บทที่ ๖

สรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะ

คุณสมบัติทั่วไปของอุโมงค์ทางน้ำลัน เชื่อนน้ำโจน

จากผลการทดลอง ทางน้ำลันเชื่อนน้ำโจนสามารถระบายน้ำในอัตรา ๒,๕๐๐ ลบ.ม/ว. เมื่อประตูบังคับเปิดเต็มที่ ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำอยู่ที่ระดับ ๓๗๒.๙๐ ม.รทก. สูงกว่าระดับเก็บกักสูงสุดอยู่ ๒.๙๐ ม. และต่ำกว่าระดับน้ำที่ออกแบบไว้เมื่อเกิดปริมาณน้ำหลากสูงสุดอยู่ ๙๐ ซม. (Design maximum flood level = 373.80 m.msl.) สภาพการไหลของน้ำในอุโมงค์เป็นการไหลแบบการไหลในทางน้ำเปิด (Open channel flow) ตามที่แสดงไว้ใน รูปที่ 47 และพอจะสรุปลักษณะการไหลของน้ำในอุโมงค์ที่บริเวณต่าง ๆ ได้ดังนี้

ก. ในช่วงของทางน้ำลัน และ Transition ระดับน้ำที่ผนังด้านข้างของอุโมงค์สูงกว่าบริเวณกลางอุโมงค์อันเนื่องมาจากน้ำที่ไหลผ่านตอม่อของทางน้ำลัน ทำให้เกิดครีบของน้ำข้างตอม่อและจะไหลกลมกลืนกันไปในช่วง Transition

ข. ช่วง Inclined Shaft ผิวน้ำที่ไหลไม่ค่อยราบเรียบอันเนื่องมาจากความหยาบของผิวอุโมงค์ อัตราส่วนความลึกของน้ำในอุโมงค์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ประมาณ ๑/๘, ๑/๔ และ ๑/๒ เมื่ออัตราการไหลของน้ำผ่านทางน้ำลันมีค่าเป็น ๗๕๐, ๑,๕๐๐ และ ๒,๕๐๐ ลบ.ม/ว. ตามลำดับ ความเร็วของการไหลของน้ำในอุโมงค์ทั้งสองเฉลี่ยประมาณ ๔๒ ม./ว. (รูปที่ 40-42, Section No.27,28)

ค. ช่วง Vertical Bend ระดับน้ำในช่วงนี้ต่ำกว่าระดับน้ำช่วงเหนือน้ำ เนื่องจากน้ำไหลด้วยความเร่ง ความเร็วของการไหลเฉลี่ยประมาณ ๕๒ ม./ว. (รูปที่ 40-42, Section No.41,52)

ง. ช่วง Downstream tunnel ความลึกของน้ำในช่วงนี้มีมากขึ้นอีกเล็กน้อย โดยมีอัตราส่วนความลึกของน้ำที่ไหลในอุโมงค์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ ประมาณ ๑/๘, ๑/๔ และ ๑/๒ เมื่ออัตราการไหลของน้ำผ่านทางน้ำล้นมีค่าเป็น ๗๕๐, ๑,๕๐๐ และ ๒,๕๐๐ ลบ.ม/ว. ตามลำดับ ความเร็วของการไหลเฉลี่ยประมาณ ๕๑ ม./ว. (รูปที่ 40-42, Section No.59)

<u>การกระจายของความดันน้ำที่ท้องอุโมงค์</u>

จาก รูปที่ 37-39 และ รูปที่ 44-46 แสดงการกระจายของความดันน้ำซึ่งวัดที่ศูนย์กลางของท้องอุโมงค์ทางน้ำล้นทั้งสอง เมื่อประตูบังคับน้ำเปิดเต็มที่ ผลการวัดความดันน้ำสรุปได้ว่า

ก. ในการทดลองหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของร่องผสมอากาศ โดยการติดตั้งร่องผสมอากาศชนิดไม่มี RAMP จำนวนเจ็ดร่อง (รูปที่ 37-39) พบว่า

๑. ค่าความดันน้ำในบริเวณทางน้ำล้นมีค่าเป็นบวกอยู่ระหว่าง ๑ ถึง ๕ ม. ของความสูงน้ำเป็นส่วนมาก และค่าความดันน้ำในทั้งสองอุโมงค์มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ไม่ว่าจะมีร่องผสมอากาศหมายเลข ๑ ติดตั้งอยู่ด้วยหรือไม่ จึงไม่มีความจำเป็นต้องติดตั้งร่องผสมอากาศหมายเลข ๑

๒. การกระจายของความดันน้ำในช่วง Transition ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีค่าเป็นบวก ระหว่าง ๒-๕ ม. ความแตกต่างของความดันน้ำบริเวณเหนือร่องอากาศหมายเลข ๒ ของทั้งสองอุโมงค์มีไม่มากนัก นั่นคือ การติดตั้งร่องผสมอากาศหมายเลข ๒ มิได้ทำให้ค่าความดันน้ำบริเวณใกล้เคียงทางด้านท้ายน้ำแตกต่างออกไปมาก แต่ทำให้เกิดค่าความดันน้ำเป็นลบเล็กน้อยที่ระยะประมาณ ๔๖ ม. ในแนวระดับจากสันของทางน้ำล้น เมื่อมีอัตราการไหลของน้ำในอุโมงค์ต่ำ ดังนั้น ร่องอากาศหมายเลข ๒ จึงไม่มีความจำเป็นในการติดตั้ง

๓. ในช่วง Inclined shaft ร่องผสมอากาศหมายเลข ๓ ทำให้เกิดค่าความดันน้ำเป็นลบเล็กน้อยที่บริเวณใกล้เคียง เมื่อมีอัตราการไหลต่ำ และที่บริเวณใกล้เคียงกับร่องผสมอากาศหมายเลข ๔ ไปทางด้านท้ายน้ำ ความดันมีค่าประมาณ -๑๕ ม. เมื่ออัตรา

การไหลต่ำ และมีค่าเป็นลบน้อยลงเมื่ออัตราการไหลมากขึ้น

๔. เมื่อน้ำไหลเข้าสู่ช่วง Vertical Bend ซึ่งเป็นช่วงที่ความลาดชันของผิวหน้าอุโมงค์ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ค่าความดันน้ำลดลงถึง -๒๕ ม. ของความสูงน้ำ เมื่อมีอัตราการไหลของน้ำผ่านทางน้ำล้นเป็น ๗๕๐ ลบ.ม/ว. และ -๑๘ ม. เมื่ออัตราการไหลเป็น ๒,๕๐๐ ลบ.ม/ว. จะเห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจาก ๗๕๐ ลบ.ม/ว. เป็น ๒,๕๐๐ ลบ.ม/ว. ทำให้ค่าความดันสูงขึ้นเพียง ๗ ม. แต่การติดตั้งร่องผสมอากาศหมายเลข ๕ ช่วยเพิ่มความดันให้กับน้ำได้ถึงประมาณ ๑๕ ม. ของความสูงน้ำที่ตำแหน่งใกล้เคียงทางด้านท้ายน้ำ

๕. บริเวณช่วงกลางของ Vertical Bend อุโมงค์ที่ติดตั้งร่องผสมอากาศจะมีค่าความดันสูงมาก ซึ่งเป็นผลมาจากร่องผสมอากาศหมายเลข ๖

จะเห็นว่าร่องผสมอากาศหมายเลข ๑, ๒, ๓, ๔, ๖ และ ๗ ไม่มีความจำเป็นต้องติดตั้ง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความดันทางด้านท้ายน้ำของร่องผสมอากาศหมายเลขดังกล่าว ไม่มีตำแหน่งใดที่ให้ค่าต่ำจนอาจทำให้เกิดการกร่อนทำลายเนื่องจากความดันต่ำได้ และเมื่อทำการทดลองโดยอุดร่องผสมอากาศหมายเลข ๑, ๒, ๓, ๔, ๖ และ ๗ ผลจากการวัดความดันน้ำที่ท้องอุโมงค์ ปรากฏว่าไม่มีผลกระทบกระเทือนจากการอุดร่องผสมอากาศดังกล่าวที่มีต่อร่องผสมอากาศหมายเลข ๕ กล่าวคือการกระจายของความดันน้ำในอุโมงค์หมายเลข ๒ และค่าความดันที่เป็นลบบริเวณใกล้เคียงไปทางด้านท้ายน้ำของร่องผสมอากาศหมายเลข ๕ ยังคงมีค่าและอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ร่องผสมอากาศหมายเลข ๕ จึงจำต้องคงไว้ เนื่องจากสามารถเพิ่มความดันได้อย่างมีประสิทธิภาพพอควร

ข. การทดลองเปรียบเทียบหาความเหมาะสมของร่องผสมอากาศชนิดต่าง ๆ (รูปที่ 44-46)

เมื่อทดลองใช้ร่องผสมอากาศชนิดมี RAMP (รูปที่ 43) ติดตั้งในอุโมงค์หมายเลข ๑ พบว่าเกิดค่าความดันบริเวณเหนือน้ำของร่องผสมอากาศมีค่าเป็นบวก แต่ทางด้านท้ายน้ำค่าความดันลดลงจนมีค่าเป็นลบโดยเฉพาะด้านท้ายน้ำของร่องผสมอากาศหมายเลข ๓ ค่าความดันต่ำลงถึง -๑๒ ม. ของความสูงน้ำ เมื่ออัตราการไหลต่ำ จึงไม่สามารถแก้ปัญหาการเกิดการกร่อนทำลายเนื่องจากความดันต่ำได้ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของร่องผสมอากาศทั้งสามโดยเทียบจากร่องผสมอากาศชนิดไม่มี

RAMP (รูปที่ 35) ณ. ตำแหน่งที่ติดตั้งเดียวกัน อัตราการไหลผ่านของน้ำเท่ากัน พบว่าร่องผสมอากาศหมายเลข ๑ ให้ค่าความดันเป็นบวกที่ดีกว่าร่องผสมอากาศอีกสองร่อง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความดันน้ำที่ระยะ ๗๕ ม. ในแนวราบจากสันทางน้ำล้นแล้ว ร่องผสมอากาศที่ไม่มี RAMP ยังมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

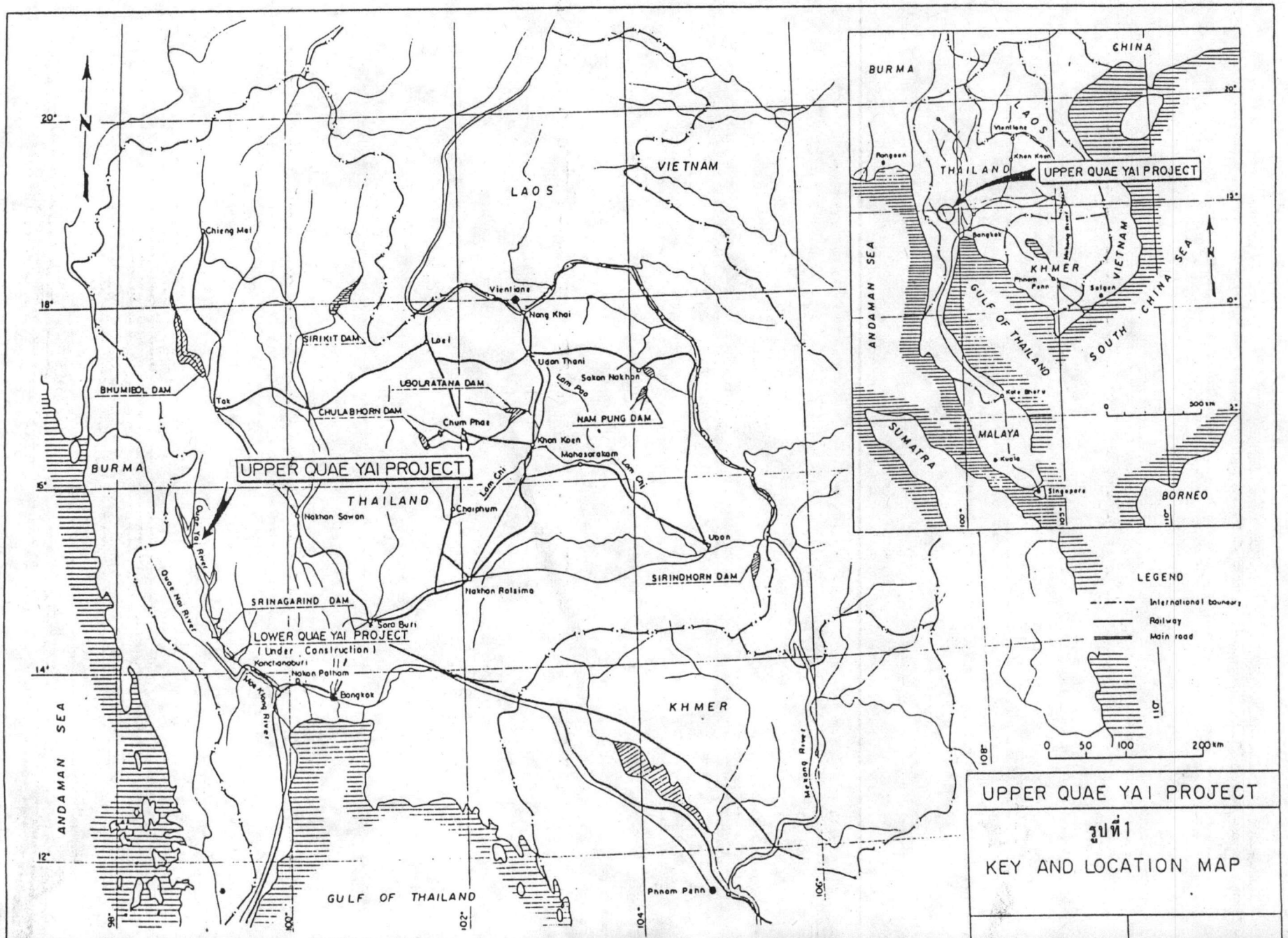
ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลอง ตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดการกร่อนทำลายจากความดันต่ำภายในอุโมงค์ทางน้ำล้นเขื่อนน้ำโจนอยู่ที่ระยะประมาณ ๑๒๐ ม. ในแนวระดับจากสันของทางน้ำล้นซึ่งอยู่ในช่วงบนของ Vertical Bend และตำแหน่งที่สมควรให้มีการติดตั้งร่องผสมอากาศอยู่ที่ระยะประมาณ ๑๒๐ ม. ในแนวระดับจากสันของทางน้ำล้น (หรือที่ระยะประมาณ ๘.๗ เท่า ของ Design head ในแนวระดับจากสันของทางน้ำล้น) เพียงตำแหน่งเดียว เหตุที่ต้องอาศัยข้อมูลของการกระจายความดันน้ำมาใช้พิจารณาหาตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดการกร่อนทำลาย เนื่องจากความดันต่ำนั้น ก็เพราะเราไม่สามารถที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ การกร่อนทำลายเนื่องจากความดันต่ำได้ในแบบจำลองของอุโมงค์ทางน้ำล้นเขื่อนน้ำโจน และจากการเปรียบเทียบร่องผสมอากาศชนิดที่มี RAMP สามขนาด (รูปที่ 43) ร่องผสมอากาศ หมายเลข ๑ (a = 52.5 ซม., b =10.5 ซม.) มีประสิทธิภาพดีกว่าอีกสองร่อง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับร่องผสมอากาศชนิดไม่มี RAMP (รูปที่ 35) ปรากฏว่าร่องผสมอากาศที่เหมาะสมกว่าเป็นร่องผสมอากาศชนิดไม่มี RAMP

ตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดการกร่อนทำลายเนื่องจากความดันต่ำนั้นอยู่ที่ระดับประมาณ ๒๐๐ ม.รทก. ซึ่งค่าความดันบรรยากาศที่ระดับนี้ประมาณ ๑๐.๓๔ ม. ของความสูงน้ำ และที่อุณหภูมิ ๖๐°F มีค่าความดันไอของน้ำประมาณ ๐.๑๘ ม. ของความสูงน้ำ ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่ค่าความดันน้ำที่ไหลในอุโมงค์มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ -๑๐.๑๖ ม. ของความสูงน้ำ ปรากฏการณ์การกร่อนทำลายเนื่องจากความดันต่ำย่อมเกิดขึ้นได้ ผลจากการติดตั้งร่องผสมอากาศทำให้ค่าความดันต่ำสุดของน้ำในอุโมงค์เป็น -๙.๘ ม. ของความสูงน้ำ ซึ่งมากกว่า -๑๐.๑๖ ม. เล็กน้อย แต่ในอุโมงค์ของจริง การผสมของน้ำกับอากาศจากร่องผสมอากาศมีค่ามากกว่าในแบบจำลองมาก เนื่องมาจากผลของแรงตึงผิวในแบบจำลองและในแบบของจริงมีค่าเท่ากัน ซึ่งในการก่อสร้างแบบจำลองมุ่งออกแบบให้มีค่า ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number) เท่ากันเท่านั้น ดังนั้น ค่าความดันน้ำในอุโมงค์แบบของจริงจะมีค่ามากกว่าในแบบ

จำลองอย่างมาก เช่นกัน อย่างไรก็ตามน่าจะได้มีการวิจัยร่องผสมอากาศชนิดมี RAMP เพิ่ม เติม โดยการแปร เปลี่ยนค่า a และ b ตลอดจนขนาดความกว้างยาวของหน้าตัดร่อง ซึ่ง เชื่อว่าจะได้ร่องผสมอากาศที่ เหมาะสมยิ่งขึ้น และหลังจากที่การก่อสร้างอุโมงค์ทางน้ำลัน เขื่อนน้ำโจน เสร็จสิ้นลง ควรจะมีการติดตามตรวจสอบผลการทำงานของร่องผสมอากาศ เพื่อหาจุดบกพร่องนำไปปรับปรุงและ เป็นแนวทางในการออกแบบร่องผสมอากาศที่ดีต่อไป

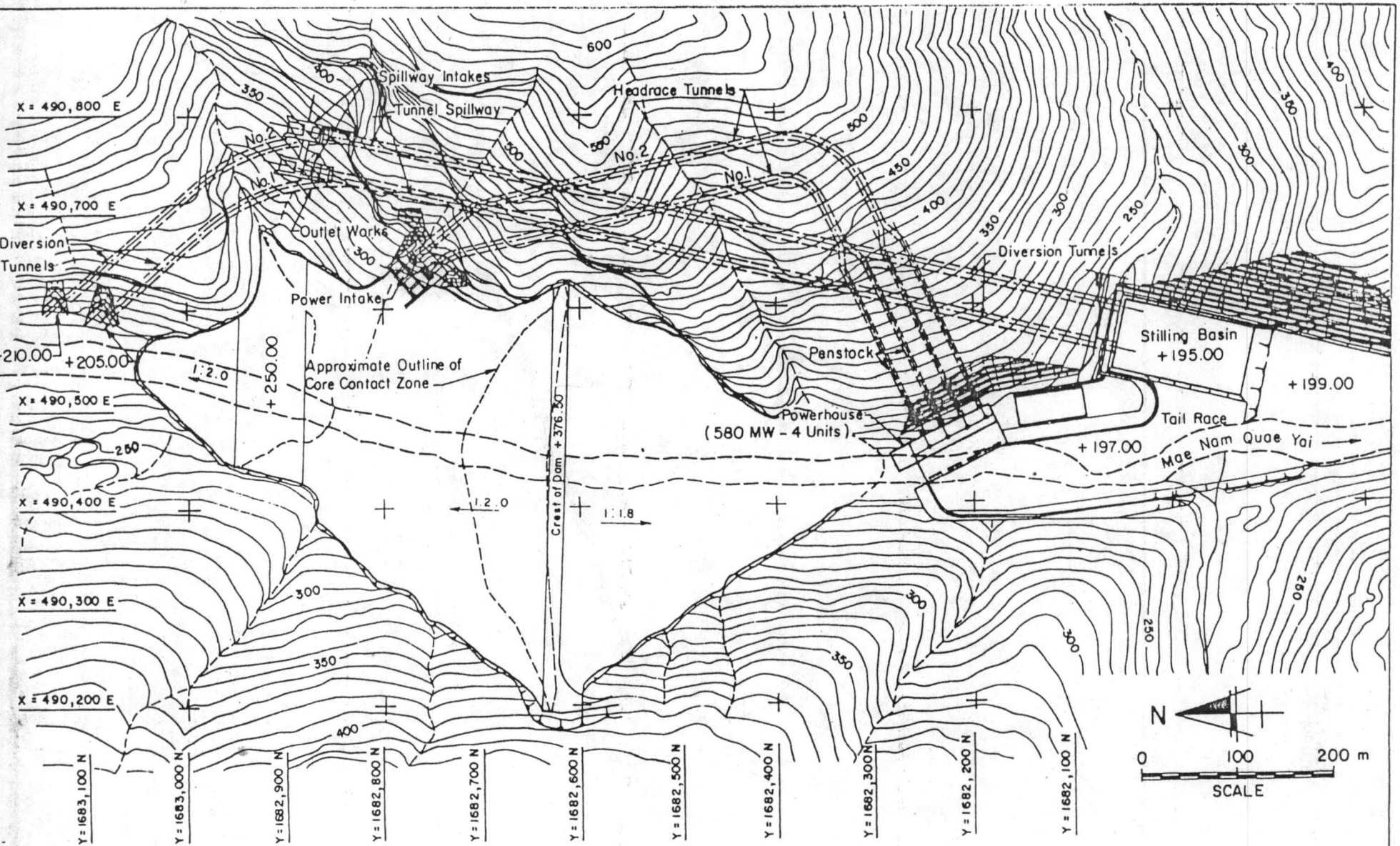
หมาย เหตุ Design head คือค่าความสูงของน้ำที่วัดจากระดับของสันทางน้ำลัน (๓๖๐.๐๐ ม.รทก) ถึงระดับผิวน้ำในอ่าง เก็บน้ำ เมื่อ เกิดน้ำหลากสูงสุดตามที่ออกแบบไว้ (๓๗๓.๘๐ ม.รทก)



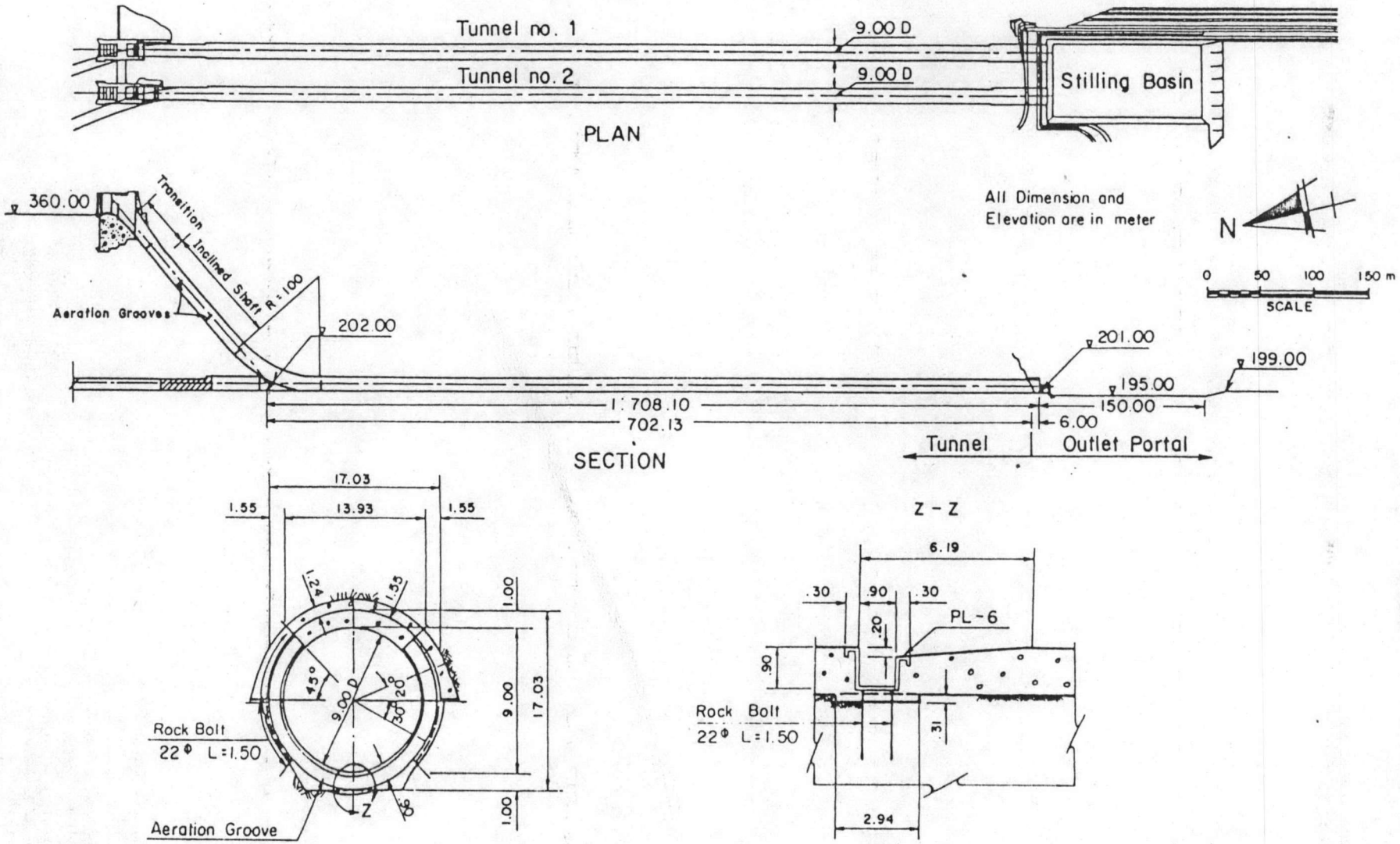
UPPER QUAE YAI PROJECT

รูปที่ 1

KEY AND LOCATION MAP

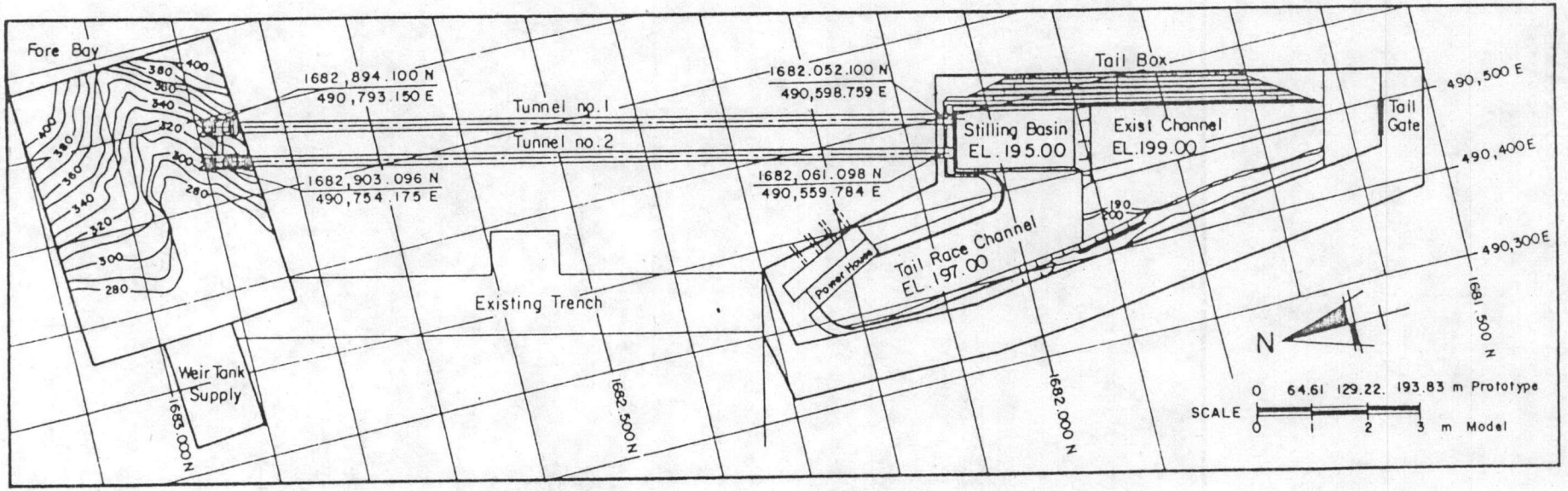


รูปที่ 2 Nam Chon Dam General Plan



รูปที่ 3 NAM CHON DAM SPILLWAY

Plan and Section

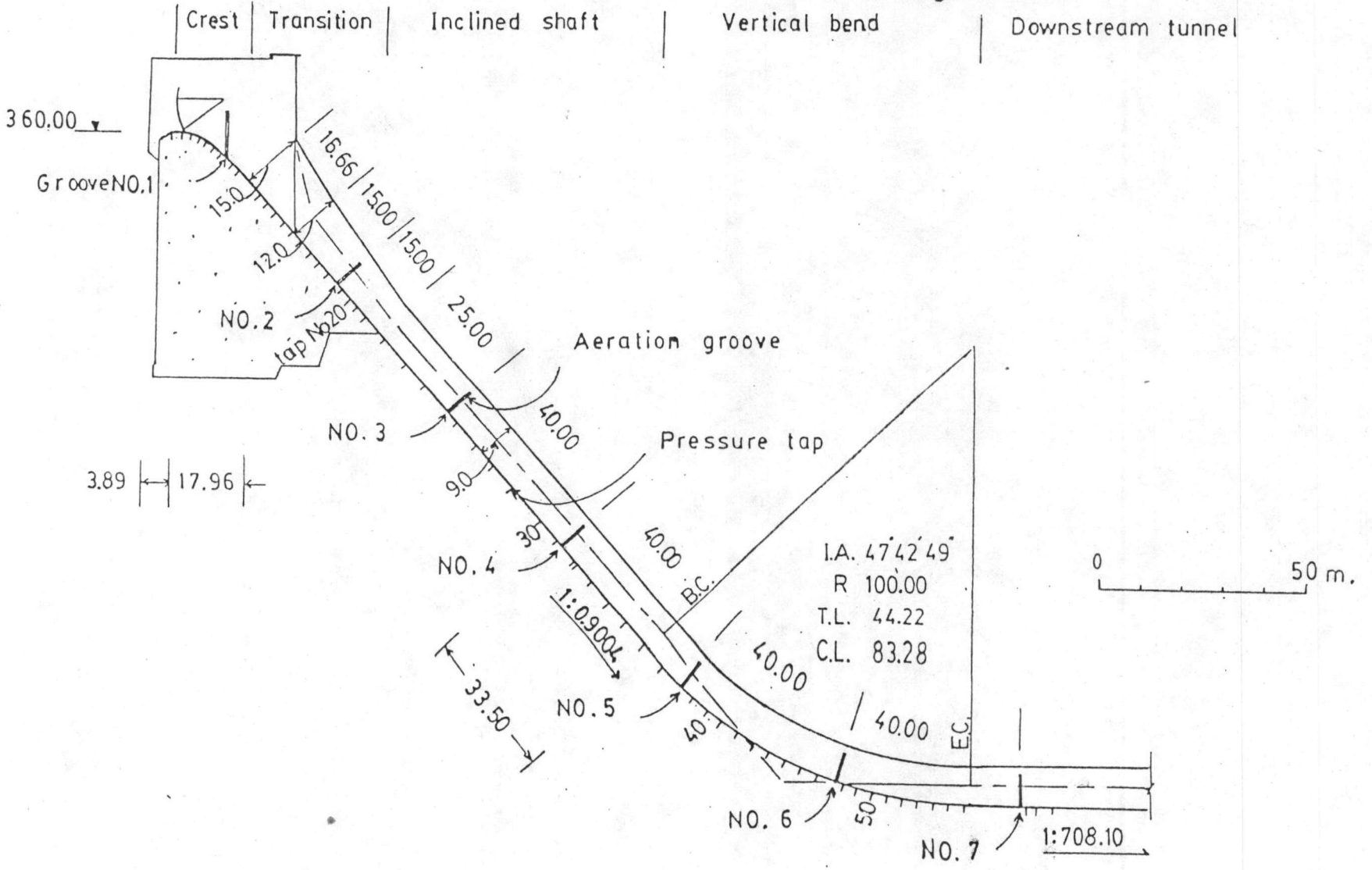


รูปที่ 4 NAM CHON DAM SPILLWAY SCALE 1/64.61

Model Layout

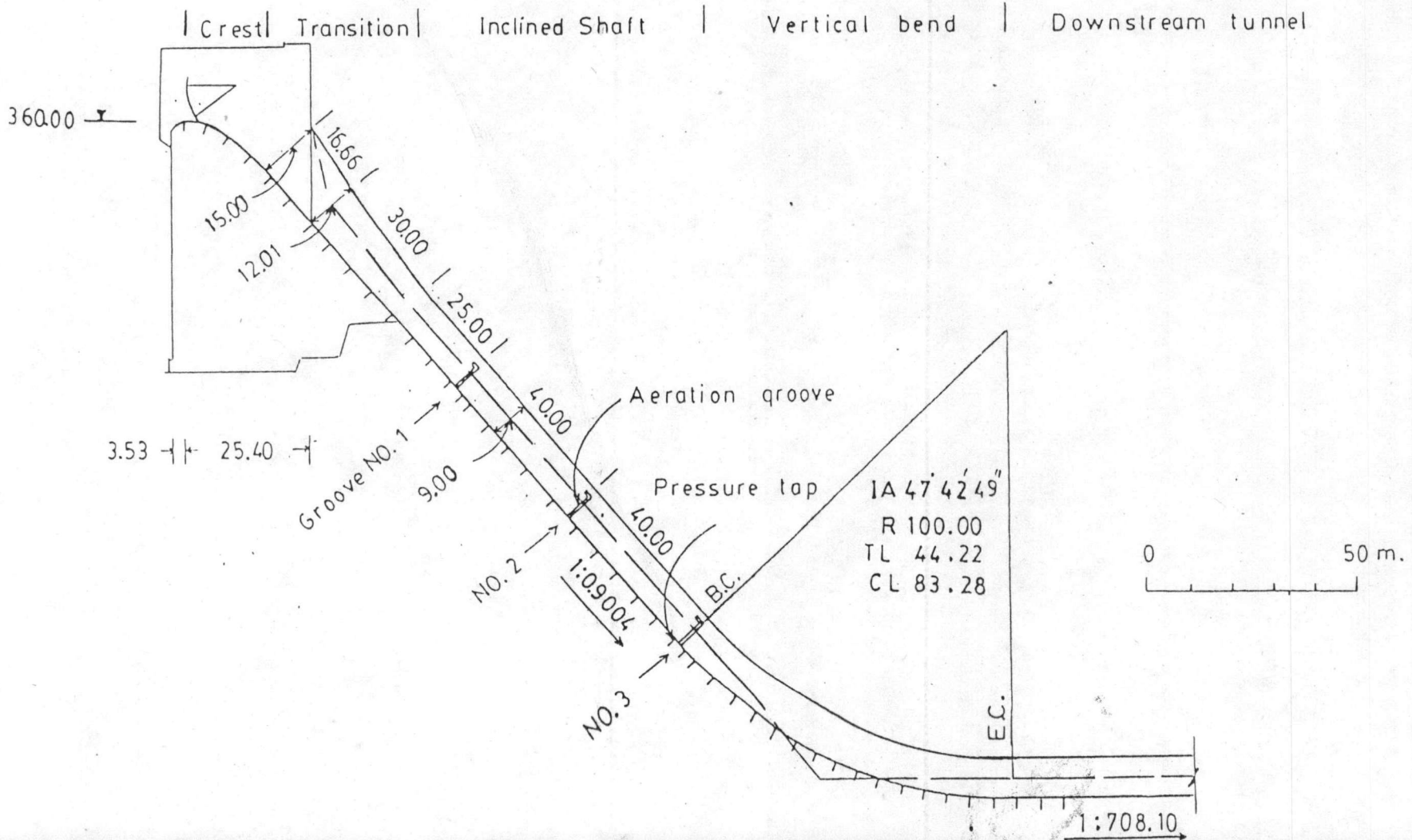
รูปที่ 5 NAM CHON DAM SPILLWAY NO. 1

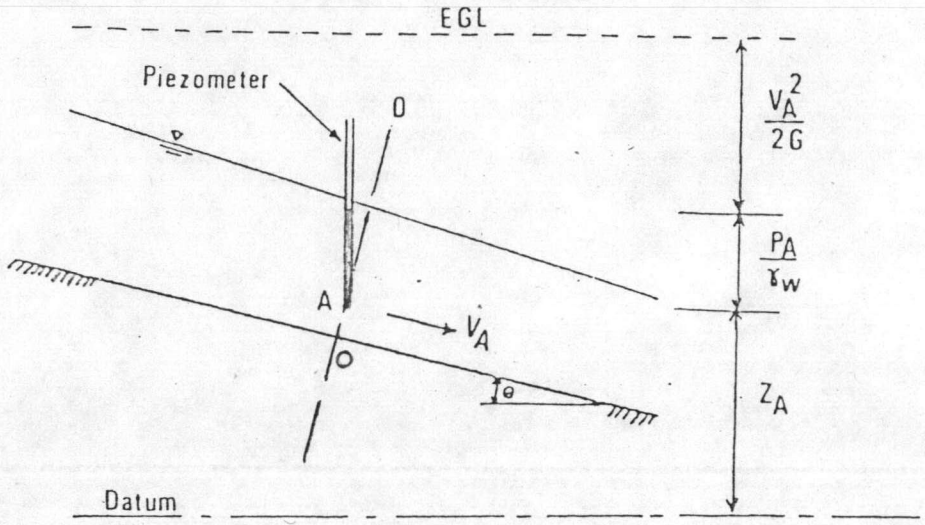
(With 7 Aeration grooves)



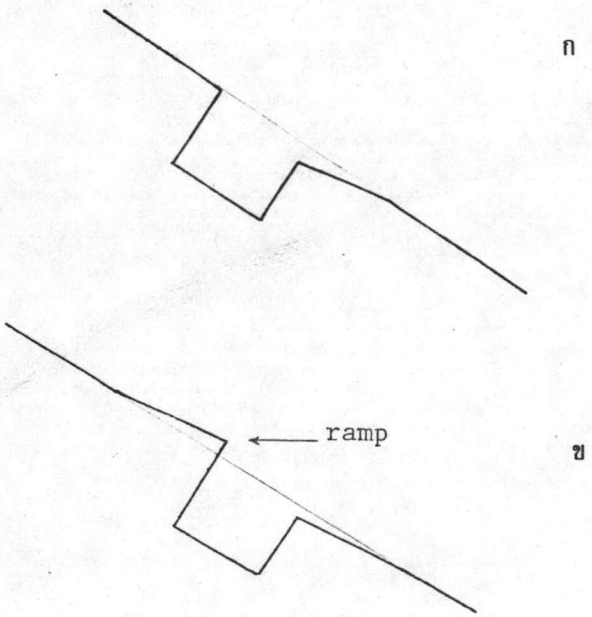
รูปที่ 6 NAM CHON DAM SPILLWAY NO.1

(With 3 Aeration grooves)

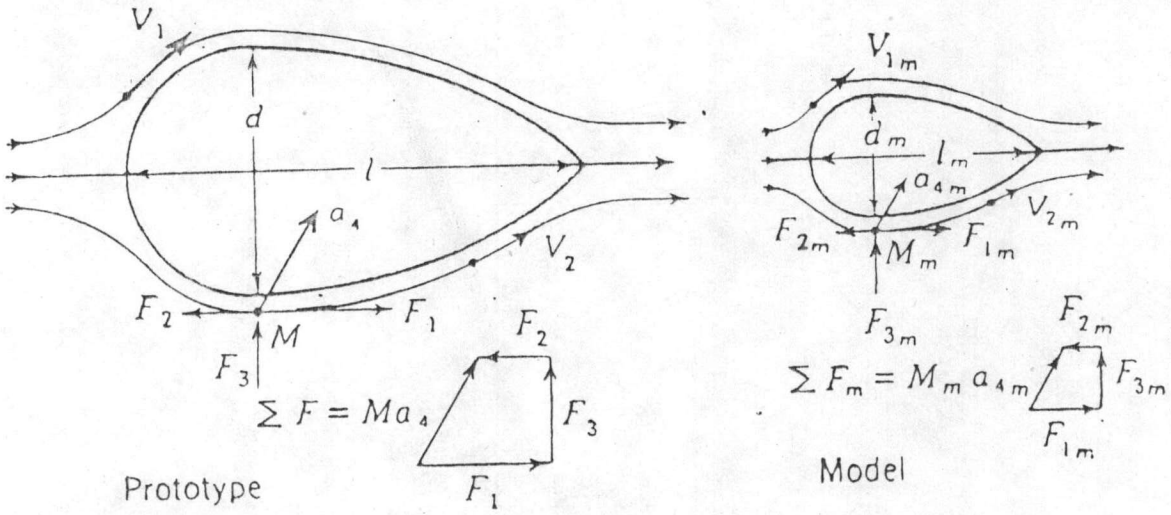




รูปที่ 7 ระดับพลังงานต่าง ๆ ที่จุด A



รูปที่ 8 ลักษณะหน้าตัดของร่องผสมอากาศ

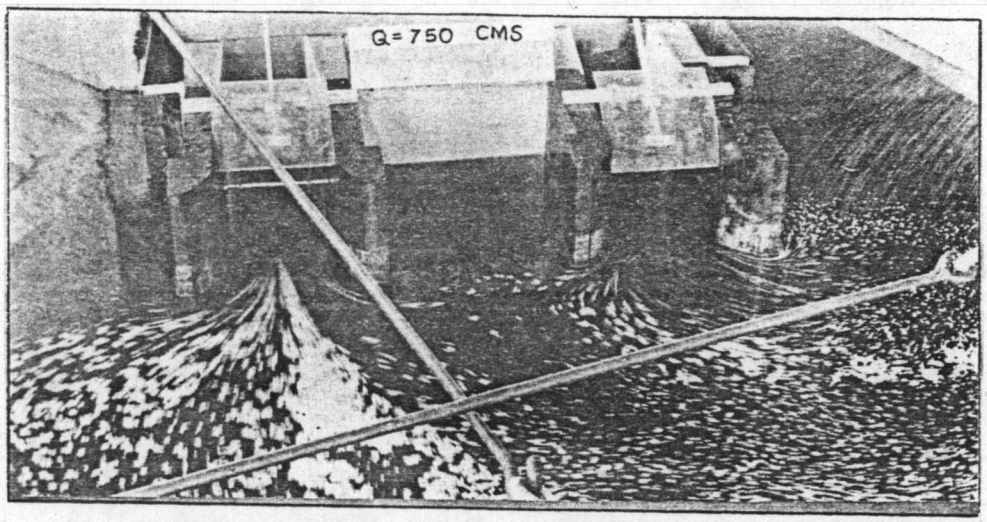


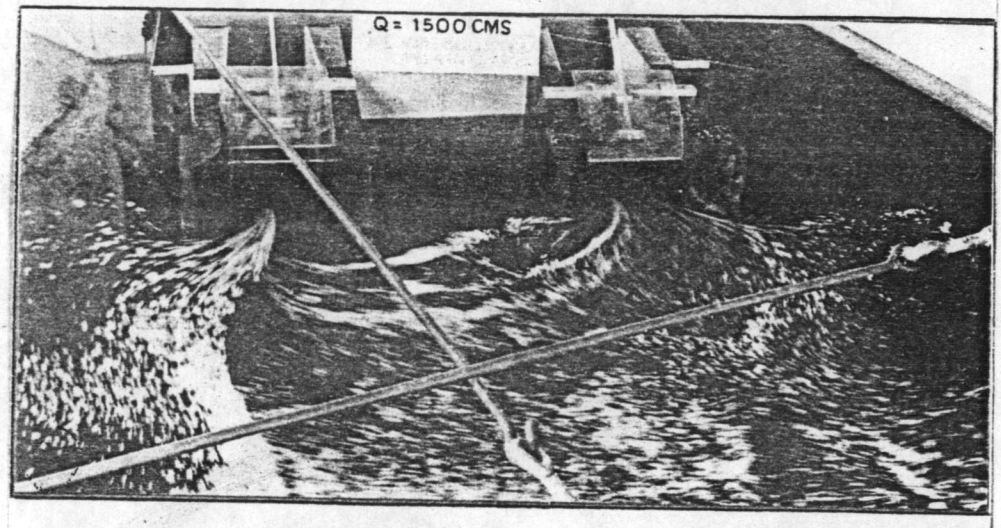
รูปที่ 9 THE SIMILARITY OF MODEL AND PROTOTYPE

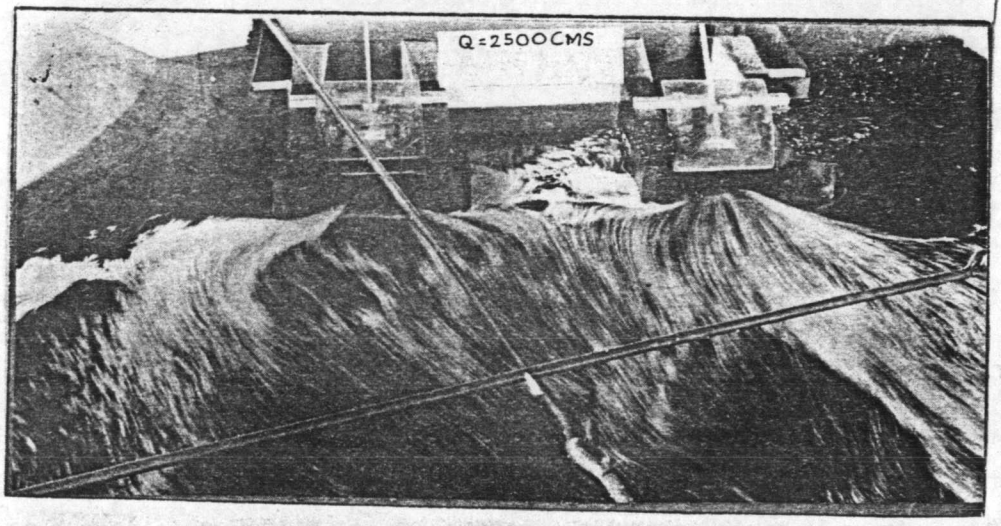
I 16742168

รูปที่ 10 NAM CHON DAM SPILLWAY SCALE 1/64.61

Spillway Intakes

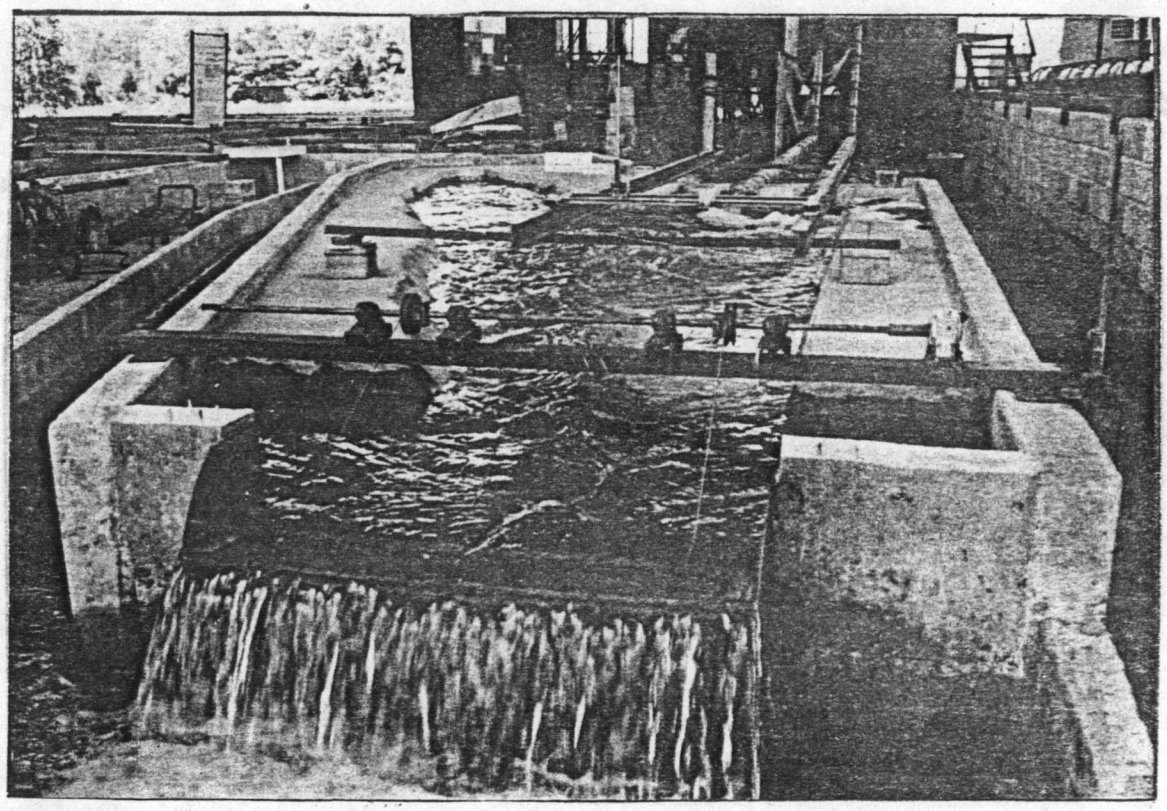






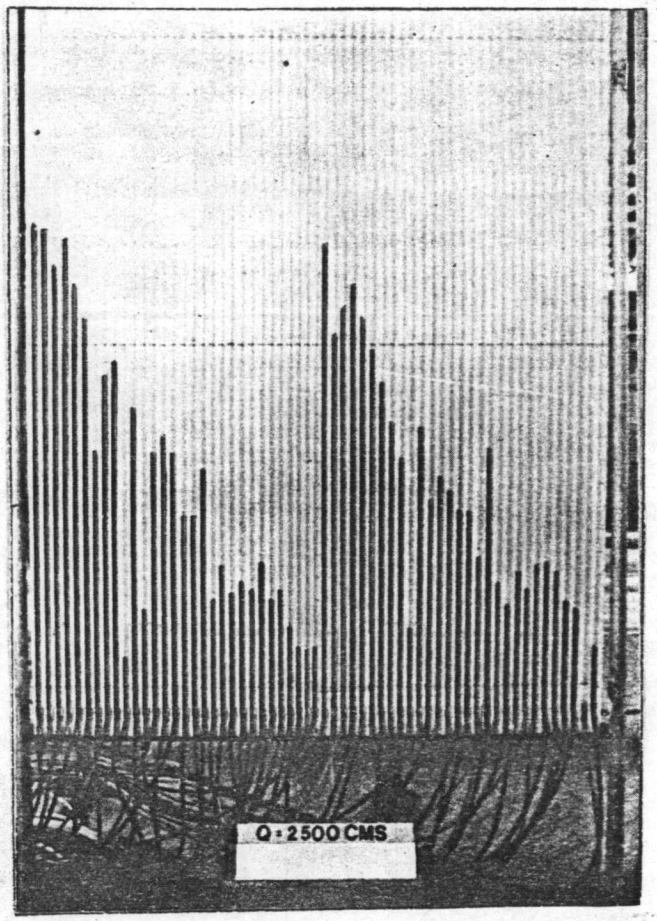
รูปที่ 11 NAM CHON DAM SPILLWAY SCALE 1/64.61

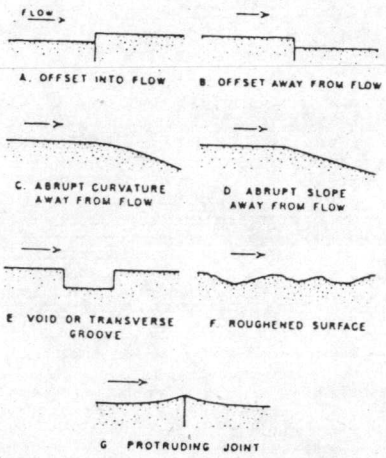
General View of the Model



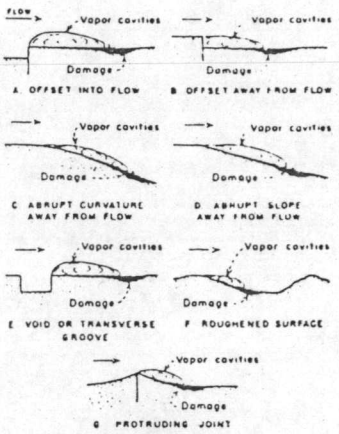
รูปที่ 12 NAM CHON DAM SPILLWAY SCALE 1/64.61

The PIEZOMETER

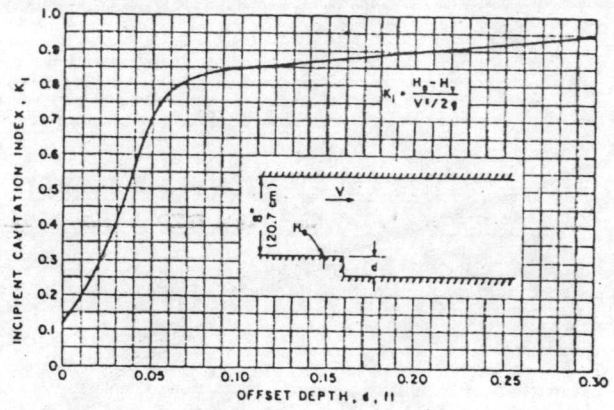




รูปที่ 13 Possible Irregularities in Flow Surfaces

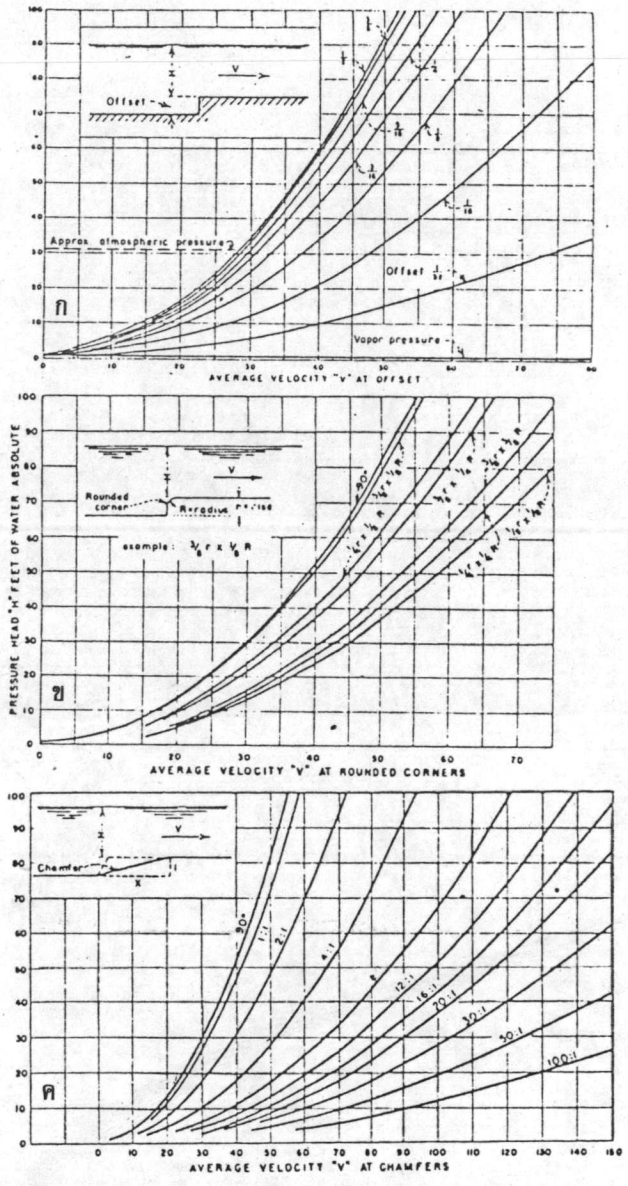


รูปที่ 14 Flow Action and Cavitation Damage at Flow Surface Irregularities



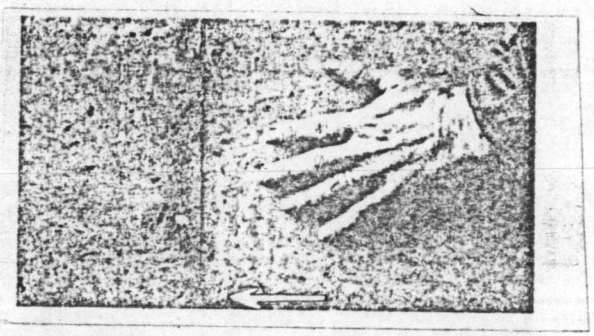
รูปที่ 15 Cavitation Potential and Characteristics for Offsets away from Flow

(After U.S. Bureau of Reclamation)

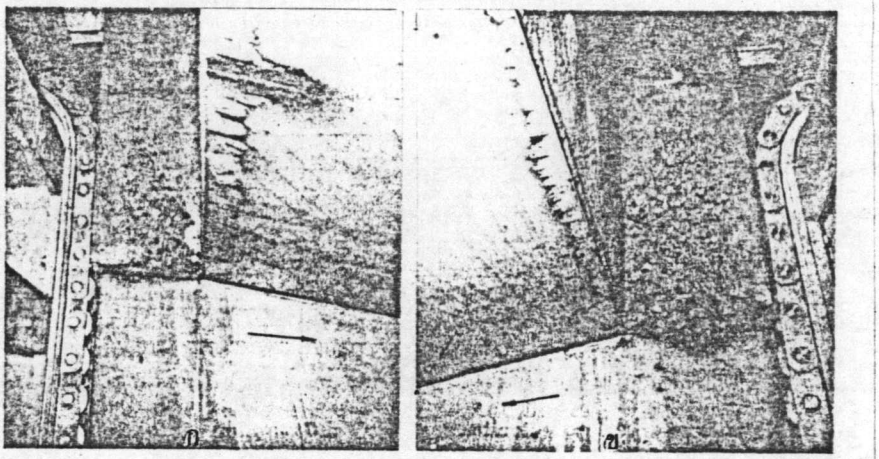


รูปที่ 16 Pressures and Flow Velocities for Incipient Cavitation at: (ก) Square-Edged Offsets into Flow; (ข) Round-Edged Offsets into Flow; (ค) Slopes into and away from Flow

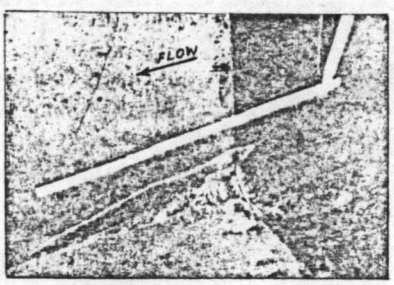
(After U.S. Army Corps of Engineers,1950)



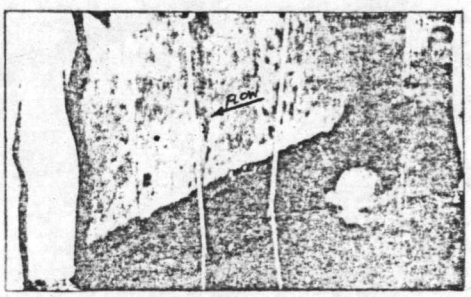
รูปที่ 17 Damage Downstream from 1/8-in. Offset into Flow, Stream Velocity ≈100 fps, Palisades Dam



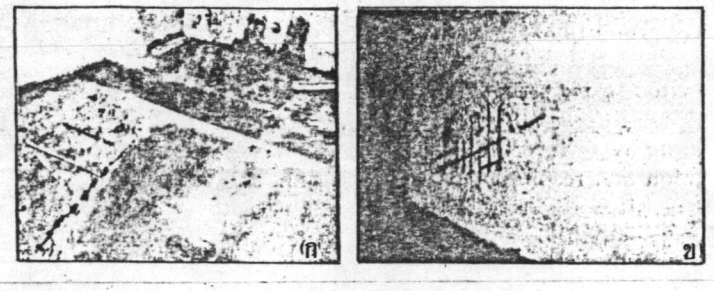
รูปที่ 18 Damage at Large Offset into Flow in Gate Slot: (ก) Left Side of Sluice at Libby Dam; (ข) Right Side of Sluice at Libby Dam



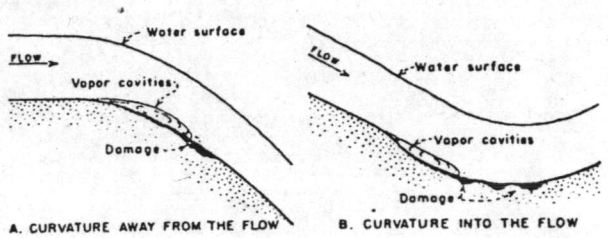
รูปที่ 19 Start of Damage at Slope away from Flow, Corner of Gate Frame, Palisades Dam Outlet



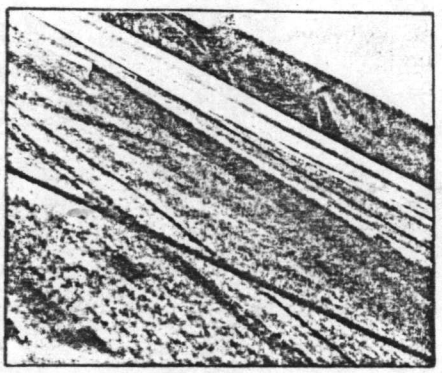
รูปที่ 20 Damage at Slope away from Flow after Prolonged Operation, Corner of Gate Frame, Palisades Dam Outlet



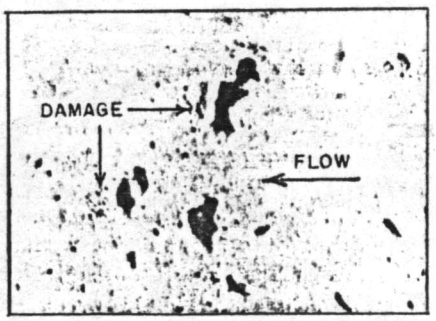
รูปที่ 21-Damage Downstream from Away-from-Flow Offset at End of: (ก) Steel Lining, Lucky Peak Dam Outlet; (ข) 1/2-in. Thick Epoxy Mortar Lining, Dworshak Dam Outlet



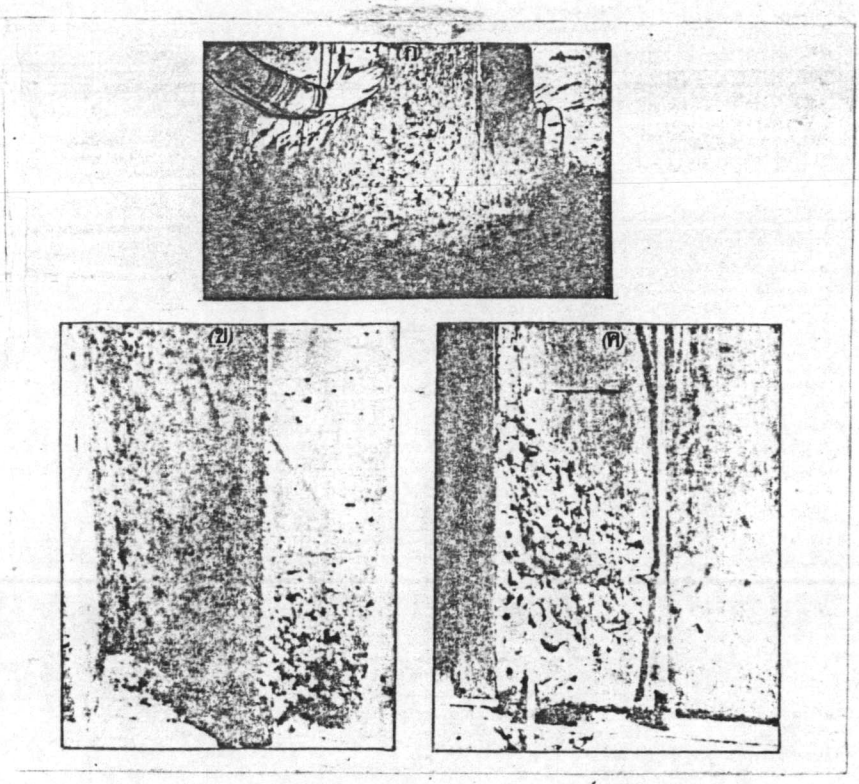
รูปที่ 22-Flow Action and Damage at Curved Surfaces into and away from Flow



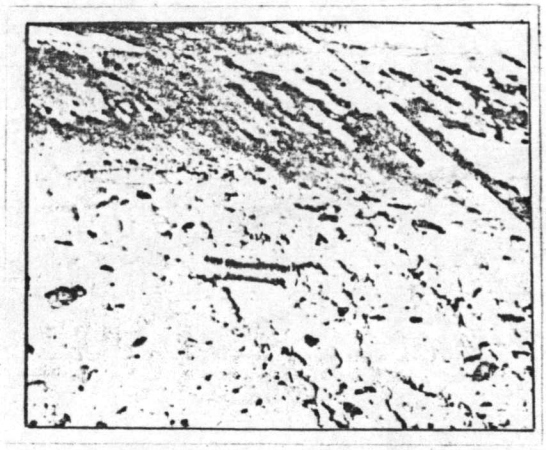
รูปที่ 23-Damage Due to Curvature away from Flow, Spillway Face, Grand Coulee Dam



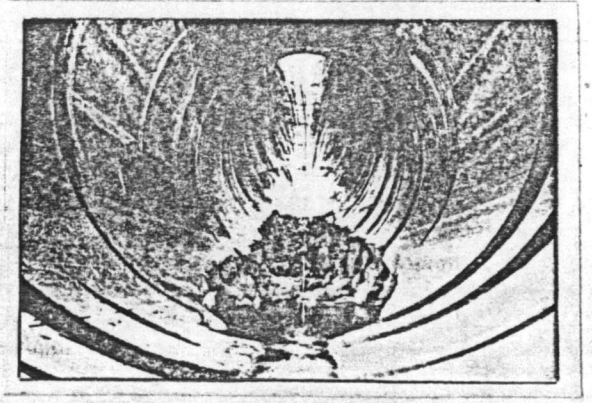
รูปที่ 24-Damage Downstream from "Bug Holes" in Concrete Wall of Palisades Dam Outlet, Velocity ≈100 fps



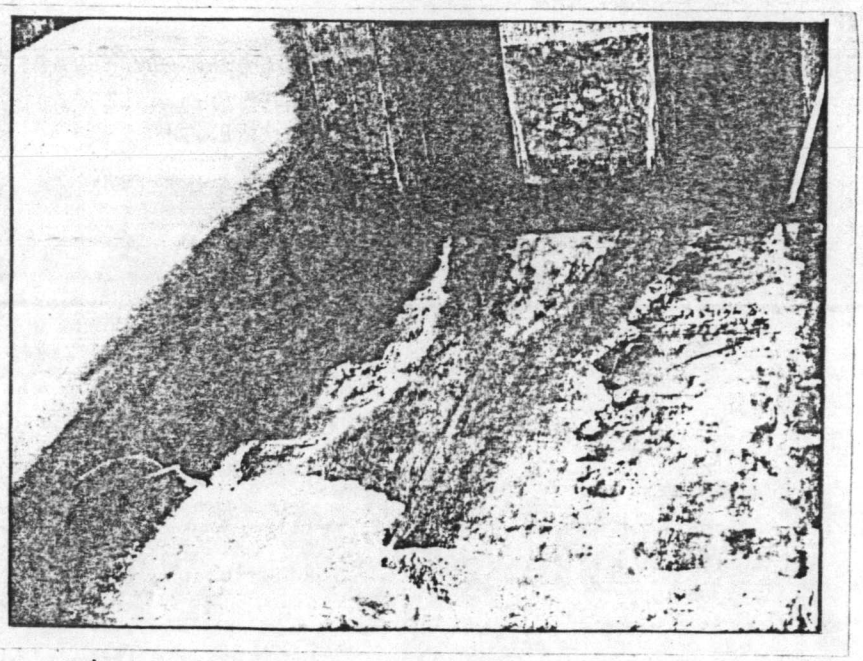
รูปที่ 25-Damage Downstream from: (ก) Recess in Concrete Wall, Brazeau Conduit, Canada; (ข) Stop Log Slot, Glendo Dam Outlet Works; (ค) Gate Slot, Parket Dam Spillway



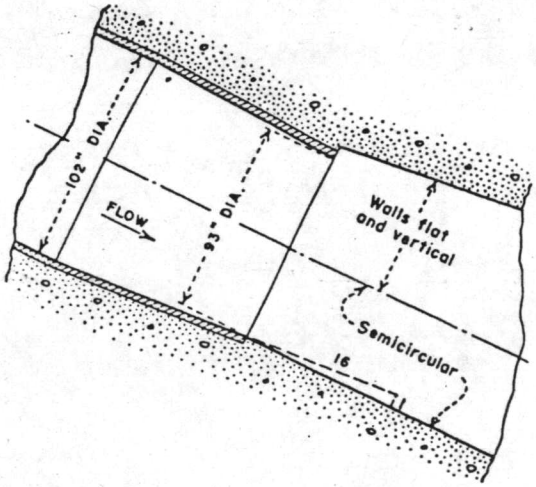
รูปที่ 26-Damage Caused by Protruding Joint in Hoover Dam Spillway Tunnel



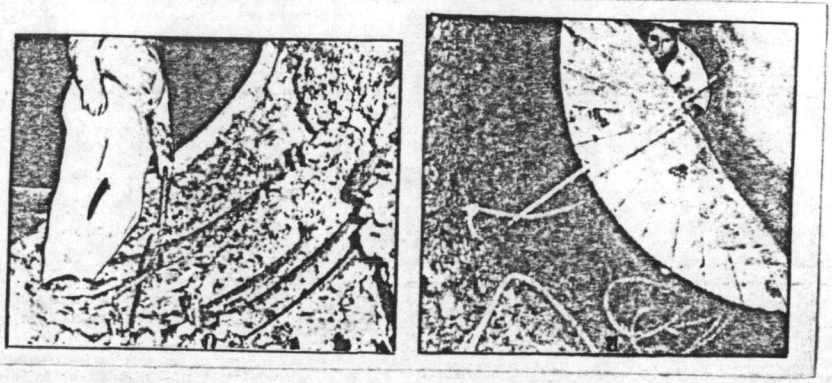
รูปที่ 27-Ultimate Erosion Triggered by Protruding Joint with High Velocity and Pressure in Fault, Hoover Dam Spillway Tunnel



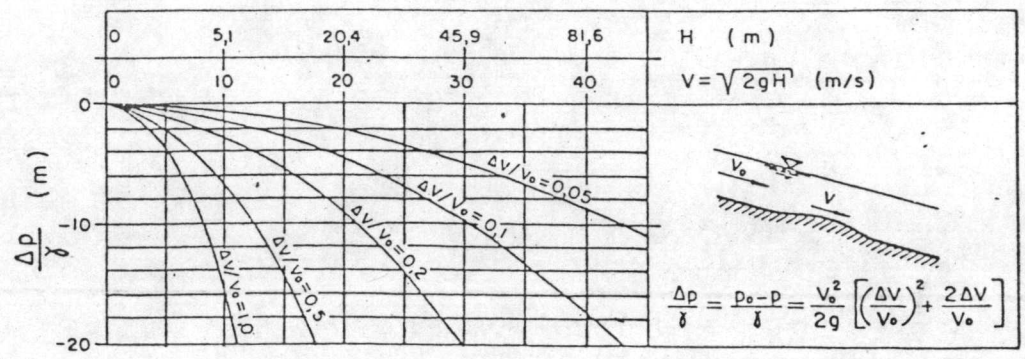
รูปที่ 28 Cavitation Erosion at Palisades Dam Outlet Works Portal



รูปที่ 29 -Slope away from Flow, Grand Coulee Dam Outlets

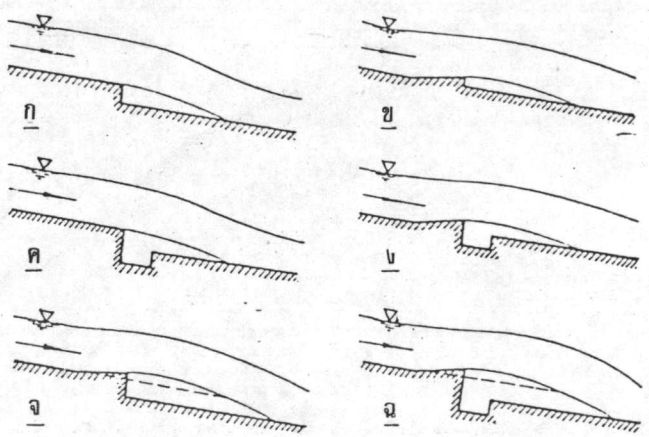


รูปที่ 30 -Damage Downstream from Slope away from Flow, Exit of Grand Coulee Dam Outlet: (ก) Looking Upstream; (ข) Looking Downstream

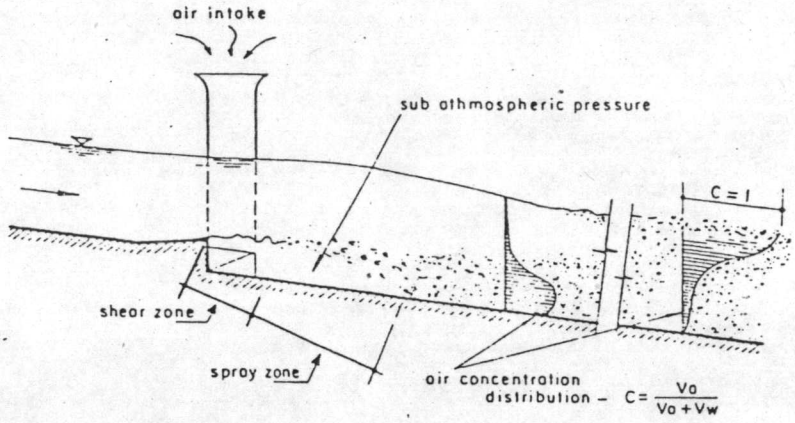


รูปที่ 31 - *Local pressure reduction as related to velocity variation.*

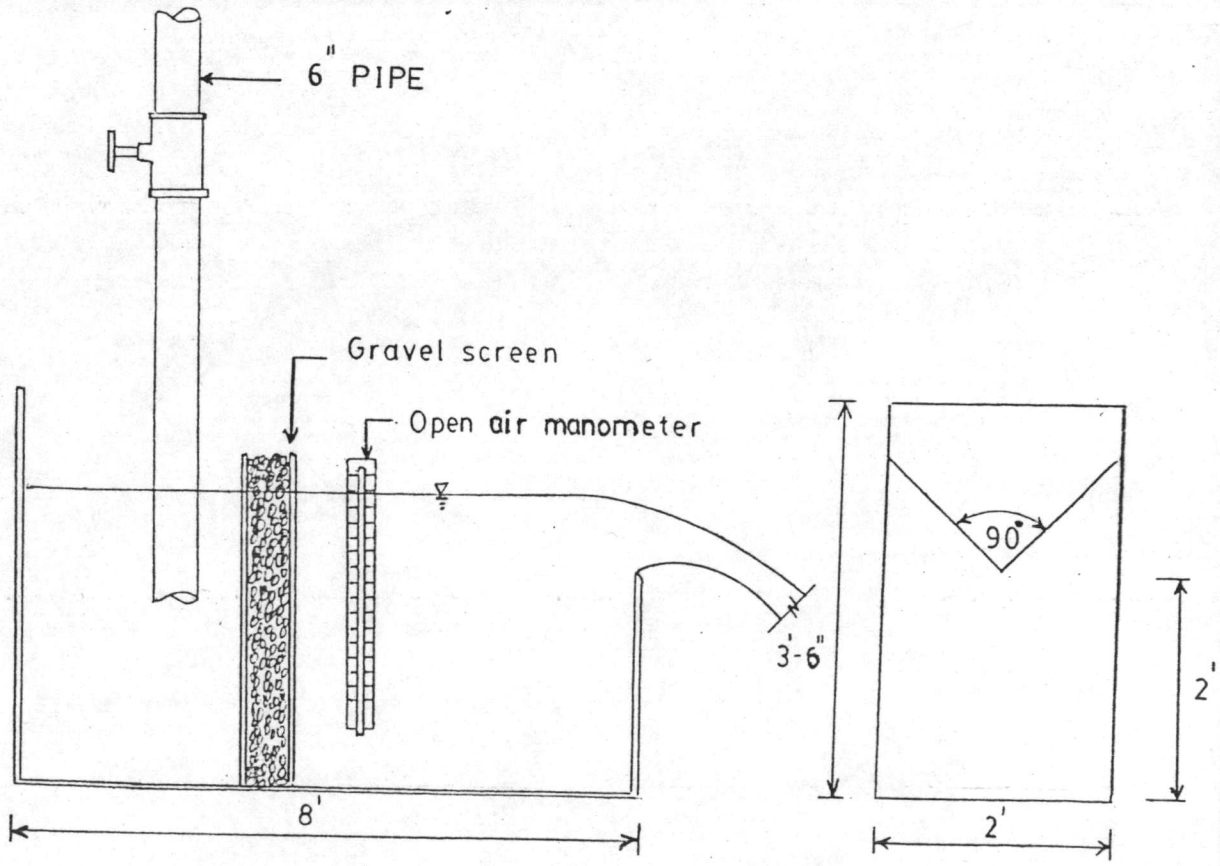
(After Ball W. James, 1976)



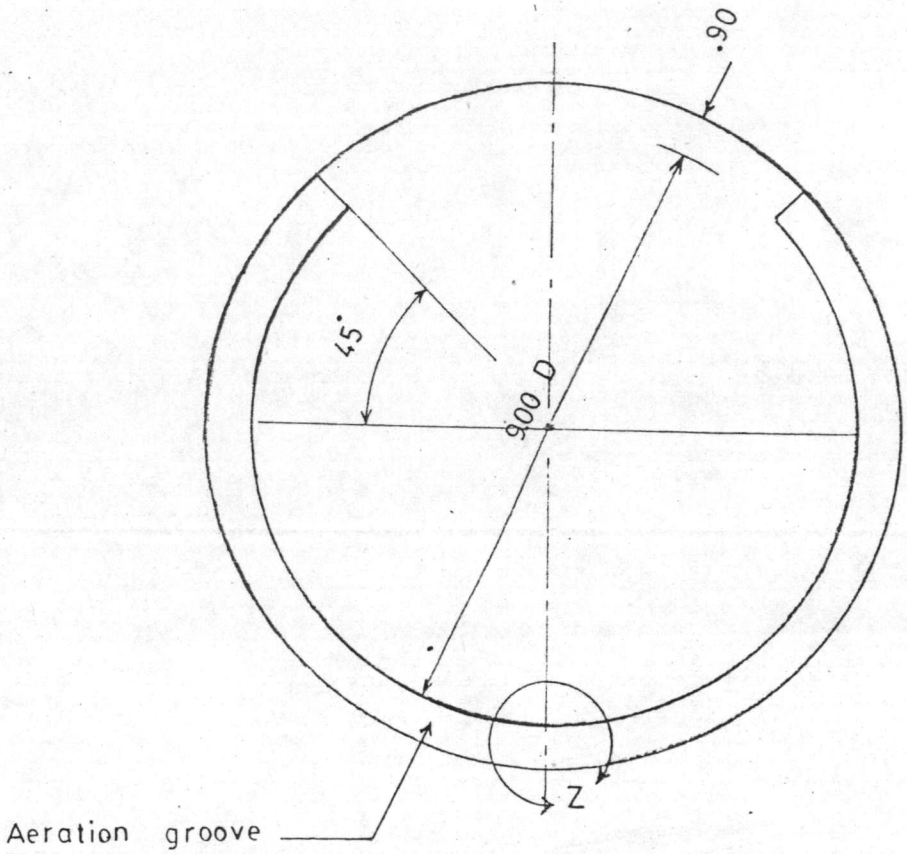
รูปที่ 32 - *Main types of aerator devices.*



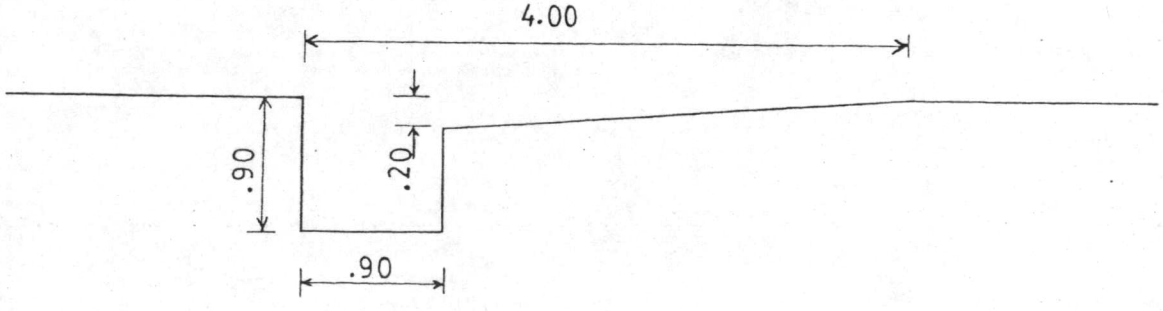
รูปที่ 33 *Air entraining mechanism.*



รูปที่ 34 V-NOTCH WEIR



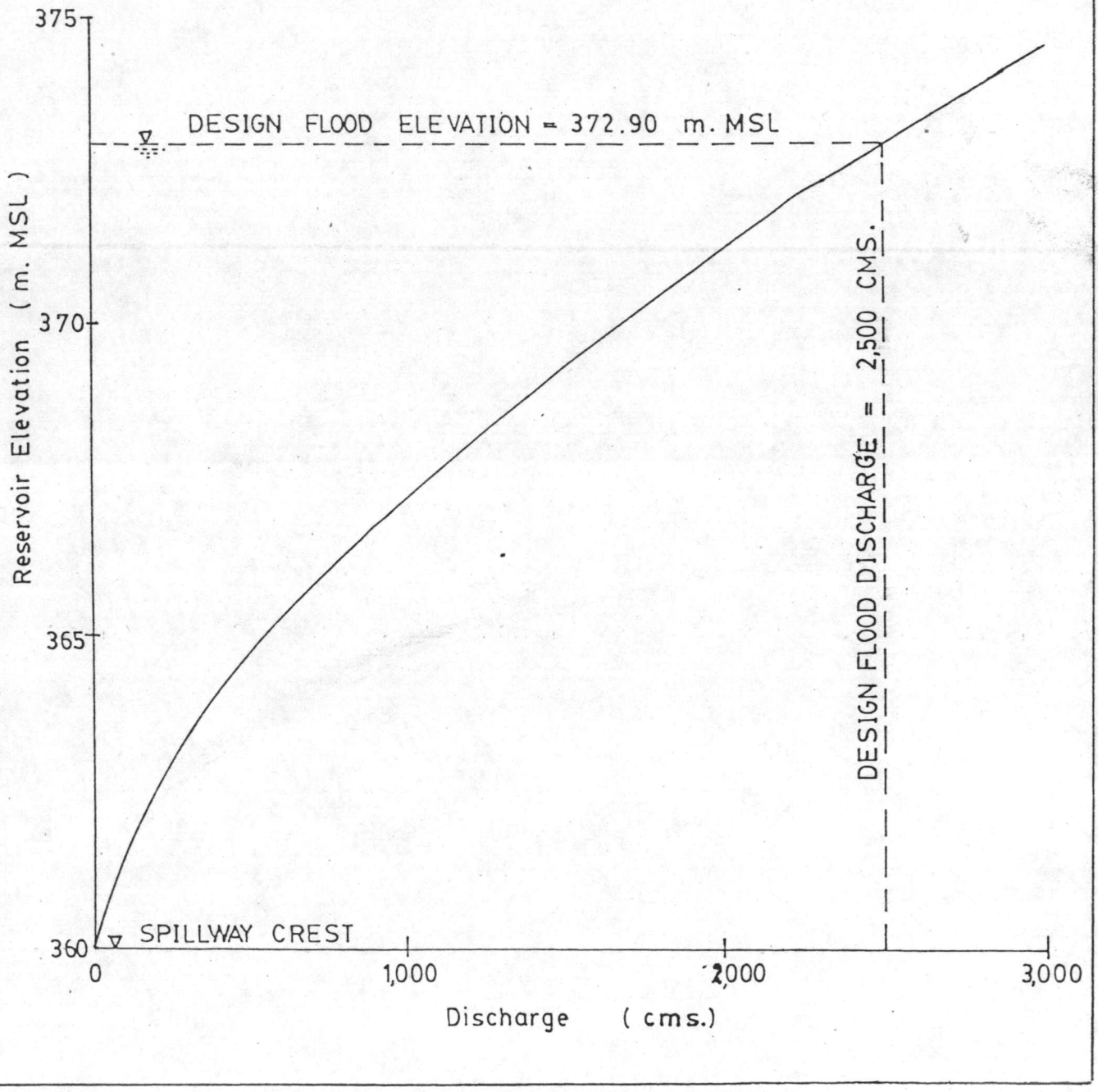
Z-Z

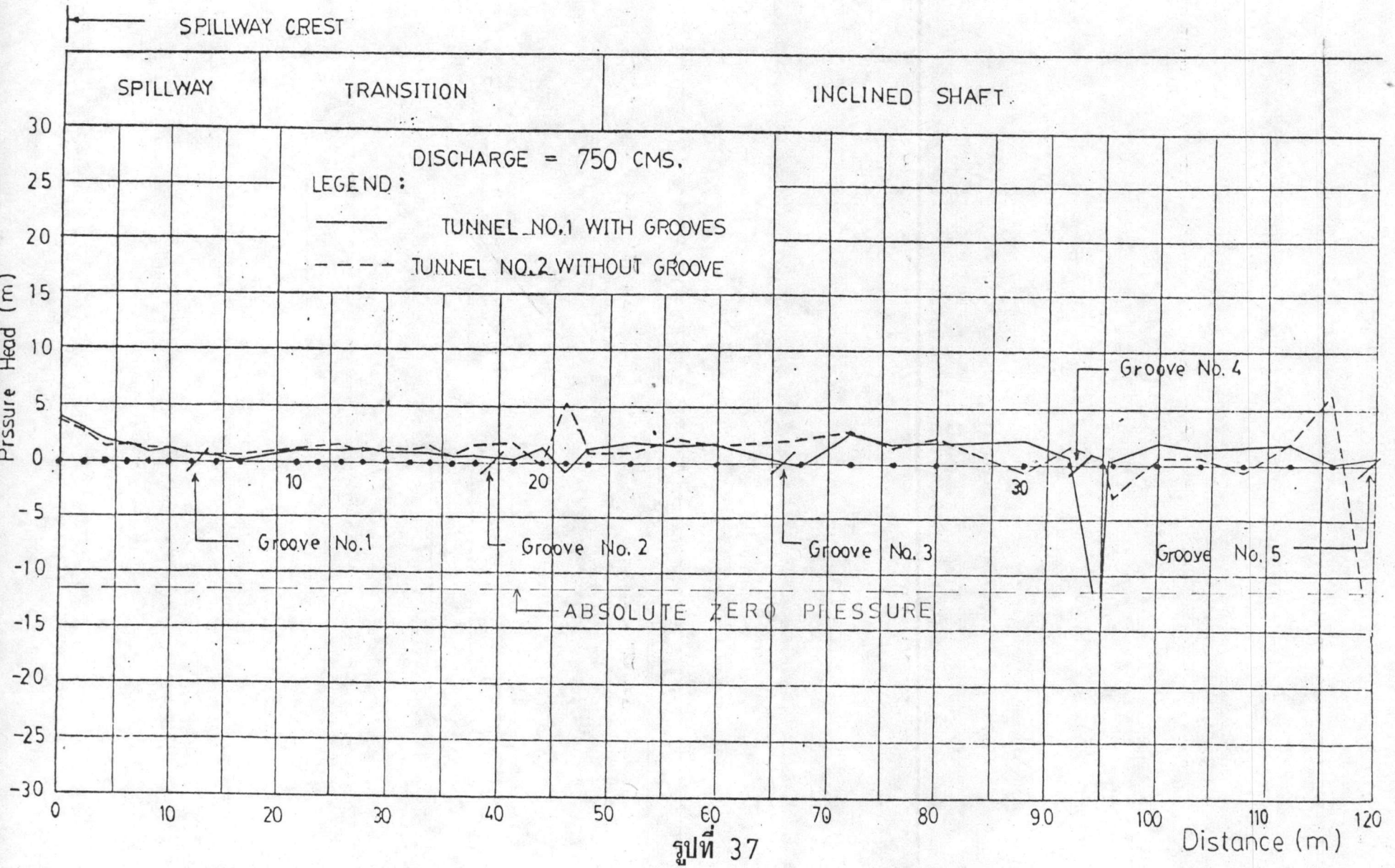


รูปที่ 35 AERATION GROOVE
(without ramp)

รูปที่ 36 SPILLWAY RATING CURVE

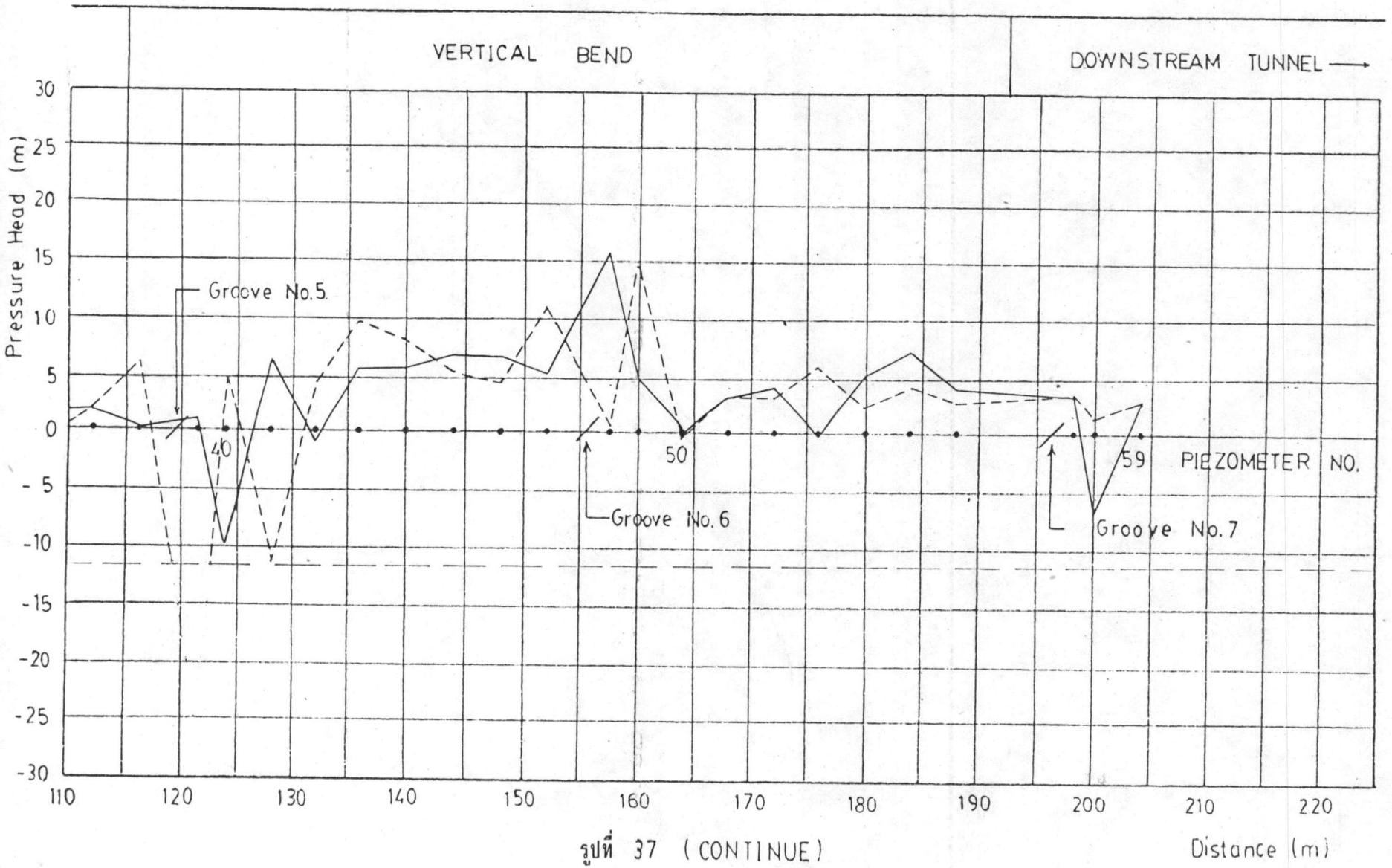
(Full gate openning)



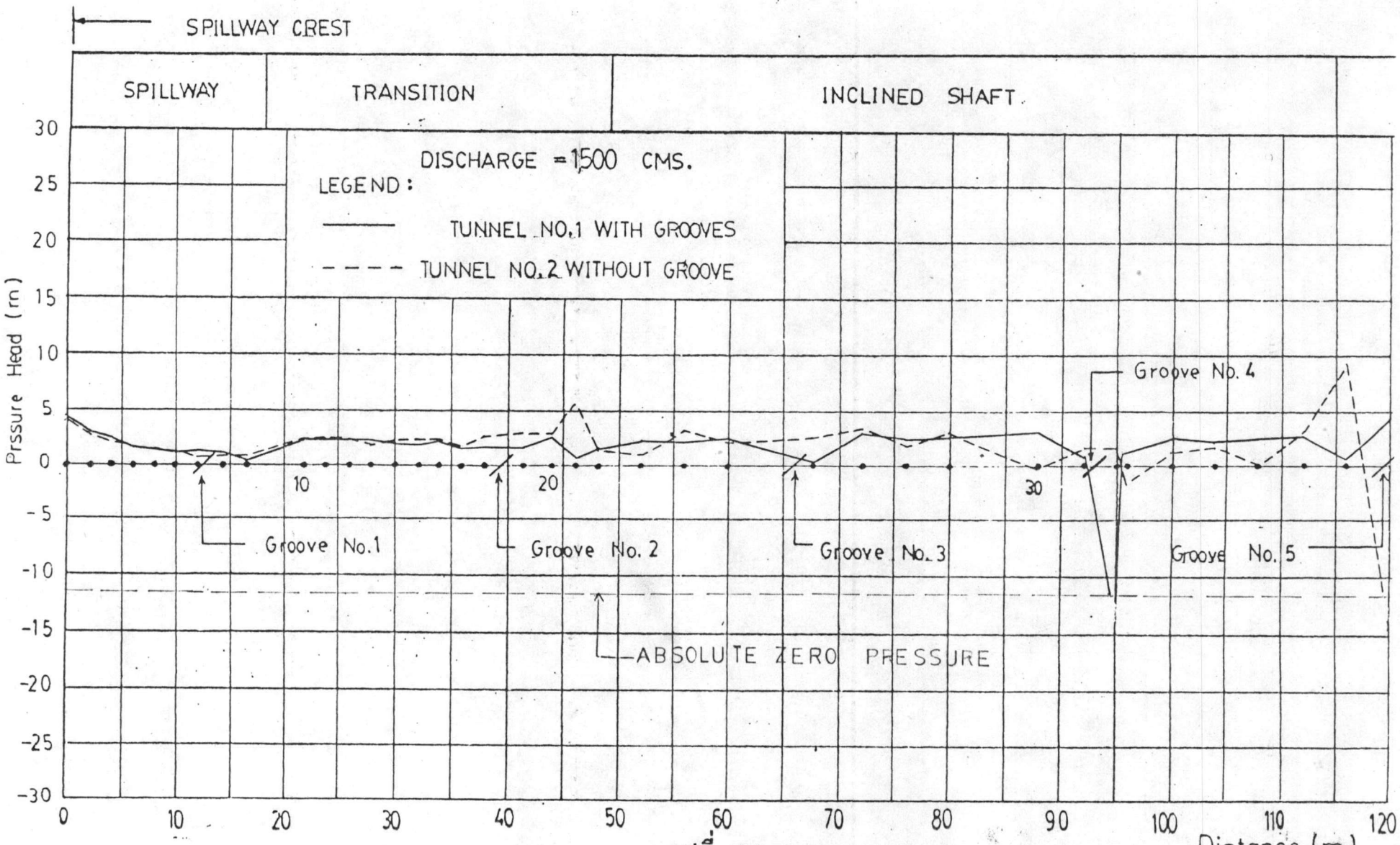


รูปที่ 37

PRESSURE DISTRIBUTION ALONG THE SPILLWAY AND TUNNELS
(Without ramp)



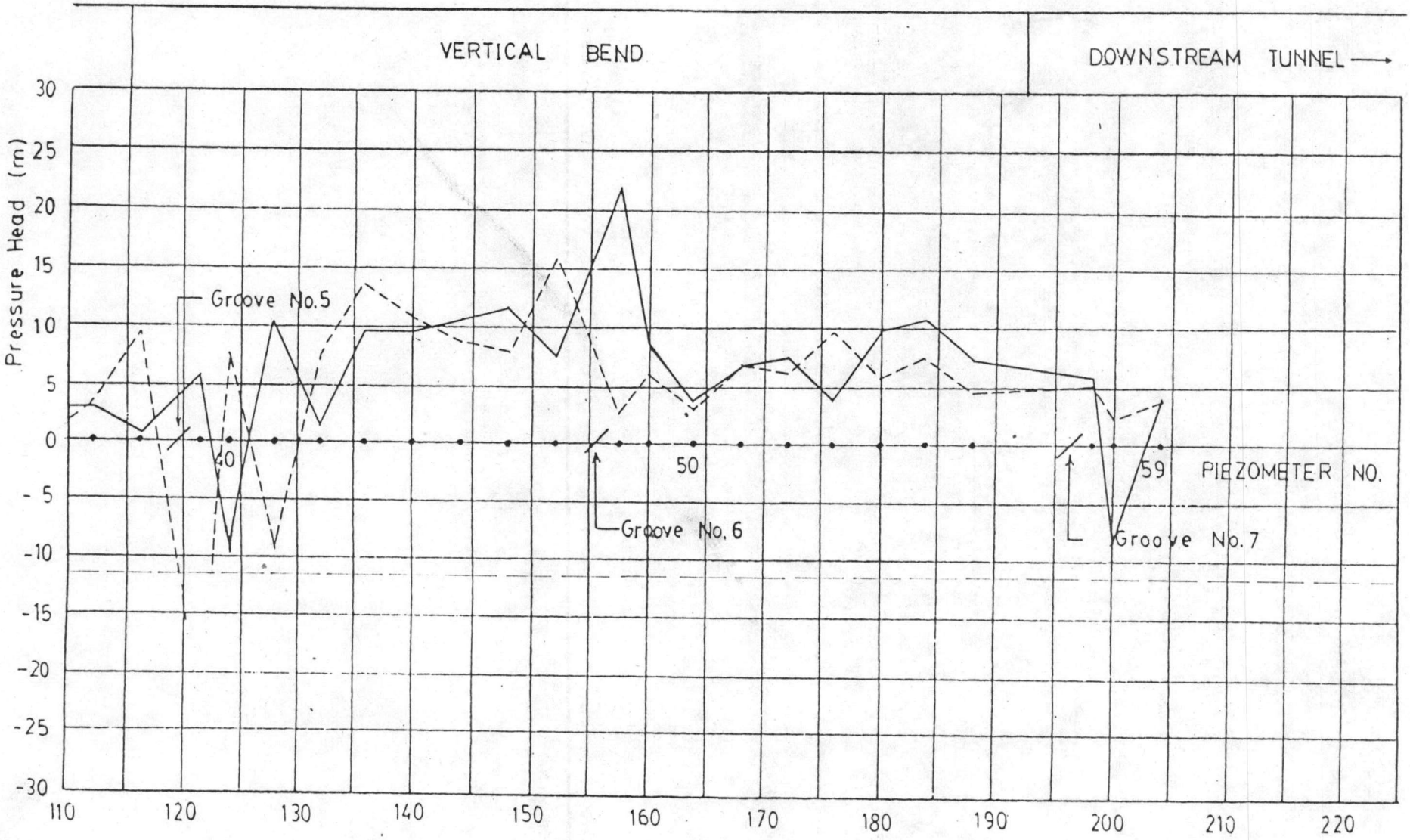
รูปที่ 37 (CONTINUE)



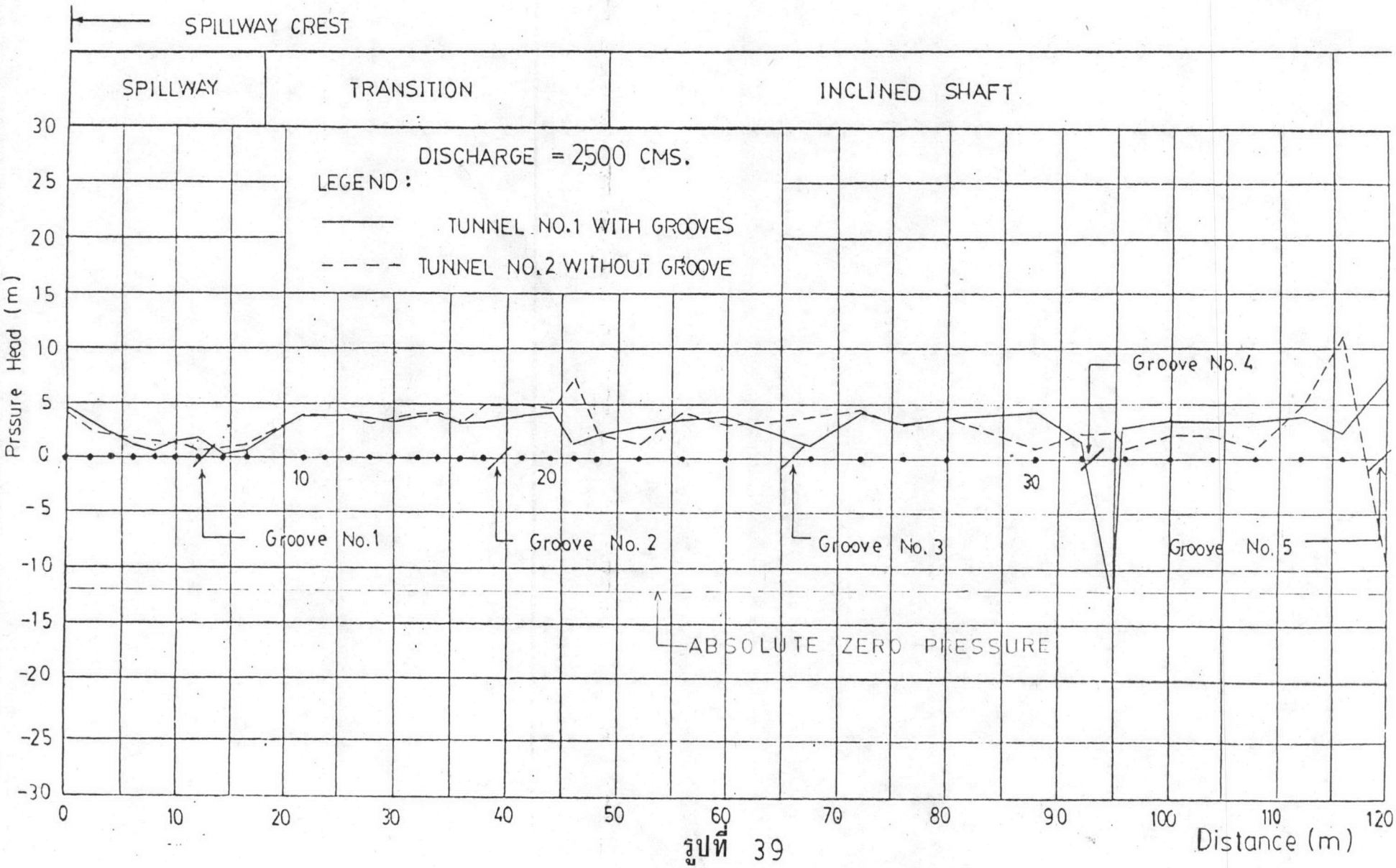
รูปที่ 38

PRESSURE DISTRIBUTION ALONG THE SPILLWAY AND TUNNELS

(Without ramp)



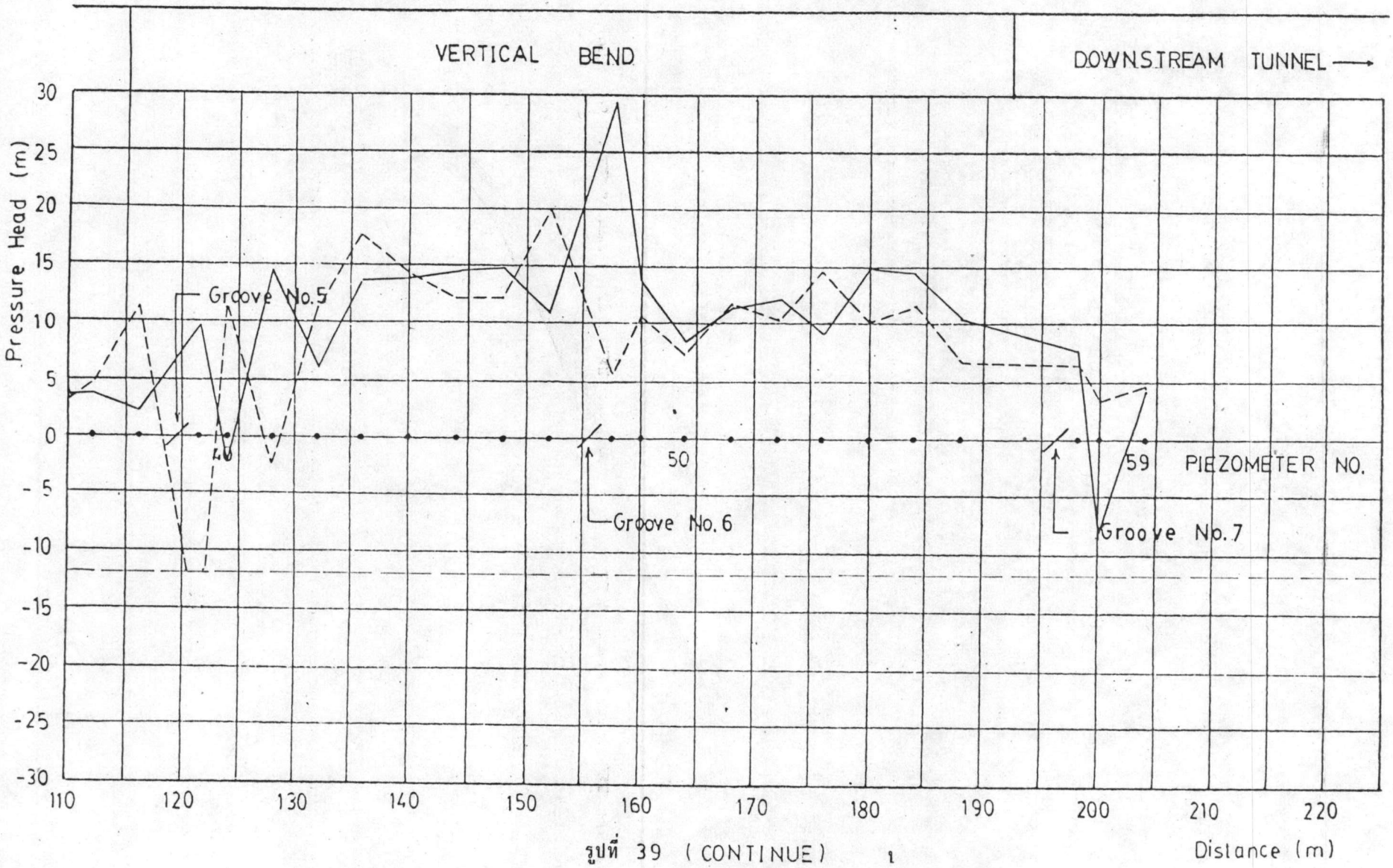
รูปที่ 38 (CONTINUE)



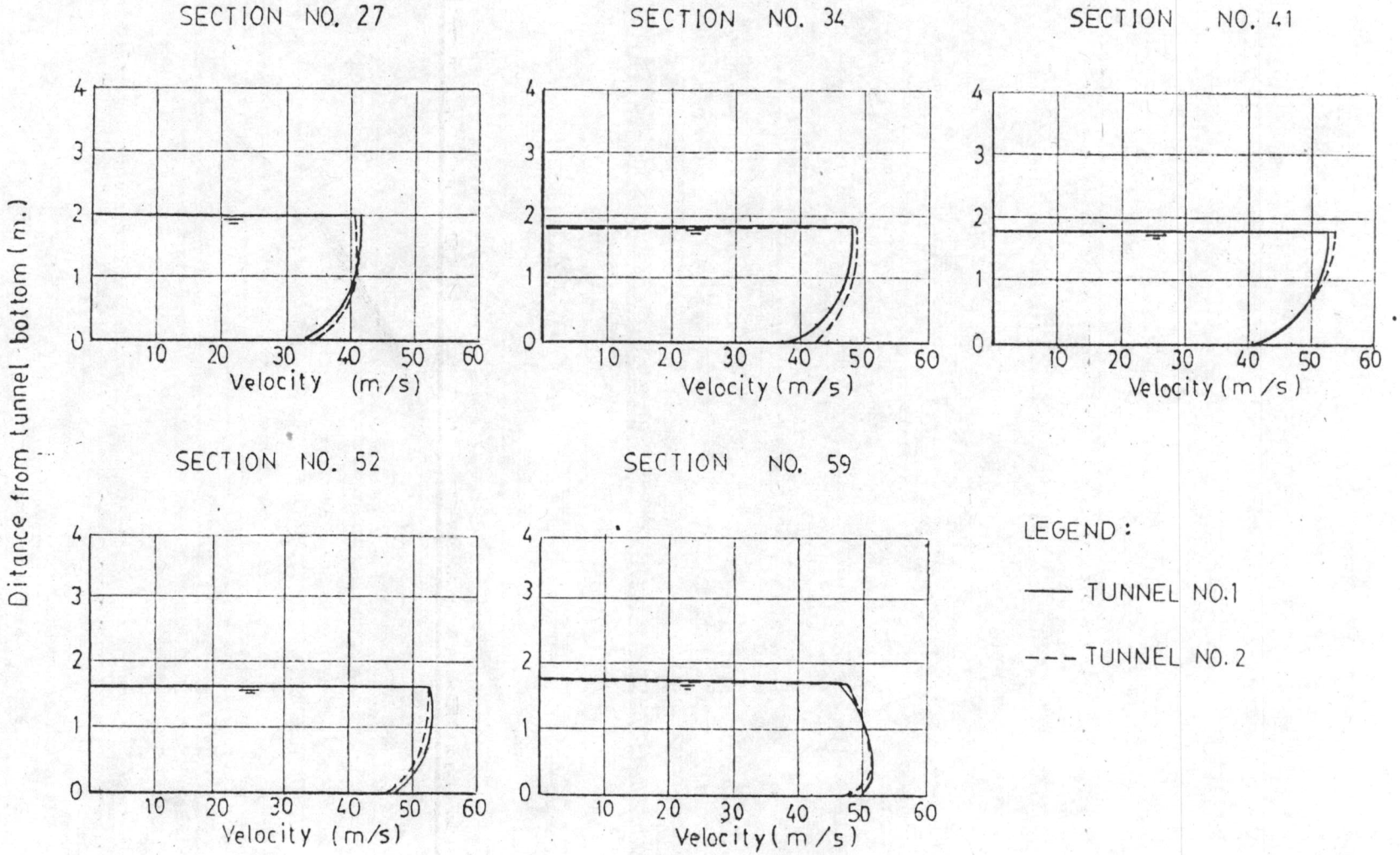
รูปที่ 39

PRESSURE DISTRIBUTION ALONG THE SPILLWAY AND TUNNELS

(Without ramp)

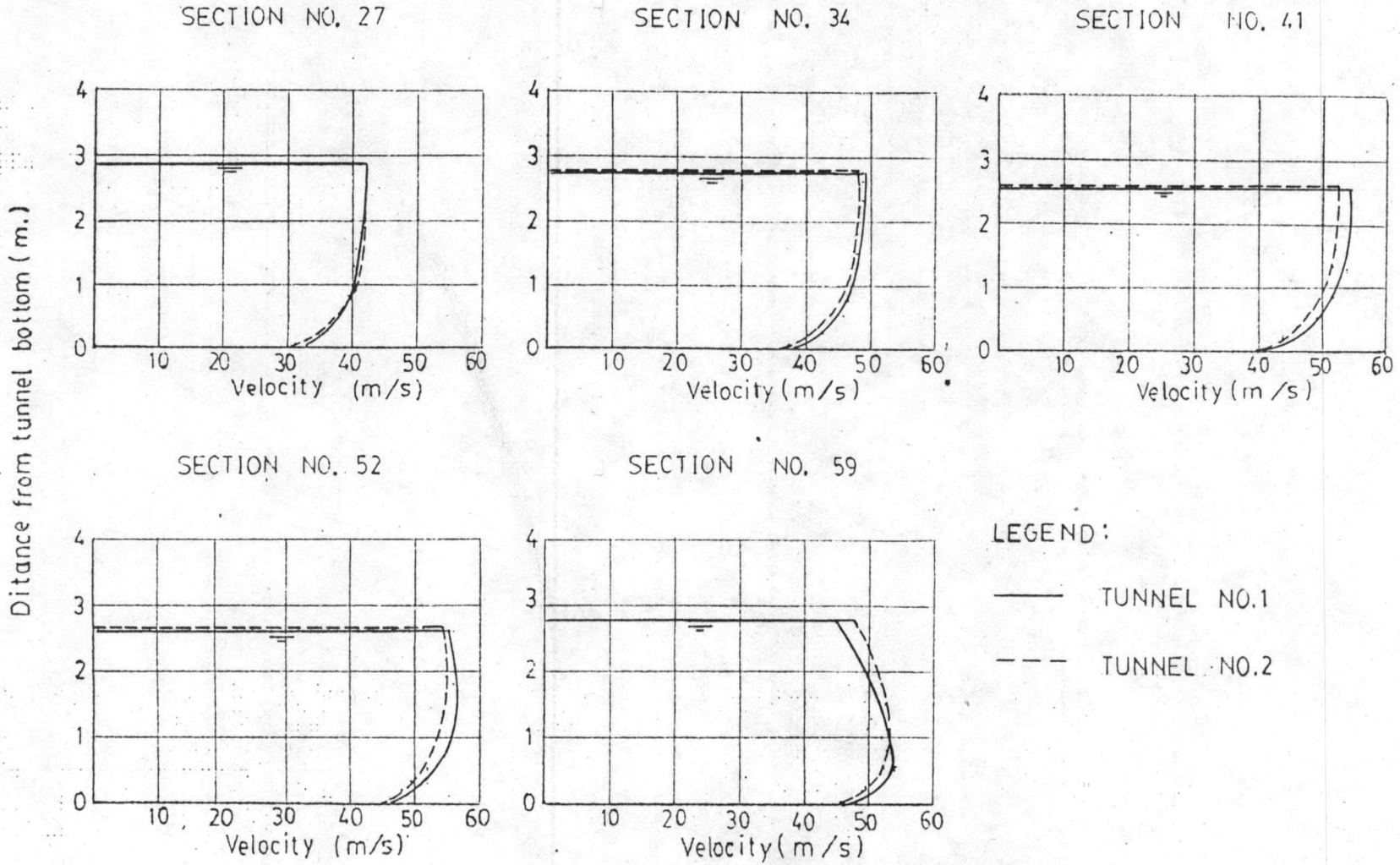


รูปที่ 39 (CONTINUE)



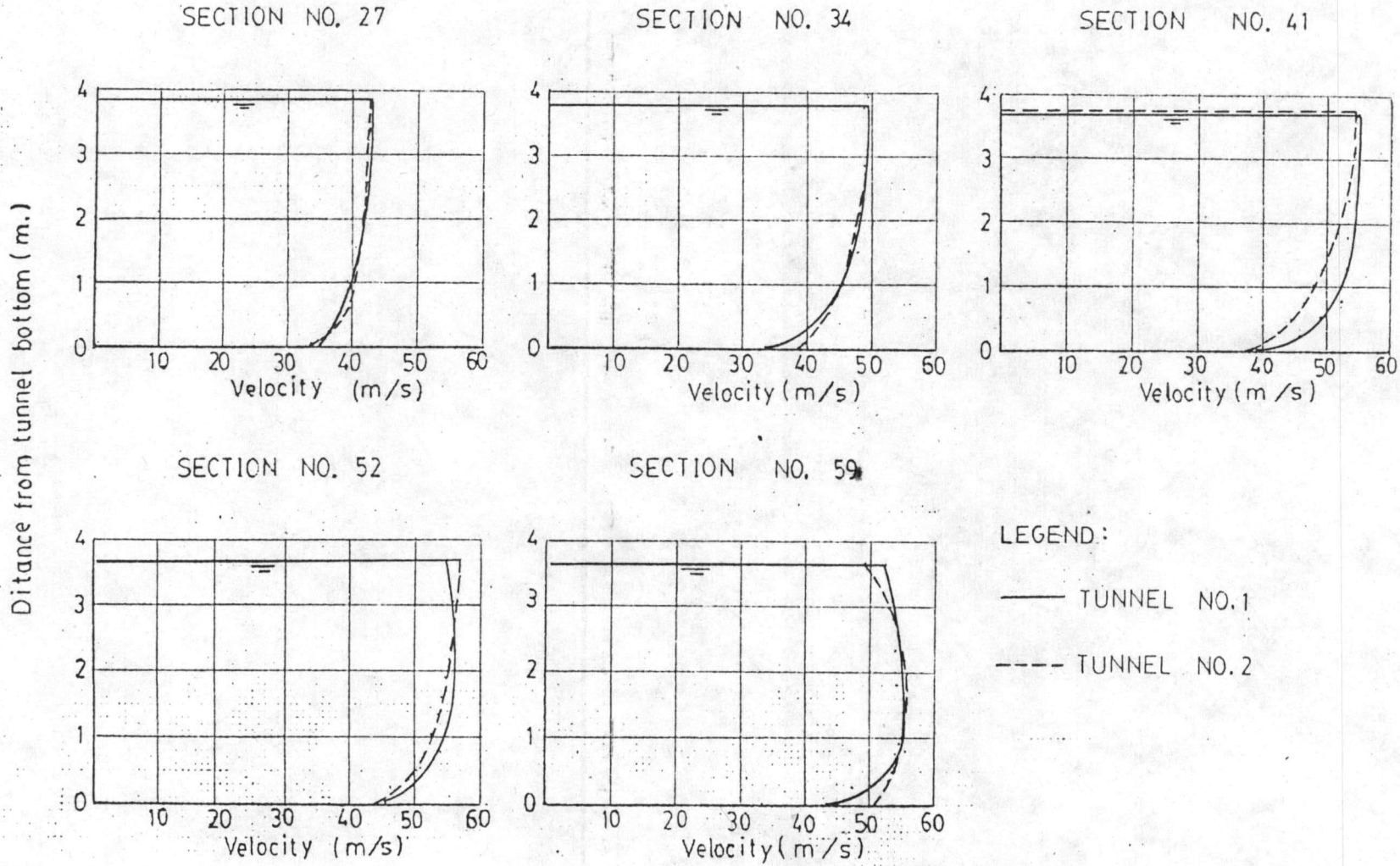
รูปที่ 40 VELOCITY FROFILE OF SPILLWAY TUNNEL

DISCHARGE = 750 CMS.



รูปที่ 41 VELOCITY FROFILE OF SPILLWAY TUNNEL

DISCHARGE = 1,500 CMS.

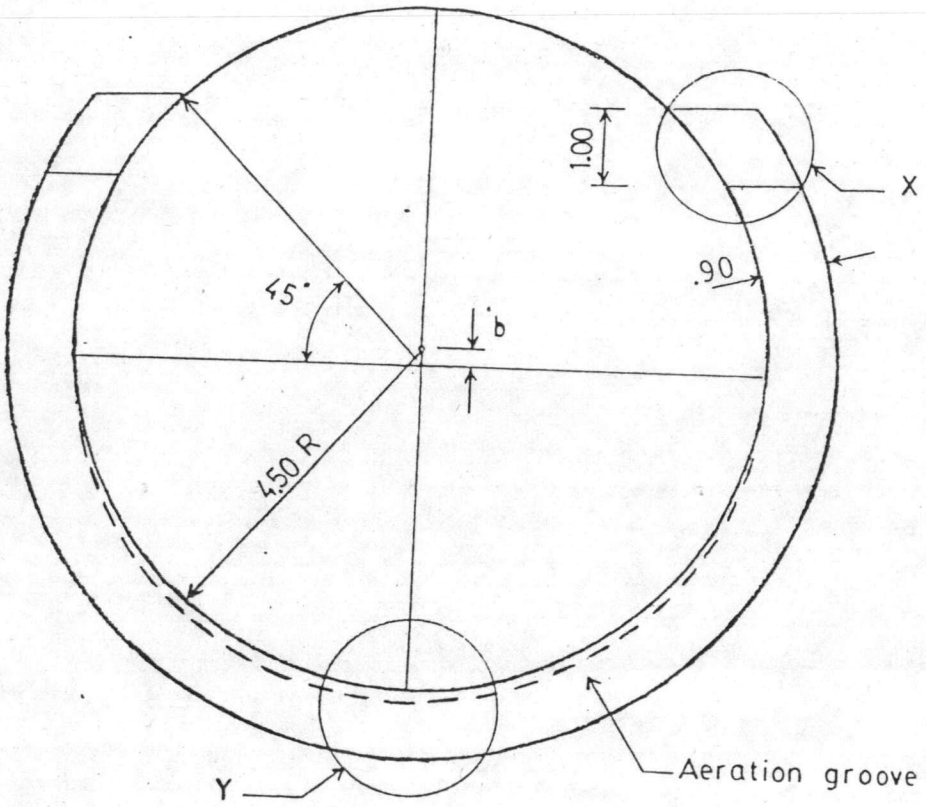


รูปที่ 42 VELOCITY FROFILE OF SPILLWAY TUNNEL

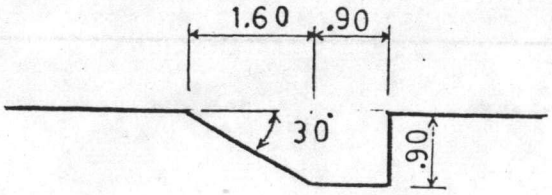
DISCHARGE = 2,500 CMS.

รูปที่ 43 AERATION GROOVE

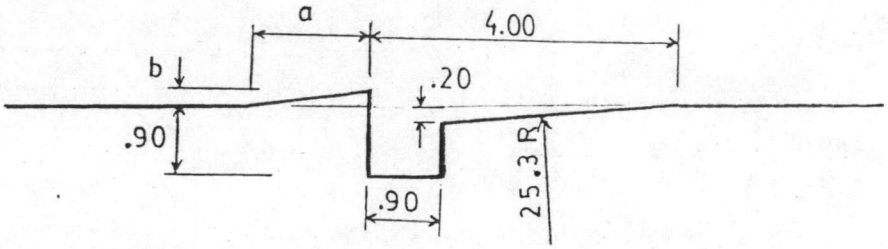
(With ramp)



Detail - X

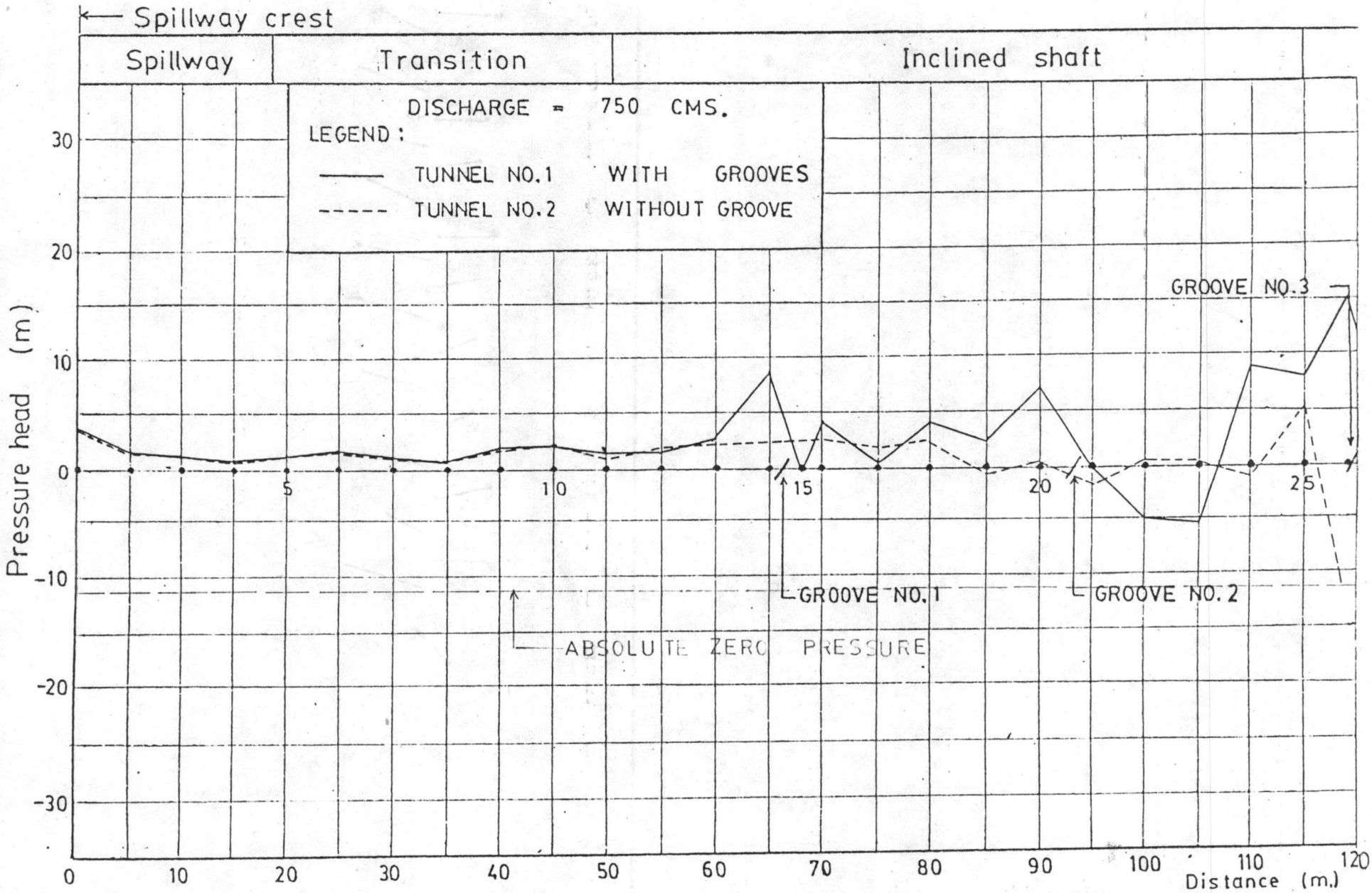


Detail - Y

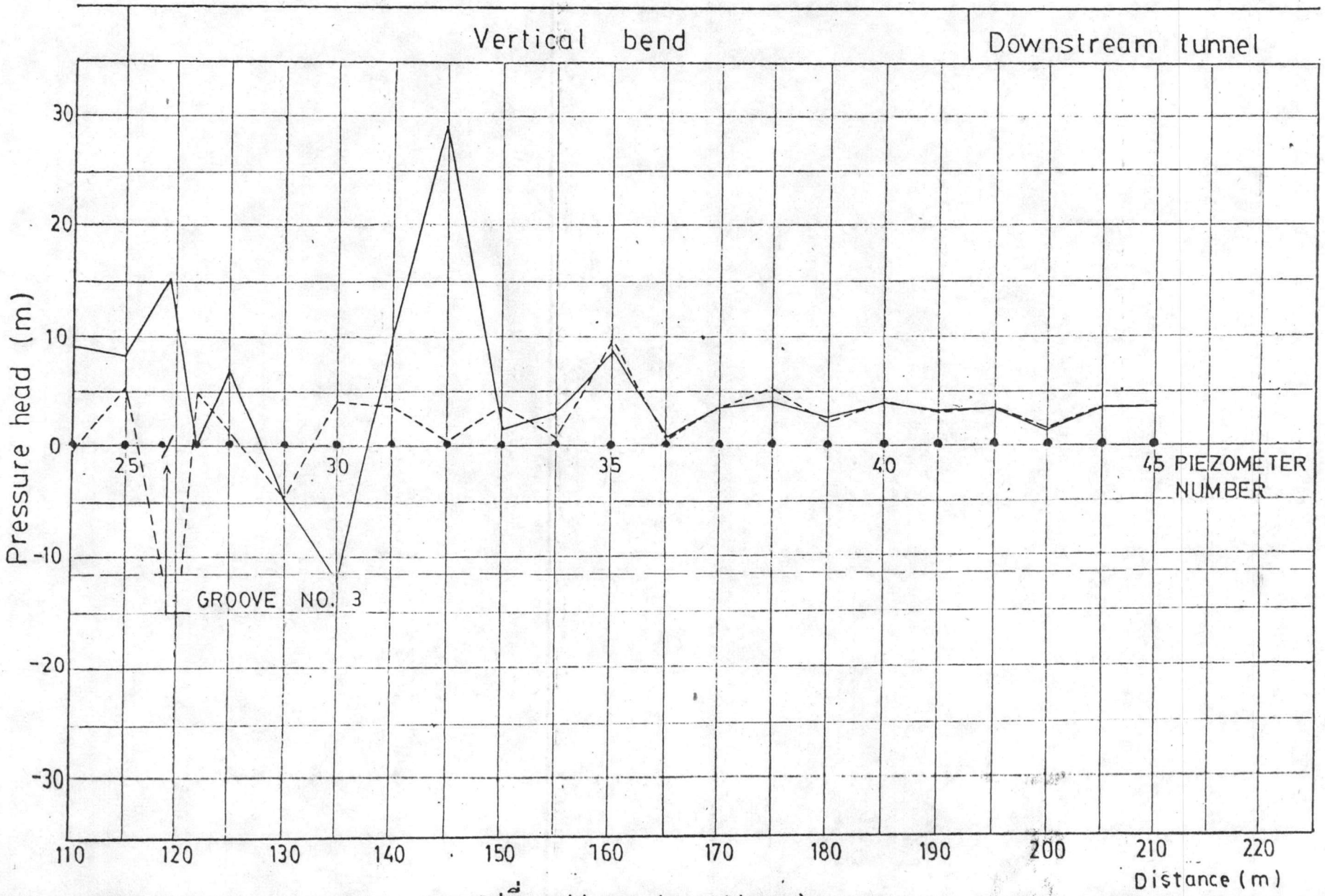


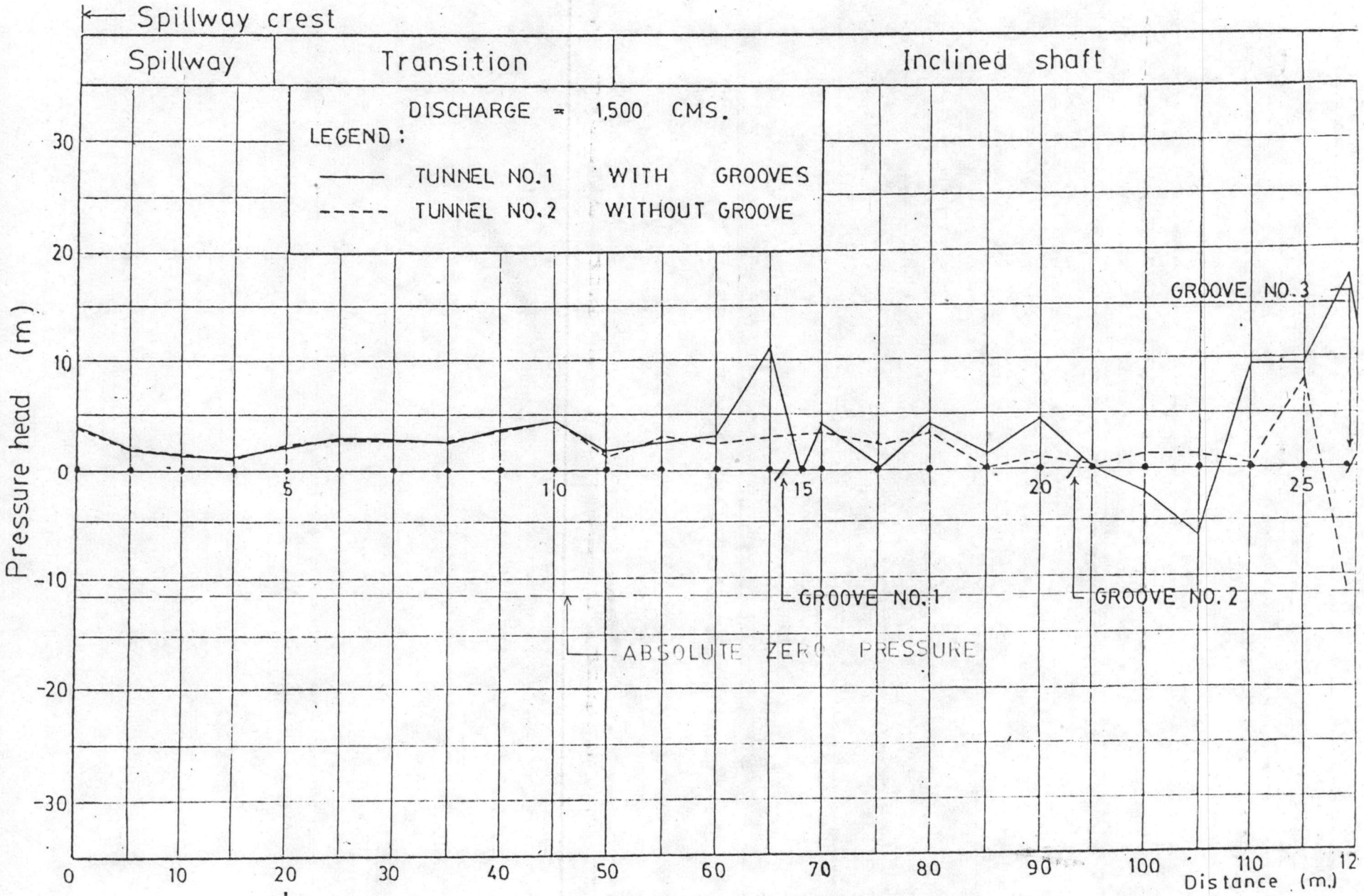
	NO.1	NO.2	NO. 3
a	52.5	45.0	37.5
b	10.5	9.0	7.5

(cm.)

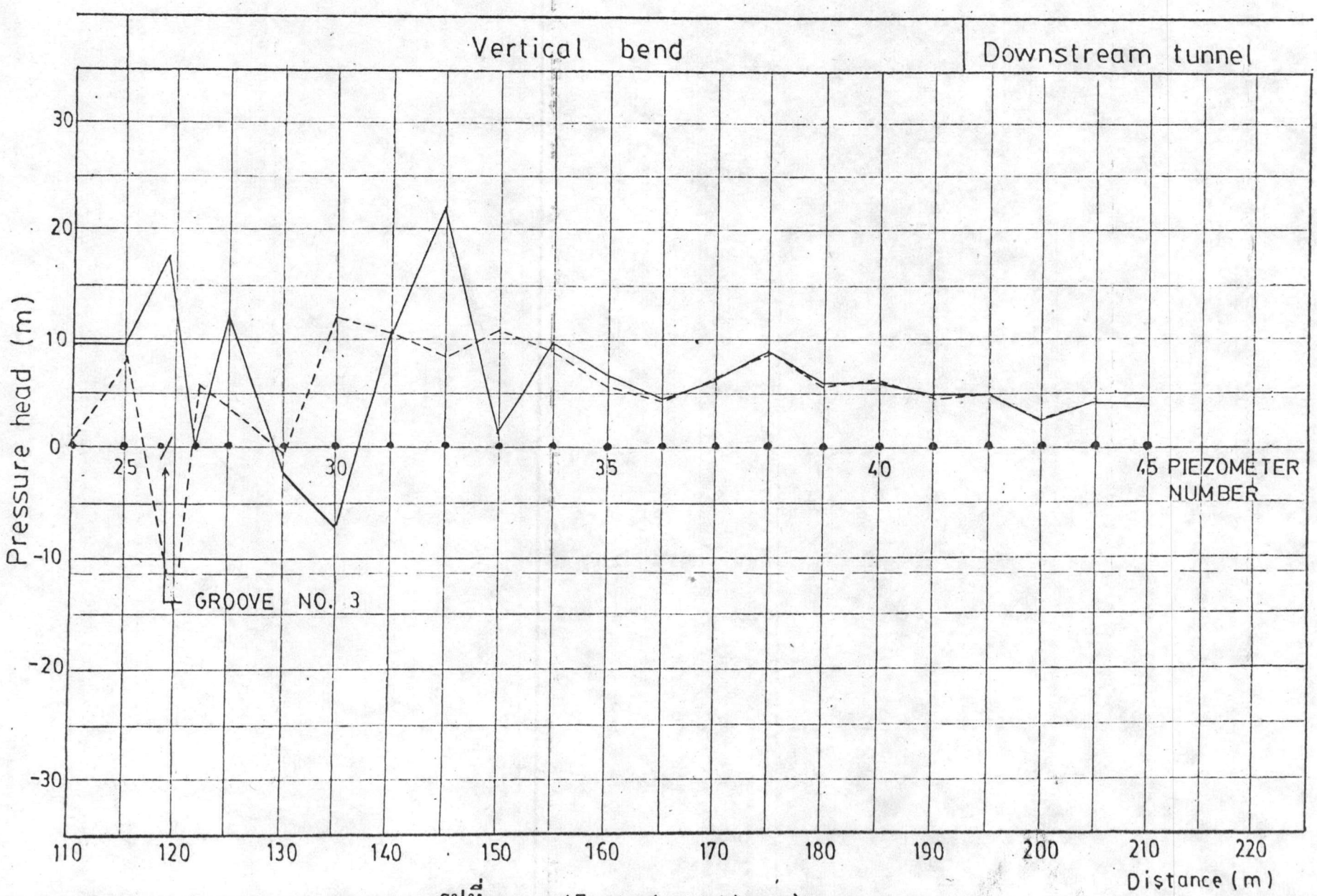


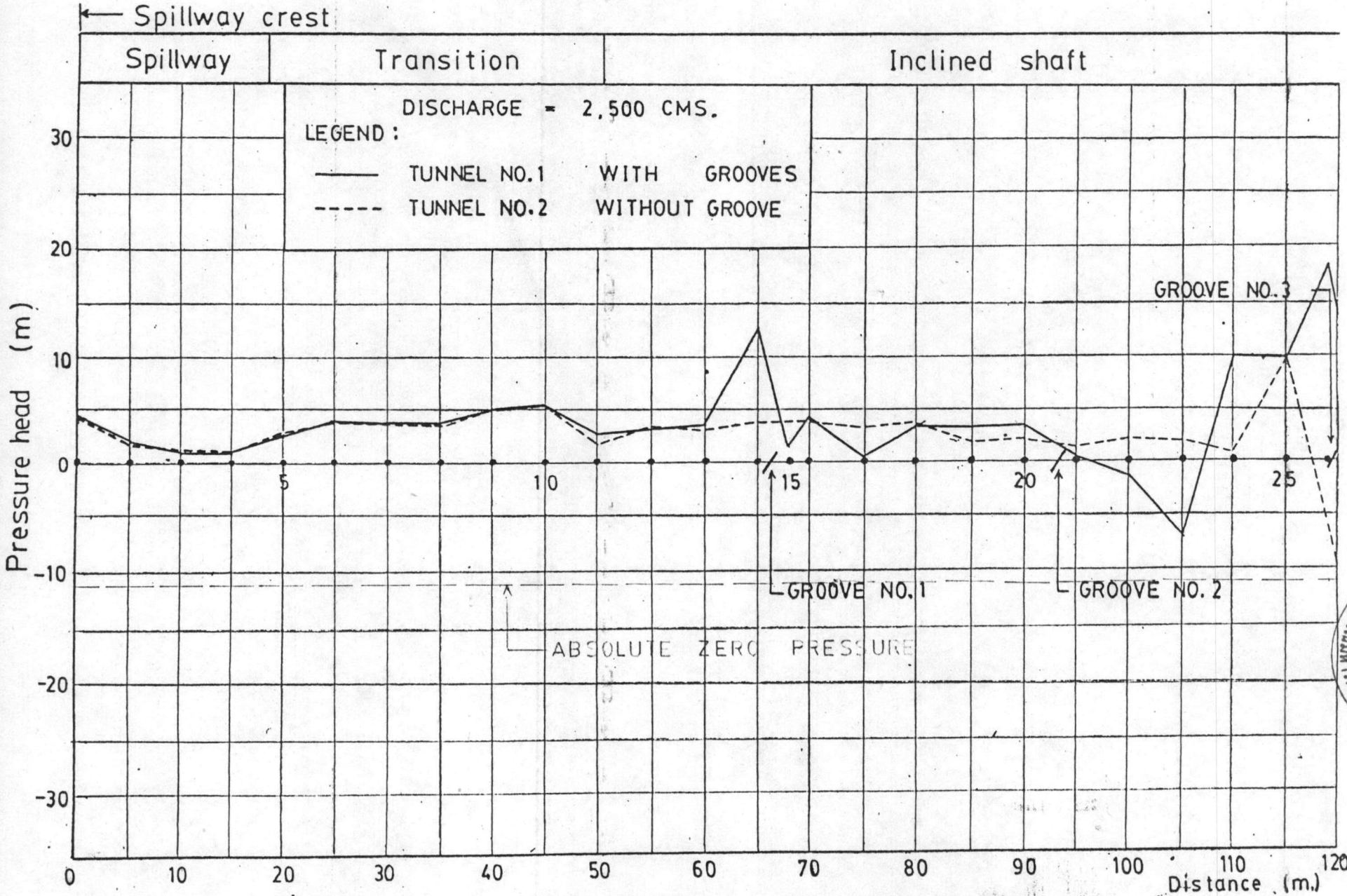
รูปที่ 44 Pressure distribution along the spillway and tunnels (with ramp)


Vertical bend
Downstream tunnel
Pressure head (m)
30
20
10
0
-10
-20
-30
25
30
35
40
45 PIEZOMETER NUMBER
GROOVE NO. 3
110
120
130
140
150
160
170
180
190
200
210
220
Distance (m)



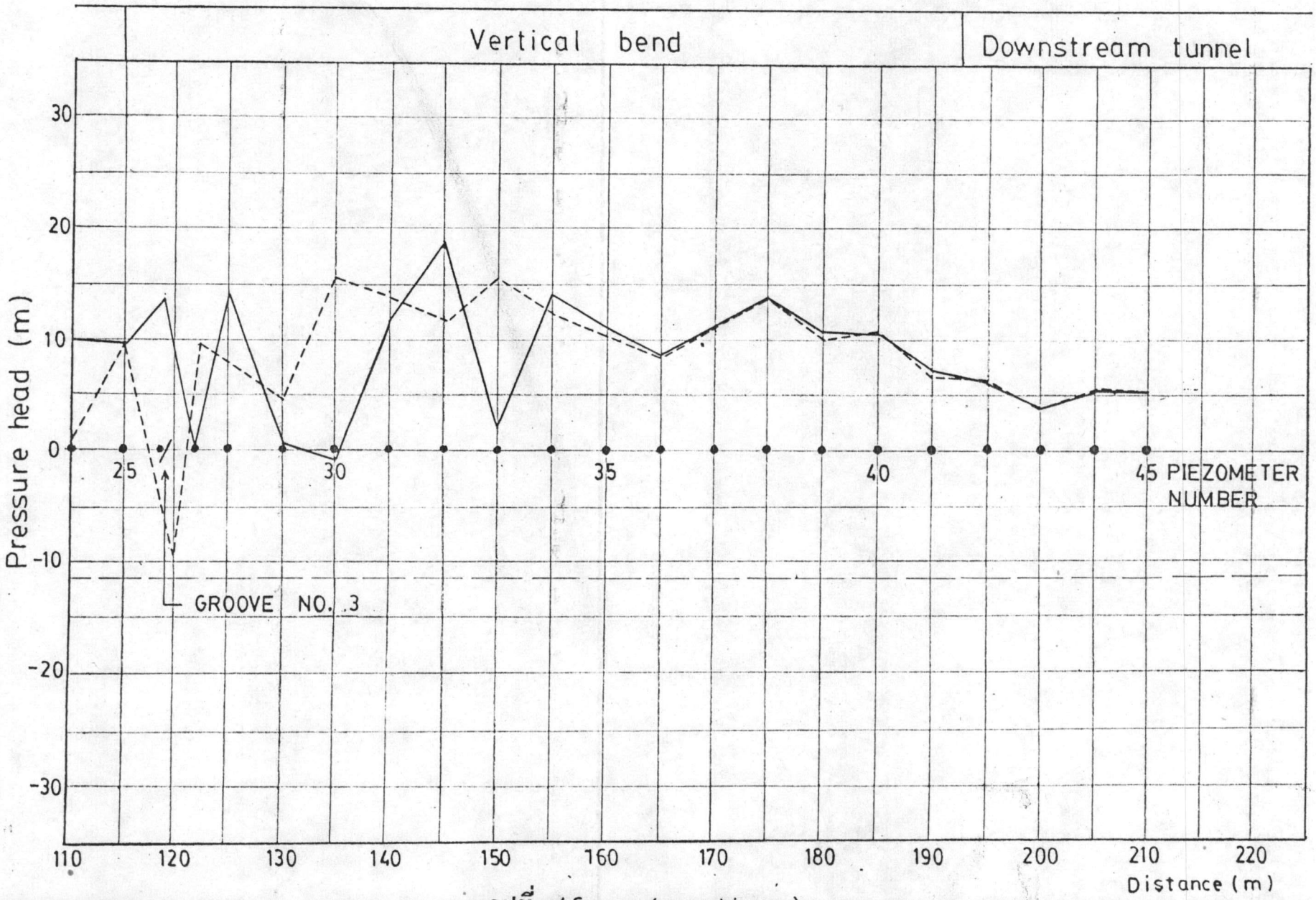
รูปที่ 45 Pressure distribution along the spillway and tunnels
(with ramp)


Vertical bend
Downstream tunnel
Pressure head (m)
30
20
10
0
-10
-20
-30
25
30
35
40
45 PIEZOMETER NUMBER
GROOVE NO. 3
110
120
130
140
150
160
170
180
190
200
210
220
Distance (m)



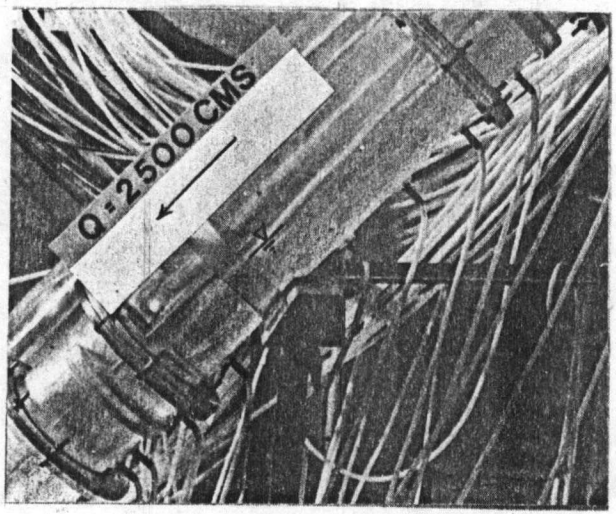
รูปที่ 46 Pressure distribution along the spillway and tunnels

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

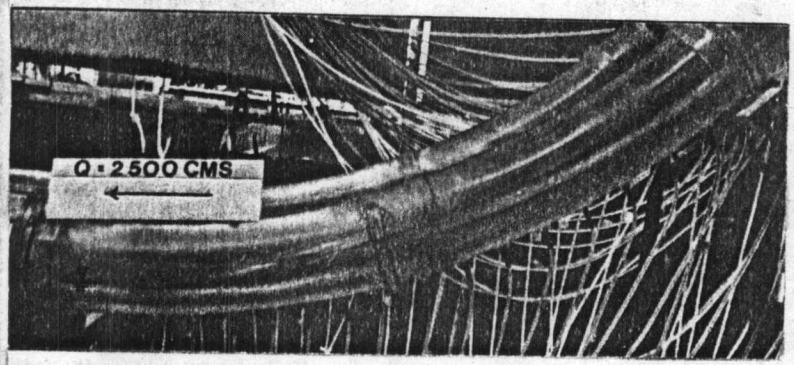

Vertical bend
Downstream tunnel
Pressure head (m)
30
20
10
0
-10
-20
-30
25
30
35
40
45 PIEZOMETER NUMBER
GROOVE NO. 3
110
120
130
140
150
160
170
180
190
200
210
220
Distance (m)

รูปที่ 47 General Flow Conditions at the Tunnel

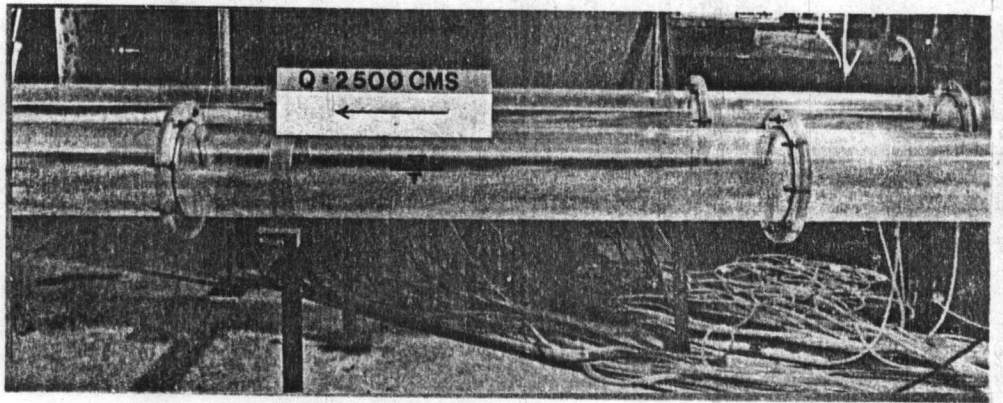
(ก) Transition



(ข) Inclined Shaft



(ค) Vertical Bend



(ง) Downstream Tunnel

ตาราง

ตารางที่ 1 SCALE RATIO

Characteristic	Unit	Symbol	Scale ratio, F-L-T system
Area	ft^2	A	L_r^2
Volume	ft^3	V	L_r^3
Velocity	fps	v	$L_rT_r^{-1}$
Acceleration	ft per sec^2	g	$L_rT_r^{-2}$
Force	lb	F	F_r
Mass	lb-sec^2 per ft	m	$F_rT_r^2L_r^{-1}$
Specific weight	lb per ft^3	γ	$F_rL_r^{-3}$
Density	lb-sec^2 per ft^4	ρ	$F_rT_r^2L_r^{-4}$
Pressure	lb per ft^2	p	$F_rL_r^{-2}$
Absolute viscosity	lb-sec per ft^2	μ	$F_rT_rL_r^{-2}$
Kinematic viscosity	ft^2 per sec	ν	$L_r^2T_r^{-1}$
Power	ft-lb per sec	P	$F_rL_rT_r^{-1}$
Discharge	ft^3 per sec	Q	$L_r^3T_r^{-1}$
Surface tension	lb per ft	σ	$F_rL_r^{-1}$
Roughness (Manning)	.....	n	$L_r^{1/6}$

NOTE: When gravity forces predominate and $g_r = 1$, $T_r = L_r^{1/2}$; when viscous forces predominate and $g_r = 1$, $T_r = L_r^2/\nu_r$.

ตารางที่ 2 SPILLWAY RATING CURVE DATA

(Full gate openning)

h_s		Reservoir	h	Qm	Qp
model (cm)	prototype (m)	elevation (m)	(cm)	(1/s)	(cms)
0.00	0.00	360.00	0.00	0.00	0.00
1.85	1.20	361.20	7.30	2.03	68.16
3.85	2.49	362.49	11.10	5.74	192.70
4.00	2.58	362.58	11.50	6.27	210.38
5.30	3.42	363.42	13.40	9.16	307.40
8.80	5.69	365.69	18.45	20.25	679.43
9.20	5.94	365.94	19.20	22.35	750.00
9.75	6.30	366.30	19.85	24.28	814.56
10.35	6.87	366.87	20.55	26.45	887.66
11.50	7.43	367.43	22.00	31.33	1,051.20
13.00	8.40	368.40	23.90	38.47	1,290.93
14.25	9.21	369.21	25.50	45.18	1,515.99
14.85	9.59	369.59	26.00	47.41	1,590.78
16.85	10.89	370.89	28.25	58.24	1,954.34
18.30	11.82	371.82	29.50	64.85	2,175.88
19.15	12.37	372.37	30.50	70.44	2,363.41
20.25	13.15	373.15	31.50	76.30	2,560.27
20.70	13.37	373.37	31.90	78.73	2,641.66