

# บทที่ 2

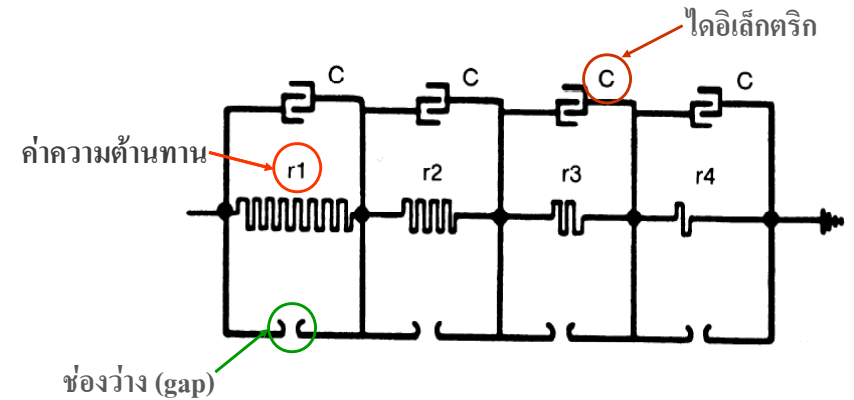
## คุณลักษณะโครงสร้าง

และ

## ค่าความต้านทานดิน

### 2.1 คุณลักษณะดิน

- 2.1.1 ดินในฐานะที่เป็นสื่อกลางการต่อลงดิน



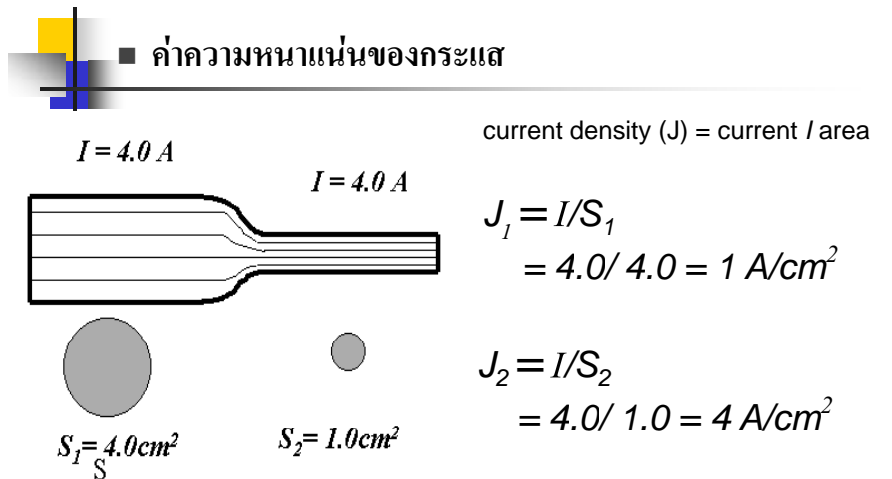
ลักษณะการทำงานของกราวด์คือเล็กโทรดที่ถูกฝังในดิน มีแบบจำลองดังรูป

### 2.1.2 ผลของการกระจายแรงดัน

- ที่ความถี่สูงและรูปคลื่นที่มีหน้าคลื่นชัน จะแทรกซึมเข้าไปหรือเจาะทะลุวัตถุ ดินที่มีสภาพต้านทาน ดินจึงสามารถแทนด้วยค่าความต้านทานอย่างเดียว
- กรณีที่การกระจายแรงดัน เกินกว่าค่าวิกฤต ซึ่งมีขนาดหลาย กิโลโวลต์ต่อ เซนติเมตร หากเกินกว่าที่กำหนดก็จะเกิดการอาร์ค (arc) ขึ้นที่ผิวอิเล็กโทรด และลามไปยังดิน ซึ่งเสมือนกับการเพิ่มขนาดประสิทธิผลของอิเล็กโทรด
- แต่ในการออกแบบการต่อลงดิน จะถูกสมมติให้การกระจายแรงดันต่ำกว่า ย่านวิกฤตเสมอ

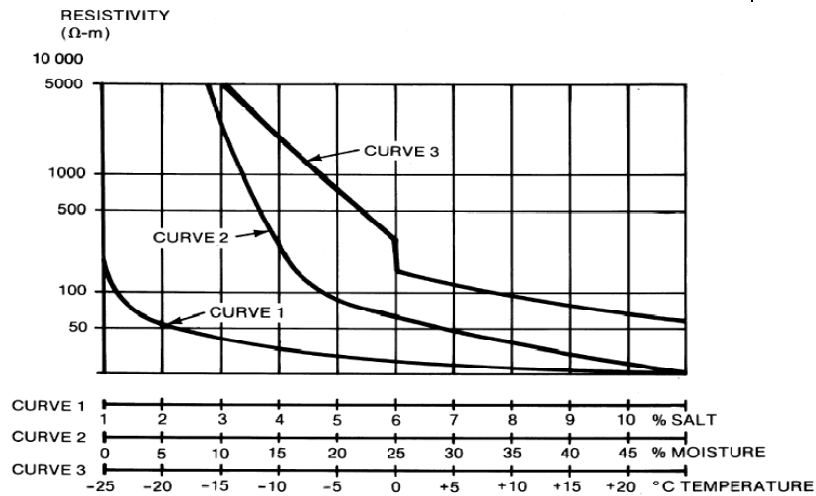
### 2.1.3 ผลของขนาดกระแส

- ค่าความหนาแน่นของกระแส



สำหรับค่าความหนาแน่นของกระแสในดินไม่ควรเกิน  $200 A/m^2$  ที่เวลา 1 s

## 2.1.4 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และความจุทางเคมี

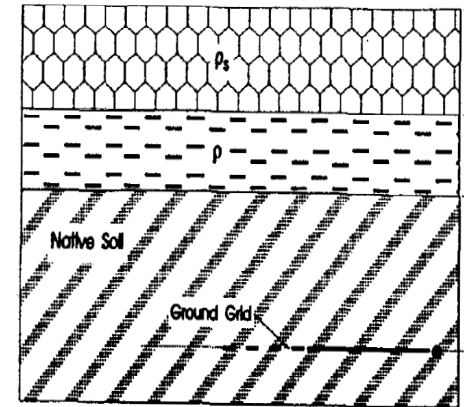


## 2.1.5 การใช้ชั้นวัสดุผิว

วัสดุที่คลุมผิวก้อนเล็กๆ

0.08–0.15 m (3–6 in)

ประโยชน์คือ



- ช่วยในการจำกัดความแห้งของชั้นดินด้านบน
- ในช่วงเวลาที่สภาวะอากาศแห้ง ช่วยให้ความชื้นในดินระเหยช้าลง
- วัสดุคลุมผิวมีสภาพต้านทานสูงช่วยในการลดกระแสไฟดูด

## วัสดุที่คลุมผิวก้อนเล็ก ๆ



## ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสภาพต้านทานวัสดุผิว

Number	Description of surface material (U.S. state where found)	Resistivity of sample Ω-m	
		Dry	Wet
1	Crusher run granite with fines (N.C.)	$140 \times 10^6$	1300 (ground water, 45 Ω-m)
2	1.5 in (0.04 m) crusher run granite (Ga.) with fines	4000	1200 (rain water, 100 W)
3	0.75–1 in (0.02–0.025 m) granite (Calif.) with fines	—	6513 (10 min after 45 Ω-m water drained)
4	#4 (1–2 in) (0.025–0.05 m) washed granite (Ga.)	$1.5 \times 10^6$ to $4.5 \times 10^6$	5000 (rain water, 100 Ω-m)
5	#3 (2–4 in) (0.05–0.1 m) washed granite (Ga.)	$2.6 \times 10^6$ to $3 \times 10^6$	10 000 (Rain water, 100 Ω-m)
6	Size unknown, washed limestone (Mich.)	$7 \times 10^6$	2000–3000 (ground water, 45 Ω-m)
7	Washed granite, similar to 0.75 in (0.02 m) gravel	$2 \times 10^6$	10 000
8	Washed granite, similar to pea gravel	$40 \times 10^6$	5000
9	#57 (0.75 in) (0.02 m) washed granite (N.C.)	$190 \times 10^6$	8000 (ground water, 45 Ω-m)
10	Asphalt	$2 \times 10^6$ to $30 \times 10^6$	$10\ 000$ to $6 \times 10^6$
11	Concrete	$1 \times 10^6$ to $1 \times 10^9$ <sup>a</sup>	21 to 100

<sup>a</sup>Oven dried concrete (Hammond and Robson [B78]). Values for air-cured concrete can be much lower due to moisture content.

## 2.2 โครงสร้างของดินและการเลือกแบบจำลองของดิน

- 2.2.1 การสำรวจโครงสร้างของดิน
  - สำรวจสภาพต้านทานของที่ตั้งสถานีไฟฟ้าย่อย
  - องค์ประกอบของดินโดยทั่วไป
  - ระดับของลักษณะสมบัติที่เหมือนกัน
  - ตัวอย่างการทดสอบและการสำรวจทางภูมิศาสตร์
  - ชั้นต่างๆและธรรมชาติของวัสดุที่เป็นดิน
  - นำไปสู่เรื่องย่านของสภาพต้านทานของดิน ซึ่งเป็นที่ตั้งของสถานีไฟฟ้าย่อย

## 2.2.2 การจำแนกดินและย่านของสภาพต้านทาน

- ตารางที่ 2.2 แสดงย่านของสภาพต้านทานดิน

Type of earth	Average resistivity ( $\Omega \cdot m$ )
Wet organic soil	10
Moist soil	$10^2$
Dry soil	$10^3$
Bedrock	$10^4$

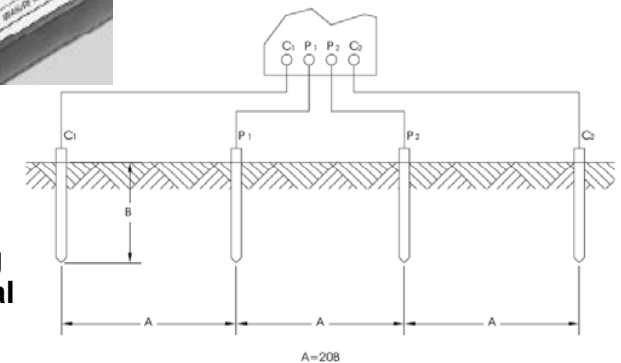
## 2.2.3 การวัดสภาพต้านทานของดิน

- ที่ผ่านหน้าของดิน ซึ่งเป็น
- ต้องมีการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งสภาพต้านทานที่เป็นจริง โดยควรทำในบริเวณ ๒๐๕ เมตรในสถานีไฟฟ้าย่อย
- ดินที่อยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อย อาจจะมีสภาพต้านทานเหมือนกันหมดตลอดทั้งพื้นที่ และในบางครั้งอาจจะต้องพิจารณาถึงความลึกด้วย
- สำหรับกรณีที่ดินมีหลายชั้น ยังมีความลำบากในการหาสภาพความต้านทานดินด้วย
- ควรทำการอ่านค่าที่ได้จำนวนมาก เมื่อค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าการอ่านบางค่าสูงเกินไป เพื่อให้เกิดความปลอดภัยเท่าที่จะเป็นไปได้



most accurate method in practice of measuring the average resistivity of large volumes of undisturbed earth

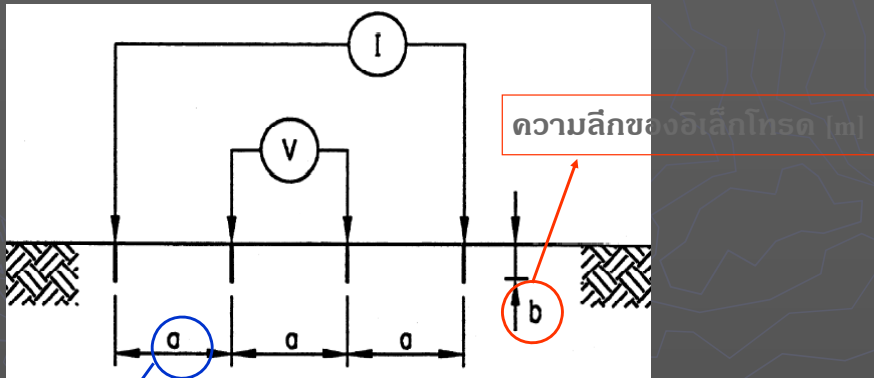
SOIL RESISTIVITY TESTING  
'FOUR-TERMINAL' METHOD OF MEASURING SOIL RESISTIVITY



the driving of long rods is not practical

NOTE: 1. A IS LESS THAN OR EQUAL TO 20B.  
2. RESISTIVITY IN OHM-METERS EQUALS 19.15R WHEN A EQUALS 10' AND B EQUALS 6'.

## เทคนิคการวัดโดย Wenner four-pin method



ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด [m]

ความลึกของอิเล็กโทรด [m]

## สภาพต้านทานที่ปรากฏของดิน

$$R = \frac{\text{แรงดันระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ที่ถูกวัด (V)}}{\text{กระแสระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง (I)}}$$

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

เมื่อ

- $\rho_a$  คือ สภาพต้านทานที่ปรากฏของดิน [ $\Omega\text{-m}$ ]
- $R$  คือ ค่าความต้านทานที่ถูกวัด [ $\Omega$ ]
- $a$  คือ ระยะทางระหว่างระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด [m]
- $b$  คือ ความลึกของอิเล็กโทรด [m]

ถ้า  $b$  มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับ  $a$

ดังเช่นในกรณีที่ว่าวัดถูกปักลงไปในดินเป็นระยะทางสั้นๆ

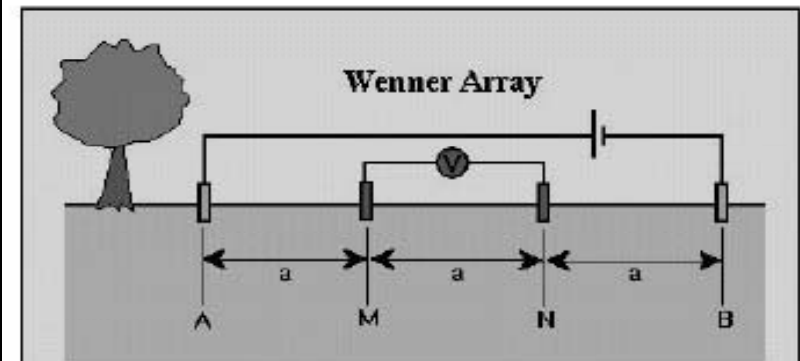
นั่นคือ  $b \ll a$

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\cancel{\sqrt{a^2 + 4b^2}}} - \frac{a}{\cancel{\sqrt{a^2 + b^2}}}}$$

ได้เป็น

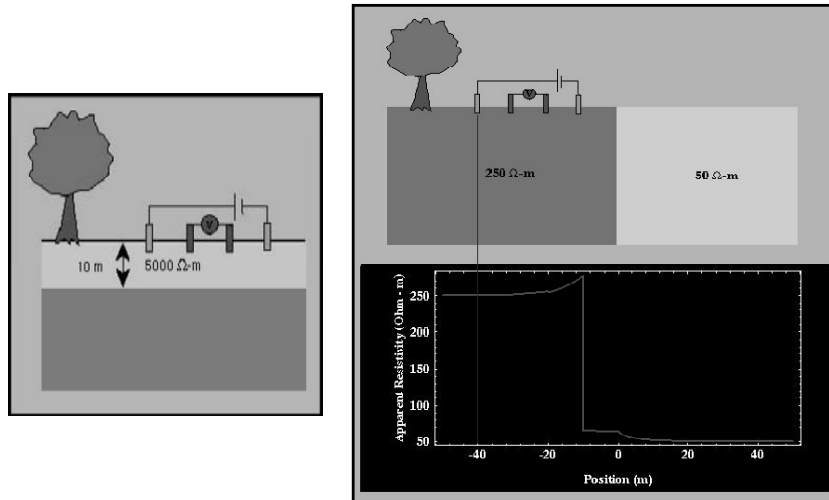
$$\rho_a = 2\pi a R$$

หรือ



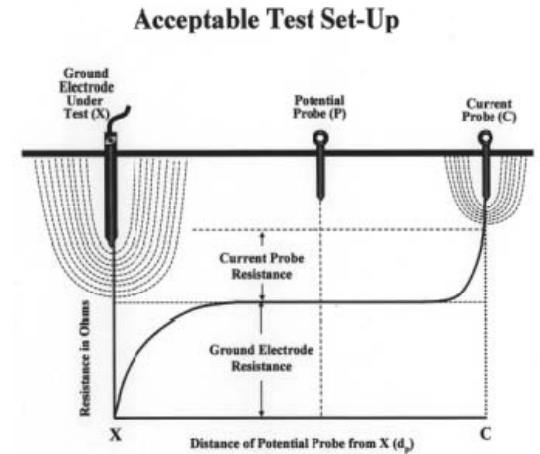
$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{i}$$

## กลุ่มข้อมูลที่อ่านได้ โดยการเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง probe

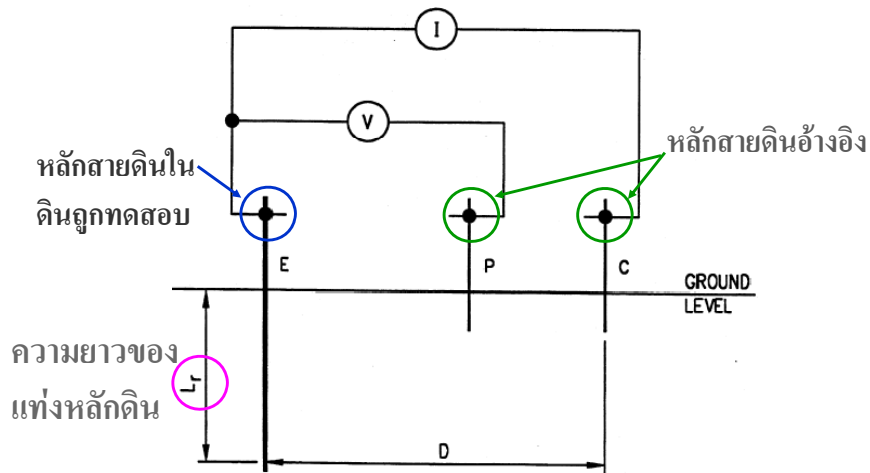


- สภาพต้านทานจะมีค่าต่างๆ กันอยู่กลุ่มหนึ่ง ซึ่งเมื่อทำการเขียนกราฟต่อระยะห่าง ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่ามีค่าแตกต่างของชั้นดิน หรือว่าเป็นหิน และให้แนวทางของสภาพต้านทานและความลึกตามลำดับ

## วิธีการแทงหลักดินปักลึก หรือสามหมุด



## วิธีปักแทงหลักสายดิน ตั้งอยู่บนพื้นฐานของหมุดสามหมุด หรือวิธีการตกของศักย์ (fall-of-potential)

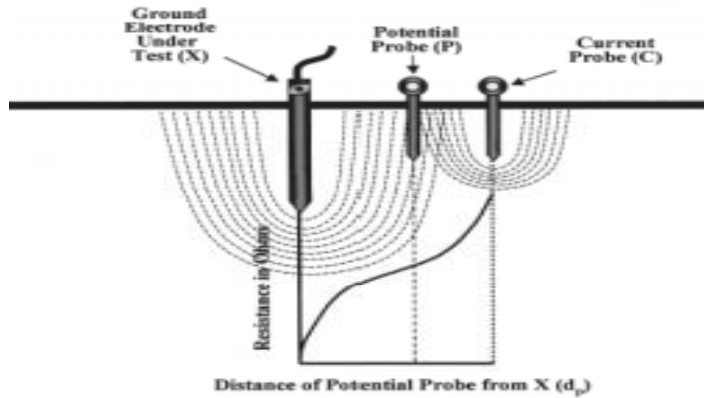


## วิธีการวัดแบบอเล็กโทรดแบบสามแท่ง

- ป้อนกระแสเข้าที่อเล็กโทรด E และ C ผ่านดิน
- อเล็กโทรดทั้งสองควรอยู่ห่างกันมากๆ เพื่อมิให้การกระจายของกระแสไฟฟ้าในดินของแต่ละอเล็กโทรดมีผลกระทบต่อกัน โดยทั่วไป ประมาณไม่ต่ำกว่า 40 เมตร
- อเล็กโทรด P ควรอยู่ในแนวต่อระหว่างอเล็กโทรดที่มีกระแสไหลผ่านทั้งสอง และอยู่ประมาณกึ่งกลางแนวต่อ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มีแรงดัน เนื่องจากไม่มีผลของสนามไฟฟ้าของทั้งสองอเล็กโทรด

## อิเล็กโทรด E และ C ที่อยู่ชิดกันเกินไป

### Insufficient Probe Spacing



## สภาพต้านทานที่ปรากฏของดิน

$$R = \frac{\text{แรงดันระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองที่ถูกวัด (V)}}{\text{กระแสระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง (I)}}$$

$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1}$$

$L_r$  คือ ความยาวของแท่งหลักดิน [m]  
 $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดิน [m]

การเขียนกราฟของค่าสภาพต้านทานปรากฏที่ถูกวัด  $\rho_a$  ต่อความยาวแท่งหลักดิน  $L_r$  จัดเตรียมไว้สำหรับการช่วยที่เห็นสำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานดินกับความลึก

## 2.3 การตีความหมายของการวัด สภาพต้านทานของดิน

- จุดประสงค์พื้นฐานคือ
  - การที่จะได้มาซึ่งแบบจำลองดิน
  - การประมาณสภาพต้านทานของดินตามความเป็นจริง

## การประมาณสภาพต้านทานของดิน ตามความเป็นจริง

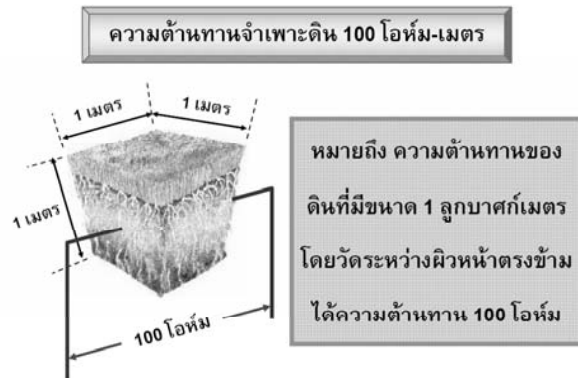
- การจำแนกดินออกเป็นชั้นๆ
- บริเวณของดินในตำแหน่งต่างๆ
- สภาพต้านทานดินที่เกี่ยวข้องกับความลึก
- ความแปรปรวนตามฤดู อาจเกิดขึ้นกับสภาพต้านทานของดิน เนื่องจากสภาวะอากาศที่หลากหลาย
- ต้องมีการสังเกตตามแบบตัวอย่างดิน

## แบบจำลองสภาพต้านทานดิน

- **แบบจำลองสภาพต้านทานดินคือ**

- **แบบจำลองดินที่เหมือนกัน**

- ใช้เฉพาะ เมื่อมีการแปรปรวนปานกลางในสภาพต้านทานดินที่ปรากฏ

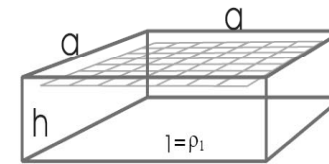


## แบบจำลองดินแบบสองชั้น

ทำให้การประมาณค่าได้ดี สำหรับโครงสร้างดินที่มีหลายๆ โครงสร้าง และใช้สำหรับสถานะดินที่ซับซ้อนมากกว่า

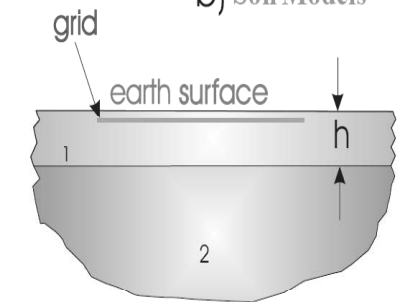
rectangular volume ( $a \times a \times h$ )

### a) Horizontal Two-Layer



$2 = \rho_2$

### b) Soil Models



## แบบจำลองดิน

- **แบบจำลองดินเหมือนกัน**

- แม้ว่าสถานะที่ดินเป็นเนื้อเดียวกัน แทบจะเป็นไปไม่ได้เลยในทางปฏิบัติเลย แต่อาจจะได้ความถูกต้องโดยประมาณ และมีข้อดีคือ ความซับซ้อนในการคำนวณน้อย

- **แบบจำลองแบบสองชั้น**

- ประกอบด้วย ชั้นด้านบนของความลึกที่กำหนด และกับสภาพต้านทานที่แตกต่างกว่าชั้นดินที่ต่ำกว่าของความหนานั้นต์

## เทคนิคที่จะหาแบบจำลองสองชั้นสมมูล

- หากจาวัดสภาพต้านทานที่ปรากฏ ที่ได้จากพื้นที่ทดสอบ
- ในบางสถานการณ์ สามารถประมาณโดยการเขียนกราฟของสภาพต้านทานปรากฏเทียบกับความลึกจากการวัดที่แพงหลัก สายดินที่ตอกลึก
- หรือสภาพต้านทานปรากฏเทียบกับระยะห่างหัววัดจากการวัด หมุดสี่หมุดของ Wenner

### 2.3.1 สมมติฐานดินที่เหมือนกัน

- แบบจำลองดินที่เหมือนกัน สามารถถูกใช้แทนที่แบบจำลองดินหลายชั้นได้ เมื่อการคำนวณแบบดินหลายชั้นมีข้อจำกัดด้านพารามิเตอร์การต่อลงดินทั้งหมดยากที่จะกะเน
- โดยทั่วไป จะใช้การประมาณสภาพต้านทานชั้นต่างๆ ให้เป็นค่าสภาพต้านทานดินเฉลี่ย โดยใช้ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของข้อมูลสภาพต้านทานดินที่ปรากฏจากเครื่องมือวัด ตามที่แสดงในสมการที่ (2.4)

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n}$$

เมื่อ

$$\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}$$

คือข้อมูลสภาพต้านทานปรากฏที่ถูกวัด ซึ่งได้มาจากระยะที่แตกต่างกัน โดยวิธีการหมุดสี่หมุด หรือที่ความลึกแตกต่างด้วยวิธีการปักลึกแทงหลักสายดิน  $n$  คือ จำนวนครั้งในการวัดทั้งหมด

และคำนวณสภาพต้านทานดินของแบบจำลองดินที่เหมือนกันด้วยคือ

$$\rho_{2(av2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2} \quad (2.5)$$

เมื่อ

- $\rho_{a(max)}$  คือ ค่าสภาพต้านทานปรากฏสูงสุด (จากข้อมูลที่ถูกวัด) [ $\Omega-m$ ]
- $\rho_{a(min)}$  คือ ค่าสภาพต้านทานปรากฏต่ำสุด (จากข้อมูลที่ถูกวัด) [ $\Omega-m$ ]

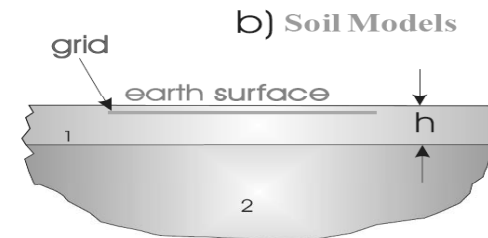
### 2.3.2 สมมติฐานดินที่ไม่เหมือนกัน

- สภาพต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงไปจากที่กำหนดไว้ตามความลึก และแร่ที่มีอยู่ตามลักษณะภูมิศาสตร์
- จึงต้องทำการอ่านค่าจากภาคสนาม ด้วยย่านกว้างของระยะห่างการทดสอบ เพื่อลดการแบ่งออกเป็นชั้นๆ ของดิน ไปเป็นชั้นสองหรือมากกว่าตามความหนาเหมาะสม เพื่อจะอธิบายการแปรปรวนที่มีอยู่ตามความเป็นจริง

#### (ก) แบบจำลองดินสองชั้น

การเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันในสภาพต้านทานดินที่บริเวณแต่ละชั้นดินสามารถอธิบายได้โดยใช้ตัวประกอบ  $K$  ที่ถูกกำหนดโดยสมการที่ (2.6)

#### ตัวประกอบ $K$



$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

เมื่อ

- $\rho_1$  คือ สภาพต้านทานดินชั้นที่สูงกว่า [ $\Omega-m$ ]
- $\rho_2$  คือ สภาพต้านทานดินชั้นที่ต่ำกว่า [ $\Omega-m$ ]



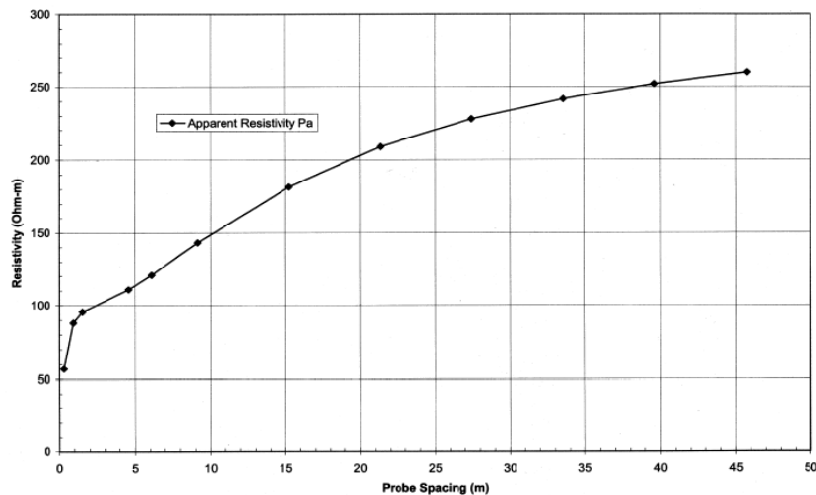
## แบบจำลองดินสองชั้นโดยวิธีการใช้กราฟ

- ในการประมาณค่าแบบจำลองดินสองชั้น โดยการใช้กราฟของ Sunde จะต้องทราบพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้
- $\rho_a$  ค่าสภาพต้านทานปรากฏ (จากข้อมูลที่ถูกวัด)
- $\rho_1$  คือ สภาพต้านทานดินชั้นที่สูงกว่า
- $\rho_2$  คือ สภาพต้านทานดินชั้นที่ต่ำกว่า
- หาค่า  $h$  โดยวิธีการทางกราฟของ Sunde ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

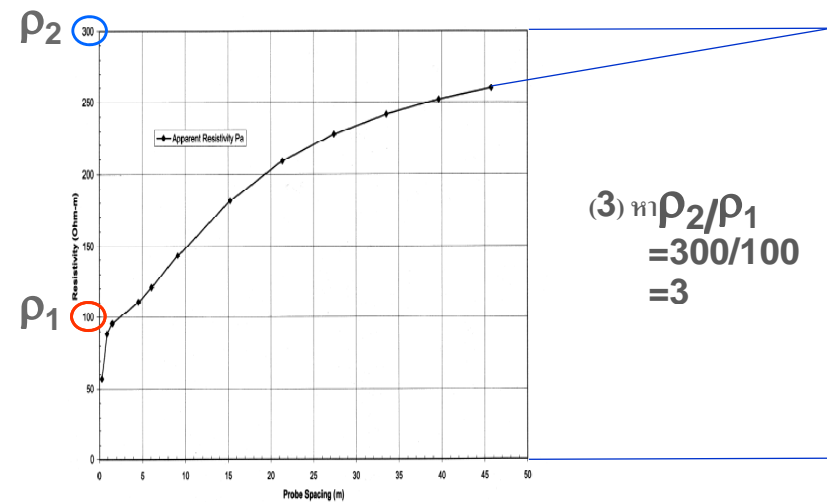
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างข้อมูลของค่าความต้านทานและสภาพต้านทานปรากฏสำหรับดินแบบที่ 1 และแบบที่ 2

Probe separation		Soil type 1		Soil type 2	
(ft)	(m)	Resistance $\Omega$	Apparent resistivity $\rho_a \Omega\cdot m$	Resistance $\Omega$	Apparent resistivity $\rho_a \Omega\cdot m$
1	0.305	29.73	56.91	89.13	170.71
3	0.915	15.33	88.07	45.85	263.46
5	1.524	9.91	95.48	29.55	283.06
15	4.573	3.85	110.71	9.39	269.67
20	6.098	3.15	120.76	6.46	247.57
30	9.146	2.49	143.10	3.52	202.12
50	15.244	1.90	181.70	1.50	144.05
70	21.341	1.56	208.78	0.90	120.28
90	27.439	1.32	227.75	0.64	110.68
110	33.537	1.15	241.48	0.51	106.41
130	39.634	1.01	251.77	0.42	104.34
150	45.731	0.90	259.76	0.36	103.16

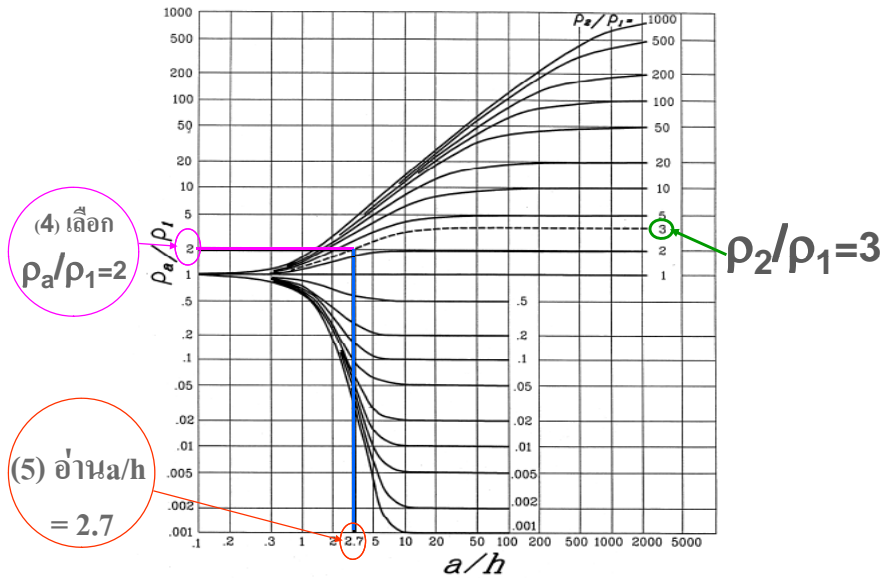
(1) เขียนกราฟสภาพต้านทานปรากฏ  $\rho_a$  บนแกน y ต่อ ระยะห่างหมุดหลักดินที่แกน x



(2) ประมาณค่า  $\rho_1$  และ  $\rho_2$  จากกราฟที่ถูกวาดในข้อ (1)



### ตัวอย่างวิธีการกราฟของ Sunde

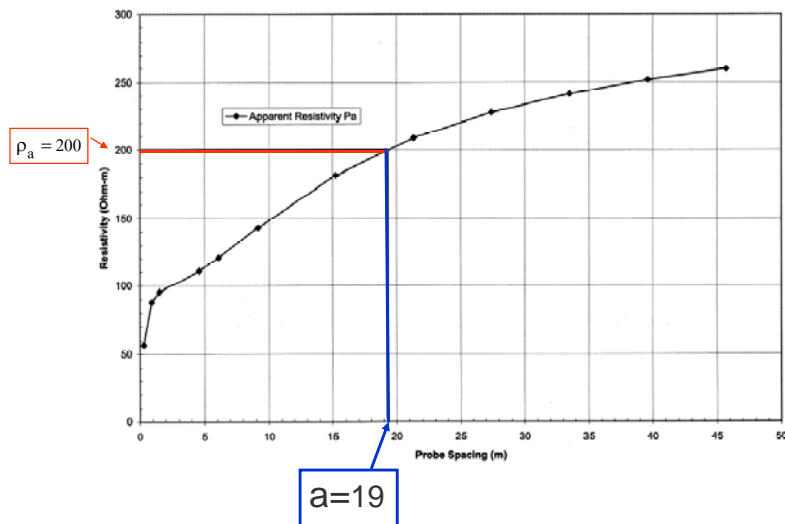


(6) คำนวณ  $\rho_a$  โดยการคูณค่าที่เลือก  $\rho_a/\rho_1$  ในข้อที่ (4) ด้วย  $\rho_1$

$$\rho_a = 2\rho_1 = 2 \times 100 = 200$$

(7) อ่านค่าระยะห่างตัววัด  $a$  ที่สอดคล้องกันจากกราฟสภาพต้านทานที่วัดในข้อ (1)

(8) คำนวณค่าความลึก  $h$  ของดินระดับบน โดยใช้ระยะตัววัด  $a$  ที่เหมาะสม



$$h = \frac{a}{a/h} = \frac{19}{2.7} = 7.0 \text{ m หรือ } 23 \text{ ft}$$

This compares favorably with the 6.1 m (20 ft) using EPRI TR-100622

## การเปรียบเทียบแบบจำลองดินสองชั้นและเหมือนกันใน ระบบการต่อลงดิน

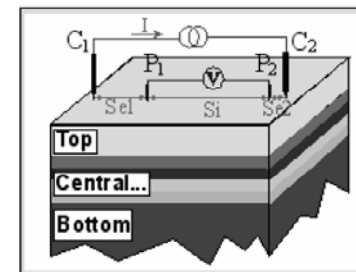
- ความแตกต่างของดิน
  - ถ้าค่า  $K$  เป็นลบ (ความต้านทานชั้นด้านบนมากกว่าชั้นที่ต่ำกว่า) ค่าความต้านทานจะมีค่าน้อยกว่าดินที่เหมือนกัน ดังนั้นแรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัสของแบบจำลองดินสองชั้นจึงน้อยกว่าดินที่เหมือนกัน
  - ถ้าค่า  $K$  เป็นบวก (ความต้านทานชั้นด้านบนน้อยกว่าชั้นที่ต่ำกว่า) ค่าความต้านทานจะมีค่ามากกว่าดินที่เหมือนกัน ดังนั้นแรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัสของแบบจำลองดินสองชั้นจึงมากกว่าดินที่เหมือนกัน

## การเปรียบเทียบแบบจำลองดินสองชั้นและเหมือนกัน ในระบบการต่อลงดิน

- พารามิเตอร์อื่นๆ
  - เช่นความสูงชั้นด้านบน มีผลกระทบต่อความแตกต่างในด้านสมรรถนะของกราวด์อิล็กโทรดในสภาพแวดล้อมสำหรับดินสองชั้น และในสภาวะดินที่เหมือนกันอีกด้วย กฎทั่วไป ก็คือเมื่อความสูงชั้นด้านบน  $h$  กลายมาเป็นตัวที่มีนัยสำคัญมากกว่าขนาดของอิล็กโทรดเอง

## สิ่งที่จำเป็นต้องคำนึงถึง

- คุณลักษณะที่ตั้งอยู่บนฐานของแหล่งจ่ายกระแสฟอลต์คงที่ กระแสตามความเป็นจริงในระบบการต่อลงดิน จะเปลี่ยนจากกรณีหนึ่งไปกรณีหนึ่ง เป็นฟังก์ชันของ  $\rho_1$  และ  $\rho_2$  การพิจารณาอย่างรอบคอบเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเฉพาะบริเวณที่เกี่ยวข้อง กับกระแสและทางกระแสฟอลต์ลงดินอื่นๆ ทั้งหมด ถูกนำมาพิจารณากับตำแหน่งฟอลต์ การแบ่งกระแสนี้ด้วย
- สำหรับการประยุกต์ใช้งานการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการจัดวางการต่อลงดินเบื้องต้น ของอิล็กโทรดที่ถูกฝังในดินที่เหมือนกัน วิธีการประมาณในที่นี้ จะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบของจริง กับขอบเขตความปลอดภัยที่เหมาะสม
- อย่างไรก็ตาม สำหรับการออกแบบที่รวมถึงพื้นที่ถูกต่อลงดินขนาดใหญ่ หรือที่ซึ่งสภาพต้านทานมีความไม่เหมือนกันของดินอย่างชัดเจน จะต้องมีการพิจารณาพารามิเตอร์อื่นๆ ประกอบด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนต่อไป



## แบบจำลองดินหลายชั้น

- สภาวะดินที่มีความไม่เหมือนกันสูงอาจจะถูกพบได้ สภาวะดินที่กล่าวถึงนั้น อาจจะต้องการใช้แบบจำลองเทคนิคแบบดินหลายชั้น ถ้าสมมูลดินสองชั้นไม่เหมาะสม แบบจำลองดินหลายๆ ชั้น อาจจะนำมาพิจารณาทั้ง ชั้นดินในแนวนอน หรือดินในแนวตั้งชั้นแนวตั้ง เทคนิคที่จะอธิบายเกี่ยวกับสภาพความต้านทานดินที่ไม่เหมือนกันอย่างมาก ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือวิธีการกราฟเข้ามาช่วย

## 2.4 การประเมินค่าความต้านทานของดิน

### 2.4.1 สิ่งต้องพิจารณาตามปกติ

—ระบบการต่อลงดินที่ดี ต้องทำให้ค่าความต้านทานต่ำ

- สำหรับระบบการส่งกำลังไฟฟ้าส่วนมาก และสถานีย่อยขนาดใหญ่อื่นๆ โดยปกติค่าความต้านทานดินมีค่าประมาณ  $1\Omega$  หรือน้อยกว่า
- ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีขนาดเล็กกว่า โดยปกติจะยอมรับค่าอยู่ในย่าน  $1\Omega$  ถึง  $5\Omega$  ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพที่ตั้งในบริเวณเฉพาะนั้นๆ

## 2.4.2 การคำนวณเบื้องต้น

- ขั้นตอนแรกสำหรับการพิจารณาขนาด และ โครงสร้างพื้นฐานของระบบการต่อลงดิน เนื่องจากค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ถูกครอบคลุมโดยระบบการต่อลงดิน ดังนั้นค่าความต้านทานที่น้อยที่สุดของระบบการต่อลงดินในสถานีย่อยสำหรับค่าความต้านทานดินที่เหมือนกัน สามารถถูกคะเนโดยการใชสูตรของแผ่นงาน โลหะเป็นรูปวงกลมหรือวงแหวนที่ความลึกเป็นศูนย์ ก็คือ

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

เมื่อ

$R_g$  คือ ค่าความต้านทานดินของสถานีไฟฟ้าย่อย [ $\Omega$ ]

$\rho$  คือ ค่าความต้านทานดินของสถานีไฟฟ้าย่อย [ $\Omega\text{-m}$ ]

$A$  คือ พื้นที่ที่มีกราวด์กริดอยู่  $\text{m}^2$

### ขีดจำกัดบนของค่าความต้านทานของสถานีไฟฟ้าย่อย

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T}$$

เมื่อ  $L_T$  คือ ความยาวของตัวนำทั้งหมดที่ถูกฝังในดิน [m]

Sverak ได้ขยายความของสมการที่ (2.8) เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากความลึกของกริดเป็น

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

เมื่อ  $h$  คือ ความลึกของกริด [m]

### ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าความต้านทานกริด

Parameter soil texture	Sub 1 sand and gravel	Sub 2 sandy loam	Sub 3 sand and clay	Sub 4 sand and gravel	Sub 5 soil and clay
Resistivity ( $\Omega\text{-m}$ )	2000	800	200	1300	28.0
Grid area ( $\text{ft}^2$ )	15 159	60 939	18 849	15 759	61 479
Buried length (ft)	3120	9500	1775	3820	3000
$R_g$ (calculated $\Omega$ )	25.7	4.97	2.55	16.15	0.19
$R_g$ (measured $\Omega$ )	39.0	4.10	3.65	18.20	0.21

## 2.4. 3 สมการของ Schwarz

- สมการของ Schwarz ได้รับการพัฒนาตามกลุ่มสมการที่พิจารณาความต้านทานทั้งหมดของระบบการต่อลงดินที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยกริดตามแนวนอนและอิเล็กโทรดแท่งหลักสายดินในแนวตั้ง
- Schwarz ได้ใช้สมการดังต่อไปนี้ เพื่อรวมค่าความต้านทานของกริด แท่งหลักสายดิน และค่าความต้านทานดินรวม เพื่อที่จะคำนวณค่าความต้านทานระบบทั้งหมด  $R_g$  คือ

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

เมื่อ

- $R_1$  คือ ค่าความต้านทานดินของตัวนำกริด [Ω]
- $R_2$  คือ ค่าความต้านทานดินของแท่งหลักสายดิน [Ω]
- $R_m$  คือ ค่าความต้านทานดินร่วมระหว่างกลุ่มของตัวนำกริด  $R_1$  และกลุ่มของแท่งหลักสายดิน  $R_2$  [Ω]

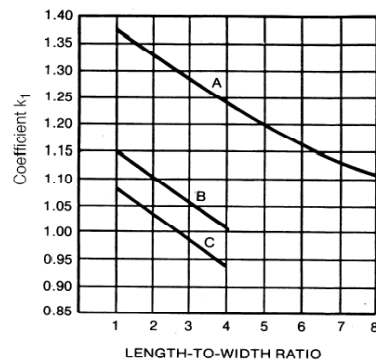
## ค่าความต้านทานดินของกริดคือ

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right]$$

เมื่อ

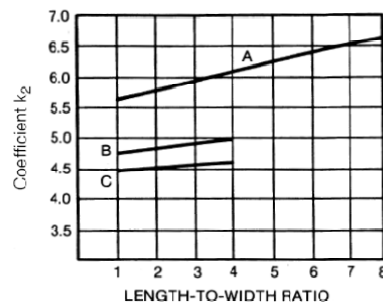
- $\rho$  คือ สภาพต้านทานดิน [Ω-m]
- $L_c$  คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำกริดที่ถูกต่อทั้งหมด [m]
- $a'$  คือ  $\sqrt{a \cdot 2h}$  สำหรับตัวนำที่ถูกฝังในดินที่มีความลึก  $h$  [m] หรือ
- $a'$  คือ  $a$  สำหรับตัวนำบนผิวดิน [m]
- $2a$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ [m]
- $A$  คือ พื้นที่ที่ถูกคลุมด้วยตัวนำ [m<sup>2</sup>]
- $k_1, k_2$  คือ สัมประสิทธิ์ (ดูรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข))

## สัมประสิทธิ์ $k_1$ และ $k_2$ สำหรับสูตรของ Schwarz



CURVE A — FOR DEPTH  $h = 0$   
 $y_A = -0.04x + 1.41$   
 CURVE B — FOR DEPTH  $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$   
 $y_B = -0.05x + 1.20$   
 CURVE C — FOR DEPTH  $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$   
 $y_C = -0.05x + 1.13$

(ก) สัมประสิทธิ์  $k_1$



CURVE A — FOR DEPTH  $h = 0$   
 $y_A = 0.15x + 5.50$   
 CURVE B — FOR DEPTH  $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$   
 $y_B = 0.10x + 4.68$   
 CURVE C — FOR DEPTH  $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$   
 $y_C = -0.05x + 4.40$

(ข) สัมประสิทธิ์  $k_2$

## ค่าความต้านทานดินของแปลงแท่งหลักสายดิน

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \cdot L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right]$$

เมื่อ

- $L_T$  คือ ความยาวของตัวนำทั้งหมดที่ถูกฝังในดิน [m]
- $2b$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักสายดิน [m]
- $n_R$  คือ จำนวนของแท่งหลักสายดินที่วางอยู่ในพื้นที่ A

## ค่าความต้านทานดินร่วมระหว่างกริดกับแปลงรากสายดิน

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln\left(\frac{2L_c}{L_r}\right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right]$$

- ค่าความต้านทานดินรวมของกริดและแปลงแท่งหลักสายดิน จะมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานดินของส่วนประกอบเพียงอันใดอันหนึ่ง แต่ยังคงสูงกว่าการรวมกันทางขนาน

## 2.4.4 สิ่งที่น่าสังเกตเกี่ยวกับค่าความต้านทานดินของอิเล็กโทรดปฐมภูมิ

- โดยทั่วไป ค่าความต้านทานดินของอิเล็กโทรดปฐมภูมิขึ้นอยู่กับ
  - สภาพต้านทานของดิน
  - ขนาดกับชนิดของการจัดวางแต่ละนำทั้งหมด ที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดการต่อลงดิน ในการจัดการที่ซับซ้อนมากกว่า
  - ลวดสายไฟที่วางไขว้กัน
  - แท่งหลักสายดินจำนวนมากภายในพื้นที่เดียวกัน
  - ค่าความต้านทานร่วมซึ่งกันและกันระหว่างแต่ละองค์ประกอบมีบทบาทสำคัญ

## 2.4.5 การปรับสภาพดินให้มีสภาพต้านทานดินต่ำลง

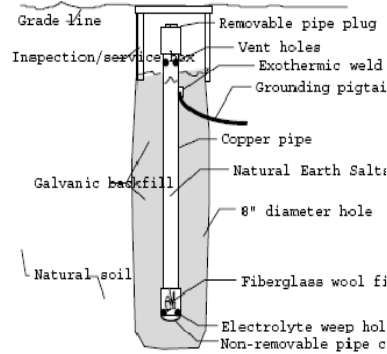
- การลดค่าความต้านทานในดินทำได้โดยการเพิ่ม
  - ตัวนำกริดจำนวนมาก
  - แท่งหลักสายดิน
  - การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรด
  - การปรับปรุงสิ่งแวดล้อมของดินรอบๆ อิเล็กโทรด เปลือกภายในของดินใกล้ซัดที่ติดกับอิเล็กโทรด

## การปรับปรุงสิ่งแวดล้อมของดินรอบๆ อิเล็กโทรด เปลือกภายในของดินใกล้ซัดที่ติดกับอิเล็กโทรด



- การใช้โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride) ธาตุโลหะเบาสีเงินที่รู้จักกันในนามของแมกนีเซียม (magnesium) และซัลเฟตทองแดง (copper sulfates) หรือแคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) เพื่อให้คุณสมบัติหรืออำนาจในการนำกระแสของดินรอบๆ อิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด

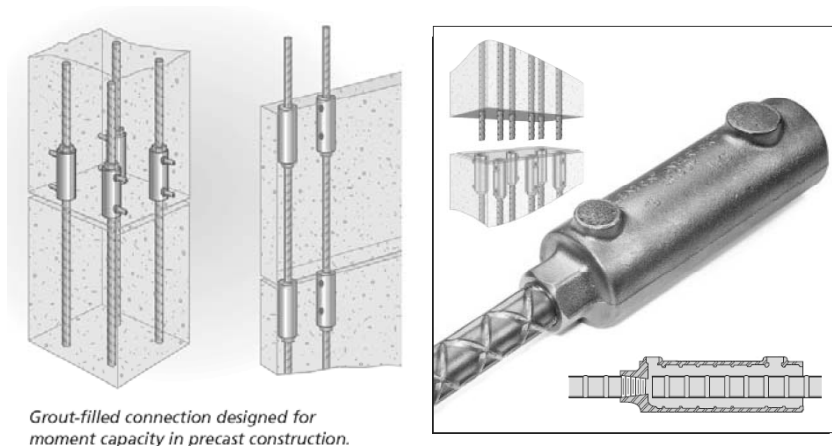
- การใช้ดินชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นรูปพูน เกิดจากเถ้าภูเขาไฟ ซึ่งมีลักษณะในการดูดซับน้ำได้ดีที่เรียกว่า เบน โตไนต์ (bentonite) ไม่ทำให้เกิดการสึกกร่อน มีเสถียรภาพ และมีสภาพต้านทานอยู่ที่  $2.5 \Omega\text{-m}$  ที่ความชื้น 300% สภาพต้านทานต่ำ



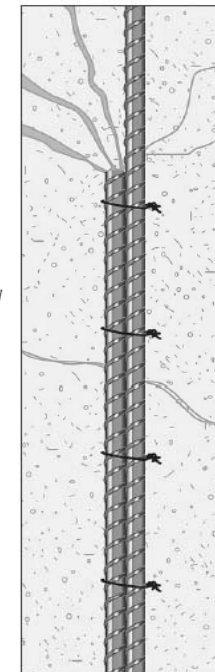
## การปรับปรุงสิ่งแวดล้อมของดินรอบๆ อิเล็กโทรด เปลือก ภายในของดินใกล้ขั้วที่ติดกับอิเล็กโทรด (ต่อ)

- อิเล็กโทรดแบบเคมีประกอบด้วยท่อทองแดงเติมด้วยเกลือ รูในท่อยอมให้ความชื้นและสารละลายเกลือเข้าไปได้ และยอมให้สารละลายเกลือเข้าไปในดินได้ อิเล็กโทรดเหล่านี้ถูกติดตั้งในหลุม และโดยทั่วไป จะมีการเติมด้วยตัวปรับสภาพดินภายหลัง
- วัสดุที่ช่วยเสริมสภาพดิน บางชนิดมีสภาพต้านทานน้อยกว่า (ราว 5% ของสภาพต้านทานของ bentonite) ที่ถูกแทนที่ ซึ่งโดยทั่วไป จะอยู่โดยรอบหลุมหลักสายดินหรือรอบๆ ตัวนำการต่อลงดินในคู ซึ่งอยู่ในลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งก็คือ อย่างแห้งหรือถูกผสมมาก่อน ในรูปของโคลน วัสดุที่ช่วยเสริมสภาพดินบางชนิดเป็นแบบถาวร และจะไม่มีสารเคมีชนิดใดๆ เข้าไปในพื้น วัสดุที่ช่วยเสริมสภาพดินที่เหมาะสมชนิดอื่นๆ ถูกผสมกันเข้ากับดินจำนวนหนึ่ง และจะค่อยๆ เข้าสู่ดินโดยรอบอย่างช้าๆ เพื่อให้สภาพต้านทานดินต่ำลง

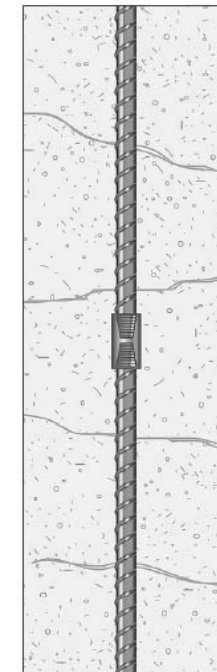
## 2.4.6 อิเล็กโทรดที่ถูกหุ้มอยู่ในคอนกรีต



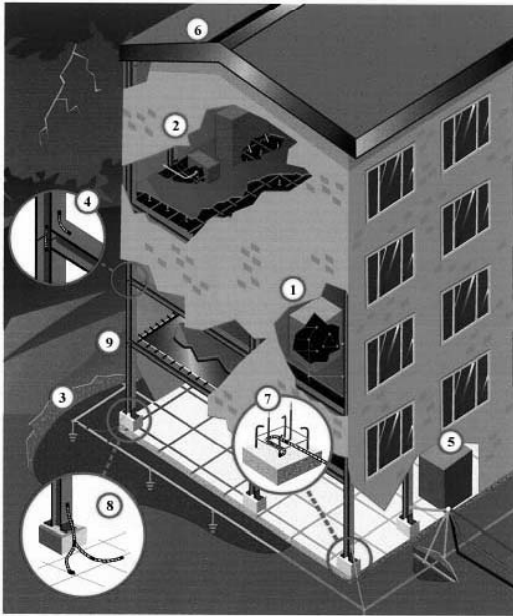
Lap splices depend on concrete for strength, and therefore lack structural integrity and continuity in concrete construction.



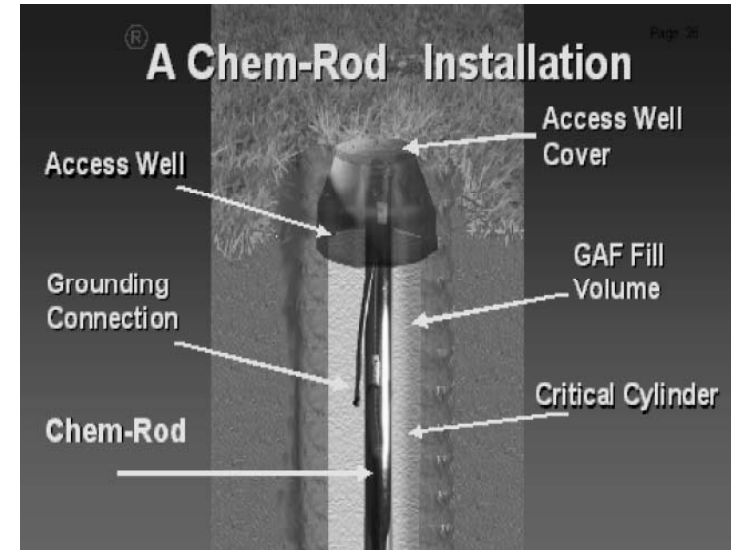
Mechanical splicing provides the assurance of maintaining load path continuity of the structural reinforcement, independent of the condition or existence of the concrete.



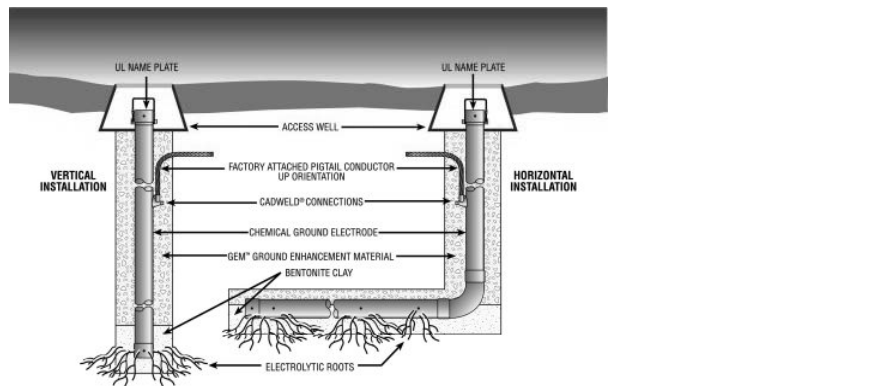
## Grounding Diagram



1. Zones of equipment with localized transformers to isolate the equipment and control leakage current.
2. Reference grids in all computer, data processing and information technology rooms.
3. Perimeter ground ring bonded to the service entrance.
4. Intentional continuity of structural steel.
5. Bonding of all communication cables to structural steel.
6. Architectural steel treatment for lightning protection.
7. Ufer ground treatment per NEC for all main vertical steel footers.
8. Grounding grid below moisture barrier.
9. Bonding horizontal steel pans to structural steel.



## Chemical Ground Electrode System



## อิเล็กโทรดที่ถูกหุ้มอยู่ในคอนกรีต

- คอนกรีตเป็นตัวที่ดึงดูดความชื้น การถูกฝังในดิน คอนกรีตบดอัดอยู่ในรูปตัวกลางที่มีลักษณะเป็นกิ่งตัวนำ มีสภาพต้านทานอยู่ที่ราว 30-90 Ω-m และเนื่องจากมีลวดโลหะหุ้มอยู่ในคอนกรีต มีค่าความต้านทานต่ำกว่าอิเล็กโทรดซึ่งคล้ายกันแต่ฝังในดินโดยตรง
- อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้อาจจะมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังเหตุผลมีดังต่อไปนี้คือ



## อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกหุ้มอยู่ในคอนกรีต

- มันไม่เป็นที่นิยมในการสร้างฐานรากสำหรับโครงสร้าง ที่มีเหล็กภายใน(บาร์เสริมแรง) ไม่ได้มีความต่อเนื่องทางไฟฟ้า
- มีกระแสไฟ dc ขนาดเล็ก ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนวัสดุ
- เกิดความดันที่กระแสสูงๆ ซึ่งความชื้นจะกลายเป็นไอในคอนกรีต
- ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย อิเล็กโทรดที่ถูกหุ้มด้วยคอนกรีต อาจจะถูกใช้เป็นกราวด์อิเล็กทรอนิกส์ช่วย

## พิกัดกระแสการไหลที่ช่วงระยะเวลาสั้น $I_{CE}$ ของอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกหุ้มอยู่ในคอนกรีต

$$I_{CE} = 1.4(I_{\infty}) = \frac{1.4}{R_z} \sqrt{2\lambda_g \rho (T_v - T_a)}$$

เมื่อ

- $\lambda_g$  คือ สภาพการนำทางความร้อนของดิน [W/(m °C)]
- $R_z$  คือ ค่าความต้านทานดินของอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกหุ้มด้วยคอนกรีต [ $\Omega$ ]
- $\rho$  คือ สภาพต้านทานของดิน [ $\Omega.m$ ]
- $T_u$  คือ อุณหภูมิโดยรอบ [ $^{\circ}C$ ]
- $T_v$  คือ อุณหภูมิที่สามารถยอมได้สูงสุด เพื่อป้องกันการกลายเป็นไอ เพื่อป้องกันการกลายเป็นไอของความชื้นอย่างทันทีทันใด [ $^{\circ}C$ ]
- $I_{\infty}$  คือ กระแสที่สามารถคงอยู่ได้ตามที่กำหนด [A]

## การพิสูจน์ โดย Bogajewski และ Mukhedkar

- โดยทั่วไป ถ้าความเสียหายถูกป้องกัน กระแสจริงๆ ควรจะน้อยกว่าค่า  $I_{CE}$  โดยย่านความปลอดภัยควรเป็น 20-25% สำหรับการใช้งานจริง

Fagan และ Lee เสนอสมการสำหรับการหาค่าความต้านทานดิน

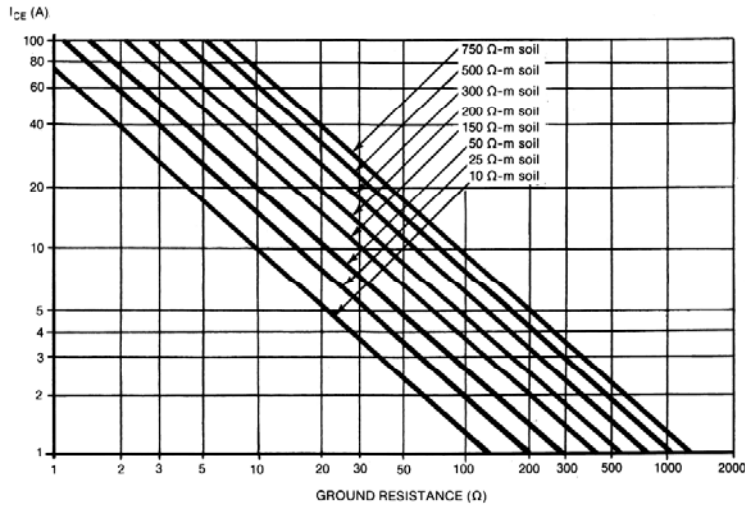
$R_{CE-rod}$  ของแท่งหลักสายดินแนวตั้งที่ถูกหุ้มอยู่ในคอนกรีตคือ

## ค่าความต้านทานดินของแท่งหลักสายดินแนวตั้งที่ถูกหุ้มอยู่ในคอนกรีต

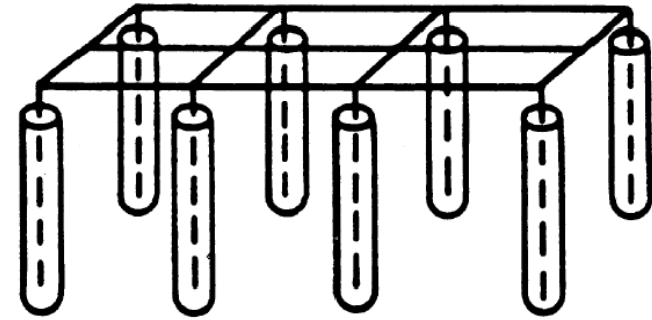
$$R_{CE-rod} = \frac{1}{2\pi L_r} (\rho_c [\ln(D_C/d)] + \rho [\ln(8L_r/D_C) - 1])$$

- $\rho_c$  คือ สภาพต้านทานของคอนกรีต [ $\Omega.m$ ]
- $L_r$  คือ ความยาวของแท่งหลักสายดิน [ $\Omega$ ]
- $\rho$  คือ สภาพต้านทานของดิน [ $\Omega.m$ ]
- $D_C$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือกคอนกรีต [m]

## พิกัดขีดความสามารถกระแสการไหลลดช่วงเวลาสั้นของ อิเล็กโทรดที่ถูกหุ้มด้วยคอนกรีต



## กริดกับอิเล็กโทรดที่ถูกหุ้มในแนวตั้ง



สำหรับแท่งหลักสายดินยาว  $L_r$  และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$   
ดังต่อไปนี้คือ

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi L_r} [\ln(8L_r/d) - 1]$$

เมื่อนำไปแทนในสมการ

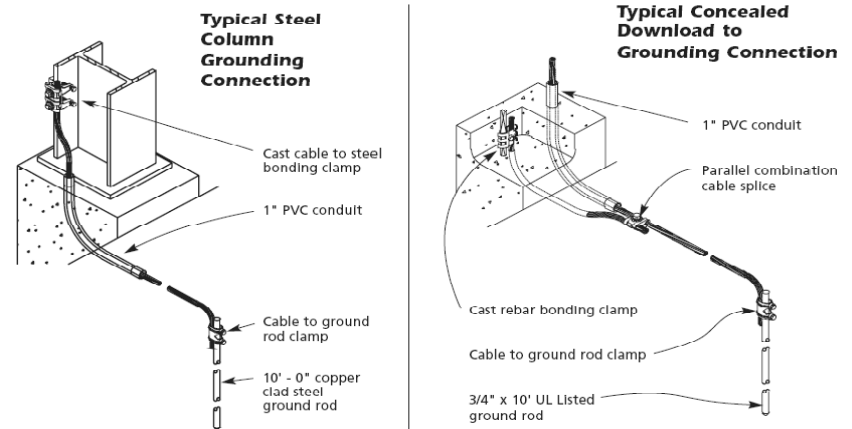
$$R_{CE-rod} = \frac{1}{2\pi L_r} (\rho_c [\ln(D_C/d)] + \rho [\ln(8L_r/D_C) - 1])$$

สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$R_{CE-rod} = \frac{1}{2\pi L_r} \{ \rho [\ln(8L_r/D_C) - 1] + \rho_c [\ln(8L_r/d) - 1] - \rho_c [\ln(8L_r/D_C) - 1] \}$$

## ข้อแนะนำที่ควรพิจารณา เมื่อมีการใช้ อิเล็กโทรดที่ถูกหุ้มด้วยคอนกรีต มีดังต่อไปนี้คือ

- เชื่อมต่อสมอใส่สลัก และการเข้ามุมที่เหล็กเสริมแรงสำหรับโลหะกับโลหะให้ติดกันอย่างมั่นคง



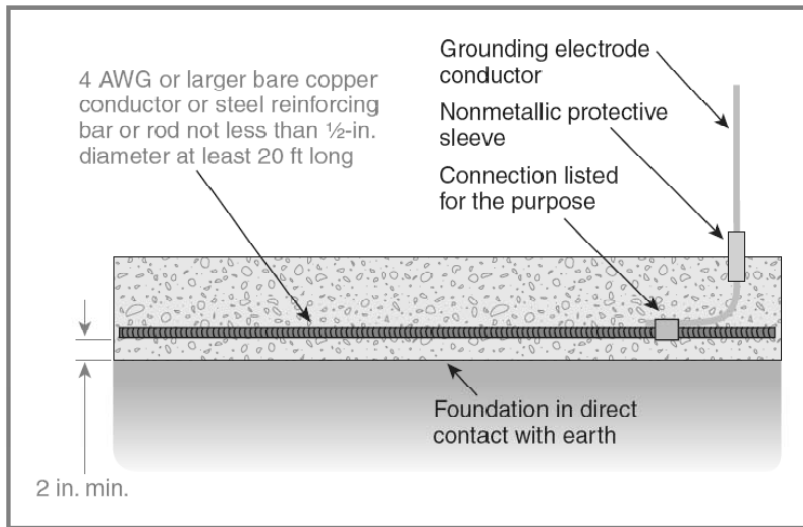
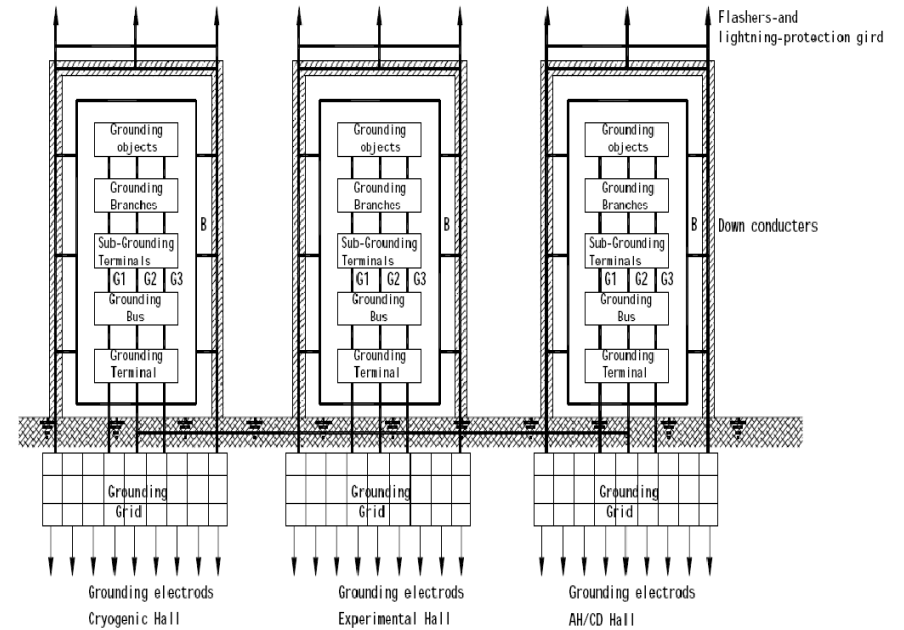


Exhibit 250.22 A concrete-encased electrode.



## Grounding Systems

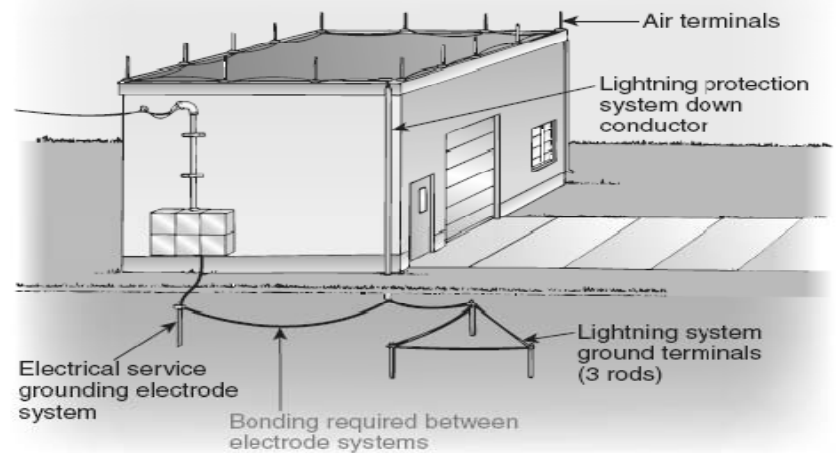
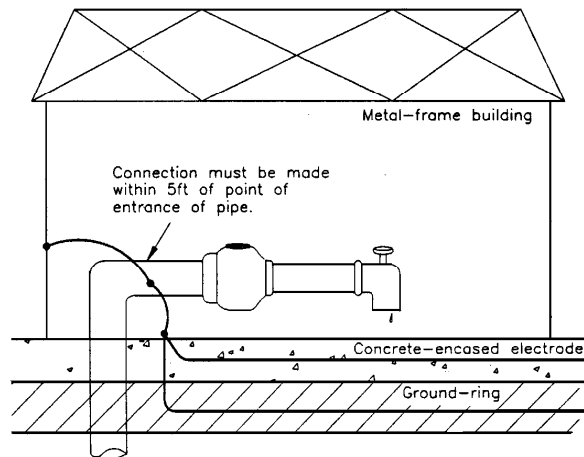


Exhibit 250.44 Bonding between the lightning system ground terminals and the electrical service grounding electrode system, in accordance with 250.106.

## กระแสทำงาน และ ระดับกระแสรั่วไหล dc

- โดยทำให้แน่ใจว่าอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์มีเพียงพอ (กริดการต่อลงดินและแท่งหลักสายดิน) จะชักนำกระแสฟอลต์ส่วนมากได้

## วัตถุเสริมในดินให้มีสภาพต้านทานดินดีขึ้น

- อาจจะถูกนำมาใช้ในพื้นที่ที่ดินมีสภาพต้านทานสูง เพื่อที่จะลดสภาพต้านทานดินของอิเล็กทรอนิกส์ การเจาะหลุมขนาด 100–250 mm (4–10 in) และกลบมันด้วยกับวัตถุเสริมในดินให้มีสภาพต้านทานดินดีขึ้นรอบๆ แท่งหลักสายดินเป็นวิธีที่จะช่วยป้องกันความมีอำนาจหรืออิทธิพลเหนือของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ช่วย ในการกระจายกระแสฟอลต์

## จบการบรรยาย

## บทที่ 2