเป็นเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D)

ในส่วนของการวิเคราะห์อิทธิพลของโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถม จะทำการศึกษาโดยการลดค่าโมดูลัสของวัสดุถมบริเวณรอบท่อ ได้แก่ 1) วัสดุถมเหนือท่อ (E_a) 2) วัสดุถมข้างท่อ (E_s) และ 3) วัสดุถมชั้นรองพื้นท่อ (E_b) ในการวิเคราะห์จะลดค่าโมดูลัสของวัสดุถมจากค่าเริ่มต้น (100%) ที่ละ 25% โดยการวิเคราะห์จะทำการลดค่าโมดูลัสของวัสดุถมยืดหยุ่นของวัสดุถมบริเวณที่ทำการศึกษา ขณะที่ค่าออสติคโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถมบริเวณอื่นจะคงที่ กำหนดช่องว่างใต้ท่อกว้าง 0.90 เมตร ยาว 1.50 เมตร

โดยการวิเคราะห์อิทธิพลค่าสติเฟนสของท่อ จะลดค่าสติเฟนสของท่อจากค่าสติเฟนสของท่อเริ่มต้น (100%) ลงที่ละ 25% โดยกำหนดช่องว่างใต้ท่อกว้างเช่นเดียวกับการลดค่าโมดูลัสของวัสดุถม

ตารางที่ 3 กรณีการวิเคราะห์อิทธิพลของความยาวของช่องว่างใต้ท่อ

ความยาวของช่องว่างใต้ท่อ (เมตร)	ความกว้างของช่องว่างใต้ท่อ (เมตร)	จำนวนการวิเคราะห์
3D (0.90 m)	1.0D, 2.0D (0.60 m), 3.0D (0.90 m)	9
5D (1.50 m)		
7D (2.10 m)		

ตารางที่ 4 กรณีการวิเคราะห์อิทธิพลของความกว้างของช่องว่างใต้ท่อ

ความกว้างของช่องว่างใต้ท่อ (เมตร)	ความยาวของช่องว่างใต้ท่อ (เมตร)	จำนวนการวิเคราะห์
1.0D (0.30 m)	3D (0.90 m), 5D (1.50 m), 7D (2.10 m)	9
2.0D (0.60 m)		

3.0D (0.90 m)		
---------------	--	--

ตารางที่ 5 กรณีการวิเคราะห์หิทธิพลของความลึกหลังท่อ

ความลึกหลังท่อ (Buried Depth) (เมตร)	ความกว้างของ ช่องว่างใต้ท่อ (เมตร)	ความยาวของ ช่องว่างใต้ท่อ (เมตร)	จำนวนการ วิเคราะห์
0.5D (0.15 m)	3.0D (0.90 m)	5D (1.50 m)	4
1.0D (0.30 m)			
1.5D (0.45 m)			
2.0D (0.60 m)			

ตารางที่ 6 กรณีการวิเคราะห์หิทธิพลของโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถม

โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถม			จำนวนการ วิเคราะห์
E_a	E_s	E_b	
75%, 50%, 25%	คงที่	คงที่	9
คงที่			
คงที่			

ตารางที่ 7 กรณีการวิเคราะห์หิทธิพลของค่าสตีเฟนสของท่อ

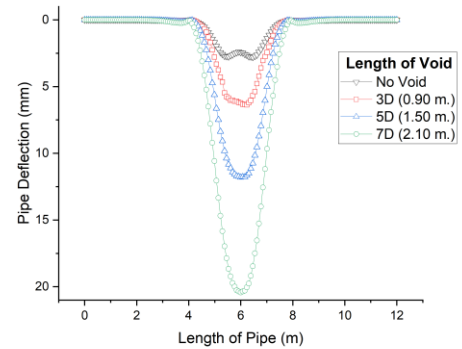
ค่าสตีเฟนสของท่อ	ความกว้างของ ช่องว่างใต้ท่อ (เมตร)	ความยาวของ ช่องว่างใต้ท่อ (เมตร)	จำนวนการ วิเคราะห์
75%,	3.0D (0.90 m)	5D (1.50 m)	3
50%,			
25%			

3. ผลการวิเคราะห์

3.1 อิทธิพลของความยาวของช่องว่างใต้ท่อ

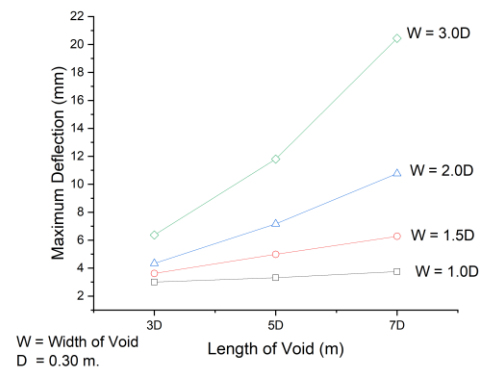
ในการศึกษาอิทธิพลของช่องว่างใต้ท่อในบริเวณที่มีน้ำหนักรถจราจรมากระทำ จะวิเคราะห์ที่ความลึกหลังท่อ 0.30 เมตร

ผลการวิเคราะห์พบว่าอิทธิพลของช่องว่างใต้ท่อส่งผลต่อการโก่งตัวของท่อที่วิธี รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของความยาวของช่องว่างใต้ท่อต่อพฤติกรรมของการโก่งตัวในแนวดิ่งในกรณีที่มีความกว้างของช่องว่างใต้ท่อกว้าง 3D (0.90 เมตร) ที่อยู่ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักจราจร จากกราฟแสดงแนวโน้มอย่างชัดเจนว่า เมื่อความยาวของช่องว่างเพิ่มขึ้น ค่าการโก่งตัวของท่อในแนวดิ่งก็เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยในกรณีช่องว่างยาว 7D (2.10 เมตร) ท่อเกิดการโก่งตัวสูงสุด 21 มิลลิเมตร ในขณะที่กรณีช่องว่างยาว 3D เกิดการโก่งตัวสูงสุด 5 มิลลิเมตร และในกรณีไม่มีช่องว่างพบการโก่งตัวเพียงเล็กน้อย จุดที่เกิดการโก่งตัวสูงสูดนั้นสอดคล้องกับตำแหน่งกึ่งกลางของช่องว่าง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการสูญเสียการรองรับของดินบริเวณใต้ท่อดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการโก่งตัวของท่อ



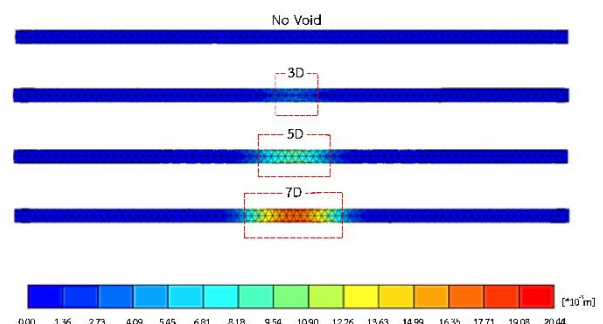
รูปที่ 7 อิทธิพลของความยาวช่องว่างใต้ท่อต่อการโก่งตัวของท่อ

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของช่องว่างใต้ท่อกับค่าการโก่งตัวสูงสุดของท่อในทุกความกว้างของช่องว่างใต้ท่อ พบว่าค่าการโก่งตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวของช่องว่างใต้ท่อ โดยเฉพาะเมื่อช่องว่างใต้ท่อมีความยาวถึง 7D (2.10 เมตร) การโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



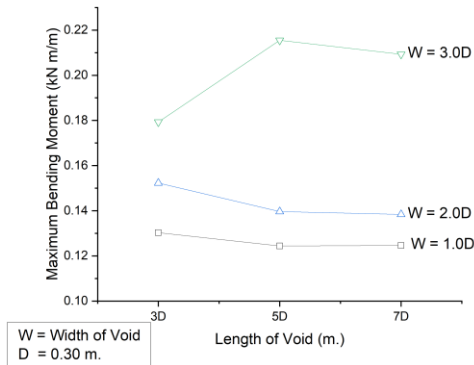
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องว่างใต้ท่อกับการโก่งตัวสูงสุดของท่อ

รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงการโก่งตัวบริเวณด้านล่างท่อกับการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องว่างใต้ท่อ พบว่าเมื่อความยาวของช่องว่างใต้ท่อเพิ่มขึ้นการโก่งตัวของท่อบริเวณด้านล่างท่อมีค่ามากขึ้นตามลำดับ สังเกตได้จากการกระจายของค่าสีที่แสดงถึงค่าการเคลื่อนที่ (Displacement) โดยเฉพาะในกรณี 7D ซึ่งเริ่มเข้าสู่ช่วงสีส้มถึงแดง แสดงถึงการโก่งตัวสูงสูด



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงการโก่งตัวบริเวณด้านล่างท่อกับการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องว่างใต้ท่อ

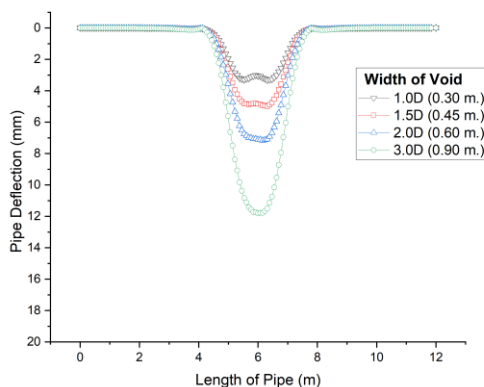
นอกจากนั้นอิทธิพลของความยาวของช่องว่างใต้ท่อ ยังส่งผลต่อการเกิดโมเมนต์สูงสุดของท่อที่ระยะความกว้างของช่องว่างใต้ท่อ ที่ 3D (0.90 เมตร) โดยการเพิ่มขึ้นของความยาวช่องว่างใต้ท่อส่งผลให้เกิดโมเมนต์สูงสุดเพิ่มขึ้นจนเกิดโมเมนต์สูงสุดที่ระยะ 5D (1.50 เมตร) และเริ่มลดลงเมื่อความยาวของช่องว่างใต้ท่อที่ระยะ 7D (2.10 เมตร) ส่วนในกรณีความกว้างช่องว่างใต้ท่อที่ 1.0D และ 2.0D มีแนวโน้มการเกิดโมเมนต์ของท่อลดลงและคงที่ตามความกว้างของท่อที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวช่องว่างใต้กับการเกิดโมเมนต์สูงสุดของท่อ

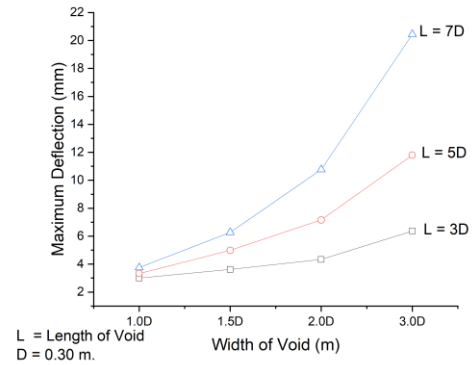
3.2 อิทธิพลของความกว้างของช่องว่างใต้ท่อ

การวิเคราะห์อิทธิพลของความกว้างช่องว่างใต้ท่อ จะวิเคราะห์ที่ความลึกหลังท่อที่ 0.30 เมตร รูปที่ 11 แสดงอิทธิพลของความกว้างของช่องว่างใต้ท่อ ต่อพฤติกรรมการโก่งตัวในแนวตั้งของท่อที่อยู่ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักจราจรโดยมีความยาวและความกว้างของช่องว่างใต้ท่อที่ 5D (1.50 เมตร) และ 3.0D (0.90 เมตร) ตามลำดับ จากรูปแสดงแนวโน้มว่า เมื่อความกว้างของช่องว่างเพิ่มขึ้น ค่าการโก่งตัวของท่อในแนวตั้งก็เพิ่มขึ้น โดยในกรณีช่องว่างใต้ท่อกว้าง 3.0D (0.90 เมตร) ท่อเกิดการโก่งตัวสูงสุด 12 มิลลิเมตร ในขณะที่กรณีช่องว่างยาว 1.0D (0.30 เมตร) เกิดการโก่งตัวสูงสุด 4 มิลลิเมตร จุดที่เกิดการโก่งตัวสูงสุดนั้นสอดคล้องกับตำแหน่งกึ่งกลางของช่องว่าง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการสูญเสียการรองรับของดินบริเวณใต้ท่อเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการโก่งตัวของท่อ

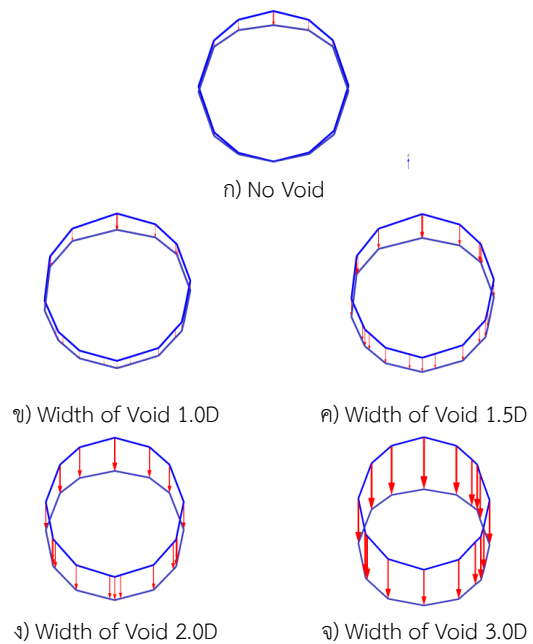


รูปที่ 11 อิทธิพลของความกว้างช่องว่างใต้ท่อต่อการโก่งตัวของท่อ

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของช่องว่างใต้ท่อกับค่าการโก่งตัวสูงสุด จากรูปพบว่าค่าการโก่งตัวเพิ่มขึ้น ตามความกว้างของช่องว่างใต้ท่อประกอบกับการเปลี่ยนแปลงของหน้าตัดท่อในแบบจำลองที่ตำแหน่งการโก่งตัวสูงสุด การเพิ่มความกว้างของช่องว่างใต้ท่อทำให้เกิดการเสียรูปของท่อเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 13

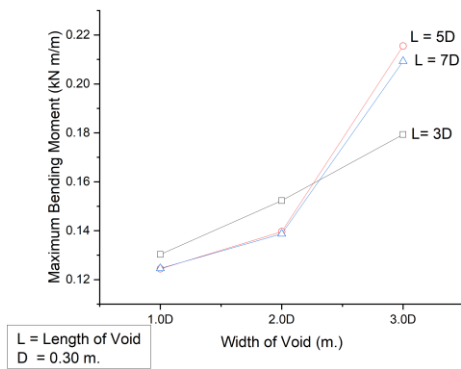


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องว่างใต้กับการโก่งตัวสูงสุดของท่อ



รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของท่อตำแหน่งที่มีการเกิดการโก่งตัวสูงสุด

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องว่างใต้กับการเกิดโมเมนต์สูงสุดของท่อเพิ่มขึ้นในทุกความยาวของช่องว่างใต้ท่อ โดยในกรณีที่ความกว้างช่องว่างใต้ท่อ 3.0D (0.90 เมตร) มีการเพิ่มขึ้นจากความกว้าง 2.0D (0.60 เมตร) อย่างเห็นได้ชัด



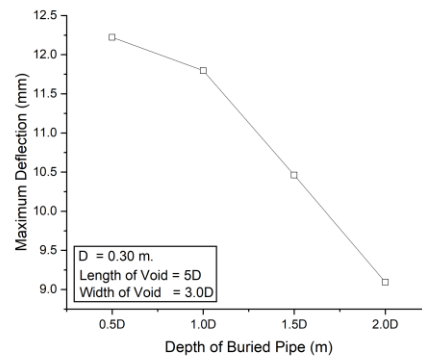
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องว่างใต้ท่อกับการเกิดโมเมนต์สูงสุดของท่อ

จากการศึกษาอิทธิพลของการเกิดช่องว่างใต้ท่อเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการโก่งตัวและเสียรูปของท่อ เนื่องจากดินไม่สามารถรองรับแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกได้ โดยขนาดของการเกิดช่องว่างใต้ท่อมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดของท่อพีวีซีทำให้ท่อเกิดการโก่งตัว เสียรูปและวิบัติส่งผลต่อการรั่วซึมหรือแตกร้าวในระยะยาว [7] รวมไปถึงการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ดัดของท่อเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของช่องว่างใต้ท่อ โดยสอดคล้องกับงานการวิจัยของ Balkaya, M. ที่ทำการศึกษาก่อสร้างท่อที่มีดินชั้นรองใต้ท่อไม่สม่ำเสมอที่เมื่อดินชั้นรองพื้นท่อไม่สม่ำเสมอจะส่งผลให้เกิดความเค้นในท่อสูงกว่ากรณีที่มีดินชั้นรองใต้ท่อที่สม่ำเสมอ [2] เช่นเดียวกับการศึกษาของ Jane M. Peter และคณะ ที่ได้ทำการศึกษาก่อสร้างท่อในท่อคอนกรีตภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การเกิดโพรงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ดัดในท่อ [3], [8]

การเกิดโมเมนต์ดัด (Bending Moment) มีผลโดยตรงต่อการเกิดความเค้นในท่อ (Stress) โดยเฉพาะในกรณีที่ท่อพีวีซีวางอยู่ในชั้นดินที่ไม่สม่ำเสมอหรือเกิดช่องว่างใต้ท่อ ค่าความเค้นของท่อเพิ่มขึ้นเกินค่าความแข็งแรงของท่อพีวีซี ส่งผลให้เกิดการเสียรูป แตกร้าว หรือเกิดความเค้นสะสมเกิดเสียหายของท่อในระยะยาวได้

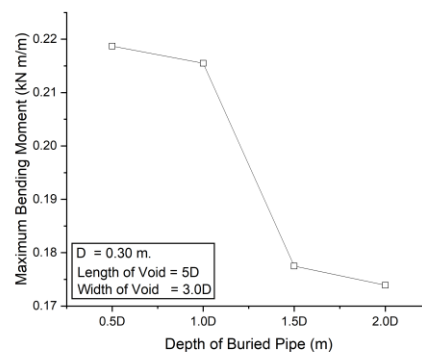
3.3 อิทธิพลของความลึกหลังท่อ

ในงานก่อสร้างมีการกำหนดระยะจากชั้นรองพื้นทางถึงหลังท่อ 0.20 เมตร และความหนาของวัสดุรองใต้ท่อ 0.15 เมตร และมีความลึกหลังท่อต่ำสุดที่ 0.50 เมตร ในกรณีการวิเคราะห์จะกำหนดความกว้างร่องขุดที่ 0.90 เมตร รูปที่ 15 อิทธิพลของความลึกหลังท่อต่อการโก่งตัวสูงสุดของท่อ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความลึกหลังท่อส่งผลให้ค่าการโก่งตัวของท่อลดลง เนื่องจากการเพิ่มความลึกหลังท่อดินที่อยู่รอบ ๆ ท่อจะมีแรงต้านด้านข้างมากขึ้นช่วยพยุงและรองรับท่อ รวมไปถึงช่วยให้แรงกระทำจากผิวดินกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกส่งผลให้แรงที่กระทำกับท่อลดลง การโก่งตัวของท่อจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากความลึกหลังท่อ 1.0D (0.30 เมตร) ไปที่ระยะ 1.5D (0.45 เมตร)



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลังท่อกับการโก่งตัวสูงสุดของท่อ

รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลังท่อกับโมเมนต์ดัดสูงสุดของท่อ ในความลึกหลังท่อที่ 0.5D (0.15 เมตร) ถึง 1.0D (0.30 เมตร) ดินด้านบนและด้านข้างของท่อไม่สามารถพยุงได้จึงทำให้น้ำหนักบรรทุกลงท่อได้โดยตรงส่งผลให้ท่อเกิดโมเมนต์ดัดของท่อสูง เมื่อความลึกหลังท่อมากขึ้นดินรอบท่อช่วยรับแรงจากน้ำหนักดินด้านบนได้ดีขึ้น (Soil Arching Effect) ทำให้การเกิดโมเมนต์ดัดของท่อลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีความลึกหลังท่อ 1.5D (0.45 เมตร)



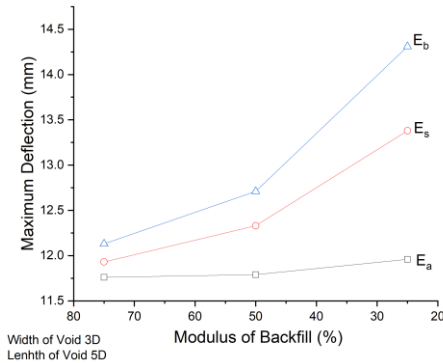
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลังท่อกับโมเมนต์ดัดสูงสุดของท่อ

3.4 อิทธิพลของโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถม

เนื่องจากการก่อสร้างวางท่อพีวีซีมีโอกาสเกิดการบดอัดวัสดุถมไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดซึ่งในบางครั้งต้องใช้การบดอัดจากแรงคนซึ่งยากต่อการควบคุมความหนาแน่นของวัสดุถมในร่องขุด เมื่อมีน้ำหนักจากรมากระทำจะมีโอกาสเกิดการทรุดตัวและเกิดการแตกร้าวของท่อพีวีซีได้ ในกรณีการวิเคราะห์จะทำการศึกษาโดยการลดค่าโมดูลัสของวัสดุถมบริเวณรอบท่อจากค่าเริ่มต้น (100%) ลดลงที่ละ 25% แบ่งการวิเคราะห์ที่บริเวณต่างๆ ในร่องขุด แบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ 1) วัสดุถมเหนือท่อ (E_a) 2) วัสดุถมข้างท่อ (E_s) และ 3) วัสดุถมรองพื้นท่อ (E_b) โดยการวิเคราะห์จะทำการลดค่าอัตราดัดโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถมในบริเวณที่ทำการศึกษา ขณะที่ค่าอัตราดัดโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถมบริเวณอื่นจะคงที่

ผลการวิเคราะห์พบว่า การโก่งตัวของท่อสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าอัตราดัดโมดูลัสของวัสดุถมในทุกบริเวณต่าง ๆ ของร่องขุดดังแสดงในรูปที่ 17 การโก่งตัวของท่อสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดลงของค่าอัตราดัดโมดูลัส ในบริเวณเหนือท่อ (E_a) และข้างท่อ (E_s) มีการโก่งตัวของท่อน้อยกว่าบริเวณการลดค่าอัตราดัดโมดูลัสของวัสดุถมชั้นรองพื้นท่อ (E_b)

เนื่องจากความเค้นจากน้ำหนักจราจรสามารถถ่ายไปยังโครงสร้างชั้นทางได้มากขึ้นเป็นพฤติกรรมการโค้งงอของดิน (Soil Arching Effect) การลดค่าอิลาสติกโมดูลัสของวัสดุถมบริเวณชั้นรองพื้นท่อ (Bedding) (E_b) จึงมีผลต่อการโก่งตัวมากกว่าบริเวณอื่น ๆ

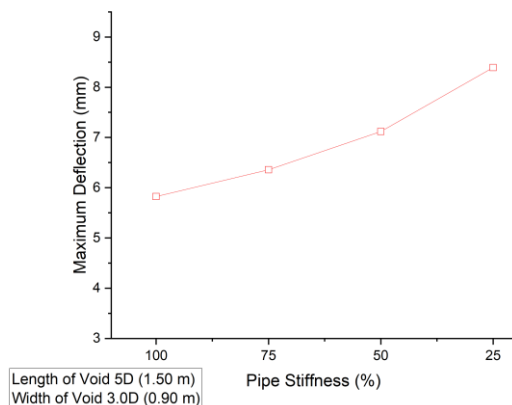


รูปที่ 17 ค่าโมดูลัสของวัสดุถมกับการโก่งตัวสูงสุดของท่อ

3.5 อิทธิพลของค่าสติฟเนสของท่อ

ในการใช้งานของท่อพีวีซีเป็นระยะเวลานานส่งผลให้ท่อเกิดความเสื่อมของท่อตามเวลาอาจจะเกิดจากเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุ หรือจากปัจจัยภายนอก เช่น แรงกระทำภายนอก อุณหภูมิ แสงแดด ความชื้น ค่าสติฟเนสของท่อเป็นตัวแปรหนึ่งที่จะส่งผลต่อความสามารถของท่อในการต้านทานการเสียรูปเมื่อมีแรงกระทำ

รูปที่ 18 แสดงค่าสติฟเนสของท่อกับการโก่งตัวสูงสุดของท่อ จากกราฟพบว่าเมื่อลดค่าสติฟเนสของท่อลง การโก่งตัวสูงสุดของท่อเปลี่ยนแปลงโดยลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น



รูปที่ 18 ค่าสติฟเนสของท่อกับการโก่งตัวสูงสุดของท่อ

4. บทสรุป

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของขนาดช่องว่างใต้ท่อต่อพฤติกรรมทางกลของท่อโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ พร้อมพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความลึกหลังท่อ โมดูลัสของวัสดุถม และค่าสติฟเนสของท่อ โดยการศึกษาพบว่า

1) ขนาดช่องว่างใต้ท่อมีอิทธิพลโดยตรงต่อการโก่งตัวและโมเมนต์ดัดของท่อ โดยเฉพาะในบริเวณเกิดโพรงหรือช่องว่างใต้ท่อ แม้ท่อพีวีซีจะรับแรงดัดได้ดี แต่การโก่งตัวของท่อสูงสร้างความเครียดสะสมที่จุดต่อของท่อพีวีซีนำไปสู่การเสียรูปหรือแตกร้าวเมื่อใช้งานต่อเนื่องในระยะยาว

2) อิทธิพลของความลึกหลังท่อเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการโก่งตัวสูงสุดของท่อ การเพิ่มขึ้นของความลึกหลังท่อช่วยเสริมแรงต้านด้านข้างจากดิน ส่งผลให้แรงที่กระทำต่อท่อกระจายอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดค่าการโก่งตัวและโมเมนต์ดัด

3) โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุถม โดยเฉพาะในบริเวณชั้นรองพื้นท่อ มีบทบาทสำคัญในการถ่ายแรงจากท่อลงสู่พื้นดิน วัสดุถมที่มีค่าโมดูลัสต่ำจะลดประสิทธิภาพในการรองรับแรง ทำให้ท่อรับภาระมากขึ้น การเลือกวัสดุถมและการบดอัดในร่องขุดจึงสำคัญต่อการวิบัติของท่อพีวีซี ในกรณีที่ไม่สามารถควบคุมการบดอัดวัสดุถมได้ตามมาตรฐาน เช่น พื้นที่แคบหรือเสี่ยงควรใช้วัสดุทางเลือก เช่น CLSM เพื่อเพิ่มโมดูลัสยืดหยุ่น และลดความเสี่ยงจากโพรงหรือช่องว่างใต้ท่อ

4) การลดลงของค่าสติฟเนสท่อส่งผลให้การโก่งตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพร้อมกับการเสื่อมสภาพของวัสดุในระยะยาวแล้วพบว่ายังคงมีผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของท่อ ซึ่งควรนำมาพิจารณาในการออกแบบและเลือกวัสดุท่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Balkaya, M., Moore, I. D., & Sağlam, A. (2012). Study of non-uniform bedding due to voids under jointed PVC water distribution pipes. Geotextiles and Geomembranes, 34, pp.39-50.
- [2] Balkaya, M., Moore, I. D., & Sağlam, A. (2013). Study of non-uniform bedding support under continuous PVC water distribution pipes. Tunnelling and Underground Space Technology, 35, pp.99-108.
- [3] Peter, J. M., Chapman, D., Moore, I. D., & Hoult, N. (2018). Impact of soil erosion voids on reinforced concrete pipe responses to surface loads. Tunnelling and Underground Space Technology, 82, pp.111-124.
- [4] Li, B., Fang, H., Yang, K., Zhang, X., Du, X., Wang, N., & Guo, X. (2022). Impact of erosion voids and internal corrosion on concrete pipes under traffic loads. Tunnelling and Underground Space Technology, 130, 104761.
- [5] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, รายงานฉบับสมบูรณ์: การศึกษาผลกระทบของน้ำหนักจราจรต่อการแตกร้าวของท่อจ่ายน้ำพีวีซีด้วยแบบจำลองหมุนเหวี่ยงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, เสนอต่อการประชุมครหลวง, 2566.
- [6] Huang, Y.H., Pavement analysis and design. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2004.
- [7] Li F, Zhang Z, Chen X. Numerical Research of Lightweight Foam Concrete Replacement Method of Deep Soft Foundation Treatment of Low-Filled Embankment. Geofluids 2022, 2022(1)
- [8] Hu J., Yan X., Zeng C., Study on Circumferential Mechanical Properties of Buried PE Pipes with Soil Erosion Void, Proceedings of Conference on Sustainable Traffic and Transportation Engineering in 2023, pp.89-100, 2024

