

ปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ (ช่วงชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น) โดยวิธีดันทางลอดรถไฟชนิดเหลี่ยมด้วยวิธี Box Jacking Guidelines to success of the track doubling project (Jira-Khon Kaen railway junction) by method of construction a railway underpass using Box Jacking

ประภัสร์ วังศ์สุนธุ์ชาติ^{1*} ธนากรณ ก่องอิน² และ ประพนธ์ จันทรประดับฟ้า³

^{1,2,3} บริษัท ช.การช่าง จำกัด (มหาชน)

587 ถนนสุทธิสาร แขวงรัชดาภิเษก เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: prakrish.vongv@gmail.com

บทคัดย่อ

วิธีก่อสร้างทางลอดรถไฟด้วยวิธีดันท่อดลอดชนิดเหลี่ยมเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสำเร็จ ในโครงการก่อสร้าง รถไฟทางคู่ช่วงชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น ของฝ่ายก่อสร้าง บริษัท ช.การช่าง จำกัด (มหาชน) ที่ได้พัฒนาเทคนิคการก่อสร้างทางลอดรถไฟ ด้วยวิธีดันท่อดลอดชนิดเหลี่ยมลอดใต้ทางรถไฟเดิม ซึ่งเป็นโครงการแรกในประเทศไทย (Pilot Project) ที่นำเสนอการประยุกต์วิธีการดันท่อดลอดชนิดเหลี่ยมมาใช้ดันท่อดลอดชนิดเหลี่ยม ทำให้รถไฟสามารถวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในขณะที่ดันท่อดลอดชนิดเหลี่ยม (Box Underpass) จึงไม่ต้องรอขั้นตอนการสร้างทางเบี่ยงใหม่ให้ขบวนรถไฟผ่าน เป็นการประหยัดเวลา - ลดต้นทุน และเป็นประโยชน์กับงานวางรางรถไฟทางคู่ (Doubling Track) ได้เร็วกว่าแผนงานแบบเดิมที่ใช้วิธีขุดเปิดคันทาง (Open Cut Method) โดยมีขั้นตอนการวางโครงการก่อสร้างทางลอดชนิดเหลี่ยม จำนวน 78 แห่ง และ งาน/คำนวณแรงที่ใช้สำหรับดันท่อดลอดชนิดเหลี่ยม ในชั้นดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ หรือดินลมหอบขอนแก่น [5] สำหรับออกแบบ/ คำนวณ สร้างหัวเจาะ ขนาด 2.7 m x 2.8 m. จำนวน 3 เครื่อง, ขนาด 3.7 m x 8.65 m. จำนวน 2 เครื่อง และ ขนาด 4.35 m x 8.9 m. จำนวน 2 เครื่อง รวมทั้ง เปลี่ยนระบบการติดตั้งกระบอกลิขิตดันท่อดลอดชนิดทำงานสองทางขนาด 100 ตัน จำนวน 8 กระบอกต่อชุด ของหัวเจาะอุโมงค์ควาซากิ แบบสมดุลแรงดันดิน จากโครงการรถไฟฟาส่งต่อขยายสายสีน้ำเงิน (สัญญา 2) ที่มีปลายยึดแกนกระบอกลิขิตดันท่อดลอดชนิดแบบเอียงศูนย์ เป็นแกนกระบอกลิขิตดันท่อดลอดชนิดในแนวแกน กับ แผ่นคอนกรีต (Thrust Wall). ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของ ท่อดลอดชนิดเหลี่ยม ทั้งในแนวตั้ง - แนวราบ ได้ตามข้อกำหนด โดยปรับปรุงออกแบบระบบไฮดรอลิก และ วิธีขุดเจาะ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของท่อดลอดชนิดเหลี่ยมแบบระยะไกลด้วยรีโมทคอนโทรลชนิดไร้สาย

Abstract

Method of constructing a railway underpass using the Box Jacking method. It is the main factor affecting the success of the Jira-Khon Kaen double track railway construction project which has been completed as intended. It is the first project in Thailand to develop a railway underpass construction technique using the Box Jacking method. which trains can pass at a speed of 20 kilometers per hour while pushing through under a railway,

then no need to wait for a new track for bypass a trains. This saves time / reduces costs and is beneficial for laying 80-pound railroad tracks faster than the traditional plan that uses the method of open-cut the embankment. The construction management for 76 Box Jacking and work/calculating the jacking force used for pushing the box underpasses. In the soil layer of the northeastern region or KHON Kaen Loess Soil [5] For designing/calculating and building drill heads, size 2.7 m x 2.8 m., 3 machines, size 3.7 m x 8.65 m., 2 machines, and size 4.35 m x 8.9 m., 2 machines. Including changing the fixing support of 8 Number of 100-ton double-acting hydraulic cylinders. Which is taken from a Kawasaki tunnel boring machine (Earth pressure balance) of the Blue Line Extension Project (Contract 2) that has the end attached to the concrete floor (Thrust Bed) in an off-center manner, is a type that pushes axially against the concrete wall (Thrust Wall). Makes it possible to control the direction of movement of the box underpass both vertically and horizontally according to the requirements. By creating a hydraulic system and method Box Jacking that can be controlled Box Underpass direction remotely with a wireless control.

1. คำนำ

งานก่อสร้างทางลอดชนิดเหลี่ยมที่ผ่านมานในอดีต สำหรับโครงการของการรถไฟแห่งประเทศไทยจะใช้วิธีก่อสร้างทางเบี่ยงให้รถไฟแล่นผ่านแล้วจึงขุดเปิด (Open Cut) ทำคันทางใหม่ หรือ ทำโครงสร้างชั่วคราวค้ำยันรางรถไฟเดิม (Temporary Support Frame) โดยไม่ต้องสร้างทางเบี่ยง ซึ่งทั้งสองวิธี เหมาะสำหรับแก้ปัญหาจุดติดระหว่างถนนกับทางรถไฟในโครงการขนาดเล็กที่ก่อสร้างทางลอดเพียงไม่กี่แห่ง ซึ่งสามารถวางแผนใช้เครื่องจักรงานก่อสร้างทั่วไปได้โดยไม่ต้องออกแบบเครื่องจักรพิเศษ หรือจัดทำขึ้นใหม่แบบเฉพาะกิจ (Special Equipment) แต่ถ้าเป็นโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีมูลค่าสูง 23,430,000,000.00 ล้านบาท (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม) และมีจำนวนทางลอด (Box Underpass) มากถึง 78 แห่งตลอดแนวเส้นทางรถไฟ 187 กิโลเมตร ของโครงการรถไฟทางคู่ชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น ซึ่งมีระยะเวลาก่อสร้างเพียง 36 เดือน (19 ก.พ. 2559 – 18 ก.พ. 2562) ดังรูปที่ 1 จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำเทคนิคการดันท่อดลอดชนิดกลมโดยวิธี Pipe Jacking มาประยุกต์ใช้ในโครงการนี้ให้สามารถดันท่อด

ชนิดเหลี่ยมโดยวิธี Box Jacking ซึ่งในต่างประเทศเช่นเมืองกัลกาตาของ ประเทศอินเดีย มีการสร้างทางลอดรถไฟชนิดเหลี่ยมลักษณะนี้จำนวนมาก แต่ยังไม่ได้พัฒนาให้เหมาะกับโครงการขนาดใหญ่ จึงเป็นที่มาของการ ออกแบบหัวเจาะ Open Shield ชนิดเหลี่ยมที่มีระบบไฮดรอลิคประสม ไฟฟ้าชนิดปรับกระแสได้ ให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของวาล์วควบคุม ทิศทางแบบระยะไกลด้วยรีโมทคอนโทรลชนิดไร้สาย เพื่อใช้ดันทางลอด ชนิดเหลี่ยม (Box Jacking) ได้ 5 ขนาดคือ

TYPE (1) ขนาด 2.70 m x 2.80 m, จำนวน 23 Box

TYPE (2) ขนาด 4.60 m x 3.40 m, จำนวน 2 Box

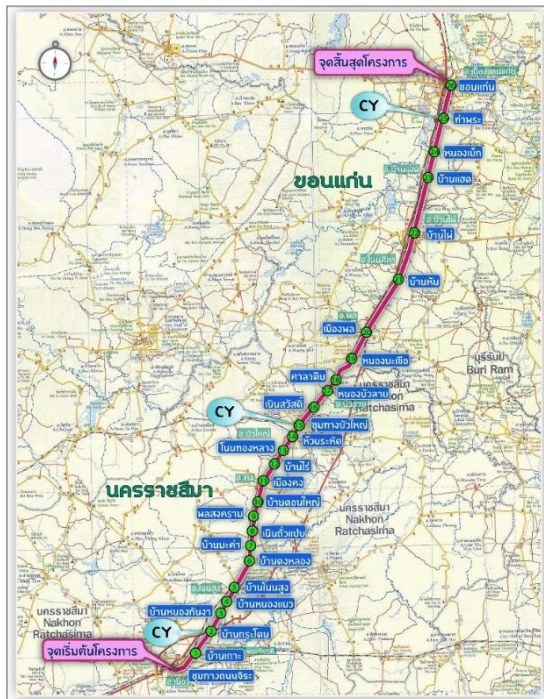
TYPE (3) ขนาด 8.65 m x 3.70 m, จำนวน 20 Box

TYPE (4) ขนาด 8.65 m x 4.20 m, จำนวน 1 Box

TYPE (5) ขนาด 8.90 m x 4.35 m, จำนวน 32 Box



รูปที่ 2 หัวเจาะ Open Shield (ITD-MAKE)



รูปที่ 1 โครงการรถไฟทางคู่ชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น

2. ชนิดของหัวเจาะที่ใช้ในประเทศไทย และ วิธีดันท่อลอด แบบเหลี่ยม (Box Jacking)

2.1 หัวเจาะแบบ Open Shield

เริ่มใช้ในโครงการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ของ การไฟฟ้านคร หลวง โดยวิธี Pipe Jacking โครงการแรกเมื่อปี พ.ศ. 2537 จนถึงปี พ.ศ. 2548 โดยกิจการร่วมค้าระหว่างบริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด (มหาชน) กับ บริษัท Skanska Lundby Artibolag ของ ประเทศสวีเดน มี จำนวนทั้งสิ้น 6 โครงการ ที่ส่งนำเข้าหัวเจาะแบบ Open Shield และ กิจการร่วมค้า ITD & SKANSKA ได้จัดทำหัวเจาะแบบ Open Shield, Thrust Jack ขนาด 300 ton ผลิตในประเทศไทย ดังรูปที่ 2 เพื่อเร่งรัด งานในโครงการนำสายไฟฟ้ารอบพระราชวังสวนจิตรลดาลงใต้ดิน ทั้งนี้หัว เจาะ Box Jacking โครงการรถไฟทางคู่ชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น ที่ใช้ ดันท่อลอดชนิดเหลี่ยมได้ออกแบบระบบฉีดน้ำแรงดันสูง (Multi-stage high pressure pump) ที่ด้านหน้าหัวเจาะเพื่อลดแรงเสียดทานของดิน ลักษณะเดียวกับหัวเจาะแบบ Open Shield ของ กิจการร่วมค้า

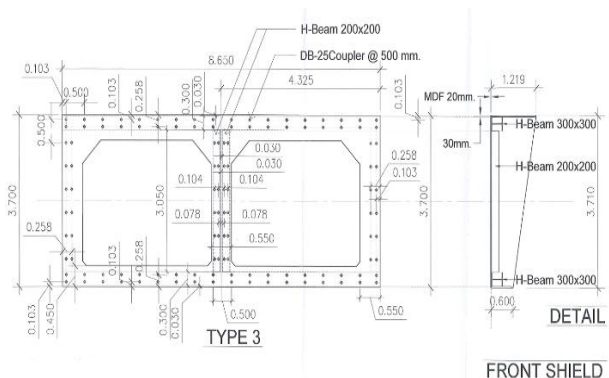
2.2 หัวเจาะแบบ EPB Shield (Earth Pressure Balance)

เริ่มใช้ในโครงการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ของ การไฟฟ้านคร หลวงโดยวิธี Pipe Jacking เมื่อพ.ศ. 2548 จนถึงปัจจุบัน สำหรับการดันท่อ ที่มีระยะทางในแต่ละ Span มากกว่า 100 – 500 m. [1] ซึ่งต้องสั่งผลิต หัวเจาะจากต่างประเทศ เช่น หัวเจาะ Herrenknecht ของประเทศเยอรมัน และ หัวเจาะ Iseki Slurry Machine จากประเทศญี่ปุ่น จึงไม่เหมาะที่จะ สร้างหัวเจาะแบบ EPB ดังรูปที่ 3 เพื่อนำมาดันทางลอดเหลี่ยมที่มีช่วงระยะ ความยาวเพียง 12 – 15 m



รูปที่ 3 หัวเจาะ EPB : Herrenknecht

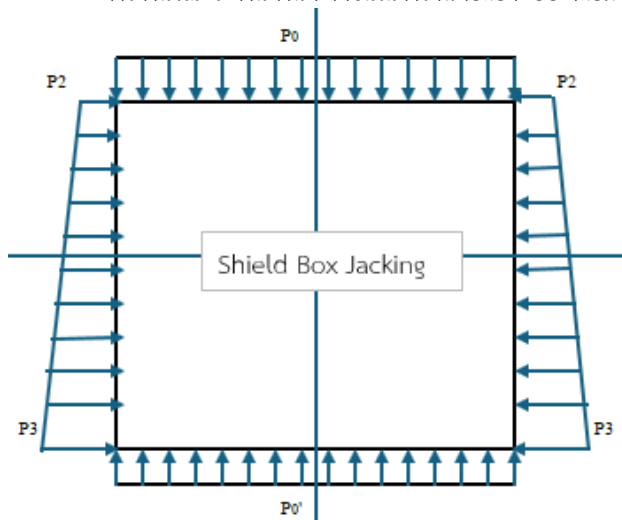
2.3 หัวเจาะ Box Jacking (CK- MAKE)



รูปที่ 4 Front Shield (Box Jacking Type 3)

เป็นการออกแบบหัวเจาะ Box Jacking เพื่อใช้ในโครงการรถไฟทางคู่
ชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น ให้สามารถดันท่อลอดชนิดเหลี่ยมได้ โดย
ออกแบบระบบฉีดน้ำแรงดันสูง (Multi-stage high pressure pump) ที่
ด้านหน้าหัวเจาะเพื่อลดแรงเสียดทานของดินลักษณะเดียวกับ หัวเจาะแบบ
Open Shield [6] ของ โครงการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (การไฟฟ้า
นครหลวง) ดังรูปที่ 4

2.4 การคำนวณแรงต้านทานที่เกิดขึ้นในการดันท่อลอดแบบเหลี่ยม



รูปที่ 5 Resistance of Friction between Box Underpass
& Front Shield and Soil

F_1 = Resistance of friction between Shield body skin and soil

F_2 = Resistance of Earth pressure

F_3 = Resistance of friction between tail inside surface

F_4 = Resistance of Horizontal Alignment.

F_5 = 150 %

Design Condition Assumption :

2.4.1 Soil Condition

γ_{Soil}	=	2.0	t/m ³	
γ'_{Soil}	=	1.0	t/m ³	
γ_w	=	1.0	t/m ³	
ϕ	=	30°		
ka	=	$\frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}$		(1)
Earth Covering	=	1.0	m	
Ground water level	=	1.0	m	
Surface charge; P'	=	2.0	t/m ²	
Water pressure	=	-	kg/cm ²	
(Center line of Shield)	=	-	t/m ²	
Soil Boring Log	=	Loess Soil		

2.4.2 Shield Body Type 5

Shield Dimension	=	8.90 x 4.35	m
Shield Length L	=	1.20	m
Weight of Shield w	=	5.0	t

2.4.3 Weight of Box Under pass

Type 5	=	Reinforced Concrete
Span Length	=	12 m
Weight of Box Type 5	=	312 t

2.4.4 Thrust Force Calculation; F_1

$$F_1 = \mu_1 DL(P_0 + P'_0 + P_2 + P_3)/4 \quad (2)$$

$$\mu_1 = 0.3$$

(Friction Coeff. Between soil and steel)

$$D = 4.35 \text{ m.}$$

$$L = 13.20 \text{ m.}$$

$$P_0 = \gamma H_0 \quad (3)$$

$$= 1.0 \text{ t/m}^3 \times 8.90 \text{ m.}$$

$$= 8.90 \text{ t/m}^2$$

$$P'_0 = P_0 + \frac{w}{D \times L} \quad (4)$$

$$= 8.90 \text{ t/m}^2 + \frac{5+312 \text{ ton}}{4.35 \text{ m} \times 13.20 \text{ m}}$$

$$= 14.42 \text{ t/m}^2$$

$$P_2 = \gamma' H_0 ka \quad (5)$$

$$= 1.0 \text{ t/m}^3 \times 8.90 \text{ m} \times 0.30$$

$$= 2.67 \text{ t/m}^2$$

$$P_3 = \gamma' (H_0 + 2R) ka \quad (6)$$

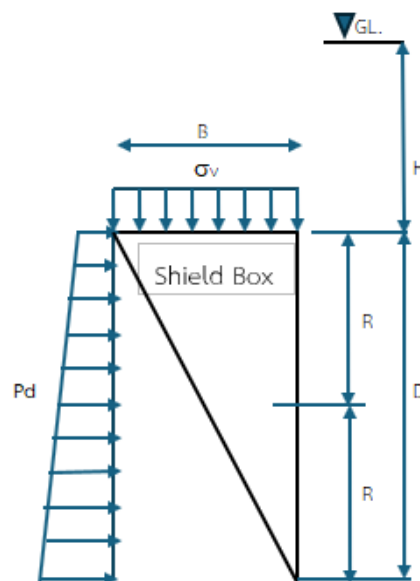
$$= 1.0 \text{ t/m}^3 \times (8.90 + 4.35) \times 0.35$$

$$= 3.97 \text{ t/m}^2$$

Conclusion :

$$F_1 = 0.3(4.35 \times 13.2 \times 2) [(8.9 + 14.42 + 2.67 + 3.97 \text{ t/m}^2) / 4]$$

$$F_1 = 257.87 \text{ t}$$



รูปที่ 6 Resistance of Earth Pressure at rest

2.4.5 Thrust Force Calculation; F_2

$$F_2 = DL \times P_d \quad (7)$$

$$P_d = \text{Earth Pressure (t/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} P_d &= \text{Lateral Earth Pressure at Rest} \\ P_d &= k_a (\sigma_v + \gamma' R) \\ P_d &= 4.657 \quad \text{t/m}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sigma_v = \frac{\gamma' \cdot B}{\tan \theta} \left[1 - e^{-\left(\frac{H}{B}\right) \tan \theta} \right] + P' \cdot e^{-\left(\frac{H}{B}\right) \tan \theta} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{D}{\tan \left(45 + \frac{\theta}{2}\right)} \\ &= \frac{4.35 \text{ m}}{\tan \left(45 + \frac{30}{2}\right)} \\ &= 2.511 \text{ m.} \\ \sigma_v &= 2.482 \quad \text{t/m}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Coeff. Of Lateral earth pressure at rest : Assume 1.0

$$P' = 2.0 \quad \text{t/m}^2$$

Conclusion :

$$\begin{aligned} F_2 &= 8.90 \times 4.35 \text{ m}^2 \times 4.65 \text{ t/m}^2 \\ F_2 &= 180.29 \text{ t} \end{aligned}$$

2.4.6) Thrust Force Calculation; F3

$$F_3 = \mu_2 \times W_s \quad (11)$$

$$\mu_2 = 0.45 \quad (\text{Friction Coeff.})$$

Between tail outside surface and H-Beam 400x400

$$\begin{aligned} W_s &= \text{Weight of H-Beam 400x400} \\ &= 172 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

$$W_s = 1.53 \text{ t}$$

Conclusion :

$$\begin{aligned} F_3 &= 0.45 \times 1.53 \text{ t} \\ &= 0.68 \text{ t} \end{aligned}$$

2.4.7) Required Thrust Force :

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ F &= (257.87 + 180.29 + 0.68) \text{ t} + F_4 \\ F &= 438.84 \text{ t} + \frac{438.84 \text{ t}}{2} \\ F &= 658.26 \text{ t} \end{aligned}$$

เนื่องจากกระบอกไฮดรอลิกแบบทำงานสองทาง (Double Acting Cylinder) ขนาด Capacity 100 ton มีระยะ Stroke 1,750 mm. ของหัวเจาะอุโมงค์ควาซากิ แบบสมดุลแรงดันดิน จากโครงการรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงิน (สัญญา2) ที่ปลายแกนกระบอกไฮดรอลิกถูกออกแบบมาเพื่อใช้ดัน Segment Concrete ที่มีปลายยึดแกนกระบอกไฮดรอลิกแบบเยื้องศูนย์ จึงต้องออกแบบให้แกนกระบอกไฮดรอลิกดันในแนวแกน กับผนังคอนกรีต จึงจะสามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ ของ ท่อลอดชนิดเหลี่ยมทั้งในแนวตั้ง และ แนวราบได้ตามข้อกำหนด

2.5 แรง Thrust Jack สูงสุดที่ใช้ในการดันท่อลอดแบบเหลี่ยม

จากการคำนวณแรงต้านทานที่เกิดขึ้นในการดันท่อลอดแบบเหลี่ยม Type 5 ซึ่งเป็นขนาดใหญ่ที่สุด ได้ค่า Thrust Force เท่ากับ 658.26 t โดย

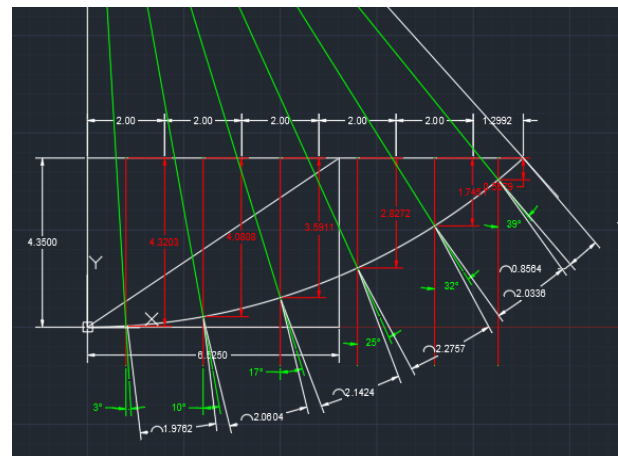
มีค่าเผื่อความปลอดภัย SF. เท่ากับ 1.5 ดังนั้นจึงสามารถใช้ กระบอกไฮดรอลิกแบบทำงานสองทาง (Double Acting Cylinder) ขนาด Capacity 100 t จำนวน 8 กระบอกต่อ 1 ชุด รวมเป็นแรง Thrust Force 800 t.

อุปกรณ์พิเศษที่ใช้ในการดัน Box Jacking

การเตรียมงานในการดัน Box Underpass No. 24 ที่สถานีพลสงครามซึ่งเป็น Box Type 3 แห่งแรกของโครงการ จะต้องใช้ชุดต้นกำลัง Power unit ของ Swivel Crane ซึ่งควบคุมด้วยรีโมทคอนโทรลที่ไม่ใช่แบบ Wireless ทำให้การควบคุมกระบอกกระบอกไฮดรอลิกแบบทำงานสองทาง (Double Acting Cylinder) ไม่สะดวก เนื่องจากคนควบคุมต้องเดินเข้าไปภายใน Box ทุกครั้งเพื่อตรวจเช็คระยะที่รูด Back hole ชุดดินให้ได้ระดับที่เหมาะสมก่อน จึงจะเริ่มดัน Box ให้เคลื่อนที่ได้ระยะทางเท่ากับระยะที่รูด Back hole ชุดดินออก ต่อมาจึงได้พิจารณาเปลี่ยนมาใช้รีโมทคอนโทรลแบบ Wireless.

ข้อมูลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดินลมหอบขอนแก่น และการคำนวณค่า Slope Stability ของดินคันทาง

ดินลมหอบขอนแก่น (Khon Kaen Loess) เป็นดินที่มีการยึดเกาะของเม็ดดินแบบหลวมๆ มีลักษณะโครงสร้างของเม็ดดินเป็นแบบรวงผึ้ง (Honey Comb) เมื่อมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นและมีแรงกดทับที่มากขึ้นกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะมีค่าลดลง และดินจะเกิดการทรุดตัวอย่างฉับพลัน ดินลมหอบเป็นดินที่มีความรุนแรงในการพังสลาย ดังนั้นจึงมีการกำหนดให้ดินลมหอบขอนแก่นเป็นดิน Collapsible Soil. การคำนวณค่าเสถียรภาพของดินคันทาง (Slope Stability) ใช้ระเบียบวิธี Method of Slices เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรม KU-SLOPE 2.1 โดยมีค่า Factor of Safety มากกว่า 1.5



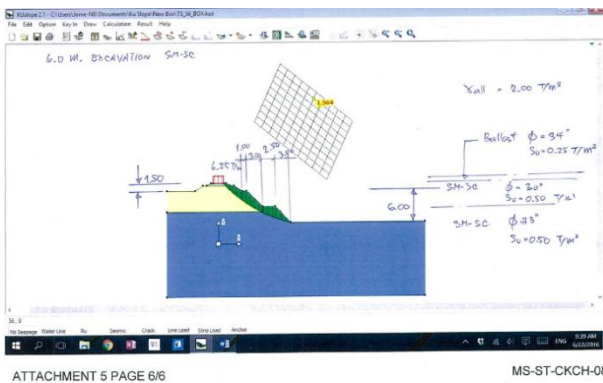
รูปที่ 7 Slope Stability Analysis (Ordinary Method of Slices)

ตารางที่ 1 Soil Properties & Slices No.

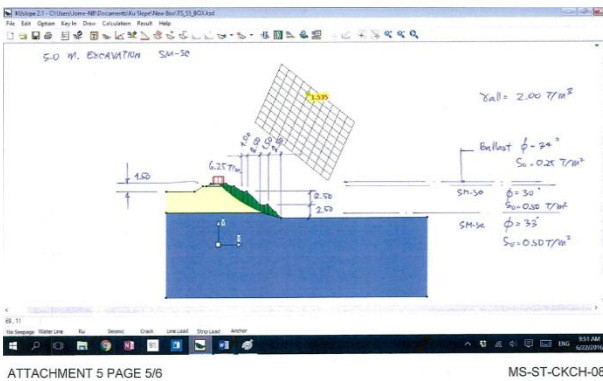
Slice No.	C (t/m ²)	φ (deg)	b (m)	θ (deg)	h (m)	hw (m)	Δi (m)
1	0.3	30	2.00	39	0.55	1	0.85
2	0.3	30	2.00	32	1.74	1	2.03
3	0.3	30	2.00	25	2.82	1	2.27
4	0.3	30	2.00	17	3.59	1	2.14
5	0.3	30	2.00	10	4.08	1	2.06
6	0.3	30	1.29	3	4.32	1	1.97

ตารางที่ 2 Resisting Forces and Driving Forces

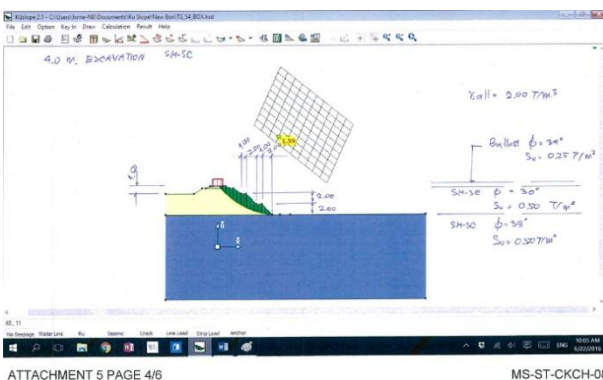
Slice No.	W (t)	c.Δi (t)	W cosθ (t)	U (t)	(W cosθ - U)tanφ (t)	(W sinθ) (t)
1	2.23	0.26	1.73	1.71	0.01	1.40
2	6.98	0.61	5.92	4.06	1.07	3.70
3	11.31	0.68	10.25	4.55	3.29	4.78
4	14.36	0.64	13.74	4.28	5.46	4.20
5	16.32	0.62	16.08	4.12	6.90	2.83
6	17.28	0.59	17.26	3.95	7.68	0.90



รูปที่ 8 Slope Stability Analysis (6.0 m. Excavation SM-SC)



รูปที่ 9 Slope Stability Analysis (5.0 m. Excavation SM-SC)



รูปที่ 10 Slope Stability Analysis (4.0 m. Excavation SM-SC)

$$\gamma = 2.00 \text{ t/m}^3$$

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resisting Forces}}{\sum \text{Driving Forces}}$$

$$F.S. = \frac{(3.40 + 24.41)}{17.82}$$

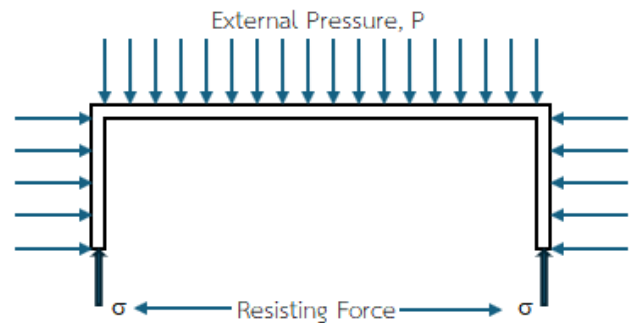
$$F.S. = 1.56 > 1.50 \text{ ok}$$

ตารางที่ 3 Field Log Record (SM-SC Soil)

SAND & GRAVEL	SPT-N	CLAY & SILT	SPT-N	PP
Very Loose:	0-4	Very Soft	0-2	0.00-0.25
Loose	5-10	Soft	3-4	0.25-0.50
Medium Dense	11-30	Medium	5-8	0.50-1.00
Dense	31-50	Stiff	9-15	1.00-2.00
Very Dense	>50	Very Stiff	15-30	2.00-4.00
		Hard	>30	>4.00

3. ทฤษฎีและหลักการออกแบบหัวเจาะ Box Jacking

การออกแบบ Shield Box โดยพิจารณากรณีของภาชนะรับแรงดันแบบ External Thin wall pressure vessel [2-3]



รูปที่ 11 Equivalent diagram for uniform external soil pressure on Shield Box, showing the more convenient form for analysis.

$$\sigma = \frac{P \cdot D}{2t} = S \cdot sf \quad (12)$$

s = Circumferential tensile stress
 P = External pressure
 D = Depth of Shield Box
 t = Thickness of Shield Box
 S = Yield strength of Shield Box material
 sf = Safety factor

Stress analysis and evaluation of a rectangular pressure vessel according to Section VIII, Division I instead of Division 2.

Fatigue is not a concern for calculate a thickness of Shield Box.

$$\begin{aligned} s &= \frac{F}{A} \quad \& \quad P = \frac{F}{A} \quad (13) \\ F &= 800 \text{ t} \\ s \cdot A &= P \cdot A \\ s \cdot 2t \cdot L &= P \cdot D \cdot L \\ s \cdot 2t \cdot L &= 800 \text{ t} \\ 2t \cdot L &= \frac{800 \text{ t}}{200 \text{ Mpa}} \\ 2t &= 32.18 \text{ mm} \\ \text{Shield Box (L = 4 ft) THK. min 30 mm. (sf = 1.86)} \end{aligned}$$

4. วิธีการก่อสร้าง และ วิธีการดัน Box Jacking

4.1 วิธีก่อสร้าง Box Underpass

โครงการก่อสร้างทางลอดรถไฟที่ผ่านมาของการรถไฟแห่งประเทศไทย ใช้วิธีขุดเปิดคันทาง และ เบี่ยงทางรถไฟเดิมในขณะที่ก่อสร้าง ซึ่งต้องใช้เวลาก่อสร้างมากกว่าวิธีดัน Box Underpass จึงมีความจำเป็นต้องแสดงการเปรียบเทียบวิธีการดันท่อลอดแบบ Pipe Jacking โดยการก่อสร้าง Jacking Shaft ที่เคยทำในประเทศไทย กับ วิธีก่อสร้างทางลอดแบบ Box Pushing โดยใช้ Thrust Bed ของประเทศอินเดีย และ นำเสนอในที่ประชุมผู้บริหารของ บมจ. ข. การช่าง อาคารวิริยะถาวร (สำนักงานใหญ่) เพื่อใช้เป็นเทคนิคงานก่อสร้างทางลอดรถไฟแบบใหม่ (Pilot Project) สำหรับประเทศไทย ในโครงการรถไฟทางคู่ชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น ทั้งนี้คุณประพนธ์ จันทร์ประดับฟ้า ผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการใหญ่ (สายงานก่อสร้าง 2) ขอให้เรียกวิธีดันทางลอดเหลี่ยมแบบใหม่นี้ว่า "Box Jacking" เพราะเป็นการประยุกต์วิธีก่อสร้างของงาน Pipe Jacking มาใช้ในการดัน Box underpass ซึ่งมีรายละเอียดแตกต่างจากวิธี Box Pushing ที่ประเทศอินเดีย

4.2 งานออกแบบทางด้านวิศวกรรม Front Shield, Thrust Bed

ในช่วงออกแบบได้วิเคราะห์ข้อมูลต่างๆจากโครงการ Box Jacking ที่ประเทศอินเดียพบว่าการใช้ Thrust Bed สำหรับดัน Box Type 3 และ Type 5 พื้นคอนกรีตจะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 50 ซม. เพื่อใช้เป็นพื้นดันให้ Box Underpass ที่มีน้ำหนักมากกว่า 300 ตันเคลื่อนที่ และ จำนวนแถวของ Pin Pocket ต้องใช้ทั้งหมด 8 Row ทำให้ใช้เวลาในการทำ Block out ตลอดจนมีความคลาดเคลื่อนของระยะการติดตั้งมาก ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 Thrust Bed 8 Row x 8 Column

4.3 Thrust wall & Thrust Bed

เนื่องจากแรงเสียดทานในการดันให้ Box Underpass No. 24 ซึ่งเป็น Box Type 3 ตำแหน่งแรกที่เกิดการบริเวณสถานีรถไฟพลสงคราม พบกับปัญหาและอุปสรรคจากการใช้ Thrust Bed อย่างเดียวนั้นไม่สามารถรับกำลังของ Thrust Jack ขนาด 100 ตัน จำนวน 8 ชุด ทำให้ Thrust Bed ขาด จึงต้องใช้ Thrust wall เสริมกำลังร่วมกับ Thrust Bed ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 Thrust Wall

4.4 ติดตั้ง Thrust Jack ขนาด 100 ตัน จำนวน 8 ชุด

ซึ่งกระบอกไฮดรอลิคชนิดทำงานสองทาง ของหัวเจาะอุโมงค์ควาซากิ แบบสมดุลแรงดันดิน จากโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายสีแดง (สัญญา 2) ที่นำมาใช้นั้นมีปลายยึดแกนกระบอกไฮดรอลิคติดกับพื้นคอนกรีตแบบเยื้องศูนย์ ทำให้เกิดแรงเบี่ยงเบน เมื่อยึดแกนกระบอกสุดท้ายที่ 1,750 มม. จึงไม่สามารถควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ให้เป็นแนวเส้นตรง และ ไม่สามารถดัน Steel Spacer ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 Thrust Jack ขนาด 100 ตัน จำนวน 8 ชุด

การติดตั้ง Thrust Jack ขนาด 100 ตัน โดยใช้ชุด Power unit ของ Swivel Crane ที่ปรับตั้งแรงดันสูงสุด 300 bar ทำให้ Thrust Jack มีแรงเพียง 86.77 ตัน จึงจำเป็นต้องสร้างชุด Power Unit ใหม่ให้สามารถปรับตั้งแรงดันสูงสุด 350 bar เพื่อให้แรงของ Thrust Jack จะเพิ่มเป็น 100 ตันได้ ตาม Specification ที่คำนวณออกแบบเบื้องต้น รวมทั้งออกแบบ

ระบบไฮดรอลิคประสมไฟฟ้าชนิดปรับกระแสได้ เพื่อสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของวาล์วควบคุมทิศทางแบบระยะไกลด้วยรีโมทคอนโทรลชนิดไร้สาย และ ออกแบบ Spread Shoe ใหม่ทำให้แกนกระบอกไฮดรอลิคดันในแนวแกน กับ Steel Spacer ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 Steel Spacer



รูปที่ 17 Over Cut (Top & Side)

4.6 วิธีลำเลียงดินออกในขณะดัน Box Jacking

มีการเสนอใช้ Mucking Loader ซึ่งเป็นเครื่องจักรพิเศษที่นิยมใช้ในงานลำเลียงดินออกจากอุโมงค์ กับ เครื่องจักรดังรูป ที่ 18-19 เป็นรถขุด Hydraulic Excavator ขนาดเล็ก KUBOTA รุ่น U15-3 ที่สามารถเข้าไปขุดดินใน Box Type 1



รูปที่ 16 Front Shield (CK MAKE) ระบบฉีดน้ำช่วยลดแรงเสียดทาน

4.5 การออกแบบ และ คำนวณ ขนาดของ Front Shield

ขนาดความหนาของ Front Shield Type 3 และ 5 โดยแผนกวิศวกรรมของ CK-CH ใช้ทฤษฎีโครงสร้างทั่วไปออกแบบนั้น จะต้องใช้เหล็กความหนา 40 mm. เท่ากับความหนาของหัวเจาะอุโมงค์รถไฟใต้ดิน ซึ่งจะทำให้น้ำหนักของ Front Shield ไม่สามารถยกได้โดยเครน 50 ตัน จึงเป็นที่มาของการออกแบบ Front Shield เป็นแบบ External Pressure Vessel โดยมีขนาดความหนาที่คำนวณสำหรับ Front Shield Type 3 เท่ากับ 30 mm. และ ใช้การยึดต่อกับ Box Underpass ด้วย Steel Coupler DB-25 @ 500 mm



รูปที่ 18 Box Type 3 ลำเลียงดินออกโดยใช้ KUBOTA รุ่น KX91-3



รูปที่ 19 ลำเลียงดินออกโดยใช้ Mini Wheel Loader

5. วิธีดัน Box Underpass ในชั้นทราย และ ในชั้นหินแข็ง

5.1 Box Underpass No.51 Type1 STA:384+770.615

สภาพดินคันทางแบบผสมระหว่างดินแข็งกับทรายชุ่มน้ำ เริ่มใช้ Beam Support ขนาด 150x150 mm. วางแทรกระหว่างหมอนคอนกรีต



รูปที่ 20 Hydraulic Breaker

5.2 Box Underpass No.54 Type 5 STA:391+648.934

สภาพของดินคันทางแบบทรายหลวม [4] ซึ่งมีการพังทลายของทราย หน้า Front Shield ตลอดเวลา และ ช่วงเวลาดัน Box Underpass ในกึ่งกลางคืนระหว่างเวลา 01:00 น. มีขบวนรถสินค้าหมายเลข 531 ซึ่งเป็นขบวนรถหนักบรรทุกทุกแกว่งผ่านโดยไม่ได้ชะลอความเร็วทำให้คันทางเกิดการทรุดตัวเนื่องจาก Shield Box ได้ไปนั่งอยู่ใต้หัวหมอนคอนกรีตแค่ 1 ด้าน และบริเวณนี้เป็นช่วงยกโค้ง ตำแหน่งของ Shield Box อยู่ด้านยกโค้ง เมื่อขบวนรถวิ่งผ่านทำให้น้ำหนักกดลงคันทางด้านต่ำมากกว่า ทำให้ขบวนรถสินค้าหมายเลข 532 ต้องหยุดรอเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อซ่อมบำรุงคันทาง ตามรายงานเหตุการณ์กับขบวนรถสินค้าที่ 532 เมื่อวันที่ 5 พ.ค. 2560 (เกิดขึ้น 1 ครั้งจากจำนวน Box Underpass ทั้งหมด 78 แห่ง)

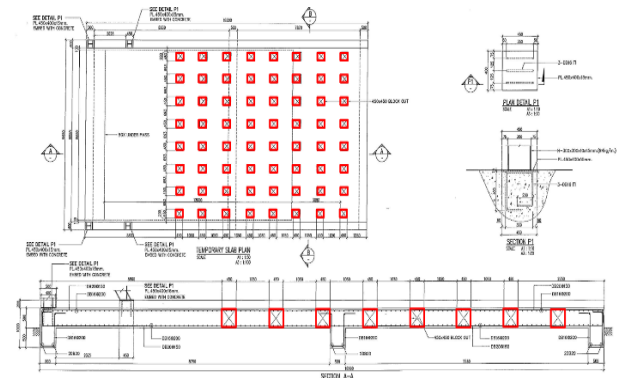


รูปที่ 21 Beam Support ขนาด 300x300 mm.

เนื่องจากระดับความลึกคันทางแต่ละ Type มีความลึกน้อยกว่าค่า Depth ของ Box underpass ซึ่งมีผลกระทบต่องานดัน Box Jacking ในช่วงระยะความกว้างของคันทาง 6 เมตรตามข้อกำหนดของโครงการทำให้คันทางถูกแรงเฉือนทะลุของ Front Shield เป็นเหตุให้เสถียรภาพของคันทางลดลง จึงต้องนำเสนอรูปแบบการทำงานเพิ่มขึ้นตอนด้วยการสอด

Beam Support ในช่วงดัน Box Jacking ให้ทำงานได้ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง (แบ่งเป็น 3 กะ) โดยเป็นผู้ออกแบบและนำเสนอวาง Beam Support สอดระหว่างหมอนคอนกรีต ซึ่งมีการประสานงานกับนายตรวจทางแต่ละสถานี ให้จัดเจ้าหน้าที่โยธาโยธาทาง Sub-ballast ออกบางส่วนในช่วงเริ่มต้นดัน Box และ ต้องโยกออกให้หมดก่อนที่ Box จะดันเข้าใกล้แนวรางรถไฟ 5 เมตรสุดท้าย ทำให้เพิ่มความปลอดภัยในขณะดินถูกแรงเฉือนทะลุ โดยไม่มีผลกระทบต่อขบวนรถไฟที่วิ่งผ่านบน Box underpass ดังรูปที่ 21

6. ปัญหา และ อุปสรรค ของงาน Box Jacking



รูปที่ 22 Thrust Bed (Standard Design) Type 3



รูปที่ 23 Modify Thrust Bed (Thrust Wall) Type 1



รูปที่ 24 Thrust Bed with Concrete Spacer

ปัญหาข้อที่ 1) Pin Pocket จำนวน 8 แถว สำหรับติดตั้ง H-Beam ขนาด 400x400 mm (Shoving Frame) บน Thrust Bed ตัวแรกที่เหมาะสำหรับ Box Underpass Type 3 แห่งแรก ดังรูปที่ 22 ที่สถานีพลสงครามนั้น มีขนาด Pin Pocket 450x450x500 mm. เพื่อเป็นฐานให้กระบอกไฮดรอลิก ขนาด 100 ton จำนวน 8 กระบอก ถ่ายแรงให้ Thrust Jack ดัน Box เคลื่อนที่ โดยมีการฝัง Flat bar ความหนา 5 mm. ไว้ที่พื้นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างพื้นคอนกรีตกับ Box Underpass ซึ่งต่อมาเป็นปัญหาที่ตัว Flat bar ติดตั้งไม่ได้ระดับทำให้เป็นตัวขวางการเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการดัน Box ต่อมาจึงได้ทำการยกเลิกการติดตั้ง Flat bar โดยเปลี่ยนมาใช้ Plastic sheet ทาจารระหว่างกล่อง Box เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาน้ำปูนจากตัว Box ยึดติดกับพื้น Thrust Bed และ การติดตั้ง Pin Pocket ต้องใช้ปูน Non Shrink กรอกใส่ให้เต็มเนื่องจากการขยับตัวจากแรงที่ถ่ายไปให้ Shoving Frame ทำให้ควบคุมทิศทางของแรงที่กระทำกับ Steel Spacer ไม่เป็นไปในแนวเคลื่อนที่ของ Box Underpass จึงต้องเปลี่ยน Steel Spacer เป็น Concrete Spacer ขนาด 1.2 x 2 m. จำนวนแถวละ 4 Ea. ดังรูปที่ 24

ปัญหาข้อที่ 2) Thrust Bed หักกลางเนื่องจากจำนวน Block Out 8 แถวละ 8 Ea. ทำให้ความแข็งแรงของ Thrust Bed ลดลง และ การเพิ่มความหนาของ Thrust Bed ย่อมมีผลต่อต้นทุนที่สูงขึ้น จึงเปลี่ยนจากการใช้ Thrust Bed เป็น Thrust Wall และทำการเทคอนกรีตฝังตัว Shoving Frame ติดกับ Thrust Wall ดังรูปที่ 23

ปัญหาข้อที่ 3) การแก้ไขระดับของ Box Type 3 และ Type 5 ที่มีค่า Slope มากกว่า 3% ซึ่งปัญหานี้ไม่เกิดกับ Box Type 1 เพราะปริมาณดินที่ขุดออกต่างกันมาก เมื่อคนขับรถขุดต้องทำงานคงกะทั้งกลางวันและกลางคืนจึงเป็นสาเหตุหลักที่ควบคุมการขุดดินออกจาก Front Shield ได้ไม่ดี โดยมีจำนวน Box Underpass ที่ต้องทำการแก้ไข 2 แห่ง จากจำนวนทั้งสิ้น 78 Box ดังรูปที่ 25 (Box No. 54 Slope > 4.2 %)



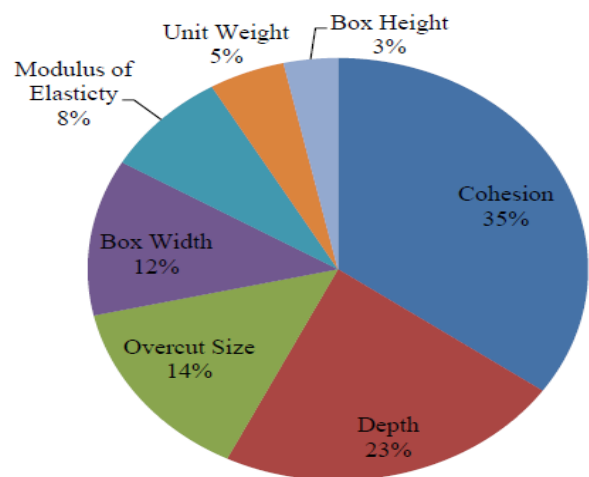
รูปที่ 25 (Box No. 54 Slope > 4.2 %)

วิธีแก้ไขระดับของ Box Underpass ตามรูปแบบที่ขออนุมัติไปนั้น เมื่อนำมาปฏิบัติกับ Box No. 70 ตามขั้นตอนติดตั้งที่ยังนำด้วยความดันสูงผ่านรู Grout ที่ด้านล่างของ Box Underpass เพื่อให้เกิดโพรงช่องว่างด้านล่าง ไม่สามารถทำให้ค่าระดับลดลง จึงขอเสนอเปลี่ยนวิธีใหม่เป็นการใช้กระบอกไฮดรอลิก ขนาด 400 ตัน จำนวน 3 กระบอก เพื่อยกน้ำหนักของ Box Type 5 ที่ความยาวรวม 12 เมตร ซึ่งมีน้ำหนักคอนกรีตประมาณ 312 ตันให้ได้ค่าระดับที่ยอมรับได้ไม่เกิน 2.5% ดังรูปที่ 26 แม้ว่าจะต้องใช้เครื่องมือ และ เวลาในการแก้ไขค่อนข้างนานเกิน 7 วัน โดยต้องแก้ไขดินใต้ Box ที่บวมน้ำให้สามารถรับแรงของกระบอกไฮดรอลิกขนาดใหญ่



รูปที่ 26 (Box No. 70 Slope > 6.9 %)

ปัญหาข้อที่ 4) วิธีขุดดินภายใน Box Underpass เพื่อลดแรงเฉือนทะลุของดินคันทาง ปัจจัยที่มีผล 8 ประการได้แก่ 1) โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน 2) มุมเสียดทานของดิน 3) น้ำหนักต่อหน่วยของดิน 4) ค่าความเชื่อมแน่นของดิน 5) ขนาดความสูงของ Box Underpass 6) ขนาดความกว้างของ Box Underpass 7) ขนาด Over Cut ของ Front Shield 8) ความลึกของ Box Underpass จากผิวดิน ดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 Settlement Analysis ต่อดังแรงเฉือนทะลุของดินคันทาง

ผลของการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D : Multiple Linear Regression ของ Center of Underground Infrastructure Research and Education (CUIRE), The University of Texas โดยใช้ข้อมูลจากโครงการต่างๆ จำนวนทั้งสิ้น 300 Box และ มีข้อกำหนดของค่าความลึกจากดินคันทางด้านบนถึงหลัง Box ต้องไม่น้อยกว่า 2h พบว่ากราฟแสดงเรียงลำดับเป็นเปอร์เซ็นต์สูงสุด ไปน้อยสุดคือค่าของ Soil cohesion, Depth of Box Underpass from the surface, Overcut size, Box width, Soil modulus of elasticity, Soil unit weight, and Box height แต่สำหรับความลึกจากดินคันทางด้านบนถึงหลัง Box ของโครงการรถไฟฟ้าชุมชนทางถนนจระ-ขอนแก่น ที่น้อยกว่า 2h การกำหนดระยะ Stroke ของ Thrust Jack และการจำกัดความเร็วให้ Box เคลื่อนที่ไปแบบช้าๆ โดยการดันๆหยุดๆ ครั้งละ 10 cm ไม่มีความสัมพันธ์ใดๆกับค่าการทรุดตัวสูงสุดของดินทั้ง 8 ประการ ทั้งนี้ปัจจัยของการทรุดตัวสูงสุด

จาก ขนาด Over Cut ของ Front Shield กับ ค่าความสูงของ Box Underpass เป็นปัจจัยสูงสุด และ ต่ำสุดด้านบวกของค่าการทรุดตัวสูงสุด (Highest positive impact) ส่วนค่าความเชื่อมั่นของดิน กับ ค่าความเครียดของดิน Modulus of Elasticity เป็นปัจจัยสูงสุด และ ต่ำสุดด้านลบ (Lowest negative impact)

7. บทสรุป

ความสำเร็จในโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่จิระ-ขอนแก่น ด้วยวิธีก่อสร้างทางลอดรถไฟโดยวิธีดันท่อลอดชนิดเหลี่ยม Box Jacking เป็นต้นแบบที่วิศวกรของกรมทางหลวงกำลังศึกษาเพื่อนำไปสร้าง Box Underpass. เพื่อใช้เป็นจุดกลับรถสำหรับรถจักรยานยนต์ บนเส้นทางด่วนมอเตอร์เวย์-บางใหญ่ซึ่งก่อสร้างเสร็จแล้ว แต่ไม่ได้ออกแบบจุดกลับรถตลอดแนวเส้นทาง โดยวิศวกรอาวุโสของ บมจ.การช่างที่รับผิดชอบงานด้าน Box Jacking โดยตรงได้ร่วมประชุมและให้ข้อเสนอแนะทางเทคนิคเกี่ยวกับปัญหา และ อุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้น ตลอดจนปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสำเร็จในโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่จิระ-ขอนแก่น. เช่น ระยะ Span Length ในการดัน Box Jacking ถ้าเกิน 12 เมตรจะไม่สามารถวาง Beam Support เพื่อป้องกันคันทางด้านบนเหนือ Box และ ระยะของ Right of Way จะต้องไม่เป็นอุปสรรคในการเข้า-ออกของ Mobile Crane เพื่อใช้ยกประกอบ Front Shield โดยทางกิจการร่วมค้า CK-CH ได้ทำการ Upload ไฟล์ VDO การดัน Box No. 24 ซึ่งเป็น Pilot Project ไว้ใน YOU TUBE ชื่อ “การสร้างทางลอดกล่องด้วยวิธี Box Jacking” และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า (พระนครเหนือ) ได้ส่งนักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มาจัดทำสื่อการสอนแบบแอนิเมชันชื่อเรื่อง “วิธีการก่อสร้าง Box Underpass โดยวิธี Box Jacking” และ Upload ไฟล์ ไว้ใน YOU TUBE เช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทอิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด (มหาชน) ที่ทำให้ได้รับความรู้ และ ประสบการณ์จากงานก่อสร้างท่อร้อยสายไฟแรงสูงใต้ดิน โดยวิธี Pipe Jacking (โครงการแรกของการไฟฟ้านครหลวง) และ บริษัท ข. การช่าง จำกัด (มหาชน) ที่ทำให้ได้ประสบการณ์จากงานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟใต้ดินสายสีน้ำเงิน Blue Line EXT_CT2 (อุโมงค์ลอดแม่น้ำเจ้าพระยาแห่งแรกของประเทศไทย) รวมทั้ง งานก่อสร้างรถไฟทางคู่ ช่วงชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น โดยวิธีดันทางลอดรถไฟชนิดเหลี่ยมด้วยวิธี Box Jacking (โครงการแรกในประเทศไทย)



รูปที่ 28 Box No. 24 Type 3 (Box Jacking แห่งแรกของโครงการก่อสร้างรถไฟทางคู่ช่วงชุมทางถนนจิระ-ขอนแก่น (สถานีพลสงคราม)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Marshall Robinson Roe. “Guide to best practice for the installation of pipe jacking and microtunnels.” Pipe Jacking Association Press 1995, pp. 24 – 50
- [2] Anderson, Loren Runar et al “PRELIMINARY RING DESIGN” (2000) Structural Mechanics of Buried Pipes Boca Raton : CRC Press LLC.
- [3] Pressure Vessel Design Manual Third Edition ASME CODE, Section VIII, Division 1 vs Division 2, DENNIS R. MOSS Gulf Professional Publishing, 2004
- [4] Udomchoke, V. (1991). *Origin and Engineering Characteristics of the Problem Soil in the Khorat Basin, NorthEastern Thailand*. Ph. D. Dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand.
- [5] วีระวัฒน์ วรรณกุล (2557). *กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินลมหอบขอนแก่น (Khon Kaen Loess) ที่ถูกบดอัดในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยวิธีการทดสอบแบบอัดตัวคลายน้ำมีการระบายน้ำ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [6] ประภษัญญ์ วงศ์สุคนธ์ชาติ (2558). *การศึกษาผลของแรงเสียดทานโดยใช้ของผสมโพลีเมอร์-โฟมที่มีต่อต้นทุนพลังงานในการเจาะอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเจ้าพระยา*. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11, ชลบุรี, 17-19 มิถุนายน 2558.