

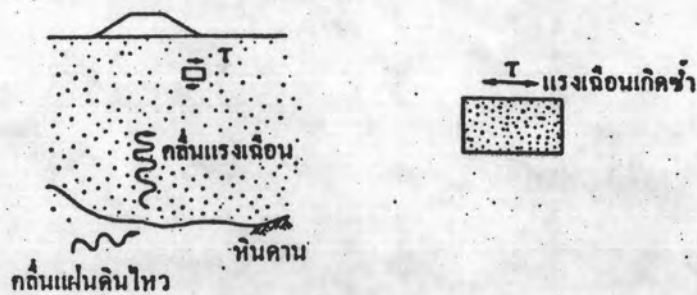


บทที่ 3

วิธีการปรับปรุงฐานรากที่เป็นชั้นดินทรายหลวม

3.1 การปรับปรุงฐานรากที่เป็นชั้นทรายหลวม

เมื่อทำการถมดินหรือเพิ่มน้ำหนักบรรทุกกระทำบนฐานรากที่เป็นชั้นทรายหลวม ถ้ามีแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวมากกระทำ อาจเกิดปรากฏการณ์สภาพเหลว บ่อย ๆ ในชั้นทรายของดินฐานราก ซึ่งทำให้เกิดอันตรายร้ายแรงปรากฏการณ์สภาพเหลวในดินฐานรากที่เป็นชั้นทรายหลวมหมายความว่า เมื่อมีคลื่นแผ่นดินไหว เคลื่อนผ่านชั้นทรายอ้อมตัวของดินฐานรากความเค้นเฉือน (Shear Strength) จะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และความดันน้ำในช่องว่างของชั้นทรายจะเพิ่มขึ้น หน่วยแรงประสิทธิผล (Stress) ของชั้นทรายจะลดลงหรือมปรากฏการณ์นี้ จะเกิดการสูญเสียของความแข็งแรงเฉือน ยังผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า สภาพเหลวในชั้นทรายคือ ทรายจะไหลเหมือนน้ำ



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์สภาพเหลว

หลักการที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงดินที่เป็นทรายหลวมที่ปฏิบัติกันอยู่ โดยอาศัยแนวความคิดที่ตามคุณสมบัติทางกล (Mechanical Property) ของชั้นดินทรายจะปรับปรุงได้โดยการอัดแน่น ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่

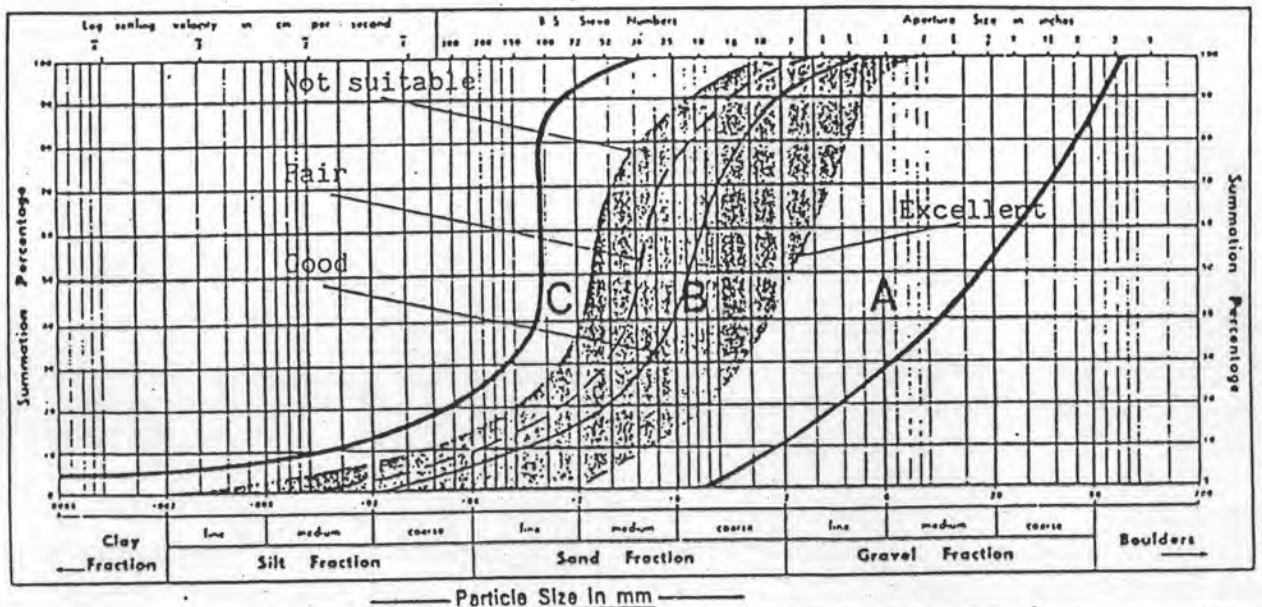
- 1) โดยการสั่นสะเทือน (Vibroflotation)
- 2) โดยการระเบิด (Explosive)
- 3) โดยการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก (Heavy Tamping)

3.1.1 การอัดแน่นทรายโดยวิธีการสั่นสะเทือน (Vibroflotation)
การใช้วิธีการสั่นสะเทือนทำให้ทรายมีความแน่นขึ้น และมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น ได้พัฒนาขึ้นมาและใช้กันแพร่หลายทั่วโลก โดยหลักการการจุ่มเครื่องสั่นเขย่า (Vibrator) ลงไปในทรายเครื่องจะถ่ายทอดแรงสั่นตามแนวนอนเข้าไปในทราย ทำให้เม็ดทรายขยับตัวเรียงกันใหม่และเพิ่มความแน่นมากขึ้น วิธีนี้จะได้ผลดีสำหรับดินที่เป็นทรายล้วนเท่านั้น ส่วนดินที่มีขนาดคละละเอียดจำนวนมาก พวดินเหนียวหรือดินตะกอน วิธีการนี้จะใช้ไม่ค่อยได้ผล ขอบเขตที่เหมาะสมที่ใช้อัดแน่นโดยใช้เครื่องสั่นเขย่าคือ วัสดุที่มีขนาดคละ (Gradation) ที่อยู่ในพื้นที่ A และ B ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนวัสดุที่มีขนาดคละอยู่ในพื้นที่ C การอัดแน่นโดยวิธีใช้เครื่องสั่นเขย่าจะไม่ได้ผลดีนักหรืออาจต้องจุ่มเครื่องสั่นเขย่าในระยะระหว่างหลุมใกล้กันมากขึ้น

เครื่องสั่นเขย่า (Vibroflot) จากรูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องสั่นเขย่า ประกอบด้วยท่อเหล็กยาวซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนบนซึ่งเรียกว่า Follow Section ส่วนล่างเป็นหัวใจของเครื่องสั่นเขย่า ซึ่งเรียกว่า Vibroflot มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30-40 เซนติเมตร มีความยาวระหว่าง 2.00-4.50 เมตร ภายในบรรจุด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าพร้อมลูกเบี้ยว (Essentric Weight) มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 3,000 รอบต่อนาที ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน 50 เฮิร์ต หรือหมุนด้วยความเร็ว 1,800 รอบ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน 60 เฮิร์ต แรงสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นในแนวราบ แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นประมาณ 30 ตัน จะทำให้เกิดการแกว่งที่ปลายของเครื่องสั่นเขย่า Amplitude ประมาณ 23 มม. น้ำหนักตัวของเครื่องสั่นเขย่าสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดน้อยลงได้ตามความเหมาะสมของงานแต่ละแห่ง โดยเปลี่ยนขนาดความหนาของ Follow Tubes ส่วนประกอบทั้งชุดของเครื่องสั่นเขย่าจะห้อยขึ้น หรือห้อยลงโดยใช้รถปั้นจั่น

วิธีการทำงานของเครื่องสั่นเขย่า (Vibroflotation Technique) เพื่อให้สามารถเข้าใจการทำงานของเครื่องสั่นเขย่าแบบ (Vibroflot) ได้ แยกดินที่จะทำการอัดแน่นเป็น 2 ชนิด คือ ดินทรายและดินเหนียว ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะดินที่เป็นดินทรายเท่านั้น ในดินทรายการอัดแน่นมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่ม

ความแน่นและให้มีความแน่นสม่ำเสมอ การสั่นเขย่า เพื่อให้ทรายมีความแน่นมากขึ้นนั้น ทรายจะต้องมีลักษณะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) เพื่อให้เม็ดทรายจัดเรียงกันใหม่ และจะทำให้มีความแน่นเพิ่มขึ้น โดยรูปที่ 3.4 เป็นการแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการทำงานของเครื่องสั่นเขย่า เมื่อเครื่องถูกห้อยลงไปและนั้นมอเตอร์หมุนเต็มที่และหัวฉีดน้ำตอนปลายทำงาน Vibroflot จะจมลงไปถึงระดับที่ต้องการ หัวฉีดที่ปลายจะหยุดและหัวฉีดน้ำส่วนบนจะเริ่มทำงาน จากนั้นตัวเครื่องจะถูกยกขึ้นอย่างช้า ๆ และขบวนการอัดแน่นทรายจะเกิดขึ้น ทรายบริเวณปากปลุมจะยุบลงต้องคอยเติมอยู่ตลอดเวลา ปริมาณทรายที่ต้องเติมมีจำนวนปริมาณ 15% โดยทั่วไปแล้วทรายที่มีอัตราส่วนละเอียดเหมาะสมสามารถจะปรับปรุงให้สามารถรับน้ำหนักได้ถึง 500 กิโลนิวตัน/ม.² และมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงถึง 90%

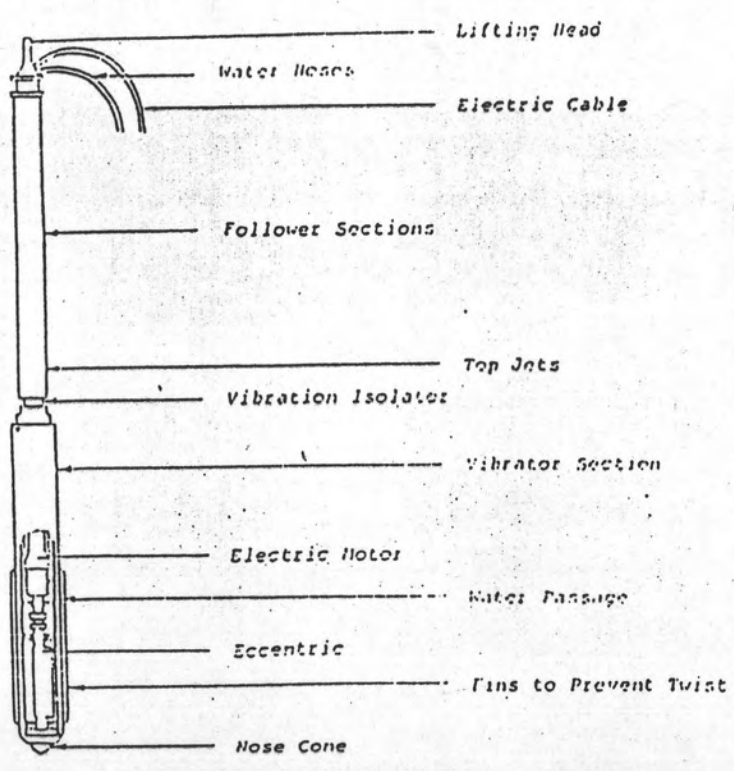


$$\text{Suitability No} = 1.7 \times \sqrt{\frac{3}{D_{50}^2} + \frac{1}{D_{20}^2} + \frac{1}{D_{10}^2}}$$

D sizes in mm for % passing 50, 20 and 10 per cent

Suitability Number	0-10	10-20	20-30	30-50	> 50
Rating	Exc.	Good	Fair	Poor	Unsuit

รูปที่ 3.2 แสดงช่วงขนาดละเอียดที่เหมาะสมในการอัดแน่นโดยวิธีสั่นสะเทือน

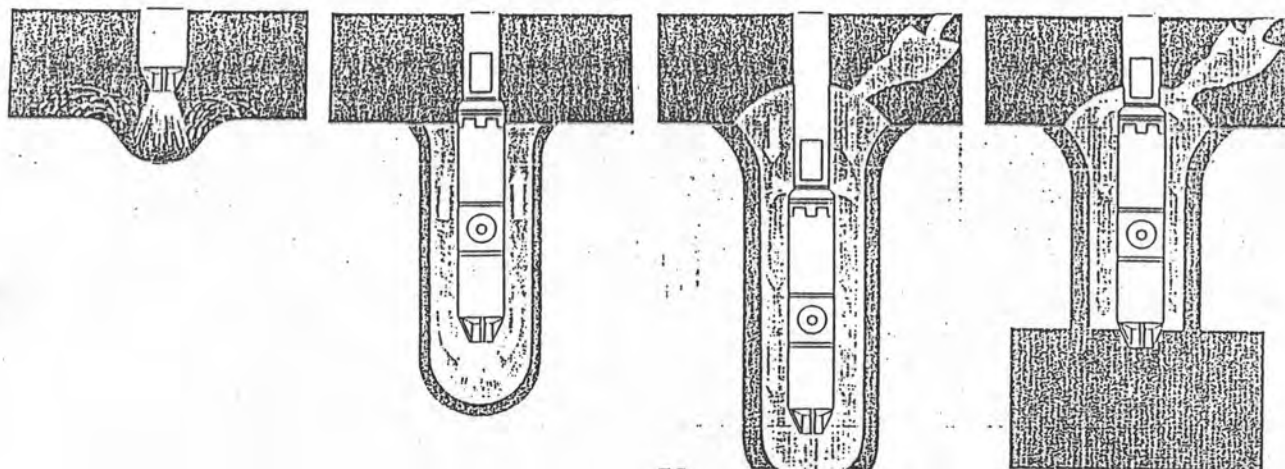


ส่วนประกอบที่สำคัญของ Vibroflot

Vibroflot มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก แบ่งออกเป็น ๗ ส่วน ส่วนข้างเป็นหัวสั้นเขย่า ส่วนบนเน้นท่อคัดหัวสั้นเขย่าประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าและลูกเขี้ยว บรรจุอยู่ในท่อกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ ๓๐๐-๔๐๐ มิลลิเมตร

รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องสั้นเขย่า

The Vibroflotation operation



1

ท่อน Vibroflot ลงมาจุดที่จะ
ทำการอัดแน่น และฉีดน้ำลงไปล้อม
ทวนเครื่องเขย่า เริ่มทำงาน

2

ปริมาณน้ำที่ฉีดออกไปมากกว่า
ปริมาณที่รั่วซึมออกไปทำให้เกิด
Quick condition ที่ปลาย
หัวฉีด หัวฉีดจะจมลงไปใต้อาไรต์
ด้วยน้ำหนักตัวเอง

3

เมื่อปลายเครื่องสั่น เขย่าจมลงไปจน
ถึงระดับที่กำหนด หัวฉีดน้ำส่วนบนเริ่ม
ทำงาน แรงดันน้ำลดลง หรือเริ่ม
กรอบทรายลงไป ผลการฉีดน้ำจากส่วน
บนทำให้ทรายไหลลงถึงชั้นล่างสุด

4

เครื่องสั่น เขย่า เริ่มทำงาน, พร้อมกับ
ยกเครื่องสั่น เขย่าขึ้นอย่างช้า ๆ
ขบวนการอัดแน่นเริ่มจากปลายของเครื่อง
สั่น เขย่าและค่อยเคลื่อนทรายลงไป, ทราย
จะถูกอัดตัวแน่นตั้งแต่ปลายขึ้นมา จนยก
เครื่องสั่น เขย่าขึ้นจนหมดตัวก็ขึ้น

รูปที่ 3.4 แสดงวิธีการทำงานของเครื่องสั่นเขย่า

3.1.2 การอัดแน่นทรายโดยวิธีการระเบิด

ในมวลดินหยาบ (Granular Soil) มีสภาพที่หลวมและอิมตัวด้วยน้ำ เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนอย่างทันทีทันใด จะทำให้เกิดสภาพเหลวและเกิดการเคลื่อนตัวของเม็ดดิน ทำให้ดินแน่นขึ้น ในสภาพดินแห้งการสั่นสะเทือนจะทำให้เม็ดดินเคลื่อนที่ โดยจะหลวมกว่าตอนแรกก่อนถูกสั่นสะเทือนแล้วจะค่อย ๆ แน่นขึ้น การทำการอัดแน่นทรายวิธีนี้จะได้ผลลัพท์สูงสุดเมื่อดินอยู่ในสภาพแห้ง ($S:0\%$) หรืออิมตัวด้วยน้ำ ($S:100\%$) ดังนั้นในบริเวณที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับผิวดิน ปริมาณความชื้นจะลดลงจาก 100% เนื่องจากการดูดซึมความชื้นของเม็ดดินที่อยู่รอบ ๆ ทำให้ความแน่นน้อยลงเนื่องจากเกิด Capillary Tension ซึ่งผลอันนี้จะเกิดมากยิ่งขึ้นเมื่อขนาดของเม็ดดินละเอียดขึ้น วิธีการแก้ผลกระทบเนื่องจาก Cappillary นี้โดยทำให้พื้นที่น้ำท่วมถึง ดังนั้นบริเวณผิวบนที่ลึกประมาณ 0.6-0.9 เมตร มักบดอัดได้ไม่แน่นนอกเสียจากผิวดินจะอิมตัวด้วยน้ำอย่างสมบูรณ์เท่านั้น วิธีนี้จึงไม่ค่อยเหมาะสมในชั้นดินตื้น ควรใช้วิธีอื่นดีกว่า

ในการระเบิดหลาย ๆ ครั้งในพื้นที่เดียวกันจะเกิดการยุบตัวมากที่สุดในการครั้งแรก แล้วจะยุบตัวน้อยลงในชั้นถัด ๆ มา จนในที่สุดการยุบตัวก็จะไม่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนของการระเบิดอย่างต่อเนื่องเป็นชุด ๆ นี้ สามารถประมาณค่าอย่างคร่าว ๆ ได้ จากผลการระเบิด 4 ครั้ง ครั้งแรกจะมีผลทำให้ดินแน่นขึ้น 60% ครั้งที่สองจะทำให้ความแน่นของดินเพิ่มขึ้นอีก 25% ครั้งที่สามจะเพิ่มขึ้นอีก 10% จนกระทั่งครั้งสุดท้าย ความแน่นของดินจะเพิ่มขึ้นเพียง 5% แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะระหว่างหลุมที่ทำให้เกิด คาบเกี่ยว (Overlapping) ของการบดอัด เบียงนอระหว่างหลุมข้างเคียง จึงจะให้ผลเป็นไปดังกล่าวข้างต้นได้

การทำให้ดินแน่นโดยการระเบิดแตกต่างจากวิธีการ รูปแบบอื่น ๆ คือ กระทำในดิน พลังงานที่ได้รับในแต่ละครั้งจะถูกจัดไว้ใต้ดิน จึงไม่มีอันตราย เนื่องจากการกระจายของระเบิด ขนาดและความลึกของการระเบิดในดินสามารถหาได้จากสูตร ประสบการณ์และการตรวจสอบจากการทดสอบในสนามก่อน ขนาดของประจุระเบิดแต่ละลูกจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของดิน, ความลึกของชั้นดิน, ความแน่นของดินที่ต้องการ, ระยะระหว่างหลุม, ระดับน้ำใต้ดิน, อาคารข้างเคียง, ผลของการคาบเกี่ยวแต่ละครั้งและชนิดของระเบิดที่ใช้จาก ประสบการณ์

ในโครงการต่าง ๆ ที่ผ่านมา พบว่าศูนย์กลางของการระเบิดควรอยู่ต่ำกว่าศูนย์กลางของมวลดินที่ต้องการจะทำให้แน่น โดยอยู่ที่ตำแหน่ง 2 ใน 3 ของชั้นดิน ในบางที่อาจจะมีควมจำเป็นต้องแยกการระเบิดในหลุมเดียวกัน เมื่อชั้นของ Cohesionless Soils แยกจาก Cohesive Soils หรือเมื่อระเบิดในบริเวณที่ใกล้กับอาคารข้างเคียง ซึ่งการแยกการระเบิดนี้ต้องใช้ Delay Elastic Blasting Cap ทำให้เกิดช่วงการช้า (Delay) ซึ่งการระเบิดไม่พร้อมกันเป็นการลดพลังงานในการระเบิด จึงไม่มีผลเสียหายต่ออาคารข้างเคียงสำหรับระยะระหว่างหลุมในแนวราบจะอยู่ระหว่าง 10 ฟุต ถึง 25 ฟุต (3 เมตร ถึง 7.5 เมตร) ขึ้นอยู่กับความลึกของชั้นดิน ขนาดของการระเบิด และผลของการคาบเกี่ยวเนื่องจากหลุมข้างเคียง ระยะระหว่างหลุมที่น้อยกว่า 3 เมตรไม่ควรใช้ นอกเสียจากสำรวจอย่างรอบคอบแล้วว่าปลอดภัย เพราะว่าอาจจะเกิดการแผ่กระจายของแรงระเบิด สำหรับการระเบิดในพื้นที่กว้าง ๆ การจัดรูปแบบควรแบ่งพื้นที่ออกเป็นโซนย่อย ๆ และเวลาระเบิดจะต้องไม่กระทำในโซนที่ต่อเนื่อง เพื่อลดความดันโพรงที่เพิ่มขึ้นเสียก่อน

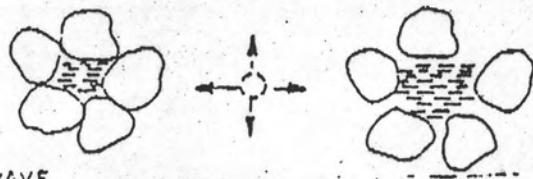
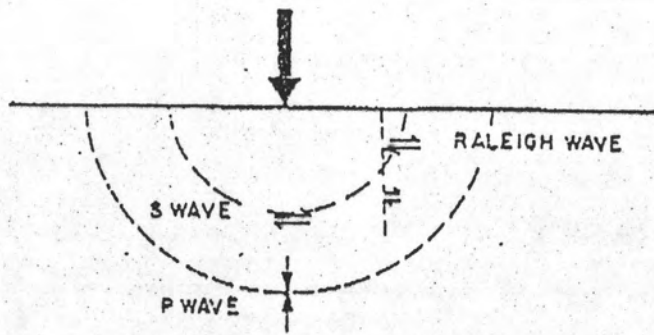
หลังจากการจัดวางรูปแบบหลุม, ระยะห่าง, ความลึก และขนาดของประจุแล้ว การทำหลุมสำหรับใส่ประจุนระเบิด คือต้องใช้พลาสติกฉนวนหรือใช้ท่ออลูมิเนียม แล้วทำการส่งลงไปดินตามความลึกที่ต้องการ ประจุนระเบิดที่มีหัวของประจุเป็นสื่อไฟฟ้าต่อลวดฉนวน จากหัวระเบิดมาตามท่อแล้วทำการชักท่อกลับขึ้นมา ต่อจากนั้นทำการกลบหลุม หลังจากติดตั้งประจุนเรียบร้อยแล้วจะต้องทำการตรวจสอบหัวระเบิดแต่ละหัวโดยใช้กัลวานอมิเตอร์ (Galvanometer) แล้วจึงทำการจุดระเบิดตามลำดับก่อนหลังที่วางไว้

3.2 การอัดแน่นทรายโดยวิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก (Heavy Tamping)

วิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก (Heavy Tamping) หรือบางที่เราเรียกว่าวิธีการอัดแน่นแบบพลวัต (Dynamic Compaction) ได้เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1969 โดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส ชื่อ หลุยส์ มีนาร์ด (Louis Menard) จนถึงปัจจุบันได้ทำการปรับปรุงดินบริเวณต่าง ๆ มาแล้วกว่า 500 แห่ง ใน 20 ประเทศ รวมทั้งสหรัฐอเมริกา พื้นที่ผิวต่าง ๆ โดยจะสามารถทำการปรับปรุงได้

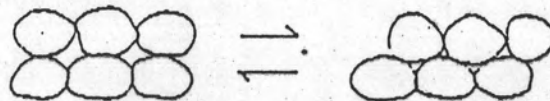
ทั้งเหนือและใช้ระดับน้ำใต้ดิน บนฝั่ง และนอกชายฝั่งทะเล เหมาะสมมากในการนำไปใช้ลดศักยภาพในการเกิดสภาพเหลวของชั้นทรายหลวม ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหว

หลักการพื้นฐานของวิธีการนี้ คือการให้พลังงานในการกระแทกจำนวนมาก กระทำต่อผิวดินโดยการทิ้งลูกตุ้มเหล็กหนักประมาณ 20 ถึง 50 ตัน ลงมาอย่างอิสระจากระยะความสูง 70 ฟุต ถึง 120 ฟุต ในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) การบดอัดจะเกิดคลื่นช่วงสั้น (Shock Wave) เหมือนในการทดสอบการบดอัดแบบ Proctor สำหรับดินที่จมน้ำ (Submerged Soils) ตอนแรกจะเกิดคลื่นแบบ P (P-Wave) เพื่อให้ดินมีสภาพเหลวเต็มที่ ต่อมาจะเกิดคลื่นแบบ S และคลื่นแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh) ทำให้ดินอัดเรียงตัวทางโครงสร้างใหม่ให้มีสภาพแน่นขึ้น ช่วงของขนาดคลื่นของดินที่สามารถกระทำการปรับปรุงวิธีนี้มีกว้างมาก ตั้งแต่หินถมจนกระทั่งถึงดินเหนียวปนดินตะกอน การรู้ถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ของดินในสนาม จะใช้เป็นตัวควบคุมการทำงานในการปรับปรุง เช่น พลังงานที่ใช้, รูปแบบการทุบ, ลำดับการทุบ, และเวลาตอกในแต่ละช่วง เพื่อให้ได้ผลตามประสงค์ จากผลการทุบนี้จะเกิดการยุบตัว ที่ผิวบนประมาณ 2% ถึง 5% หรือมากกว่าของความหนาของชั้นดินที่เราทำการทุบในแต่ละครั้ง แรงดันโรงพของน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งบางที่อาจจะดันพุ่งทะเลผ่านมาถึงผิวดินทำให้ดินกระจายได้ กำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของดินจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2-4 เท่า การทรุดตัวจะลดลงประมาณ 3-10 เท่า เมื่อพื้นที่ในการปรับปรุงมีบริเวณกว้างมาก ๆ วิธีการทุบด้วยลูกตุ้มจะประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าวิธีอื่น ๆ ชนิดของโครงการที่ปรับปรุงโดยวิธีนี้ได้แก่ เขื่อนดิน, ถังน้ำ, กำแพงเรือ, สนามบิน, ทางหลวง



P WAVE.

- INCREASES PORE WATER PRESSURE
- DISLOCATES SOIL MATRIX



S AND RALEIGH WAVES:

- SHEAR SOIL GRAINS
- REARRANGE STRUCTURE TOWARDS DENSER STATE

รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะคลื่นที่เกิดขึ้นหลังการรบกวน

3.2.1 โครงการต่าง ๆ ที่ได้ปรับปรุงผ่านมาในอดีต

โครงการแรกที่เริ่มทำการปรับปรุงโดยวิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก เป็นการปรับปรุงพื้นที่ในแคว้นริเวียร์ทางตอนใต้ของประเทศฝรั่งเศส นั่นก็คือทำการปรับปรุงเป็นชั้นเศษหินผุ ที่เหลือจากการทำเหมืองแร่ที่ถมกันหนา 30 ฟุต วางอยู่บนชั้นดินตะกอนหนา 40 ฟุต ต้องการปรับปรุงเป็นฐานรากรับอาคารสูง 27 ชั้น เพื่อทำศูนย์การค้า, ทางเดิน และที่จอดรถ โดยในสมัยก่อนการปรับปรุงฐานรากยังลึก (Deep Foundation) ที่นิยมใช้จะมี 2 วิธีด้วยกันคือ การตอกเสาเข็ม (Piling) และการใส่น้ำหนักกดก่อน (Preloading) ซึ่งถ้าใช้วิธีตอกเสาเข็มปรับปรุงตลอดพื้นที่เป็นการสิ้นเปลืองมาก และบางบริเวณที่ไม่ได้ทำการตอกเสาเข็มจะเกิดการทรุดตัวไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความเสียหายได้ จึงนำวิธีการ Preloading มาใช้ปรากฏว่าผลลัพธ์ไม่น่าพอใจเนื่องจากเสียเวลา เพราะมีค่าอัตราการยุบตัวเพียง 8 นิ้ว หลังจากการใส่น้ำหนักกด 3 เดือน และความแน่นเพิ่มขึ้นไม่มากนัก จึงได้มีการนำวิธีการทุบด้วยลูกตุ้มมาทดลองใช้ โดยใช้ลูกตุ้มหนัก 10 ตัน ปลดปล่อยมาจากกระยะความสูง 40 ฟุต ปรากฏว่า ผลที่ได้รับเป็นที่น่าพอใจ มีการยุบตัวตลอดพื้นที่ถึง 20 นิ้ว และผลการทดสอบดินหลังการทุบค่า Pressuremeter เพิ่มขึ้น 2-3 เท่า สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เกิน 3 ตัน/ฟุต² ค่าการทรุดตัวของอาคารโดยเฉลี่ยเพียง 0.5 นิ้ว และค่าแตกต่างของการทรุดตัวของอาคารแทบไม่มีเลย จึงเริ่มนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในพื้นที่อื่น ๆ อีกหลายโครงการ

ในช่วงเริ่มแรกในการนำวิธีการปรับปรุงโดยวิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก มาประยุกต์ใช้ ปรากฏว่า ความนิยมแพร่หลายเป็นไปอย่างช้า ๆ เนื่องจากไม่สามารถกดอัดชั้นดินหนาเกิน 30 ฟุต (9.144 เมตร) ได้ จึงมีการประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ในการยกลูกตุ้มให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เช่น ประดิษฐ์รถปั้นจั่น (Crawler Crane) สามารถยกลูกตุ้มหนัก 15-20 ตัน ขึ้นสูงถึง 60 ฟุต ทำให้สามารถกดอัดชั้นดินหนาเกินกว่า 30 ฟุตได้ วิธีการจึงเริ่มใช้แพร่หลายอย่างรวดเร็ว จนในปัจจุบันวิธีการนำสามารถกดอัดชั้นดินได้หนาเกินกว่า 100 ฟุต เช่น การปรับปรุงชั้นทรายหลวมหนา 45 ฟุต ที่วางตัวอยู่บนชั้นดินอ่อนที่ถมหนา 85 ฟุต ของสนามบิน Nice ในแคว้นริเวียร์ ประเทศฝรั่งเศส

โครงการต่าง ๆ ในอดีตที่ได้ปรับปรุงโดยวิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก แยกออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1. การปรับปรุงบนแผ่นดิน (Standard Job on Land) เช่น การปรับปรุงทรายถมที่ Jacksonville มลรัฐฟลอริดา การปรับปรุงดินถมละเอียดของท่าเทียบเรือเมือง Papenburg ประเทศเยอรมันนี, การปรับปรุงหินถมที่ Uddavalla ประเทศสวีเดน

2. การปรับปรุงบริเวณชายฝั่งทะเล (Standard Job Offshore) เช่น การปรับปรุงชั้นทรายหลวมใต้ทะเลที่ Al Jlayah ประเทศคูเวต

3. การปรับปรุงเพื่อลดศักยภาพการเกิดสภาพเหลวเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหว เช่น การปรับปรุงชั้นดินธรรมชาติที่ Playa Dorada ทางชายฝั่งด้านเหนือของประเทศสาธารณรัฐโดมินิกัน, การปรับปรุงชั้นทรายหลวมของเขื่อน Penitas ประเทศเม็กซิโก

3.2.1.1 โครงการปรับปรุงชั้นทรายถมที่ Jacksonville มลรัฐฟลอริดา

ในปี ค.ศ. 1974 ทำการปรับปรุงชั้นทรายถมหนา 43 ฟุต (ดังรูปที่ 3.6 ก.) โดยใช้ลูกตุ้มหนัก 18 ตัน ปล่อยลงมาจากระยะความสูง 75 ฟุต (23 เมตร) พลังงานที่ใช้ในการทุบทั้งหมด/พื้นที่ หลังจากทำการทุบ 3 ช่วง เท่ากับ 335 ตัน ม./ม.² ผลการทดสอบความแน่นหลังการบดอัดพบว่าในดิน Silty Sand สามารถบดอัดได้ลึก 38 ฟุต ค่า N เพิ่มขึ้น 6 เท่า

3.2.1.2 โครงการปรับปรุงชั้นทรายหลวมใต้ระดับน้ำทะเล ที่ Al Jlayah ประเทศคูเวต

ในการก่อสร้างแนวกำแพงปะทะคลื่นของฐานกันเรือคูเวต ในอ่าวอาระเบีย เมื่อทำการถมบล็อกคอนกรีตลงไปในทะเล ปรากฏว่าบล็อกคอนกรีตไม่สามารถทรงตัวอยู่บนชั้นทรายหลวมหนา 12 ฟุตได้ จึงเกิดการไถลตัวออกทางด้านข้าง วิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนักได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทุบชั้นทรายหลวมใต้ระดับน้ำทะเล โดยใช้ลูกตุ้มหนัก 32 ตัน ปล่อยลงมาจากระยะความสูง 30 ฟุต ปรากฏว่า ทำให้ชั้นทรายแน่นขึ้น สามารถรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มประมาณ 3 เท่า (ดังรูป 3.6 ข.) บล็อกคอนกรีตจึงสามารถทรงตัวอยู่ได้

3.2.1.3 โครงการปรับปรุงชั้นทรายละเอียดที่ Playa Dorada ทางชายฝั่งด้านเหนือของประเทศ สาธารณรัฐโดมินิกัน

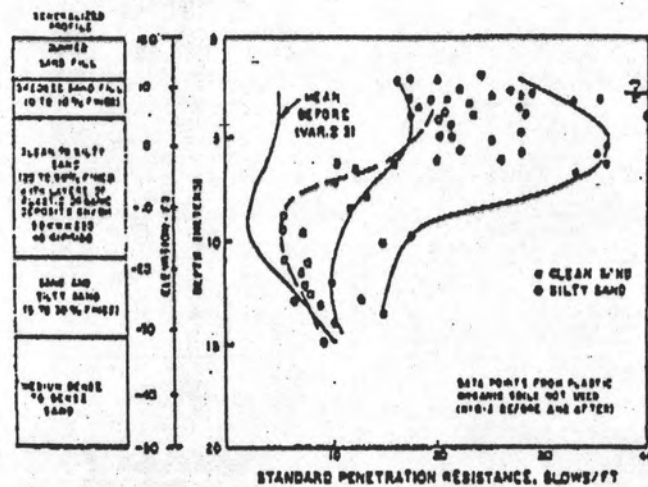
ประเทศสาธารณรัฐโดมินิกันอยู่ในแนวที่เกิดแผ่นดินไหวบ่อยครั้ง ซึ่งการเกิดแผ่นดินไหวครั้งรุนแรงที่สุดในปี ค.ศ. 1502 และจะเกิดอย่างรุนแรงทุก ๆ ช่วง 38 ปี โดยเฉลี่ย การเกิดแผ่นดินไหวครั้งรุนแรงครั้งล่าสุดวัดขนาดความแรงได้ 8.1 แต่ปรากฏว่าในชั้นทรายหลวมหนาระหว่าง 10-40 ฟุต ก็จะเกิดสภาพเหลวขึ้นได้ขณะเกิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงยังไม่มากนัก ยังผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน และโครงสร้างต่าง ๆ ได้ ถึงแม้ว่าโครงสร้างเหล่านั้นจะวางอยู่บนเสาเข็มหรือฐานรากแผ่กว้างก็ตาม จึงได้มีการพิจารณาปรับปรุงคุณสมบัติของดิน โดยทำการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก เพื่อลดศักยภาพในการเกิดสภาพเหลวขณะเกิดแผ่นดินไหว โดยก่อนบดอัดความหนาแน่นสัมพัทธ์มีช่วงกว้างมากอยู่ระหว่าง 2%-90% ค่าเฉลี่ยประมาณ 51% เมื่อทำการบดอัดแล้วช่วงความหนาแน่นสัมพัทธ์จะแคบเข้าเหลือเพียง 46-100% ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 79% (ดังรูปที่ 3.6 ค.)

3.2.1.4 โครงการปรับปรุงฐานรากของเขื่อน Penitas ประเทศเม็กซิโก

การไฟฟ้าของประเทศเม็กซิโกได้ทำการสร้างเขื่อน Penitas ซึ่งเป็นเขื่อนดินและหินถมสูง 55 เมตรขวางลำน้ำ Grijalva เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า 500 กิโลวัตต์ การสำรวจทางธรณีวิทยาเบื้องต้นพบว่าชั้นดินประกอบไปด้วยดินทรายขนาดเล็กถึงปานกลาง มีตะกอนและกรวดปนบ้างเล็กน้อย หนาประมาณ 50 เมตร โดยเป็นชั้นดินหลวมในช่วง 15 เมตรแรก (ดังรูปที่ 3.7 ก.) ซึ่งคาดว่าจะเกิดการทรุดตัวสูงและอาจจะเกิดสภาพเหลวขึ้นได้เมื่อเกิดแผ่นดินไหว จึงทำการปรับปรุงโดยวิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทุบจะใช้สามขา (Tripod) ยกลูกตุ้มหนัก 37 ตัน ขนาดหน้าตัด 2.5 x 2.5 ม.² ปล່อยลงมาจากระดับความสูง 27 เมตร และใช้รถปั้นจั่นยกลูกตุ้มหนัก 15 ตัน ขนาดหน้าตัด 2x2 ม.² ปล່อยลงมาจากระยะความสูง 20 เมตร บริเวณที่ทำการปรับปรุงแบ่งออกเป็น 3 โซน ได้แก่ ด้านเหนือน้ำ, ตอนกลางและด้าน

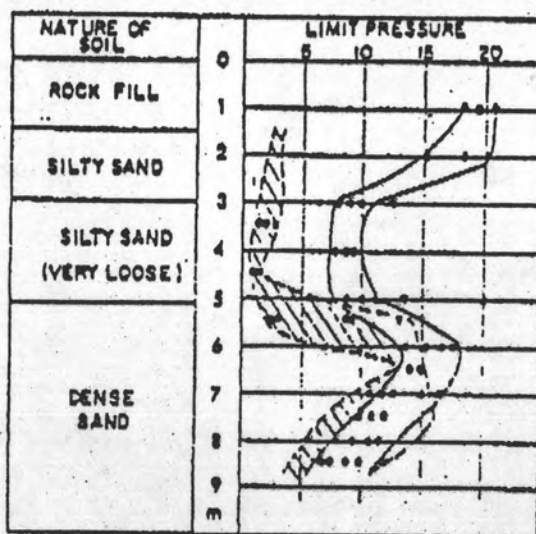
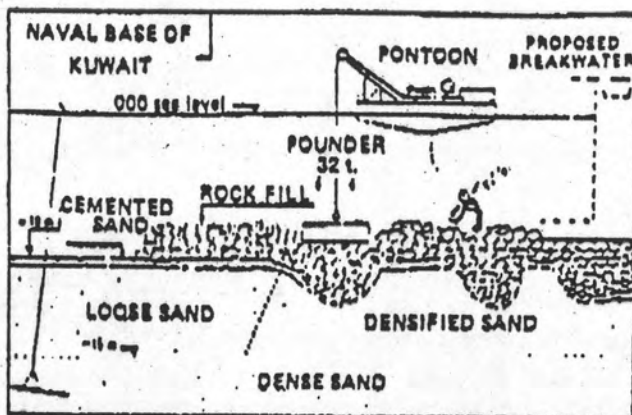
ท้ายน้ำ โดยการบดอัดบริเวณตอนกลางเชื่อมใช้พลังงานในการทุบต่อพื้นที่สูงกว่า ด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ ซึ่งจากรูปแบบการทุบ, ขั้นตอนการทุบและค่าการยุบตัวเฉลี่ยดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ข. พบว่าการยุบเฉลี่ยต่อพื้นที่ประมาณ 20 ซม. และจากการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันโพรงของน้ำ (Piezometer) ที่ระดับความลึก 6 เมตร และ 12 เมตร บริเวณที่ทำการปรับปรุงทั้งสามโซน ปรากฏว่าไม่ได้รับประโยชน์จากการเปรียบเทียบ เนื่องจากการกระจายของแรงดันโพรงของน้ำที่เพิ่มขึ้นกระจายกลับสู่สภาพเดิมได้รวดเร็วมาก ประมาณภายใน 1 ชม. และวิธีการนี้สามารถปรับปรุงฐานรากพื้นที่ 50,000 ม.² ให้เสร็จภายในเวลาเพียง 3 เดือน

สำหรับการตรวจสอบความแน่นหลังการบดอัดกระทำ โดยการทดสอบ 2 วิธีคือ Standard Penetration Test กับวิธี Dynamic Cone Penetration Test ซึ่งผลการทดสอบดังรูปที่ 3.7 ค. เมื่อทำการวัดค่าความลึกอิทธิพลได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.6 เมตร โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.1 เมตร ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์แก้ไขเท่ากับ 0.37



- from ground surface to 6 feet — dumped sand fill.
- from 6 to 15 feet — hydraulic sand fill (mostly clean).
- from 15 to 43 feet — clean sand and silts. There were interspersed layers of highly plastic organic silts and clays sometimes several feet in thickness, with moisture contents above 100,
- below 43 feet of depth medium dense to dense sand.

รูปที่ 3.6 (ก) แสดงลักษณะชั้นดินและค่า SPT-N ของโครงการ Jacksonville

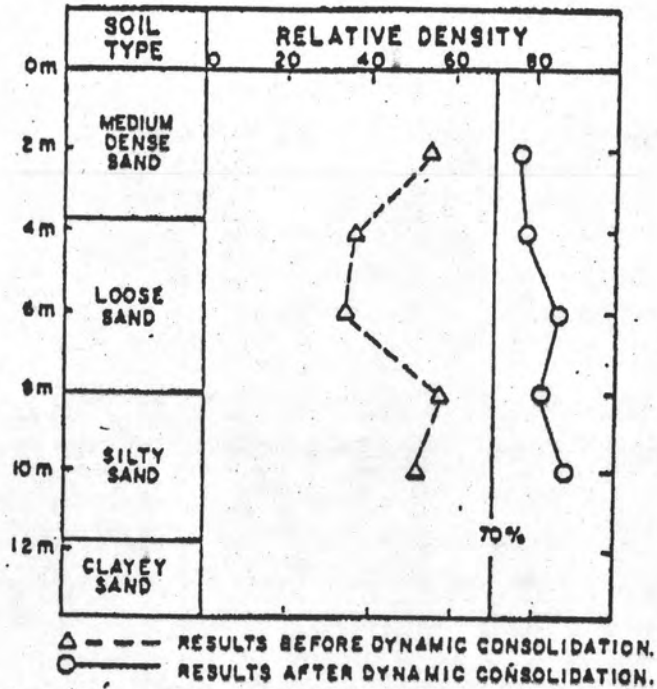


▨ BEFORE COMPACTION

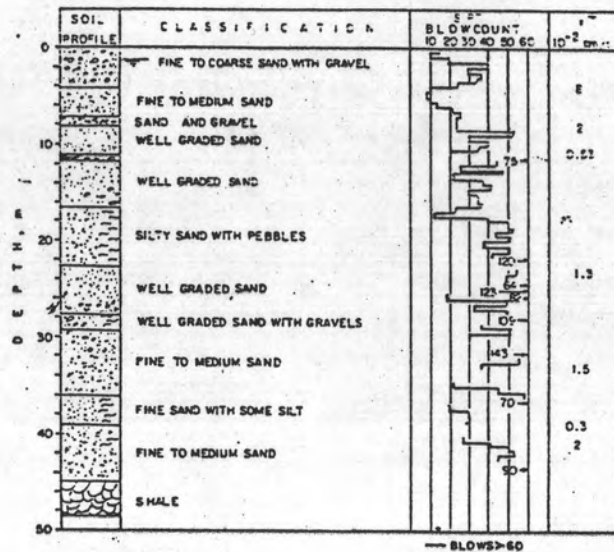
□ AFTER COMPACTION

ENERGY: 350 t.m/m²

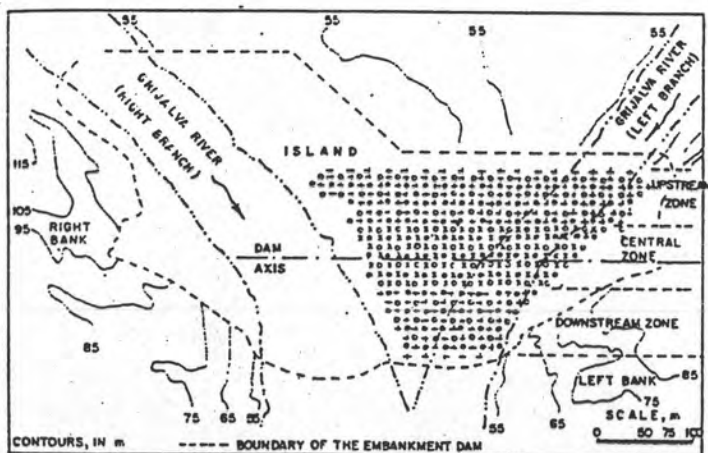
รูปที่ 3.6 (ข) แสดงลักษณะของชั้นดินและผลการทดสอบความแน่นก่อนและหลังการบดอัดของโครงการ Al Jlayah



รูปที่ 3.6 (ค) แสดงลักษณะชั้นดินและค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ก่อนและหลังการบดอัดของโครงการ Playa Dorada



รูปที่ 3.7 (ก) แสดงลักษณะชั้นดินและค่า SPT-N ก่อนการบดอัดของเขื่อน Penitas



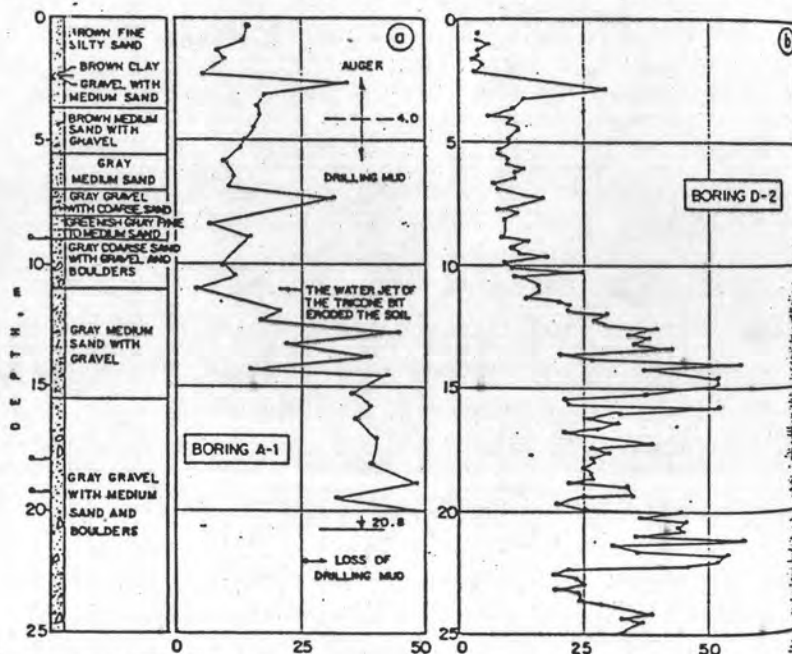
PLAN VIEW OF ZONES AND STAGES OF COMPACTION

TABLE I. COMPACTION PROCEDURE
UPSTREAM AND DOWNSTREAM ZONES

STAGE	STEEL MASS		GRID (m)	No. OF BLOKS	ENERGY (ton/m ²)	INDUCED AVERAGE SETTLEMENT		
	WEIGHT (ton)	DROP (m)						
1 ○	37	27	20 X 20	20	50	6.4		
2 ●	37	27	20 X 20	12	30	4.3		
3 +	15	20	14 X 14	16	25	3.1		
4	15	20	CONTINUOUS COVERAGE OF 1 @ 4 m ²		75	6.7		
CENTRAL ZONE					TOTAL ENERGY	180	20.5	ACCUMULATED AVERAGE SETTLEMENT
1 ○	37	27	20 X 20	20	50	6.4		
2 ●	37	27	20 X 20	14	35	4.3		
3 X	37	27	14 X 14	7	35	4.5		
4	15	20	CONTINUOUS COVERAGE OF 1 @ 4 m ²		75	6.7		
					TOTAL ENERGY	195	22.3	ACCUMULATED AVERAGE SETTLEMENT

Zones and stages of compaction by heavy tamping. Peñitas Dam

รูปที่ 3.7 (ข) แสดงวิธีการทุบและค่าการยุบตัวเฉลี่ยของเขื่อน Penitas



รูปที่ 3.7 (ค) แสดงผลการทดสอบความแน่นหลังการบดอัดโดยวิธี SPT กับ วิธี DCPT

3.2.2 แนวความคิดและทฤษฎีที่ใช้ในการปรับปรุง

ในการอัดแน่นทรายโดยการทุบด้วยลูกตุ้มหนัก มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแน่นของชั้นทราย และเพิ่มกำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของทราย ซึ่งการที่จะอัดแน่นทรายให้มีประสิทธิภาพจะต้องทำการพิจารณาถึงสิ่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ

3.2.2.1 ความลึกอิทธิพล (Influence Depth)

ในการอัดแน่นทรายโดยวิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนักค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงเป็นอันดับแรก ได้แก่ ความลึกที่เมื่อทำการอัดแน่นแล้ว ความแน่นหลังทำการทุบมีค่ามากกว่าความแน่นก่อนทำการทุบ เราเรียกความลึกนี้ว่า "ความลึกอิทธิพล" เพื่อที่จะได้ทราบว่าสามารถที่จะอัดแน่นไปถึงระดับที่ต้องการหรือไม่ ซึ่งค่าความลึกอิทธิพลที่จะมีค่าไม่คงจะเหมือนกันในแต่ละบริเวณที่ทำการปรับปรุง เพราะว่าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ หลายประการด้วยกัน ปัจจุบันยังไม่มีสูตรมาตรฐานในการคำนวณหาค่าความลึกอิทธิพลได้อย่างถูกต้องแน่นอน เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการใหม่ เริ่มพัฒนาและศึกษามาเป็นเวลานานนัก เพียงแต่มีสูตรคำนวณคร่าว ๆ (Empiricas Formular) ในการประมาณหาค่าเบื้องต้นเท่านั้น โดยเริ่มต้นทำการศึกษาในปี 2975 จากทฤษฎีของหลุยส์ มีนาร์ด (Louis Menard) ผู้ค้นคิดวิธีการนี้กล่าวไว้ว่า ความลึกอิทธิพลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของพลังงานที่ใช้ในการทุบหนึ่งครั้ง

$$D \propto \sqrt{WH}$$

จึงกำหนดเป็นสูตรคร่าว ๆ ได้เป็น

$$D = K\sqrt{WH}$$

$$W = \text{น้ำหนักของลูกตุ้มที่ใช้ทุบ}$$

$$H = \text{ระยะความสูงในการปล่อยลูกตุ้ม}$$

$$D = \text{ความลึกอิทธิพล}$$

$$K = \text{ค่าสัมประสิทธิ์แก้ไข (Coefficient of Correction)}$$

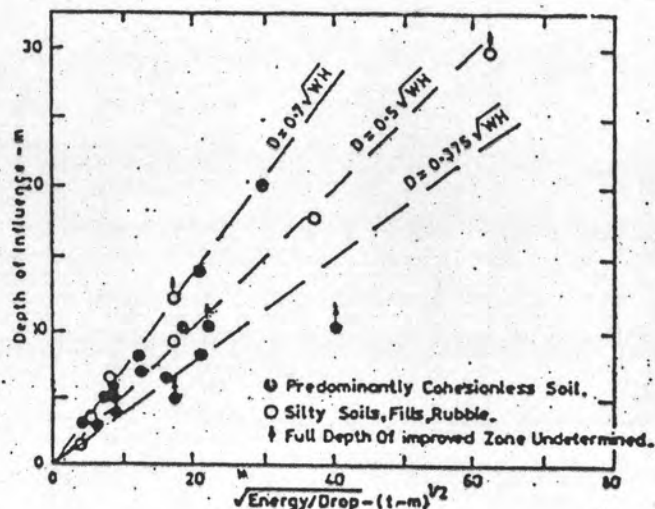
ค่าสัมประสิทธิ์แก้ไขหรือค่า K จะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณ เนื่องจากองค์ประกอบที่สำคัญคือ ชนิดของดิน และสภาวะเริ่มต้นก่อนการบดอัด โดยในดินเหนียวจะมีค่าสัมประสิทธิ์แก้ไขน้อยกว่าในดินทราย ต่อมาวิธีการนี้ เริ่มพัฒนาและ

ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงสภาพสนามบริเวณอื่น ๆ อีกหลายโครงการ จึงมีการ
 คำนวณหาความลึกอิทธิพล โดยอาศัยหลักค่ากล่าวของ หลุยส์ มีนาร์ด ได้ตั้ง
 ตารางที่ 3.1 แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับรากที่สองของพลังงาน
 ที่ใช้ในการทุบหนึ่งครั้ง ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.8 พบว่าค่า K อยู่ในช่วงระหว่าง
 0.375 ถึง 0.7

Coefficient of correlation

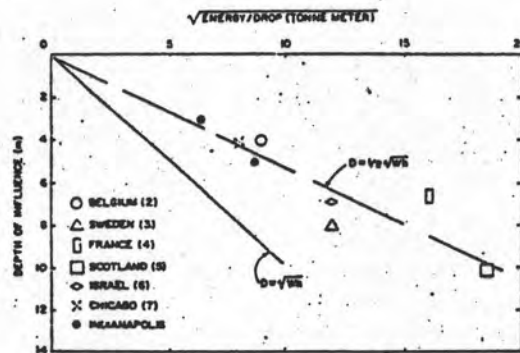
Reference	K
Menard and Brosie	1.0
Lukas	0.8 - 0.65
Ramaswamy et al.	0.6*
Bhandari	0.51
Charles et al.	0.35*
Santoyo and Fuentes	0.37

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แก้ไข (k)



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกอิทธิพลกับรากที่สองของพลังงาน
 ที่ใช้ในการทุบหนึ่งครั้ง (Mitchell and Katti, 1981)

Gerald A Leonards, William A Cutter and Robert D Holtz (1980) ได้ทำการศึกษาถึงความลึกอิทธิพลของมวลดินทราย (Granular Soil) บริเวณต่าง ๆ แล้วนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 3.9 พบว่าความลึกอิทธิพลของมวลดินทรายมีค่าประมาณ 0.5 WH และใช้ค่า K เท่ากับ 0.5 ในการหาค่าหน้าหนักของลูกตุ้มและระยะความสูงในการปล่อยลูกตุ้มในครั้งแรกได้ โดยผลจะไม่คลาดเคลื่อนมากนัก แล้วจึงค่อยมาปรับค่าแก้ไขในสนามจากแปลงทดสอบอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกอิทธิพลกับรากที่สองของพลังงานพลังงานในการทุบหนึ่งครั้งของมวลดินทราย

สำหรับการศึกษาวิธีการทุบด้วยลูกตุ้มหนักในประเทศจีน โดยทำการวิเคราะห์วิจัยว่าร้อยละของค่า K อยู่ระหว่าง 0.5-0.8

Professor J.H. Oian ได้ทำการศึกษาค่า K ในดินทรายละเอียดได้เท่ากับ 0.65 และต่อมา Professor Fang Wei Hang กับผู้ร่วมงานได้ทำการศึกษาค่าความลึกอิทธิพลใน Cohesive Soil และ Sandy Soil พบว่าความลึกอิทธิพลนอกจากขึ้นอยู่กับน้ำหนักของลูกตุ้ม และระยะความสูงในการปล่อยลูกตุ้มแล้ว ยังขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่อีกด้วย โดยเขียนเป็นสูตรความสัมพันธ์ได้เป็น

$$D = 5.1022 + 0.00895 WH + 0.009361 E/A \dots\dots\dots (3.2)$$

โดย E/A = พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่ (ตัน ม./ม.²)

3.2.2.2 รูปแบบการทុบและระยะห่างระหว่างจุดทុบ

รูปแบบการทុบโดยทั่วไปจะทำการทុบเป็นตารางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Grid) หรือตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Grid) การจัดระยะห่างระหว่างจุดทุบ โดยทั่วไประยะห่างระหว่างจุดทุบจะเท่ากับความหนาของชั้นดินที่ต้องการอัดแน่น (Depth = Spacing) แบ่งรูปแบบหลักของการทุบออกเป็น 3 รูปแบบใหญ่ คือ

1. ตารางสี่เหลี่ยมแบบคาบเกี่ยว (Overlap Grid)
2. ตารางสี่เหลี่ยมแบบเดี่ยว (Concentrated Grid)
3. ตารางสี่เหลี่ยมแบบต่อเนื่อง (Continuous Grid)

ซึ่งการเลือกรูปแบบการทุบว่าจะใช้รูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับ ค่าความแน่นตามธรรมชาติของชั้นดินที่ระดับต่าง ๆ ก่อนการบดอัด และความ หนาของชั้นดิน

1) รูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมแบบคาบเกี่ยว
รูปแบบนี้เหมาะสมสำหรับทำการทุบชั้นดินที่มีความหนาจำกัดแน่นอน, ความแน่นตามธรรมชาติก่อนการบดอัดค่อนข้างสม่ำเสมอ และค่าความแน่นไม่ต่ำมากที่ระดับใกล้ชั้นหินแข็ง ซึ่งขั้นตอนในการทุบจะกระทำดังนี้

ช่วงที่ 1 ทำการทุบโดยมีระยะห่างระหว่างจุดทุบเท่ากับความหนาของชั้นทราย และควรจะดำเนินถึงขนาดหน้าตัดของลูกตุ้มด้วย โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดทุบเป็นจำนวนเท่าของความกว้างหรือความยาวของฐานลูกตุ้ม ในการทุบแต่ละครั้งให้ถือเป็นจุด ส่งผ่านแรงเป็นเส้นทำมุม 60 ดังนั้นในการทุบในช่วงที่ 1 จะถ่ายแรงลงไปถึงชั้นหินแข็งพอดีโดยยังไม่มี การคาบเกี่ยว

ช่วงที่ 2 ทำการทุบที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของตำแหน่ง ในช่วงที่ 2 ระยะระหว่างจุดทุบเท่ากับความหนาของชั้นทรายเช่นกัน ดังนั้นในการทุบในช่วงที่ 2 จะเกิดการคาบเกี่ยวของแรง ทำให้เกิดการอัดแน่นบริเวณตอนล่างก่อน (ระยะประมาณ $D/2$ จากชั้นหินแข็ง)

ช่วงที่ 3 ทำการทุบที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของสองช่วงแรก จึงมีระยะห่างระหว่างจุดเท่ากับ $\sqrt{(S/2)^2 + (S/2)^2}$ จะทำให้เกิดการคาบเกี่ยวของแรงในระยะถัดมาขึ้นใกล้ผิวบน ทำให้บริเวณผิวบนแน่นขึ้น (ระยะประมาณ $2D/3$ จากชั้นหินแข็ง) ถ้าจำนวนครั้งของการทุบรวมทั้ง 3 ช่วง ให้พลังงานยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ดินแน่นตามที่ต้องการได้ ต้องทำการทุบในช่วงที่ 4 ต่อไป แต่รูปแบบของการทุบจะคงเดิม ไม่มีการทุบที่จุดกึ่งกลางของช่วงอีก แต่จะทำการทุบซ้ำที่ตำแหน่งเดิมของช่วงที่ 1, 2 หรือ 3 ดังนั้นจากรูปแบบการทุบนี้ ถ้าเลือกระยะระหว่างจุดทุบได้เหมาะสมจะทำให้ดินที่ระดับตอนล่างแน่น แต่บริเวณระดับใกล้ ๆ ผิวบนไม่ค่อยแน่น จึงต้องทำการทุบแบบต่อเนื่องในช่วงสุดท้าย เพื่อทำการอัดแน่นบริเวณผิวชั้นบน

2) รูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมแบบเดี่ยว

ส่วนมากรูปแบบนิยมกันมาก มักใช้กับการทุบชั้นทรายที่มีความหนามาก ๆ และมีความแน่นตามธรรมชาติใกล้ชั้นหินแข็งต่ำมาก การทุบจะกระทำเป็นช่วง ๆ เช่นเดียวกัน จำนวนครั้งของการทุบในแต่ละช่วงประมาณ 5-15 ครั้ง แต่ตำแหน่งที่ทำการทุบทุกช่วงอยู่ที่จุดเดิมตลอด

3) รูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมแบบต่อเนื่อง

ส่วนมากใช้สำหรับการปรับปรุงชั้นดินต้น ๆ ไม่เกินความกว้างหรือความยาวของหน้าตัดลูกตุ้ม และมีค่าความแน่นตามธรรมชาติสูงพอสมควร จำนวนครั้งการทุบประมาณ 1-3 ครั้งต่อจุด

3.2.2.3 จำนวนครั้งการทุบในแต่ละช่วง

(Number of Blow per Phase)

ในการอัดแน่นชั้นดินจะทำการทุบเป็นหลาย ๆ ช่วง โดยจำนวนครั้งในการทุบแต่ละช่วงก็จะไม่ค่อยแน่นอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ชนิดของดิน, ความแน่นก่อนการทุบ, ระดับน้ำใต้ดิน และค่าความซึมผ่านได้ เป็นต้นจำนวนครั้งในการทุบแต่ละครั้งควรที่จะเหมาะสม ไม่ควรจะมีมากหรือน้อยจนเกินไป เพราะว่าถ้ามากเกินไปจะเป็นการสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์ ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้ต้องย้ายจุดทุบใหม่บ่อย ๆ ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่าย เมื่อทำการทุบพลังงานในการกระแทกที่ผิวจะส่งผ่านแรงลงไปใน

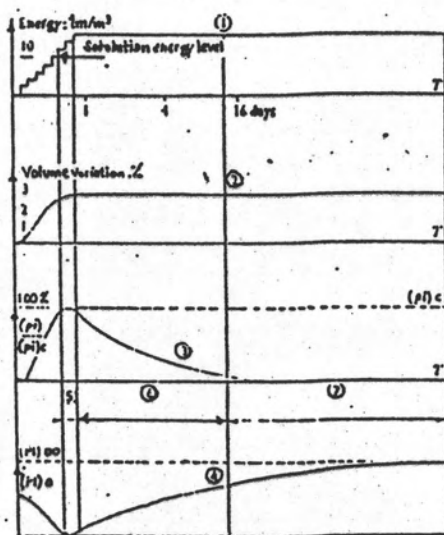
ดินทำให้ดินเกิดเป็นหลุมขึ้นเนื่องจากการทุบ (ซึ่งความลึกของหลุมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการทุบแต่ละครั้ง และค่าความแน่นก่อนการทุบ) และจะเป็นการเพิ่มแรงดันโพรงของน้ำในดินให้สูงขึ้นเมื่อทำการทุบต่อมา ความลึกของหลุมก็จะมากขึ้นและแรงดันโพรงของน้ำก็จะเพิ่มขึ้นตาม จนกระทั่งถึงกรณีใดกรณีหนึ่ง ดังต่อไปนี้ จึงหยุดทำการทุบ

1) ความลึกของหลุมที่ลึกมาก ๆ จนแทบไม่สามารถยกตุ้มขึ้นมาจากหลุมได้ ซึ่งกรณีนี้มักจะเกิดเมื่อทำการทุบผ่านช่วงแรก ๆ ของดินจำพวกดินเหนียว

2) แรงดันโพรงของน้ำที่เพิ่มขึ้นมากจนกระทั่งทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) เท่ากับศูนย์ หรือที่เรียกว่าเกิดสภาพ Plastic Equilibrium สิ่งเกิดจากการยุบตัวหรือความลึกของหลุมจะไม่เพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนครั้งการทุบเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ที่จะทำการทุบไปที่จุดเดิมอีก โดยพลังงานสูงสุดที่ใช้ในการทุบแล้วไม่ทำให้ดินมีความแน่นเพิ่มขึ้น (การเปลี่ยนแปลงปริมาตรไม่เกิดขึ้น) เนื่องจากแรงดันโพรงของน้ำเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับความดันที่ทำให้เกิดสภาพเหลว (Liquifaction Pressure) นี้ เราเรียกว่า พลังงานที่อิ่มตัวในแต่ละช่วง (Saturated Energy) ดังรูปที่ 3.10

ซึ่งค่าพลังงานอิ่มตัวนี้จะไม่เท่ากันในแต่ละช่วงขึ้นอยู่กับค่าความแน่นก่อนการทุบ และค่าความซึมผ่านได้ของดิน โดยค่าพลังงานที่อิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นสัมพัทธ์และค่าความซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น พลังงานอิ่มตัวในทรายจึงมากกว่าในดินเหนียว เนื่องจากแรงดันโพรงที่เพิ่มขึ้นนี้ จะมีผลต่อการบดอัดในกรณีที่เป็นดินละเอียด เช่น ดินเหนียว, ดินตะกอน มากกว่าดินหยาบจำพวกดินทรายหรือกรวดปนทราย ซึ่งมีค่าความซึมผ่านได้สูง เพราะว่าจะต้องรอให้แรงดันของน้ำในโพรงที่เพิ่มขึ้นนั้นกระจายออกรอบข้าง จนแรงดันโพรงของน้ำลดลงจนกลับสู่สภาพปกติเสียก่อนจึงจะค่อยเริ่มทำการบดอัดในช่วงต่อไปได้ ไม่นั้นแรงดันน้ำในโพรงที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นตัวต้านทานการบดอัด ทำให้การบดอัดได้ไม่สมบูรณ์เต็มที่ ช่วงเวลาการรอให้น้ำในโพรงกระจายออกนั้นขึ้นอยู่กับค่าความซึมผ่านได้ของดิน ซึ่งบางทีอาจจะต้องรอถึง 3-4 อาทิตย์ ในการบดอัดแต่ละช่วงของดินเหนียว ดังนั้นการบดอัดดินเหนียวพื้นที่ที่เหมาะสมควรจะเกินกว่า 10,000

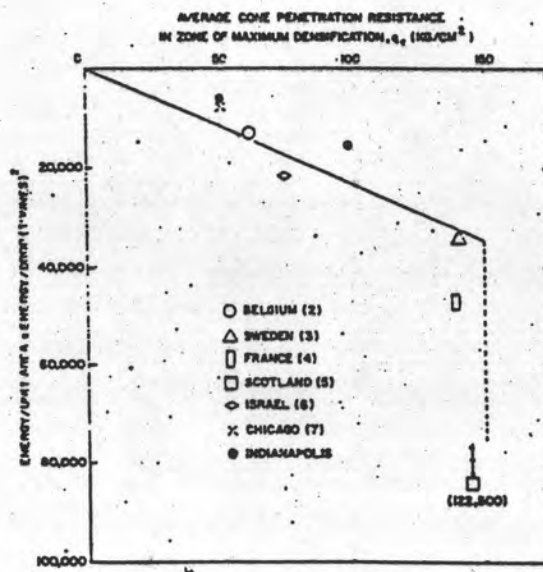
ตารางเมตร เพื่อจะได้เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการรอคอย เพราะว่าจะได้
ทำการบดอัดในบริเวณอื่นแทนได้



รูปที่ 3.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงในมวลดินภายหลังการทุบด้วยพลังงานต่าง ๆ

3.2.2.4 พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่ (Total Energy per unit Area)

การหาค่า พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ที่เหมาะสมในการปรับปรุงในแต่ละแห่งนั้น เป็นการยากที่จะระบุให้แน่ชัดลงไปได้ เพราะว่าพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ความหนาของชั้นทราย, ความแน่นตามธรรมชาติของดินก่อนการอัดแน่น, ความแน่นที่ต้องการ, ชนิดของดิน เป็นต้น ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยถึงพลังงานในการทุบในแหล่งต่าง ๆ พบว่า ผลคูณของพลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่กับพลังงานที่ใช้ในการทุบแต่ละครั้ง จะแปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความต้านทานในการตอกทดสอบ โดยวิธี Cone Penetration Test (q_c) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และพบว่าการทุบจะให้ค่า q_c สูงสุดที่ประมาณ 150 กก./ชม.² หรืออาจจะมากกว่า 150 กก./ชม.² หรืออาจจะมากกว่า 150 กก./ชม.² เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แม้ว่าจะใส่พลังงานเพิ่มขึ้นอีกก็จะไม่ทำให้ค่า q_c เพิ่มขึ้นอีกมากนัก



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_c กับ $(E/A) \cdot E$ (Leonard, cutter & Holtz, 1980)

Michel P. Gambine (1987) หาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบตอพื้นทีกับค่า Cone Penetration Resistance (q_c) เขียนเป็นสมการต่าง ๆ ในการประมาณค่าเบื้องต้น ดังต่อไปนี้คือ

$$q_c = 225 (\log U - 1.85)$$

โดย q_c = Cone Penetration Resistance (กก./ซม.²)

$$U = \text{พลังงานทั้งหมดในการทุบตอหน่วยพื้นที่ (ตัน.เมตร/เมตร}^2) = E/A$$

แต่ในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดสอบโดยวิธี Cone Penetration Test แต่ทำการทดสอบอีกวิธีหนึ่งคือ การตอกแบบมาตรฐานจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าของ q_c เป็นค่า SPT-N Value เสียก่อนจากความสัมพันธ์ของ Schermann (1970)

Soil type	$n=q_c/N$ (Average Value)
Silts, sandy silts and slightly cohesive silt-sand mixtures	2.0
Clean, fine to medium sands and slightly silty sands	3.5
Coarse sands and sands with little gravel	5.5
Sandy gravels and gravel	9.0

ตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT-N Value กับ q_c
(Schermann, 1970)

ดังนั้นในการหาค่าพลังงานที่ใช้ทุบตอหน่วยพื้นที่ในแต่ละโซนก่อนอื่นควรพิจารณาชนิดของดิน จากการเจาะเก็บตัวอย่าง ก่อนการอัดแน่นแล้วนำไปประมาณค่า q_c ที่ต้องการ (จากตาราง 3.2) เมื่อทราบค่า q_c ที่ต้องการแล้วก็สามารถคำนวณค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่ได้

จากตั้งที่กล่าวมาแล้วว่าการหาค่าพลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่ยังไม่สามารถระบุเป็นสูตรที่แน่นอนได้และยังขึ้นอยู่กับความแน่นก่อนการบดอัด, ความหนาของชั้นทรายอีก นอกจากค่าความแน่นที่ต้องการ และชนิดของดินดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2.3 นอกจากนี้ในกรณีที่ทำการตอกทดสอบโดยวิธีการตอกแบบมาตรฐานแทนที่จะทดสอบโดยวิธี Cone Penetration Test ทำให้ต้องทำการแปลงค่า qc เป็นค่า N ตามชนิดของดิน ซึ่งก็อาจจะทำให้ค่าพลังงานในการทุบตอพื้นที่ยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นพลังงานทั้งหมดในการทุบตอหน่วยพื้นที่ในแต่ละโซนอาจจะต้องนำมาปรับแก้ไข (Adjust) หรือตรวจสอบและควบคุมโดยการสังเกตจากการทำงานจริงในสนามควบคุมกันไปด้วย การตรวจสอบทำได้โดยการวัดปริมาตรของหลุมที่เกิดจากการทุบ นำไปหาค่าการยุบตัวของพื้นที่ และนำมาหาค่าความหนาแน่นที่ต้องการจากสมการที่ 3.4 และ 3.5

เมื่อกำหนดให้หลุมที่เกิดจากการทุบเป็นกรวยตัดทอน
ปริมาตรทรายที่ใช้เติม (V) = $\frac{1}{12} \pi d (b^2 + ab + a^2) \dots \dots \dots (3.4)$

โดย d = ความลึกของหลุม

b = ความกว้างของปากหลุม

a = ความกว้างของก้นหลุม = ความกว้างของฐานลูกตุ้ม

$$-\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta rd}{rd}$$

โดย Δh = ค่าการยุบตัวเฉลี่ยต่อพื้นที่

h = ความหนาของชั้นทราย

Δrd = ค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลง

rd = ค่าความหนาแน่นก่อนการทุบ

ดังนั้นในกรณีที่ความแน่นตามธรรมชาติของดินก่อนการทุบหรือความหนาของชั้นทรายไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งโซน จำนวนครั้งของการทุบในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ซึ่งจำนวนครั้งทั้งหมดในการทุบตอหนึ่งจุด สังเกตได้จากค่าของการยุบตัวของพื้นที่ที่คาดการณ์ไว้ว่าจะทำให้ดินมีความแน่นตามที่ต้องการ แต่พลังงานรวมทั้งหมดไม่ควรจะต่ำกว่าพลังงานที่คำนวณจากสมการที่ 3.3 หรือใน

กรณีที่ทำกรทุบเป็นช่วงที่มีค่าจำนวนครั้งในการทุบแต่ละช่วงที่เท่ากัน พลังงานทั้งหมดในการทุบต่อพื้นที่ควรจะต่องมากกว่า พลังงานที่คำนวณจากจำนวนครั้งที่ทุบจนได้ค่าการยุบตัวต่อพื้นที่ที่ทำให้ความแน่นได้ตามที่ต้องการ

3.2.3 เครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงชั้น

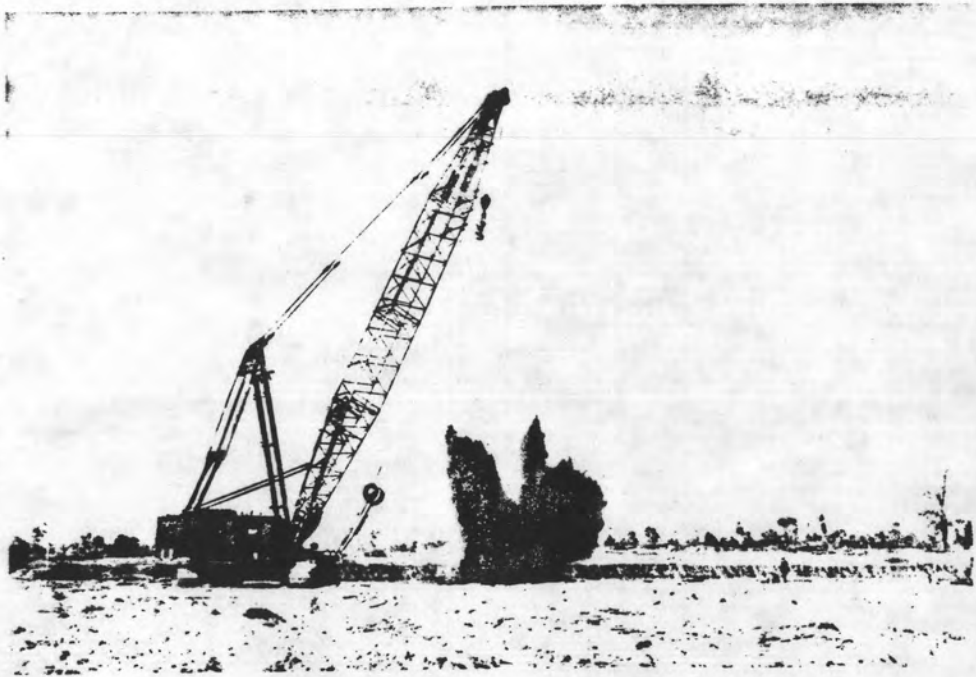
ทราสลวมของเขื่อนทับเสลา

- รถปั้นจั่น (Crawler Crane) ขนาด LS418 น้ำหนัก 100 ตัน ซึ่งมีเครนยาว 30-35 เมตร สำหรับยกลูกตุ้มหนัก 15 ตัน จำนวน 1 คัน
- รถปั้นจั่น (Crawler Crane) ขนาด LS528S น้ำหนัก 150 ตัน ซึ่งมีเครนยาว 30-35 เมตร สำหรับยกลูกตุ้มหนัก 30 ตัน จำนวน 1 คัน (รูปที่ 3.12 ก.)
- ลูกตุ้ม (Pounder) หนัก 15 ตัน ขนาดหน้าตัด 3 x 3 เมตร² จำนวน 2 ลูก
- ลูกตุ้ม (Pounder) หนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3 x 3 เมตร² จำนวน 2 ลูก (รูปที่ 3.12 ข.)
- เครื่องเชื่อม และเครื่องตัดเหล็ก จำนวน 1 ชุด
- เครื่องมือทดสอบความแน่นของดินโดยวิธีการตอกแบบมาตรฐาน จำนวน 6-8 ชุด
- กล้องระดับพร้อมสตาร์ฟ จำนวน 2 ชุด
- เครื่องมือวัดแรงดันโพรงของน้ำ จำนวน 2 ชุด

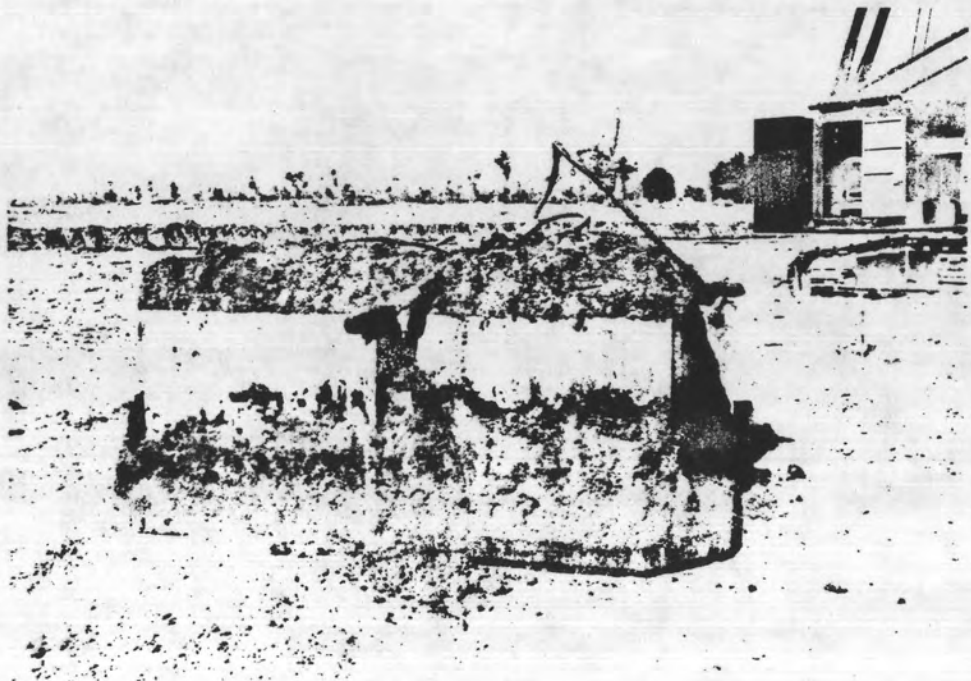
3.3 ขั้นตอนต่าง ๆ ในการปรับปรุงชั้นดินทราสลวมของเขื่อนทับเสลา

3.3.1 แบ่งพื้นที่ เนื่องจากพื้นที่ที่จะทำการปรับปรุงมีบริเวณกว้างมาก จึงต้องทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นโซนย่อย ๆ จำนวน 16 โซน (ดังแสดงในรูปที่ 3.13) เมื่อแบ่งพื้นที่เสร็จจะต้องทำการขุดลอกหน้าดินออกจนถึงชั้นหินหรือชั้นที่ปราศจากหญ้า รากไม้

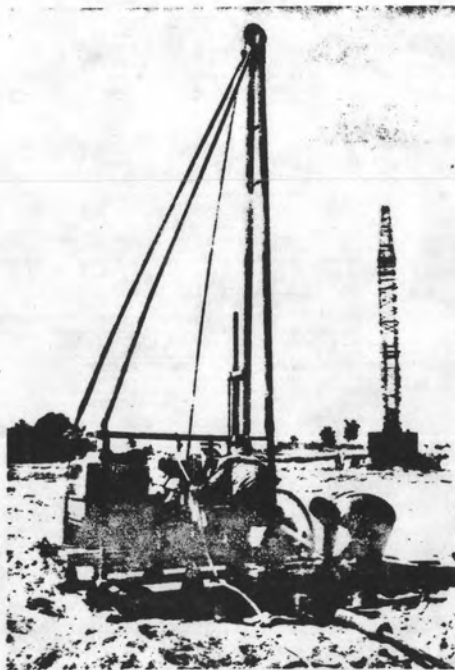
3.3.2 ลำดับการดำเนินการ ในการปรับปรุงจะเลือกทำการปรับปรุงบริเวณต้นน้ำก่อน เพื่อจะได้ทำกำแพงกันน้ำ (Impervious Cut-Off Wall) ได้โดยไม่ต้องเสียเวลา แล้วจึงจะมาทำการปรับปรุงบริเวณด้านท้ายน้ำและตอนกลาง ในการปรับปรุงบริเวณด้านเหนือน้ำจะใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ยกลูกตุ้มทุบบริเวณ 1U ก่อนจึงมาทำการทุบบริเวณโซน 2U และ AD, 3U ตามลำดับ และใช้รถปั้นจั่นขนาดเล็กยกลูกตุ้มทำการทุบบริเวณโซน 5U, 5C, 5D, 4U, 4C, 4D ต่อจากนั้นก็จะมาเริ่มทำการปรับปรุงในด้านท้ายน้ำและตอนกลางบริเวณโซน 3C, 3D, 1C, 1D, 2C, 2D ตามลำดับ



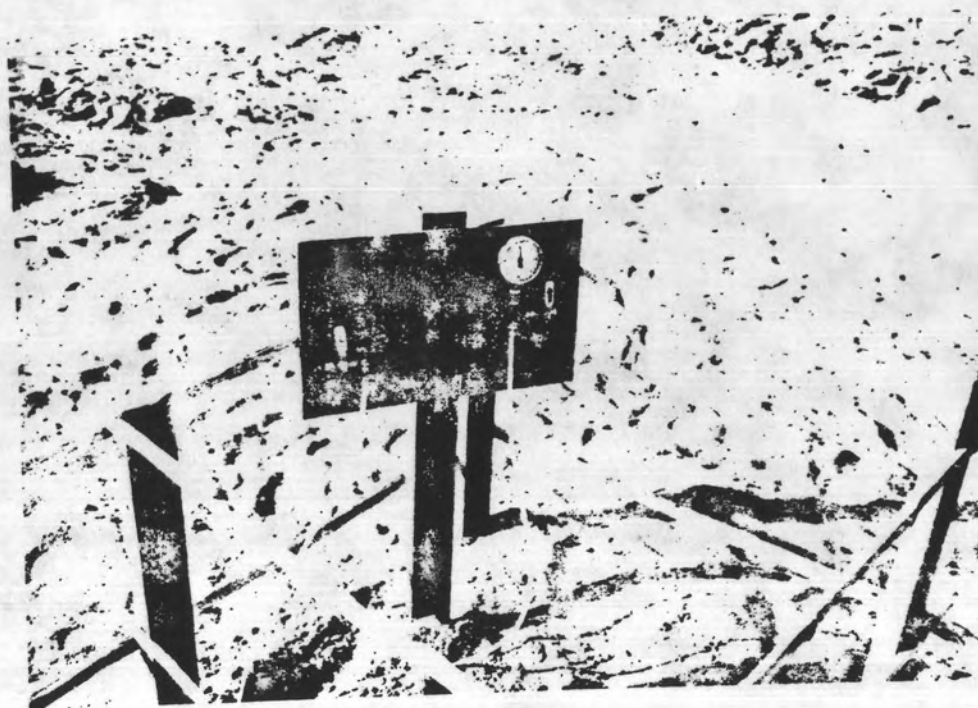
รูปที่ 3.12 (ก) รถปั้นจั่นขนาด LS 528S



รูปที่ 3.12 (ข) ลูกตุ้มหนัก 30 ตัน



รูปที่ 3.12 (ค) เครื่องมือทดสอบความแน่นของดินโดยวิธีการตอกแบบมาตรฐาน



รูปที่ 3.12 (ง) เครื่องมือวัดแรงดันโพรงของน้ำ

3.3.3 การเจาะและตอกทดสอบก่อนการอัดแน่น ก่อนที่จะทำการทาบ จะต้องทำการตอกทดสอบหาค่า N ที่บริเวณเสียก่อนเพื่อหาความหนาของชั้นทรายและสภาพความแน่นตามธรรมชาติ โดยจะทำการตอกทดสอบในอัตรา 1 จุด ต่อพื้นที่ 200 ตารางเมตร เป็นจำนวน 593 จุด แต่ละจุดให้ทดสอบทุกระยะความลึก 1 เมตร จากผิวนจนถึงชั้นหิน

3.3.4 กรรมวิธีการปรับปรุง ก่อนที่จะทำการปรับปรุงควรจะต้องทราบถึง

1) รายละเอียดเครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้
 2) ข้อมูลในการปฏิบัติงาน โดยจัดทำแปลงทดสอบขึ้นในบริเวณที่จะทำการปรับปรุง ถ้าหากว่าผลในแปลงทดสอบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอหรือต้องใช้เวลาในการปรับปรุงนานเกินความเหมาะสม จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงวิธีใหม่ สำหรับเชื่อมทับเสาเลือกบริเวณที่จะจัดทำแปลงทดสอบไว้ 2 บริเวณ คือ แปลงทดสอบที่ 1 อยู่ในโซนที่ 5 ขนาดพื้นที่ 40 x 40 ตารางเมตร แปลงทดสอบที่ 2 อยู่ในโซนที่ 2 ขนาดพื้นที่ 40 x 40 ตารางเมตร

3) รายละเอียดในการดำเนินการแต่ละโซน ซึ่งได้แก่ ระยะระหว่างจุดตอก ตำแหน่งตอก น้ำหนักลูกตุ้ม ความสูงของการปล่อย จำนวนครั้งการทาบ เป็นต้น

3.3.5 การตอกทดสอบหลังการอัดแน่น เมื่อทำการทาบเสร็จจะต้องทำการตอกทดสอบหาค่า N เช่นเดียวกับการดำเนินการก่อนการบดอัดโดยทำการตอกทดสอบ 1 จุด ต่อ พื้นที่ 200 ตารางเมตร ซึ่งจะต้องทำการตอกจำนวน 553 จุด ตลอดทั่วบริเวณเพื่อดูว่าบริเวณดังกล่าวมีความแน่นตามเกณฑ์กำหนดหรือไม่ หากผลการอัดแน่นไม่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนดตามหัวข้อ 2.3 จะต้องทำการบดอัดใหม่จนกว่าจะได้ความแน่นตามที่กำหนด

3.4 การทดสอบสภาพความแน่นก่อนการบดอัด

3.4.1 จำนวนหลุมตอกทดสอบบริเวณโซนต่าง ๆ

โดยทำการเจาะและตอกทดสอบจำนวน 1 หลุมต่อพื้นที่ 200 ตารางเมตร โดยมีรูปแบบการเจาะและตอกทดสอบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Grid) ขนาด 14 x 14 เมตร² ซึ่งจำนวนการเจาะและตอกทดสอบในโซนต่าง ๆ เป็นดังต่อไปนี้ คือ

โซนที่ 1U และแปลงทดสอบที่ 2	จำนวน	44	จุด
โซนที่ 1C	จำนวน	51	จุด
โซนที่ 1D	จำนวน	20	จุด
โซนที่ 2U	จำนวน	75	จุด
โซนที่ 2C	จำนวน	41	จุด
โซนที่ 2D	จำนวน	10	จุด
โซนที่ 3U	จำนวน	80	จุด
โซนที่ 3C	จำนวน	60	จุด
โซนที่ 3D	จำนวน	20	จุด
โซนที่ 4U	จำนวน	48	จุด
โซนที่ 4C	จำนวน	36	จุด
โซนที่ 4D	จำนวน	12	จุด
โซนที่ 5U และแปลงทดสอบที่ 1	จำนวน	39	จุด
โซนที่ 5C	จำนวน	30	จุด
โซนที่ 5D	จำนวน	10	จุด
โซนที่ AD	จำนวน	17	จุด
รวมทั้งสิ้น	จำนวน	593	จุด

3.4.2 ผลการตอกทดสอบความแน่นตามธรรมชาติก่อนการบดอัด

จากผลของการเจาะเก็บตัวอย่างและตอกทดสอบค่าความแน่นก่อนการบดอัดตลอดทั่วบริเวณ (ดังแสดงในภาคผนวก ก.) นำมาคำนวณหาค่าความแน่นเฉลี่ยก่อนการบดอัดของชั้นทราย จากระดับผิวดินจนถึงระดับชั้นหินบริเวณโซนต่าง ๆ ได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ โดยสมการของ Fardis and Veneziano ได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 พอสรุปได้ดังนี้

โซน 1U สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพหลวม (Loose) ถึงแน่นปานกลาง (Medium) ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 36% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 59% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 59% ความหนาของชั้นทรายค่อนข้างสม่ำเสมออยู่ระหว่าง 10-11 เมตร บริเวณด้านที่ติดกับโซน 2U แล้วขึ้นหินแข็งค่อย ๆ ลาดเอียงสูงขึ้นมาทางบริเวณด้านที่ติดกับโซน AD ที่ประมาณระยะ กม. 2 + 480 ถึงระยะ กม. 2+500 ทำให้ความหนาของชั้นทรายลดลงเหลือ 8-9 เมตร (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 1U เท่ากับ 10.25 เมตร

โซน 1C/D มีสภาพคล้ายคลึงกับโซน 1U สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพหลวมถึงแน่นปานกลาง ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 37%, ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 61% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 50% ความหนาของชั้นทรายค่อนข้างสม่ำเสมออยู่ระหว่าง 10-11 เมตร บริเวณด้านที่ติดกับโซน 2 C/D แล้วขึ้นหินแข็งค่อย ๆ ลาดเอียงสูงขึ้นมาทางบริเวณด้านที่ติดกับโซน AD ที่ประมาณระยะ กม. 2+480 ถึงระยะ กม. 2+500 ทำให้ความหนาของชั้นทรายลดลงเหลือ 5-7 เมตร (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 1 C/D เท่ากับ 9.98 เมตร

โซน 2U สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพหลวมถึงแน่นปานกลาง ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 39% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 66% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 54% ความหนาของชั้นทรายสม่ำเสมอตลอดทั่วบริเวณ ระหว่าง 10-11.5 เมตร (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 2U เท่ากับ 10.81 เมตร

โซน 2C/D มีสภาพคล้ายคลึงกับโซน 2U สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพหลวมถึงแน่นปานกลาง ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 39% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 62% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 52% ความหนาของชั้นทรายสม่ำเสมอตลอดทั่วบริเวณระหว่าง 9.5-11 เมตร (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 2C/D เท่ากับ 10.38 เมตร

โซน 3U สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพหลวมถึงแน่นปานกลาง ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 36%, ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 63% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 51% ความหนาของชั้นทรายด้านที่ติดกับโซน 2U ที่ประมาณระยะ กม. 2+280 ถึงระยะ กม. 2+300 โดยมีความหนาระหว่าง 11-12 เมตร แล้วขึ้นหินแข็งค่อย ๆ ลาดเอียงสูงขึ้นมาทางบริเวณด้านที่ติดกับโซน 4U ทำให้ความหนาของชั้นทรายนลดลงเหลือ 5-7 เมตร ที่ประมาณระยะ กม. 2+160 ถึงระยะ กม. 2+180 (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 3U เท่ากับ 9.46 เมตร

โซน 3C/D มีสภาพคล้ายคลึงกับโซน 3U สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพหลวมถึงแน่นปานกลาง ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 38% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 63% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 52% ความหนาของชั้นทรายไม่สม่ำเสมอตลอดทั่วบริเวณ กล่าวคือ ชั้นทรายจะมีความหนามากที่สุดที่บริเวณด้านที่ติดกับโซน 2C/D ที่ประมาณระยะ กม. 2+250 ถึงระยะ กม. 2+300 โดยมีความหนาระหว่าง 10-11 เมตร แล้วขึ้นหินแข็งค่อย ๆ ลาดเอียงสูงขึ้นมาทางบริเวณด้านที่ติดกับโซน 4C/D ทำให้ความหนาของชั้นทรายนลดลงเหลือ 7-10 เมตร ที่ประมาณระยะ กม. 2+200 ถึง ระยะ กม. 2+250 และลดลงเหลือ 4-7 เมตร ที่ประมาณระยะ กม. 2+160 ถึง ระยะ กม. 2+200 (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 3C/D เท่ากับ 8.68 เมตร

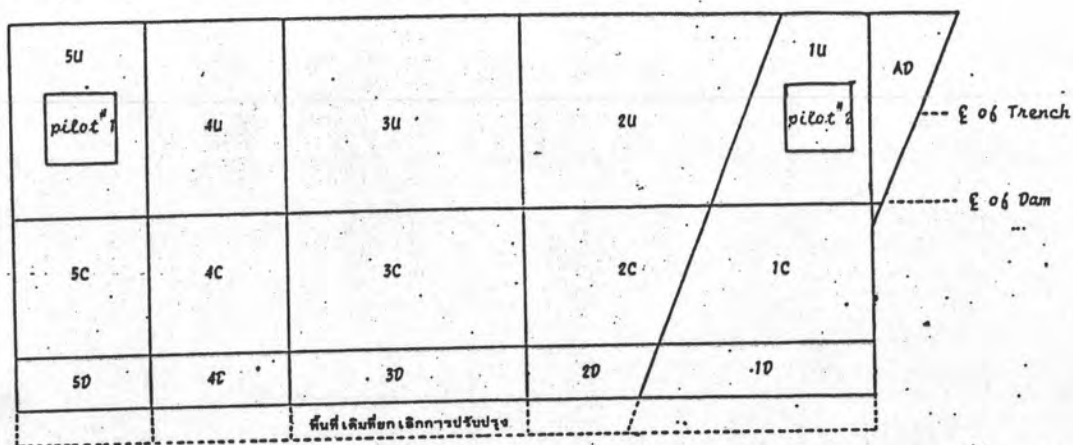
โซน 4U สภาพความแน่นของชั้นทรายมีสภาพไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งโซน เหมือนกับโซนที่ 1, 2 และ 3 กล่าวคือ บริเวณด้านที่ติดกับโซน 5U ที่ประมาณระยะ กม. 2+080 ถึงระยะ กม. 2+140 ชั้นทรายมีสภาพแน่นปานกลางถึงแน่นมาก (Very Dense) ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 69% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 100% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 86% ส่วนบริเวณด้านที่ติดกับโซน 3U ที่ประมาณระยะ กม. 2+140 ถึงระยะ กม. 2+160 ชั้นทรายมีสภาพแน่นปานกลางถึงแน่น (Dense) ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 59% ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 91% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 77% ความหนาของชั้นทรายก็ไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน กล่าวคือ ชั้นทรายจะมีความหนามากที่สุดบริเวณด้านที่ติดกับโซน 3U ที่ประมาณระยะ กม. 2+150 ถึงระยะ กม. 2+160 โดยมีความหนา 6 เมตร แล้วขึ้นหินแข็งค่อย ๆ ลาดเอียงสูงขึ้นมาทางบริเวณด้านที่ติดกับโซน 5U ทำให้ความหนาของชั้นทรายน้อยลงเหลือ 2-3 เมตร ที่ประมาณระยะ กม. 2+080 ถึงระยะ กม. 2+100 (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 4U เท่ากับ 4.33 เมตร

โซน 4C/D สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพแน่นถึงแน่นมาก ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 60%, ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 100% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 84% ความหนาของชั้นทรายค่อนข้างสม่ำเสมอระหว่าง 2-4 เมตร (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 4C/D เท่ากับ 3.37 เมตร

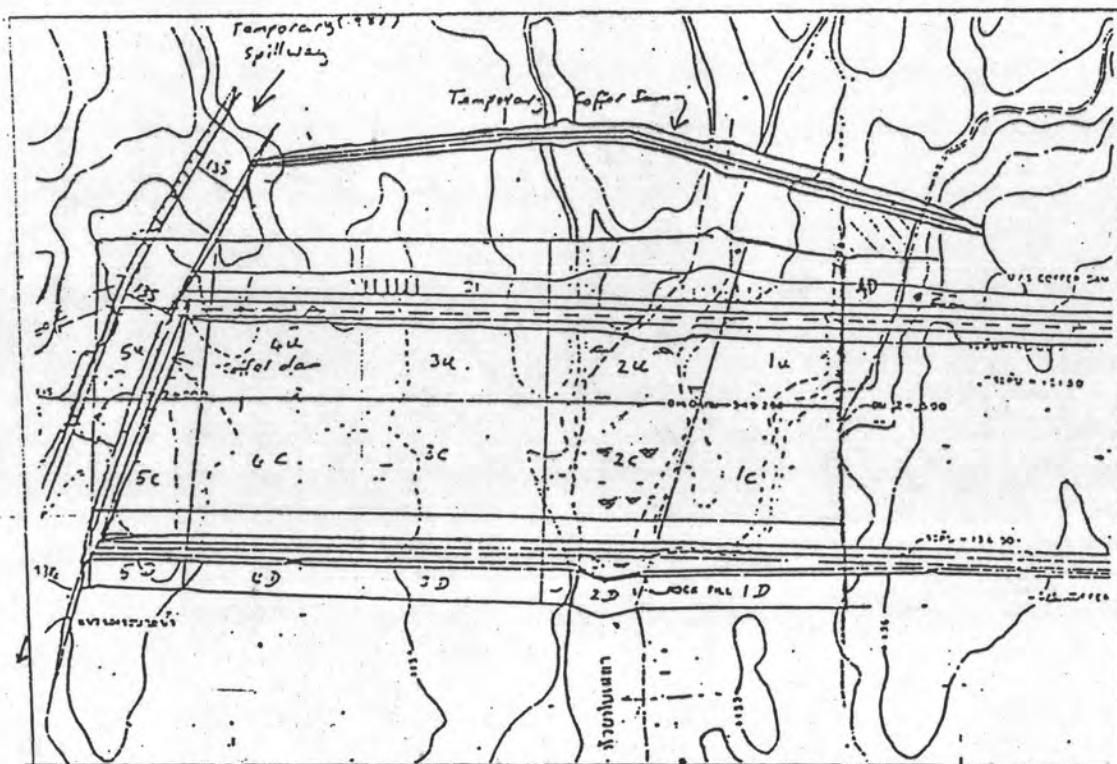
โซน 5U สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายไม่สม่ำเสมอที่ระดับความลึกต่าง ๆ กล่าวคือ มีสภาพแน่นปานกลางถึงแน่นมากที่ระดับความลึกไม่เกิน 1.00 เมตร จากผิวดิน ความหนาของชั้นทรายค่อนข้างสม่ำเสมอระหว่าง 2-4 เมตร (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 5U เท่ากับ 2.90 เมตร

โซน 5C/D สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพแน่นถึงแน่นมาก ที่ทุกระดับความลึกความหนาของชั้นทรายค่อนข้างสม่ำเสมอระหว่าง 1-3 เมตร (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน 5C/D เท่ากับ 2.34 เมตร

โซน AD สภาพความแน่นตามธรรมชาติของชั้นทรายมีสภาพหลวมถึงแน่นปานกลาง ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดเท่ากับ 33%, ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 64% และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 52% ความหนาของชั้นทรายได้สม่ำเสมอตลอดทั่วบริเวณ กล่าวคือ บริเวณด้านบนของเส้นผ่าศูนย์กลางร่อง (Center Line of Trench) มีความหนาประมาณ 7 เมตร แล้วชั้นหินแข็งค่อย ๆ ลาดเอียงสูงขึ้นมาทางบริเวณเส้นผ่าศูนย์กลางของเขื่อน (Center Line of Dam) ทำให้ความหนาของชั้นทรายน้อยลงเหลือประมาณ 4-5 เมตร (ดังรูปที่ 3.18) ความหนาเฉลี่ยของชั้นทรายโซน AD เท่ากับ 6.05 เมตร



รูปที่ 3.13 แสดงการแบ่งโซนบริเวณที่ทำการปรับปรุงฐานราก



รูปที่ 3.14 แพลนเขื่อนบริเวณที่ทำการปรับปรุงฐานราก

ความลึก	โซน	AD	1U	1C/D	2U	2C/D	3U	3C/D (R)
๑.๐๐		๕.๘๒๓.๘๕	๕.๘๒๓.๑๐	๕.๘๒๓.๐๐	๕.๑๘๓.๑๓	๓.๕๓๓.๖๖	๘.๒๕๓.๕๐	๗.๕๕๓.๐๓
๒.๐๐		๖.๒๕๓.๕๕	๓.๕๕๓.๘๒	๕.๕๒๓.๐๐	๕.๗๖๓.๓๘	๕.๗๕๓.๓๗	๗.๓๕๓.๑๕	๗.๒๕๓.๒๕
๓.๐๐		๗.๒๕๓.๗๕	๕.๑๕๓.๘๕	๕.๕๒๓.๑๕	๖.๒๒๓.๕๓	๕.๕๕๓.๒๖	๗.๖๒๓.๘๕	๗.๕๖๓.๕๗
๔.๐๐		๑๑.๕๗๓.๗๕	๕.๕๕๓.๕๒	๗.๐๓๓.๒๐	๘.๒๕๓.๕๕	๗.๕๑๓.๑๕	๘.๑๖๓.๕๖	๘.๕๒๓.๒๐
๕.๐๐		๑๒.๑๐๓.๕๒	๖.๕๕๓.๓๕	๗.๕๖๓.๕๖	๙.๒๒๓.๒๒	๙.๗๕๓.๗๗	๘.๓๕๓.๖๕	๘.๕๕๓.๕๐
๖.๐๐		๑๓.๖๒๓.๕๗	๗.๕๓๓.๖๕	๙.๕๑๓.๑๐	๑๐.๕๓๓.๕๖	๑๐.๑๕๓.๒๑	๙.๐๗๓.๒๙	๑๑.๑๕๓.๕๓
๗.๐๐	๕๐		๙.๓๓๖.๐๗	๑๒.๒๑๓.๘๕	๑๓.๘๗๖.๕๓	๑๕.๕๑๖.๗๑	๑๑.๑๐๖.๐๐	๑๓.๓๓๖.๘๘
๘.๐๐			๑๕.๓๕๓.๕๕	๑๕.๕๗๖.๖๓	๑๗.๒๐๓.๕๖	๑๗.๒๕๖.๕๑	๑๓.๕๕๓.๕๗	๑๕.๑๗๖.๒๕
๙.๐๐			๑๙.๕๐๓.๐๑	๑๗.๒๕๖.๘๐	๑๘.๖๗๖.๘๐	๑๙.๓๐๖.๘๒	๑๗.๐๖๖.๘๗	๑๙.๒๑๖.๗๕
๑๐.๐๐			๒๕.๗๕๑๑.๕๓	๒๐.๐๒๖.๕๑	๒๗.๐๒๖.๓๕	๒๕.๐๐๖.๗๕	๕๐	๕๐
๑๑.๐๐			๕๐	๕๐	๕๐	๕๐		
Do		๖.๐๕๓.๑๘	๑๐.๒๕๓.๐๕	๙.๕๘๖.๕๕	๑๐.๘๖๖.๖๑	๑๐.๓๘๖.๗๕	๙.๗๕๓.๗๐	๙.๕๗๖.๑๓

ตารางที่ 3.3 (ก) แสดงค่า SPT-N ก่อนการบดอัดโซน 1, 2, 3U, 3C/D (R) และ AD

โซน ความลึก	3C/D (L)	4U (3P)	4U (4P)	4C/D (L)	4C/D (R)	5U	5C/D
๑.๐๐	๑๒.๒๕๓.๕๓	๑๕.๕๒๓.๕๒	๑๕.๑๗๗.๕๕	๑๑.๘๘๕.๓๖	๕.๕๘๓.๕๗	๑๘.๑๐๓.๘๓	๒๗.๖๕๓.๕๕
๒.๐๐	๕.๘๘๓.๑๕	๒๒.๕๒๓.๒๕	๑๖.๕๕๓.๑๗	๑๕.๗๕๓.๕๕	๑๕.๐๕๓.๕๕	๕๑.๕๒๓.๑๓	๕๑.๕๒๓.๐๘
๓.๐๐	๑๐.๕๒๓.๖๓	๒๘.๖๕๓.๓๕	๑๖.๕๒๓.๕๖	๕๐	๒๘.๕๕๓.๑๕	๕๐	
๔.๐๐	๑๒.๐๕๓.๑๘	๕๐	๒๒.๐๕๓.๘๗		๕๐		
๕.๐๐	๑๕.๕๐๓.๒๘		๓๖.๕๒๓.๕๕				
๖.๐๐	๕๐		๕๐				
Do	๕.๗๖๓.๕๕	๓.๕๒๓.๘๓	๕.๒๕๓.๗๕	๒.๘๒๓.๖๖	๓.๕๒๓.๕๗	๒.๕๐๓.๗๘	๒.๕๒๓.๘๑

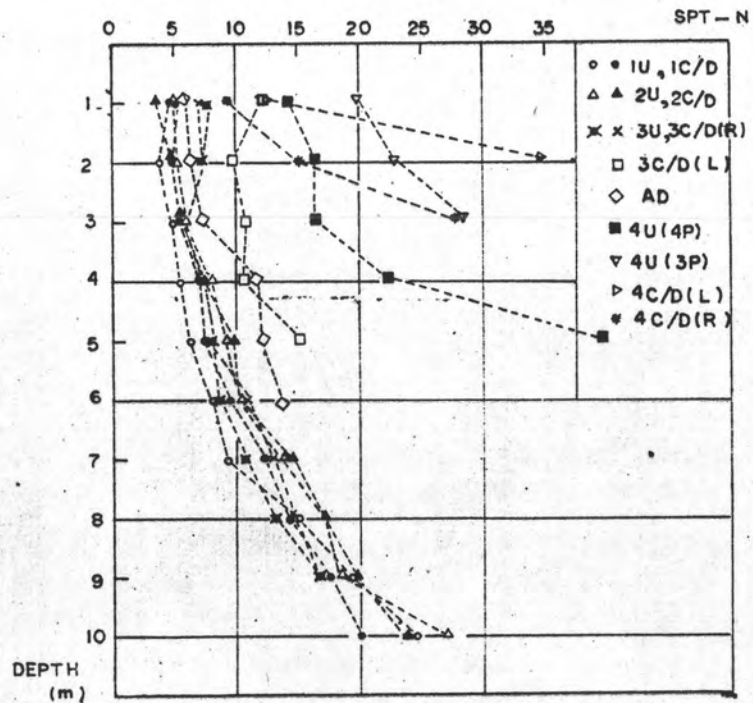
ตารางที่ 3.3 (ข) แสดงค่า SPT-N ก่อนการรบกวนโซน 3C/D (L), 4 และ 5

ความลึก (ม.)	AD			1U			1C/D			2U			2C/D			3U			3C/D (R)			
	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	
๑.๐๐	๒๘	๔๗	๖๐	๓๕	๔๕	๕๒	๓๓	๔๓	๕๐	๔๔	๕๕	๒๖	๓๖	๔๕	๔๕	๕๕	๔๕	๕๕	๔๙	๕๓	๖๒	
๒.๐๐	๓๐	๔๕	๕๖	๒๗	๓๖	๔๓	๓๑	๔๐	๔๗	๕๕	๕๒	๒๘	๓๕	๔๔	๕๔	๕๔	๕๔	๕๔	๓๖	๔๔	๕๔	
๓.๐๐	๒๑	๔๖	๖๑	๓๑	๓๕	๔๕	๓๒	๔๐	๔๗	๕๕	๕๒	๓๑	๓๒	๔๑	๔๘	๕๘	๕๘	๕๘	๓๖	๔๘	๕๗	
๔.๐๐	๓๓	๕๖	๗๒	๓๐	๓๕	๔๗	๒๘	๔๕	๕๕	๕๕	๖๐	๓๐	๔๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๓๕	๔๘	๕๕	
๕.๐๐	๔๔	๕๖	๖๓	๓๓	๔๑	๕๔	๓๓	๔๕	๕๕	๕๕	๕๕	๓๖	๔๖	๕๖	๕๖	๕๖	๕๖	๕๖	๓๗	๕๗	๕๖	
๖.๐๐	๕๑	๖๐	๗๕	๓๓	๔๕	๕๕	๓๓	๔๘	๖๐	๖๐	๖๒	๓๕	๔๕	๕๖	๕๖	๕๖	๕๖	๕๖	๓๐	๕๓	๖๔	
๗.๐๐				๒๕	๔๗	๖๐	๓๕	๕๕	๖๖	๖๖	๖๕	๓๕	๔๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๔๐	๕๖	๖๕	
๘.๐๐				๓๗	๕๕	๗๒	๔๕	๕๕	๗๐	๗๐	๗๕	๔๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๖๐	๗๓
๙.๐๐				๕๑	๖๖	๗๘	๕๑	๖๖	๘๑	๘๑	๘๗	๕๑	๖๖	๗๘	๗๘	๗๘	๗๘	๗๘	๕๕	๕๕	๖๖	๘๑
๑๐.๐๐				๕๕	๗๓	๘๘	๕๕	๖๖	๗๑	๗๑	๗๖	๖๕	๗๖	๘๕	๘๕	๘๕	๘๕	๘๕				
\bar{D}_h	๓๓	๕๒	๖๕	๓๖	๔๕	๕๕	๓๗	๔๐	๕๑	๕๑	๖๖	๓๕	๔๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๕๕	๓๘	๕๓	๖๕	
\bar{N}	๕	๑๑	๑๗	๖	๑๑	๑๗	๖	๑๑	๑๗	๑๗	๑๗	๗	๑๓	๑๗	๑๗	๑๗	๑๗	๑๗	๖	๑๓	๑๗	

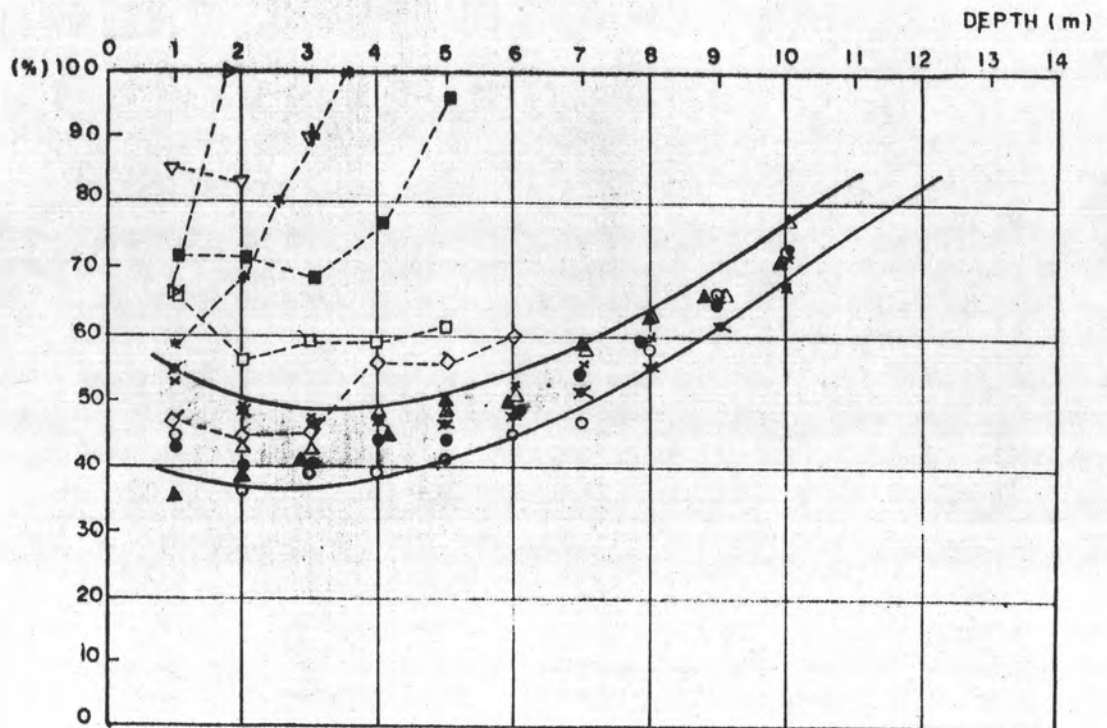
ตารางที่ 3.4 (ก) แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามธรรมชาติก่อนการบดอัด
โซนที่ 1, 2, 3U, 3C/D (R) และ AD

ความลึก (ม.)	3C/D (L)			4U (3P)			4U (4P)			4C/D (L)			4C/D (R)			5U			5C/D		
	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max	Min	\bar{X}	Max
๑.๐๐	๕๗	๖๗	๗๖	๗๐	๘๕	๙๗	๕๔	๗๒	๘๘	๕๕	๖๖	๗๔	๕๐	๕๔	๖๘	๕๔	๕๙	๙๐๐	๗๐	๙๐๐	๙๒๒
๒.๐๐	๕๖	๕๖	๖๔	๖๔	๘๓	๙๖	๕๗	๗๒	๘๕	๕๐	๙๐๓	๙๒๑	๖๐	๖๔	๗๖	๕๖	๙๑๓	๙๒๘	๕๕	๙๑๒	๙๒๗
๓.๐๐	๕๘	๕๕	๖๗	๖๘	๘๐	๙๐๗	๕๓	๖๕	๘๑				๖๐	๕๐	๑๑๑						
๔.๐๐	๓๖	๕๕	๗๕				๖๐	๗๗	๙๐												
๕.๐๐	๕๐	๖๑	๗๖				๗๖	๙๑๓													
๖.๐๐																					
\bar{D}_r	๕๕	๖๐	๗๒	๖๕	๘๖	๑๐๐	๕๔	๗๗	๙๑	๖๕	๘๕	๙๐๐	๕๗	๗๓	๘๕	๗๐	๙๐๗	๙๑๕	๘๓	๙๐๖	๙๒๕
\bar{N}	๘	๑๕	๒๐	๑๗	๒๖	๓๖	๑๕	๒๓	๓๓	๑๓	๒๓	๓๓	๑๑	๑๕	๒๖	๑๖	๓๑	๔๓	๒๒	๓๗	๕๕

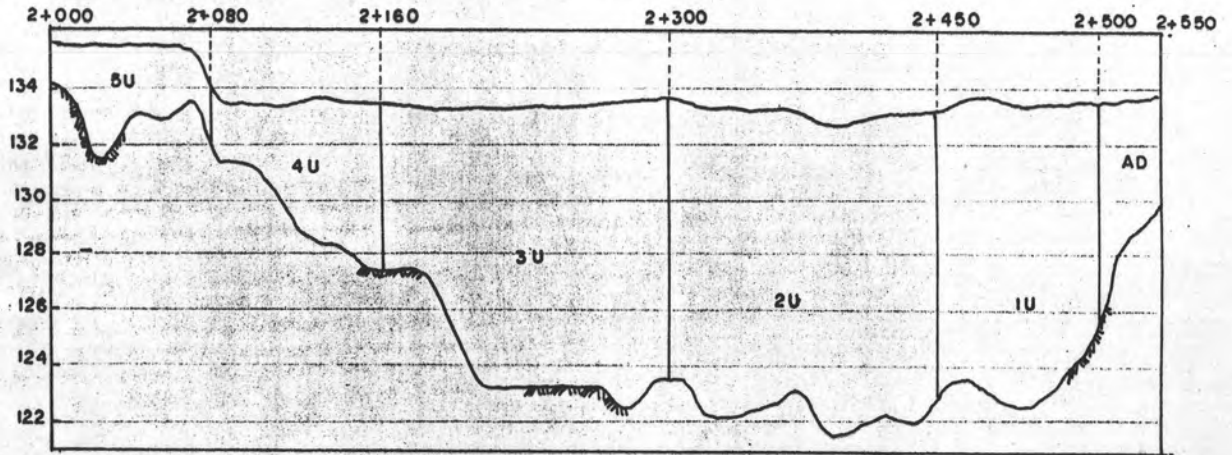
ตารางที่ 3.4 (ข) แสดงค่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ตามธรรมชาติก่อนการบดอัด
3C/D (L), 4 และ 5



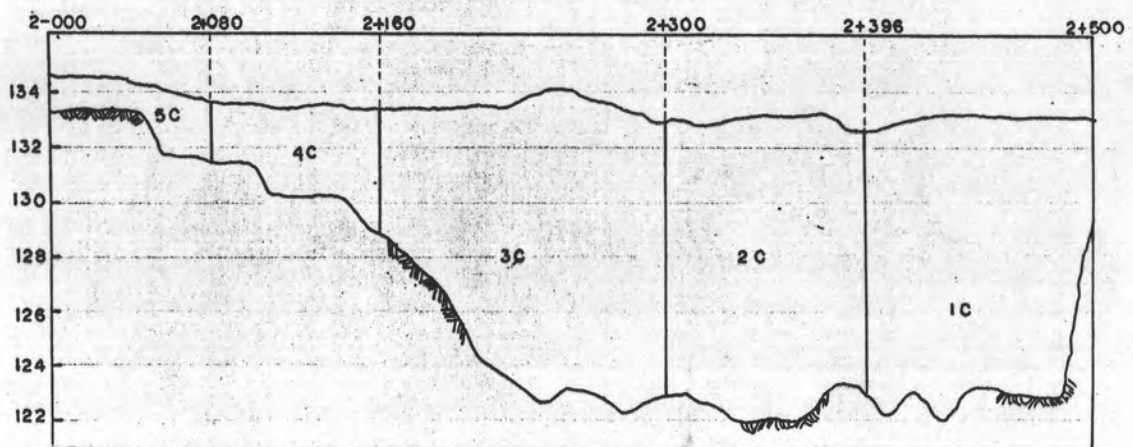
รูปที่ 3.15 แสดงค่า SPT-N เฉลี่ยก่อนการบดอัดบริเวณโซนต่าง ๆ



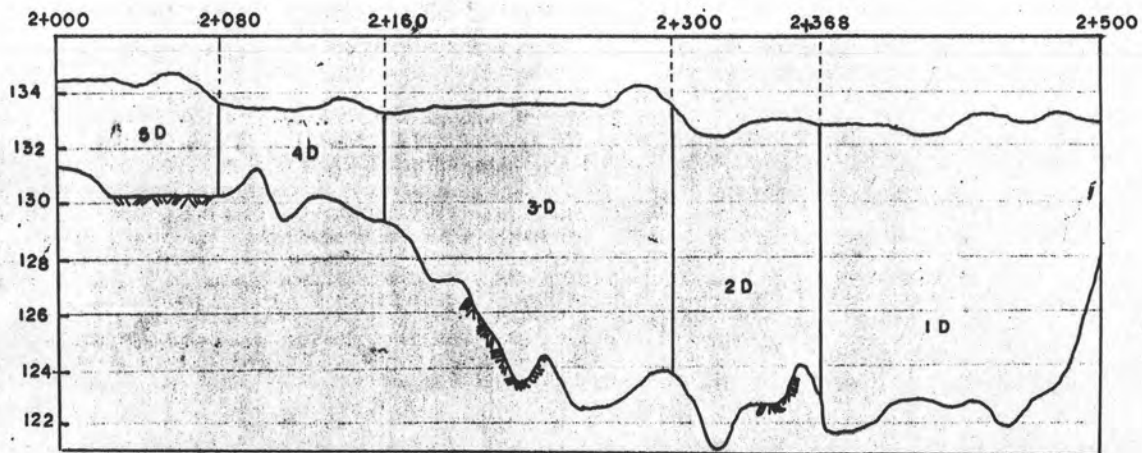
รูปที่ 3.16 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยก่อนการบดอัดบริเวณโซนต่าง ๆ



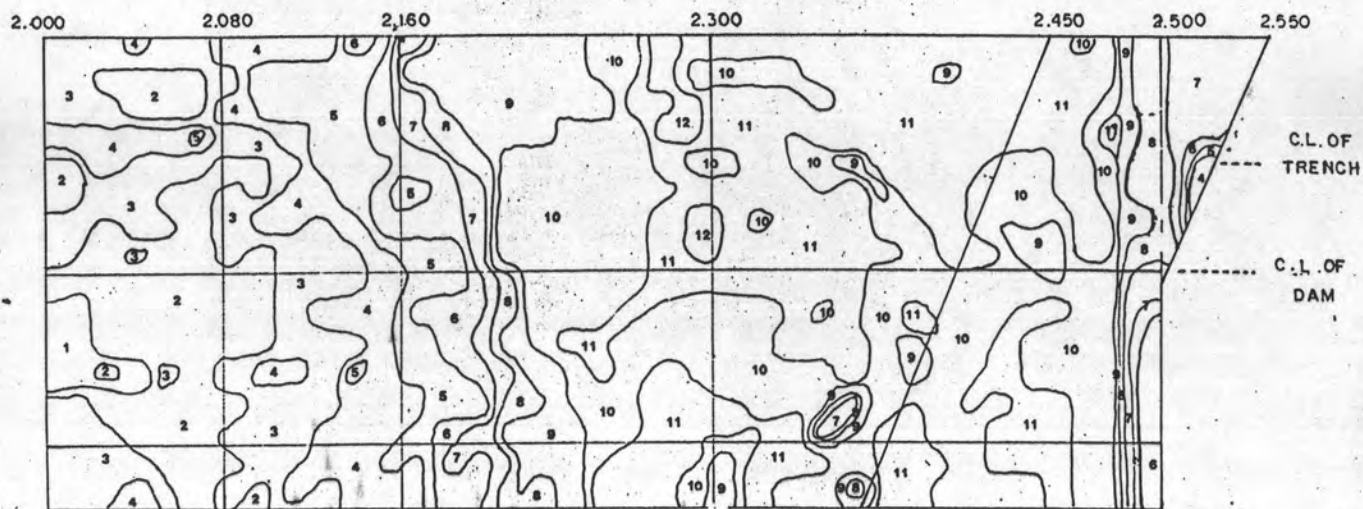
รูปที่ 3.17 (ก) แสดงภาพตัดของชั้นทราย บริเวณด้านเหนือ



รูปที่ 3.17 (ข) แสดงภาพตัดของชั้นทราย บริเวณตอนกลาง



รูปที่ 3.17 (ค) แสดงภาพตัดของชั้นทราย บริเวณด้านท้ายน้ำ

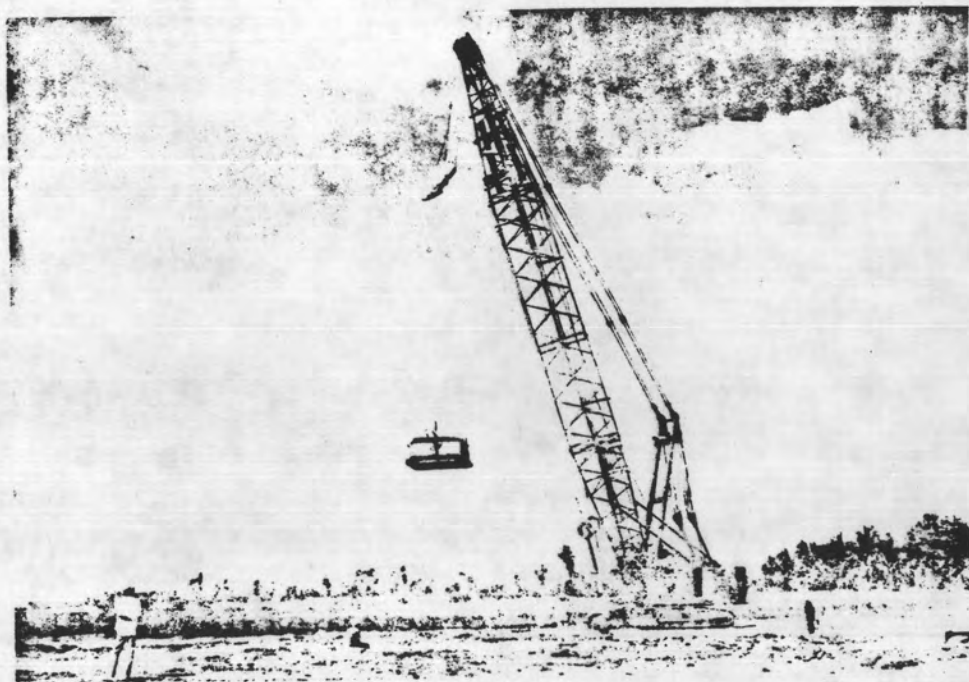


รูปที่ 3.18 แสดงเส้นระดับความหนาของชั้นทรายบริเวณโซนต่าง ๆ

3.5 วิธีการดำเนินการปรับปรุงรากบริเวณโซนต่าง ๆ

3.5.1 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 1U และแปลงทดสอบที่ 2

ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกลูกตุ้มหนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3 x 3 เมตร² ปล่องลงมาอย่างอิสระจากระยะความสูง 22 เมตร (ดังรูป 3.19) แบ่งขั้นตอนการทุบออกเป็น 5 ช่วง (Phase) บริเวณนอกแปลงทดสอบที่ 2 และ 6 ช่วงบริเวณแปลงทดสอบที่ 2 โดยทำการทุบจากบริเวณด้านนอกเข้าด้านใน ซึ่งแต่ละช่วงของการปรับปรุงจะกระทำดังต่อไปนี้ (ดังรูป 3.20 ก.)



รูปที่ 3.19 วิธีการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกลูกตุ้มหนัก 30 ตัน ปล่องลงมาจากระยะความสูง 22 เมตร

ช่วงที่ 1 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Grid) ขนาด 12 x 12 เมตร² จำนวน 4 ครั้งต่อจุด ที่จุด ● หลังจากการทุบ จะเกิดหลุมที่เกิดจากการทุบ (Crater) ในการทุบแต่ละครั้ง เมื่อทำการทุบครบจำนวนครั้งที่ต้องการแล้ว ทำการวัดความลึกของหลุม, ความกว้างของปากหลุม (เพื่อนำไปประมาณค่าปริมาตรทรายที่ใช้เดิม) ต่อจากนั้นทำการกลบหลุมด้วยวัสดุเดิม (Filter Materials) เช่น ทราย หรือกรวดปนทราย จนถึงระดับผิวดินเดิม แล้วปล่อยให้แรงดันโพรงของน้ำที่เพิ่มขึ้น (Excess Pore Pressure) เนื่องจากการทุบลดลงเสียก่อนจึงจะทำการทุบในช่วงต่อไป

ช่วงที่ 2 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Grid) ขนาด 12 x 12 เมตร² เช่นเดียวกันแต่ตำแหน่งทุบจะไม่ซ้ำกับช่วงที่ 1 โดยทำการทุบที่จุด ▲ จำนวน 4 ครั้งต่อจุด เมื่อทำการเสร็จได้จำนวนครั้งครบตามที่กำหนดจะต้องทำการกลบหลุมทุกครั้ง และวัดค่าเหมือนกับช่วงที่ 1

ช่วงที่ 3 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Grid) ขนาด 8.5 x 8.5 เมตร² ตำแหน่งของการทุบจะอยู่ระหว่างกลางของการทุบในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 คือ ทำการทุบที่จุด × จำนวน 6 ครั้งต่อจุด

ช่วงที่ 4 ทำการทุบซ้ำในตำแหน่งจุดในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 ระยะระหว่างจุดเท่ากับ 8.5 เมตร จำนวน 8 ครั้งต่อจุด

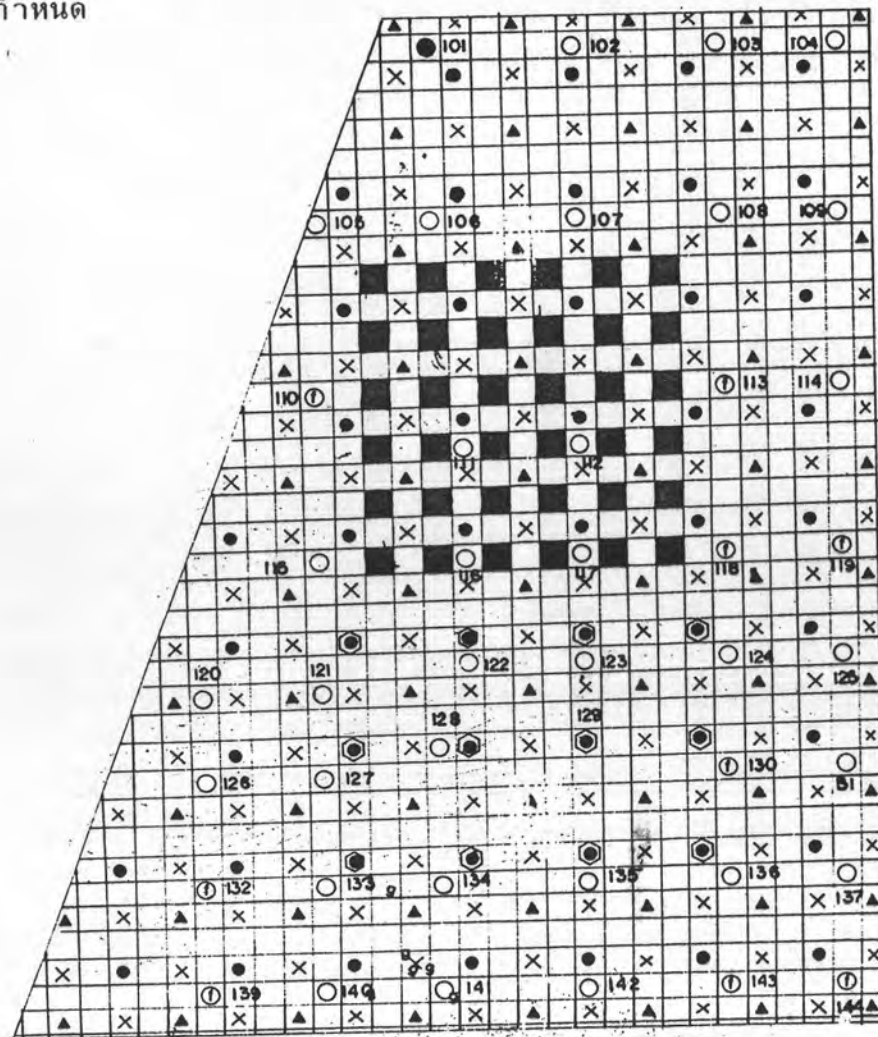
ช่วงที่ 5 ทำการทุบซ้ำในตำแหน่งจุดในช่วงที่ 1, 2 และ 3 ระยะระหว่างจุดเท่ากับ 6 เมตร จำนวน 10 ครั้งต่อจุด

ช่วงที่ 6 ทำการทุบบริเวณแปลงทดสอบที่ 2 โดยทางด้านเหนือของเส้นผ่าศูนย์กลางร่อง (Center Line of Trench) ทำการทุบที่จุด ■ จำนวน 10 ครั้งต่อจุดและทางด้านใต้ของเส้นผ่าศูนย์กลางร่องทำการทุบที่จุด ○ จำนวน 40 ครั้งต่อจุด

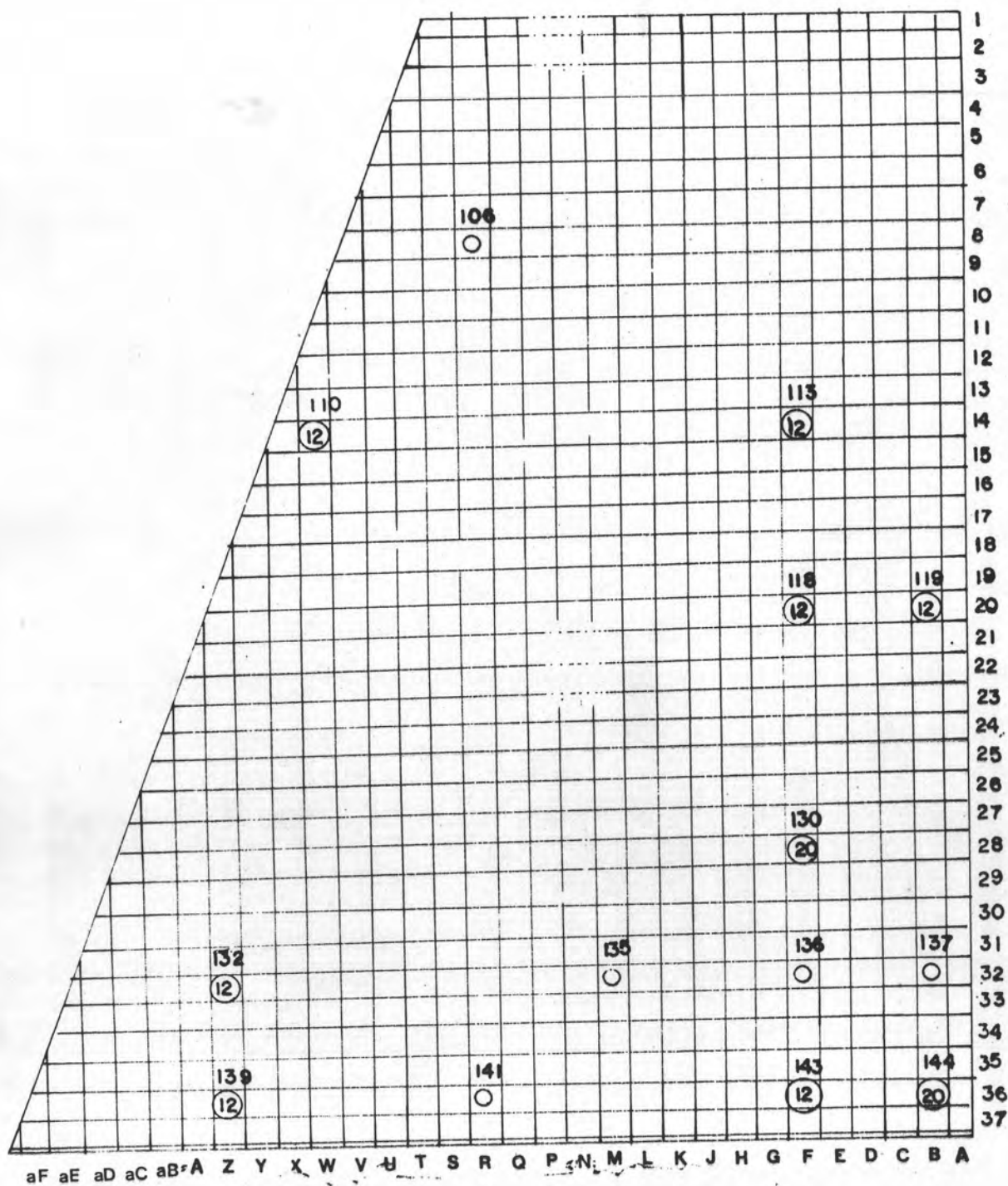
เมื่อทำการทุบและกลบหลุมเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการทดสอบความแน่นหลังการทุบ ซึ่งผลของความแน่นหลังการทุบ (แสดงในภาคผนวก ข) ปรากฏว่ามีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 14 จุด จากทั้งหมด 43 จุด (32.56%) จึงต้องทำการทุบซ้ำ (Retamp) บริเวณจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งวิธีการทุบซ้ำของโซน 1U กระทำดังต่อไปนี้

วิธีการทาบซ้ำบริเวณโซน 1U

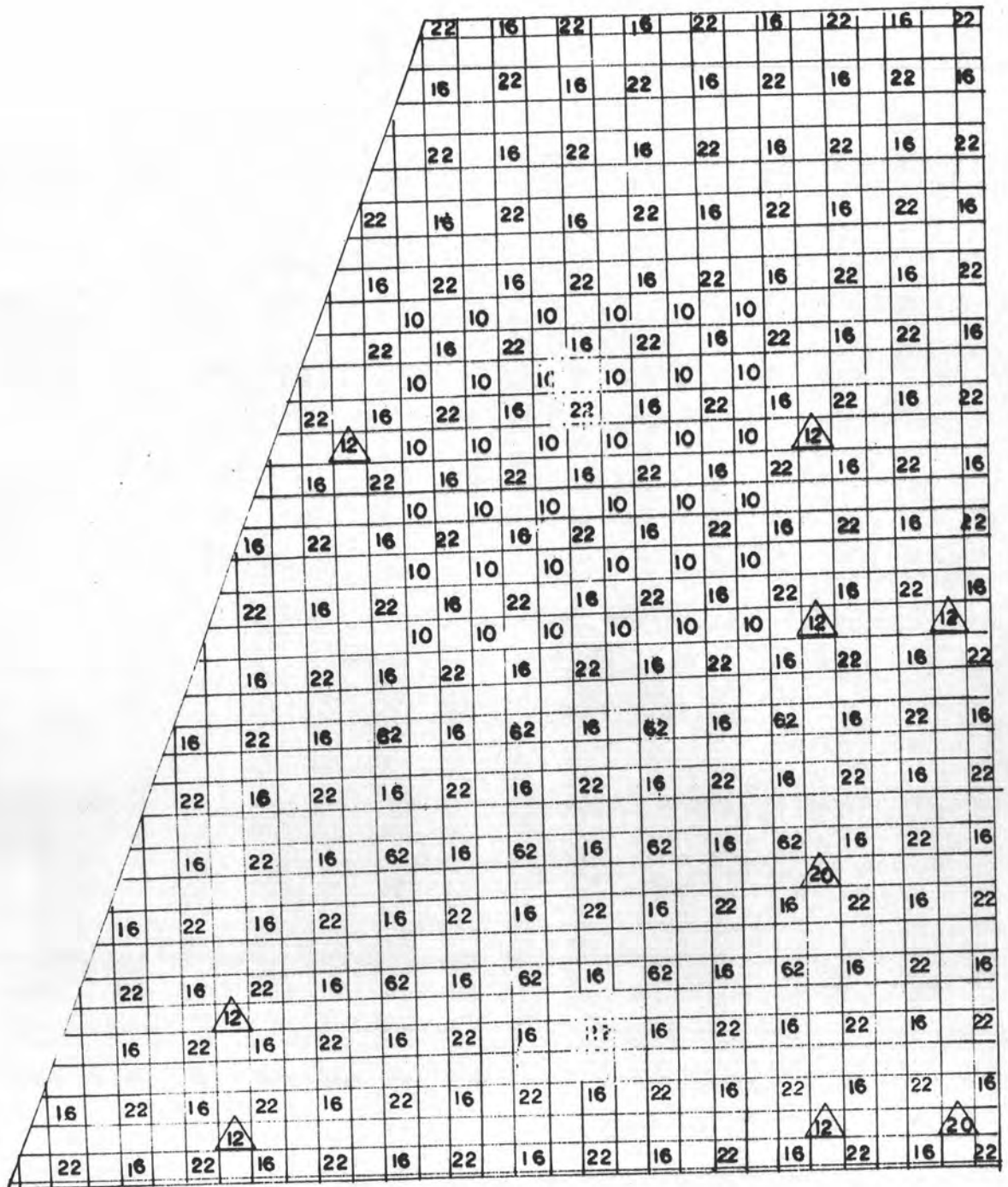
ทำการทาบที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด บางจุดที่ค่าของ N ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดมากเท่านั้น จำนวนครั้งของการทาบ, ตำแหน่งจุดทาบ และตำแหน่งจุดตอกทดสอบซ้ำ (แสดงในรูปที่ 3.20 ข.) เมื่อทำการทาบซ้ำและกลบหลุมเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงทำการตอกทดสอบซ้ำ (Retest) โดยที่ตำแหน่งจุดตอกทดสอบซ้ำจะถูกกำหนดโดยวิศวกรหรือผู้ควบคุมงานของกรมชลประทาน ซึ่งตำแหน่งจะซ้ำเดิมหรืออาจเปลี่ยนแปลงก็ได้ แต่โดยส่วนมากมักจะเลือกจุดที่คาดว่าความแน่นควรถะต่ำที่สุด เช่น บริเวณจุดกึ่งกลางของการทาบหรือขอบ ซึ่งผลของการตอกทดสอบซ้ำ (แสดงในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่าทุกจุดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 3.20 (ก) แสดงวิธีการทาบและจุดตอกทดสอบบริเวณโซน 1U



รูปที่ 3.20 (ข) แสดงวิธีการทาบซ้ำ และจุดตอกทดสอบซ้ำบริเวณโซน 1U



รูปที่ 3.20 (ค) แสดงจำนวนครั้งที่การทับทั้งหมดที่จุดต่าง ๆ บริเวณโซน 1U

3.5.2 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 1C และ 1D

ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกลูกตุ้มหนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3 x 3 เมตร² ปล่อยลงมาอย่างอิสระจากระยะความสูง 22 เมตร แบ่งขั้นตอนการทุบออกเป็น 2 ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงกระทำดังต่อไปนี้ (รูปที่ 3.21 ก.)

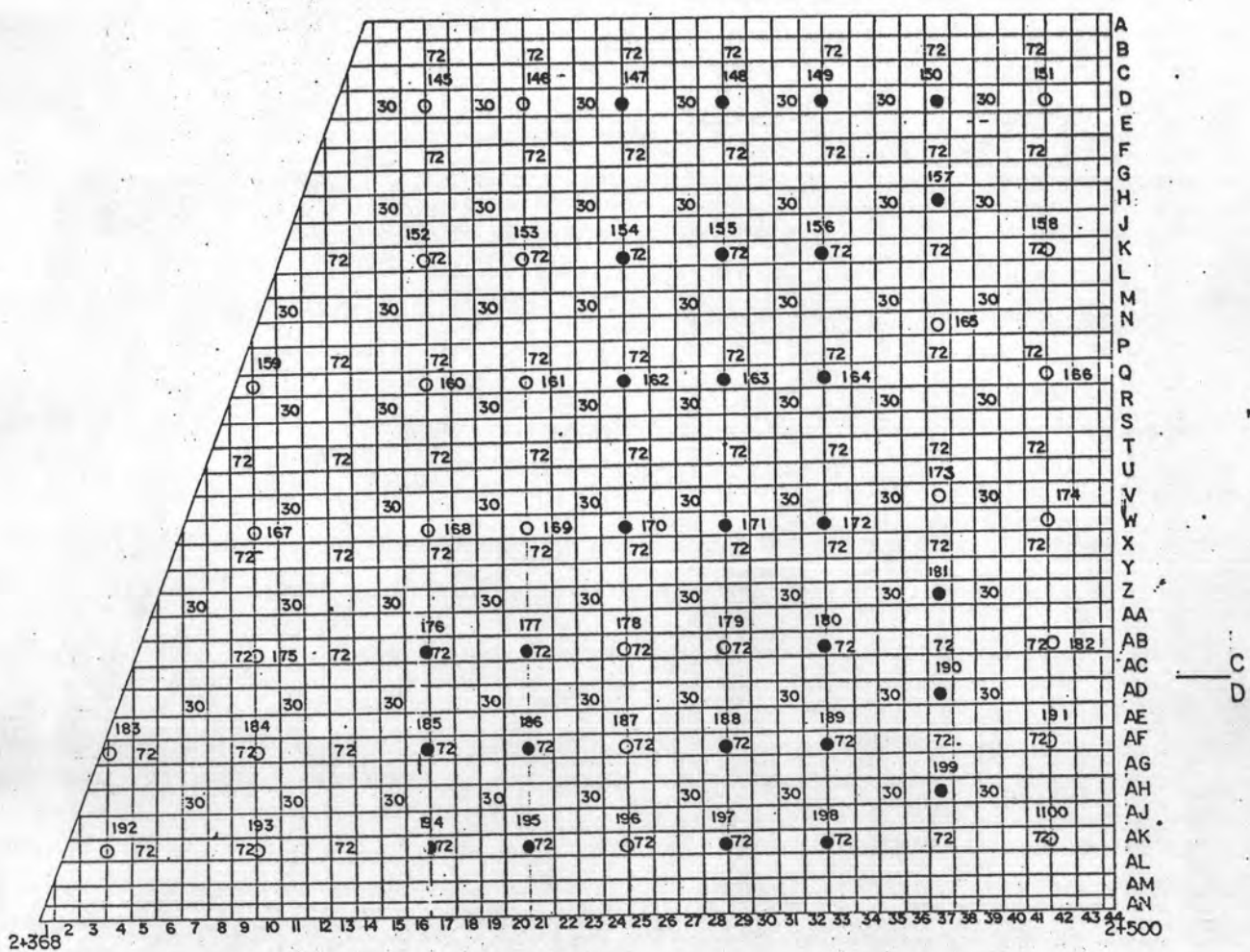
ช่วงที่ 1 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 12 x 12 เมตร² ที่จุด [72] จำนวน 72 ครั้งต่อจุด (โดยแบ่งจำนวนครั้งของการทุบออกเป็นช่วงย่อย เป็น 5, 5, 7, 10, 15, 15, 15 ครั้ง)

ช่วงที่ 2 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 12 x 12 เมตร² เช่นกัน แต่ตำแหน่งของการทุบจะอยู่ระหว่างกลางของการทุบในช่วงที่ 1 นั่นคือ ทำการทุบที่จุด [30] จำนวน 30 ครั้งต่อจุด (โดยแบ่งจำนวนครั้งของการทุบออกเป็นช่วงย่อยเป็น 15, 15 ครั้ง)

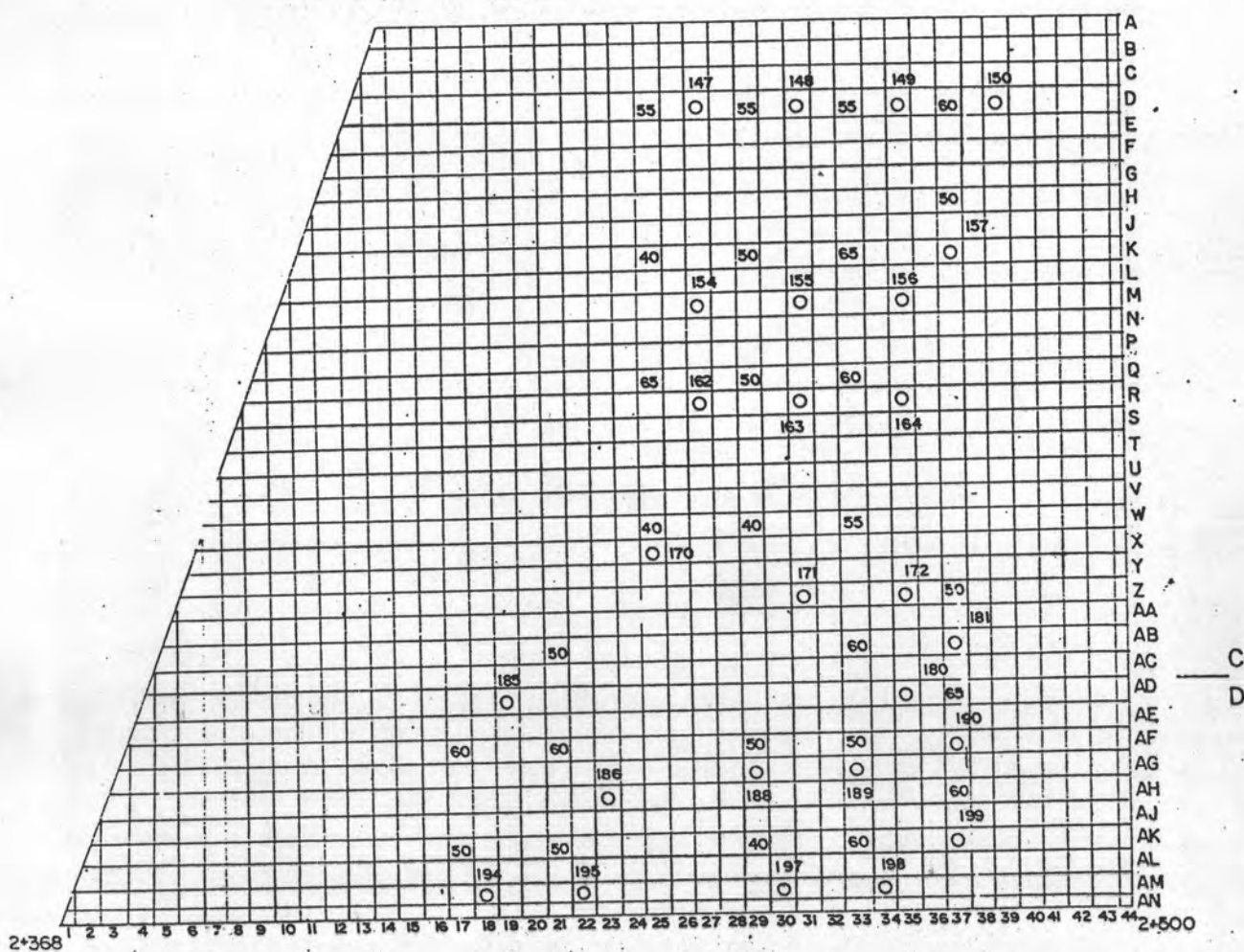
เมื่อทำการทุบและกลบหลุมเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังการทุบ ซึ่งผลของความแน่นหลังการทุบ (แสดงในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่ามีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 28 จุด จากทั้งหมด 56 จุด (50%) จึงต้องทำการทุบซ้ำบริเวณที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งวิธีการทุบซ้ำของโซน 1C และ 1D กระทำดังต่อไปนี้

วิธีการทุบซ้ำบริเวณโซน 1C และ 1D

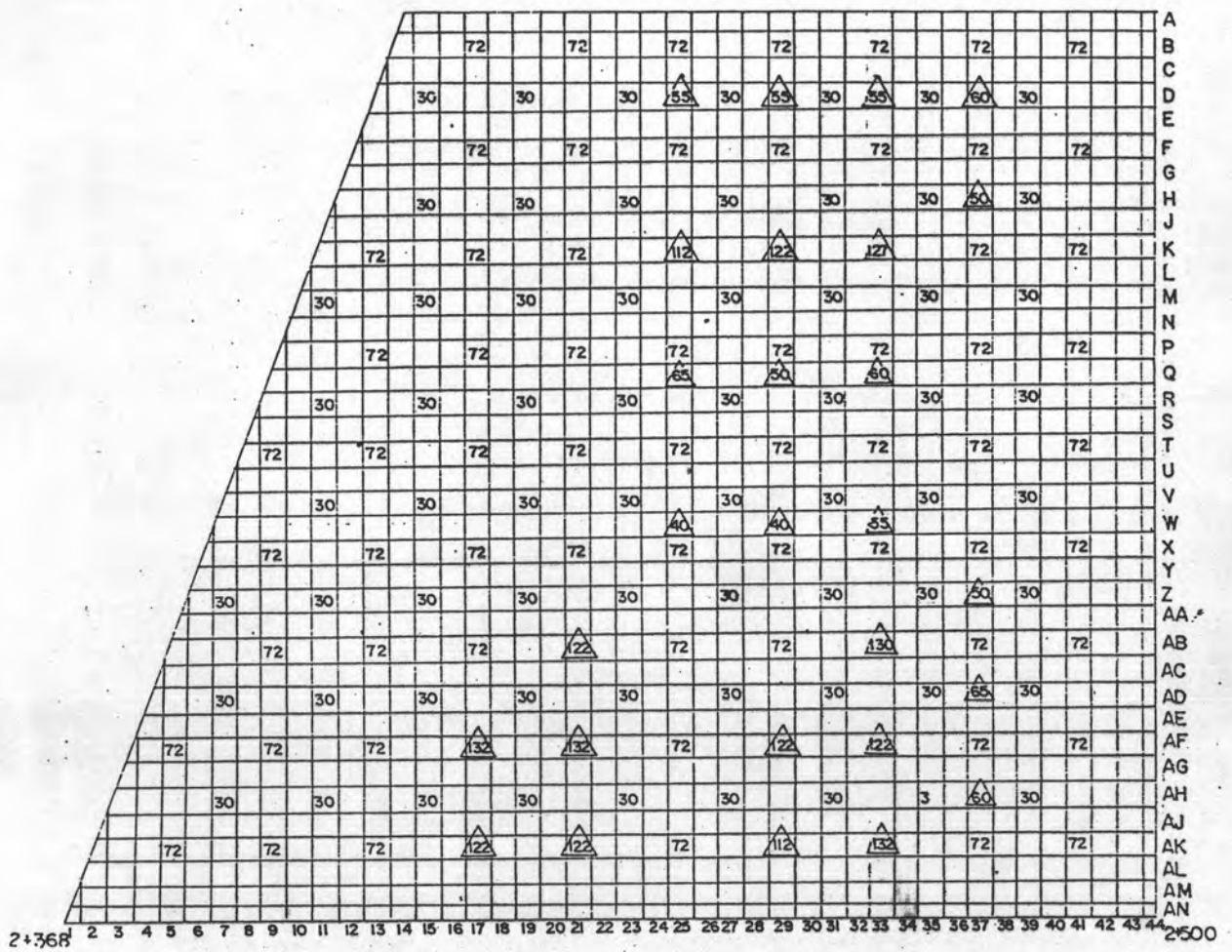
ทำการทุบซ้ำที่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดที่ตอกทดสอบไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 40-65 ครั้งต่อจุด (รูปที่ 3.21 ข.) เมื่อทำการทุบซ้ำและกลบหลุมที่เกิดจากการทุบซ้ำเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบซ้ำ ซึ่งผลของการตอกทดสอบซ้ำ ปรากฏว่าทุกจุดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 3.21 (ก) แสดงวิธีการทาบและจุดตอกทดสอบบริเวณโซน 1C/D



รูปที่ 3.21 (ข) แสดงวิธีการทาบซ้ำ และจุดตอกทดสอบซ้ำบริเวณโซน 1C/D



รูปที่ 3.21 (ค) แสดงจำนวนครั้งการทับทั้งหมดที่จุดต่าง ๆ บริเวณโซน 1C/D

3.5.3 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 2U

ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกลูกตุ้มหนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3×3 เมตร² ปล່อยลงมาอย่างอิสระจากระยะความสูง 22 เมตร เช่นเดียวกับโซนที่ 1 โดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 12×12 เมตร² เพียงรูปแบบเดียวเท่านั้น การทุบจะกระทำเป็นช่วง ๆ เช่นเดียวกันแต่จำนวนครั้งการทุบในแต่ละช่วงของหลุมต่าง ๆ จะมีค่าไม่เท่ากัน เหมือนกับโซน 1U โดยจะกระทำการทุบไปจนกว่าเห็นว่าความลึกของหลุมที่เกิดจากการทุบเพิ่มขึ้นอีกไม่มากนักเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งของการทุบ หรือความลึกของหลุมมีค่าสูงมากจนเกือบไม่สามารถดึงลูกตุ้มออกจากหลุมได้ จึงหยุดทุบในแต่ละช่วงนั้น ๆ เมื่อทำการทุบเสร็จในแต่ละช่วงจะต้องทำการกลบหลุมที่เกิดจากการทุบด้วยวัสดุเติม จนถึงระดับผิวดินเดิมทุกช่วงก่อน แล้วจึงทำการทุบช่วงต่อไปจนกว่าจะได้จำนวนครั้งครบตามที่กำหนด (ดังรูปที่ 3.22 ก.)

เมื่อทำการทุบและกลบหลุมเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังการทุบ ผลของความแน่นหลังการทุบ (แสดงในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่ามีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 23 จุด จากทั้งหมด 69 จุด (33.33%) จึงต้องทำการทุบซ้ำ ซึ่งวิธีการทุบซ้ำในโซน 2U กระทำดังต่อไปนี้

วิธีการทุบซ้ำบริเวณโซน 2U

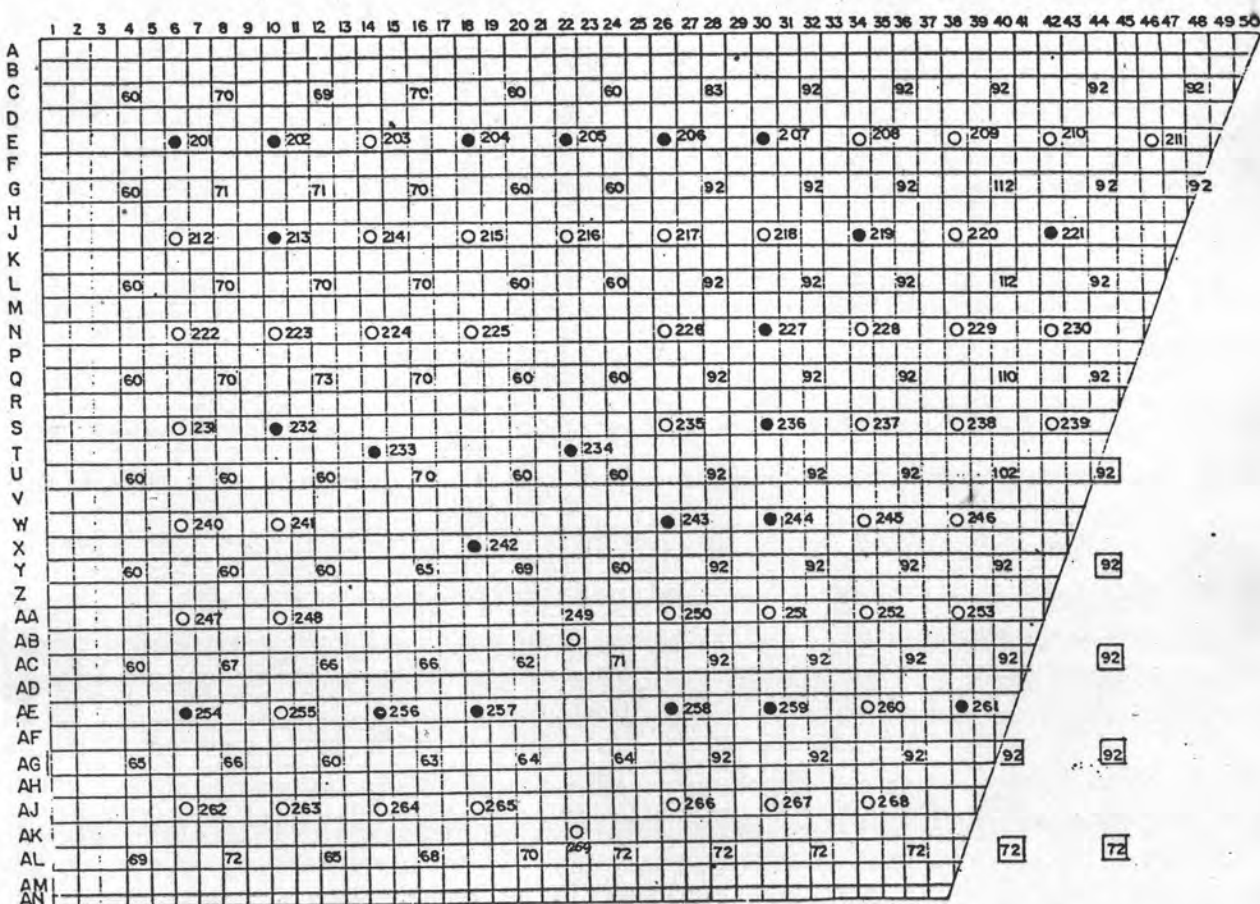
ก่อนที่จะทำการทุบซ้ำ นำผลของความแน่นจุดตอกทดสอบที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดมาพิจารณาว่า ไม่ผ่านที่ความลึกตำแหน่งใด, จำนวนจุดที่ไม่ผ่าน และค่า N ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดมากน้อยเพียงใดเพื่อนำมากำหนดรูปแบบของการทุบ และจำนวนครั้งของการทุบซ้ำ (ดังรูปที่ 3.22 ข.)

กรณีที่ค่า N ไม่ผ่านที่ระดับเมตรที่หนึ่งและเมตรที่สอง เช่น ที่ ตำแหน่งจุด 206, 207, 236 และ 243 การทุบจะใช้พลังงานน้อย โดยทำการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมแบบต่อเนื่อง 1 ครั้ง/จุดจำนวน 9 จุด

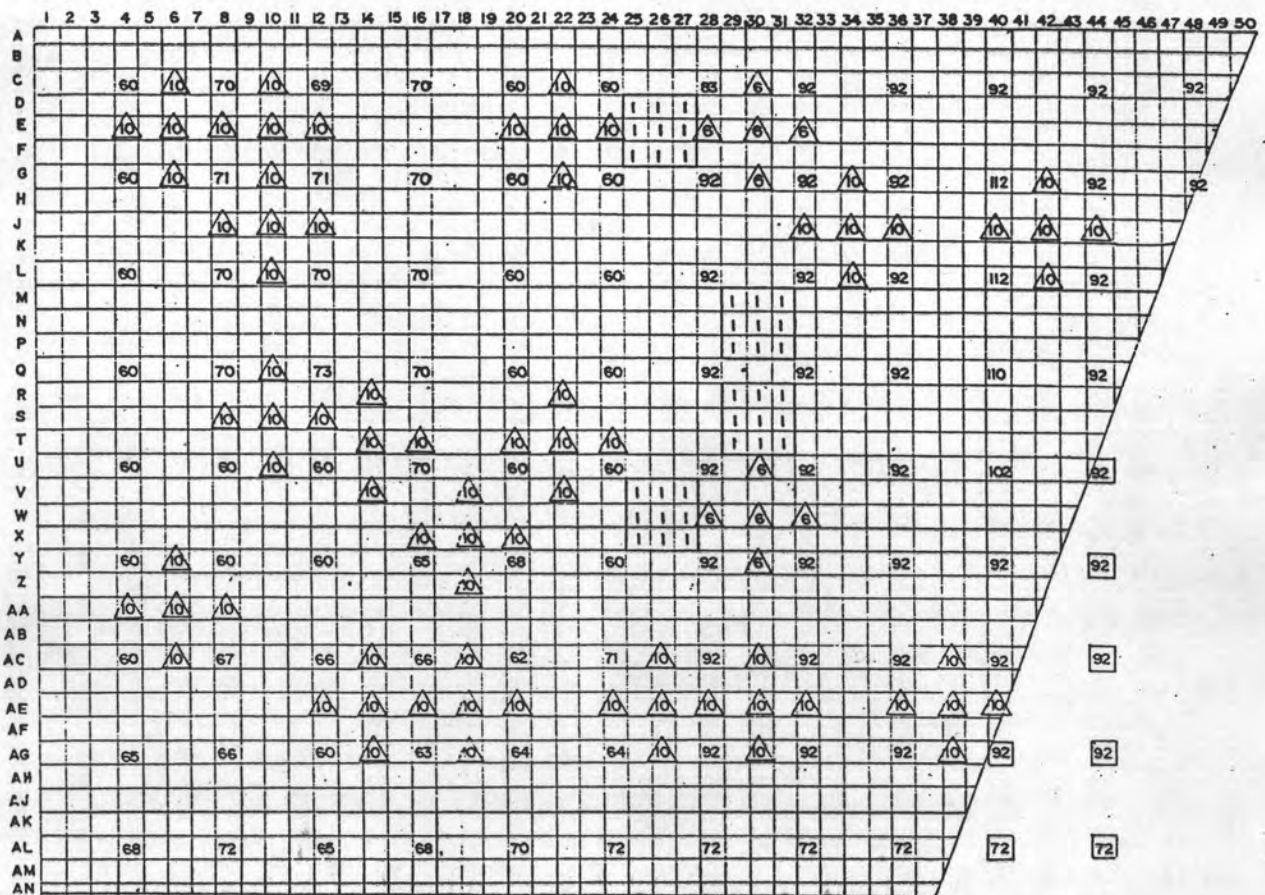
กรณีค่า N ไม่ผ่านบริเวณตอนกลางของชั้นทรายที่หนาไม่มากนัก หรือค่า N ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไม่มากนัก ซึ่งได้แก่ จุด 217 และ 244 จะจัดรูปแบบการทาบเป็นรูปกากบาท 5 จุด ระยะห่างระหว่างจุด 6 เมตร การทาบจะใช้พลังงานสูงขึ้น จำนวนครั้งของการทาบเท่ากับ 6 ครั้งต่อจุด

กรณีค่า N ไม่ผ่านที่ระดับลึกมากใกล้ชั้นหิน ได้แก่ จุด 201, 202, 205, 213, 219, 221, 232, 234, 242, 255, 256, 257, 258, 259 และ 261 การทาบจะใช้พลังงานสูงขึ้นอีก โดยมีรูปแบบการทาบเป็นรูปกากบาท ระยะระหว่างจุด 6 เมตร จำนวนครั้งของการทาบเท่ากับ 10 ครั้งต่อจุด

เมื่อทำการทาบซ้ำและกลบหลุมที่เกิดจากการทาบซ้ำหมดแล้ว จึงทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังการทาบซ้ำปรากฏว่าทุกจุดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 3.22 (ก) แสดงวิธีการทาบและจุดตอกทดสอบบริเวณโซน 2U



รูปที่ 3.22 (ค) แสดงจำนวนครั้งการทุบทั้งหมดที่จุดต่าง ๆ บริเวณโซน 2U

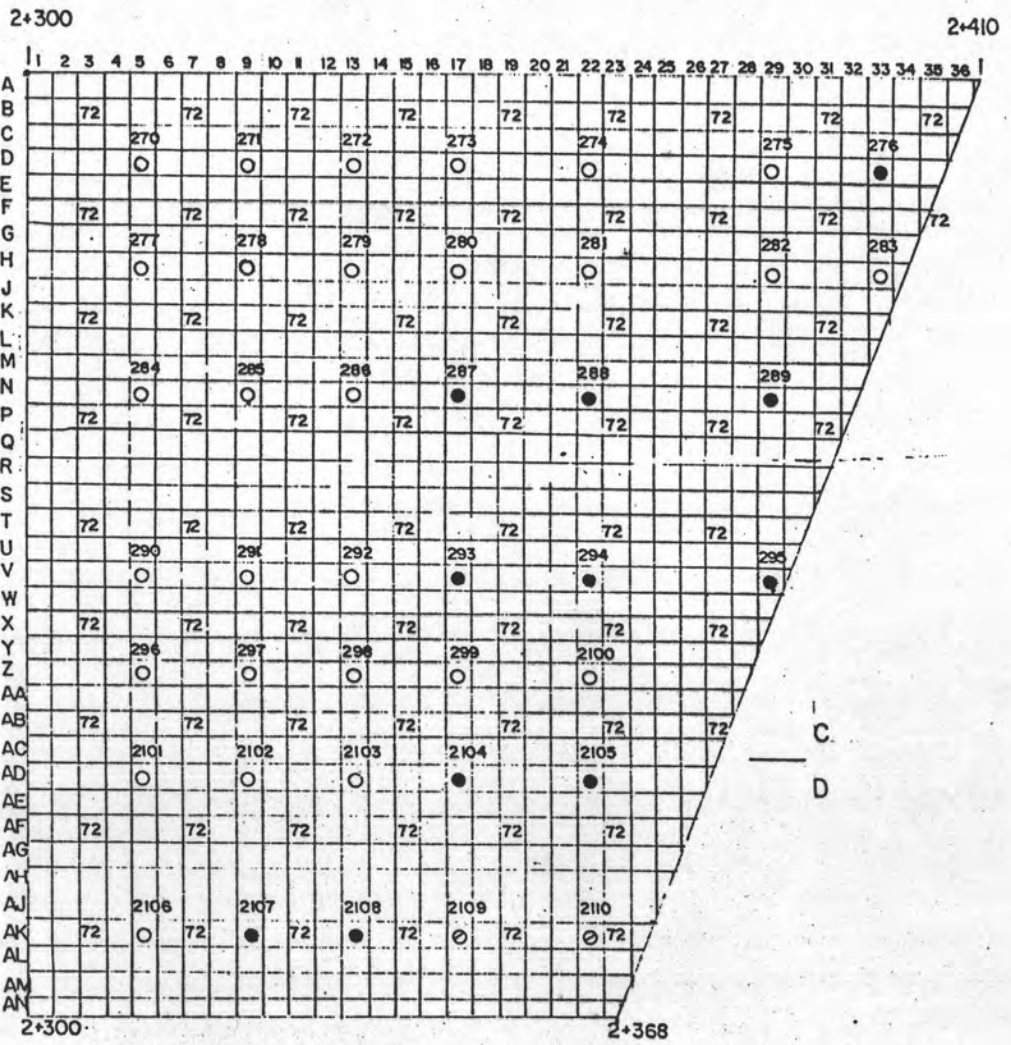
3.5.4 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 2C และ 2D

ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกลูกตุ้มหนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3×3 เมตร² ปล່อยลงมาอย่างอิสระจากระยะความสูง 22 เมตร การทุบจะกระทำคล้าย ๆ กับโซน 1C และ 1D คือ แบ่งขั้นตอนการทุบออกเป็น 2 ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงกระทำดังต่อไปนี้

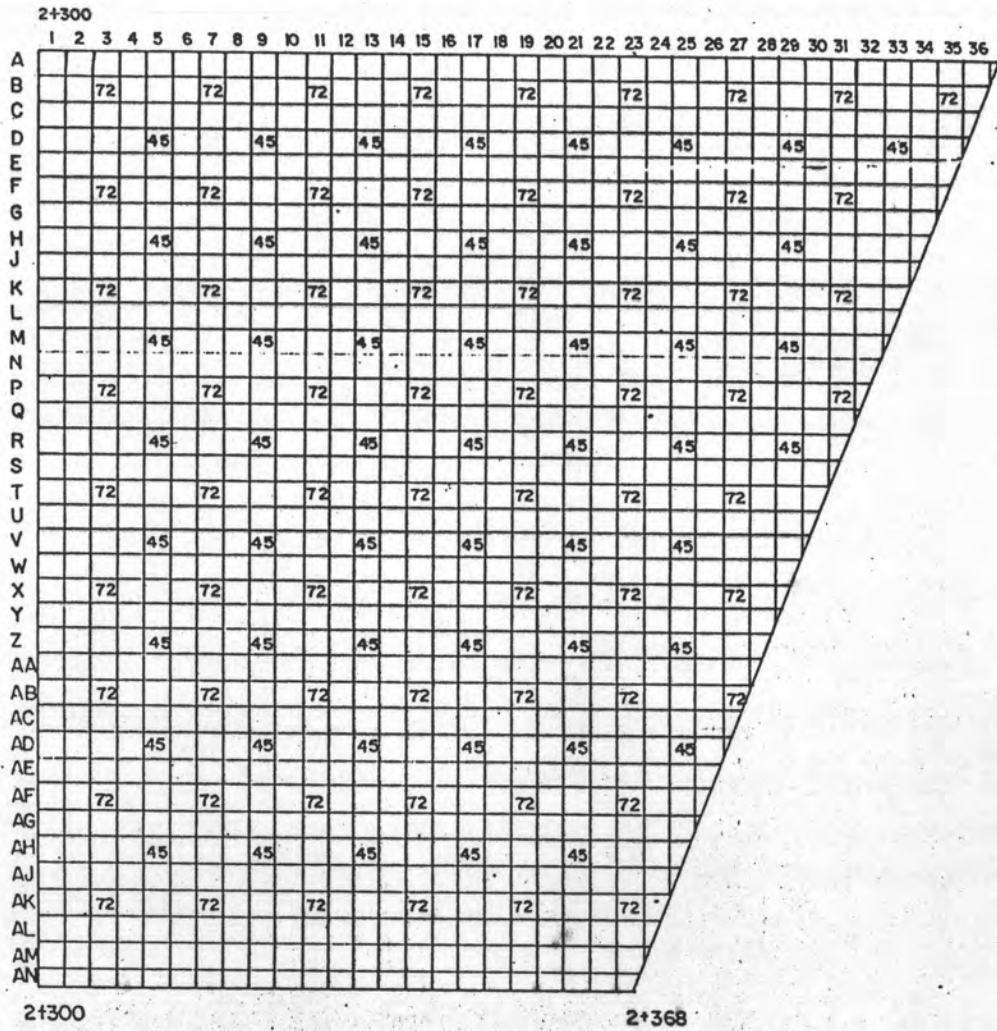
ช่วงที่ 1 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 12×12 เมตร² ที่จุด 72 จำนวน 72 ครั้งต่อจุด (โดยแบ่งจำนวนครั้งของการทุบออกเป็นช่วงย่อยเป็น 5, 10, 12, 15, 15, 15 ครั้ง)

ช่วงที่ 2 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 12×12 เมตร เช่นกัน แต่ตำแหน่งของการทุบจะอยู่ระหว่างกลางของการทุบในช่วงที่ 1 นั่นคือ ทำการทุบที่จุด 45 จำนวน 45 ครั้งต่อจุด (โดยแบ่งจำนวนครั้งของการทุบออกเป็นช่วงย่อยเป็น 15, 15, 15 ครั้ง)

เมื่อทำการทุบช่วงที่ 1 เสร็จ (รูปที่ 3.23 ก.) ลองทำการตอกทดสอบจำนวน 13 จุด ปรากฏว่าไม่ผ่านเกณฑ์ถึง 11 จุด (84.62%) จึงต้องทำการทุบเพิ่มจนครบจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ (รูปที่ 3.23 ข.) แล้วทำการตอกทดสอบใหม่หมดทั้งบริเวณจำนวน 41 จุด ผลปรากฏว่าทุกจุดผ่านเกณฑ์ที่กำหนดให้ทุกจุด



รูปที่ 3.23 (ก) แสดงวิธีการทาบและจุดตกทดสอบบริเวณโซน 2C/D



รูปที่ 3.23 (ข) แสดงจำนวนครั้งการทาบทั้งหมดที่จุดต่าง ๆ บริเวณโซน 2C/D

3.5.5 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 3U

สำหรับโซน 3U จัดรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 12×12 เมตร² เพียงรูปแบบเดียว จำนวน 108 จุด จำนวนครั้งของการทุบในแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากัน (ดังรูปที่ 3.24 ก.) โดยแบ่งวิธีการทุบออกเป็น 2 วิธีคือ

1. ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดเล็ก (LS418) ยกหลุกตัมหนัก 15 ตัน ขนาดหน้าตัด 3×3 เมตร² ปล่องลงมาจากระยะความสูง 22 เมตร ที่ตำแหน่งจุด ○ คือในแนวที่ 3 ถึงแนวที่ 27 (ระยะ กม. 2 + 160 ถึง ระยะ กม. 2 + 240) รวมจำนวนครั้งการทุบทั้งหมด 5,087 ครั้ง

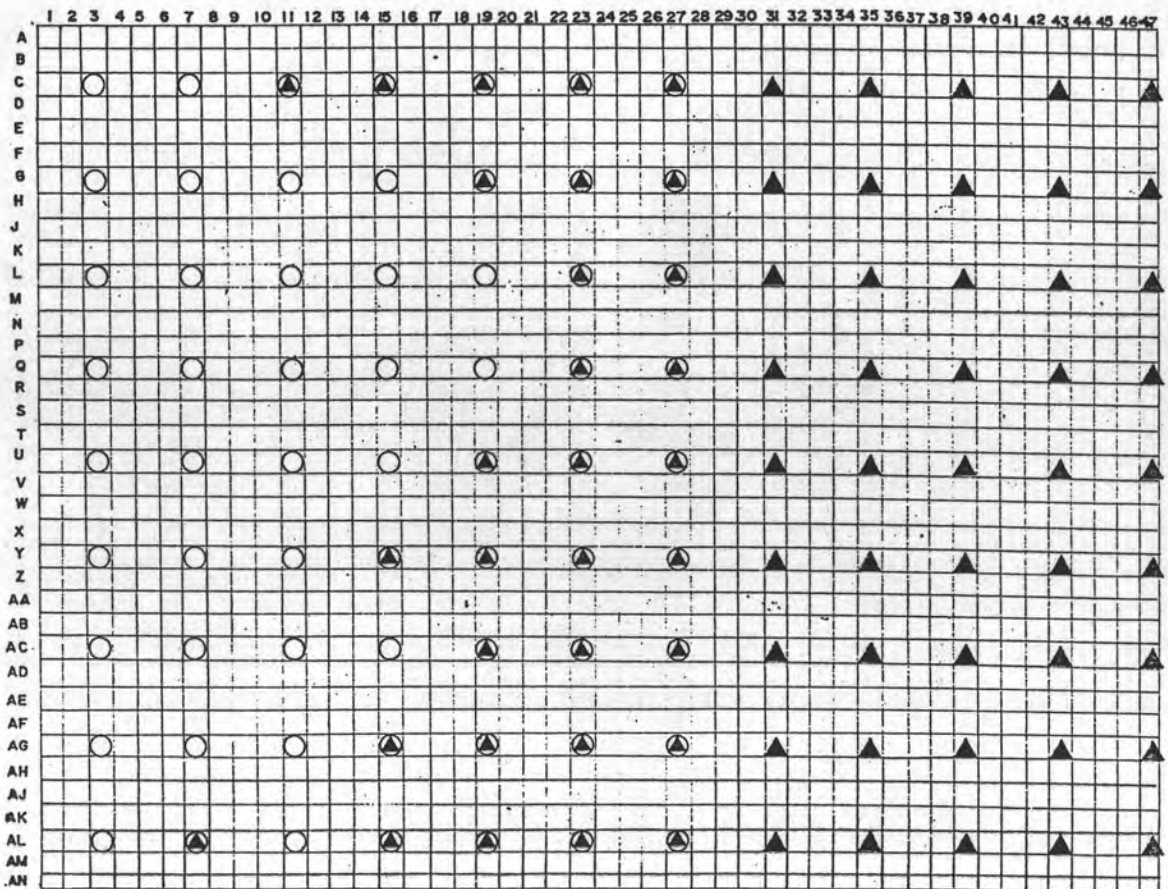
2. ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกหลุกตัมหนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3×3 เมตร² ปล่องลงมาอย่างอิสระจากระยะความสูง 22 เมตร ที่ตำแหน่งจุด ▲ คือ ในแนวที่ 23 ถึงแนวที่ 47 (ระยะ กม. 2 + 230 ถึงระยะ กม. 2 + 300) และในแนวที่ 7, 11, 15, 19 บางจุดรวมจำนวนครั้งการทุบทั้งหมด 5,016 ครั้ง จึงพบว่าบางจุดจะมีการทุบทั้งสองวิธี

เมื่อทำการทุบและกลบหลุมเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังจากการทุบ ผลของความแน่นหลังการทุบ (แสดงในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่า เมื่อทำการตอกทดสอบไปได้ 53 จุด มีจุดที่ความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดถึง 34 จุด (64%) ซึ่งสูงมาก จึงทำการหยุดการตอกทดสอบ แล้วทำการทุบซ้ำซึ่งวิธีการทุบซ้ำในโซน 3U กระทำดังต่อไปนี้

วิธีการทุบซ้ำบริเวณโซน 3U

ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกหลุกตัมหนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3×3 เมตร² ปล่องลงมาอย่างอิสระจากระยะความสูง 22 เมตร ที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของการทุบในครั้งแรกบริเวณที่ความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด (ซึ่งเป็นจุดเดียวกับจุดที่ตอกทดสอบไม่ผ่าน) และบริเวณที่ยังไม่ได้ทำการตอกทดสอบ คือ ที่จุด [20] จำนวน 20 ครั้งต่อจุด (ดังรูปที่ 3.24 ค.) รวมจำนวนครั้งของการทุบทั้งหมด 1,600 ครั้ง เมื่อทำการทุบซ้ำและกลบหลุมที่เกิดจากการทุบซ้ำเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบซ้ำ (Retest) ปรากฏว่า

เมื่อทำการตอกทดสอบไปได้จำนวน 57 จุด มีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 22 จุด (47%) จึงหยุดทำการตอกทดสอบ แล้วเริ่มทำการทาบซ้ำอีกเป็นครั้งที่สอง (Retamp* 2) ซึ่งวิธีการทาบซ้ำในครั้งที่สองกระทำโดยการทาบตำแหน่งเดียวกับที่ทำการทาบครั้งแรกบริเวณจุดที่ตอกทดสอบไม่ผ่าน (ดังรูปที่ 3.24 ง.) คือที่จุด Δ โดยใช้วิธีการทาบทั้งสองวิธี เมื่อทำการทาบและกลบหลุมที่เกิดจากการทาบซ้ำครั้งที่สองเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบซ้ำครั้งที่สอง (Retest* 2) อีกจำนวน 40 จุด ปรากฏว่ายังมีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดอีกจำนวน 15 จุด ต้องทำการทาบซ้ำครั้งที่ 3 (Retamp* 3) ซึ่งวิธีการทาบซ้ำครั้งที่สามกระทำโดยการทาบที่ตำแหน่งจุดตอกทดสอบซ้ำครั้งที่สองที่ไม่ผ่านจำนวน 10-30 ครั้งต่อจุด (ดังรูปที่ 3.24 จ.) เมื่อทำการทาบซ้ำครั้งที่สามและกลบหลุมที่เกิดจากการทาบเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบซ้ำครั้งที่สาม (Retest* 3) ปรากฏว่าทุกจุดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 3.24 (ก) แสดงวิธีการทาบบริเวณโซน 3U

3.5.6 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 3C และ 3D

สำหรับโซน 3C และ 3D จะแบ่งพื้นที่ในการทุบออกเป็น 2 บริเวณ (ดังรูปที่ 3.25 ก.) คือ


บริเวณที่ 1 คือ ในแนวที่ 1 ถึงแนวที่ 13 (กม. 2 + 160 ถึง กม. 2 + 200) การทุบทำโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดเล็ก (LS418) ยกลูกตุ้มหนัก 15 ตัน ขนาดหน้าตัด 3 x 3 เมตร² ปล่องลงมาจากระยะความสูง 22 เมตร² โดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 6 x 6 เมตร² เพียงรูปแบบเดียวทำการทุบจำนวน 27 ครั้งต่อจุด โดยการทุบจะกระทำเป็นช่วงย่อย ๆ เช่นเดียวกัน แต่การทุบในแต่ละช่วงของหลุมต่าง ๆ จะมีค่าไม่เท่ากัน

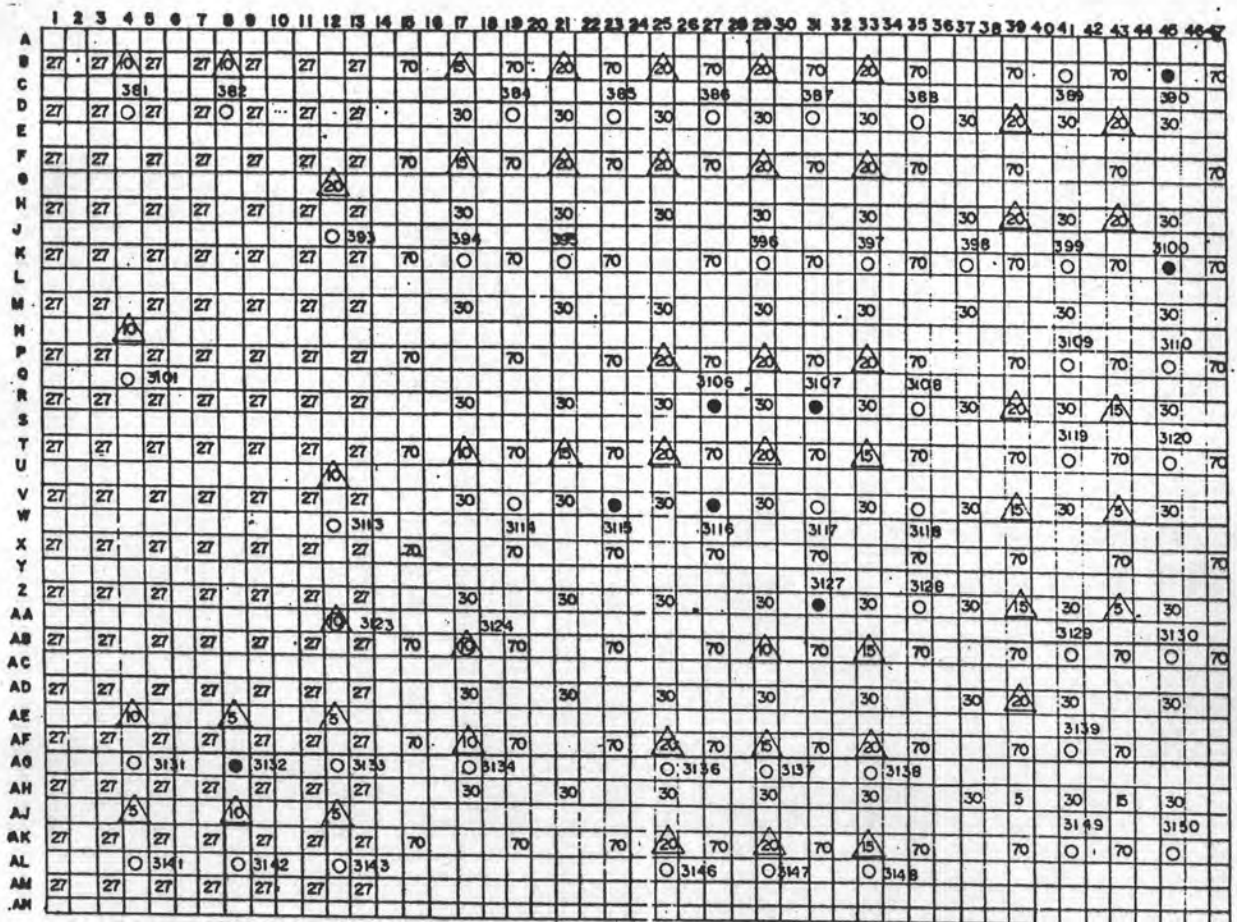
บริเวณ 2 คือ ในแนวที่ 15 ถึงแนวที่ 47 (กม. 2 + 200 ถึง กม. 2 + 300) ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกลูกตุ้มหนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3 x 3 เมตร² ปล่องลงมาอย่างอิสระจากระยะความสูง 22 เมตร โดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 12 x 12 เมตร² สองรูปแบบ คือ ช่วงที่ 1 จะทำการทุบจำนวน 70 ครั้งต่อจุด ที่จุด 70 เมื่อทำการทุบเสร็จแล้วก็มาทำการทุบในช่วงที่ 2 ที่จุด 30 ซึ่งอยู่ระหว่างกลางของรูปแบบแรกอีกจำนวน 30 ครั้งต่อจุด

เมื่อทำการทุบและกลบหลุมที่เกิดจากการทุบเสร็จเรียบร้อยหมดทั้งโซนแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังจากทำการทุบ ซึ่งผลของความแน่นหลังจากทำการทุบ (แสดงในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่ามีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 53 จุด จากทั้งหมด 70 จุด (75.71%) จึงต้องทำการทุบซ้ำบริเวณจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งวิธีการทุบซ้ำบริเวณโซน 3C และ 3D กระทำดังต่อไปนี้

วิธีการทุบซ้ำบริเวณโซน 3C และ 3D

ทำการทุบซ้ำที่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งจุดตอกทดสอบที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดที่ตำแหน่งจุด Δ จำนวน 5, 10, 15 หรือ 20 ครั้งต่อจุด (ดังรูปที่ 3.25 ข.) เมื่อทำการทุบซ้ำและกลบหลุมที่เกิดจากการทุบซ้ำหมดเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบค่าความแน่นหลังการทุบซ้ำ ผลของความแน่นหลังการทุบ

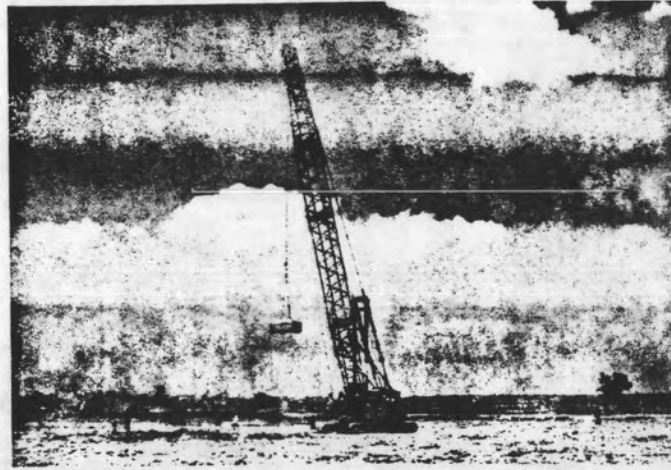
ซ้ำปรากฏว่ามีจุดที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดอีกจำนวน 8 จุด จึงต้องทำการทาบซ้ำใหม่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งวิธีการทาบซ้ำครั้งที่สอง (Retamp* 2) จะกระทำโดยการทาบที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งจุดตอกทดสอบซ้ำที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดที่ตำแหน่งจุด  (รูปที่ 3.25 ค.) เมื่อทำการทาบและกลบหลุมเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังการทาบซ้ำครั้งที่สอง ผลของการตอกทดสอบหาความแน่นหลังการทาบครั้งที่สอง (Retest* 2) ปรากฏว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด



รูปที่ 3.25 (ข) แสดงวิธีการทาบข้างครั้งที่หนึ่งและจุดตอกทดสอบข้างบริเวณโพชน
3C/D

3.5.7 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 4U

ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดเล็ก (LS418) ยกลูกตุ้มหนัก 15 ตัน ขนาดหน้าตัด 3×3 เมตร² ปล่อยลงมาจากระยะความสูง 22 เมตร (รูปที่ 3.26) โดยแบ่งรูปแบบการทุบออกเป็น 4 ช่วง ซึ่งช่วงต่าง ๆ กระทำดังต่อไปนี้ คือ (ดังรูปที่ 3.27 ก.)



รูปที่ 3.26 วิธีการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดเล็ก (LS418) ยกลูกตุ้มหนัก 15 ตัน ปล่อยลงมาจากระยะความสูง 22 เมตร

ช่วงที่ 1 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Grid) ขนาด 6×6 เมตร² จำนวน 3 ครั้งต่อจุด ที่ตำแหน่งจุด ○

ช่วงที่ 2 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 6×6 เมตร² เช่นกัน แต่ตำแหน่งของการทุบจะอยู่ระหว่างกลางของช่วงที่หนึ่ง จำนวน 3 ครั้งต่อจุด ที่ตำแหน่งจุด □

ช่วงที่ 3 ทำการทุบโดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 4.25×4.25 เมตร² จำนวน 5 ครั้งต่อจุด ที่ตำแหน่งจุด △

ช่วงที่ 4 ทำการทาบโดยมีรูปแบบการทาบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 6×6 เมตร² บริเวณที่มีความหนาของชั้นทรายมาก ๆ บางบริเวณจำนวน 10 ครั้งต่อจุด ที่ตำแหน่งจุด จำนวนทั้งสิ้น 99 จุด

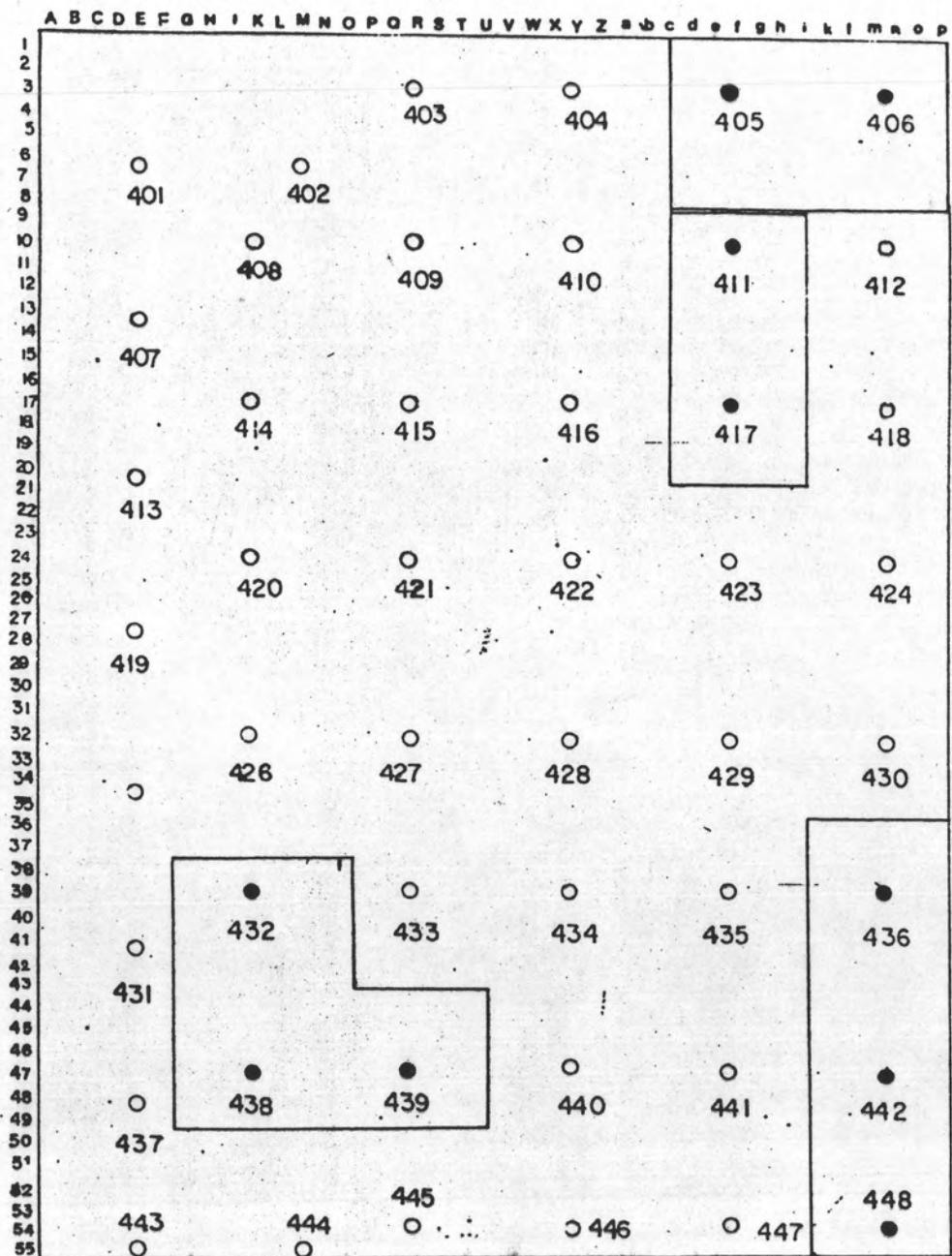
เมื่อทำการทาบและกลบหลุมเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังทำการทาบ ผลของความแน่นหลังการทาบ (แสดงภาคผนวก ข.) ปรากฏว่ามีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 10 จุด จากทั้งหมด 48 จุด (20.83%) จึงต้องทำการทาบซ้ำบริเวณที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งวิธีการทาบซ้ำของโซน 4U กระทำดังต่อไปนี้

วิธีการทาบซ้ำบริเวณโซน 4U

โดยแบ่งพื้นที่ทาบซ้ำออกเป็น 3 บริเวณ และทำการทาบซ้ำดังต่อไปนี้คือ (รูปที่ 3.27 ข.)

- 1) บริเวณพื้นที่จุด 405, 406, 411 และ 417 ทำการทาบจำนวน 12 จุด ระยะห่างระหว่างจุด 6 เมตร จำนวน 5 ครั้งต่อจุด
- 2) บริเวณพื้นที่จุด 432, 438 และ 439 ทำการทาบจำนวน 16 จุด ระยะห่างระหว่างจุด 6 เมตร จำนวน 2-9 ครั้งต่อจุด
- 3) บริเวณพื้นที่จุด 436, 442 และ 448 ทำการทาบจำนวน 14 จุด ระยะห่างระหว่างจุด 6 เมตร จำนวน 9 ครั้งต่อจุด

เมื่อทำการทาบซ้ำและกลบหลุมหมดแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังการทาบซ้ำ ผลของความแน่นหลังการทาบซ้ำ (แสดงในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่ามีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดอีก 1 จุด คือ จุด 448 ต้องทำการทาบซ้ำอีกเป็นครั้งที่สอง โดยทำการทาบจำนวน 6 ครั้งต่อจุด ระยะห่างระหว่างจุด 4.5 เมตร จำนวน 9 จุด เมื่อทำการทาบและกลบหลุมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบซ้ำครั้งที่สองปรากฏว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไม่ต้องทำการทาบอีก



รูปที่ 3.27 (ข) แสดงวิธีการทาบซ้ำ และจุดตกทดสอบซ้ำบริเวณโซน 4U

3.5.8 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 4C และ 4D

ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดเล็ก (LS418) ยกลูกตุ้มหนัก 15 ตัน ขนาดหน้าตัด 3×3 เมตร² ปล่อยลงมาจากระยะความสูง 22 เมตร² โดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 6×6 เมตร² เพียงรูปแบบเดียว การทุบจะแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ ในแนวที่ 1 ถึงแนวที่ 13 (กม. 2 + 080 ถึง กม. 2 + 120) ทำการทุบจำนวน 20 ครั้งต่อจุดและในแนวที่ 15 ถึงแนวที่ 27 (กม. 2 + 120 ถึง กม. 2 + 160) ทำการทุบจำนวน 23 ครั้งต่อจุด (ดังรูปที่ 3.28) การทุบจะกระทำเป็นช่วงย่อย ๆ โดยจำนวนครั้งของการทุบที่จุดต่าง ๆ จะไม่เท่ากันในแต่ละช่วงย่อย แต่สุดท้ายจำนวนครั้งรวมของการทุบในแต่ละจุดจะเท่ากันตามที่กำหนด

เมื่อทำการทุบและกลบหลุมที่เกิดจากการทุบหมดทั่วบริเวณแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังการทุบ ผลของความแน่นหลังการทุบ (แสดงในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่าทุกจุดผ่านเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		A
		○ 448						○ 450						○ 451				○ 452		○ 453				○ 454				B
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		C
																												D
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		E
																												F
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		G
		○ 445						○ 456						○ 457				○ 458		○ 459				○ 460				H
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		J
																												K
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		L
																												M
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		N
		○ 461						○ 462						○ 463				○ 464		○ 465				○ 466				P
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		Q
																												R
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		S
																												T
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		U
		○ 467						○ 468						○ 469				○ 470		○ 471				○ 472				V
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		W
																												X
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		Y
																												Z
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		AA
		○ 473						○ 474						○ 475				○ 476		○ 477				○ 478				AB
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		AC
																												AD
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		AE
																												AF
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		AG
		○ 479						○ 480						○ 481				○ 482		○ 483				○ 484				AH
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		AJ
																												AK
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		AL
		○ 485						○ 486						○ 487				○ 488		○ 489				○ 490				AM
20		20		20		20		20		20		20		23		23		23		23		23		23		23		AN

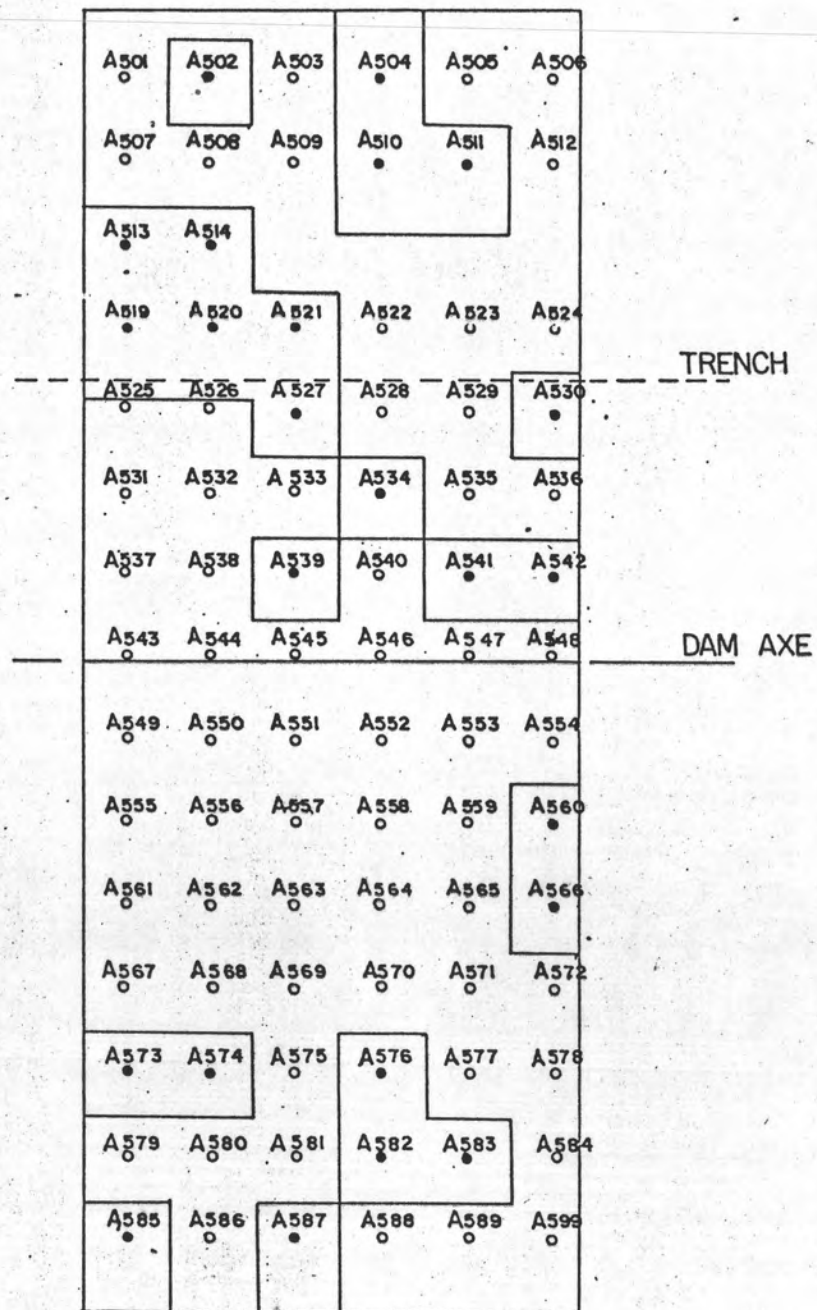
รูปที่ 3.28 แสดงวิธีการทาบและจุดตกทาบของบริเวณโซน 4C/D

3.5.9 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน 5U, 5C และ 5D

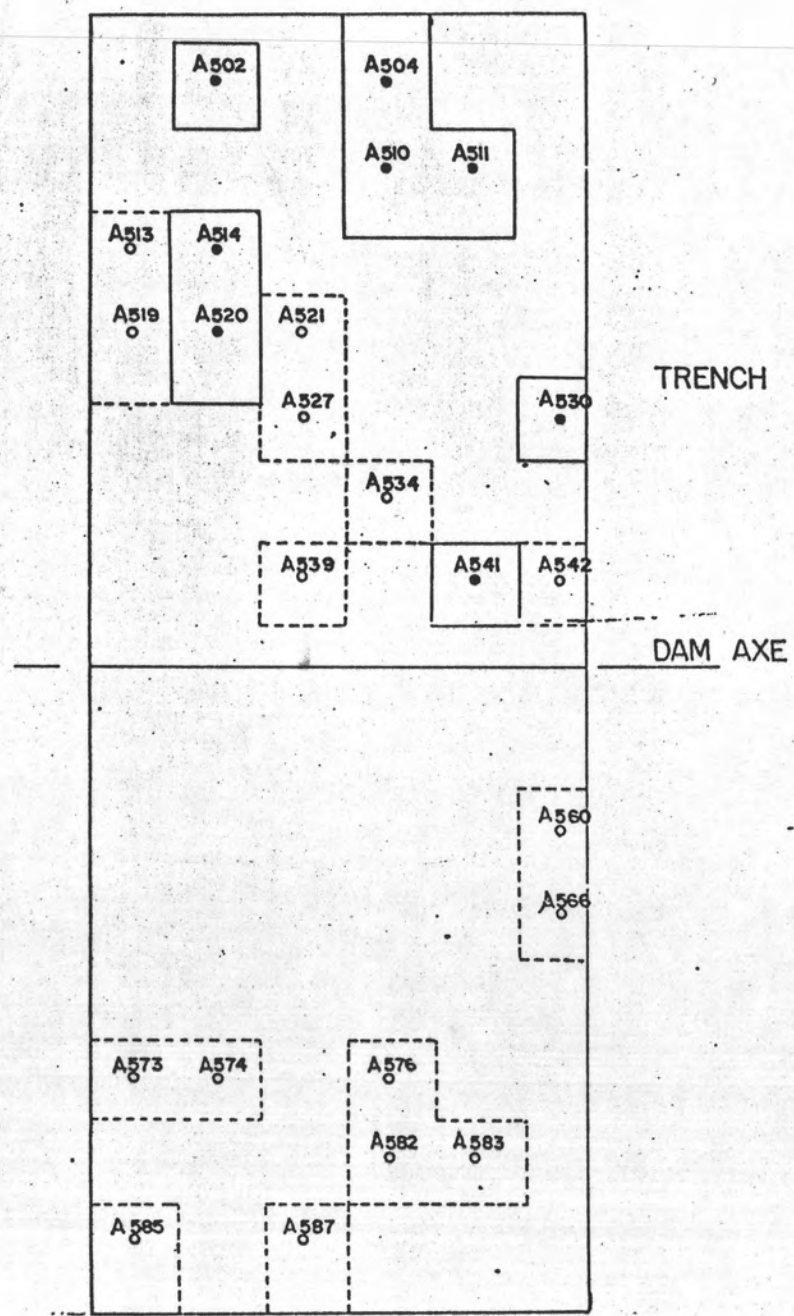
ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดเล็ก (LS418) ยกลูกตุ้มหนัก 15 ตัน ขนาดหน้าตัด 3 x 3 เมตร² ปล่อยลงมาจากระยะความสูง 22 เมตร² มีรูปแบบการทุบเป็นตารางแบบต่อเนื่อง จำนวน 1 ครั้งต่อจุด ตลอดทั้งโซน โดยการทุบในครั้งถัดไปจะมีพื้นที่คาบเกี่ยวกับการทุบในครั้งก่อนครั้งหนึ่งเสมอ ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน

เมื่อทำการทุบเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบหาความแน่น หลังจากทำการทุบ ผลของความแน่นหลังการทุบ (แสดงในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่าในโซน 5U มีจุดที่ความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 15 จุด จากทั้งหมด 42 จุด และในโซน 5C/D มีจุดที่ความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 9 จุด จากทั้งหมด 48 จุด จึงต้องทำการทุบซ้ำบริเวณที่ความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งวิธีการทุบซ้ำก็เหมือนกับการทุบในครั้งแรก คือ ทำการทุบเป็นตารางแบบต่อเนื่องจำนวน 1 ครั้งต่อจุด โดยมีพื้นที่คาบเกี่ยวกันครั้งหนึ่ง

เมื่อทำการทุบซ้ำเรียบร้อยแล้ว ทำการตอกทดสอบซ้ำปรากฏว่าโซน 5C/D มีความแน่นผ่านเกณฑ์ที่กำหนดให้ทุกจุด ส่วนโซน 5U ยังมีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดอีกจำนวน 8 จุด ต้องทำการทุบซ้ำครั้งที่สอง โดยการทุบซ้ำครั้งที่สองก็จะเหมือนกับการทุบซ้ำในครั้งแรก เมื่อทำการทุบเสร็จทำการตอกทดสอบครั้งที่สอง ปรากฏว่าทุกจุดผ่านเกณฑ์ที่กำหนดให้ทั้งหมด



รูปที่ 3.29 (ก) แสดงบริเวณที่ต้องทำการทาบซ้ำครั้งที่หนึ่งของโซนที่ 5

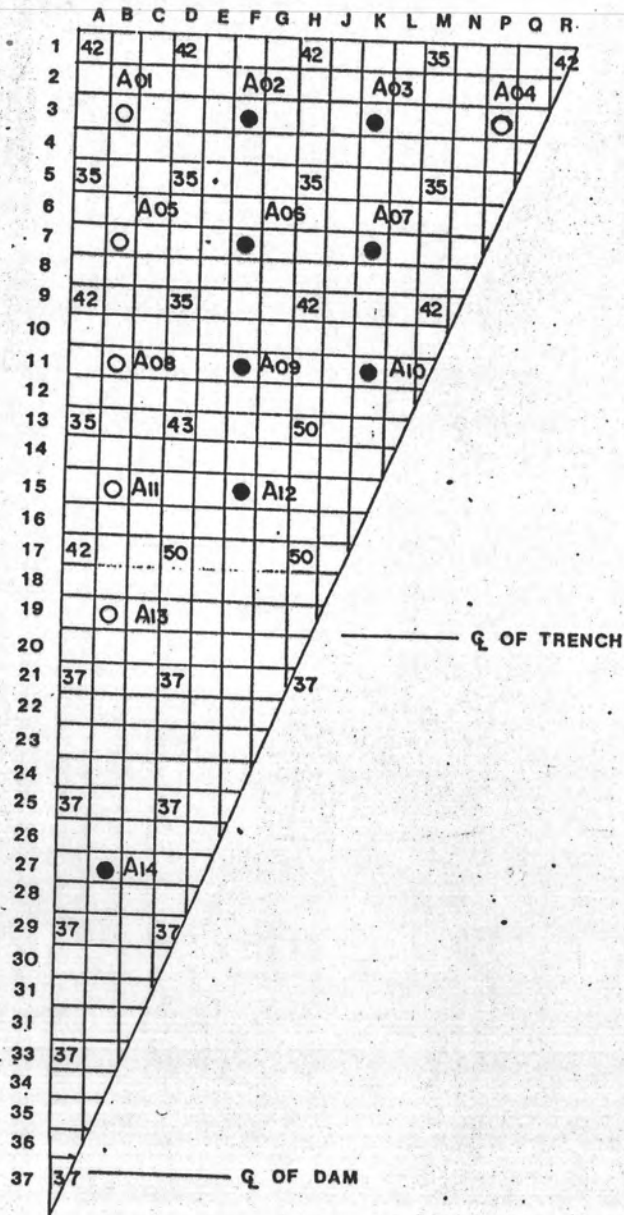


รูปที่ 3.29 (ข) แสดงบริเวณที่ต้องทำการขุดครั้งที่สองของโซนที่ 5

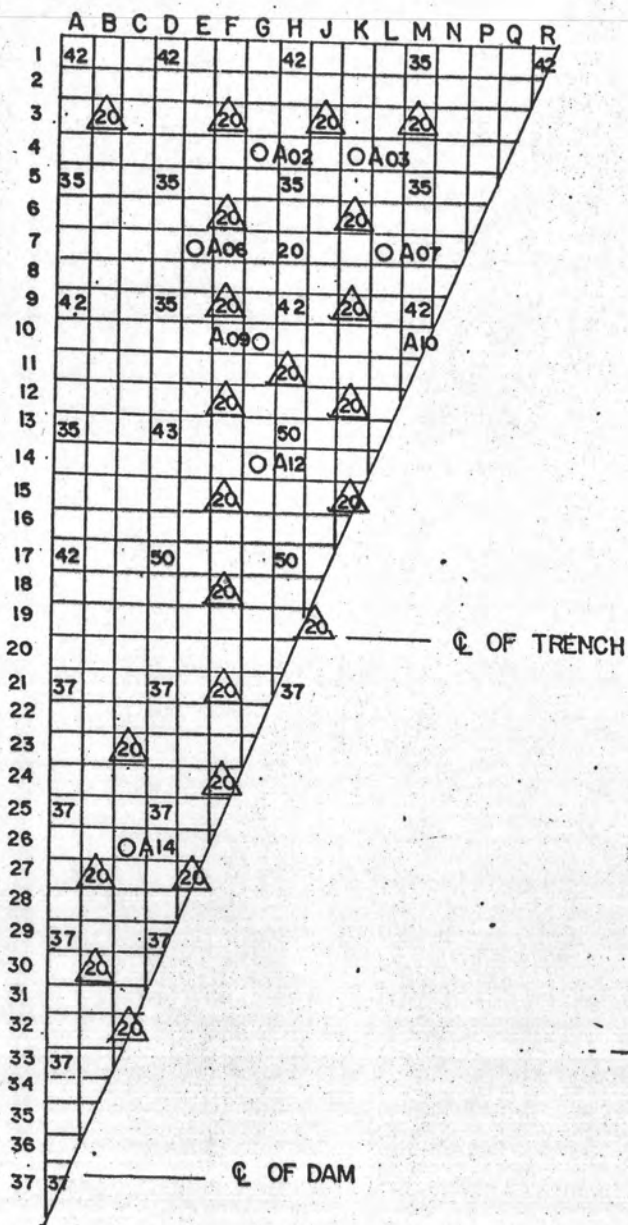
3.5.10 วิธีการปรับปรุงฐานรากบริเวณโซน AD

ทำการทุบโดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS528S) ยกหลุมตื้น
หนัก 30 ตัน ขนาดหน้าตัด 3×3 เมตร² ปล่องลงมาอย่างอิสระจากระยะ
ความสูง 22 เมตร โดยมีรูปแบบการทุบเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $12 \times$
 12 เมตร² การทุบที่แต่ละจุดจะมีจำนวนครั้งไม่เท่ากัน (ดังรูปที่ 3.30 ก.)

เมื่อทำการทุบและกลบหลุมที่เกิดจากการทุบทั่วบริเวณแล้ว
ทำการตอกทดสอบหาความแน่นหลังการทุบ ผลของความแน่นหลังการทุบ (แสดง
ในภาคผนวก ข.) ปรากฏว่ามีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 9 จุด จากทั้งหมด
14 จุด จึงต้องทำการทุบซ้ำบริเวณที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งวิธีการทุบซ้ำ
โดยทำการทุบที่จุด $\triangle 20$ จำนวน 20 ครั้งต่อจุด (ดังรูปที่ 3.30 ข.) เมื่อทำการ
ทุบซ้ำและกลบหลุมเรียบร้อยแล้วทำการตอกทดสอบซ้ำ ปรากฏว่าทุกจุดผ่านเกณฑ์
ที่กำหนด



รูปที่ 3.30 (ก) แสดงวิธีการทาบและจุดตอกทดสอบบริเวณโซน AD



รูปที่ 3.30 (ข) แสดงวิธีการท่บข้ำ และจุดตอกทดสอบข้ำบริเวณโซน AD

3.6 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่บริเวณโซนต่าง ๆ (Energy per. Unit Area)

จากวิธีการปรับปรุงฐานรากดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5 สามารถจัดกลุ่มของโซนต่าง ๆ ตามพลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ

กลุ่มที่ 1 โซนที่ใช้พลังงานในการทុบต่อพื้นที่สม่ำเสมอ ได้แก่ โซน 1U, โซน 1C/D, โซน 2C/D, โซน 3C/D, โซน 4U, โซน 4C/D, โซน 5U/C/D เป็นต้น

กลุ่มที่ 2 โซนที่ใช้พลังงานในการทុบต่อพื้นที่ไม่สม่ำเสมอ ได้แก่ โซน 2U, โซน 3U และโซน AD เป็นต้น

3.6.1 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่บริเวณโซน 1U

โซน 1U จะทำการทុบโดยใช้พลังงานในการทុบ/พื้นที่อย่างสม่ำเสมอ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ บริเวณแปลงทดสอบที่ 2 พื้นที่ประมาณ 3,024 ตารางเมตร ทำการทុบ 6 ช่วง และบริเวณนอกแปลงทดสอบที่ 2 พื้นที่ประมาณ 5,616 ตารางเมตร ทำการทុบ 5 ช่วง ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการทុบแต่ละช่วงของบริเวณต่าง ๆ มีค่าดังนี้ คือ

$$\text{ช่วงที่ 1 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่} = \frac{4 \times 22 \times 30}{12 \times 12} = 18.33 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 2 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่} = \frac{4 \times 22 \times 30}{12 \times 12} = 18.33 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 3 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่} = \frac{6 \times 22 \times 30}{8.5 \times 8.5} = 55.00 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 4 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่} = \frac{8 \times 22 \times 30}{8.5 \times 8.5} = 73.33 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 5 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่} = \frac{10 \times 22 \times 30}{6 \times 6} = 183.33 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 6 พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่} = \frac{10 \times 22 \times 30}{6 \times 6} = 183.33 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่ (นอกแปลงทดสอบที่ 2)} = 348.32 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่ (แปลงทดสอบที่ 2)} = 531.65 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่ โซน 1U} = \underline{412.48} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

จากผลการตอกทดสอบ (Test) ปรากฏว่ามีบางจุดไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ต้องทำการทุบซ้ำเพิ่มอีกจำนวน 124 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำต่อพื้นที่} = \frac{124 \times 22 \times 30}{8640} = 9.47 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานที่ใช้ในการทุบทั้งหมดต่อพื้นที่ โซน 1U} \quad 412.48 + 9.47 = \underline{\underline{421.95}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.2 พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่บริเวณโซน 1C/D

โซน 1C และ 1D มีพื้นที่ประมาณ 12,210 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่สม่ำเสมอ แบ่งการทุบออกเป็น 2 ช่วง

$$\text{ช่วงที่ 1 พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่} = \frac{72 \times 77 \times 22 \times 30}{12,210} = 299.68 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 2 พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่} = \frac{30 \times 65 \times 22 \times 30}{12,210} = 105.40 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{ผลรวมพลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่} = 405.08 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดทำการทุบซ้ำอีก จำนวน 1,435 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำต่อพื้นที่} = \frac{1,435 \times 22 \times 30}{12,210} = 77.57 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่ โซน 1C/D} = \underline{\underline{482.65}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.3 พลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่บริเวณโซน 2U

โซน 2U มีพื้นที่ประมาณ 14,544 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่ไม่สม่ำเสมอ โดยทำการทุบ 101 จุด รวมจำนวนครั้งการทุบทั้งหมด 7,781 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่} = \frac{7,781 \times 22 \times 30}{14,544} = 353.10 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบซ้ำอีก
จำนวน 846 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำตอพื้นที่} = \frac{846 \times 22 \times 30}{14,544} = 38.39 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่ โซน 2U} = \underline{\underline{391.89}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.4 พลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่บริเวณโซน 2C/D

โซน 2C และ 2D มีพื้นที่ประมาณ 9,725 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่สม่ำเสมอแบ่งการทุบออกเป็น 2 ช่วง

$$\text{ช่วงที่ 1 พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{67 \times 72 \times 22 \times 30}{9,725} = 327.39 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 2 พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{45 \times 5 \times 22 \times 30}{9,725} = 158.81 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่ โซน 2C/D} = \underline{\underline{486.20}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.5 พลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่บริเวณโซน 3U

โซน 3U มีพื้นที่ประมาณ 15,552 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่ไม่สม่ำเสมอ แบ่งการทุบออกเป็น 2 ชนิด ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการทุบตอพื้นที่ของแต่ละชนิดเป็นดังนี้

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่ (LS 418)} = \frac{5616 \times 22 \times 15}{15,552} = 119.17 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทบ/พื้นที่ (LS 528S)} = \frac{5087 \times 22 \times 30}{15552} = 215.88 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{ผลรวมพลังงานที่ใช้ในการทบ/พื้นที่} = 335.05 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทบซ้ำ โดยรถปั้นจั่นขนาดใหญ่ (LS 528S) ทบอีกจำนวน 1,600 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทบ/พื้นที่} = \frac{1600 \times 22 \times 30}{15,552} = 67.90 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

ภายหลังจากการตอกทดสอบซ้ำ ปรากฏว่ายังมีบางบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทบซ้ำอีกเป็นครั้งที่สอง โดยใช้รถปั้นจั่นขนาดใหญ่ทบเพิ่มอีกจำนวน 1,061 ครั้ง และใช้รถปั้นจั่นขนาดเล็กทำการทบเพิ่มอีกจำนวน 288 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทบซ้ำครั้งที่สอง/พื้นที่ (LS 418)} = \frac{288 \times 22 \times 15}{15,552} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$= 6.11 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทบซ้ำครั้งที่สอง/พื้นที่ (LS 528S)} = \frac{1061 \times 22 \times 30}{15,522} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$= 45.03 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{ผลรวมของพลังงานที่ใช้ในการทบซ้ำครั้งที่สอง/พื้นที่} = 51.14 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

เมื่อทำการตอกทดสอบซ้ำครั้งที่สอง ปรากฏว่ายังมีบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ต้องทำการทบซ้ำอีกเป็นครั้งที่สามจำนวน 180 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทบซ้ำครั้งที่สาม/พื้นที่} = 7.64 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทบ/พื้นที่ โชน 3U} = \underline{\underline{502.60}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.6 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่บริเวณโซน 3C/D

โซน 3C และ 3D มีพื้นที่ประมาณ 15,466 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่สม่ำเสมอ แบ่งออกเป็น 2 บริเวณ ได้แก่ ระยะ กม. 2+160 ถึง กม. 2+200 กับระยะ กม. 2+200 ถึง ระยะ กม. 2+300

3.6.6.1 ระยะ กม. 2+160 ถึง ระยะ กม. 2+200

(แนวที่ 1 ถึง แนวที่ 13) มีพื้นที่ประมาณ 4,536 ตารางเมตร

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{126 \times 27 \times 22 \times 15}{126 \times 6 \times 6} = 247.50 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบซ้ำอีกจำนวน 140 ครั้ง

$$\text{พลังที่ใช้ในการทุบซ้ำ/พื้นที่} = \frac{140 \times 22 \times 30}{126 \times 6 \times 6} = 20.37 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \underline{\underline{267.87}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.6.2 ระยะ กม. 2+200 ถึง ระยะ กม. 2+300 (แนวที่ 15 ถึง แนวที่ 47) มีพื้นที่ประมาณ 10,930 ตารางเมตร แบ่งการทุบออกเป็น 2 ช่วง

$$\text{ชุดที่ 1 พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{70 \times 81 \times 22 \times 30}{10930} = 342.38 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ชุดที่ 2 พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{30 \times 64 \times 22 \times 30}{10930} = 115.94 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{ผลรวมพลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = 458.32 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบซ้ำอีกจำนวน 680 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำ/พื้นที่} = \frac{680 \times 22 \times 30}{10930} = 41.06 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

ภายหลังจากทำการทุบซ้ำ ปรากฏว่ายังมีบางบริเวณที่ความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบซ้ำอีกเป็นครั้งที่ 2 จำนวน 140 ครั้ง

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ใช้ในการทុบซ้ำครั้งที่สอง/พื้นที่} &= \frac{140 \times 22 \times 30}{10930} = 8.45 \text{ ตัน ม./ม.}^2 \\ \therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} &= 458.32 + 41.06 + 8.45 \text{ ตัน ม./ม.}^2 \\ &= \underline{\underline{507.83}} \text{ ตัน ม./ม.}^2 \end{aligned}$$

3.6.7 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่บริเวณโซน 4U

โซน 4U มีพื้นที่ประมาณ 9,000 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่สว่านเสมอ แบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือบริเวณที่ทำการทុบ 3 ช่วง และบริเวณที่ทำการทុบ 4 ช่วง

3.6.7.1 บริเวณที่ทำการทុบ 3 ช่วง มีพื้นที่ประมาณ 5,436 ตารางเมตร

$$\text{ช่วงที่ 1 พลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = \frac{3 \times 22 \times 15}{6 \times 6} = 27.50 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 2 พลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = \frac{3 \times 22 \times 15}{6 \times 6} = 27.50 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 3 พลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = \frac{5 \times 22 \times 15}{4.25 \times 4.25} = 91.67 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{ผลรวมพลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = \underline{\underline{146.67}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด
ต้องทำการทุบซ้ำอีก จำนวน 62 ครั้ง

$$\text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{62 \times 22 \times 15}{5436} = 3.76 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \underline{\underline{150.43}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.7.2 บริเวณที่ทำการทุบ 4 ช่วง มีพื้นที่ประมาณ 3,564 ตารางเมตร

$$\text{ช่วงที่ 1 ถึงช่วงที่ 3 พลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = 146.67 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\text{ช่วงที่ 4 พลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = \frac{10 \times 22 \times 15}{6 \times 6} = 91.67 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{ผลรวมพลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = \underline{238.33} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด
ทำการทุบซ้ำอีกจำนวน 171 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำ/พื้นที่} = \frac{171 \times 22 \times 15}{3564} = 15.83 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

ภายหลังจากทำการทุบซ้ำ ปรากฏว่ายังมีบางบริเวณ
ที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบซ้ำอีกเป็นครั้งที่สอง จำนวน 54 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำครั้งที่สอง/พื้นที่} = \frac{54 \times 22 \times 15}{3564} = 5.00 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = 283.33 + 15.83 + 5.00 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$= \underline{299.16} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.8 พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่บริเวณโซน 4C/D

โซน 4C และ 4D มีพื้นที่ประมาณ 9,576 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่ที่สม่ำเสมอ แบ่งออกเป็น 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณระยะ กม. 2+080 ถึงระยะ กม. 2+120 กับ ระยะ กม. 2+120 ถึงระยะ กม. 2+160

3.6.8.1 ระยะ กม. 2+080 ถึง ระยะ กม. 2+120

(แนวที่ 1 ถึง แนวที่ 13) มีพื้นที่ 4,788 ตารางเมตร

$$\therefore \text{พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{20 \times 22 \times 15}{6 \times 6} = \underline{183.33} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.8.2 ระยะ กม. 2+120 ถึง ระยะ กม. 2+160 (แนว

ที่ 15 ถึงแนวที่ 27) มีพื้นที่ 4,788 ตารางเมตร

$$\therefore \text{พลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = \frac{23 \times 22 \times 15}{6 \times 6} = \underline{210.83} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.9 พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่บริเวณโซน 5U

โซน 5U มีพื้นที่ประมาณ 8,800 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทុบต่อพื้นที่สม่ำเสมอ รวมจำนวนครั้งของการทុบทั้งหมด 3,910 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทុบ/พื้นที่} = \frac{3910 \times 22 \times 15}{8800} = 146.63 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบซ้ำอีกจำนวน 1,215 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำ/พื้นที่} = \frac{1215 \times 22 \times 15}{8800} = 45.56 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

ภายหลังจากการทำการทุบซ้ำ ปรากฏว่ายังมีบางบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบซ้ำอีกเป็นครั้งที่สอง จำนวน 648 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำครั้งที่สอง/พื้นที่} = \frac{648 \times 22 \times 15}{8800} = 24.30 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \underline{216.49} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.10 พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่บริเวณโซน 5C/D

โซน 5C/D มีพื้นที่ประมาณ 8,800 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทุบต่อพื้นที่สม่ำเสมอ รวมจำนวนครั้งของการทุบทั้งหมด 3,910 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{3910 \times 22 \times 15}{8800} = 146.63 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่มีความแน่นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบซ้ำอีกจำนวน 729 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำ/พื้นที่} = \frac{729 \times 22 \times 15}{8800} = 27.34 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \underline{173.97} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

3.6.11 พลังงานที่ใช้ในการทุบต้อนพื้นที่บริเวณโซน AD

โซน AD มีพื้นที่ประมาณ 3,744 ตารางเมตร พลังงานที่ใช้ในการทุบไม่สม่ำเสมอ โดยทำการทุบ จำนวน 28 จุด รวมจำนวนครั้งการทุบทั้งหมด 1,107 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \frac{1107 \times 22 \times 30}{3744} = 195.14 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

สำหรับบริเวณที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทำการทุบอีกจำนวน 490 ครั้ง

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการทุบซ้ำ/พื้นที่} = \frac{490 \times 22 \times 30}{3744} = 86.38 \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

$$\therefore \text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทุบ/พื้นที่} = \underline{\underline{281.52}} \text{ ตัน ม./ม.}^2$$

ตารางที่ 3.5 แสดงจำนวนครั้งของการทาบบริเวณโซนต่าง ๆ

โซน	พื้นที่	น้ำหนัก	จำนวนครั้งการทาบ (น)				
			Tamp	Retamp #1	Retamp #2	Retamp #3	Total
1U	๘๖๕๐	๓๐	๕๕๐๐	๑๖๕	-	-	๕๕๖๕
2U	๑๕๕๕๕	๓๐	๗๗๕๑	๕๕๖	-	-	๘๖๖๗
1C/D	๑๖๖๑๐	๓๐	๗๕๕๕	๑๕๓๕	-	-	๙๐๙๐
2C/D	๕๗๖๕	๓๐	๕๕๖๕	๖๓๕๑	-	-	๗๑๖๕
3U	๑๕๕๕๖	๓๐	๘๖๕๕	๑๖๖๐	๑๓๕๕	๑๕๐	๑๑๕๕๓
3C/D(R)	๑๐๕๓๐	๓๐	๗๕๕๐	๖๕๐	๑๕๐	-	๘๕๖๐
3C/D(L)	๕๕๓๖	๑๕	๓๕๐๖	๖๕๐	-	-	๓๖๕๖
AD	๓๗๕๕	๓๐	๑๑๐๗	๕๕๐	-	-	๑๕๕๗
4U(3)	๕๕๓๖	๑๕	๑๖๖๐	๖๖	-	-	๑๗๖๖
4U(4)	๓๕๖๕	๑๕	๖๐๗๕	๑๗๑	๕๕	-	๖๓๐๕
4C/D(L)	๕๗๕๕	๑๕	๖๖๖๐	-	-	-	๖๖๖๐
4C/D(R)	๕๗๕๕	๑๕	๓๐๕๕	-	-	-	๓๐๕๕
5U	๘๘๐๐	๑๕	๓๕๑๐	๑๖๑๕	-	-	๕๑๒๕
5C/D	๘๘๐๐	๑๕	๓๕๑๐	๗๖๕	-	-	๔๒๗๕

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการทบต่อนั้นที่บริเวณโซนต่าง ๆ

โซน	ความหนา ชั้นทราย	E/h	พลังงานที่ใช้ในการทบ/พื้นที่ (E/A)				
			Tamp	Retamp # 1	Retamp # 2	Retamp # 3	Total
1U	๑๐.๒๔	๖๖๐	๕๑๖.๔๔	๔.๕๗	-	-	๕๒๑.๐๑
2U	๑๐.๘๖	๖๖๐	๓๕๓.๑๐	๓๘.๓๔	-	-	๓๙๑.๔๔
1C/D	๔.๔๔	๖๖๐	๔๐๕.๐๔	๗๗.๕๗	-	-	๔๘๒.๖๑
2C/D	๑๐.๓๘	๖๖๐	๓๖๗.๓๘	๑๕๘.๘๑	-	-	๕๒๖.๑๙
3U	๔.๗๔	๖๖๐	๓๖๔.๑๓	๖๘.๗๕	๕๗.๐๘	๗.๖๕	๕๐๗.๖๑
3C/D(R)	๑๐.๖๓	๖๖๐	๔๕๘.๓๖	๕๑.๐๖	๘.๕๕	-	๕๑๗.๘๗
3C/D(L)	๖.๘๑	๓๓๐	๒๕๗.๕๐	๒๐.๓๗	-	-	๒๗๗.๘๗
AD	๖.๕๕	๖๖๐	๑๕๕.๑๕	๘๖.๓๘	-	-	๒๔๑.๕๓
4U(3)	๔.๕๖	๓๓๐	๑๕๖.๖๖	๓.๗๖	-	-	๑๕๐.๔๒
4U(4)	๖.๓๖	๓๓๐	๑๓๘.๓๓	๑๕.๘๓	๕.๐๐	-	๒๕๙.๑๖
4C/D(L)	๔.๐๕	๓๓๐	๑๘๓.๓๓	-	-	-	๑๘๓.๓๓
4C/D(R)	๔.๗๑	๓๓๐	๒๑๐.๘๓	-	-	-	๒๑๐.๘๓
5U	๖.๕๐	๓๓๐	๑๕๖.๖๓	๔๕.๕๖	๒๔.๓๐	-	๒๒๖.๔๙
5C/D	๖.๓๕	๓๓๐	๑๕๖.๖๓	๒๗.๓๕	-	-	๑๘๓.๙๘