

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะท่อประปาตามมาตรฐานของการประปานครหลวง

ในปัจจุบันลักษณะการวางท่อประปาที่เป็นท่อประธานคือท่อส่งน้ำประปาจากสถานีสูบน้ำไปยังท่อจ่ายน้ำเพื่อส่งต่อไปยังบ้านผู้ใช้น้ำ ตามมาตรฐานการประปานครหลวงจะใช้เป็นท่อเหล็กเหนียว (ST) มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน AWWA C200, BS 534 หรือ JIS.G -3457 เป็นต้น ซึ่งท่อเหล็กเหนียว (Steel Pipe) ที่นิยมใช้ในงานวางท่อประปา เพราะมีข้อดีคือแข็งแรง แต่ป้องกันการผุกร่อนได้ไม่ดีจึงต้องมี Lining ด้วย Cement Mortar หรือ Liquid Epoxy รอยต่อของท่อในแต่ละช่วงจะเป็นการต่อด้วยรอยเชื่อมจะ Rigid และต้องป้องกันการผุกร่อนของรอยเชื่อม ปัจจุบันการประปานครหลวงนิยมใช้ท่อเหล็กเหนียวเส้นผ่าศูนย์กลาง 600 มม. ถึง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1,800 มม. ในการกำหนดเส้นทางและขนาดท่อประธานนั้น จะกำหนดจากความยาวในการวางท่อในระบบจ่ายน้ำ ปริมาณน้ำ และ Pressure Head จากจุดต้นทาง ปลายทาง และค่า Coefficient Roughness (C) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ชนิดท่อประปาที่การประปานครหลวงใช้ในการวางท่อเหล็กใต้ดิน

การเลือกชนิดท่อประปานี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ภูมิประเทศ วิธีการก่อสร้าง ตลอดจนค่าก่อสร้างและการบำรุงรักษา โดยต้องกำหนดชนิดท่อที่จะใช้ให้เหมาะสมกับสภาพงาน ท่อเหล็กที่นิยมใช้ประกอบด้วย

- ท่อเหล็กหล่อ (Cast Iron Pipe) ในอดีตการประปานครหลวงใช้ท่อเหล็กหล่อในงานวางท่อประธาน ปัจจุบันเลิกใช้เนื่องจากมีข้อเสียคือมีความเปราะหากมีแรงกระแทกจะทำให้ร้าวง่ายที่ข้อต่อการซ่อมบำรุงมีราคาแพง วัสดุหายากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

- ท่อเหล็กหล่อเหนียว (Ductile Iron Pie) มีข้อดีคือ ป้องกันการผุกร่อนได้ดีมาก ข้อต่อสามารถขยับตัวและขยายตัวได้ ออกแบบมาสำหรับต่อแบบ Push-on joint หรือ แบบ mechanical joint โดยอุปกรณ์จะออกแบบให้สามารถทนความดันใช้งาน (Working Pressure) ได้ไม่น้อยกว่า 10 กก./ซม.² และเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 2531 เหมาะกับพื้นที่ดินเดิมที่มีผลต่อการกัดกร่อนสูง และมีการทรุดตัวของดินมาก แต่เนื่องจากไม่มีโรงงานในประเทศไทย จึงทำให้มีปัญหาต่อการซ่อมแซม จำเป็นต้องซื้ออุปกรณ์ท่อมาสำรอง ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเหล็กหล่อเหนียวที่มีใช้แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนาผนังท่อเหล็กหล่อเหนียว

(ที่มา: รายละเอียดท่อและอุปกรณ์การประปานครหลวง, พ.ศ. 2549)

ขนาด ระบุ มม.	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก และความคลาดเคลื่อนที่ปลายท่อ มม.	ความหนาของผนังท่อ (ก่อนเคลือบภายใน) มม.	ความหนาของปูนสอ เคลือบภายในท่อ มม.
150	170 + 1.0, -3.0	6.0-1.3	5.0-0.5
200	200 + 1.0, -3.5	6.3-1.50	5.0-0.5
250	274 + 1.0, -3.5	6.8-1.55	5.0-0.5
300	326 + 1.0, -3.5	7.2-1.60	5.0-0.5
400	429 + 1.0, -4.0	8.1-1.70	5.0-0.5
500	532 + 1.0, -4.0	9.0-1.80	5.0-0.5
600	635 + 1.0, -4.5	9.9-1.80	5.0-0.5
700	738 + 1.0, -4.5	10.8-2.00	6.0-0.5
800	842 + 1.0, -4.5	11.7-2.10	6.0-0.5
900	945 + 1.0, -5.0	12.6-2.20	6.0-0.5
1,000	1,048 + 1.0, -5.0	13.5-2.30	6.0-0.5
1,200	1,255 + 1.0, -6.0	15.3-2.50	6.0-0.5
1,500	1,565 + 1.0, -7.5	18.0-2.80	9.0-1.0
1,800	1,875 + 1.0, -8.2	20.7-2.80	9.0-1.0

- ท่อเหล็กเหนียว (Steel Pipe) นิยมใช้ในการวางท่อประปาในปัจจุบัน ข้อดีคือแข็งแรง แต่การป้องกันการผุกร่อนไม่ดี จึงต้องมี Lining ด้วย Cement Mortar หรือ Liquid Epoxy หากการ Lining ไม่ดีจะมีปัญหาการผุกร่อนขึ้นได้ ท่อเหล็กเหนียว อุปกรณ์จะออกแบบให้สามารถทนความดันใช้งาน (Working Pressure) ได้ไม่น้อยกว่า 10 กก./ซม.² โดยข้อต่อถ้าเป็น mechanical Coupling จะสามารถขยับตัวและขยายตัวได้ หากเป็นการเชื่อมจะ Rigid และต้องป้องกันการผุกร่อนของรอยเชื่อมและข้อต่อให้ดี โดยการทำสีและทดสอบรอยเชื่อมให้มีประสิทธิภาพ ปัจจุบันการประปานครหลวงได้นำมาใช้ในงานวางท่อประปา รวมถึงบริเวณที่ท่อน้ำหนักบรรทุกมากๆ เช่นท่อข้ามถนนหรือทางเข้า และใช้ในกรณีวางท่อข้ามคลอง โดยแผ่นเหล็กที่ใช้ในการผลิตท่อต้องมีคุณสมบัติทางกลอย่างน้อยตามมาตรฐานดังต่อไปนี้

- ก) ASTM A 283, Grade C or D
- ข) ASTM A 570, Grade 30,33,36,40,45 or 50
- ค) JIS G 3457
- ง) JIS G 3101, Class SS400

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเหล็กเหนียวแสดงในตารางที่ 2.2

- ท่อคั่นลวด (Steel Concentric Double Cylinder Pipe) ท่อคั่นลวดจะต้องเป็นท่อเหล็กเหนียว 2 ชั้น ตามมาตรฐานของการประปานครหลวง ช่องว่างระหว่างชั้นนอกและชั้นในจะต้องเติมเต็มด้วย ปูนสอ (Cement mortar) ปูนสอต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน AWWA C 205 [1] โดยท่อคั่นลวด จะต้องจัดส่งท่อปลอกผ่าครึ่ง (Half Steel Segment) จำนวน 2 ชั้นต่อหนึ่งท่อน โดยแผ่นเหล็กที่ใช้ในการผลิตท่อต้องมีคุณสมบัติทางกลเหมือนท่อเหล็กเหนียว (Steel Pipe) และต้องมีลักษณะรอยเชื่อม ดังนี้

- ก) เชื่อมต่อชนแบบตะเข็บเกลียว (Spiral Seam Welding)
- ข) เชื่อมต่อชนแบบตะเข็บตรง (Straight Seam Welding)

ท่อคั่นลวดที่มีการเชื่อมแบบตะเข็บตรง ท่อแต่ละท่อนที่นำมาต่อกันจะมีตะเข็บตามยาว (Longitudinal Seam) ได้ไม่เกิน 1 ตะเข็บ และความยาวของท่อไม่น้อยกว่า 1.50 เมตร แนวตะเข็บตามยาวของส่วนต่อของท่อที่ติดกันให้อยู่ในแนวตรงกันข้าม โดยต้องทำการตรวจความหนาของแผ่นเหล็กแบบ Ultrasonic และทดสอบรอยเชื่อมตามมาตรฐานการประปานครหลวง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อคั่นลวดแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาผนังท่อเหล็กเหนียว

(ที่มา: รายละเอียดท่อและอุปกรณ์การประปานครหลวง, พ.ศ. 2549)

ขนาดระบุ มม.	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกของท่อ มม.	ความยาวท่อ ใต้ดิน และท่อบนดิน ม.	ความหนาของผนังท่อก่อนการเคลือบ มม.		ความหนา ของปูนสอ เคลือบ ภายใน มม.
			ใต้ดิน	บนดิน	
100	114.3, + - 1.6	-	2.65-0.25	4.50-0.25	6+2,-1
150	168.3, + - 1.6	6.00, + - 0.05	3.45-0.25	5.50-0.25	6+2,-1
200	219.1, + - 1.6	6.00, + - 0.05	4.50-0.25	6.00-0.25	6+2,-1
250	273.0, + - 1.6	6.00, + - 0.05	4.80-0.25	6.00-0.25	6+2,-1
300	323.9, + - 1.6	6.00, + - 0.05	6.00-0.25	6.00-0.25	6+2,-1
400	406.4, + - 1.6	9.00, + - 0.05	6.00-0.25	7.90-0.25	8+3,-2
500	508.0, + - 1.6	9.00, + - 0.05	6.00-0.25	7.90-0.25	8+3,-2
600	609.6, + - 1.6	9.00, + - 0.05	6.00-0.25	11.10-0.25	8+3,-2
700	711.2, + - 1.6	9.00, + - 0.05	6.00-0.25	11.10-0.25	10+3,-2
800	812.8, + - 1.6	9.00, + - 0.05	7.90-0.25	12.70-0.25	10+3,-2
900	914.4, + - 1.6	9.00, + - 0.05	7.90-0.25	12.70-0.25	10+3,-2
1,000	1,016.0, + - 1.6	9.00, + - 0.05	9.50-0.25	12.70-0.25	12+3,-2
1,100	1,117.6, + - 1.6	9.00, + - 0.05	9.50-0.25	-	-
1,200	1,219.2, + - 1.6	-	11.10-0.25	15.90-0.25	12+3,-2
1,300	1,320.8, + - 1.6	9.00, + - 0.05	12.70-0.25	-	-
1,400	1,422.4, + - 1.6	-	12.70-0.25	-	-
1,500	1,524.0, + - 1.6	-	12.70-0.25	19.10-0.25	12+3,-2
1,800	1,820.0, + - 3.0	9.00, + - 0.05	15.90-0.25	25.40-0.25	14+3,-2
2,100	2,120.0, + - 3.0	6.00, + - 0.05	19.10-0.25	-	-

ตารางที่ 2.3 ขนาด มิติ และความหนาของอุปกรณ์ท่อเหล็กเหนียวแบบดัดลอน
(ที่มา: รายละเอียดท่อและอุปกรณ์การประปานครหลวง, พ.ศ. 2549)

ขนาด ระบุ มม.	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก		ความหนาของผนัง		ความยาวของ ท่อประชน เมตร
	ท่อประชน มม.	ท่อปลอก มม.	ท่อประชน มม.	ท่อปลอก มม.	
1,000	1,016.0, + - 1.6	1,117.6, + - 1.6	12.7-0.25	6	3,4.5 และ 6
1,200	1,219.2, + - 1.6	1,320.8, + - 1.6	15.9-0.25	6	3,4.5 และ 6
1,500	1,524.0, + - 1.6	1,625.6, + - 1.6	19.1-0.25	6	3,4.5 และ 6
1,800	1,820.0, + - 3.0	1,920.0, + - 3.0	25.4-0.25	9	3,4.5 และ 6

2.2 ขั้นตอนการออกแบบท่อเหล็กใต้ดินรับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน

ALA-ASCE 2005

การประเมินท่อเหล็กใต้ดินรับแรงแผ่นดินไหวตาม ALA-ASCE 2005 นั้นทำการประเมิน โดยคำนวณค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงรูปของท่อเหล็ก (Deformation) เทียบกับ(Allowable Strain) ที่ยอมให้ที่กระทำกับท่อเหล็กใต้ดิน โดยจะต้องพิจารณาความเครียดจาก 2 ปัจจัยดังนี้

1) ค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจากแรงใช้งานของท่อเหล็ก (Operation Strain, $\mathcal{E}_{oper}$) จากแรงดันภายในท่อ (Internal Pressure) และจากการยืดหดของอุณหภูมิ (Temperature Chance)

2) ค่าความเครียด ที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหว (Seismic Strain, $\mathcal{E}_{sesimic}$) ทั้งแรงดึง (Longitudinal Strain) และแรงอัด (Compression Strain) โดยคำนวณจากแรงแผ่นดินไหวที่เกิดจากกรณี เช่น การทรุดตัวของดินบริเวณใต้ท่อเหล็ก (Permanent Ground Deformation, PGD) , แรงลอยตัว (Liquefaction) และผลจากการแพร่ของแรงแผ่นดินไหว (Seismic Wave Propagation) ในการคำนวณจะนำค่าความเครียด ที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 กรณีมารวมกันแล้วต้องไม่เกิดค่าค่าความเครียดที่ยอมให้ (Allowable Strain) ตามตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005

การคำนวณตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathcal{E}_{oper} + \mathcal{E}_{seismic} \leq \mathcal{E}_{allowable} \quad (2.1)$$

รายละเอียดในการคำนวณค่าความเครียดสามารถสรุปได้ดังนี้

2.3 การคำนวณความเครียดใช้งานในท่อ (Operation Longitudinal Strain in Pipeline, $\mathcal{E}_{oper}$)

ค่าความเครียดใช้งานสามารถหาได้จากแรงดันภายในท่อที่ออกแบบไว้รวมกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการใช้งาน

2.3.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงภายใน (Longitudinal Strain due to internal pressure)

ตามมาตรฐานของ ALA-ASCE 2005 กำหนดให้ความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงดันภายในท่อสามารถคำนวณได้จาก

$$\mathcal{E}_p = \frac{S_p}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \right] \left(\frac{S_p}{\sigma_y} \right)^r \quad (2.2)$$

- เมื่อ $\mathcal{E}_p$ = ความเครียดในเส้นท่อ (Engineering strain)
 S_p = Stress in pipe จากแรงดันภายในท่อมีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
 E = Initial Young's modulus มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
 σ_y = Yield strain ของท่อเหล็ก มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
 n, r = Ramberg - Osgood parameters กำหนดในตารางที่ 2.4

ค่าแรงดันภายในท่อ S_p สามารถหาได้ดังนี้

$$S_p = \frac{PD\mu}{2t} \quad (2.3)$$

- เมื่อ P = แรงภายในออกแบบ (Maximum internal operating pressure of the pipe)
 มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa) โดยแรงดันภายในท่อที่ประปานครหลวง
 ออกแบบไว้อยู่ที่ 30 kg/cm^2 หรือประมาณ 3 Mpa
- D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกมีหน่วยเป็นเมตร
- μ = Poisson's ratio (0.3 สำหรับท่อเหล็ก)
- t = ความหนาท่อมีหน่วยเป็นเมตร

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า n, r ของ Ramberg - Osgood parameters สำหรับท่อเหล็ก
 (ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Grade of pipe	Grade-B	X-42	X-52	X-60	X-60
Yield stress (Mpa) of the pipe material	227	310	358	413	517
n	10	15	9	10	5.5
r	100	32	10	12	16.6

2.3.2 ความเครียดที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิการ (Longitudinal Strain due to temperature change)

ตามมาตรฐานของ ALA-ASCE 2005 กำหนดให้ความเครียดที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงใน
 ท่อสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\mathcal{E}_t = \frac{S_r}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \right] \left(\frac{S_r}{\sigma_y} \right)^r \quad (2.4)$$

- เมื่อ $\mathcal{E}_t$ = ความเครียดในเส้นท่อ (Engineering strain)
- S_r = Stress in pipe จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในท่อมีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
- E = Initial Young's modulus มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
- σ_y = Yield strain ของท่อเหล็ก มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
- n, r = Ramberg - Osgood parameters กำหนดในตารางที่ 2.4

ค่า Stress in pipe, S_r สามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงดังนี้

$$S_r = E\alpha(T_2 - T_1) \quad (2.5)$$

เมื่อ	S_r	= Stress in pipe จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในท่อมีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
	E	= Initial Young's modulus มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
	α	= สัมประสิทธิ์การขยายตัวของท่อเหล็ก Linear coefficient of thermal expansion of steel ใช้ $(12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C})$
	T_1	= อุณหภูมิตอนติดตั้งท่อได้ดินมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
	T_2	= อุณหภูมิตอนใช้งานปกติมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

2.4 การคำนวณความเครียดจากแรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับท่อ (Seismic Strain in Pipeline)

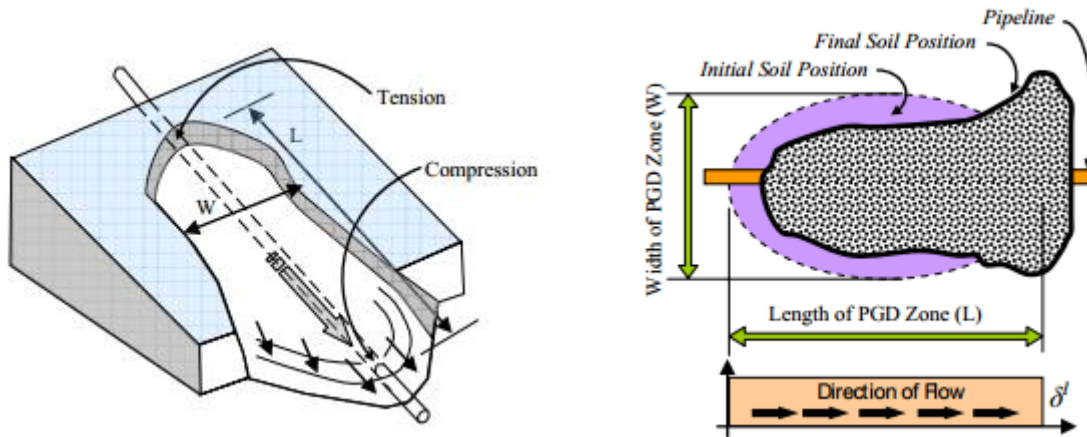
ผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดความเครียดในท่อเหล็กใต้ดินนั้นมีหลายกรณีตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005 ได้แบ่งกรณีในการพิจารณาเป็น 4 กรณีในการคำนวณหาความเครียดที่เกิดขึ้นในท่อได้แก่ 1. การทรุดตัวของดินตามแนวท่อบริเวณใต้ท่อเหล็ก (Longitudinal Permanent Ground Deformation, PGD) 2. การทรุดตัวของดินตามแนวตั้งฉากกับท่อบริเวณใต้ท่อเหล็ก (Transverse Permanent Ground Deformation, PGD) 3. แรงลอยตัว (Liquefaction) และ 4. ผลจากการแพร่ของคลื่นแผ่นดินไหว (Seismic Wave Propagation) เพื่อนำมาหาค่าสูงสุดของแรงดึง (Longitudinal Strain) และค่าสูงสุดของแรงอัด (Compression Strain) ไปใช้ในการคำนวณรายละเอียดค่าความเครียดจากทั้ง 4 กรณีสามารถสรุปได้ดังนี้

2.4.1 การคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้นจากการทรุดตัว (Permanent Ground Deformation , PGD)

ตามมาตรฐานของ ALA-ASCE 2005 กำหนดให้พิจารณาความเครียดที่เกิดขึ้นจากการทรุดตัวของดินบริเวณท่อเหล็กโดยแบ่งเป็นการทรุดตัวตามแนวยาว และแนวตั้งฉากกับแนวท่อ

การทรุดตัวในแนวยาว (Longitudinal Permanent Ground Deformation) เป็นการทรุดตัวของดินตามแนวท่อเหล็กใต้ดินเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวทำให้ดินใต้ท่อมีการทรุดตัวจึงเกิดเป็นแรง

ที่กระทำกับท่อทั้งแรงดึงและแรงอัด ในการคำนวณต้องมีการกำหนดค่าการทรุดตัวโดยประมาณ (δ^l) จากจากข้อมูลทางปฐพีและขอบเขตพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการพังถลายประกอบด้วย ความยาว (L) และความกว้าง (W) ของพื้นที่ที่เกิดการทรุดตัว โดยทั่วไปเป็นเรื่องยากที่จะหาค่าที่เป็นตัวเลข ในการกำหนดค่าการทรุดตัวที่ใช้ในการออกแบบ (δ^l) และขอบเขตพื้นที่ ของการทรุดตัวพื้นดินถาวร ดังนั้นช่วงในการคำนวณจะต้องมีการประมาณการจากข้อมูลทางปฐพี



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการเกิดและรูปแบบของ Longitudinal Permanent Ground Deformation [6]
(ที่มา: National Information Center of Earthquake Engineering, พ.ศ. 2550)

ค่าการทรุดตัวออกแบบตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005 กำหนดได้ดังนี้

$$\delta^l_{design} = \delta^l * I_p \quad (2.6)$$

เมื่อ δ^l_{design} = ค่าการทรุดตัวออกแบบ (Maximum longitudinal ground displacement)
มีหน่วยเป็นเมตร

I_p = แฟกเตอร์คูณขยาย (กำหนดในตารางที่ 2.5) ตามความสำคัญ

ค่าความสำคัญจะขึ้นอยู่กับลักษณะของท่อโดยกำหนดค่าความสำคัญตาม Class ของท่อตามตารางที่ 2.5 ลักษณะของท่อ Class ต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

- **Class I** ท่อน้ำที่สำคัญมากจำเป็นในการให้บริการเมื่อเกิดแผ่นดินไหวยังคงอยู่ในสถานการณ์ทำงานและการดำเนินงานได้ตามปกติ ทั้งในระหว่างและหลังเกิดแผ่นดินไหวเช่นในการ

ออกแบบ ท่อน้ำมัน ท่อประปาที่ส่งจ่ายน้ำในบริเวณกว้าง และก๊าซความดันต่ำสูงซึ่งจำเป็นและมีความสำคัญมากในการทำงานซึ่งต้องให้ยังคงสภาพอยู่ตามปกติ เพราะเมื่อท่อเกิดการสูญเสียหรือเสียหายมีผลกระทบในวงกว้างของชีวิตหรือผลกระทบที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อมในกรณีเมื่อเกิดความเสียหาย

- **Class II** ท่อน้ำที่มีความสำคัญในการให้บริการชุมชนขนาดใหญ่และมีความสำคัญ มีผลกระทบทางเศรษฐกิจต่อชุมชนหรือเป็นอันตรายอย่างมากต่อชีวิตมนุษย์และทรัพย์สิน ในกรณีของความเสียหาย เช่นท่อความดันปานกลาง ท่อน้ำมันและท่อก๊าซ ท่ออำนวยความสะดวกที่ให้บริการด้านพลังงาน แต่เมื่อเกิดความเสียหายสามารถซ่อมแซมได้

- **Class III** ระบบท่อส่งน้ำประปาเพื่อการใช้งานปกติ ท่อน้ำมันและท่อก๊าซความดันต่ำ

- **Class IV** ท่อน้ำที่มีความสำคัญต่ำหรือน้อยมากและส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ชีวิตและสังคมน้อยในกรณีเกิดความเสียหาย ท่อที่ไม่จำเป็นต้องซ่อมแซมอย่างรวดเร็ว หลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว

เมื่อได้ชั้นความสำคัญแล้วสามารถคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้นจากผลของการทรุดตัวในแนวยาว (Longitudinal Permanent Ground Deformation) ได้จากสมการที่ 2.7-2.10

ตารางที่ 2.5 แสดงแฟกเตอร์สำหรับการออกแบบที่ตามความสำคัญของท่อใต้ดิน (I_p)

(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Class of pipeline	Transverse and Longitudinal PGD
I	1.5
II	1.35
III	1
IV	*

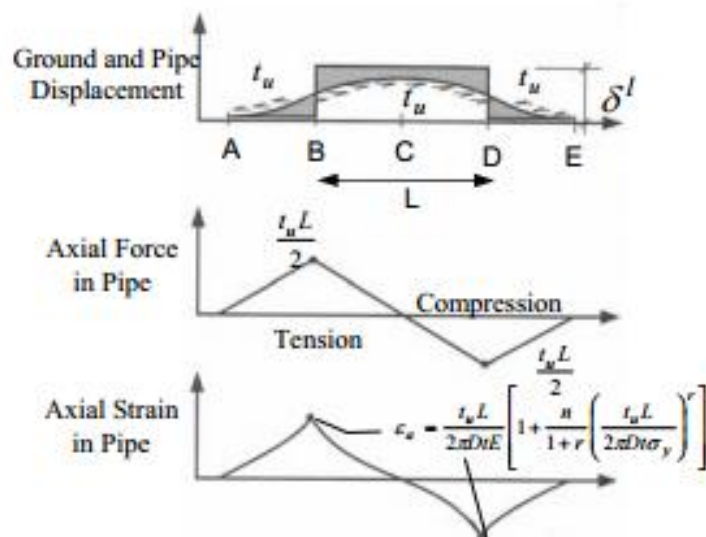
* ไม่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว

ตามมาตรฐานของ ALA-ASCE 2005 ให้คำนวณค่าความเครียดจาก 2 รูปแบบจากการเคลื่อนตัวของดินที่อาจเกิดขึ้นได้จากการทรุดตัวตามแนวยาวดังนี้

รูปแบบที่ 1 เมื่อการเคลื่อนตัวของพื้นดิน (δ^l_{design}) ที่มีขนาดใหญ่ จะได้ลักษณะของความเครียดและแรงตามแนวท่อดังรูปที่ 2.6 [4] ความเครียดตามแนวแกนสูงสุดในท่อทั้งความแรงดึงและแรงอัดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon_l = \frac{t_u L}{2\pi D t E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{t_u L}{2\pi D t E} \right)^r \right] \quad (2.7)$$

- เมื่อ L = ระยะตามยาวของ permanent ground deformation zone
 σ_y = Yield stress ของท่อเหล็กมีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
 n, r = Ramberg - Osgood parameters กำหนดในตารางที่ 2.5
 E = Modulus of elasticity มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
 t_u = แรงเสียดทานสูงสุดต่อความยาวท่อที่ชั้นดินบริเวณวางท่อใต้ดิน
 มีหน่วยเป็น kN/m
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกมีหน่วยเป็นเมตร
 t = ความหนาท่อมีหน่วยเป็นเมตร



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบที่ 1 Inelastic model for longitudinal PGD [4]
 (ที่มา O'Rourke et. al., 1995)

ค่าแรงเสียดทานต่อความยาวท่อตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$t_u = \pi D c \alpha + \pi D H \gamma \left(\frac{1 + K_0}{2} \right) \tan(f\phi) \quad (2.8)$$

- เมื่อ L = ระยะตามยาวของ permanent ground deformation zone มีหน่วยเป็นเมตร
 c = ค่าสัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวของดิน Coefficient of cohesion
 มีหน่วยเป็นกิโลปาสคาล (kpa)
 α = Adhesion factor คำนวณได้จากสมการ

$$= 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1}$$

 H = ระดับดินถมด้านบนท่อเฉลี่ยจนถึงกึ่งกลางท่อเฉลี่ยมีหน่วยเป็นเมตร
 γ = น้ำหนักจำเพาะของดิน Effective Unit weight of soil
 มีหน่วยเป็น N/m^3
 f = ค่าแรงเสียดทานของท่อ
 = Concrete ใช้ 1.0 , Rough steel ใช้ 0.8 และ Smooth Steel ใช้ 0.7
 ϕ = มุมภายในของชั้นดิน Internal Friction angle of soil มีหน่วยเป็นองศา
 K_0 = Lateral Earth Pressure Coefficient ประมาณเท่ากับ $1 + \sin 30^\circ$

รูปแบบที่ 2 เมื่อความยาว (L) ของโซ่การเคลื่อนตัวมีขนาดใหญ่มาก ความเครียดในท่อสูงสุดสำหรับทั้งความแรงดึงและแรงอัดสามารถคำนวณได้ดังนี้

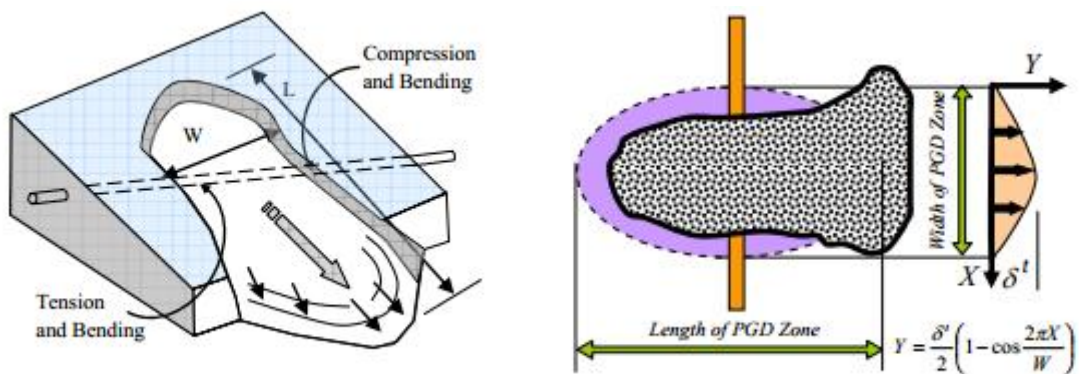
$$\varepsilon_l = \frac{t_u L_e}{2\pi D t E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{t_u L_e}{2\pi D t E} \right) \right]^r \quad (2.9)$$

- เมื่อ L_e = ระยะตามยาวประสิทธิผลของท่อค่า L_e จะหาค่าจากการทรุดตัวออกแบบ δ^l_{design} โดยที่จะต้องหาจากการแก้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง δ^l_{design} และ L_e ดังนี้

$$\delta^l_{design} = \frac{t_{uLe}}{\pi D t E} \left[1 + \left(\frac{n}{1+r} \right) \left(\frac{2}{2+r} \right) \left(\frac{t_{uLe}}{\pi D t \sigma_y} \right) \right]^r \quad (2.10)$$

ในการออกแบบจะนำเอาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นมากที่สุดจาก 2 รูปแบบจากสมการที่ 2.7 และ 2.9 ในการทรุดตัวตามแนวยาว (Longitudinal Permanent Ground Deformation) ไปรวมกับความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงใช้งานของท่อเหล็ก (Operation Strain)

ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งแรงดึงและแรงอัดจากผลของการเคลื่อนตัวตั้งฉากกับแนวท่อ (รูปที่ 2.3) จะพิจารณาในทำนองเดียวกันกับการทรุดตัวตามแนวยาว (Longitudinal Permanent Ground Deformation) โดยที่ค่าความเครียดจะขึ้นอยู่กับช่วงของการเคลื่อนที่ (δ^t_{design}) และขอบเขตพื้นที่ (W) ของการเคลื่อนตัว



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดและรูปแบบของ Transverse Permanent Ground Deformation [4]

(ที่มา: National Information Center of Earthquake Engineering, พ.ศ. 2550)

ค่าความเครียดที่เกิดตามแนวยาวตั้งฉากตามมาตรฐานของ ALA-ASCE 2005 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 -2.13

ค่าการทรุดตัวในทิศทางตั้งฉากสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta^t_{design} = \delta^t * I_p \quad (2.11)$$

เมื่อ δ^t_{design} = ค่าการทรุดตัวออกแบบ (Maximum transverse ground displacement)

มีหน่วยเป็นเมตร

I_p = แฟกเตอร์คูณขยาย (ดังในตารางที่ 2.5)

ค่าความเครียดจะคำนวณจาก 2 กรณี คือ

ค่าใน กรณีที่ 1

$$\varepsilon_t = \pm \frac{\pi D \delta^t_{design}}{w^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ δ^t_{design} = ค่าการทรุดตัวออกแบบ (Transverse ground displacement) มีหน่วยเป็นเมตร

w = ความกว้างของ (Transverse ground displacement) มีหน่วยเป็นเมตร

D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก มีหน่วยเป็นเมตร

t = ความหนาต่อมีหน่วยเป็นเมตร

ใน กรณีที่ 2

$$\varepsilon_t = \pm \frac{P_u w^2}{3\pi E t D^2} \quad (2.13)$$

เมื่อ P_u = แรงต้านทานของชั้นดินต่อความยาวต่อ มีหน่วยเป็น kN/m คำนวณได้จากสมการ

$$P_u = N_{ch} * cD + N_{qh} \gamma H D$$

โดยค่า N_{ch} และค่า N_{qh} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$N_{ch} = a_I + b_I x + \frac{c_I}{(x+1)^2} + \frac{d_I}{(x+1)^3} \quad (2.14)$$

เมื่อ N_{ch} = ค่าสัมประสิทธิ์แรงอัดตามแนวแกนสำหรับดินเหนียว (กำหนดในตารางที่ 2.6)

x = ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่าง $\frac{H}{D}$

H = ระดับดินถมด้านบนท่อเหล็กจนถึงกึ่งกลางท่อเหล็กมีหน่วยเป็นเมตร

D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก มีหน่วยเป็นเมตร

a_1, b_1, c_1, d_1 = ค่าตัวประกอบ (กำหนดไว้ในตารางที่ 2.6)

$$N_{qh} = a_1 + b_1x + c_1x^2 + d_1x^3 + e_1x^4 \quad (2.15)$$

เมื่อ N_{qh} = ค่าสัมประสิทธิ์แรงอัดตามแนวแกนสำหรับทราย (กำหนดในตารางที่ 2.6)

x = ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่าง $\frac{H}{D}$

H = ระดับดินถมด้านบนท่อเหล็กจนถึงกึ่งกลางท่อเหล็กมีหน่วยเป็นเมตร

D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก มีหน่วยเป็นเมตร

a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 = ค่าตัวประกอบ (กำหนดไว้ในตารางที่ 2.6)

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าตัวประกอบสำหรับการออกแบบแรงต้านทานของชั้นดิน (P_u)

(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Factor	θ	X	a_1	b_1	c_1	d_1	e_1
N_{ch}	0°	H/D	6.752	0.065	-11.063	7.119	-
N_{qh}	20°	H/D	2.399	0.439	-0.03	$1.059(10)^{-3}$	$-1.754(10)^{-5}$
N_{qh}	25°	H/D	3.332	0.839	-0.09	$5.606(10)^{-3}$	$-1.319(10)^{-4}$
N_{qh}	30°	H/D	4.565	1.234	-0.089	$4.275(10)^{-3}$	$-9.159(10)^{-5}$
N_{qh}	35°	H/D	6.816	2.019	-0.146	$7.651(10)^{-3}$	$-1.683(10)^{-4}$
N_{qh}	40°	H/D	10.959	1.783	0.045	$5.425(10)^{-3}$	$-1.153(10)^{-4}$
N_{qh}	45°	H/D	17.658	3.309	0.048	$6.443(10)^{-3}$	$-1.299(10)^{-4}$

ในการออกแบบจะเอาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นมากที่สุดจาก 2 กรณี ไปรวมกับความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงใช้งานของท่อเหล็ก (Operation Strain)

2.4.2 การคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงลอยตัว (Buoyancy due to Liquefaction)

แรงลอยตัวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเกิด Liquefaction เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะของชั้นทรายหรือจำพวกกรวดเมื่อเกิดแผ่นดินไหว ทำให้สถานะของชั้นทราย หรือชั้นกรวด (Solid State) กลายสภาพเป็นของเหลวหรือคล้ายของเหลว (Liquefied State) เมื่อชั้นทรายที่อยู่ใต้โครงสร้างท่อเหล็กเปลี่ยนสภาพไปผลที่เกิดคือแรงดันน้ำใต้ดินจะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินในขณะที่ดินเมื่อมีการเคลื่อนตัวจากแรงแผ่นดินไหวกลายเป็นแรงลอยตัวกระทำกับโครงสร้างท่อเหล็ก ซึ่งการเกิด Liquefaction จะมีโอกาสเกิดในชั้นดินเหนียวน้อยมากแต่ถ้าท่อเหล็กใต้ดินไปวางในชั้นทรายอ่อนโอกาสที่จะมีผลกระทบจาก Liquefaction ก็จะมีสูงขึ้นเมื่อเกิดแผ่นดินไหวการประเมินความเสี่ยงของการเกิด Liquefaction สามารถทำได้โดยดูค่าความปลอดภัยในชั้นทราย (F.S.) โดยใช้วิธี Simplified Method [9]

เมื่อท่อเหล็กวางบนชั้นทรายที่เป็นชั้นทรายอ่อน และมีโอกาสเกิด Liquefaction ทำให้เกิดแรงดันน้ำใต้ดินกระทำกับท่อเหล็กสามารถคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้นจากผลของแรงลอยตัวตาม ตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005 ได้ดังนี้

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_{bf}}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \right] \left(\frac{\sigma_{bf}}{\sigma_y} \right)^r \quad (2.16)$$

เมื่อ ε_b = ความเครียดในเส้นท่อ (Engineering strain) เนื่องจากแรงลอยตัว
 σ_{bf} = Stress in pipe จากแรงลอยตัวมีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
 E = Initial Young's modulus มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
 σ_y = Yield strain ของท่อเหล็ก มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)
 n, r = Ramberg - Osgood parameters (กำหนดในตารางที่ 2.4)

แรงดัดสูงสุดที่เกิดจากแรงลอยตัวที่กระทำกับท่อเหล็กต่อสามารถคำนวณตาม ALA-ASCE 2005 ได้ดังนี้

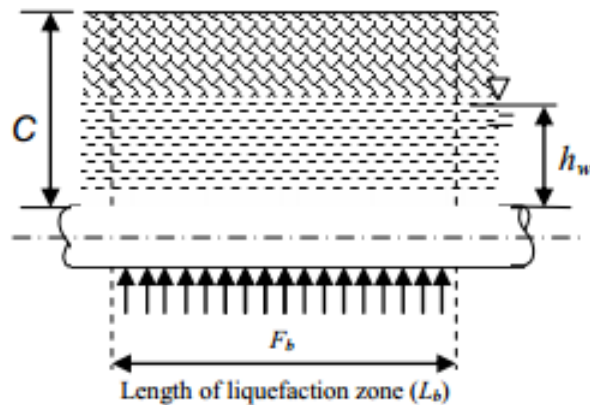
$$\sigma_{bf} = \frac{F_b L_b^2}{10Z} \quad (2.17)$$

เมื่อ L_b = ความยาวของท่อที่อยู่ภายใต้แรงลอยตัวมีหน่วยเป็นเมตร (ดังรูปที่ 2.4) โดยในการคำนวณใช้ระยะ L_b เท่ากับ 100 เมตร

Z = Section modulus ของท่อมมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรหาได้จากสมการ

$$= \frac{\pi}{32} \left[\frac{D^4 - (D-2t)^4}{D} \right]$$

F_b = แรงลอยตัวที่กระทำกับท่อมมีหน่วยเป็น kN/m



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการเกิดแรงลอยตัวที่กระทำกับท่อใต้ดิน [4]

(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

แรงดันสุทธิต่อหน่วยความยาวของท่อเนื่องจากการลอยตัวตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005 สามารถคำนวณได้จาก

$$F_b = \frac{\pi D^2}{4} (\gamma_{sat} - \gamma_{content}) - \pi D t \gamma_{pipe} \quad (2.18)$$

เมื่อ	γ_{sat}	= หน่วยน้ำหนักอิ่มตัวของดิน (Saturated Unit weight of soil) มีหน่วยเป็น kN/m^3
	$\gamma_{content}$	= หน่วยน้ำหนักของวัสดุด้านในท่อ (Saturated Unit weight of content) มีหน่วยเป็น kN/m
	γ_{pipe}	= หน่วยน้ำหนักของท่อเหล็ก (Saturated Unit weight of steel pipe) มีหน่วยเป็น kN/m (ใช้ 78.60 kN/m)
	D	= เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอกมีหน่วยเป็นเมตร
	t	= ความหนาท่อมีหน่วยเป็นเมตร

ในการออกแบบจะเอาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงลอยตัวนำไปรวมกับความเครียดที่เกิดขึ้นจากแรงใช้งานของท่อเหล็ก (Operation Strain)

2.4.3 การคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้นจากผลของการแพร่ของคลื่นแผ่นดินไหว (Design for Seismic Wave Propagation)

ตามมาตรฐานของ ALA-ASCE 2005 ให้พิจารณาความเครียดที่เกิดจากคลื่นแผ่นดินไหวจากความสัมพันธ์ของค่า PGA และ PGV โดยมีระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหว ความรุนแรงที่ต่างกัน และต้องพิจารณาชั้นดินที่มีผลกับคลื่นแผ่นดินไหวโดยมีรายละเอียดดังนี้

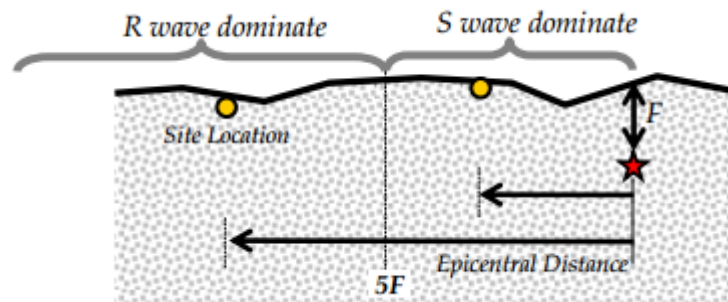
ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในท่อเหล็กได้คิดจากการแพร่ของคลื่นแผ่นดินไหวสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon_a = \frac{V_g}{\alpha_{\varepsilon}} \leq \frac{t_u \lambda}{4AE} \quad (2.19)$$

เมื่อ	V_g	= ค่าออกแบบ Peak ground velocity มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที
	α_{ε}	= ค่าสัมประสิทธิ์ของ Ground strain coefficient โดยพิจารณาจากความลึกและระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวดังแสดงในรูปที่ 2.5 = 2.0 (for S-waves) และ 1.0 (for R-waves)

- C = ค่าความเร็วของการแพร่กระจายของคลื่น
 = C_s สำหรับ S- waves (ใช้ 2.0 km/s) และ C_{rph} สำหรับ R-waves (ใช้ 0.5 km/s)
 t_u = ค่าแรงเสียดทานสูงสุดต่อความยาวท่อที่ทำกับชั้นดินสามารถคำนวณได้จาก
 สมการที่ 2.8 มีหน่วยเป็น kN/m
 λ = ความยาวของคลื่นแผ่นดินไหวที่พื้นผิวดิน (ใช้ 1.0 กิโลเมตรในกรณีที่ไม่มีข้อมูล)
 มีหน่วยเป็นเมตร
 A = Cross sectional area ของท่อคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\pi}{4} (D^4 - (D-2t)^4)$$
 มีหน่วยเป็นตารางเมตร
 E = Modulus of elasticity ของท่อมีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (Mpa)



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการพิจารณาคลื่นแผ่นดินไหว [6]

(ที่มา: National Information center of Earthquake Engineering, พ.ศ. 2550)

ค่าออกแบบ Peak ground velocity สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$V_g = PGV * I_p \quad (2.20)$$

- เมื่อ PGV = Peak ground velocity มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที หาได้จากตาราง
 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PGA และ PGV (แสดงในตารางที่ 2.8)
 I_p = แฟกเตอร์คูณขยาย (แสดงในตารางที่ 2.7) ตามความสำคัญของท่อ

ตารางที่ 2.7 แสดงแฟกเตอร์สำหรับการออกแบบตามความสำคัญของท่อใต้ดิน (I_p)
(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Class of pipeline	Wave propagation
I	1.5
II	1.25
III	1
IV	*

* ไม่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว

ตารางที่ 2.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่า peak ground velocity and peak ground acceleration
(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Soil Class	Mw	PGV/PGA	PGV/PGA	PGV/PGA
		Distance 0-20 (km)	Distance 20-50 (km)	Distance 50-100 (km)
Rock	6.5	66	76	86
	7.5	97	109	97
	8.5	127	140	152
Stiff Soil	6.5	94	102	109
	7.5	140	127	155
	8.5	180	188	193
Soft Soil	6.5	140	132	142
	7.5	208	165	201
	8.5	269	244	251

2.4.3.1 การแบ่งประเภทชั้นดินที่มีผลจากการแพร่ของคลื่นแผ่นดินไหว

ตามมาตรฐานของ ALA-ASCE 2005 ประเภทชั้นดินที่แตกต่างกันและมีคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละจุดกำเนิดของแผ่นดินไหวโดยค่าที่ใช้ในการจำแนกชั้นดินสามารถหาจากการเจาะสำรวจชั้นดินหรือข้อมูลทางปฐพีเพื่อประเมินค่าต่างๆของชั้นดินออกมา เช่น ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Velocity of shear wave, V_s) ค่าความเครียดเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) และค่า การตรวจสอบความแข็งแรงของชั้นดิน (Standard penetration resistance, N) ตามมาตรฐานสามารถจำแนกชั้นดิน A,B,C,D และ E ได้ดังนี้

1. จำแนกโดยใช้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย (V_s) ในช่วงความลึก 30 เมตรแรก เรียกวิธีนี้ว่าวิธี V_s สามารถหาค่าได้จากการคำนวณจากสมการของ (Boore et al., 1997) [9] โดยใช้ค่าจำนวนชั้นดินในช่วงความลึก 30 เมตรจากผิวดิน ความหนาของชั้นดิน (เมตร) และความเร็วคลื่นเฉือนในชั้นดิน (m/s) ในการคำนวณ
2. จำแนกโดยการหาค่า SPT (Uncorrected Standard Penetration Resistance) แบบไม่มีการปรับแก้ในช่วงความลึก 30 เมตร
3. จำแนกโดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) การหาค่า Plasticity Index (PI) และค่า Natural Moisture Content (W)
4. ส่วนในชั้นดินแบบ F ต้องมีการทดสอบอย่างละเอียด เพราะชั้นดินแบบ F มีวัตถุอินทรีย์มาก มีความเป็นพลาสติกสูงค่า Plasticity Index มากกว่า 75 ทำให้เสียรูปและพังทลายได้ง่ายเมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหว

ในการคำนวณหาค่าออกแบบ Peak ground velocity (V_g) ต้องใช้ค่าตัวประกอบ (I_g) สำหรับประเภทชั้นประเภทต่างๆ เนื่องจากชั้นดินแต่ละประเภทมีผลตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวที่ค่า PGA และ PGV ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.9-2.10

จากวิธีการดังกล่าวสามารถแสดงรายละเอียดการจำแนกชั้นดินได้ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.9 ตารางตัวประกอบ Peak ground acceleration สำหรับชั้นดินต่างๆ
(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Class of Soil	Peak Ground Acceleration Values at site (PGA) / Peak Ground Acceleration at base rock layer (PGAr)				
	$PGAr \leq 0.1g$	$PGAr = 0.2g$	$PGAr = 0.3g$	$PGAr = 0.4g$	$PGAr \geq 0.5g$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	*	*	*	*	*

ตารางที่ 2.10 ตารางแนะนำแฟกเตอร์ขยายสำหรับ Peak ground velocity สำหรับชั้นดินต่างๆ
(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Class of Soil	Peak Ground Velocity at surface layer (PGV) / Peak Ground Velocity at base rock layer (PGVr)				
	$PGVr \leq 0.1m/s$	$PGVr = 0.2m/s$	$PGVr = 0.3m/s$	$PGVr = 0.4m/s$	$PGVr \geq 0.5m/s$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	*	*	*	*	*

* Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis is recommended to develop appropriate values.

ตารางที่ 2.11 แสดงตารางการแบ่งประเภทของชั้นดินตามลักษณะและคุณสมบัติ
(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Soil Class	Soil Type	Velocity of shear wave (Vs), m/s	Undrained shear strength (Su), kN/m ²	Uncorrected SPT (N)
A	Hard rock	$V_s > 1500$	---	---
B	Rock	$760 < V_s \leq 1500$	---	---
C	Very dense soil and soft rock	$360 < V_s \leq 760$	$S_u \geq 98$	$N > 50$
D	Dense/ Stiff soil	$180 < V_s \leq 360$	$49 \leq S_u \leq 98$	$15 \leq N \leq 50$
E	Loose/ Soft soil	$V_s < 180$	$S_u < 49$	$N < 15$
	Soft soil with PI >10 and Natural Moisture Content $\geq 40\%$	---	$S_u < 24$	---
F**	Soil vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading (i.e. liquefiable soil, quick and highly sensitive soil, collapsible weakly cemented soil) Peat or highly organic clays (H>3m, where H = thickness of soil) Very high plasticity clays (H>7.5m with plasticity index > 75) Very thick medium or soft stiff clays (H>35m)	---	---	---

*PI = Plasticity Index of the soil

** The soil requires site specific investigation

2.5 ความเครียดที่ยอมให้ (Allowable Strain) ตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005

จากการคำนวณค่าความเครียดจากแรงงานใช้ดังที่กล่าวมา ในหัวข้อที่ 2.3 (ϵ_{oper}) นำไปรวมกับค่าความเครียดจากทั้ง 4 กรณีจากแผ่นดินไหวในหัวข้อที่ 2.4 ($\epsilon_{sesimic}$) ต้องมีค่าความเครียดไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005 ($\epsilon_{allowable}$) ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.12 แสดงค่าที่ยอมให้สำหรับการวางท่อใต้ดินตามมาตรฐาน ALA-ASCE 2005
(ที่มา: ALA - ASCE, พ.ศ. 2548)

Strain Component	Pipe Category	Allowable Strain	
		Tension	Compression
Continuous Water Pipeline	Steel and iron pipe	0.25 ϵ_u or 5%	ϵ_{c-pgd}
			ϵ_{c-wave}

จากตารางที่ 2.12 ความเครียดที่ยอมให้จากแรงดึงและแรงอัดสามารถหาได้ดังนี้

$$\epsilon_{c-pgd} = 0.88 \frac{t}{R} \quad (2.21)$$

เมื่อ ϵ_{c-pgd} = ค่าความเครียดที่ยอมให้เนื่องจากแรงอัด
 t = ความหนาของท่อมีหน่วยเป็นเมตร
 R = รัศมีของท่อมีหน่วยเป็นเมตร
 ϵ_u = Failure strain แรงดึงของท่อเหล็กใช้ค่าเท่ากับ 0.15

และ

$$\mathcal{E}_{c-wave} = 0.75 \left[0.5 \frac{t}{D'} - 0.0025 + 3000 \left(\frac{PD}{2ET} \right) \right]^2 \quad (2.22)$$

โดย

$$D' = \frac{D}{1 - (D - D_{min}) \frac{3}{D}} \quad (2.23)$$

เมื่อ D_{min} = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อชั้นต่ำเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อไม่รวมความหนาภายนอก