

การใช้เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สในดินเหนียว

Application of Pneumatic Piezometers in Clays

ดร. ชเนศ ศรีศิริโรจนการ

Tanate Srisirojanakorn

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330

โทร. 0-2218-6460-3 โทรสาร 0-2251-7304

Email fcetss@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีวิธีการติดตั้งที่มีคุณภาพและเหมาะสม โดยใช้ผลตรวจวัดแรงดันน้ำในดินเหนียวหลังการกลบหลุมเจาะและระหว่างการขุดเจาะเพื่อติดตั้งอุโมงค์ระบายน้ำอีแวนสตันในสหรัฐอเมริกาและอุโมงค์ระบายน้ำบึงมะกักแสนแม่เจ้าพระยาในกรุงเทพฯ ผลตรวจวัดในสนามแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการตรวจวัดแรงดันน้ำเป็นประจำหลังการกลบหลุมเจาะเพื่อยืนยันการเข้าสู่สมดุลของแรงดันน้ำ และความสำคัญของการให้เวลาอย่างเพียงพอต่อการเข้าสู่สมดุลของแรงดันน้ำก่อนจะได้รับอิทธิพลจากการก่อสร้าง แรงดันน้ำเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้นเมื่อมีการทิ้งกระเปาะเบนโทไนท์ไว้ข้ามคืนก่อนการกลบหลุมเจาะ ในขณะที่การขุดเจาะเพื่อติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำและท่อ Inclinator ในบริเวณข้างเคียงทำให้แรงดันน้ำสูงขึ้นและใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลมากขึ้น

Abstract

With an appropriate installation technique, this paper exhibits the effective applicability of pneumatic piezometers in detecting responses of pore water pressure in clays. Field monitoring results from the Evanston tunnel project (U.S.A.) and the Bangkok Metropolitan Authority (BMA) tunnel project are presented herein to substantiate the importance of frequent piezometric observations after backfill grouting and the necessity of piezometer installation well in advance of construction. Leaving bentonite pellets overnight shortened the stabilization time of pore water pressure after installation. However, drilling for piezometer/inclinometer installation nearby caused the increase of pore water pressure and thereby prolonged the stabilization time after installation.

1. คำนำ

โครงการก่อสร้างหลายโครงการมีความจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำในดินเพื่อตรวจสอบระดับ การกระจายตัว และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในสนามก่อนและระหว่างการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม บ่อยครั้งที่พบว่าค่าแรงดันน้ำที่วัดได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งๆที่มีการก่อสร้างอยู่ในระยะใกล้ๆ สิ่งที่ยกขึ้นทำให้เกิดความเข้าใจในปัจจุบันว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำเกิดขึ้นหรือเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำไม่สามารถทำงานได้จริง จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯ ให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาอีกต่อไป อีกทั้งยังพบในหลายๆกรณีที่ยังเวลาภายหลังการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดฯ (ก่อนการก่อสร้างจะเริ่มขึ้นหรือเริ่มที่จะมีอิทธิพลต่อแรงดันน้ำในบริเวณนั้น) ที่สั้นเกินไป ทำให้ค่าแรงดันน้ำยังไม่เข้าสู่สมดุลในธรรมชาติ เป็นผลให้ค่าที่ตรวจวัดได้ไม่ถูกต้อง และเป็นสาเหตุให้ข้อมูลการตรวจวัดแรงดันน้ำในสนามที่มีคุณภาพในประเทศไทยมีอย่างจำกัด

บทความนี้จะแสดงให้เห็นว่า เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊ส (Pneumatic piezometer) สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากใช้วิธีการติดตั้งที่เหมาะสมและมีคุณภาพ โดยแสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดในดินเหนียว ทั้งภายหลังการกลบหลุมเจาะ (Backfill grouting) และระหว่างการขุดเจาะเพื่อติดตั้งอุโมงค์ในกรุงเทพฯ และในมลรัฐอิลลินอยส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา

2. เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊ส (Pneumatic Piezometer)

โครงการที่จะกล่าวถึงในบทความนี้เป็นงานขุดเจาะอุโมงค์ในดินเหนียวจึงเลือกใช้เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สซึ่งมีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ

เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สเป็นระบบไดอะแฟรม (Diaphragm system) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือไดอะแฟรมที่บีบน้ำและยึดหยุ่นได้เป็นตัวกั้นระหว่างแรงดันภายนอกและภายในเครื่องมือตรวจวัด ระบบใช้น้ำปริมาณน้อยมากในการผลัก

ไดอะแฟรม ทำให้มีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและเหมาะสมกับการตรวจวัดแรงดันน้ำระหว่างการก่อสร้างในดินที่มีความชื้นได้ต่ำ เช่น ดินเหนียว อย่างไรก็ตาม ระบบมีกลไกการทำงานที่ซับซ้อน จึงมีราคาสูงและมีโอกาสที่จะไม่ทำงานได้

3. การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำอิวานสตันและอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสัน - แม่น้ำเจ้าพระยา

3.1 ลักษณะของโครงการและสถานทดสอบ

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำอิวานสตัน (Evanston tunnel project)

โครงการนี้เป็นโครงการขั้นที่ 6 สัญญา A ของเมืองอิวานสตันซึ่งมีขึ้นเพื่อช่วยลดปัญหาน้ำท่วม เพิ่มความสามารถในการควบคุมมลภาวะทางน้ำโดยจัดการผันของท่าระบายน้ำ และลดมลภาวะในทางน้ำ North Shore Channel ในเมืองอิวานสตัน มลรัฐอิลลินอยส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ข้อมูลเบื้องต้นของโครงการฯ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

โครงการมีการตรวจวัดในสนามของพฤติกรรมของแรงดันน้ำอย่างต่อเนื่องระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ สองสถานทดสอบถูกติดตั้งไว้ตามแนวเส้นทางอุโมงค์ เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำที่ติดตั้งมีดังนี้

สถานทดสอบที่ 1 มี 7 ตัว ได้แก่ P1-1 ถึง P1-7

สถานทดสอบที่ 2 มี 7 ตัว ได้แก่ P2-1 ถึง P2-7

ตำแหน่งติดตั้งของเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำพร้อมลักษณะชั้นดินที่สถานทดสอบทั้งสองแสดงไว้ในรูปที่ 1 และ 2 คุณสมบัติโดยเฉลี่ยของชั้นดินในบริเวณสถานทดสอบทั้งสองแสดงในตารางที่ 2 ข้อมูลของโครงการฯ และสถานทดสอบโดยละเอียดนั้นได้มีการนำเสนอไว้โดย [7]

หัวตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊ส (Pneumatic piezometer probe) และเครื่องวัดแรงดันแก๊ส (Pneumatic indicator) ที่ใช้มีคุณสมบัติดังนี้

แรงดันสูงสุดที่สามารถวัดได้: 141-m H₂O (1380 kPa)

ความแม่นยำ (Accuracy): $\pm 0.07\text{-m H}_2\text{O}$ ($\pm 0.7\text{ kPa}$)

ค่าอ่านซ้ำ (Repeatability): $\pm 0.035\text{-m H}_2\text{O}$ ($\pm 0.35\text{ kPa}$)

ความละเอียด (Resolution): $\pm 0.007\text{-m H}_2\text{O}$ ($\pm 0.07\text{ kPa}$)

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสัน - แม่น้ำเจ้าพระยา (BMA tunnel project)

ระบบระบายน้ำบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ในปัจจุบันอาศัยการระบายจากคลองแสนแสบและคลองสามเสนลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาเป็นหลัก ซึ่งความสามารถในการระบายน้ำที่ไม่เพียงพอจึงก่อให้เกิดปัญหาน้ำท่วมเมื่อมีฝนตกหนัก โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสัน - แม่น้ำเจ้าพระยาของสำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร (Bangkok Metropolitan Administration, BMA) จึงมีขึ้นเพื่อช่วยลดปัญหาน้ำท่วมในบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ข้อมูลเบื้องต้นของโครงการฯ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

โครงการนี้มีการตรวจวัดในสนามของพฤติกรรมของแรงดันน้ำอย่างต่อเนื่องระหว่างการขุดเจาะ มีการติดตั้งสองสถานทดสอบตามแนวเส้นทางอุโมงค์ เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำที่ติดตั้งมีดังนี้

สถานทดสอบที่ 1 มี 1 ตัว ได้แก่ B1

สถานทดสอบที่ 2 มี 8 ตัว ได้แก่ B2-1 ถึง B2-8

ตำแหน่งติดตั้งของเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำพร้อมลักษณะชั้นดินที่สถานทดสอบทั้งสองแสดงไว้ในรูปที่ 3 และ 4 คุณสมบัติโดยเฉลี่ยของชั้นดินในบริเวณสถานทดสอบทั้งสองแสดงในตารางที่ 3 ข้อมูลของโครงการฯ และสถานทดสอบโดยละเอียดนั้นได้มีการนำเสนอไว้โดย [8]

หัวตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สและเครื่องวัดแรงดันแก๊สที่ใช้มีคุณสมบัติดังนี้

แรงดันสูงสุดที่สามารถวัดได้: 105-m H₂O (1030 kPa)

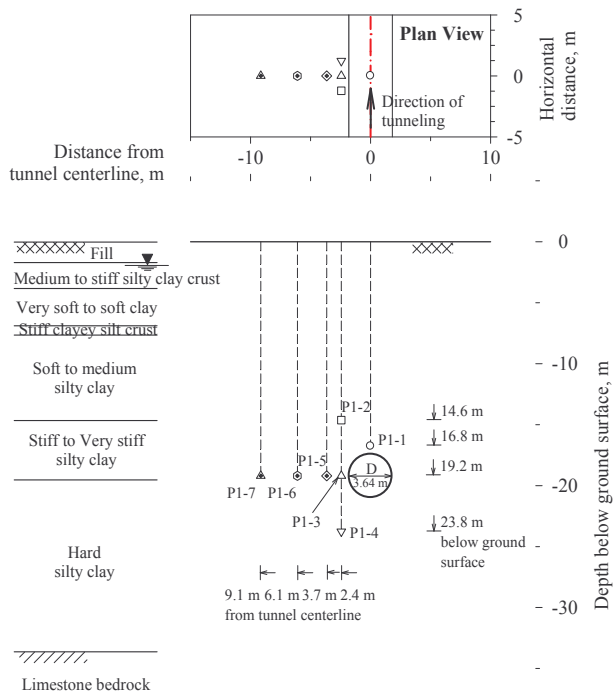
ความแม่นยำ (Accuracy): $\pm 0.05\text{-m H}_2\text{O}$ ($\pm 0.5\text{ kPa}$)

ค่าอ่านซ้ำ (Repeatability): $\pm 0.07\text{-m H}_2\text{O}$ ($\pm 0.7\text{ kPa}$)

ความละเอียด (Resolution): $\pm 0.007\text{-m H}_2\text{O}$ ($\pm 0.07\text{ kPa}$)

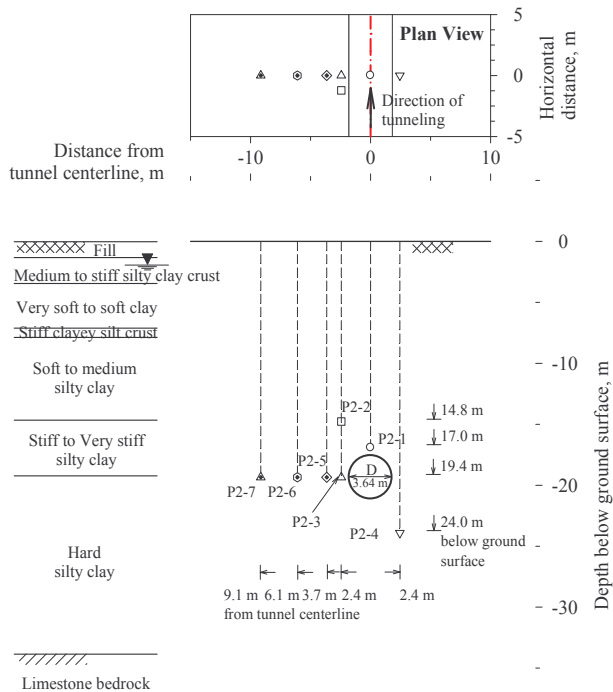
ตารางที่ 1 ข้อมูลเบื้องต้นของโครงการอุโมงค์ระบายน้ำอิวานสตันและอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสัน - แม่น้ำเจ้าพระยา

	Year constructed	Shield			Tunnel			Lining	
		Type	Length, m	Shove length, m	Depth, m	Length, m	Excavated diameter, m	Type	Outside diameter (m)
Evanston tunnel	2000 - 2001	Tunnel Boring Machine, TBM (Lovat)	5.74	1.22	19 - 21	1345	3.64	Initial: Steels ribs (W4x13) and timber lagging (7.6 - 10.2 cm thick), with lining expansion Final: Cast-in-place concrete (2.74-m inside diameter)	3.64
BMA tunnel	2005 - 2006	Earth Pressure Balance Machine, EPBM (Mitsubishi)	7.74	1.2	25 - 30	6030	5.31	Segmental reinforced concrete (27.5 cm thick), with grouting behind lining	5.15



Test Section 1

รูปที่ 1 ชั้นดินบริเวณสถานีทดสอบที่ 1 และตำแหน่งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำโครงการอุโมงค์ระบายน้ำอ่าวแวนสตัน



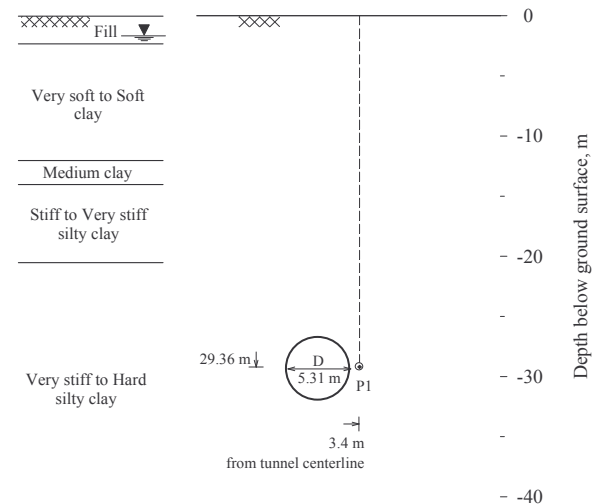
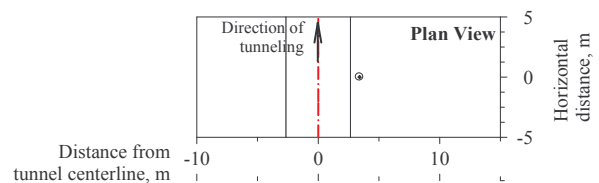
Test Section 2

รูปที่ 2 ชั้นดินบริเวณสถานีทดสอบที่ 2 และตำแหน่งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำโครงการอุโมงค์ระบายน้ำอ่าวแวนสตัน

ตารางที่ 2 ข้อมูลคุณสมบัติชั้นดินโดยเฉลี่ยในบริเวณสถานีทดสอบของโครงการอุโมงค์ระบายน้ำอ่าวแวนสตัน

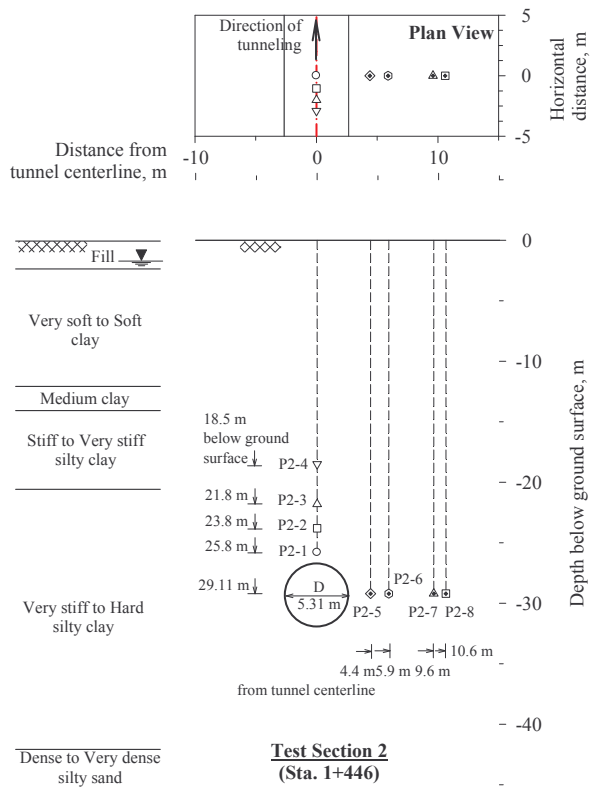
Soil layer	w_o , %	w_L , %	I_p , %	γ , kN/m ³	N, blows/ft	$s_{uo}(UC)$, kPa
Medium to stiff clay	22.7	-	-	20.4	13.2	104.0
crust	3.8	-	-	0.9	8.1	67.2
Very soft to soft clay	32.8	45.7	28.6	19.2	2.6	17.0
	10.1	7.5	6.9	2.5	2.1	11.6
Stiff silt crust	18.7	-	-	-	8.0	-
	5.2	-	-	-	3.5	-
Soft to medium clay	23.8	29.8	15.9	19.9	4.0	21.2
	4.3	4.4	4.5	1.1	3.6	10.4
Stiff to very stiff clay	17.5	28.5	15.3	21.6	14.4	65.3
	3.2	2.3	3.7	0.7	5.2	17.6
Hard clay	12.5	24.0	10.7	22.2	41.8	229.7
	2.4	1.0	2.1	-	20.2	106.9

Note: w_o = Natural water content, w_L = Liquid limit, I_p = Plasticity index, γ = Total unit weight, N = SPT-Blow counts, $s_{uo}(UC)$ = Undrained shear strength from unconfined compression test. Values in *italic* are standard deviation.



Test Section 1 (Sta. 0+853)

รูปที่ 3 ชั้นดินบริเวณสถานีทดสอบที่ 1 และตำแหน่งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำโครงการอุโมงค์ระบายน้ำอ่าวแวนสตัน



รูปที่ 4 ชั้นดินบริเวณสถานีทดสอบที่ 2 และตำแหน่งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสันฯ

ตารางที่ 3 ข้อมูลคุณสมบัติชั้นดินโดยเฉลี่ยในบริเวณสถานีทดสอบของโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสันฯ

Soil layer	w_p , %	w_L , %	I_p , %	γ , kN/m ³	N, blows/ft	s_{u0} (UC), kPa
Very soft to soft clay	65.3	69.3	41.8	16.1	-	17.0
	11.0	17.0	12.2	0.7	-	5.9
Medium clay	52.7	-	-	16.9	-	36.6
	3.9	-	-	0.2	-	9.0
Stiff to very stiff clay	26.9	65.6	40.0	19.4	16.6	92.0
	3.8	16.2	10.5	0.8	4.3	19.6
Very stiff to hard clay	22.3	60.8	37.3	20.0	28.5	154.5
	3.1	16.2	10.7	0.7	9.1	37.3
Dense to very dense sand	-	-	-	-	61.4	-
	-	-	-	-	13.4	-

3.2 ส่วนประกอบของเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊ส

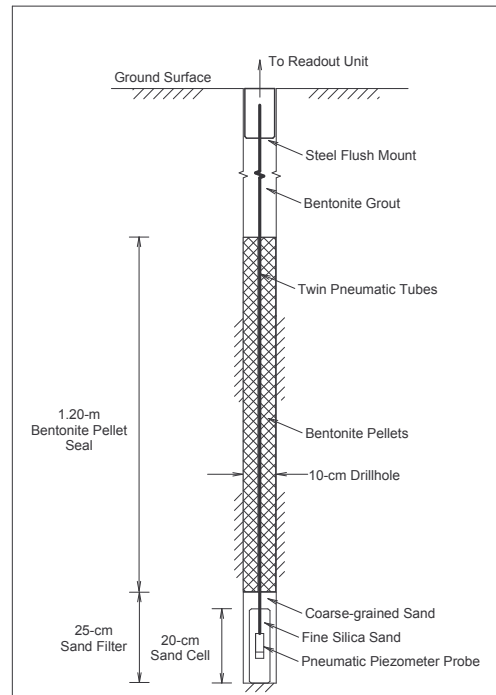
เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สของทั้งสองโครงการมีส่วนประกอบหลัก ดังแสดงในรูปที่ 5

หลุมเจาะ (Borehole)

หลุมเจาะที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. โดยประมาณ เพื่อให้สามารถหย่อนหัวตรวจวัดแรงดันน้ำลงในหลุมเจาะได้ และล้างหลุมเจาะให้สะอาดเมื่อเจาะหลุมได้ตามความลึกที่ต้องการติดตั้ง

หัวตรวจวัดแรงดันน้ำและกระเปาะทราย (Sand filter)

หัวตรวจวัดแรงดันน้ำถูกห่อหุ้มโดยรอบด้วยทรายในถุงผ้า (Sand cell) ที่มีดัดให้แข็งแรงทนทานและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 ถึง 7 ซม. และความสูงประมาณ 20 ถึง 25 ซม. ถุงผ้าที่ใช้ทำจากผ้าดิบที่เหนียวและทนทาน ทรายที่ใช้เป็นทรายออตตาวา (Ottawa sand) ซึ่งเป็นทรายซิลิกา (Silica sand) สะอาดเม็ดละเอียด ส่วนทรายรอบๆ ทรายเป็นทรายซิลิกาสะอาดเม็ดหยาบ



รูปที่ 5 ส่วนประกอบในการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สในโครงการอุโมงค์แวนสตันและบึงมกกะสันฯ

ถุงทรายที่หุ้มหัวตรวจวัดนี้เป็นส่วนหนึ่งของกระเปาะทรายซึ่งช่วยป้องกันความเสียหายที่มีต่อหัวตรวจวัดและช่วยถ่วงน้ำหนักให้หย่อนหัวตรวจวัดลงในหลุมเจาะซึ่งมีน้ำอยู่ใต้ง่ายขึ้น

ในการติดตั้ง หลังจากหย่อนหัวตรวจวัดลงในหลุมเจาะ มีการตรวจเครื่องมือที่ทำไว้ที่ท่อหน้าแก๊ส (Pneumatic tube) เพื่อยืนยันว่าหัวตรวจวัดแรงดันน้ำได้ถูกวางไว้ที่ความลึกที่ออกแบบไว้จริงและมีการตรวจวัดแรงดันน้ำทันที (ก่อนใส่เม็ดเบนโทไนท์แห้ง) เพื่อตรวจสอบว่าหัวตรวจวัดทำงานได้ปกติ โดยค่าแรงดันน้ำที่วัดได้ต้องสอดคล้องกับความสูงของน้ำในหลุมเจาะ แก๊สที่ใช้ตรวจวัดแรงดันน้ำเป็นไนโตรเจนอัดแห้ง (Dry compressed nitrogen) ที่มีปริมาณน้ำไม่เกิน 5 ppm

กระเปาะเบนโทไนท์ (Bentonite seal)

ระดับแรงดันน้ำในดินนั้นแตกต่างกันไปในแต่ละชั้นดินและความลึก ดังนั้นสิ่งสำคัญในการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำคือ การแยกหัวตรวจวัดให้ตรวจจับเฉพาะแรงดันน้ำที่บริเวณหัวตรวจวัดฯ

เท่านั้น โดยไม่ให้มีการรั่วของน้ำไปเชื่อมต่อกับชั้นดินหรือดินที่ความลึกอื่นๆ อันจะทำให้ค่าแรงดันน้ำที่ตรวจวัดได้ไม่ถูกต้อง การสร้างกระเปาะทรายรอบหัวตรวจวัดแรงดันน้ำโดยมีกระเปาะเบนโทไนท์ซึ่งมีความซึมน้ำได้ต่ำกว่าดินโดยรอบ กันอยู่ด้านบน จะช่วยทำหน้าที่นี้ได้

กระเปาะเบนโทไนท์ที่ใช้มีความหนาประมาณ 1.2 เมตร และใช้เบนโทไนท์แท่งอัดเม็ด (Bentonite pellets, Bentonite tablets, หรือ Bentonite chips) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 ถึง 1.9 ซม.

การที่เม็ดเบนโทไนท์ตกลงในหลุมเจาะต้องใช้เวลานานพอสมควร การใส่เม็ดเบนโทไนท์ลงในหลุมเจาะในอัตราที่เร็วเกินไป เช่น การเทครั้งละปริมาณมากๆ เป็นต้น อาจทำให้เม็ดเบนโทไนท์เกาะตัวกันขวางหลุมเจาะ (Bridging) ได้ ดังนั้นในโครงการทั้งสอง จึงใส่เม็ดเบนโทไนท์ครั้งละหนึ่งกำมือและจับท่อน้ำแก๊สให้ตั้งอยู่ตลอดเวลาระหว่างใส่เม็ดเบนโทไนท์เพื่อป้องกันปัญหานี้

หลังจากใส่เบนโทไนท์แท่งอัดเม็ดลงในหลุมเจาะแล้วเสร็จ จึงให้เม็ดเบนโทไนท์ได้ซึมน้ำอย่างช้าๆ ประมาณ 2 ชั่วโมงก่อนทำการกลับหลุมเจาะ การทำเช่นนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้วัสดุกลับหลุมเจาะไหลแทรกเข้าไปในกระเปาะเบนโทไนท์ซึ่งอาจทำให้ความทึบน้ำของกระเปาะเบนโทไนท์เสียไป

การกลับหลุมเจาะ (Backfill grouting)

ในการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำนั้น ความซึมน้ำของวัสดุกลับหลุมเจาะเป็นสิ่งสำคัญ วัสดุกลับหลุมเจาะที่ใช้ควรมีความซึมน้ำได้ที่ไม่สูงไปกว่าความซึมน้ำของดินโดยรอบหลุมเจาะ น้ำในมวลดินจะไหลซึมเข้ามาในหลุมเจาะหากใช้วัสดุกลับหลุมเจาะที่มีความซึมน้ำสูงกว่าดินโดยรอบและทำให้ค่าแรงดันน้ำที่ตรวจวัดได้ผิดพลาด โครงการทั้งสองจึงใช้ผงเบนโทไนท์ (Bentonite powder) ผสมน้ำเป็นวัสดุกลับหลุมเจาะเพื่อให้มีความซึมน้ำได้ไม่สูงไปกว่าดินโดยรอบ

3.3 ผลการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊ส

โครงการอุโมงค์ระบายน้ำอ่าวแสดและโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสันมีการตรวจวัดแรงดันน้ำภายหลังการกลับหลุมเจาะ (ก่อนที่การขุดเจาะอุโมงค์จะมีอิทธิพลต่อแรงดันน้ำ) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นตามเวลาและยืนยันการเข้าสู่สมดุลในธรรมชาติของแรงดันน้ำ และมีการตรวจวัดแรงดันน้ำระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามขั้นตอนการก่อสร้าง

ในโครงการทั้งสอง การหย่อนหัวตรวจวัดลงในหลุมเจาะ การสร้างกระเปาะทรายและกระเปาะเบนโทไนท์ และการกลับหลุมเจาะได้ทำในวันเดียวกัน โดยกลับหลุมเจาะหลังจากทิ้งเบนโทไนท์แท่งอัดเม็ดให้บวมในหลุมเจาะประมาณ 2 ชั่วโมง (สำหรับโครงการอุโมงค์อ่าวแสด) และประมาณ 2 ถึง 5 ชั่วโมง (สำหรับโครงการอุโมงค์บึงมกกะสัน) ยกเว้นเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำที่ P2-1, B2-1,

B2-3, และ B2-7 ซึ่งมีการทิ้งเม็ดเบนโทไนท์ข้ามคืนในหลุมเจาะเป็นเวลาประมาณ 18 ชั่วโมงก่อนกลับหลุมเจาะ ข้อมูลการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำของโครงการอุโมงค์อ่าวแสดและโครงการอุโมงค์บึงมกกะสันฯ แสดงในตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ข้อมูลการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำของโครงการอุโมงค์ระบายน้ำอ่าวแสด

สถานีทดสอบ	เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำ	จำนวนชั่วโมงที่ทิ้งเม็ดเบนโทไนท์ในหลุมเจาะก่อนทำการกลับหลุมเจาะ	วันที่ทำการกลับหลุมเจาะ
1	P1-1	2	02/02/00
	P1-2	2	02/03/00
	P1-3	2	02/02/00
	P1-4	2	02/04/00
	P1-5	2	01/26/00
	P1-6	2	01/25/00
	P1-7	2	01/24/00
2	P2-1	18	02/11/00
	P2-2	2	02/15/00
	P2-3	2	02/09/00
	P2-4	2	03/15/00
	P2-5	2	02/08/00
	P2-6	2	02/07/00
	P2-7	2	02/07/00

ตารางที่ 5 ข้อมูลการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำของโครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสันฯ

สถานีทดสอบ	เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำ	จำนวนชั่วโมงที่ทิ้งเม็ดเบนโทไนท์ในหลุมเจาะก่อนทำการกลับหลุมเจาะ	วันที่ทำการกลับหลุมเจาะ
1	B1-1	2	03/02/06
2	B2-1	18	03/17/06
	B2-2	5	03/21/06
	B2-3	18	03/23/06
	B2-4	5	03/25/06
	B2-5	5	03/17/06
	B2-6	5	03/19/06
	B2-7	18	03/26/06
	B2-8	5	03/27/06

ผลตรวจวัดแรงดันน้ำภายหลังการกลับหลุมเจาะของโครงการอุโมงค์อ่าวแสดแสดงไว้ในรูปที่ 6 และ 7 ส่วนผลตรวจวัดแรงดันน้ำภายหลังการขุดของโครงการอุโมงค์บึงมกกะสันฯ แสดงไว้ในรูปที่ 8 และ 9

จากผลตรวจวัด พบว่าหลังจากกลับหลุมเจาะแล้วเสร็จ แรงดันน้ำในช่วงต้นมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันน้ำจริงในธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากแรงดันจากการบวมตัวของเบนโทไนท์แท่งอัดเม็ดที่ใช้ น้ำหนักกดทับของวัสดุกลับหลุมเจาะ และการรบกวนดินจากการขุดเจาะ แรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) ที่เกิดขึ้นนี้จะระบายไปตามเวลาจนแรงดัน

น้ำเข้าสู่สมดุลในธรรมชาติ เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของแรงดันน้ำของโครงการอุโมงค์คือแวนสันประมาณ 10 ถึง 17 วัน และของโครงการอุโมงค์บึงมักกะสันประมาณ 8 ถึง 15 วัน

การขุดเจาะติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอื่นๆในบริเวณใกล้เคียงจะมีผลให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินได้เช่นกัน และทำให้เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของแรงดันน้ำมากขึ้น ดังสังเกตได้จากแรงดันน้ำที่ P1-1, P1-3, P1-5, P2-5, B1, B2-5, B2-6, และ B2-7 ดังนี้

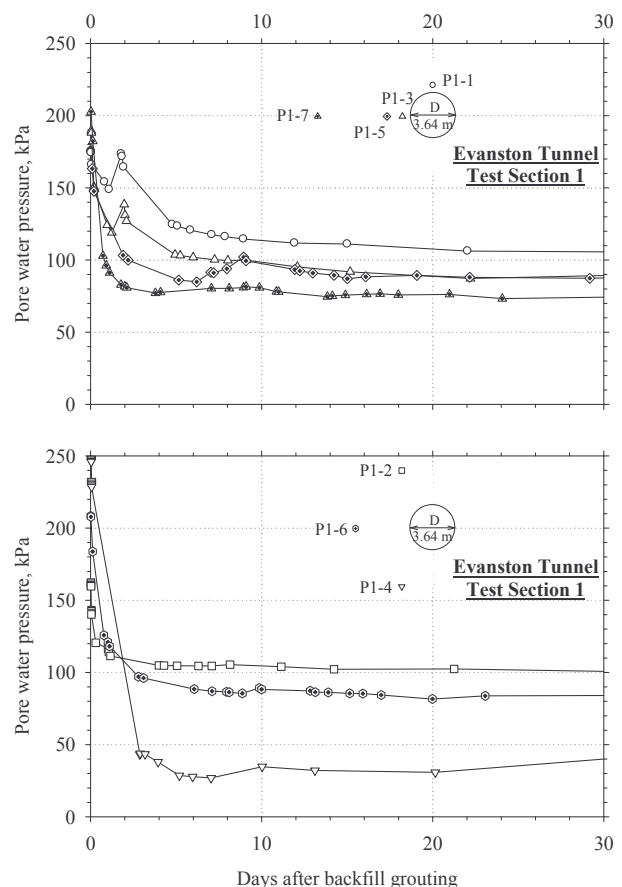
- 1) P1-5 ได้รับอิทธิพลจากการขุดเจาะเพื่อติดตั้งที่ P1-3 (7 วันหลังจากกลบหลุมเจาะที่ P1-5) และที่ P1-4 (9 วันหลังจากกลบหลุมเจาะที่ P1-5) ทำให้แรงดันน้ำสูงขึ้นในช่วงเวลานั้น
- 2) P1-1 และ P1-3 มีแรงดันน้ำสูงขึ้นจากการขุดเจาะเพื่อติดตั้งที่ P1-4 (2 วันหลังจากกลบหลุมเจาะที่ P1-1 และ P1-3)
- 3) การขุดเจาะเพื่อติดตั้งที่ P2-3 (1 วันหลังจากกลบหลุมเจาะที่ P2-5) ทำให้แรงดันน้ำที่ P2-5 สูงขึ้น
- 4) แรงดันน้ำที่ B1 สูงขึ้น (1-2 วันหลังจากกลบหลุมเจาะที่ B1) จากการขุดเจาะลึก 42 เมตรเพื่อติดตั้ง Inclinator ซึ่งห่างจาก B1 ประมาณ 1 เมตร
- 5) แรงดันน้ำสูงขึ้นที่ B2-5 (7 วันหลังจากกลบหลุมเจาะที่ B2-5) และ B2-6 (5 วันหลังจากกลบหลุมเจาะที่ B2-6) จากการขุดเจาะลึก 42 เมตรเพื่อติดตั้ง Inclinator ซึ่งห่างจาก B2-5 และ B2-6 ประมาณ 1 และ 1.8 เมตรตามลำดับ
- 6) B2-7 มีแรงดันน้ำสูงขึ้นจากการขุดเจาะเพื่อติดตั้งที่ B2-8 (1 วันหลังจากกลบหลุมเจาะที่ B2-7)

การสร้างกระเปาะเบนโทไนท์และทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนทำการกลบหลุมเจาะช่วยลดแรงดันน้ำที่มีค่าสูงในช่วงต้นได้มาก เพราะเมื่อยังไม่มีการกลบหลุมเจาะ เมื่อบนโทไนท์จะบวมตัวได้ง่าย ทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นน้อยลงและสามารถระบายได้ง่ายโดยตรงไปยังน้ำในหลุมเจาะ ดังสังเกตได้จากแรงดันน้ำที่ P2-1, B2-1, และ B2-3 ที่เข้าสู่สมดุลภายในเวลา 1 ถึง 3 วัน ส่วนแรงดันน้ำที่ B2-7 ต้องใช้เวลาถึง 8 วันโดยประมาณ (ถึงแม้จะทิ้งกระเปาะเบนโทไนท์ไว้ข้ามคืนก่อนกลบหลุมเจาะ) จึงเข้าสู่สมดุล ทั้งนี้เพราะการรบกวนจากการขุดเจาะเพื่อติดตั้งที่ B2-8 (1 วันหลังจากติดตั้งที่ B2-7) อย่างไรก็ตาม การทิ้งกระเปาะเบนโทไนท์ไว้ข้ามคืนก่อนทำการกลบหลุมเจาะจะเสี่ยงต่อการที่หลุมเจาะเสียเสถียรภาพและบวมตัวเข้ามา ซึ่งทำให้การกลบหลุมเจาะให้เต็มทำได้ยากและค่าแรงดันน้ำที่ตรวจวัดอาจคลาดเคลื่อนได้

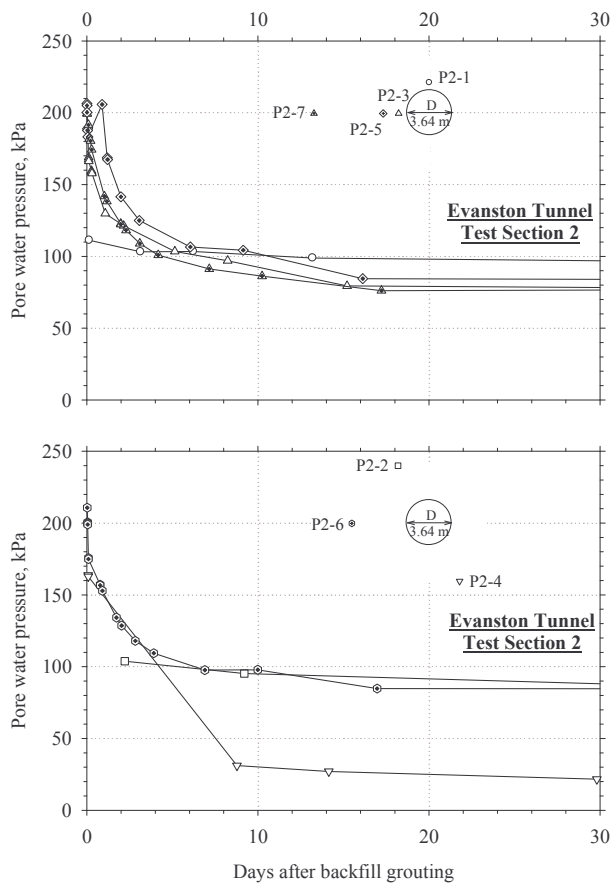
ผลตรวจวัดแรงดันน้ำระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์คือแวนสันแสดงไว้ในรูปที่ 10 และ 11 ส่วนผลตรวจวัดแรงดันน้ำระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์บึงมักกะสันแสดงไว้ในรูปที่ 12 และ 13

ในทั้งสองโครงการ ผลตรวจวัดแรงดันน้ำระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ในดินเหนียวแสดงให้เห็นว่า เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สสามารถใช้งานได้ดี โดยพบว่าแรงดันน้ำในดินบริเวณ

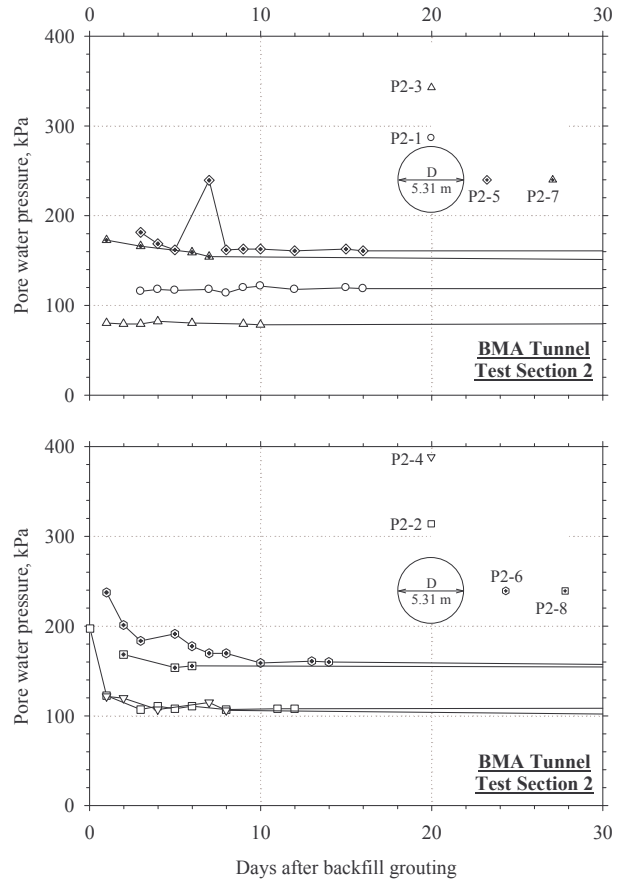
ใกล้ๆอุโมงค์ค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อหัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนเข้าใกล้ (จากแรงดันที่หัวเจาะกระทำต่อดินบริเวณหน้าหัวเจาะ) และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพื้นส่วนท้าย (Tailpiece) ของหัวเจาะ (จากแรงดันของการอัดฉีดน้ำปูนผ่านผนังอุโมงค์เพื่อปิดช่องว่างระหว่างดินและผนังอุโมงค์ (Tail void) หรือจากแรงดันของการขยายผนังอุโมงค์ (Lining expansion)) ส่วนแรงดันน้ำ ณ จุดที่ไกลออกมาจากอุโมงค์เพิ่มขึ้นไม่มากและเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆระหว่างที่หัวเจาะเคลื่อนผ่าน ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายโอนของหน่วยแรงเค้น (Stress transfer) ไปยังดินรอบๆที่อยู่ห่างออกไปจากอุโมงค์ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำระหว่างการเคลื่อนผ่านของหัวเจาะนี้เป็นพฤติกรรมแบบไม่คายน้ำ (Undrained response) ของดินเหนียวอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงเค้นรอบๆอุโมงค์ ซึ่งพฤติกรรมของแรงดันน้ำที่พบมีลักษณะเดียวกันกับที่พบทั่วไปในการขุดเจาะอุโมงค์ในดินเหนียวโดย [1-6, 9]



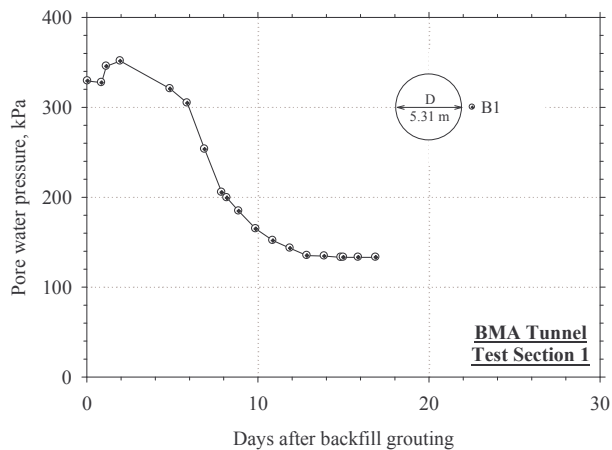
รูปที่ 6 แรงดันน้ำหลังจากการกลบหลุมเจาะที่สถานีทดสอบที่ 1 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำคือแวนสัน



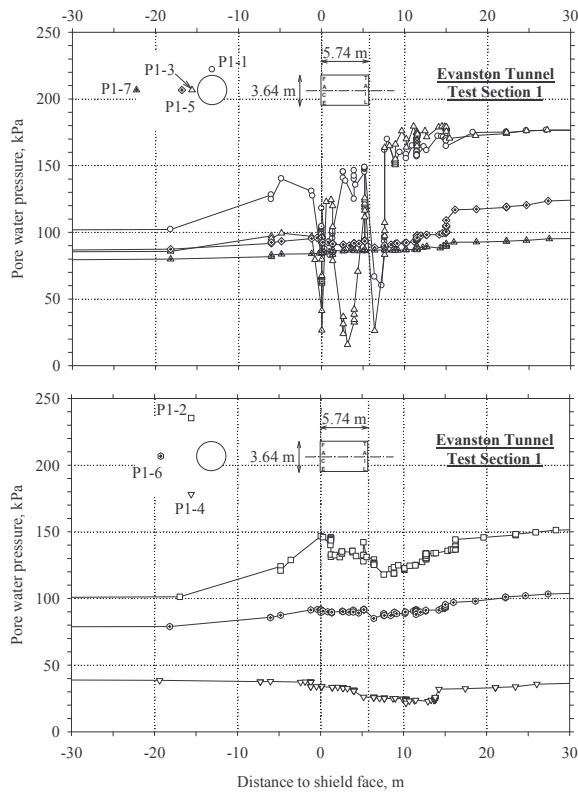
รูปที่ 7 แรงดันน้ำหลังจากการกลบหลุมเจาะที่สถานีทดสอบที่ 2 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำอีเวนสตัน



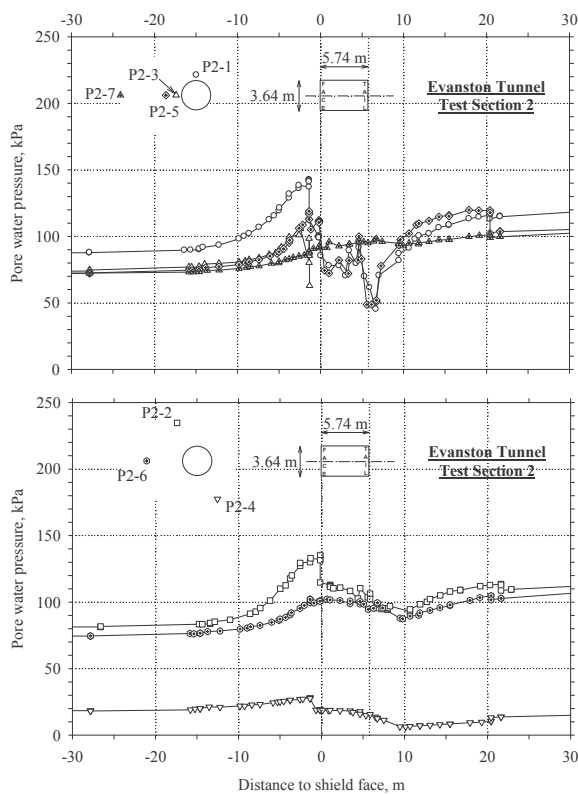
รูปที่ 9 แรงดันน้ำหลังจากการกลบหลุมเจาะที่สถานีทดสอบที่ 2 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงมะกักแสน



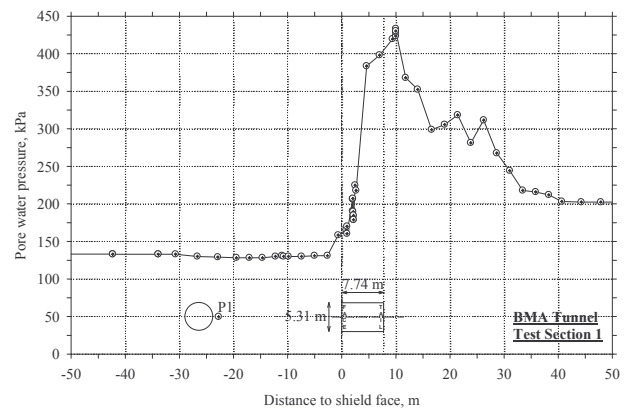
รูปที่ 8 แรงดันน้ำหลังจากการกลบหลุมเจาะที่สถานีทดสอบที่ 1 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงมะกักแสน



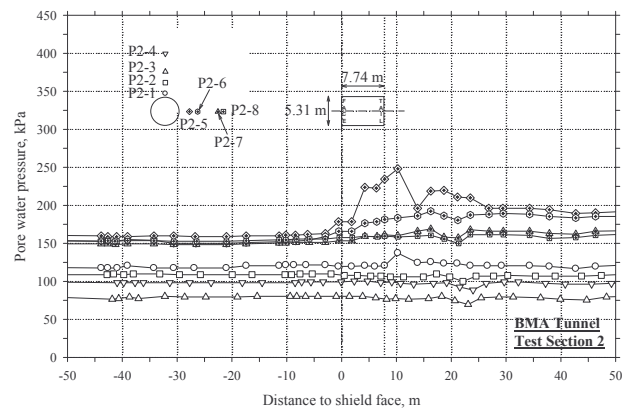
รูปที่ 10 แรงดันน้ำระหว่างชุดเจาะอุโมงค์ที่สถานีทดสอบที่ 1 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำอ่าวแวนสตัน



รูปที่ 11 แรงดันน้ำระหว่างชุดเจาะอุโมงค์ที่สถานีทดสอบที่ 2 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำอ่าวแวนสตัน



รูปที่ 12 แรงดันน้ำระหว่างชุดเจาะอุโมงค์ที่สถานีทดสอบที่ 1 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสันฯ



รูปที่ 13 แรงดันน้ำระหว่างชุดเจาะอุโมงค์ที่สถานีทดสอบที่ 2 โครงการอุโมงค์ระบายน้ำบึงมกกะสันฯ

4. บทสรุป

ผลตรวจวัดแรงดันน้ำภายหลังการกลบหลุมเจาะของโครงการอุโมงค์อ่าวแวนสตันและโครงการอุโมงค์บึงมกกะสันฯชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นของการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำล่วงหน้า โดยต้องให้เวลามากพอที่แรงดันน้ำเข้าสู่สมดุลก่อนจะได้รับอิทธิพลจากการก่อสร้างและมีการตรวจวัดแรงดันน้ำเป็นประจำหลังการกลบหลุมเจาะเพื่อยืนยันการเข้าสู่สมดุลนี้

แรงดันจากการบวมตัวของเบนโทไนท์แห่งอีดเม็คที่ใช้ทำหน้ากกดทับของวัสดุกลบหลุมเจาะ และการรบกวนดินจากการชุดเจาะทำให้แรงดันน้ำหลังการกลบหลุมเจาะมีค่าสูงในช่วงต้น ก่อนที่จะระบายไปตามเวลาจนเข้าสู่สมดุลในธรรมชาติ แรงดันน้ำเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้นเมื่อมีการทิ้งระยะเวลาเบนโทไนท์ไว้ข้ามคืนก่อนกลบหลุมเจาะ ส่วนการรบกวนแรงดันน้ำจากการชุดเจาะติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอื่นๆในบริเวณข้างเคียงทำให้แรงดันน้ำสูงขึ้น และเป็นเหตุให้การเข้าสู่สมดุลของแรงดันน้ำต้องใช้เวลามากขึ้น

ผลตรวจวัดแรงดันน้ำระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ของทั้งสองโครงการได้ยืนยันว่า เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำแบบทำงานด้วยแก๊สสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธีการติดตั้งที่มีคุณภาพและเหมาะสมและสามารถใช้งานได้ดีในดินเหนียว

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ McNally Tunneling Corporation (U.S.A.) สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร บริษัท ไทยเอนยีเนียร์จังก์ชัน แทนส์ จำกัด และบริษัท ช.การช่าง จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลผลตรวจวัดแรงดันน้ำในสนามสำหรับบทความวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Belshaw, D. J., and Palmer, J. H. L. (1978). Results of a program of instrumentation involving a precast segmented concrete-lined tunnel in clay. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, 573-583.
- [2] Hou, X. Y., and Hsu, F. K. (1992). Pore water pressure and ground movements due to shield (EPB) tunnelling in soft clay. *Towards New World in Tunnelling*, Vieitez-Utesa and Montanez-Cartaxo - editors, 189-196.
- [3] Hwang, R. N., Moh, Z. C., and Chen, M. (1996). Pore pressures induced in soft ground due to tunnelling. *Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, London, UK, April, 695-700.
- [4] Hwang, R. N., Wu, D. J., and Lee, C. J. (1995). Pore pressure response to shield tunneling in soft clay. *Southeast Asian Symposium on Tunnelling and Underground Space Development*, Japan Tunnelling Association, Bangkok, January, 33-40.
- [5] Katano, S. (1995). Behavior of cohesive soil ground during shield tunnelling. *Underground Construction in Soft Ground*, Fujita and Kusakabe - editors, 269-272.
- [6] Palmer, J. H. L., and Belshaw D. J. (1980). Deformations and pore pressures in the vicinity of a precast, segmented, concrete-lined tunnel in clay. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 17, 174-184.
- [7] Srisirirajanakorn, T. (2006). Tunneling-induced and Time-dependent Ground Behaviors of Phase VI Evanston Tunnel. *Proceedings of the International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling - Urban Tunnel Construction for Protection of Environment*, February 2-4, 2006, Bangkok, Thailand, 331-340.
- [8] Sunnananda, M., Chanpradappha, P., Akewanlop, K., and Srisirirajanakorn, T. (2006). Responses of Pore Water Pressures during EPB Shield Tunneling in Bangkok Subsoil. To be published in

Proceedings of the Nineteenth Annual National Conference – Tunnelling Towards 2010, September 17-20, 2006, British Columbia, Canada.

- [9] Yi, X. (1991). Ground movements and pore pressures induced by shield tunneling in soft ground. *Fortschritt-Berichte VDI*, VDI-Verlag, Dusseldorf, Germany.