การก่อสร้างเขื่อนดิน
และข้อควรสังเกต

โดย นายชลอ รัตนเสน
ช่างพิเศษฝ่ายเขื่อน

รวมรวบแก้ไขครั้งที่ ๒ (๒๔ ตุลาคม ๒๕๑๖)

ผู้รวบรวม
นายประวิทย์ เกรัมย์
หัวหน้ากลุ่มงานบริหารจัดการโครงการก่อสร้าง
สำนักโครงการขนาดใหญ่

วันที่ ๙ พฤษภาคม ๒๕๕๔

การก่อสร้างเขื่อนดิน และข้อควรสังเกต

ชลอ รัตนเสน

อารัมภบท

งานของกรมชลประทาน ขณะนี้การสร้างเขื่อนดินเพื่อเก็บกักน้ำกำลังมีบทบาทมากขึ้นตามลำดับ และทำเลที่จะสร้างเขื่อนดิน และ Material ต่าง ๆ ก็หาได้ง่ายทั่ว ๆ ไป คิดราคาเปรียบเทียบกับการก่อสร้างเขื่อน Concrete แล้ว เขื่อนดินถูกกว่ามาก เขื่อนดินจึงแพร่หลายมากขึ้นตามลำดับ

วิธีการก่อสร้างเขื่อนดิน และข้อสังเกตตามที่ผมจะบรรยายต่อไปนี้ ได้รวบรวมจากงานต่าง ๆ ที่ได้ผ่านมาบ้าง และจากตำหรับตำราบ้าง ซึ่งอาจจะเป็นประโยชน์ได้ไม่มากก็น้อย และถ้ามีอะไรที่ผิดพลาดโปรดให้อภัยด้วย และจะพยายามแก้ไขให้ถูกต้องและเพิ่มเติมในครั้งต่อ ๆ ไป.

นายชลอ รัตนเสน

ช่างพิเศษฝ่ายเขื่อน

รวบรวมแก้ไขครั้งที่ ๒ ๒๔ ตุลาคม ๒๕๑๖

CONSTRUCTION

1. General Consideration

    1.1 Construction Program

    1.2 Construction-Plant Layout

    1.3 Excavation and Placing Equipment

    1.4 Material-handing and Storage facilities

    1.5 Transportation facilities

    1.6 Stream diversion during construction

2. Field laboratory operations

3. Stripping the foundation

4. Unwatering the foundation

5. Cutoff Structures

    5.1 Cutoff trenches

    5.2 Concrete cutoff walls

    5.3 Sheet-piling cutoff walls

    5.4 Impervious upstream blanket

    5.5 Toe and abutment drains

    5.6 Downstream filter blanket

6. Borrow-pit Excavation

7. Rolled-fill Construction

    7.1 Embankment material Selection

    7.2 Material Placing

    7.3 Compaction

    7.4 Moisture control

    7.5 Construction control tests

7.6 Field density test

7.7 Laboratory comparison of field test

8. Stabilizing fills

9. Upstream Slope protection

10. Downstream Slope protection

11. Progress reports

12. Supervision and inspection

13. Inspection reports

ประวัติของการก่อสร้างเขื่อนดิน

เขื่อนดินเก็บกักน้ำเพื่อการชลประทาน ได้มีมาแล้วแต่โบราณกาลสมัยปี พ.ศ. ๕๐๔ ประมาณ ๒ พันกว่าปีมาแล้ว เขื่อนดินนี้สร้างในประเทศลังกา มีขนาดความยาวทั้งหมด ๑๑ ไมล์ กว้างที่ฐานประมาณ ๒๐๐ ฟุต หลังเขื่อนกว้าง ๓๐ ฟุต สูงประมาณ ๗๐ ฟุต ใช้ดินในการก่อสร้าง ประมาณ ๑๗,๐๐๐,๐๐๐ ลูกบาศก์หลา

ในเวลาต่อมาเขื่อนดินยิ่งแพร่หลายมากขึ้น เพราะการก่อสร้างเขื่อนดินหาวัสดุง่าย ก่อสร้างง่าย ฐานรากก็ไม่ต้องการฐานรากเป็นหินเช่นเขื่อนคอนกรีต หรือเขื่อนหินก่อ สามารถจะสร้างบนฐานรากที่เป็นดินก็ได้ และการใช้น้ำมีความสำคัญและจำเป็นเพิ่มขึ้นเสมอ การก่อสร้างเขื่อนเก็บกักน้ำก็ยิ่งมีความสำคัญมากขึ้นเช่นกัน และทำเลที่จะสร้างเขื่อนคอนกรีตได้ก็เหลือน้อยลง ความสำคัญของเขื่อนดินจึงเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งการออกแบบก็ก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น และสามารถแก้ไขดัดแปลงเขื่อนดินให้ประหยัดได้ แต่ต่อมาเนื่องจากความเข้าใจผิดคิดว่าการก่อสร้างเขื่อนดินนี้ไม่ต้องการหลักวิชาการและความชำนาญ จึงทำให้เกิด Failure ขึ้นเช่นที่เกิดขึ้นแล้ว จึงได้แก้ไขโดยอาศัยหลักการวิชาการทางออกแบบและวิธีการก่อสร้างให้ดีขึ้น พอจะสรุปหลักเกณฑ์การออกแบบและก่อสร้างได้ดังนี้ :–

๑. สำรวจสภาพของฐานรากและวัสดุที่จะใช้ก่อสร้าง

๒. ใช้ความชำนาญในหลักวิชาการและเทคนิคต่าง ๆ ทำการออกแบบ

๓. วางแผนวิธีการควบคุมในการก่อสร้าง

๔. ใช้ความรู้ความชำนาญในวิชา Soil Mechanics ในการก่อสร้างและออกแบบ ถ้าได้ดำเนินการก่อสร้างออกแบบเขื่อนดินโดยถูกต้องตามหลักวิชาการ เช่นเดียวกับเขื่อนคอนกรีต หรือหินก่อแล้ว เขื่อนดินก็จะมีความคงทนถาวรไว้ใจได้เช่นกัน

ตั้งแต่เริ่มมีเขื่อนดินจนกระทั่งปี ค.ศ. ๑๙๒๕ มีการสร้างเขื่อนดินที่สูงกว่า ๑๐๐ ฟุต น้อยมากมีของ Bureau of Reclamation อยู่เพียง ๓ เขื่อน ซึ่งสูงกว่า ๑๐๐ ฟุต แต่ไม่เกิน ๑๒๕ ฟุต ในจำนวนทั้งหมดในขณะนั้นมีเขื่อนอยู่ ๒๓ เขื่อนด้วยกัน

การแบ่งลักษณะของเขื่อน (Classification)

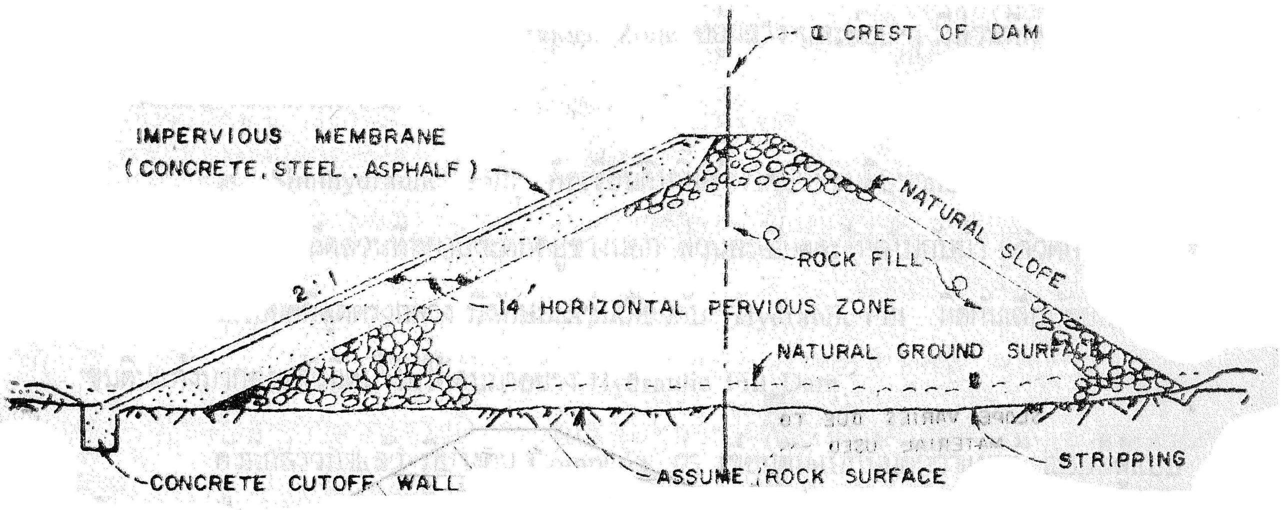
เขื่อนดินสามารถแบ่งตามแบบของ Bureau of Reclamation ได้ดังนี้ คือ แบ่งตามลักษณะการ Design และแบ่งตามลักษณะของการก่อสร้าง แบ่งตามลักษณะการ Design สามารถแบ่งได้เป็น ๓ ชนิด

๑. Homogeneous Embankment คือ เขื่อนดินที่สร้างขึ้นจาก Material หรือดินชนิดเดียวหรือใกล้เคียงกันตลอด เพียงแต่จัดเม็ดดินที่หยาบกว่าอยู่ข้างผิวนอก และละเอียดกว่าอยู่ข้างในตามลำดับ โดยถือศูนย์กลางของเขื่อนเป็นส่วนที่ละเอียดที่สุด นิยมสร้างเมื่อไม่สามารถจะหาดินชนิดที่มีเม็ดขนาดต่าง ๆ กันมากได้หรือหาได้ยาก

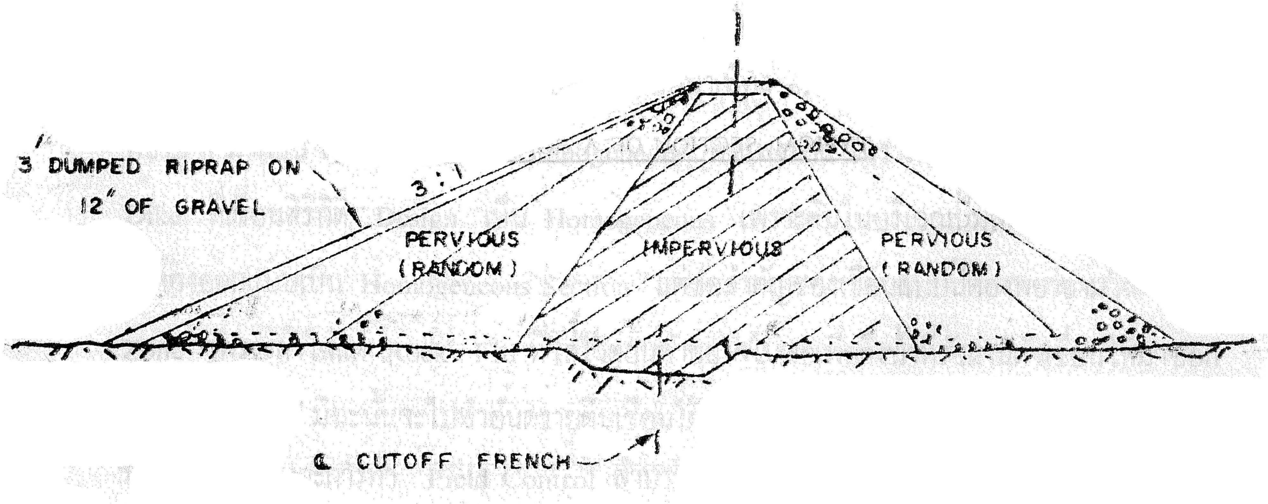
๒. zone Embankment คือ เขื่อนดินประเภท Rool Fill ชนิดหนึ่ง การ Design จัดให้ Zone ที่เป็น Impervious อยู่กลาง และ Zone ที่เป็น Pervious อยู่ถัดไปข้างนอกตามลำดับ บางเขื่อนแบ่งเป็นหลาย Zone ก็มี ขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินหรือหินที่หาได้ง่ายในบริเวณนั้น

๓. Earth and Rock Fill Embankment เป็นเขื่อนดินชนิดหนึ่งซึ่งมี Heavy Rock Fill อยู่ทางด้านเหนือน้ำหรือท้ายน้ำหรือทั้งสองข้าง และมี Impervious Zone อยู่ด้านนอกเป็น Membrane หรือ Core Zone อยู่ตรงกลาง การพิจารณาออกแบบๆ นี้ เนื่องมาจากหินหาง่ายกว่าดิน และสามารถออกแบบ Slope ให้ชันขึ้นได้ เปลืองวัสดุก่อสร้างน้อยกว่าดิน และตัดปัญหาเรื่อง Moisture และ Compaction ไปได้มาก แบ่งตามลักษณะวิธีการก่อสร้างสามารถแบ่งได้เป็น ๓ ชนิดคือ :-

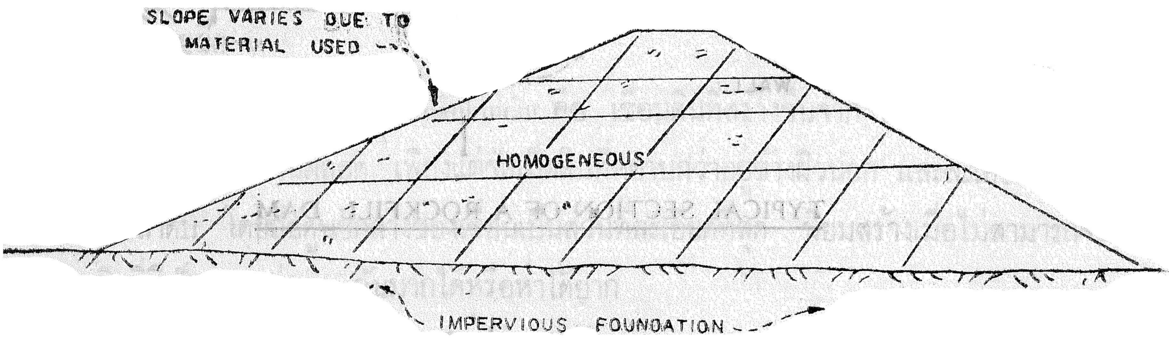
๑. Rolled Earth Fill เป็นเขื่อนดินที่ก่อสร้างด้วยการเอาดินหรือหินมาปูเป็นชั้นแล้วบดทับด้วยเครื่องมือบดทับเป็น Sheep foot, Rubber tire Roller หรือเครื่องมืออย่างอื่น



TYPICAL SECTION OF A ROCKFILL DAM



TYPICAL SECTION OF A ZONEO EMBANKMENT



TYPICAL SECTION OF A HOMOGENOUS DAM

๒. Hydraulic Fill Dam คือเขื่อนดินที่มีวิธีการถมดินโดยการเอาดินกับน้ำมาผสมกัน และสูบขึ้นมาถมเขื่อนด้วยท่อหรือราง แล้วปล่อยให้ปลายท่อหรือรางตกตรงริมนอกของเขื่อนเป็นระยะไป ดินส่วนที่หยาบจะตกอยู่ด้านนอกส่วนที่ละเอียดจะไหลไปอยู่ตรงกลางโดยอัตโนมัติ ทำให้เกิดเป็นเขื่อนดินที่มีส่วนละเอียด Impervious Zone อยู่กลาง และค่อย ๆ มีส่วนที่หยาบเรียงจากข้างในไปข้างนอกตามลำดับ

๓. Simihydraulic Fill คือเขื่อนดินที่สร้างโดยวิธีขนดินมากองไว้ริม ๆ ด้านนอกของเขื่อนแล้วใช้น้ำฉีดส่วนที่หยาบจะตกอยู่ข้างนอก ส่วนละเอียดจะไหลไปกับน้ำ แล้วตกไล่ไปจากหยาบจนถึงละเอียดที่สุดตรงกลาง มีลักษณะเช่นเดียวกับ Hydraulic Fill ผิดกันเล็กน้อยที่แบบนี้ขนดินแห้งมากองแล้วฉีดน้ำไม่ได้สูบมาอย่าง Hydraulic Fill Dam

ดังที่กล่าวมาแล้ว มีบางคน Complain ว่า เขื่อนดินแบบนั้นดีกว่าแบบนี้ แบบนี้สู้แบบนั้นไม่ได้ เช่น บอกว่าการ Design เขื่อนดินเป็นแบบ Homogeneous สู้ Design เป็น Zone Embankment ไม่ได้ สร้างแล้วไม่พังเป็นต้น ผมเห็นว่าเป็นการเข้าใจผิด Designer เขาพิจารณา Design Section ตามวัสดุที่หาได้ง่าย ๆ ในบริเวณนั้น เพื่อให้การก่อสร้างประหยัดที่สุด และพิจารณาในด้านความแข็งแรง ตัวอย่าง เขื่อนแก่งกระจาน Design เป็น Zone Embankment เพราะดินบริเวณนี้มีลูกรังปนดินเหนียวอยู่ตอนบนหนาเพียง ๑.๐๐ เมตรเท่านั้น ลึกจากนี้เป็นหินผุหยาบ ๆ มากขึ้น ถ้า Design เป็น Homogeneous คงแพงมาก เพราะต้องไปหาดินไกล Saddle Dike ที่เขื่อนสิริกิติ์ Design เป็น Homogeneous เพราะดินในบริเวณนี้มีลักษณะคล้ายกันมาก จึงต้องออกแบบเป็น Homogeneous Section แต่ข้อสำคัญของเขื่อนแบบนี้ต้องพยายามใส่ Filter Zone เพราะถ้าใส่แต่ Rock Fill ที่ใส่ไว้ตอนท้ายอาจไม่พอเพื่อดึงน้ำที่รั่วผ่านตัวเขื่อนให้มาออกใน Zone นี้ มิฉะนั้นจะไปทำอันตรายตีนเขื่อนได้ ส่วน Hydraulic Fill นั้น ในสมัยนี้ไม่ค่อยมีใครสร้าง เพราะการทำ Field Control ลำบาก และสมัยนี้เครื่องบดทับดินและ Equipment ต่างเจริญก้าวหน้าไปมาก หาได้ง่ายและเขื่อนประเภทนี้สู้ Roll Earth Fill ไม่ได้ ถ้าสร้างในบริเวณที่มี Earth Quake เช่น ตัวอย่างในรัฐ California เมื่อ ๒ ปีที่แล้วมีแผ่นดินไหว เขื่อนแบบ Hydraulic Fill เสียหายเป็นจำนวนมาก

วิธีการก่อสร้างเขื่อนดิน (Construction)

๑. การพิจารณาโดยทั่ว ๆ ไป (General Considerations)

พิจารณาวิธีการก่อสร้างที่ดีที่สุด เครื่องจักรเครื่องมือต้องมีจำนวนพอเพียง และกำหนดวิธีการดำเนินงานอย่างระมัดระวัง ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญของการก่อสร้างเขื่อนดินมาก และไม่ใช่การออกแบบและกำหนดวิธีการก่อสร้างดังกล่าวแล้วเท่านั้น การพิจารณาเลือกใช้ Material ที่หาได้ในบริเวณนั้น เพื่อนำมาในการออกแบบให้เหมาะสมและปลอดภัย การทำงานให้เป็นไปตามแผนการ มีความสำคัญมากเหมือนกันที่จะทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปภายในกำหนดเวลาและภายในวงเงินที่กำหนดไว้

๑.๑ แผนงานก่อสร้าง (Construction Program)

การเตรียมโปรแกรมก่อสร้างหรือการวางแผน เป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้มีจังหวะและความสัมพันธ์กับการดำเนินงานอย่างมากมายสำหรับงานใหญ่ ๆ และมิใช่จะทำให้เกิดความสัมพันธ์ในการทำงานอย่างเดียวเท่านั้น ยังต้องพิจารณาถึงปริมาณน้ำที่ไหลของแม่น้ำนั้น ๆ ฤดูการทำงาน เช่น ฝนตกหนัก ทำงานไม่ได้กี่เดือน ทำได้กี่เดือนต่อปี ซึ่งทำให้รู้ว่าต้องทำงานให้ได้มากน้อยแค่ไหน เพื่อจะได้วางแผนเครื่องจักรเครื่องมือและอุปกรณ์ก่อสร้างต่าง ๆ ได้ถูกต้องตามความต้องการ

๑.๒ การกำหนดที่ตั้งอาคารและโรงงานต่าง ๆ (Construction Plant Layout)

ที่ ๆ จะตั้งและความสามารถของเครื่องจักรเครื่องมือ เช่น เครื่องล้างแยกหิน เครื่องผสมคอนกรีต เครื่องอัดลม ฯลฯ ต้องพิจารณาสร้างให้ถูกที่ ๆ ซึ่งทำงานได้สะดวกไม่กีดขวางที่ ๆ ทำงาน ถูกหลักเกณฑ์และประหยัด เช่น Batching Plant ก็ต้องอยู่ในทำเลที่เหมาะไม่ไกลจากงาน การขนส่งคอนกรีตและซีเมนต์ได้ง่าย โรงงาน โรงซ่อม พัสดุ ไม่ควรให้ไกลกันเกินไป และห่างจากฝุ่นละอองที่เกิดจาก Heavy Equipment เป็นต้น ซึ่งของเหล่านี้อาจจะทำให้งานเร็วหรือล่าช้า และแพงได้

๑.๓ เครื่องจักรเครื่องมือในการขุดและเทดิน (Excavation and Placing Equipment)

การพิจารณาเลือกเครื่องจักรเครื่องมือที่ใช้ขุดและถมดินนั้น ต้องบอกขนาดสามารถดัดแปลงใช้งานต่าง ๆ ได้ และเหมาะสมเป็นข้อสำคัญที่สุด จำนวนที่ต้องการ ชนิด ขนาดของแต่

ละชนิดขึ้นอยู่กับขนาดของงาน วิธีการก่อสร้าง เช่น เป็น Hydraulic Placement หรือ Roll Earth Fill ระยะขนดินจากบ่อยืมดิน ระดับของบ่อยืมดิน การกำหนดปริมาณงานที่ทำต่อวัน ต่อเดือน มากน้อยแค่ไหน ขึ้นอยู่กับกำหนดเวลาเสร็จงานที่วางแผนไว้ และต้องทำงานให้ได้ตามแผนก่อสร้างเพื่อให้งานก่อสร้างพ้นระดับอันตรายจาก Flood Flow

เครื่องมือขนย้ายดิน – หิน ควรเป็นชนิดเดียวกัน Speed เท่ากันเพราะมิฉะนั้นจะใช้ถนนร่วมกันก็ต้องวิ่งแซงกัน อันตรายมาก ถ้าจำเป็นต้องมีหลายขนาดควรแบ่งเป็นพวก ๆ ทำงานคนละแห่ง

๑.๔ การขนและการเก็บพัสดุที่สะดวกในการใช้งาน (Material–Handling and Storage Facilities)

ปัญหาต่าง ๆ เรื่องการขนและการเก็บวัสดุของแต่ละโครงการย่อมไม่เหมือนกัน จะให้กำหนดวิธีการแน่นอนลงไปเลยทีเดียวไม่ได้ เพียงแต่วางหลักเกณฑ์ไว้กว้าง ๆ คือ เป็นที่ ๆ สะดวกในการรับ–ส่ง เก็บรักษาใกล้ ๆ ที่ใช้งาน พยายามอย่าให้ต้องขนย้ายซ้ำ ๆ ซาก ๆ และขนส่งไกลโดยไม่จำเป็น

บางทีก็มีความจำเป็นที่จะต้องมีหลังคากันฝน สำหรับของบางอย่างที่จำเป็น เช่น Cement เครื่องมือต่าง ๆ การเตรียมการเช่นนี้ย่อมเปลืองเงิน แต่ก็ต้องพิจารณาว่าถ้าไม่เตรียมให้พอ หรือจัดการไม่ดีย่อมเกิดความยุ่งยากเสียเวลา เสียเงินเพราะข้าวของเสียหาย และจะนำมาซึ่งการล่าช้าและเป็นอุปสรรคของงานเป็นต้น

๑.๕ ความสะดวกในการขนส่ง (Transportation Facilities)

ในการก่อสร้างงานใหญ่ การขนส่งเป็นปัจจัยสำคัญมาก งานจะถูกเสร็จตามแผนและรวดเร็วก็เนื่องมาจากการขนส่งเหมือนกัน และปัญหาเหล่านี้จะต้องแก้หรือเตรียมวางแผนไว้โดยการสร้างถนนทางเข้าหัวงาน เพราะโดยมากหัวงานจะอยู่นอกตัวเมือง จากสถานีรถไฟเพื่อใช้ขนส่งวัสดุก่อสร้าง ถนนในบริเวณก่อสร้างก็ต้องสร้างให้ถูกหลักเกณฑ์ ความกว้างต้องพอไม่มีโค้งมากนัก และถ้าไม่ตัดกันได้ก็จะดี และต้องบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพที่ดี Equipment วิ่งได้สะดวกทุกฤดูกาล และสามารถใช้ในเวลากลางคืนได้ด้วย และถ้าเป็นถนนขนส่ง Material จาก Quarry หรือ Borrow ควรแยกต่างหาก เพื่อให้รถงานวิ่งได้เร็ว ปลอดภัย หรือจะทำเป็น One Way ได้ยิ่งดี จะทำให้ได้ผลงานเร็วขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องไปถึงเงินและเวลาคอย

๑.๖ การผันน้ำในระหว่างก่อสร้าง (Stream Diversion During Construction)

การสร้างเขื่อนจำเป็นต้องสร้างขวางทางน้ำ การออกแบบและใน Spec. ต้องเตรียมเรื่องการระบายน้ำผ่านบริเวณก่อสร้าง การกำหนดวิธีการระบายน้ำนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและสภาพของลำน้ำนั้น ๆ และอาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผันน้ำเป็นเงินจำนวนมาก ซึ่งเป็นรายการหนึ่งของราคางาน ถ้าพื้นที่รับน้ำของลุ่มน้ำเล็กก็อาจจะผันน้ำโดยระบายได้ ถ้าใหญ่จะต้องพิจารณากันอย่างละเอียดถี่ถ้วน และต้องมีสถิติเรื่องน้ำนานพอที่จะเชื่อถือได้ บางทีต้องเตรียมระบายถึงปริมาณสูงสุด ซึ่งการก่อสร้างเขื่อนดินถือว่าเรื่องนี้มีความสำคัญมาก เพราะถ้าพลาดน้ำอาจไหลข้ามตัวเขื่อนขณะก่อสร้าง จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างมหาศาล เขื่อนอาจพังได้

ตามปกติใช้ผันน้ำขณะทำงานเรื่องฐานรากและถมเขื่อนโดยผ่านทาง Outlet Works ในการระบายน้ำผ่าน Outlet Works โดยมากต้องมี Coffer Dam ถ้าหากว่า Coffer Dam นี้เป็นส่วนหนึ่งของ Dam ผู้เป็นเจ้าของงานหรือผู้ออกแบบจะต้องกำหนดหรือออกแบบให้ไม่ได้ปล่อยให้ผู้รับเหมาทำกันเอง

ในสภาพที่ต้องผันน้ำจำนวนมาก จำเป็นจะต้องระบายน้ำทางท่อ Outlet หรืออุโมงค์ผ่าน Abutment บางทีต้องออกแบบท่อหรืออุโมงค์ให้ใหญ่กว่าความจำเป็นที่จะระบายน้ำเพื่อประโยชน์ทางไฟฟ้า หรือการชลประทานเพื่อผันน้ำในระหว่างก่อสร้าง เช่น เขื่อนสิริกิติ์อุโมงค์ผันน้ำมี Capacity ๓,๗๐๐ ม.^{๓} / sec ซึ่งมากกว่าความต้องการของไฟฟ้าและการชลประทานหลายเท่า

๒. การดำเนินการของห้องทดลองในสนาม (Field Laboratory Operations)

การดำเนินการของห้องทดลองในสนามเป็นสิ่งสำคัญของการก่อสร้าง เพราะทำให้เกิดความรู้ความชำนาญอยู่เสมอ เนื่องมาจากได้รู้คุณสมบัติของดิน หิน ที่ตรวจพบจากบ่อยืมต่าง ๆ ซึ่งอาจไม่เหมือนที่ได้สำรวจคุณสมบัติไว้เดิม ทำให้กำหนดค่าต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง และอีกประการหนึ่งเป็นการช่วยให้ Inspector ในการรักษาและควบคุมคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่นำมาถมเขื่อนให้ถูกต้องเรียบร้อยตาม Design

การทดลองทั่ว ๆ ไปเป็นประจำในสนามคือ การหาค่า Percolation, Compaction Machanical Analysis, Moisture Determination, Specific Gravity ของ Material ที่ใช้ ส่วนการทดลองหาค่าอย่างอื่น เช่น shear Test ก็หาบ้างเป็นบางครั้งบางคราว ถ้าเห็นว่าจำเป็น

เพื่อกำหนดชนิดของดินที่นำไปถมเขื่อนให้เหมาะสม ส่วนการทดลองพิเศษอย่างอื่นโดยมากส่งตัวอย่างไปทดลองส่วนกลาง เพราะต้องใช้เครื่องมือพิเศษ

การทดลองหาค่าต่าง ๆ ในสนามเมื่อทำแล้วได้ผลมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของ Material ที่ตั้งใจจะใช้ถมเขื่อนได้ และการเทียบเคียงนี้ประกอบด้วยการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ (Data) ของการทดลองในสนามที่ต้องทำเป็นประจำกับคุณสมบัติที่หาได้จากตัวอย่างตอนสำรวจ ทำให้ทราบถึงวิธีการ Control Gradation ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการก่อสร้างอันหนึ่ง การเทียบเคียงเช่นนี้ทำให้การก่อสร้างใช้ Material ถูกต้องตามต้องการ

การเทียบเคียงอย่างอื่นซึ่งทำให้ห้องทดลองในสนามคือ การเปรียบเทียบระหว่าง Density ที่หาได้ในตัวเขื่อน กับ Density ที่หาได้จากห้องทดลองโดยทำให้ Material มีความชื้นที่ Optimum Bureau of Reclamation standard ใช้ Density ที่เกิดจากการ Compact ดินมีความชื้นที่ Optimum และกระทุ้งโดยเครื่อง ๒๕ ครั้ง (มีคำอธิบายอยู่ใน Earth Manual) ซึ่ง Density อันนี้ใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของดินที่บดทับแล้ว วิธีการก็คือเอาดินจากเขื่อนมาหา Max. Density และ Optimuu Moisture และเมื่อได้ค่าแล้วก็ใช้เปรียบเทียบกับ Dry Density และ Moisture Content ของ Material ที่ใช้ถมเขื่อนเพื่อ Control Quality ให้ได้ตาม Design

๓. **การขุดหน้าดินฐานราก** (Stripping the Foundation) เป็นเรื่องที่แน่นอนว่าการเตรียมงานฐานรากเป็นปัจจัยที่ สำคัญ ที่สุด อันหนึ่งที่ จะทำให้อาคาร ต่าง ๆ อยู่ในสภาพที่ปลอดภัยและไว้ใจได้ ซึ่งพอจะแยกความมุ่งหมายและเจตนาได้ดังนี้

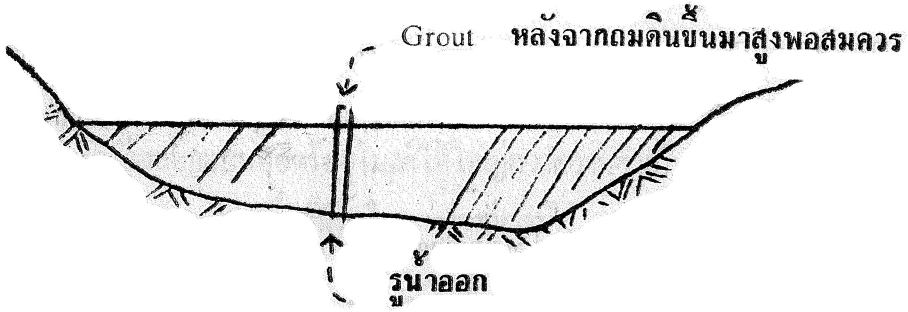
๓.๑ ขุดดินที่ใช้ไม่ได้และไม่เหมาะสมออกทิ้งไป

๓.๒ แก้ไขดัดแปลงสภาพของเดิมที่ไม่ดีออกเสีย เช่นเป็นที่สูง ๆ ต่ำ ๆ มากซึ่งไม่สะดวกแก่การถมบดทับดิน เป็นต้น

การทำ Stripping the Foundation อย่างน้อยที่สุดก็ต้องเอาต้นเหญ้า ดิน Top Soil ซึ่งมีพวกกิ่งไม้ รากไม้ ปนอยู่มากออก ส่วนสิ่งที่ใช้ไม่ได้อย่างอื่นอาจกำจัดได้โดยการขุดไปปิ้งเสีย ถ้าปรากฏว่าดินฐานรากเป็น Unstable Clay, Quick Sand, Silt หรือเป็นกรวด ทราย ที่น้ำผ่านได้มาก แต่เป็นชั้นตื้น ๆ ไม่ลึกมาก ก็ควรขุดเอาวัสดุเหล่านี้ออกจนถึง Bedrock ถ้าเป็น

กรวด ทรายหยาบ น้ำผ่านได้สะดวก และไม่ลึกมากนักก็ควรเอาออกเฉพาะด้านเหนือน้ำจาก cut off Trench ไปสุดด้านเหนือน้ำ

ปัญหาเรื่องรอยเชื่อมต่อ (Contact Surface) ระหว่างพื้นฐานรากกับดินที่ถมใหม่ก็เป็นสิ่งสำคัญมากที่สุดเหมือนกัน ถ้าทำไม่ดีน้ำอาจรั่วได้ โดยเฉพาะฐานรากที่เป็นหิน เพราะรอยเชื่อมต่อทำได้ยากกว่าฐานรากที่เป็นดิน ผิวหินต้องล้างให้สะอาดจริง ๆ ตรงไหนมีบ่อเล็ก ๆ ที่มีหิน กรวด ทราย ต้องเป่าล้างให้หมด เพราะน้ำอาจรั่วซึมได้ถ้าทำไม่ดีพอ อาจเป็นอันตรายต่อเขื่อนอย่างมหันต์ ดินที่จะมาใส่ในชั้นนี้ต้องเลือกมาอย่างดีเป็นพิเศษ และต้องให้ความชื้นมาให้เรียบร้อย และก่อนถมต้องฉีดน้ำให้บริเวณที่จะถมดินให้ชื้นเสียก่อน เมื่อใส่แล้วต้องบดทับให้ได้ความแน่นตามที่กำหนดด้วย Machanical Tamper เช่น Fog Jump หรือ Pneumatic Tamper ขนาดที่เหมาะสมเป็นต้น ในขณะที่ทำน้ำที่รั่วซึมต้องแห้ง น้ำตามหลุมๆ บ่อ ๆ ก็ต้องสูบให้แห้งจริง ในกรณีที่ไม่สามารถจะทำให้น้ำแห้งได้จริง ๆ อาจจะฝังท่อให้น้ำผ่านไหลออก แล้วอุดภายหลังด้วย Grouting



เครื่องจักรเครื่องมือที่ใช้ในงาน Stripping เลือกใช้ได้หลายอย่างแล้วแต่ความเหมาะสมของงาน เช่น เป็นชั้นดินพื้นแห้งควรใช้ Scraper ถ้าขุดลึกแต่แห้งควรใช้ Shovel ถ้ามีน้ำควรใช้ Dragline แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำ Final Cleaning ต้องใช้คนพร้อมด้วยเครื่องอัดลมที่มีความดันสูง ๆ น้ำ ไม้กวาด ฯลฯ เป็นต้น

ดินที่ Stripping แล้ว ใช้ในงานก่อสร้างได้ให้แยกเก็บไว้อย่าให้เกะกะงาน ถ้าใช้ไม่ได้เป็น Top Soil Silt ถ้านำไปถมทางด้านเหนือน้ำจะทำให้ดีขึ้นทางด้าน Permeability เพราะทางน้ำผ่านยาวขึ้น ถ้าเป็น Course Gravel หรือ Free Drain Material นำไปทิ้งทางด้านท้ายน้ำจะทำให้เขื่อนดีทางด้าน Stability คือเพิ่มน้ำหนักให้กับตัวเขื่อน ทำให้เขื่อนมั่นคงและปลอดภัยขึ้น

๔. **การสูบน้ำฐานราก** (Unwatering Foundation) การสูบน้ำออกจากฐานรากเพื่อทำให้ฐานราก เช่น Silt, Sand ที่มีอยู่เดิมแน่น (Consolibating and Stabilizing) ก่อนที่จะถมดินเขื่อนโดยไม่ยุบตัวมาก วิธีนี้ต้องพิจารณาถึงราคาเปรียบเทียบระหว่าง Unwatering Foundation กับ Stripping the Foundation ว่าวิธีไหนถูกต้องกว่ากัน การทำ Unwatering Foundation ทำได้ดังนี้

๑. ใช้ Well-points

๒. ใช้ Deep Well และสูบด้วย Deep Well Pump

๓. ใช้วางท่อหรือรางใน Cut off Trench หรือ Trench แล้วให้น้ำไหลมารวมใน Sump แล้วสูบน้ำออกในขณะถมดินเขื่อน

Well-Points ใช้ได้ผลดีกับดินที่เป็นเม็ดหยาบและ Silt ละเอียดๆ ถ้าใช้ใน Plastic Clay ไม่ค่อยได้ผล เพราะส่วนมาก Permeability ไม่พอ

โดยทั่วไประบบของ Well-Point ประกอบด้วยการออกแบบสร้างปลายท่อดูด (เป็นตะแกรงกันทรายละเอียดและกรวดผ่านขณะสูบน้ำ และเพื่อใช้สำหรับฉีดน้ำฝังท่อดูดลงไปในชั้นดินเพื่อสูบน้ำ) และท่อนี้ต่อกับท่อ Main ใหญ่ (Header) ซึ่งติดต่อกับ Pump และปลายท่อ ซึ่งมีตะแกรงจะต่อติดกับท่อขนาดยาว ๑๐-๒๔ ฟุต ระยะห่างกันระหว่าง "๑๘-๕" แล้วแต่จะต้องการสูบน้ำมากน้อยแค่ไหน และในชุดหนึ่งนี้มี Reser อยู่ประมาณ ๒๐–๖๐ วัน หรือเฉลี่ยประมาณ ๕๐ วัน ต่อสูบน้ำ ๑ เครื่อง ส่วน Stage ของการวาง Well Point นั้นขึ้นอยู่กับจะต้องการดึงน้ำใต้ดินลงไปลึกแค่ไหน ถ้าต้องดินเอาไปลึกมากก็ต้องวางหลาย Stage หรือหลายชั้น สูบน้ำใช้เป็นแบบ Self-Priming Centrefical Pump

๕. Cut off-Structure หมายถึงอาคารที่สร้างหรือทำไว้เพื่อลดการรั่วของน้ำผ่านใต้หรือข้างๆ เขื่อน พอที่จะจำแนกได้ดังนี้

๕.๑ Cut off Trench คือการขุดร่องแกนตรงบริเวณกลางๆ หรือค่อนข้างไปทางเหนือน้ำของเขื่อนลงไปจนถึง Bed rock โดยใช้เครื่องมือต่างๆ กัน เช่น Scraper, รถขุด Shovel ตามความเหมาะสมดังกล่าวแล้ว ส่วนลึกหรือกว้างของพื้นล่าง หรือลาดข้างๆ นี้ แล้วแต่การออกแบบเมื่อถึงชั้นใต้ระดับ Underground water และเป็นดินทราย ส่วนมากใช้ Well Point สูบน้ำใต้ดิน เพราะดีที่สุดสามารถรักษาลาดของ Trench ไม่ให้พังได้เพราะน้ำแห้งอยู่ตลอดเวลา

๕.๒ Concrete Cutoff Walls เมื่อขุดร่องแกนลงไปถึงหินฐานรากแล้วสร้างเป็นกำแพงคอนกรีต มีฐานของกำแพงฝังจมอยู่ในหิน ฉะนั้นการเจาะขุดหินเพื่อทำ Footing อย่าให้กระทบกระเทือนมากนัก ไม่นิยมการใช้วัตถุระเบิด ถ้ามีความจำเป็นก็ต้องใช้ดินระเบิดน้อยมากและทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อยึดคอนกรีต Footing ติดกับหินฐานรากโดยมากใช้ฝัง Anchor Bar และ Crout

๕.๓ Sheet Piling Cutoff Walls ใช้เป็นชนิดทำด้วยเหล็กหรือไม้ก็ได้ตีลงไปถึงชั้นหิน โดยเครื่องจักรเครื่องมือ เมื่อฐานรากเป็น Silt หรือ Fine Sand หรือ Gravel บางทีใช้น้ำฉีดนำลงไปก่อน แล้วจึงใช้เครื่องมือตีเข็มประกอบช่วยเหลือ ถ้าเป็น Boulder หรือ Coarse Gravel จะทำให้ราคางานแพงมากหรืออาจทำไม่ได้

๕.๔ Empervious Upstream Blanket คือการปู Impervious Material ทางด้านเหนือน้ำของเขื่อน ในแนวราบและบดทับโดยให้ได้ความแน่นเช่นเดียวกับการถมเขื่อน โดยมากใช้ความหนาตั้งแต่ ๑๐ ฟุตขึ้นไปโดยเริ่มจาก Abutment และหนาขึ้นเมื่อลงมาระดับต่ำ หรือจะใช้ความหนาอย่างอื่นตามที่ออกแบบและสภาพของทำเลที่ก่อสร้างเขื่อน

๕.๕ ท่อระบายน้ำที่ตีนท้านบและที่บ่าของเขื่อน (Toe and Abutment Drains)

ในการสร้างเขื่อนย่อมต้องมีน้ำรั่วซึมผ่านมาได้บ้าง ฉะนั้นจึงต้องมีการสร้าง Toe and Abutment Drains ไว้สำหรับให้น้ำที่ผ่านตัวเขื่อนหรือ Foundation ผ่านออกไปได้โดยไม่ทำอันตรายต่อเขื่อน โดยมากขุดร่องระบายลึกประมาณ ๑ เมตร กว้างที่ก้นร่องประมาณ ๒–๓ ฟุต ลาดข้างประมาณ ๑:๑ หรือแล้วแต่ลักษณะของดินและฝังท่อแบบ Open Joint หรือเจาะรูที่ท่อสำหรับให้น้ำผ่านเข้าในท่อได้รอบ ๆ ท่อใช้หุ้มด้วย Filter Material จากขนาดใหญ่ (กรวดอยู่ติดกับท่อ) มาหาเล็ก เพื่อป้องกันน้ำพาเม็ดดินออกไป

๕.๖ Downstream Filter Blanket ในการออกแบบบางครั้งมีความจำเป็นต้องใส่ Filter Blanket เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึมทำอันตรายต่อเขื่อน การก่อสร้างใช้กรวดทรายที่มี Well-graded และสะอาดจากบ่อกรวดทรายที่หาได้ในบริเวณนั้น หรือจากกรวดทรายที่ Stripping จาก Foundation มาปูจากตีนท้านบด้านท้ายเข้ามาหา Cutoff Trench หนาแล้วแต่ Design โดยทั่วไปเขื่อนขนาดกลางใช้หนาประมาณ ๑.๕๐ ม. แล้ว Satulate ด้วยน้ำ บดทับด้วยรถล้อยางที่ใช้งานอยู่ เช่น รถยนต์ขนดิน ก็ได้ สมัยนี้การออกแบบไม่ใช่ใส่แต่ Filter Blanket อย่างเดียว ยัง

ใส่ Vetical หรือ Incline Filter Blanket อีกด้วย เมื่อน้ำผ่านตัวเขื่อนมาก็จะได้ไหลรวมลงมาที่ Filter Blanket และไหลออกไปโดยไม่ทำอันตรายกับตัวเขื่อน

๖. การขุดดินจากบ่อยืมดิน (Borrow-Pits Excavation)

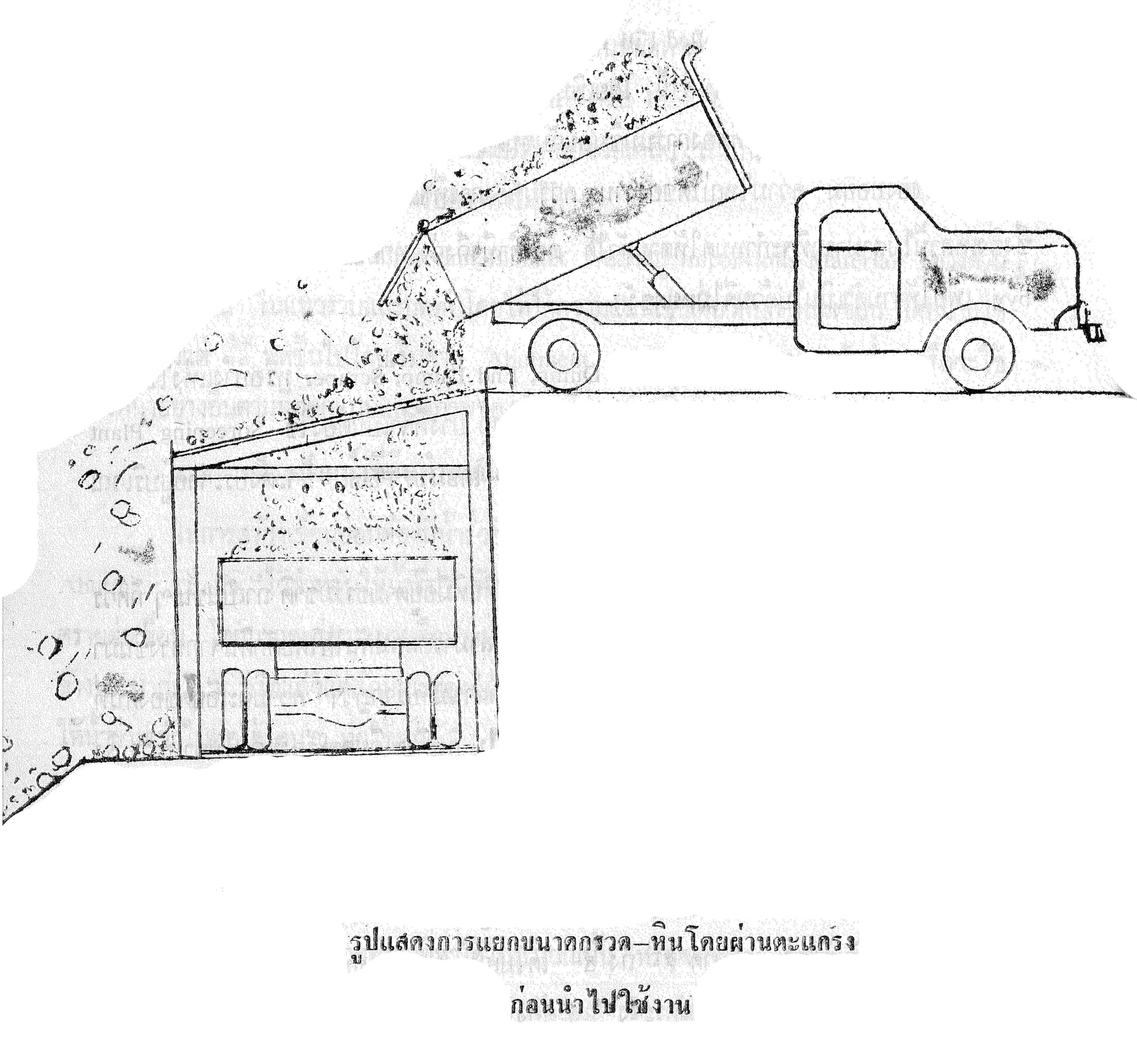
การขุดดินจากบ่อยืมเพื่อสร้าง Rolled-Fill Dam โดยมากใช้ Shovel, Scraper รถขุดต่อมาสมัยนี้ได้ปรับปรุงเครื่องจักรเครื่องมือเหล่านี้ โดยเพิ่มความจุเคลื่อนย้ายได้เร็ว และความสามารถในการทำงานดีขึ้น ส่วนจำนวนขนาดที่ต้องการนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของ Equipment ลักษณะของดิน ลักษณะภูมิประเทศของบ่อยืม ความใหญ่โตของงาน ความต้องการที่จะทำงานให้เสร็จภายในกำหนดเวลา ซึ่งสิ่งเหล่านี้ไม่สามารถที่จะกำหนดให้ตายตัวได้ ต้องคำนึงถึงว่า ทุกอย่างควรมีอาหลั่ยหรือ Stand-byy เพื่อให้งานดำเนินไปด้วยดีไม่หยุดชงัก

การขนย้ายโดยมากใช้ Bottom Dump, End Dump, Scraper หรือบางแห่งใช้ Belt Conveyor รถ Truck ขนาด ๑๐-๒๕ cu yd. ใช้มาก บางทีจำเป็นต้องใช้ Soreening Plant เพื่อแยกหิน กรวด ซึ่งมีขนาดใหญ่ออกก่อนที่จะนำไปถม โดยมาก Plant นี้จะตั้งประจำอยู่บริเวณใกล้ ๆ บ่อยืมดิน

การขุดดินในบ่อยืมดังที่กล่าวมาแล้วขึ้นอยู่กับดินที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ถ้าเป็นชั้น ๆ ก็ควรต้องผสมกันเสียก่อน โดยใช้ Shovel เหมาะที่สุดเพราะสามารถผสมกันได้โดยตักดินจากล่างขึ้นมาข้างบน แล้วเทผสมกันเสียก่อนนำไปใช้ จากการทำงานที่ผ่านมาปรากฏว่า ความละเอียดของดินที่ได้จาก Lab. จะละเอียดกว่าที่เป็นจริง เพราะขณะที่ขนไป ดินที่ละเอียดจะร่วงหล่นไปตามทาง จึงทำให้ดินที่ใช้ถมจริงหยาบกว่าที่ได้จาก Lab. ถ้าดินเป็นดินชนิดเดียวกันตลอด Scraper ใช้ได้ดี

ถ้าการถมดินหนา ๖" หินหรือกรวดซึ่งมีขนาดใหญ่ กว่า ๕" ให้เอาออกก่อนบดทับเพื่อให้ได้ความแน่นที่ดี บางทีก็ให้เลือกหินหรือกรวดขนาดใหญ่กว่า ๒ " หรือ ๓ " ออก โดยทั่วไปที่ปฏิบัติกันยอมให้มีหินหรือกรวดขนาด $\frac{1}{4}$ " ถึง ๕ " ได้ไม่เกิน ๔๐% โดยน้ำหนัก ถ้ามีมากกว่านี้การทดสอบความแน่นต้องทำด้วยความระมัดระวัง และต้องใช้วิธีทดลองหาความแน่นแบบพิเศษ

หินที่ใหญ่เกินไปอาจจะแยกออกได้โดยใช้เครื่องผ่านตะแกรงหรือผ่าน Grizzly ซึ่งมีลักษณะดังรูปภาพ เพราะดินที่มีความชื้นแล้วไม่สามารถจะแยกออกได้จากตะแกรงธรรมดาจะต้องใช้ Trommel ดังกล่าวแล้ว อีกวิธีหนึ่งก็ใช้



รูปแสดงการแยกขนาดกรวด–หินโดยผ่านตะแกรง
ก่อนนำไปใช้งาน

Rock Raking เป็นคราดเหล็กพื้นห่างกันตามต้องการใช้ติดแทนใบมีดของรถ Buldozer วิธีนี้ใช้เหมาะในบริเวณที่ก่อสร้างแคบ ๆ ไม่ต้องขนไปไกล เช่น ใช้ในส่วนของเขื่อนที่ติดต่อกับ Rock–Fill เพราะส่วนที่ใหญ่เกินไปที่ติด Rock Raking มาจะได้ตกอยู่ในส่วนที่เป็น Rock–fill หรือ Rip–Rap ใช้งานได้เลยไม่ต้องทิ้ง วิธีสุดท้ายก็ใช้คนเก็บออก

บ่อยืมควรวาง Grid ไว้ให้แน่นอนเพื่อใช้คำนวณปริมาตรดิน และใช้กำหนดชนิดของ Material ก่อนที่จะนำไปถมเขื่อนให้ถูกต้องตามคุณภาพของดิน และวางแผนการขุดขนดิน

๗. **การบดทับ** (Rolled–Fill Construction) เครื่องจักรเครื่องมือในการเทดินและบดทับพอจะประมาณหยาบ ๆ ได้ดังนี้ รถ Buldozer รถบด Sheep–foot หรือล้อยาง Machanical Tamper รถน้ำ และอย่างอื่น เช่น Rock Raking รถ Moter Grader เป็นต้น แต่จะให้กำหนดตายตัวลงไปทีเดียวนั้นไม่สามารถทำได้ว่าจะใช้มากน้อยแค่ไหน ขึ้นอยู่กับขนาดของงานลักษณะของดิน ชนิดและความใกล้ไกลของ Borrow Pits จากงานที่ทำมาแล้ว การบดทับด้วย Sheep–foot พอจะกำหนดคร่าว ๆ ได้ว่า ถ้าเป็นชนิด ๓ Drums จาก ๑๒ เที่ยว สามารถบดทับดินหนาชั้นละ ๖" ได้ประมาณ ๑๕๐ ลูกบาศก์เมตร ต่อ ๑ ชม. ส่วนขนาดของรถขนดินขึ้นอยู่กับระยะทางขนส่งขนาดโดยมากใช้ตั้งแต่ ๑๒–๒๕ ลูกบาศก์หลา

๗.๑ **วัสดุที่ใช้ในการถมเขื่อน** (Embank.nent Material Section)

ถ้าเป็น Zone Embankment วัสดุหรือดินที่จะนำมาใช้ต้องตรวจสอบเสียก่อนว่าเหมาะที่จะเอาไปใช้ใน Zone ไหน ตามที่กำหนดไว้ดินที่ใช้ในร่องแกน (Cutoff Trench) ต้องเลือกดินที่ป้องกันน้ำรั่วซึมอย่างดีที่สุด (Most Impervious Material)

เมื่อการดำเนินการก่อสร้างได้วางไว้แล้ว ต่อไปก็ต้องตรวจสอบและกำหนดว่าดินใดจากบ่อยืมต่าง ๆ กันว่าจะขุดและใช้เมื่อใด การวางแผนการใช้ Material การขุด การถม ไม่ใช่จะทำให้ดำเนินไปด้วยความรวดเร็วอย่างเดียวเท่านั้น ยังเป็นการก่อสร้างเขื่อนดินที่ถูกต้องเรียบร้อยอีกส่วน Homogeneous Embankment เรื่องดังกล่าวแล้วไม่สู้สำคัญมากนัก

๗.๒ **การถมดิน** (Material Placing) การถมดิน Zoned Embankment การให้แนวของ Zone ต่าง ๆ เป็นเรื่องที่จะต้องเตรียมวิธีการให้แนวให้เหมาะสม เช่น บางแห่งให้ขีดด้วยสี และปักธงไว้ที่ Abutment ถ้าทำแบบนี้ไม่ได้หรือไม่สะดวกก็ใช้ทำเป็นตาราง ซึ่งบวกระยะ Offset มาจากศูนย์กลางของเขื่อนถึงแนวแบ่ง Zone ในระดับต่าง ๆ กัน และให้ละเอียดพอ เช่น ทุกระดับ

แตกต่างกันทุก ๕–๑๐ ซม. โดยคำนวณไว้ก่อน เมื่อรู้ระดับก็วัดระยะให้แนวได้ สิ่งเล็ก ๆ น้อย ๆ เช่นนี้ เป็นส่วนประกอบอันหนึ่งที่จะทำให้งานช้าหรือต้องหยุดคอยได้เหมือนกัน ถ้าเป็นจุดที่ตั้งซึ่งเราจะต้อง Control ตำแหน่งตั้งแต่ฐานรากขึ้นมา เช่น Settlement Gauge โดยมากใช้อ่านมุมจาก Abutment โดยทำหมุดตั้งกล้องถาวรไว้ และควรให้มุมกว้าง ๆ เพื่อให้ได้ผลของการวางเส้นกล้องตัดกันได้ผลแน่นอน

โดยทั่วไปวิธีการเทดินมีหลักอยู่ว่า เมื่อเทดินบนเขื่อนแล้ว ต้องเกลี่ยให้ได้ความหนาบดทับให้ได้ Density ซึ่งทำได้หลายอย่าง แล้วแต่ชนิดของเครื่องจักรเครื่องมือที่ใช้ เช่น ถ้าใช้ Scraper ทำงานการเทดิน เทได้เป็นชั้นบาง ๆ แล้วเกลี่ยให้ได้ความหนาด้วยตัวของมันเองเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ถ้าใช้รถ Shovel ขุดดิน และขนส่งด้วยรถยนต์ การเกลี่ยต้องใช้ Buldozer วิธีนี้การควบคุมยากกว่าวิธีแรก เพราะต้องกะระยะให้กอง เพื่อให้ Buldozer ทำงานเกลี่ยให้น้อยที่สุด และการควบคุมความหนาของแต่ละชั้นดีขึ้น ความหนาโดยมากใช้หนา ๖ นิ้ว จะกำหนดได้จากการทำ Embankment Test Section ซึ่งจะกล่าวต่อไป และการกองหรือเทดินให้พยายามเทและบดทับ ให้ขนานกับแนวศูนย์กลางของเขื่อน เพื่องป้องกันเรื่องการใช้ Material ไม่ถูก และบดทับผิดพลาด ซึ่งจะทำให้น้ำผ่านในชั้นหรือแนวนี้ได้

การทำงานหน้าฝนผู้ควบคุมต้องเตรียมเรื่องการระบายน้ำฝนอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้งานไม่ต้องหยุดชงัก วิธีป้องกัน คือ ทำบริเวณที่ถมดินให้มีความลาดเท โดยมากลาดไปทางเหนือน้ำ เพื่อไม่ให้น้ำฝนกัดเซาะรากเขื่อน เพราะเขื่อนทุกเขื่อนต้องมี Rip rap หรือ Rock Slope Protection ทางด้านเหนือน้ำ ซึ่งความลาดเทควรใช้ประมาณ ๔ เปอร์เซ็นต์ ส่วนทางด้านท้ายน้ำอาจใช้ปลูกหญ้า ถ้า Slope ลงทางนี้น้ำฝนอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ ในกรณีที่เทดินแล้วยังบดทับไม่ทัน เพราะฝนจะตกให้รีบใช้ Flat Roller บดหน้าดินให้แข็งและเรียบเพื่อป้องกันน้ำฝนซึมลงไปทำให้ดินเละได้ ซึ่งจะต้องเสียเวลาพื้นดินตากแดดให้มีความชื้นพอดีก่อนทำงานต่อไปอีก นอกจากนี้ควรห้าม Heavy Equipment วิ่งผ่านขณะฝนตก หรือหลังฝนตกใหม่ จะทำให้เป็นร่องหลุมขังน้ำได้

๗.๓ **การบดทับ** (Compaction) การกำหนดความแน่นของการบดทับใช้กำหนดจาก Dry Density เป็นมาตรฐานในการทำงานดินที่จะนำไปบดทับในการสร้างเขื่อนจะต้องนำไปทดลองหาคุณสมบัติต่าง ๆ ใน Lab. เสียก่อนว่า มีความมั่นคงในการเปียกน้ำเพียงไร (Saturated Stability) เช่น ที่เขื่อนแม่สอด มีดิน Marl ปนอยู่ ดินเช่นนี้เมื่อถูกน้ำแล้วจะละลาย มีปฏิกิริยาทาง

เคมีกับน้ำ เราห้าม**ไม่ให้ใช้** ทรุดตัวน้อย (Minimum Settlement) น้ำผ่านได้น้อย (Low Rate of Percolation) และสามารถนำไปใช้และทำงานได้ ค่าของ Dry Density (น้ำหนักต่อ ๑ Cu.ft.) นี้เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะและคุณสมบัติของดิน ความชื้นที่จะใช้กับดินที่จะนำไปถม ชนิด และน้ำหนักของ Roller ที่ใช้ และจำนวนเที่ยวของการบดทับ

การบดทับดำเนินการดังนี้ เกลี่ยดินที่มีความชื้นพอดี (Optimum Moisture Content) ให้ได้ความหนาตามที่กำหนดแล้วบดทับด้วย Roller ที่ถูกต้องตามมาตรฐานในเวลาที่พอเพียงบางแห่ง Roller เข้าไปบดทับไม่ได้ เช่น Abutment ที่ค่อนข้างชัน ร่องแกน หรือ Trench หรืออาคารต่าง ๆ ใช้ Mechanical Tampers เช่น ลูกกระทุ้งดินที่ขับด้วย เครื่องยนต์ ห้ามใช้รถขนดินบดทับ นอกจากดินพวกนั้นเป็น Cohesionless Material เช่น กรวด ทราย ให้ใช้ได้

ตามกร๊าฟที่แสดงนั้น เป็นการแสดงให้เห็นว่าความชื้นในดินที่เหมาะสมถูกต้องมีความสำคัญมากต่อการบดทับให้ได้ความแน่นที่ต้องการโดยวิธีการเพิ่ม Energy ลงไปในดินที่ทดลองนั้นคือการเพิ่มจำนวน Blows (Rammer ขนาด ๕ $\frac{1}{2}$ lb. ปล่อยให้ตกในระยะสูง ๑๘ นิ้ว ลงไปในดิน ซึ่งหนาชั้นละ ๒ นิ้ว ซึ่งอยู่ในกระบอกขนาด ๔" x ๖" ๑ ครั้ง เรียกว่า ๑ Blow) จะทำให้เกิดเพิ่ม Dry Density และลดความชื้นที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของ Dry Weight ในดิน นี่เป็นการชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของเครื่องบดทับและความแห้งของดิน ซึ่งสามารถถมให้ได้ความแน่นที่ต้องการ และเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ในการที่จะเพิ่มความแน่น โดยเพิ่มจำนวน Blow เพื่อกำหนดเปอร์เซ็นต์ของความชื้นที่เหมาะสมได้ การกำหนดน้ำหนักของเครื่องบดทับ และกำหนดความชื้นในดิน และบดทับด้วยจำนวนเที่ยวจำนวนหนึ่งนั้น จะไม่ได้ผลในการที่เพิ่มความแน่น ถ้าความชื้นนั้นเกิน ๑๒ เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนเที่ยวของการบดทับ อาจจะได้ผลในการเพิ่มความแน่นถ้าดินนั้นมีความชื้นใกล้เคียง Optimum และใช้เป็นประโยชน์ในการกำหนดจำนวนเที่ยวของการบดทับสำหรับเครื่องบดทับชนิดหนึ่ง ๆ

การบดทับด้วย Sheepsfoot หรือ Tamping–Type Roller เป็นวิธีการที่ดีที่สุด ซึ่งใช้กับเขื่อนดินโดยทั่ว ๆ ไป การบดทับด้วยเครื่องมือชนิดนี้เป็นการบดด้วยพื้นของ Sheeps–foot ซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดเล็ก ๆ ทำให้เกิดความแน่นตามหน้าตัดของพื้นผ่านชั้นดินลงไป และสม่ำเสมอและรอยต่อระหว่างชั้นไม่เรียบเหมือนรอยต่อของขนมชั้น จึงทำให้น้ำรั่วผ่านยาก ในระหว่างเวลาที่ผ่านมา

แล้ว การออกแบบ Roller ได้ก้าวหน้ามากขึ้น โดยขยายให้ใหญ่และหนักขึ้น การออกแบบที่แล้วๆ มาพอที่จะรวบรวมได้คือ

๑. สร้าง Drum ใหญ่ขึ้น มีห้องที่จะใส่น้ำหนักมากขึ้น (มาตรฐานขนาด ϕ ๕ ฟุต x ๕ ฟุต ยาว) ซึ่งสามารถควบคุมการบดทับได้ โดยน้ำหนักที่ใส่ในห้องของ Sheepsfoot

๒. สามารถถอดเปลี่ยนปลายพื้นให้มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่เล็กได้ตามต้องการ และประหยัดทั้งเวลาและเงิน

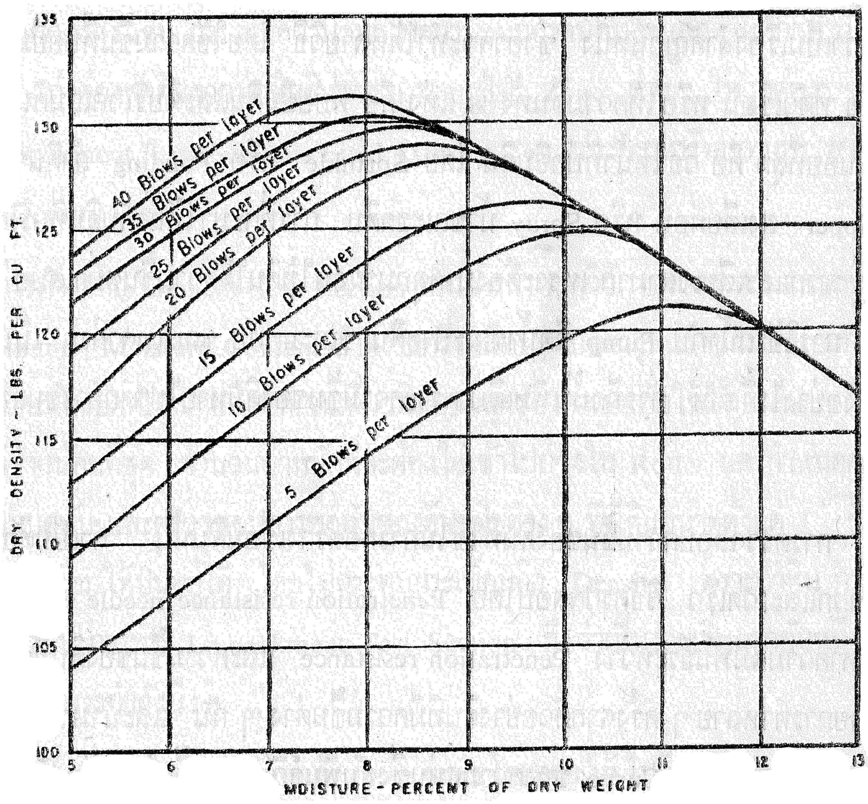
๓. มีขาที่สามารถปรับและเปลี่ยนได้ติดทั้งสองทาง สามารถลากเดินหน้าถอยหลังได้โดยดินไม่ติด

๔. ตัว Frames บิดตัวได้ทำให้บดพื้นดินบนพื้นที่ไม่เรียบได้

๕. ปรับปรุงระยะพื้นดีขึ้น คือ ๑ พื้น ต่อ พื้นที่ ๑ ตารางฟุต ของพื้นที่ของ Drum แรงกดที่ปลายของพื้น โดยปกติประมาณ ๔๕๐ lbs./ตารางนิ้ว การหา Pressure นี้หาได้โดยเอาน้ำหนักทั้งหมดของ Roller หารด้วย ๕ % ของเนื้อที่ปลายของพื้นทั้งหมด

Sheepsfoot Roller โดยมากมี ๒ ลูกต่อกัน หรือ ๓ ลูกต่อกัน ถ้าบดในที่กว้างๆ หรือบางครั้งใช้ลูกเดียวเมื่อบดในที่แคบ ๆ เช่น ในร่อง Cutoff Trench

จำนวนเที่ยวของการบดทับ น้ำหนักของน้ำหนักที่ใช้ถ่วงใน Sheepsfoot พื้นที่หน้าตัดของพื้นนั้นขึ้นอยู่กับการกำหนดความแน่นที่ต้องการ และชนิดของดินด้วย (ดินแต่ละชนิดจำนวนเที่ยวของการบดทับไม่เหมือนกัน) Sheepsfoot ขนาด ϕ ๕ ฟุต x ๕ ฟุต ใส่น้ำหนักประมาณลูกละ ๒๐,๐๐๐ lbs. โดยมากใส่ทรายกับน้ำ มีพื้น ๑๒๐ พื้น แต่ละพื้นมีพื้นที่หน้าตัดที่ปลายเท่ากับ ๗ ตารางนิ้ว พื้นยาว ๑๐" บดทับ ๑๒ เที่ยว จะได้ความแน่นของดินตามความต้องการของการก่อสร้างเขื่อนดินทั่ว ๆ ไป เครื่องมือบดทับที่ใช้บดทับในที่ ๆ เครื่องมือบดทับธรรมดาเข้าไปทำงานไม่ได้ เพราะเนื้อที่แคบหรือลาดชัน เช่น ที่ Abutment หรือลาดด้านข้างของร่องแกน (Cutoff Trench) หรือรอบ ๆ ของอาคารประกอบของเขื่อน เช่น Outlet Conduit เป็นต้น ต้องแก้ไขโดยใช้ Mechanical Tamping ซึ่งขับด้วยลมเครื่องยนตร์ หรือไฟฟ้า ดังที่เราเห็นใช้ทั่วๆ ไปขณะนี้ การใช้รถยนต์ขนดินบดทับนั้นไม่ดี เพราะดินจะเกิดแน่นเฉพาะที่ผิวแล้วค่อย ๆ หลวมตัวเมื่อลึกลงไปและควบคุมการบดดินได้ยากเพราะเนื้อที่ ๆ บดทับกว้าง ไม่สามารถจะนับเที่ยวของการบดทับได้แน่นอน



Materials were compacted in a 4x6-inch cylinder in three 2-inch layers using a $5\frac{1}{2}$ lb. rammer dropped 18-inches.

ENERGY-MOISTURE-DENSITY RELATIONS

PLATTE RIVER EMBANKMENT MATERIAL

Roller ในสมัยเก่าหรือระบบการบดทับของ USBR ไม่แนะนำให้ใช้บดทับด้วยรถบดล้อยาง แนะนำให้ใช้ Sheepsfoot แต่ต่อมา Waterways experiment station ได้ค้นคว้าเรื่องเครื่องมือบดทับ ปรากฏว่า Rubber Tire Roller บดทับดินได้ดีเช่นกัน ถ้าควบคุม Tire Pressure ได้ และสามารถบดทำได้หนากว่า Sheepsfoot เร็วกว่าประหยัดกว่าด้วย จากการทดลองปรากฏว่า ลมของยางที่ ๙๐ PSI. เป็น Pressure ที่เหมาะและดีที่สุด

๗.๔ **การควบคุมความชื้น** (Moisture Control) การกำหนดความชื้นในดินก่อนการบดทับถือว่าเป็นเรื่องสำคัญอันหนึ่ง ซึ่งอาจจะทำได้หลายวิธี โดยใช้ความชื้นที่บ่อยืมดิน ที่บริเวณถมดิน คือ ที่ตัวเขื่อน หรือให้ความชื้นทั้ง ๒ แห่ง คือ ที่บ่อยืมดินและที่บริเวณถมดิน วิธีที่ดีที่สุดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด คือ วิธีให้น้ำที่บ่อยืมดิน โดย Sprinkle หรือ Ponding ถ้าดินซึมน้ำไม่ค่อยดีก็ใช้ Ripper ลงเสียก่อน หรือ Spray น้ำขณะขุดดิน การที่จะมาให้น้ำกับดินที่บริเวณถมดินนั้นเป็นเรื่องยุ่งยากและเสียเวลามาก เพราะต้องมาคลุกมาผสมให้ดินได้ความชื้นสม่ำเสมอ โดยใช้คราดไถ พรวน การใช้รถน้ำกับ Pump ฉีดน้ำขณะปาดดิน ขณะบดทับ ขณะเทจากรถ เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ถึงอย่างไรก็ตาม การฉีดน้ำเพิ่มเติมเพราะความชื้นของดินหายไปจากการขนและขณะเทดินควรทำได้

การตรวจสอบความชื้นของดินที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนดินนั้น จำเป็นต้องใช้วิธีตรวจสอบที่สะดวกและรวดเร็ว วิธีตรวจสอบโดย Penetration-resistance needle เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอยู่ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่าง Penetration-resistance และความชื้นของดินที่จะใช้ในการก่อสร้าง โดยการทำหลาย ๆ ครั้งจากตัวอย่างดินที่มีความชื้นต่าง ๆ กัน และนำมาเขียนเป็น Curve และในเวลาเดียวกันนี้ก็หา Curve ของความแน่นซึ่งสัมพันธ์กับความชื้นไปพร้อมกันด้วย (ตามรูปที่แสดงได้มาจากหนังสือของ USBR) ความชื้นที่ใช้กันในการก่อสร้างเขื่อนดินโดยทั่วไปใช้ ๑-๒ เปอร์เซ็นต์ ต่ำกว่า Optimum เพราะไม่สามารถที่ Control ความชื้นได้ ๑๐๐ เปอร์เซ็นต์ เช่น ตามรูปตัวอย่างจะเห็นว่า ถ้าอ่าน Penetration-resistance reading ได้ ๖๐๐ lbs./ ตารางนิ้ว จะอ่านค่าของความชื้นได้ที่ Optimum และความแน่นได้ที่ Max. Density ถ้า Penetration-resistanceneedle อ่านได้ระหว่าง ๑๐๐๐—๑๙๐๐ lbs./ ตารางนิ้ว จาก Curve จะเห็นว่าความชื้นน้อยกว่า Optimum ไป ๑—๒ เปอร์เซ็นต์ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้ใช้ได้ดังกล่าวแล้วข้างต้นวิธีการดังกล่าวนี้ตามในตัวอย่าง Curve จะตั้ง เพราะเป็นการทดลองหาจากดินปนกรวดและ Well

Graded ถ้าเป็นดินละเอียดหรือ Poor Graded แล้ว Curve จะออกมา Flat ค่าของการอ่าน Allowable Penetration-Resistance reading จะแคบลง จึงทำให้ผิดพลาดได้มาก จึงไม่ควรใช้กับ Material ดังกล่าวแล้ว จากวิธีการนี้ถ้าทำงานไปมากก็อาจจะนำหลักการมาใช้ได้ เช่น ใช้มีดหรือของแหลมแทงดินที่บดทับแน่นแล้วดูก็พอจะทายว่า Density หรือความแน่นสักเท่าใด เป็นต้น

๙. **การควบคุมการทดลองตรวจสอบในการก่อสร้าง** (Construction-Control Test) การควบคุมการก่อสร้าง เช่น การเพิ่มความชื้นจากความชื้นของดินที่มีอยู่แล้วตามปกติถ้าเป็น Zone Embankment ถ้าต้องจัดดินจากบ่อยืมดินต่าง ๆ มาถมใน Zone ต่าง ๆ ให้ถูกต้อง ซึ่งรวมทั้งการทำ Embrnkment Test Section, Field Density Test และการเปรียบเทียบระหว่าง Lab และ Field Density Test

การทำ Embankment Test Section เป็นการกำหนดวิธีการต่างๆ ตามสภาพที่เป็นจริง การหา Optimum Moisture Content สำหรับเครื่องมือบดทับอย่างหนึ่ง ๆ ไม่เหมือนกัน และจำนวนเที่ยวที่จะต้องบดทับหมายถึงจำนวนเที่ยวที่น้อยที่สุดของการบดทับให้ได้ Density ที่กำหนดและเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด จำนวนน้ำหนักที่จะต้องใส่เข้าไปถ่วงใน Roller และกำหนดความหนาของชั้นดินก่อนบดทับ และตรวจสอบการบดทับของดินชนิดต่าง ๆ ที่มีหินขนาดตั้งแต่ $\frac{1}{4}$ " ขึ้นไป ถึงขนาดใหญ่ที่สุดที่ยอมให้ปนอยู่ได้ โดยไม่กระทบกระเทือนถึง Density เพราะถ้าหิน กรวด มากไปจะบดทับไม่แน่น การทำ Lmbankment Test Section ถือว่าเป็นงานเริ่มแรกอันหนึ่งที่จะต้องทำ วิธีดำเนินการกระทำดังนี้ :–

๗.๕ (๑) กำหนดและเลือกที่ ๆ จะทำ โดยอย่า ให้ ไปกีดขวางการ ทำงาน บน ตัว Embankment ขนาดประมาณ ๒๐×๔๐ เมตร และต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะต้องนำผลไปใช้ในการทำงานต่อไปบางครั้งอาจทำ ๒ วัน ก็ได้ เพื่อเร่งรัดให้รู้ค่าของ Optimum Moisture Content เร็วขึ้น

๗.๕ (๒) ต้องใช้ความระมัดระวังในการกำหนดความหนาของชั้นดินที่เทเป็นชั้น ๆ เพื่อบดทับแล้วจะได้ความหนาของชั้นดินและจำนวนเที่ยวของการบดทับต่างๆ กัน ตามที่ระบุไว้ใน Spec. ทั้งการใช้ Roller ต้องใช้ให้เต็มตามความสามารถของ Roller นั้น เช่น ถ่วงน้ำหนักให้เต็มที่ตาม Spec. เพื่อให้ได้งานดีที่สุด เป็นต้น

๗.๕ (๓) นำดินที่ได้ตรวจสอบมาแล้วตั้งแต่เมื่อทำการสำรวจบ่อยืมดินมาให้ความชื้นให้ได้ Optimum Moisture Content ตามที่หาได้จาก Lab. เกลี่ยบดทับในเวลาต่าง ๆ กัน ทำให้ได้ ๓-๔ ชั้น

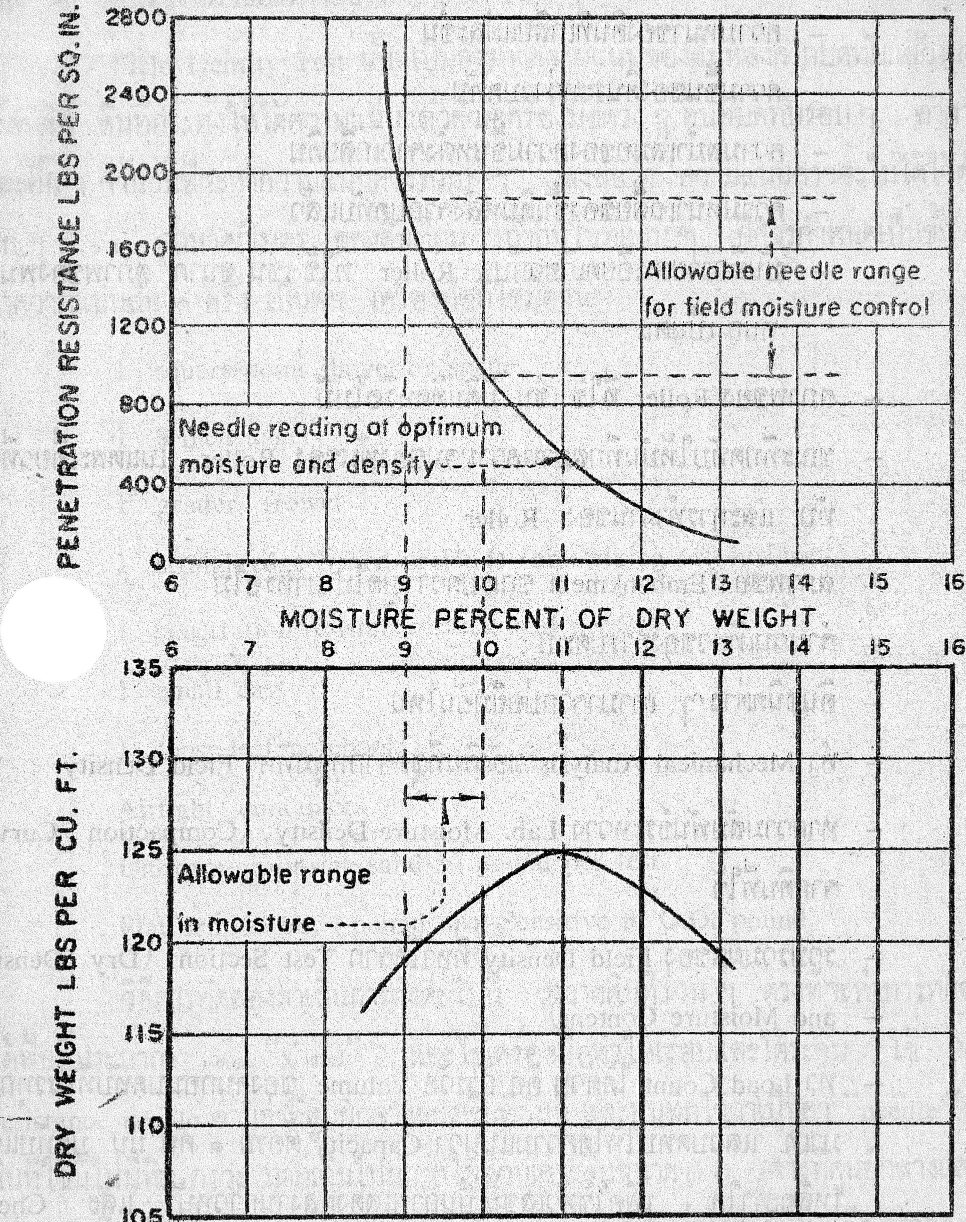
๗.๕ (๔) ภายหลังจากทำตามข้อ ๗.๕ (๓) แล้วให้เริ่มหา Density ใน Test Section การทดลองนี้พยายามทำในสภาพความเป็นจริง ซึ่งในระหว่างก่อสร้างย่อมแตกต่างกัน เช่น บางแห่งก็มีรถวิ่งมากน้อยไม่เหมือนกัน ตัวอย่าง Test Section ที่ติดต่ออยู่กับ Abutment ความหนาแน่นในบริเวณนี้ย่อมแตกต่างกับข้างนอกออกไป เพราะมี Equipment วิ่งผ่านไปมามากกว่า เป็นต้น

๗.๕ (๕) ภายหลังจากถมดินและได้กำหนด Density ได้แล้ว ขั้นต่อไปให้ทำซ้ำอีกแต่คราวนี้ให้ใช้ Moisture Content สูงกว่า Optimum ที่หาได้จาก Lab. ประมาณ ๑-๒ เปอร์เซ็นต์ ถ้าปรากฏว่า ความแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Moisture ในจำนวนเที่ยวของการบดทับเท่าเดิมก็ให้ทำต่อไปโดยเพิ่มความชื้นจนถึงได้ Optimum Moisture Content โดยระบุจำนวนเที่ยวของการบดทับ และชนิดของ Roller ไว้ หรือทำอีกอย่างหนึ่ง คือ เพิ่มความชื้นให้สูงกว่า Optimum Moisture Content ที่หาได้จาก Lab. บดทับแล้ว Density ลดลงก็ให้ลดน้ำลงจนได้ Moisture Content ที่ถูกต้องอาจจะสรุปได้ง่าย ๆ ว่า วิธีการนั้น คือ การหาตัวเลขต่าง ๆ จากการทำ Test Section นั้นพยายามทำให้ใกล้เคียงกับการทำงานจริงอย่างที่สุด เพื่อจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Moisture Density, Compaction Curve เพื่อกำหนดจำนวนเที่ยวและชนิดของ Roller ที่จะใช้งานจริง ๆ

๗.๕ (๖) เรื่องที่อาจเป็นได้ ถ้าพบว่าได้ใช้ความชื้นและบดทับที่ถูกต้องตามที่ทดลองหามาได้จากทำ Test Section แล้ว ไม่สามารถจะให้ได้ความแน่นที่ต้องการได้ ก็ควรศึกษาและทดลองถึงเหตุผลต่าง ๆ เป็นพิเศษจนได้ Optimum Moisture Content ที่เหมาะสมใหม่ และได้จำนวนเที่ยวของการบดทับที่ประหยัดที่สุด

๗.๕ (๗) เมื่อมีการพิจารณาคุณสมบัติของดินต่าง ๆ ที่จะใช้ถมเขื่อน บางที่อาจมีความจำเป็นที่จะต้องทำ Test Section ต่อไปจนได้ Optimum Moisture Content และบดทับด้วยจำนวนเที่ยวของการบดทับที่ประหยัดที่สุดสำหรับชนิดต่าง ๆ กัน

๗.๕ (๘) ภายหลังจากการทำ Test Section แล้ว Record และ Report ต่าง ๆ เกี่ยวกับการทำ ควรดำเนินการบันทึกได้ต่อไปนี้ ;–



PENETRATION RESISTANCE NEEDLE

RESISTANCE — MOISTURE RELATION

- ตำแหน่งที่ ๆ ทำ Test Section
- จำนวนชั้นดินที่ถม
- ความหนาของดินที่เกลี่ยแต่ละชั้น
- ความชื้นของดินระหว่างบดทับ
- ความสม่ำเสมอของความชื้นหลังจากเกลี่ยดิน
- ความหนาเฉลี่ยของชั้นดินหลังจากบดทับแล้ว
- บันทึกรายละเอียดเกี่ยวกับ Roller ที่ใช้ เช่น ขนาด สภาพของพื้นน้ำหนัก เป็นต้น

- สภาพของ Roller ที่ใช้ เช่น มีดินติดหรือไม่มี
- ขณะที่บดทับให้บันทึกสภาพความจมของพื้นของ Roller ในแต่ละเที่ยวที่บดทับ และการทำงานของ Roller
- สภาพของ Embankment ขณะบดว่า ปูดไป-มาหรือไม่
- จำนวนเที่ยวของการบดทับ
- ดินชนิดต่าง ๆ เอามาจากบ่อยืมอันไหน
- ทำ Mechanical Analysis ของดินที่ขุดจากหลุมที่หา Field Density
- หาความสัมพันธ์ระหว่าง Lab. Moisture-Density (Compaction Curve) จากดินที่ใช้
- รวบรวมผลของ Field Density ที่หาได้จาก Test Section (Dry Density
- and Moisture Content)
- ทำ Load Count ได้ด้วย คือ การวัด Volume ของดินก่อนบดทับที่บรรทุกรถมาเท แล้วบดทับให้ได้ความแน่นว่า Capacity ต่อรถ ๑ คัน นั้น บดทับแล้วเหลือเท่าใด เพื่อใช้ตัวเลขนี้เป็นการแสดงผลงานก้าวหน้า และ Check ปริมาตรงานจากการคำนวณด้วย Cross Section

๗.๒ การหา Density ในสนาม (Field Density Test) การหาความแน่น (Density) ในสนามนั้น แบ่งวิธีการหาได้เป็น ๒ วิธี คือ "Density-in-place" คือ การหาความแน่นจากดินฐานรากจากบ่อยืม เพื่อทราบการแตกร้าว (Shrinkage) ของดิน

ส่วนการหา "Field Density" คือ การหาความแน่นของดินจากดินที่ถมเขื่อนในระหว่างก่อสร้าง เพื่อประโยชน์ในการนำผลลัพธ์มาเปรียบกับความแน่นมาตรฐานที่หาได้จากห้องทดลอง ทั้ง ๒ อย่างนี้มีวิธีการหาอย่างเดียวกัน

Field Density Test นั้น เป็นการหาความแน่นของดินหลังจากบดทับแล้วทุกชนิด เช่น เขื่อนดิน ดินที่กระทุ้งให้ได้ความแน่นแล้วด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ดินที่บดทับรอบ ๆ อาคารก่อสร้าง และอื่น ๆ จำนวนที่จะหาความแน่นควรราวที่ ๆ ลงสัยว่า ความแน่นอาจจะไม่ได้ไว้ด้วยควรทำทุก ๆ ๒,๐๐๐ ลูกบาศก์เมตร ของดินที่ถม ถ้าถมในที่แคบ ๆ ก็ควรกำหนดเป็นชั้น ๓-๔ ชั้น หาความแน่นสัก ๑ ครั้ง เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้มีดังนี้:-

1 square-point shovel or spade

1 8-inch auger

1 grader trowel

1 straightedge board or blade for striking off surface

1 penetration-resistance stock and needles

1 small cass

1 loose-leaf notebook

Airtight containers

Uniform-grain-size sand-50 pound per test

Platform seales, 1-pound arm-Sensitive to O.Ol pound

วิธีการทดลองดำเนินการดังต่อไปนี้ กวาดดินที่ร่วน ๆ ตรงที่จะทำการทดลองออกให้ได้พื้นที่ประมาณ ๑๘" x ๑๘" และใช้เครื่องมือทำให้เรียบและได้ระดับ ใช้ Penetration resistance needle อ่านค่าที่ศูนย์กลางของพื้นที่อันนี้ และบันทึกไว้ว่าเป็นค่า "needle (top)" ถ้าดินที่ใช้นี้ไม่มีหิน กรวด มากเกินไปนัก ก็ใช้ส่วนเจาะดินขนาด ϕ ๘" เจาะที่ศูนย์กลางและต้องระวังอย่างมากที่จะไม่ให้หลุมเจาะนี้กระทบกระเทือนจากการไปยืนอยู่ใกล้เกินไปหรือ การขุดอาจจะกว้างเกินไป ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ออกมาผิดพลาด ถ้าดินมีหินมากก็อาจจะเอามือเก็บออกเสียก่อนได้ถ้าจำเป็น ภายหลังจากขุดหลุมลงไปลึกประมาณ ๖ นิ้ว ให้ใช้ Penetration-resistance needle อ่านค่าที่ศูนย์กลางอีกครั้ง และบันทึกว่าเป็นการอ่าน "needle (bottom)" และขุดหลุมต่อลงไป

ให้ได้ลึก ๑๒ ถึง ๑๔ นิ้ว และให้เอาดินที่ขุดออกอย่างระมัดระวัง และเก็บไว้ในกระป๋องซึ่งอากาศเข้าไม่ได้ แล้วชั่งน้ำหนักจดไว้ ปริมาตรความจุของหลุมตรวจสอบได้โดยการเติมทรายแห้งซึ่งมีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ จากนี้ก็จะรู้ Density ได้ การเททรายลงไปในหลุมให้ใช้เหล็กพาดและเททรายลงหลุมให้มีลักษณะการเทเช่นเดียวกับการเททรายลงในกระป๋องตวงสำหรับชั่งน้ำหนักใน Lab.

ภายหลังจากการบรรจุทรายลงหลุมเต็มแล้ว ทรายที่เหลืออยู่ให้นำไปชั่งได้น้ำหนักแล้วจดบันทึกไว้เป็นน้ำหนักทรายที่เหลือ ทรายที่เหลือในหลุมให้เก็บมาให้ต่อไปอีกได้ แต่ต้องร่อนให้สะอาด Density ของทรายนี้ต้องหมั่นตรวจสอบเสมอ ๆ โดยเทใส่ในที่บรรจุที่รู้ความจุ และชั่งเพื่อรู้ Density

ก่อนที่จะเลิกการทดลองในสนาม ให้บันทึกส่วนที่มีความสัมพันธ์กับการทดลองไว้ เช่นที่ ๆ ทดลอง ระดับเท่าใด รายละเอียดของดินที่ใช้ จำนวนเที่ยวของการบดทับ และอื่น ๆ ในแบบฟอร์มที่เตรียมไว้ ดังแสดงอยู่ในหน้า ๒๘

ภายหลังให้เอาทรายออกจากหลุมและชั่งทรายที่เหลืออยู่ในขวดแล้ว น้ำหนักเหล่านี้รวมทั้งเรารู้ Density ของทรายร่อน ก็อาจจะหา Density-in-place ได้ตามสูตรต่อไปนี้:-

$$\begin{bmatrix}\text{Density-in-place}\\ \text{lb. per cu. ft.}\end{bmatrix} = \frac{\text{Wt. of soil removed}}{\text{Wt. of sand refill hole}} \times \text{Density of the sand}$$

ที่ได้ Density มานี้ เป็น Wet Density เพราะดินที่ขุดมาจากหลุมทดลองเป็นดินเปียก

๗.๗ การเปรียบเทียบ Density ที่หาได้จากสนามกับจากห้องทดลอง

'ปรียบเทียบ Density ในสนามกับในห้องทดลองนั้น เป็นการตรวจสอบความแน่นของ erial ที่ใช้ถมเขื่อนภายหลังจากบดทับแล้วว่ามีความแน่นตามเกณฑ์ที่กำหนดให้หรือไม่

เปรียบเทียบใช้เปรียบเทียบจาก Dry Density จาก Material ที่ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{1}{4}''$ ก่อนอื่นให้หา Field Wet Density ของดินเหล่านี้ที่คัดเอาหินหรือกรวดขนาดตั้งแต่ $\frac{1}{4}''$ หรือใหญ่กว่าออกเสียก่อน และเมื่อเราทราบน้ำหนักและปริมาตรของกรวดหิน แล้วเราก็สามารถหา Field Wet Density ของดินอย่างเดียวนี้ได้ การหาปริมาตรของหินหรือกรวดที่ได้ผ่านตะแกรง $\frac{1}{4}''$ ใช้หาโดยวิธีการแทนที่สะดวกกว่าอย่างอื่น ถ้า Specific Gravity ของกรวดหรือหินไม่แตกต่างกันมาก ก็สามารถคำนวนหาได้จากสูตรต่อไปนี้ ซึ่งมีความละเอียดพอใช้ได้

UNITED STATES
DEPARTMENT OF THE INTERIOR
Bureau of Reclamation

DATE ________ ____________ DAM

Test No. ______ Inspector __________

Location ______________________

______________ Elev. __________

Description ____________________

____

Roller passes __________________

Remarks _______________________

____

Wt. soil + box = ______

Wt. box empty = ______

Net wt. soil = ______

Wt. sand = ______

Wt. residue = ______

Net wt. sand (used) = ______

Density sand (loose) = ______

FIELD

Moist density-Soil & rock = ______

Moist density-Soil only = ______

Dry density-Soil & rock = ______

Dry density-Soil only = ______

Needle (top) = ______

Needle (bottom) = ______

LAB.

Blows per layer = ______

Dry density-Soil only = ______

Moisture (evap)-Soil only = ______

Moisture (comp)-Soil&rock = ______

Needle = ______

EF 2-34

UNITED STATES
DEPARTMENT OF THE INTERIOR
Bureau of Reclamation
EMBANKMENT PLASTICITY RECORDS

DATE ________ ____________ DAM

Blows per Layer ______

Location		Elev.	Plasticity		Moist.
Sta.	Offset		Dam	Cyl.	

EF 3-34

$$\text{Volume} \quad - \quad \frac{\text{Wt. of rock}}{\text{Sp.gr.} \times 62.4}$$

ถ้ากรวดหินจำนวนเล็กน้อยในขณะกำหนดหา Field Wet Density เราอาจจะใส่กลับลงไปในหลุมใหม่ และสามารถใส่ทรายให้รอบ ๆ ก้อนกรวด หิน อย่างเรียบร้อย ก็ไม่จำเป็นต้องกำหนดหาปริมาตร

ดินที่ร่อนแล้วให้ใส่ในกระบอก และกระทุ้งโดย Rammer ตามมาตราฐานของห้องทดลองทำ ๓ ชั้น ความชื้นของดินตัวอย่างใช้ในการทดลองใช้ประมาณ ๕๐๐ แกรม และเป็นดินที่ผ่านตะแกรงขนาดเดียวกัน กำหนดหาความชื้นได้จากทำให้แห้ง เมื่อรู้ค่าของ Wet Density และความชื้นของดินแล้วก็หาค่าของ Field หรือ Lab. Density ต่อไปจากสูตรต่อไปนี้:-

$$\text{Dry Density} = \frac{\text{Wet Density}}{1 + \text{the percent of moisture}}$$

ตัวอย่าง

Wet Density – 130 lb. per cu. ft.

Moisture – 10 percent

$$\text{Dry Density} - \frac{130}{1 + 0.10}$$

$$- \quad 118.2 \text{ lb. per cu.ft.}$$

เมื่อกำหนดหาความชื้นของดินที่ร่อนแล้ว โดยวิธีการทำให้แห้งได้แล้ว ยังมีความจำเป็นที่จะต้องหาความชื้นของดิน หิน กรวด จากตัวอย่าง (Pit - run) ด้วย ตามตัวอย่างวิธีการดังต่อไปนี้:-

Pit - run มีหิน กรวด ประมาณ ๓๐ เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ผ่านตระแกรง และผ่านตะแกรงขนาด $\frac{1}{4}$" ได้ ๗๐ เปอร์เซ็นต์ และหาความชื้นของดินที่ผ่านตะแกรงได้ ๑๒ เปอร์เซ็นต์ อันดับแรกความชื้นที่มีอยู่ในกรวด หิน ทรายกำเหนดหาได้โดยใส่กรวด หิน ประมาณ ๕-๑๐ ปอนด์ ในกระบอกซึ่งมีตระแกรงที่ก้นและแช่น้ำไว้ ๒๔ ชม. และเมื่อตั้งทิ้งไว้ให้น้ำแห้งแล้วนำไปชั่ง และไปคั่วโดยใช้ความร้อนไม่น้อยกว่า ๑๐๕° C และชั่งใหม่คำนวนความชื้นได้จากน้ำหนักที่หายไป ตามตัวอย่างที่แสดงความชื้นที่หาได้ประมาณ ๒ เปอร์เซ็นต์ของ Dry Weight ความชื้นของ Pit-run คำนวนได้ดังนี้:-

$\frac{๑๒x๗๐}{๑๐๐}$ = ๘.๔ เปอร์เซ็นต์ของ dry pit-run material รวมทั้งความชื้นที่ Absorb

อยู่ในกรวด หิน ด้วยจะได้ดังนี้:-

$๘.๔ + \frac{๒x๓}{๑๐๐}$ = ๙.๐ เปอร์เซ็นต์ หรือ Moisture content ของ Pit-run material

ค่าอันนี้นำไปใช้ในการคำนวน Dry Density ของ Pit - run จากสูตรดังกล่าวมาแล้ว Wet Density ที่ใช้ในการคำนวนนั้นเป็น Wet - Density ของ Pit - run material และความชื้นที่อยู่ในกรวดหรือหินนี้คงที่ ไม่แตกต่างกันสำหรับ กรวด หิน อย่างหนึ่ง ๆ

เป็นสิ่งสำคัญอันหนึ่ง เมื่อเราคำนวนหาความชื้นของ Pit - run material เป็นเปอร์ของ Dry Weight ซึ่งได้บันทึกหรือจดไว้เพื่อรายงานความก้าวหน้าของงานก่อสร้างควรนำมาลงในแบบฟอร์มแล้วแนบเสนอไปด้วย

การกำหนดหา Dry Density จาก Lab ควรทำอย่างน้อย ๒ ตัวอย่าง โดยใช้ Material ที่ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{1}{4}''$ ความชื้นต่าง ๆ กันกับ Field Moisture

บางครั้ง Field Dry Density สำหรับดินที่นำมาทดลองต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้ของ Max. Lab. Dry Density ซึ่งแสดงว่า ความแน่นของดินที่ถมเขื่อนยังไม่พอ ก็ให้บดทับใหม่พร้อมทั้งแก้ความชื้นเสียให้ถูกต้องด้วย

๘. Stabilizing Fill คือ คันดินที่เราสร้างขึ้นที่ตีนทำนบด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำและใช้ดินอะไรก็ได้ ถมอย่างไดก็ได้ และจะสร้างก็ได้ไม่สร้างก็ได้ เพิ่มน้ำหนักไม่ให้ดินฐากรากของตัวเขื่อนปูดออกไป ความชื้นและความแน่นก็ไม่จำเป็นต้องควบคุม ปูดินแล้วบดทับด้วยเครื่องจักรเครื่องมือที่ขนดินนั่นเอง บางทีอาจจะบดเล็กน้อยเพื่อให้รถผ่านไปมาสะดวก

๙. **การป้องกันลาดเหนือน้ำของเขื่อน** โดยทั่ว ๆ ไปการป้องกันลาดเหนือน้ำของเขื่อนให้ทั้งหิน Rip - Rap อย่างอื่นก็มี ป้องกันด้วยการเท Conc. Slab, Conc. Block หรือไม่ก็ Asphalt ซึ่งพิจารณากันถึงด้านประหยัดและเหมาะสมเป็นเกณฑ์

การใส่ Rock Riprap ทำได้หลายวิธี คือ ขนหินมาเทที่พื้นที่ริมลาดเหนือน้ำบนหลังเขื่อนที่กำลังถม วิธีนี้ต้องพยายามป้องหินให้หันกับงานดิน งานดินไม่ควรสูงเกิน ๓.๐๐ เมตร ถ้าไม่เกินเวลา Doze ลงไปหินจะแน่นที่สุด ถ้าสูงกว่าจะแยกตัวกัน หรือมาใส่ภายหลังงานดิน

ของเขื่อนเสร็จวิธีหลังใช้รถบรรทุกหินแล่นลงมาตาม Slope ของเขื่อน โดยใช้ Tractor รถอีกคันลากจูงขึ้นลงเมื่อถึงที่ก็เทเป็นกองๆ และตบแต่งด้วยรถหรือคนเฉพาะทำหน้า Slope ให้เรียบเท่านั้น อีกวิธีก็ให้รถวิ่งเทในแนวราบตาม Slope ขึ้นมาเป็นระดับชั้นๆ เช่น Conc. Block ส่วนมากใช้หล่อมาจากที่อื่นแล้วนำมาเรียงใช้คนหรือเครื่องจักรเครื่องมือขึ้นอยู่กับขนาดของ Conc. Block ส่วนการลาดยางมาตอยทำเช่นเดียวกันกับเท Conc. Slab

๑๐. **การป้องกันลาดท้ายน้ำ** (Downstream-Slope Protection) เขื่อนดินทุกเขื่อนจำเป็นต้องทำการป้องกันการกัดเซาะจากน้ำฝน โดยใส่หิน กรวด หรือบางครั้งใช้ปลูกหญ้าถ้าเขื่อนไม่สูงนัก การทำก็ทำเช่นเดียวกับด้านเหนือน้ำ ซึ่งแล้วแต่จะหนา-บางเพียงใด ส่วนหญ้านั้นก็ใช้วิธีปลูกธรรมดา หรือใช้ปลูกด้วยเม็ดหญ้าโรย Grass seeding Machine หรือพ่นด้วยเครื่องพ่นเม็ดหญ้า ส่วนการใช้ Asphalt นั้น การออกแบบยากไม่นิยมทำกัน

๑๑. **การรายงานผลก้าวหน้าของงาน** (Progress Reports) ระบบของ Bureau of Reclamation ให้รายงานผลงานก้าวหน้าเป็นประจำ ดังต่อไปนี้:-

๑๑.๑ ตำแหน่งของการทำงาน

- บริเวณที่ทำงานและทำสำเนาแนบกับรายงานทุกครั้งไปทุกๆ วันในบ่อยืมดินให้เขียนลงในแผนที่ไว้ทุกๆ วัน
- บันทึกย่อ หรือ Sketch แสดงตำแหน่งและระดับของทุกๆ จุดที่ต่ำบนตัวเขื่อน และถ้าจุดต่างๆ เหล่านี้ได้ถมขึ้นมาอย่างรวดเร็วก็ให้บันทึกรายละเอียดการทำงาน เหตุผลไว้ด้วยว่า ต่ำไปเพราะอะไรสูงขึ้นมาอย่างรวดเร็วเพราะอะไร

๑๑.๒ ความชื้น (Moisture)

- เปอร์เซ็นต์ของความชื้นในดินที่บ่อยืมดินก่อนให้น้ำ
- เปอร์เซ็นต์ของความชื้นที่ให้เพิ่มในบ่อยืมดิน
- เปอร์เซ็นต์ของความชื้นที่ให้เพิ่มที่ๆ เทดิน
- ความชื้นสูงสุด ความชื้นเฉลี่ย ความชื้นต่ำสุดที่หาได้หลังจากการบดทับ ให้ใช้แทนความชื้นทั่วๆ ไปได้ ไม่ใช่ต้องทำการทดลองหาจนมากมายเกินไป ถ้าวันนั้นใช้ดินจากหลายบ่อยืมก็ให้บันทึกความชื้นต่างๆ ไว้ด้วย

- ให้บันทึกย่อ ๆ ถึงวิธีการเพิ่มน้ำให้ดินทั้งที่บ่อยืมและที่บนเขื่อน
- บันทึกเรื่องความชื้นตลอดความหนาของชั้นว่า สม่ำเสมอเพียงใดก่อนที่จะบดทับ

๑๑.๓ การผสมดินให้ได้ความชื้น (Mixing)

- บันทึกย่อถึงวิธีการผสมดิน คลุกดินให้ได้ความชื้นทั้งที่บ่อยืม และที่ ๆ เทดินบนเขื่อน
- จากวิธีการผสมดังกล่าวแล้วได้ผลเพียงใด บดทับแล้วได้ผลสม่ำเสมอเพียงใด

๑๑.๔ วัสดุ (Materials)

- ดินชนิดต่าง ๆ ที่ขุดและพบในบ่อยืม เช่น ปรากฏว่า ดินที่กำลังขุดด้วย Shovel เปลี่ยนไปจากเดิม ก็ให้บันทึกไว้
- ถ้าดินที่ใช้อยู่ผิดแปลกไปจากดินที่ใช้ทำ Test Section ตอนระยะเริ่มงานก็ให้หมายเหตุไว้
- บันทึกย่อลักษณะและความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของชั้นดิน ตำแหน่งและลักษณะพิเศษของดินทุก ๆ ชั้น ที่ปรากฏพบในบ่อยืม
- ความลึกของการขุดดิน ที่ Eorrow Pits ว่า ขุดลึกมากที่สุดเท่าใด ลึกเฉลี่ย และตื้นที่สุดเท่าใด

๑๑.๕ การบดทับ (Rolling)

๑.๑๕ (๑) เมื่อบดทับให้สังเกตความเปลี่ยนแปลงเคลื่อนไหวของดินที่ถูกบดทับว่าเป็นคลื่นหน้าตัวบดทับหรือเปล่า หรือปูดไปปูดมาหรือไม่ ความจมของตัวบดทับหรือพื้นของตัวบดทับ ของทุกเที่ยวที่บดจนถึงสุดท้าย หรือมีอาการอะไรอย่างอื่นก็ให้บันทึกไว้ด้วย

๑๑.๕ (๒) เครื่องบดทับทุก ๆ ชั้นที่ใช้ในการบดทับ ควรใช้ชนิดขนาดเดียวกันเพื่อความสะดวกในการ Control ต่าง ๆ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องน้ำหนัก ขนาดหรือกำหนดต่าง ๆ ให้บันทึกหมายเหตุไว้ให้ละเอียด

๑๑.๖ การถ่ายภาพ (Photographs)

๑.๑๖ (๑) การเก็บภาพการทำงานควรกำหนดสถานที่ถ่ายภาพถาวรไว้ ซึ่งเป็นที่ ๆ ให้มีระดับสูงพอเหมาะที่จะใช้ถ่ายภาพได้ทั้งบริเวณก่อสร้างและสามารถถ่ายได้ตั้งแต่เริ่มงานจน

ถึงเสร็จงาน เพื่อใช้ถ่ายผลการก้าวหน้าของงานเป็นระยะ ๆ และควรถ่าย Close–up ไว้สัก ๓–๔ ภาพ เป็นประจำ เพื่อรายรายงานผลความก้าวหน้า เช่น ภาพรถกำลังเทดิน บดทับและให้ความชื้น เป็นต้น

๑๑.๖ (๒) รูปถ่ายบ่อยืมดินก็ควรถ่ายภาพวิวทั่ว ๆ ไป แสดงการทำงาน และถ่าย Close–up ของหน้าตัดดิน

๑๑.๗ ทั่ว ๆ ไป

๑๑.๗ (๑) บรรยายเรื่องราวต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดในข้อนี้โดยย่อ

๑๑.๗ (๒) กำหนดแบบฟอร์มที่เหมาะสมและสะดวกในการบันทึกต่าง ๆ เช่น ดินมาจากไหน จำนวนเที่ยวของการบดทับ ค่าของ Dry Density และความชื้นทุกตัวอย่างที่หาค่าของความแน่น

๑๒. การตรวจสอบและอำนวยการ (Supervision and Inspection)

ความสามารถของการอำนวยการและตรวจสอบงาน เป็นมูลฐานที่ทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี Inspector ต้องรู้ถึงหลักของการออกแบบและวิธีการก่อสร้างที่ดี และการควบคุมงานอย่างดี Inspector ก็เช่นเดียวกัน ต้องรู้หลักการออกแบบและวิธีการก่อสร้าง พอที่จะแนะหรือทำให้งานดำเนินไปตามวิธีการที่กำหนดไว้ และตามหน้าที่ที่ตนรับผิดชอบ Inspector งานดินทั้งหลายต้องมีความชำนาญในการทำ ควบคุมงานในสนามและสามารถเข้าใจรายงานต่าง ๆ ได้อย่างดี

๑๓. รายงานการตรวจสอบผลงาน (Inspection Reports)

สถิติความก้าวหน้าของงานเป็นสิ่งที่ต้องทำให้สม่ำเสมอ และแน่นอนของงานแต่ละอย่าง ๆ สถิติเหล่านี้จะได้บางอย่างที่ดีที่สุดจากรายงานประจำวันของ Inspector ซึ่งรวมรายละเอียดงานต่าง ๆ ไว้ตามต้องการ ซึ่งแบบฟอร์มต่าง ๆ เหล่านี้ต้องกำหนดไว้ให้เรียบร้อยตั้งแต่เริ่มงาน (ตัวอย่างแบบฟอร์มได้ให้ไว้หน้าต่อไป)

แบบฟอร์มต่าง ๆ ของรายงาน กำหนดขึ้นตามความต้องการของ Project office แบบฟอร์มตัวอย่างที่ได้แนบมาด้วยเป็นของ USBR ซึ่งพอจะเอามาดัดแปลงใช้กับงานของเราได้ ซึ่งตามปกติรายงานนี้จะแจกจ่ายให้กับบุคคลที่เกี่ยวข้อง เช่น ตัวอย่าง

Routing	Initial	Date
1. Inspector on following shift	....	....
2. Chief Earthwork Inspector	....	....

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR

BUREAU OF RECLAMATION

FEATURE ____________ ____________ PROJECT

EARTHWORK INSPECTOR'S DAILY REPORT

DATE ______ SHIFT: ____ WEATHER: ______ ROLLER TRIPS: ______ INSPECTOR: ____________ FOLLOWING INSPECTOR: ______

EXCAVATION				EMBANKMENT							
							CONDITION AT END OF SHIFT				
MATERIAL	SHOVEL NUMBER	WORKING AT LOCATION	DEPTH OF CUT	NUMBER LAYERS PLACED	HAULING TO LOCATION	ELEVATION	MOISTURE	SPREAD	ROLLED	TESTS TAKEN	REMARKS

EQUIPMENT	INSTRUCTION GIVEN CONTRACTOR
NO. DOZERS: ____________ NO. ROLLERS: ____________ NO. TRUCKS: ____________ NO. SHOVELS: ____________ NO. MEN: ____________	
DELAYS	NOTE: USE BACK OF REPORT FOR SKETCH AND ANY ADDITIONAL REMARKS

3.	Concrete and Earthwork Eng.	....	....
4.	Construction (or Resident) Eng.	....	....
5.	Office Engineer	....	....
6.	Filles	....	....

วิธีการสังเกตและตรวจสอบความมั่นคงของเขื่อน

(Dam Behavior Observation System)

๑๔. **คุณสมบัติของเขื่อนเป็นปัญหาข้อหนึ่งของการออกแบบ** (Dam Behavior as a Factor in Design) การอ้างถึงปัญหาทางวิชาการเกี่ยวกับความมั่นคงของเขื่อนดินนั้น เป็นเรื่องที่ไม่แน่นอนหรือมีกำหนดแน่นอนนัก ทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับความชำนาญในการก่อสร้างและอาศัยผลที่ปรากฏออกมาของเขื่อนที่สร้างเสร็จมาแล้วเป็นเครื่องปรับปรุงแก้ไขการออกแบบและวิธีการก่อสร้าง นอกจากนี้การแก้ปัญหาการก่อสร้างและออกแบบเขื่อนให้มั่นคงถาวร ขึ้นอยู่กับการเจริญก้าวหน้าของการค้นคว้าทาง Soil-Mechanics และการเปรียบเทียบเกี่ยวกับปรากฏการณ์ต่าง ๆ โดยอาศัยความสังเกตเมื่อเขื่อนนั้นได้ทำหน้าที่จริง ๆ เช่น ภายหลังจากการเก็บกัก เป็นต้น

การใช้ความสังเกตงานในสนามให้มากขึ้นนับว่ามีความสำคัญมาก เช่น Consolidation และการทรุดตัวของตัวเขื่อนหรือฐานราก และการจัด Internal porepressure ประโยชน์ในการใช้ความสังเกตที่เป็นการทำให้มีสถิติของการทำงานในสนาม และเป็นการจัดหารายละเอียดต่าง ๆ เพื่อเป็นการยืนยันผลของการทดลองใน Lab. ว่าถูกต้องหรือไม่เป็นต้น

๑๕. Consolidation และ Settlement ปัญหาของ Consolidation และ Settlement ที่เกิดขึ้นกับเขื่อนดินนั้น ต้องการพิจารณาจากหลักของความต้องการรักษาความสูงของ Freeboard ต้องการปริมาตรของการขุดดินจากบ่อยืมดิน และพิจารณาการแตกร้าวของอาคารที่สร้างบนหรือผ่านเขื่อน การทรุดตัวที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับการ Consolidation ของตัวเขื่อนและดินฐานรากที่ยังไม่ Consolidate และเมื่อได้รับ Load ย่อมเกิดขึ้นได้ภายหลัง การ Consolidate ของเขื่อนจะมีต่อไปหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินตามธรรมชาติ และวิธีการก่อสร้างถ้าทำดีก็เกิดการทรุดน้อย สำหรับฐานรากนั้นจำนวนของ Consolidation นั้น ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ Material ความลึกของ Bed Rock และความเข้มของน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดให้

Consolidation และ Settlement ที่เกิดขึ้นนั้น จำเป็นต้องคอยสังเกตและติดตามในเมื่อได้รับ Load เพิ่มขึ้นต่าง ๆ กัน ทั้งการเกิดขึ้นในตัวเขื่อนและรากฐาน USBR ใช้วัดด้วย Settlement Point ทั้งที่เกิดขึ้นภายนอกและภายใน

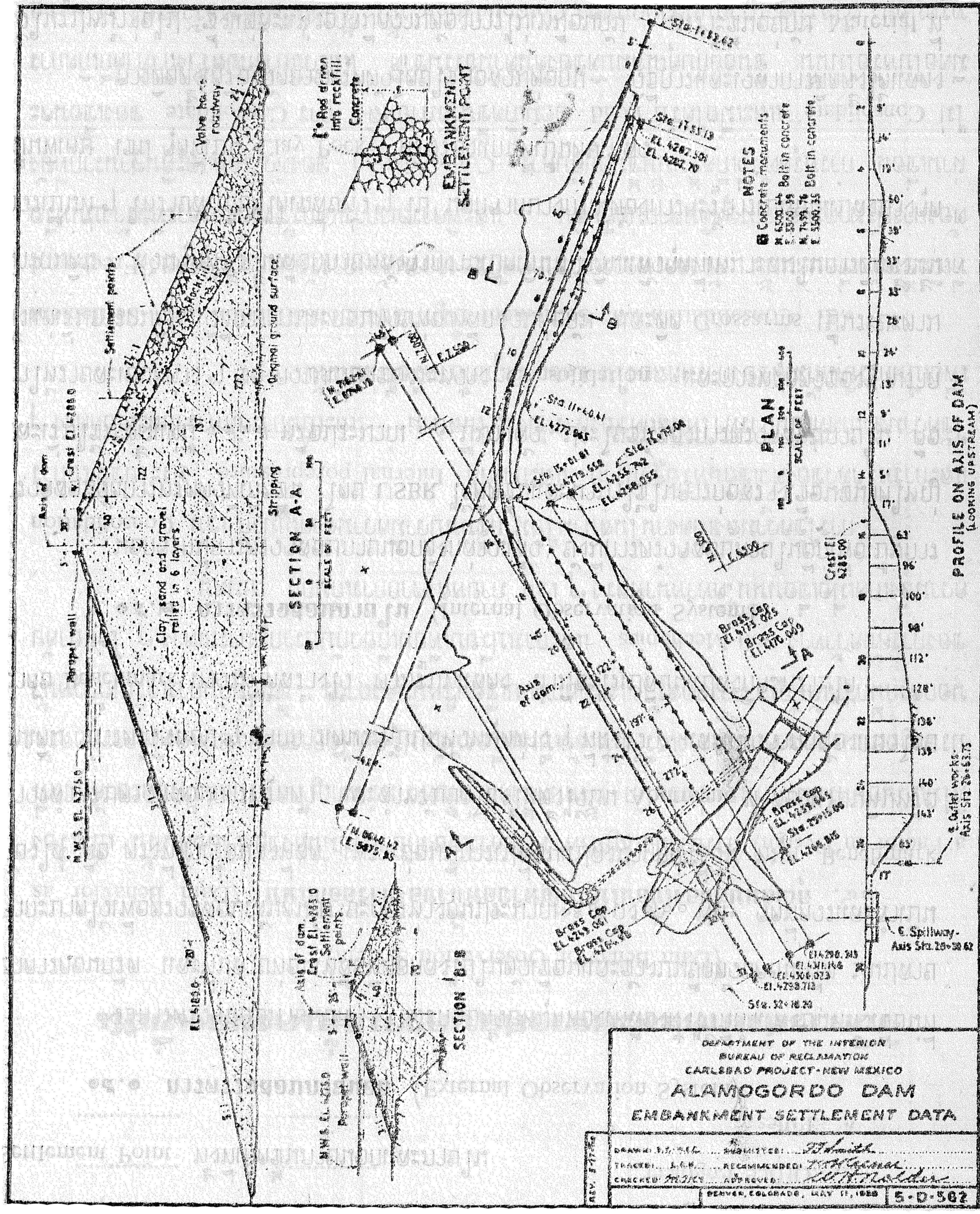
๑๕.๑ การตรวจสอบภายนอก (External Observation System)

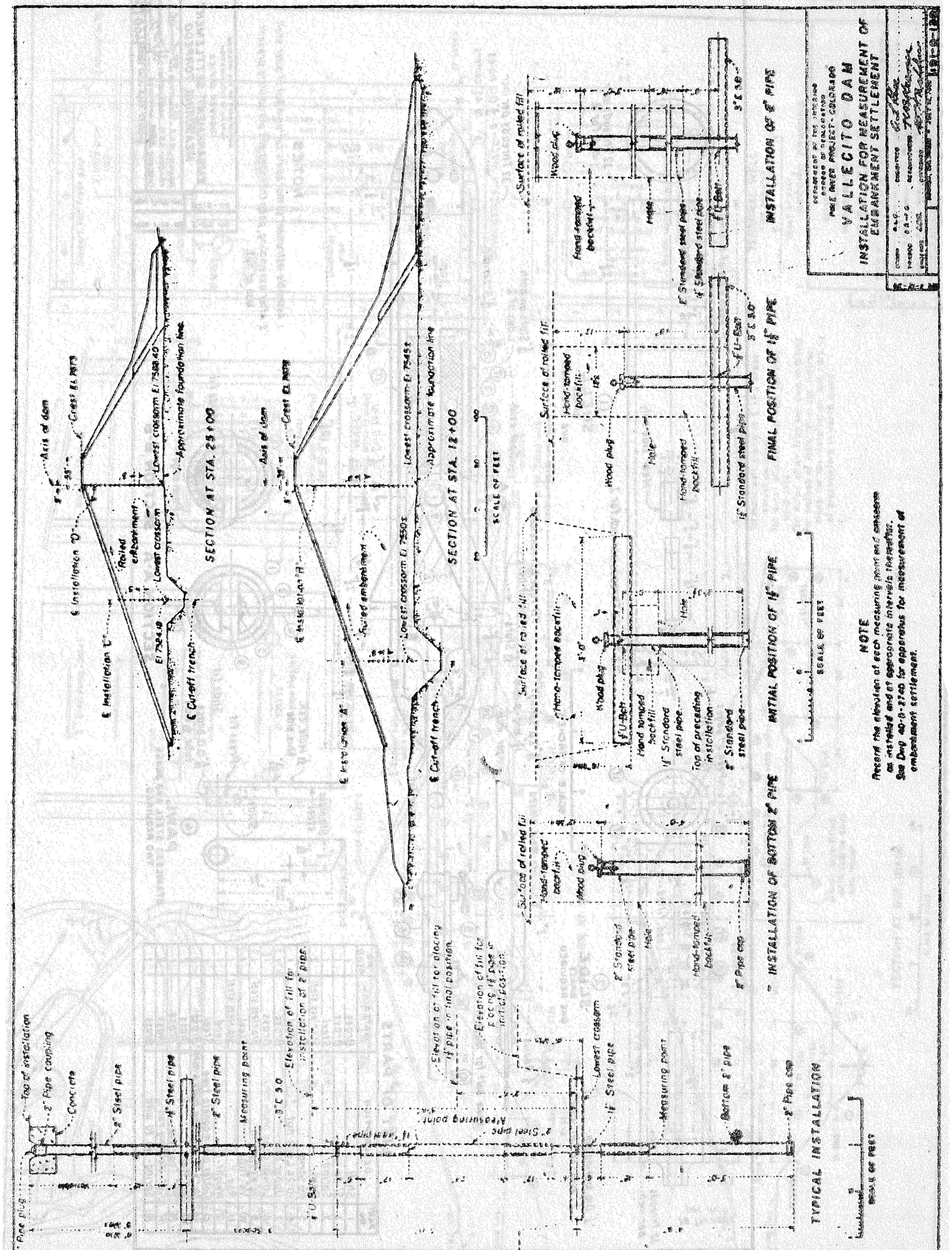
วิธีการตรวจสอบภายนอก ประกอบด้วยหมุดทองเหลืองฝังไว้ที่กำแพงบนหลังเขื่อนที่อาคารคอนกรีต และที่ปลายท่อนเหล็กที่ตอกลงไปในตัวเขื่อนและข้างบนยึดด้วยคอนกรีต บนปลายกากะบาดไว้เพื่อตรวจสอบเส้นศูนย์ระยะควรห่างกันประมาณ ๕๐ ถึง ๑๐๐ ฟุต จุดที่ควรและจำเป็นต้องใส่ คือ ตรงที่ตัวเขื่อนสูงที่สุด เพราะย่อมมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่อื่น หมุด Benchmark ถาวรสำหรับตรวจสอบการทรุดตัว และสำหรับยึดโยงให้ตั้งไว้บน Abutment ทั้งสองฝั่งบนหินหรือดินเดิม การตรวจสอบ ๆ จากการเดินระดับบนหัวหมุดต่าง ๆ ที่ฝังไว้ และแนวจากกล้องแนวโดยอาศัย Benchmark ถาวรที่ได้สร้างไว้ ตามรูปที่แสดง ถ้ามีอะไรเปลี่ยนแปลงก็จะทราบได้

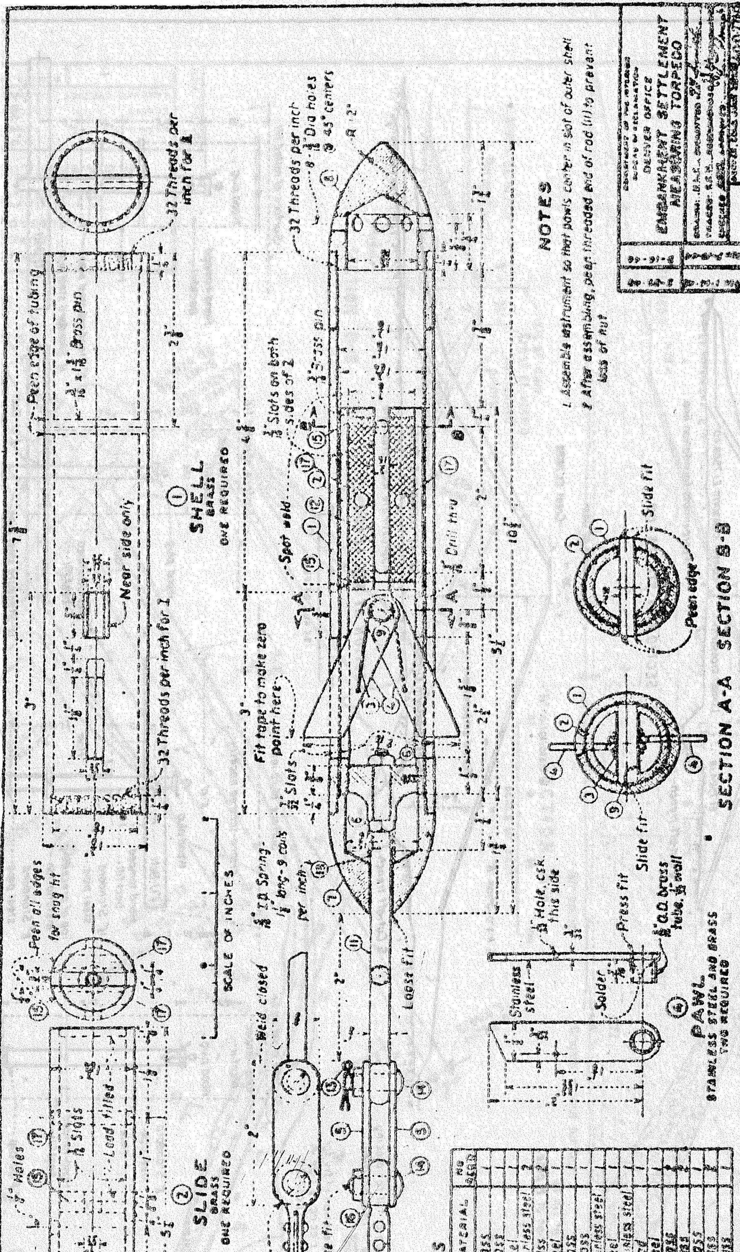
๑๕.๒ การตรวจสอบภายใน (Internal Observation System)

นอกจากมีการตรวจสอบภายนอกดังกล่าวแล้ว ยังมีการตรวจสอบภายในอีกเพื่อเป็นการตรวจสอบวัดการทรุดตัวที่เกิดขึ้น โดย USBR ได้คิดขึ้นและนำมาใช้ในการก่อสร้างเขื่อนขนาดใหญ่และเริ่มใช้มาตั้งแต่ปี ๑๙๓๘ หรือประมาณ ๓๕ ปีมาแล้ว ประโยชน์ของการตรวจสอบภายใน คือทำให้รายละเอียดต่าง ๆ ของความเกี่ยวข้องระหว่าง Consolidation และการทรุดตัวของฐานรากตั้งแต่เริ่มการถมดิน วิธีการทำประกอบด้วยท่อเหล็กสวมต่อกัน และติด Crossarms เป็นระยะตามการถมดิน ส่วนจุดที่ตั้งนั้นเลือกภายหลังจากงานเปิดเดินหน้าดินแล้วจุดที่เหมาะสมในการติดตั้งนั้นควรเป็นที่ ๆ ให้รายละเอียดได้เฉลี่ยทั่ว ๆ ไป นอกจากบางกรณีต้องการจะรู้การเปลี่ยนแปลงบางจุดเป็นพิเศษ เช่น จุดที่เป็น Clay Pocket หรือร่องแกนที่เป็นดินเหลว

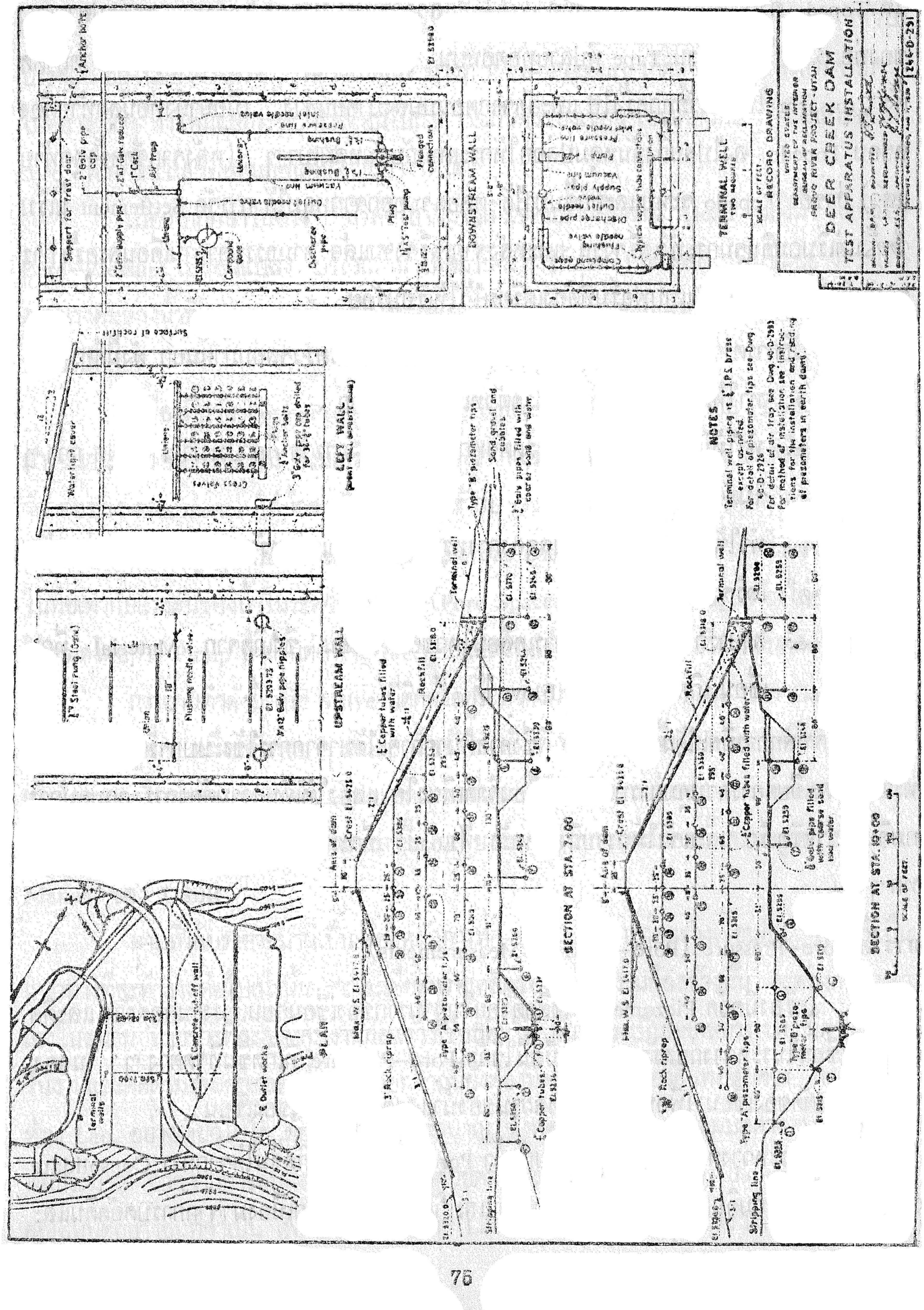
การติดตั้งเครื่องวัดการทรุดตัวโดยใช้ท่อสวมต่อกัน วิธีการและเวลาการติดตั้งได้แสดงไว้ในรูปหน้าต่อไป ซึ่งแต่ละแห่งอาจมีความต้องการไม่เหมือนกัน เพราะขึ้นอยู่กับ Material ที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนนั้น ๆ เป็นต้น


DEPARTMENT OF THE INTERIOR
BUREAU OF RECLAMATION
CARLSBAD PROJECT-NEW MEXICO
ALAMOGORDO DAM
EMBANKMENT SETTLEMENT DATA
5-D-562
SECTION A-A
SECTION B-B
PLAN
PROFILE ON AXIS OF DAM
(LOOKING UPSTREAM)
EMBANKMENT SETTLEMENT POINT
NOTES


VALLECITO DAM
INSTALLATION FOR MEASUREMENT OF EMBANKMENT SETTLEMENT
SECTION AT STA. 25+00
SECTION AT STA. 18+00
TYPICAL INSTALLATION
INSTALLATION OF BOTTOM 2" PIPE
INITIAL POSITION OF 1½" PIPE
FINAL POSITION OF 1½" PIPE
INSTALLATION OF 2" PIPE
NOTE
Record the elevation of each measuring point and crossarm as installed and at appropriate intervals thereafter.
See Dwg 40-D-2740 for apparatus for measurement of embankment settlement.



DEPARTMENT OF THE INTERIOR
BUREAU OF RECLAMATION
DENVER OFFICE
EMBANKMENT SETTLEMENT
MEASURING TORPEDO
NOTES
1 Assemble instrument so that pawls center in slot of outer shell
2 After assembling, peen threaded end of rod (11) to prevent loss of nut
SHELL
BRASS
ONE REQUIRED
SLIDE
BRASS
ONE REQUIRED
PAWL
STAINLESS STEEL AND BRASS
TWO REQUIRED
SECTION A-A
SECTION B-B
SCALE OF INCHES
LIST OF PARTS
Peen edge of tubing
32 Threads per inch for 1
Near side only
Fit tape to make zero point here
Spot weld
Drill thru
Loose fit
Weld closed
Peen bolt for loose fit
Peen all edges for snug fit
Lead filled
Slide fit
Press fit
Solder
Stainless steel
Peen edge


DEER CREEK DAM
TEST APPARATUS INSTALLATION
RECORD DRAWING
DOWNSTREAM WALL
TERMINAL WELL
UPSTREAM WALL
LEFT WALL
PLAN
NOTES
SECTION AT STA. 7+00
SECTION AT STA. 19+00
Axis of dam
Rockfill
Terminal well
Rock riprap
Stripping line

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทรุดตัวตามที่แสดงในภาพนั้น ได้ออกแบบไว้สำหรับโดยปล่อยให้ Topedo ลงมาเลยปลายล่างของท่อ ϕ 1 ½'' แล้วดึงขึ้นไป ป่าของ Topedo จะติดปลายล่างของท่อ ϕ 1 ½'' แล้วอ่าน Tape ที่ปลายท่อตอนบน (Trpedo ผูกติดกับเทปเหล็ก) การวัดถ้าติดตั้ง Crossarm ใหม่ให้วัดทุกครั้งไป และวัดจากตอนบนลงมาตอนล่าง เมื่อมาถึงท่อนสุดท้ายต้องหย่อน Topedo ลงไปจนถึงก้นหลุมปล่อยให้กระแทกกับก้นหลุมเบา ๆ (หลังจากวัดครั้งสุดท้ายแล้ว) ป่าของ Topedo จะหุบและยกขึ้นมาได้ ตลอดจนออกจากหลุมได้ การจัด Settlement นี้เริ่มวัดตั้งแต่เริ่มถมดินจนกระทั่งเสร็จงาน และหลังจากเสร็จงานแล้ว ตามธรรมดาอ่านเดือนละครั้ง การจดบันทึกให้บันทึกลงในแบบฟอร์มที่ต้องเตรียมไว้ให้เรียบร้อย

วิธีการตรวจสอบภายในนี้ได้ผลดีนอกเหนือจากวิธีการตรวจสอบภายนอก ดังนี้คือ:–

๑. ทำให้มีโอกาสทราบจากทรุดตัวที่เกิดในฐานราก

๒. ทำให้มีโอกาสทราบการทรุดตัวทุก ๆ ชั้น ของการวัด คือ ประมาณ ๕ ฟุต กว่า ๆ ในตัวเขื่อน

๓. ทำให้มีโอกาสได้ทราบผลของการทรุด ทั้งในขณะก่อสร้าง หรือหลังจากก่อสร้างเสร็จแล้ว

๔. สามารถที่จะทราบจอกการเคลื่อนไหวของตัวเขื่อน ซึ่งเกิดจาก Material ที่ถมเขื่อน เกิดเป็น Plastic Flow ได้

หลักการที่จะได้ผลตอบแทน ซึ่งคาดหมายว่าจะได้มาจากการใช้ระบบการวัดนี้ คือ ได้ทราบรายละเอียดการควบคุมการบดทับตัวเขื่อนว่าดีเพียงใด แสดงให้เห็นความต้องการ ควบคุมการถมดินว่าช้าหรือเร็ว และแจ้งให้ทราบถึงน้ำหนัก (Load) ที่จะเกิดขึ้นกับฐานรากเมื่อถมดินสูงขึ้นทุก ๆ วัน

การวัด Pore–Pressure (Pore–Pressure Measurements)

เครื่องมือวัด Piezometer ใช้ติดตั้งอยู่ในฐานรากของเขื่อนก่อนเริ่มงานก่อสร้าง และติดตั้งในตัวเขื่อนในระหว่างก่อสร้าง เครื่องมือนี้ใช้วัด Pore–Pressure ที่เกิดขึ้นที่จุดต่าง ๆ ในสองหรือสามรูปตัดของเขื่อน เพื่อทราบการไหลผ่านของน้ำและความมั่นคงของเขื่อน

ในระหว่างก่อสร้างและก่อนเก็บกักน้ำ Pore–Pressure เกิดขึ้นได้จากการ Consolidate ของตัวเขื่อน เมื่อถมดินและบดทับสูงมากขึ้น และเกิดขึ้นในฐานรากเนื่องมาจากการบดอัดดินและ

จากน้ำหนักของตัวเขื่อน จากการอธิบายที่แล้วมา การลดปริมาตร คือ การลดช่องว่างในระหว่างเม็ดดิน เนื่องมาจากการกดดัน และเนื่องจากเหตุนี้ทำให้ Pore–Fluid (air and water) เข้าไปบรรจุเต็มอยู่ในช่องว่างหรือรูระหว่างเม็ดดิน บางที Pore–Pressure เกิดสูงมาก และกระจายหายไปอย่างช้า ๆ ทำให้มีผลกระทบกระเทือนไปถึงความมั่นคงของเขื่อน เช่นเดียวกับ "Uplift Pressure" ที่เกิดขึ้นในเขื่อนหินก่อนที่น้ำผ่านข้างใต้ได้

เมื่อเก็บกักน้ำในอ่าง น้ำพยายามผ่านตัวเขื่อนมากขึ้นตาม Head ของน้ำ จึงทำให้ Pore–Pressure เปลี่ยนแปลง บริเวณที่น้ำไหลผ่านจะทำให้เกิด Pressure เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามแรงดันของน้ำที่พยายามกดดันเข้าไปในรูหว่างเม็ดดิน ฉะนั้น Pore–Pressure จึงเกิดในดินที่รั่วซึมได้น้อย

เครื่องมือวัด Pore–Pressure คือ Piezometer ซึ่งประกอบด้วย ท่อ Plastic อย่างดีต่อมารวมกันที่ห้องนอกตัวเขื่อน ซึ่งมีเครื่องวัด (Gage) และติดตั้งอยู่ใน Section ของเขื่อนที่ต้องการวัด ท่อของ Piezometer ใส่น้ำจนเต็ม และต่อเข้ากับ Gage และตรงระยะระหว่างกลางของท่อต่อไว้กับแผ่นหินที่เป็นรู ๆ ลักษณะคล้ายฟองน้ำ (Porous Disk) ฝังไว้ในตัวเขื่อน ซึ่งแรงดันของน้ำในท่อเท่ากับแรงดันของน้ำในระหว่างเม็ดดิน (Pore Spaces) ก่อนอ่านที่ Gage ต้องไล่อากาศออกให้หมดโดยการ Pump น้ำผ่านต่อ Piezometer และผ่านเข้าไปที่หลอดแก้วที่สำหรับดักอากาศ

การอ่านทำดังนี้ เปิด Valve ที่ติดตั้งอยู่ระหว่าง Piezometer Tube ของ Gage เข็มจะขึ้นไปหยุดอยู่ที่ ๆ หนึ่งแล้วค่อย ๆ Pump น้ำเข้าไป เข็มที่ Gage จะขึ้นไปแล้วหยุดอีกครั้ง และเมื่อไล่อากาศในท่อออกหมดแล้ว เข็มจะตกลงมาที่เดิม นี่คือ การอ่านค่าของ Pressure เพื่อใช้นำไปคำนวณหา Pore–Pressure ที่กล่าวมานี้เป็นเพียงย่อ ๆ ส่วนรายละเอียดนั้นจะหาดูได้จาก Earth Manual ของ USBR

ตามที่ได้บรรยายมานี้เป็นเพียงหลักการทั่ว ๆ ไปในการก่อสร้างเขื่อนดิน เพื่อใช้เป็นแนวทางที่จะทำงานต่อไปเท่านั้น รายละเอียดหรือเคล็ดของการทำงานก่อสร้างนั้น จะต้องศึกษาเอาเองในสนาม นายช่างที่จะควบคุมงานก่อสร้างเขื่อนดินได้ดีนั้น ต้องเป็นบุคคลที่รักงาน มีความสนุกในงานและติดตามงานอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้ยังต้องมีความรู้ในเรื่องดินพอสมควร จะอาศัยแต่ห้อง Lab. อย่างเดียวไม่ได้ ต้องอาศัยความชำนาญ ซึ่งพอจะคาดคะเนคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินได้พอประมาณ อาจจากการสัมผัสหรือการมองดูด้วยตา เช่น ความชื้น และ Gradation เป็นต้น และคุณสมบัติอย่างอื่นที่จำเป็น เพราะจะคอยผลจาก Lab. คงไม่ทันแน่ งานก่อสร้างเขื่อนดินนั้น ไม่

เหมือนกับอาคารคอนกรีต เพราะในแบบจะให้รายละเอียดอะไรมากไม่ได้ จะต้องไปกำหนดเอาในสนาม เช่น งานขุดร่องแกนจะกำหนดในแบบได้แต่เพียงว่าให้ขุดลงไปถึงหิน ส่วนจะลึกเท่าใดนั้นกำหนดไม่ได้ งานเปิดหน้าดิน (Stripping) ก็กำหนดความลึกไม่ได้แน่นอนเช่นกัน และยังมีอีกหลายอย่างหลายชนิด งานเขื่อนดินมีแบบไม่กี่แผ่น แต่ราคางานอาจถึงร้อย ๆ ล้านก็ได้ ฉะนั้นความสำคัญของนายช่างที่คุมงานจึงมีบทบาทมากเช่นกัน ขณะนี้งานของกรม ฯ เราสร้างเขื่อนดินโดยผู้รับเหมา และคุมงานโดยนายช่างของกรม ฯ จึงมีปัญหาต่าง ๆ เกิดขึ้นมากมาย เช่น งาน เงิน ต้องแก้ไขแบบบ้าง นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการดำเนินงานและ Equipments ที่ใช้ไม่ถูกกับลักษณะของงานและมีจำนวนไม่เพียงพอ เป็นต้น

ถ้าผู้ควบคุมงานมีความรู้และมีประสพการณ์เพียงพอ ก็จะวาง Schedule ต่าง ๆ ได้เป็นขั้น ๆ ไป เช่นเดียวกับการปลูกบ้านหรือสร้างตึก ตามความรู้สึกของคนทั่ว ๆ ไป อาจคิดว่างานสร้างเขื่อนดินเป็นงานง่าย แต่โดยความเป็นจริงแล้ว งานสร้างเขื่อนดินนั้นเป็นงานที่ต้องอาศัยความละเอียดรอบคอบในการทำงาน และการควบคุมงานอย่างใกล้ชิด เนื่องจากทำไปแล้วไม่มีหลักฐานปรากฏให้เห็นแน่ชัด เพราะต้องถมทับไปหมดและบริเวณงานก็กว้าง ควบคุมไม่ค่อยทั่วถึง นอกจากนี้ยังต้องอาศัยการตัดสินปัญหาเฉพาะหน้าในสนามอยู่ตลอดเวลาอีกด้วย

ผมขอจบคำบรรยายเพียงเท่านี้ หวังว่าท่านทั้งหลายคงได้ความรู้ไปบ้างไม่มากก็น้อยและจากที่ได้บรรยายมานี้หวังว่า ท่านจะให้ความสนใจกับงานก่อสร้างเขื่อนดินบ้าง เพื่อให้งานก่อสร้างได้สำเร็จไปด้วยดี และมั่นคงถาวรตลอดไป

□ □ □