



บทที่ 2

ภูมิหลังของทฤษฎีในงานวิจัย

2.1 บทบาทเกี่ยวกับงานวิจัย

การออกแบบผิวจราจรแบบยึดหยุ่นของสนามบินมีด้วยกันหลายวิธีแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียของตัวเอง ในเวลาที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงให้เหมาะสมกับสภาพความเป็นจริงมากขึ้น วิธีการออกแบบต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

1. วิธี CBR ของ Corps of Engineers เป็นวิธีการออกแบบที่ใช้ผลการทดลอง และรวบรวมข้อมูลจริงควบคู่กันไป (Empirical Method) วิธีการออกแบบถือเอาการทดลองหา CBR ของชั้นดินเดิมเป็นหลัก ทำให้สามารถออกแบบได้ง่ายแต่มีข้อเสียคือต้องการทำการวิจัยอีกมาก ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนและการจัดเรียงตัวของกลุ่มล้อยหลัก เนื่องจากการออกแบบเป็น empirical

2. วิธี FAA (Federal Aviation Administration Method) วิธีนี้อาศัยการจำแนกดินออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามดัชนีกำลังรับน้ำหนักของดิน จึงคล้ายกับวิธี CBR เพียงแต่นำผลจากน้ำหนักจราจรกระทำซ้ำและสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้องมาพิจารณา

3. วิธีการออกแบบโดยการวิเคราะห์โครงสร้างผิวจราจรเช่นวิธีของ The Asphalt Institute, The Shell Method และ Navy Method เป็นต้น แต่ละวิธีสามารถออกแบบชั้นทางวิ่งได้หลายชั้น ข้อเสียของวิธีนี้คือ การคำนวณค่อนข้างยุ่งยาก

การวิจัยครั้งนี้ได้ปรับปรุงการออกแบบ โดยถือเอาวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางหลายชั้น ตามวิธีการในหัวข้อ 3 เป็นหลัก โดยพิจารณาถึง

1. คุณสมบัติของวัสดุชั้นทาง
2. สภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง
3. ผลรวมความเสียหายเนื่องจากน้ำหนักจราจรกระทำซ้ำ (Distress)

เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางหลายชั้น ทำให้การคำนวณค่อนข้างซ้ำและยุ่งยากมาก จึงได้มีการพัฒนาโปรแกรมในการออกแบบเช่น โปรแกรม DAMA ของ The Asphalt Institute (1983) สำหรับออกแบบความหนาถนน โดยปรับปรุงมาจาก THE CHEVRON N-LAYER PROGRAM ซึ่งใช้วิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางสำหรับการออกแบบสนามบิน ได้มีโปรแกรม

ออกแบบความหนาชั้นทางตามคู่มือ MS-11 ของ The Asphalt Institute ซึ่งออกแบบชั้นทาง
ได้เพียง 2 ชั้น ในการวิจัยครั้งนี้ได้ปรับปรุงโปรแกรมดังกล่าวให้ออกแบบความหนาชั้นทางวิ่ง
สนามบินให้ออกแบบได้ 3 ชั้นประกอบด้วยชั้น A.C. (ชั้นผิวจราจรแอสฟัลท์คอนกรีต) ชั้นพื้นทาง
และชั้นดินเดิม

2.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบ

ข้อพิจารณาในการออกแบบผิวจราจรสนามบินออกเป็น 2 ข้อตามลักษณะความเสียหาย
ดังนี้

2.2.1 การเกิดรอยแตกในชั้นแอสฟัลท์คอนกรีต

การออกแบบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตกจากความล้า (Fatigue Cracking) ในชั้น
A.C. เนื่องจากการกระทำซ้ำซากของน้ำหนักจราจรมีความสัมพันธ์กับค่า Maximum Principal
Tensile Strain (ϵ_t) ที่ขอบล่างของชั้น A.C. ความล้า (Fatigue) เป็นปรากฏการณ์ที่
วัสดุภายใต้น้ำหนักกระทำซ้ำเกิดการวิบัติ เมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าความเค้นคลาก
การวิบัติจะเริ่มจากรอยแตกเล็ก ๆ ของชั้น A.C. แล้วค่อย ๆ ขยายใหญ่ขึ้น ซึ่งโอกาสที่จะเกิด
มากเมื่ออุณหภูมิค่า ชั้น A.C จะแข็งและค่าอีลาสติกโมดูลัสสูง ทำให้เกิด ϵ_t มีค่ามาก

Kingham (1972) ได้ศึกษาค่าตามสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_t และจำนวนการเกิดความ
เครียดขนาด ϵ_t จำนวนวิบัติ (N_f) โดยการนำผลการทดสอบผิวจราจร AASHO ROAD TEST
มาวิเคราะห์ได้ตามสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_t และ N_f ที่อุณหภูมิ T ใด ๆ เป็น

$$N_f = ab^{d_1} (1/\epsilon_t)^c \dots\dots\dots (2.1)$$

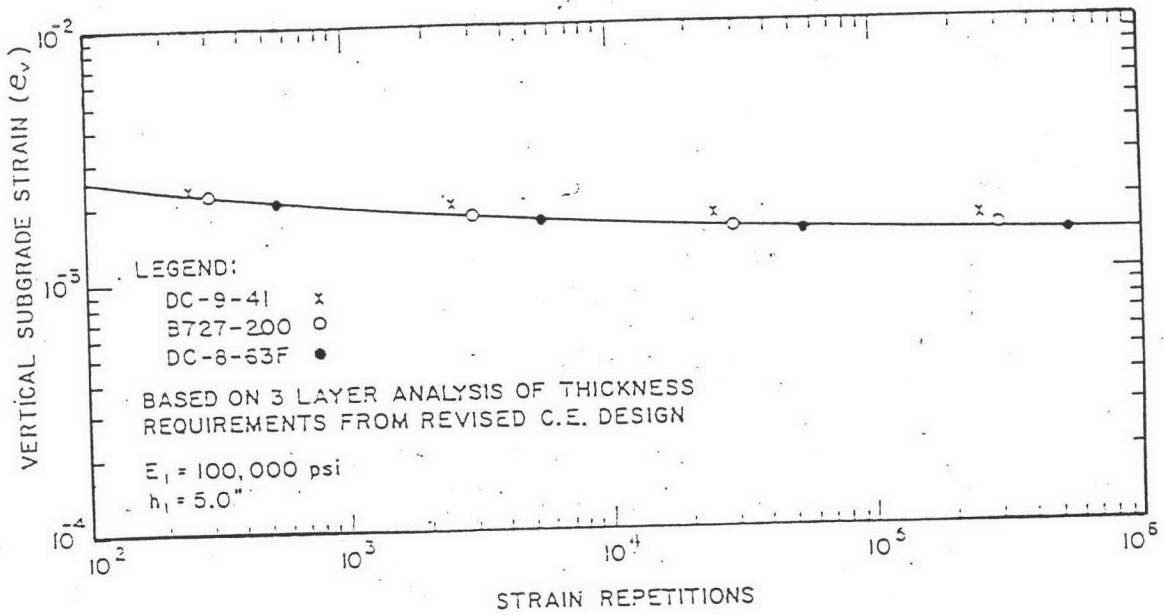
- โดยที่
- a = 1.86351×10^{-17}
 - b = 1.01996
 - c = 4.995
 - d1 = 1.45
 - q = อุณหภูมิของชั้น A.C.
 - ϵ_t = Principal Tensile Strain
 - N_f = จำนวนครั้งที่เกิดความเครียดขนาด ϵ_t จำนวนวิบัติ

2.2.2 การเกิดร่องล้อบนชั้นดินเดิม

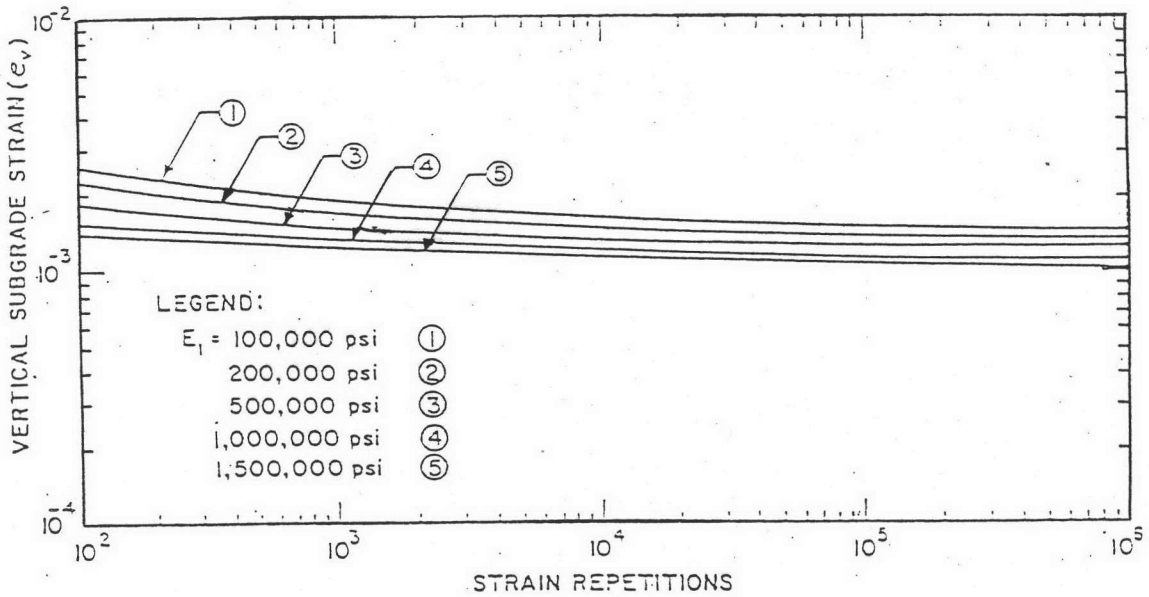
การวิจัยนี้เนื่องจากการเกิดร่องล้อถาวร (Rutting) บนชั้นดินเดิมนั้นได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวตั้ง (e_v) บนชั้นดินเดิมและจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำ (Strain Repetition) ขนาด e_v จนวิบัติ (N_f) Witczak (1972) ได้ดัดแปลงการวิเคราะห์ผลการทดสอบผิวจราจรของ U.S.A.C.E. สำหรับเครื่องบดหลายล้อและน้ำหนักเพลามาก โดยใช้โปรแกรม The Shell BISTRO หาความเค้นและความเครียดของผิวจราจร ตามทฤษฎีอีลาสติคของวัสดุหลายชั้น (Multilayer Elastic Theory) เนื่องจากน้ำหนักของเครื่องบด โดยการวิเคราะห์แบบเดิมของ U.S.A.C.E. นั้น วิเคราะห์โดยใช้วิธีของ BOUSSINESQ หลังจากวิเคราะห์แล้วจึงนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง e_v กับ N_f จากการวิเคราะห์นั้นได้ผลสรุปว่าผลจากเครื่องบดต่างชนิดและค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นดินเดิม (E_s) แทบไม่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่าง e_v-N_f ดังแสดงในรูปที่ 2.1 รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ e_v-N_f สำหรับค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้น A.C. (E_1) ต่าง ๆ จากระบบชั้นทาง 3 ชั้นในการออกแบบจะเลือกใช้ความสัมพันธ์ e_v-N_f ที่ $E_1 = 100,000$ psi เรียกว่า Limiting Subgrade Strain Criteria ซึ่งเป็นกรณีที่อุณหภูมิต่ำของชั้น A.C. สูงทำให้อ่อนตัว จึงมีโอกาที่จะเกิดร่องล้อถาวร (Rutting) บนชั้นดินเดิมสูง โดยแสดงค่าความสัมพันธ์ e_v-N_f ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง e_v และ N_f

N_f	$e_v \times 10^{-6}$ (in/in)
100	2548
1,000	1904
10,000	1646
100,000	1508
1,00,000	1422



รูปที่ 2.1 ผลของเครื่องบินชนิดต่าง ๆ ต่อการเกิดค่าความเครียดซ้ำในแนวตั้ง



รูปที่ 2.2 ผลของแอสฟัลต์คอนกรีตโมดูลัสต่อค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดอัดในแนวตั้ง (e_v) กับจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำจนวนวัต

2.3 ทฤษฎีอีลาสติกละเยอร์ (ELASTIC LAYERED THEORY)

การออกแบบตามข้อพิจารณาในหัวข้อ 2.2.1 และ 2.2.2 ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้ ต้องการผลตอบสนองของผิวจราจร เนื่องจากน้ำหนักของเครื่องบดในรูปความเครียด โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติกละเยอร์สำหรับผิวจราจรหลายชั้นซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกัน

Burmister ได้เสนอการวิเคราะห์ทฤษฎีนี้เป็นคนแรกในปี 1943 และต่อมาในปี 1945 ได้ปรับปรุงทฤษฎีให้ใช้กับผิวจราจรสองและสามชั้น Jones (1962) เสนอตารางความเค้นสำหรับระบบทางสามชั้นโดยใช้พารามิเตอร์เป็นอัตราส่วนของโมดูลัสของความยืดหยุ่นและอัตราส่วนความหนาของชั้นทางแต่ละชั้น การวิเคราะห์ข้างต้นน้ำหนักที่กระทำบนผิวจราจรเป็นแบบยืดหยุ่น (Flexible load) กระจายสม่ำเสมอเป็นรูปร่างกลมมีทิศทางในแนวตั้ง Schiffman (1977) เสนอการวิเคราะห์สำหรับระบบสามชั้นในรูปแบบทั่วไปใช้ได้กับน้ำหนักกระทำแบบยืดหยุ่น และแบบแข็ง (Rigid Load) ทิศทางอยู่ในแนวราบหรือแนวตั้ง (Normal and tangential surface load)

ในการวิเคราะห์ถือน้ำหนักกระทำของล้อเป็นรูปร่างกลม และน้ำหนักกระทำเป็นแบบยืดหยุ่นสมมาตรรอบแกนตั้ง (Axis-symmetric flexible load) ดังนั้นจึงใช้ระบบพิกัดทรงกระบอกโดยพิกัดมุม (Θ) และรัศมี (R) อยู่ในแนวราบ และพิกัดความลึก (Z) อยู่ในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณามวลถึงไม่สิ้นสุด (Semi-infinite mass) เมื่อ $Z > 0$ มวลถูกแบ่งออกเป็น n ชั้น มีคุณสมบัติทางอีลาสติคแตกต่างกัน แต่ละชั้นอยู่ในแนวราบแผ่ออกไปไม่สิ้นสุดสำหรับชั้น L_k ใด ๆ ที่ $k = 1, 2, 3, \dots, n-1, n$ โดยที่

$$\text{ที่ผิวบนสุด } Z = h_0 = 0$$

ชั้น L_k ใด ๆ จะพิจารณาทุกจุดที่

$$h_{k-1} < Z < h_k$$

ชั้น L_n จะพิจารณาทุกจุดที่

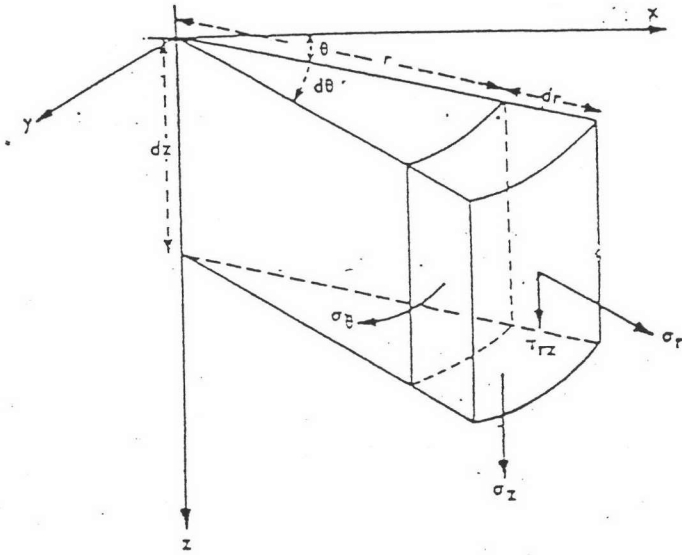
$$Z > h_{n-1}$$

ที่ระนาบ $Z = h_k$ เรียกว่าชั้น k -interface

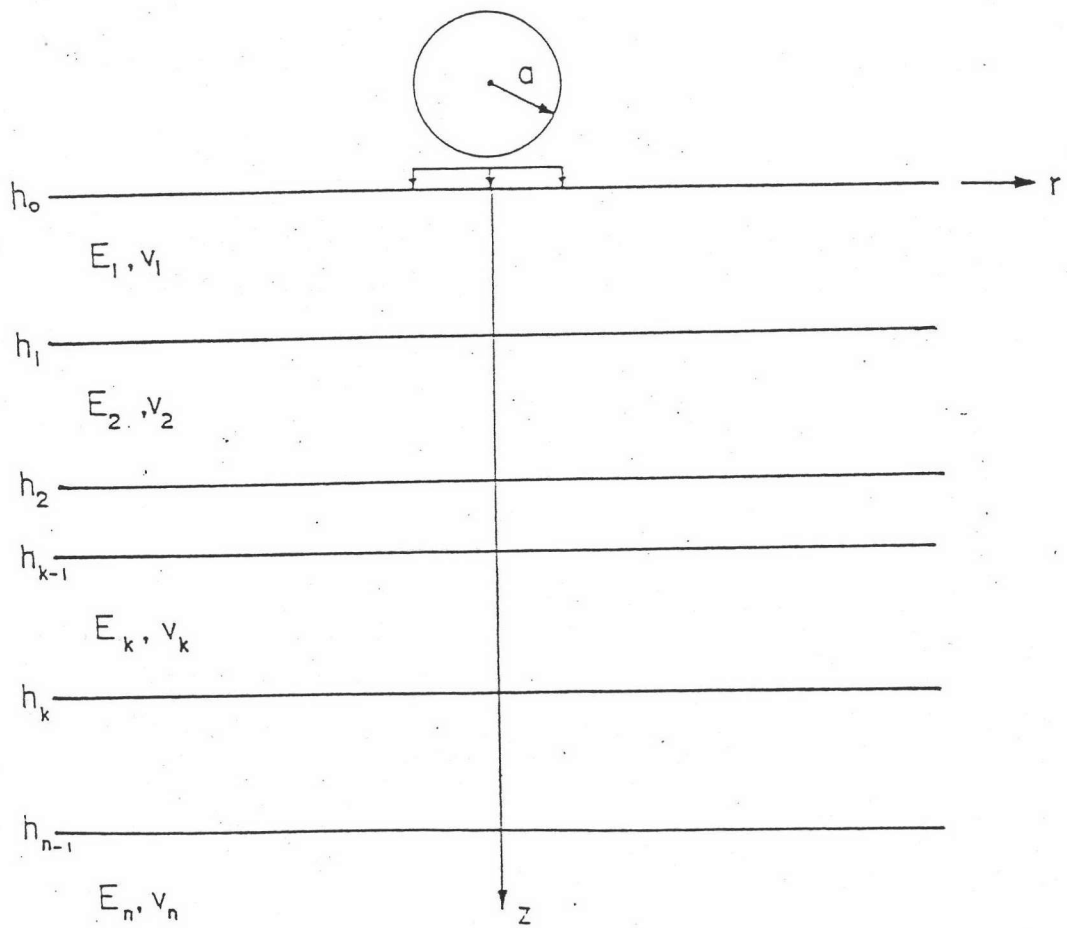
2.3.1 สมมติฐานในการวิเคราะห์

1. วัสดุที่ชั้นใด ๆ เป็นของแข็ง (Solid) มีคุณสมบัติเป็นลิเนียร์อีลาสติค มีเนื้อเดียวกันคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Homogeneous and Isotropic) ดังนั้นอีลาสติคโมดูลัสมีค่าเหมือนกันทั้งแรงดึงและแรงอัด วัสดุที่วิเคราะห์ถือน้ำหนัก (Weightless)

2. เงื่อนไขค่าขอบเขต (Boundary Condition) บนผิวชั้นบนสุดความเค้นเฉือนเท่ากับศูนย์ ความเค้นในแนวตั้ง (Normal Stress) มีค่าเท่ากับความดันที่กระทำที่ผิว



รูปที่ 2.3 a ความเค้นในระบบพิกัดทรงกระบอก



รูปที่ 2.3 b ระบบชั้นของชั้นทาง

3. เงื่อนไขความต่อเนื่อง (Continuity Condition) ความเค้นเฉือน ความเค้นในแนวตั้ง การเคลื่อนที่แนวตั้งและแนวราบของชั้น Interface ต้องเท่ากัน สมมติเกิดแรงเสียดทานระหว่างชั้นเต็มที่ (Full Friction)

2.3.2 สมการอนุพันธ์ย่อยของความเค้นและการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของความเค้นในทิศทางต่างมี

σ_z = ความเค้นในแนวตั้ง (Vertical stress)

σ_r = ความเค้นในแนวรัศมี (Radial Stress)

σ_θ = ความเค้นในแนวตั้งฉากกับแนวรัศมี
(Tangential Stress)

τ_{rz} = ความเค้นเฉือน (Shear stress)
บนระนาบ R ทิศทาง Z

เนื่องจากเหตุผลที่น้ำหนักกระทำสมมาตรรอบแกน Z (Axi-symmetric) ความเค้นในระบบจึงเป็นอิสระจากค่าพิสัย θ ดังนั้น

ระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) ประกอบด้วย

U = ระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี

V = ระยะเคลื่อนที่ในแนวมุม

W = ระยะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

สมการสมดุลย์ (Equilibrium Equation)

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad \dots\dots(2.2 a)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad \dots\dots(2.2 b)$$

สมการเปรียบเทียบ (Compatibility Equation)

$$\nabla^2 \sigma_r - \frac{2}{r^2} (\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} = 0 \quad \dots\dots(2.3 a)$$

$$\nabla^2 \sigma_\theta + \frac{2}{r^2} (\sigma_r - \sigma_\theta) + \frac{1}{1+\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} = 0 \quad \dots\dots(2.3 b)$$

โดยที่ $\nabla^2 =$ Laplacian Operator

$\nu =$ บัวของเรโซ

เมื่อนำเอาสมการความเค้นและการเคลื่อนที่มาเขียนอยู่ในรูป ϕ_k (Stress Function) ของผิวจราจรชั้น k โดยความเค้นและความเครียดต้องสอดคล้องทั้งสมการสมดุลและสมการเปรียบเทียบ.

ความเค้นในผิวจราจรชั้น k จะเป็น

$$\sigma_r^k = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \nabla^2 \phi_k - \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial r^2} \right\} \quad \dots (2.4 a)$$

$$\sigma_\theta^k = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \nabla^2 \phi_k - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_k}{\partial r} \right\} \quad \dots (2.4 b)$$

$$\sigma_z^k = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (2-\nu) \nabla^2 \phi_k - \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial z^2} \right\} \quad \dots (2.4 c)$$

$$\tau_{rz}^k = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ (1-\nu) \nabla^2 \phi_k - \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial z^2} \right\} \quad \dots (2.4 d)$$

สมการเคลื่อนที่ในชั้น k

$$u^k = -\frac{1+\nu}{E} \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial r \partial z} \quad \dots (2.5 a)$$

$$w^k = \frac{1+\nu}{E} \left\{ 2(1-\nu) \nabla^2 \phi_k - \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial z^2} \right\} \quad \dots (2.5 b)$$

$$v^k = \frac{1+\nu}{E} \left[-\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial \theta \partial z} \right] \quad \dots (2.5 c)$$

และคำตอบเดียวของ ϕ_k สำหรับสมการสมดุลและเปรียบเทียบคือ

$$\nabla^4 \phi_k = 0 \quad \dots (2.6)$$

2.3.3 ค่าตอบสำหรับ ϕ_k (Stress Function)

การหาค่าตอบสำหรับ ϕ_k หาได้โดยใช้ Hankel Transform ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$F(m) = \int_0^{\infty} x f(x) J_0(mx) dx \quad \dots\dots(2.7)$$

Sneddon (1951) ได้แสดงรายละเอียดสำหรับการใช้ Hankel Transform ในปัญหาอีลาสติกสามมิติ เมื่อกำหนดค่าให้ p เป็นพารามิเตอร์และ $J_n(pr)$ เป็น Bessel Function อันดับที่ n

$$J_n(pr) = \frac{(-1)^v (pr/2)^{n+2v}}{v! (v+n+1)} \quad \dots\dots(2.8)$$

ถ้า $G(p, z)$ เป็น Hankel Transform อันดับที่สองของ ϕ_k จากสมการ

$$G_k(p, z) = \int_0^{\infty} r \phi_k J_0(pr) dr \quad \dots\dots(2.9)$$

พิจารณา Hanleel Ttransform อันดับที่สองของ $\frac{d^2 \phi_k}{d r^2}$ คือ

$$\int_0^{\infty} r \frac{d^2 \phi_k}{d r^2} J_0(pr) dr$$

โดยวิธีอินทิเกรตแยกส่วน (by part)

$$\int_0^{\infty} r \frac{d^2 \phi_k}{d r^2} J_0(pr) dr = (r \frac{d \phi_k}{d r} J_0(pr)) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} \frac{d \phi_k}{d r} d(r J_0(pr)) dr$$

ถ้าหากค่า $\frac{r d \phi_k}{d r}$ เท่ากับศูนย์เมื่อ $r = 0$ และ ∞ จะได้

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} r \left(\frac{d^2 \phi_k}{d r^2} + \frac{1}{r} \frac{d \phi_k}{d r} \right) J_0(pr) dr &= -p \int_0^{\infty} r \frac{d \phi_k}{d r} \frac{d J_0(pr)}{d(pr)} dr \\ &= -p \left[\frac{r \phi_k \frac{d J_0(pr)}{d(pr)}}{d(pr)} - \int_0^{\infty} \phi_k \frac{d(r d J_0(pr))}{d(pr)} \right] \end{aligned}$$

ถ้าหากค่า $r \phi_k$ เท่ากับศูนย์เมื่อ $r = 0$ และ ∞

$$\int_0^{\infty} r \left(\frac{d^2 \phi_k}{d r^2} - \frac{1}{r} \frac{d \phi_k}{d r} \right) J_0(pr) dr = -p^2 \int_0^{\infty} r \phi_k J_0(pr) dr$$

บวก $\int_0^{\infty} r \frac{d^2 \phi_k}{d z^2} J_0(pr) dr$ ทั้งสองข้างจะได้

$$\int_0^{\infty} r \left(\frac{d^2 \phi_k}{d r^2} + \frac{1}{r} \frac{d \phi_k}{d r} + \frac{d^2 \phi_k}{d z^2} \right) J_0(pr) dr = \int_0^{\infty} r \left(\frac{d^2}{d z^2} - p^2 \right) \phi_k J_0(pr) dr$$

หรือ

$$\int_0^{\infty} r^2 \phi_k J_0(pr) dr = \int_0^{\infty} r \left(\frac{d^2}{d z^2} - p^2 \right) \phi_k J_0(pr) dr \quad \dots\dots(2.10)$$

เช่นเดียวกับ

$$\int_0^\infty r \nabla^4 \phi_k J_0(pr) dr = \int_0^\infty r \frac{(d^2}{dz^2} - p^2)^2 \phi_k J_0(pr) dr \dots (2.11)$$

จากสมการที่ 2.6 $\nabla^4 \phi_k = 0$

เพราะฉะนั้น

$$\int_0^\infty r \frac{(d^2}{dz^2} - p^2)^2 \phi_k J_0(pr) dr = 0$$

ใช้ส่วนกลับของ Hankel transform

$$\phi_k = \int_0^\infty p \{ (A_k + B_k) e^{pz} + (C_k + D_k) e^{-pz} \} J_0(pr) dp \dots (2.12)$$

โดยการแทนค่า ϕ_k ในสมการที่ 2.4 ถึง 2.5 จะได้ค่าความเค้นและการเคลื่อนที่สำหรับชั้น L_k คือ

$$\sigma_z^k = \int_0^\infty p \{ p^2 J_0(pr) [(1+v_k)(B_k e^{pz} + D_k e^{-pz}) - p((A_k + B_k z) e^{pz} - (C_k + D_k z) e^{-pz})] \} dp \dots (2.13 a)$$

$$\sigma_r^k = \int_0^\infty p \{ p^2 J_0(pr) [(1+2v_k)(B_k e^{pz} + D_k e^{-pz}) + p((A_k + B_k z) e^{pz} - (C_k + D_k z) e^{-pz})] - p^2 \{ J_1(pr)/pr \} [(B_k e^{pz} + D_k e^{-pz}) + p((A_k + B_k z) e^{pz} - (C_k + D_k z) e^{-pz})] \} dp \dots (2.13 b)$$

$$\sigma_\theta^k = \int_0^\infty p \{ 2v_k p^2 J_0(pr) (B_k e^{pz} + D_k e^{-pz}) + p \{ J_1(pr)/pr \} [B_k e^{pz} + D_k e^{-pz} + p((A_k + B_k z) e^{pz} - (C_k + D_k z) e^{-pz})] \} dp \dots (2.13 c)$$

$$\tau_{rz}^k = p \{ p^2 J_0(pr) [2v_k (B_k e^{pz} - D_k e^{-pz}) + p((A_k + B_k z) e^{pz} + (C_k + D_k z) e^{-pz})] \} dp \dots (2.13 d)$$

$$U^k = p \{ ((1+v_k)/E_k) p J_1(pr) [B_k e^{pz} + D_k e^{-pz} + p((A_k + B_k z) e^{pz} - (C_k + D_k z) e^{-pz})] \} dp \dots (2.13 e)$$

$$W^k = p \{ ((1+v_k)/E_k) p J_0(pr) [2(1-2v_k)(B_k e^{pz} - D_k e^{-pz}) - p((A_k + B_k z) e^{pz} + (C_k + D_k z) e^{-pz})] \} dp \dots (2.13 f)$$

2.3.4 ค่าตอบสำหรับค่า A_k, B_k, C_k และ D_k

ค่า A_k, B_k, C_k และ D_k ของชั้น L_k ใด ๆ หาได้จากเงื่อนไข
ต่อเนื่องระหว่างชั้น และการขอบเขต พิจารณาเมตริกซ์

$$S_k(z) = \begin{bmatrix} \sigma_z^k \\ \tau_{rz}^k \\ U^k \\ W^k \end{bmatrix} \dots\dots(2.14)$$

เงื่อนไขต่อเนื่องที่ชั้น L_k และ L_{k+1} แสดงออกมาเป็น

$$S_k(h_k) = S_{k+1}(h_k) \dots\dots(2.15)$$

จากสมการที่ 2.13a, 2.13d, 2.13e, 2.13f, 2.14 และ 2.15

$$K(v_k, E_k) M(h_k, v_k) D(h_k) \begin{bmatrix} A_k \\ B_k \\ C_k \\ D_k \end{bmatrix} = K(v_{k+1}, E_{k+1}) M(h_k, v_{k+1}) D(h_k) \begin{bmatrix} A_{k+1} \\ B_{k+1} \\ C_{k+1} \\ D_{k+1} \end{bmatrix} \dots\dots(2.16)$$

โดยที่

$$K(v, E) = \begin{bmatrix} -p^2 J_0(pr) & & & \\ & p^2 J_1(pr) & & \\ & & \{(1+v)/E\} p J_1(pr) & \\ & & & \{(1+v)/E\} p J_0(pr) \\ & & & & \dots\dots(2.17) \end{bmatrix}$$

$$M(z, v) = \begin{bmatrix} 1 & pz+2v-1 & -1 & -pz+2v-1 \\ 1 & pz+2v & 1 & pz-2v \\ 1 & pz+1 & -1 & -pz+1 \\ 1 & pz+4v-2 & 1 & pz-4v+2 \end{bmatrix} \dots\dots(2.18)$$

$$D(z) = \begin{bmatrix} pe^{pz} & & & \\ & e^{pz} & & \\ & & pe^{-pz} & \\ & & & e^{-pz} \end{bmatrix} \dots\dots(2.19)$$

ถ้าหากต้องการกระจาย A_k , B_k , C_k และ D_k เป็นฟังก์ชัน A_{k+1} , B_{k+1} , C_{k+1} และ D_{k+1} สามารถเขียนได้โดย

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \\ C_k \\ D_k \end{bmatrix} = D^{-1}(h_k)M^{-1}(h_k, v_k)K^{-1}(v_k, E_k)K(v_{k+1}, E_{k+1}) \\ = M(h_k, v_{k+1})D(h_k) \begin{bmatrix} A_{k+1} \\ B_{k+1} \\ C_{k+1} \\ D_{k+1} \end{bmatrix} \dots\dots (2.20)$$

ข้อสังเกต

$$K(v_k, E_k)K(v_{k+1}, E_{k+1}) = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & T_k & \\ & & & K_k \end{bmatrix} \dots\dots (2.21)$$

โดยที่ $T_k = (E_k/E_{k+1})(1+v_{k+1})/(1+v_k) \dots\dots (2.22)$

ให้ X_k เป็นเมตริกซ์ ซึ่งมีค่า

$$X_k = 4M^{-1}K^{-1}(h_k, v_k)K^{-1}(v_k, E_k)K(v_{k+1}, E_{k+1})M(h_k, v_{k+1}) \dots\dots (2.23)$$

$$X_k = \begin{bmatrix} X(k,1,1) & X(k,1,2) & X(k,1,3) & X(k,1,4) \\ X(k,2,1) & X(k,2,2) & X(k,2,3) & X(k,2,4) \\ X(k,3,1) & X(k,3,2) & X(k,3,3) & X(k,3,4) \\ X(k,4,1) & X(k,4,2) & X(k,4,3) & X(k,4,4) \end{bmatrix} \dots\dots (2.24)$$

$$X_k = \begin{bmatrix} 4(v_k-3)-T_k & -L(-h_k, v_k, v_{k+1}) & (2ph_k+4v_{k+1}) & L(h_k, v_k, v_{k+1}) \\ & +T_k q(-h_{k+1}, v_{k+1}, v_k) & (1-T_k) & -T_k P(-h_k, v_{k+1}, v_k) \\ \hline 0 & T(4v_{k+1}-3)-1 & 2(T_k-1) & (2ph_k-4v_{k+1}+1)(T_k-1) \\ \hline (2ph_k-4v_{k+1}) & -L(-h_k, v_k, v_{k+1}) & (4v_k-3)-T_k & q(h_k, v_k, v_{k+1}) \\ (T_k-1) & ; +T_k L(h_k, v_{k+1}, v_k) & & -T_k q(h_k, v_{k+1}, v_k) \\ \hline 2(1-T_k) & (2ph_k+4v_{k+1}-1)(1-T_k) & 0 & T(4v_{k+1}-3)-1 \end{bmatrix}$$

..... (2.25)

โดยที่

$$L(h, v, u) = p^2 (2h^2) + 4ph(v-u) + (1-8vu+2u) \dots (2.26)$$

และ

$$q(h, v, u) = 2ph(2v-1) - (1+8vu-6u) \dots (2.27)$$

ผลสุดท้ายสามารถเขียนสมการที่ 2.20 ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \\ C_k \\ D_k \end{bmatrix} = \frac{D^{-1}(h_k) X_k D(h_k)}{4(v_{k-1})} \begin{bmatrix} A_{k+1} \\ B_{k+1} \\ C_{k+1} \\ D_{k+1} \end{bmatrix} \dots (2.28)$$

สำหรับวัสดุแข็งความลึกกึ่งไม่สิ้นสุด (Semi-infinite Solid) ในชั้นสุดท้าย (ชั้น $k = n$) ค่าความเค้นและความเครียดเป็นศูนย์ที่ความลึกไม่สิ้นสุด (Infinity) นั่นคือ

$$A_n = B_n = 0 \dots (2.29)$$

โดยใช้สมการที่ 2.28 อีกครั้ง ให้คำตอบ A_k, B_k, C_k และ D_k เขียนสมการใหม่เป็น พังค์ชันของ C_n, D_n สำหรับค่า $k=1, 2, 3, \dots, n-1$ ซึ่งจะได้

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \\ C_k \\ D_k \end{bmatrix} = \begin{matrix} \nearrow n=1 \\ \downarrow j=k \end{matrix} \frac{D^{-1}(h_j) X_j D(h_j)}{4(v_{j-1})} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_n \\ D_n \end{bmatrix} \dots (2.30)$$

สำหรับจำนวนชั้น n ชั้น ค่า A_k, B_k, C_k และ D_k มี $4n$ ค่า สมการที่ 2.29 และ 2.30 จะมี $4n-2$ สมการ อีก 2 สมการ สำหรับแก้ปัญหาค่า $A_k, B_k, C_k,$ และ D_k ได้จากเงื่อนไขค่าขอบเขตในหัวข้อ 2.3.1 ได้ $(\tau_{rz})_{z=0} = 0$ สมการที่ 2.13 d จะเป็น

$$pA_1 + 2v_1 B_k + pC_1 - 2v_1 D_1 = 0 \quad \dots\dots (2.31)$$

และ $(\sigma_z)_{z=0} = 0$ ถ้า $r > a$
 $(\sigma_z)_{z=0} = -1$ ถ้า $0 < r < a$

เมื่อ a เป็นรัศมีของล้อ (รัศมีของน้ำหนักกระทำ) สมการที่ 2.13 a จะได้

$$\int_0^a p \{ p^2 J_0(pr) [-pA_1 + (1-2v_1)B_1 + pC_1 + (1-2v_1)D_1] \} dp = (\sigma_z)_{z=0}$$

ใช้ส่วนกลับของ Hankel Transform จะได้

$$p^2 [-pA_1 + (1-2v_1)B_1 + pC_1 + (1-2v_1)D_1] = \int_0^a r (\sigma_z)_{z=0} J_0(pr) dr$$

$$p^2 [-pA_1 + (1-2v_1)B_1 + pC_1 + (1-2v_1)D_1] = \int_0^a r (-1) J_0(pr) dr$$

$$pA_1 + (2v_1-1)B_1 - pC_1 + (2v_1-1)D_1 = (1/p^2) [(a/p) J_1(pa)] \quad \dots\dots (2.32)$$

จากสมการที่ 2.31, 2.32 และ 2.30 จะได้

$$\begin{bmatrix} p & 2v_1 & p & -2v_1 \\ p & 2v_1-1 & -p & 2v_1-1 \end{bmatrix} \prod_{j=1}^{n-1} \frac{D^{-1}(h_j) X_j D(h_j)}{4^{j(v_j-1)}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_n \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f(p) \end{bmatrix} \quad \dots\dots (2.33)$$

$f(p)$ ในสมการที่ 2.33 เท่ากับ $(1/p^2) [(a/p) J_1(pa)]$ ในสมการที่ 2.33 ค่า C_n, D_n เป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่า $f(p)$ ดังนั้น สมการที่ 2.30 จะให้ค่า $A_k, B_k, C_k,$ และ D_k เป็นปฏิภาคกับ $f(p)$ สำหรับทุกค่า $k = 1, 2, \dots, n$ หากรวบรวมสมการที่ 2.13a ถึง 2.13 f จะได้ $\sigma_z^k, \sigma_\theta^k, \sigma_\theta^k, \tau_{rz}^k, u^k$ และ w^k เป็นปฏิภาคกับ $f(p)$ สำหรับทุก $k=1$ ถึง n เพราะฉะนั้นในสมการ 2.33 เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณจะใช้ค่า $f(p) = 1/p^2$ ส่วนเทอม $[(a/p)J_1(pa)]$ ที่เหลือสามารถนำไปคูณกับค่า $A_k, B_k, C_k,$ และ D_k ที่หาโดยใช้ $f(p) = 1/p^2$ ในการหาค่าความเค้นและการเคลื่อนที่ตามสมการที่ 2.13e ถึง 2.13f

2.3.5 ค่าตอบของความเค้นจากหลายล้อ

จากหัวข้อ 2.3.2 ถึง 2.3.4 เป็นการหาความเค้นเนื่องจากล้อเพียงล้อเดียว การหาความเค้นเนื่องจากล้อหลายล้อหาได้โดยวิธี Superposition โดยการเปลี่ยนแกนจากระบบพิกัดทรงกระบอกเป็นพิกัดฉาก โดยใช้ Law of stress transformation จากรูปที่ 2.4 เมื่อเปลี่ยนแกนจากพิกัด R, θ เป็น x, y โดยการหมุนระนาบ xy รอบ แกน Z จาก Law of stress transformation จะได้

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r & 0 & \tau_{zr} \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ \tau_{zr} & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta & (\sigma_r - \sigma_\theta) \sin \theta \cos \theta & \tau_{zr} \cos \theta \\ (\sigma_r - \sigma_\theta) \sin \theta \cos \theta & \sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_\theta \cos^2 \theta & \tau_{zr} \sin \theta \\ \tau_{zr} \cos \theta & \tau_{zr} \sin \theta & \sigma_z \end{bmatrix}$$

.....(2.34)

จากรูปที่ 2.5 สมการที่ 2.34 เป็น

$$\sigma_x = \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_\theta) + \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_\theta) \frac{(x-x_n)^2 - (y-y_n)^2}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} \dots\dots(2.35 a)$$

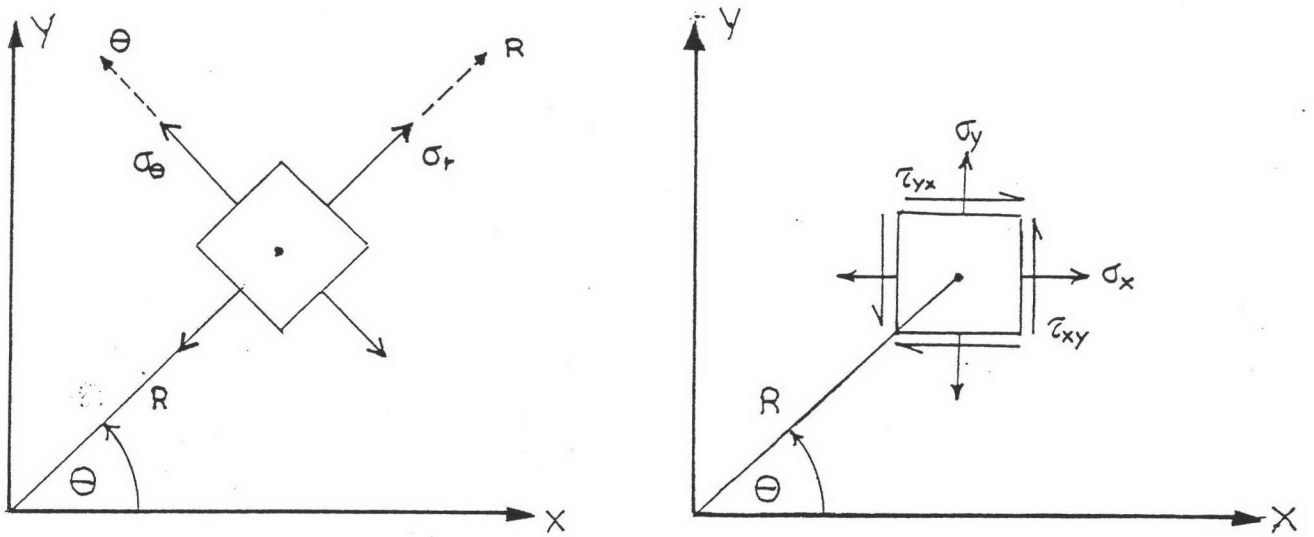
$$\sigma_y = \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_\theta) - \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_\theta) \frac{(x-x_n)^2 - (y-y_n)^2}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} \dots\dots(2.35 b)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_r - \sigma_\theta) \frac{(x-x_n)(y-y_n)}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} \dots\dots(2.35 c)$$

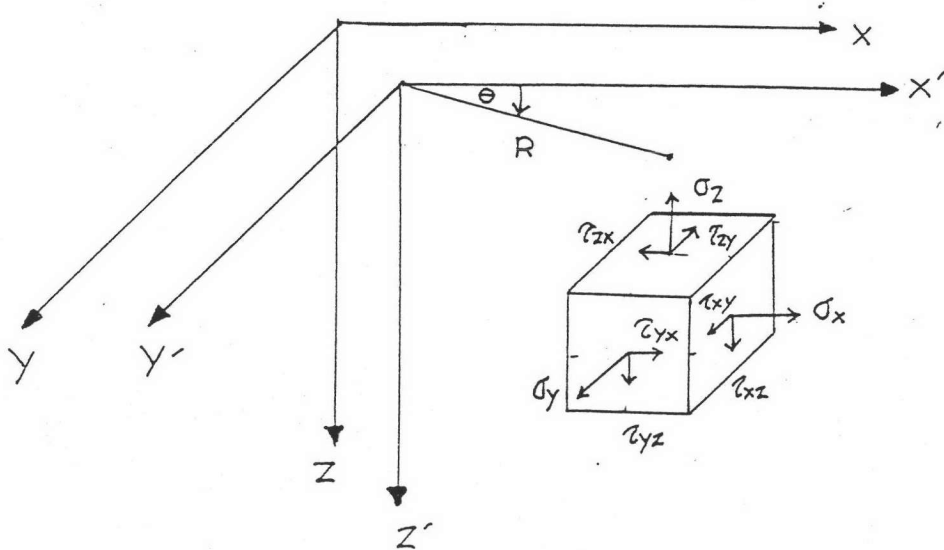
$$\tau_{xy} = \tau_{rz} \frac{x-x_n}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} \dots\dots(2.35 d)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{rz} \frac{y-y_n}{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2} \dots\dots(2.35 e)$$

$$\sigma_z = \sigma_z \dots\dots(2.35 f)$$



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแกนจากพิกัดทรงกระบอกเป็นพิกัดฉาก (2 มิติ)



รูปที่ 2.5. การเปลี่ยนแกนจากพิกัดทรงกระบอกเป็นพิกัดฉาก (3 มิติ)

เมื่อเปลี่ยนค่าความเค้นของแต่ละลัทธิให้อยู่ในพิกัดจากตามสมการที่ 2.35 a ถึง 2.35 f แล้วจึงรวมค่าส่วนประกอบของความเค้นแต่ละแกนได้

2.3.6 การหาค่าความเครียด

สภาวะความเค้นและความเครียดที่ตำแหน่งใด ๆ ในชิ้นทางประกอบด้วย $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ และ $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma_x &= F_1(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}) \\ \sigma_y &= F_2(\epsilon_x, \epsilon_y, \dots, \gamma_{xy}) \\ \dots\dots\dots & \\ \tau_{xy} &= F_6(\epsilon_x, \epsilon_y, \dots, \gamma_{xy}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.36 a)$$

จากสมการที่ 2.36 a สำหรับความเครียดขนาดเล็ก ๆ ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง สมการที่ 2.36 a สามารถเขียนได้ในรูป

$$\sigma_x = (F_1)_0 + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \epsilon_x}\right)_0 \epsilon_x + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \epsilon_y}\right)_0 \epsilon_y + \dots + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \gamma_{xy}}\right)_0 \gamma_{xy} \quad \dots\dots\dots (2.36 b)$$

เมื่อค่าของศูนย์ในรูปตัวห้อยหมายถึงอนุพันธ์สำหรับค่า F_1 สำหรับ $\epsilon_x = \epsilon_y = \dots = \gamma_{xy} = 0$ และถ้าถือว่าไม่มีค่าความเครียด เมื่อไม่มีค่าความเค้น จะได้

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= C_{11}\sigma_x + C_{12}\sigma_y + C_{13}\sigma_z + C_{14}\tau_{yz} + C_{15}\tau_{xz} + C_{16}\tau_{xy} \\ \epsilon_y &= C_{21}\sigma_x + \dots \dots \dots + C_{26}\tau_{xy} \\ \dots\dots\dots & \\ \gamma_{xy} &= C_{61}\sigma_x + \dots \dots \dots + C_{66}\tau_{xy} \end{aligned}$$

เมื่อ C_{1j} เป็นค่าคงที่ ในกรณีที่วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันจะได้ ค่า C_{1j} เท่ากับ 36 ค่า และจากการกำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง ค่า C_{1j} จะเหลือ 2 ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= C_{11}\sigma_x + C_{12}(\sigma_y + \sigma_z) \\ \epsilon_y &= C_{11}\sigma_y + C_{12}(\sigma_x + \sigma_z) \\ \epsilon_z &= C_{11}\sigma_z + C_{12}(\sigma_x + \sigma_y) \\ \gamma_{yz} &= 2(C_{11} - C_{12})\tau_{yz} \quad \gamma_{xz} = 2(C_{11} - C_{12})\tau_{xz} \quad \gamma_{xy} = 2(C_{11} - C_{12})\tau_{xy} \end{aligned} \quad \dots\dots (2.36 c)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของความเค้นและส่วนประกอบความเครียด ซึ่งหาได้จาก การทดลองที่เรียกว่า Hook's Law นั้น ได้กำหนดค่าให้วัสดุหน้าตัดสี่เหลี่ยมแท่งยาวขนานกับ แกน x ภายใต้ความเค้นดึงอย่างเดียวยังสองปลาย(∞) สม่่าเสมอ จากการทดลองพบว่าใน กรณีของวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง(Isotropic) ความเครียดจะถูกกำหนด โดยสมการ

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad \dots\dots\dots(2.36 d)$$

เมื่อกำหนดค่าให้ E เป็นอีลาสติคโมดูลัส และเมื่อพิจารณาว่าการยืดตัวตามแนวยาวภายใต้แรง ดึงทำให้เกิดการหดตัวด้านข้างของวัสดุซึ่งกำหนดโดย

$$\epsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E}, \quad \epsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} \quad \dots\dots\dots(2.36 e)$$

เมื่อ ν = ปัวซองเรโช (อัตราส่วนความเครียดด้านข้างและความเครียดตามแนวยาว) จากสมการที่ 2.36 c จะได้ $C_{11} = 1/E$ และ $C_{12} = \nu/E$ (เครื่องหมายลบ หมายถึงการยืดตัวตามแนวแกนยาว ทำให้เกิดการหดตัวด้านข้าง) โดยสรุปแล้วความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียดจะเป็น

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)) \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) \end{aligned} \quad \dots\dots(2.36 f)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}$$

$$\tau_{xz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xz}$$

$$\tau_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz}$$

- โดยที่
- $\epsilon_{y,z}$ = axial strain (x,y,z เป็นทิศทาง)
 - γ_{xz} = shear strain (subscript เทอมแรกหมายถึงระนาบ เทอมหลังหมายถึงทิศทาง)
 - E = อีลาสติกโมดูลัส
 - ν = ปัวซองเรโซ (อัตราส่วนของ lateral กับ longitudinal strain)

2.3.7 การหา Principal Strain

Principal Strain เป็น normal strain ในระนาบที่ shear strain เป็นศูนย์หาได้จากสมการ characteristic ของ strain

$$\epsilon_n^3 - J_1 \epsilon_n^2 + J_2 \epsilon_n - J_3 = 0 \quad \dots (2.37)$$

โดยที่ $J_1 = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$

$$J_2 = \epsilon_x \epsilon_y + \epsilon_y \epsilon_z + \epsilon_z \epsilon_x - \frac{1}{4} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)$$

$$J_3 = \epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z + \frac{1}{4} (\gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx} - \frac{1}{4} (\epsilon_x \gamma_{yz}^2 + \epsilon_y \gamma_{zx}^2 + \epsilon_z \gamma_{xy}^2))$$

สำหรับสมการที่ 2.37 จะมีคำตอบสามค่าของ เป็นค่า principal strain ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) เลือกค่า principal tensile strain ที่มีค่ามากที่สุดนำไปหาค่า จำนวนการเกิดความเครียดซ้ำจันวับัดินหัวข้อ 2.2.1

2.4 คุณสมบัติของวัสดุในการออกแบบ

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบประกอบด้วยค่าอีลาสติกโมดูลัสและปัจจัยเรโซของวัสดุแต่ละชั้น ค่าที่นำมาใช้ทำการทดสอบภายใต้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Repeated Load) โดยเลือกค่าความถี่ของน้ำหนักกระทำตามสภาพที่เกิดขึ้นจริง

2.4.1 อีลาสติกโมดูลัสของชั้น A.C. (E_1 , $|E^*|$)

วัสดุผสมแอสฟัลท์สำหรับงานสนามบิน เป็นแบบเกรดแน่น (Dense-Graded Asphalt Mixes) ขนาดคละของมวลรวมมีการจัดเรียงกันแน่น เพื่อให้ทางวิ่งมีเสถียรภาพ (Stability) ไม่เกิดร่องล้อ (Rutting) และมีความต้านทานในการเกิดรอยแตก (Fatigue Cracking) ได้ดี

อีลาสติกโมดูลัสของชั้น A.C. เรียกโดยทั่วไปว่าไดนามิกโมดูลัส (Dynamic Modulus) วิธีการหาค่าไดนามิกโมดูลัสในห้องทดลองใช้มาตรฐาน ASTM D3496 สำหรับการเตรียมตัวอย่าง และ ASTM D3497 สำหรับการทดสอบหาค่า ตัวอย่างที่ทดสอบเป็นแท่งทรงกระบอกขนาด ϕ 4" x 8" หรือ ϕ 6" x 12" ความเค้นอัดที่กระทำต่อตัวอย่างในแนวตั้งเป็นฟังก์ชันของไซน์ (Sinusoidal Axial Compressive Stress) ที่อุณหภูมิและความถี่ของน้ำหนักที่กระทำค่าหนึ่ง ความเครียดที่วัดได้และนำมาใช้เป็น Recoverable Strain

Shook, J.F. และ Kallas, B.F. (1969) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าแฟคเตอร์ ซึ่งมีผลต่อค่าไดนามิกโมดูลัสของวัสดุแอสฟัลท์ เกรดแน่นผสมร้อนสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์ (Asphalt Content) คงที่ ค่า E_1 เพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศลดลง
2. เมื่อเปอร์เซ็นต์ฟองอากาศคงที่ E_1 เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์ลดลง
3. E_1 เพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดของยางแอสฟัลท์เพิ่มขึ้น

ในการออกแบบครั้งนี้ใช้สมการที่หาได้จาก Regression Analysis ของผลการทดสอบจริง ซึ่งได้นำไปใช้ออกแบบในคู่มือ MS - 1 สำหรับใช้ในโปรแกรม DAMA ของ The Asphalt Institute (1982) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Log } |E^*| = & 5.553833 + 0.028829 (P200 / f^{0.17033}) - 0.03476(VV) \\ & + 0.070377 (VS) \\ & + 0.000005 (t_p (1.3 + 0.49825 \text{ Log } f) \cdot \text{Pac}^{0.5}) \\ & - 0.00189 (t_p (1.3 + 0.49825 \text{ Log } f) \cdot \text{Pac}^{0.5} / f^{1.1}) \\ & + 0.931757 (1/f^{0.02774}) \quad \dots (2.38) \end{aligned}$$

โดยที่ E^* = E_1 , โมดูลัสของแอสฟัลท์คอนกรีต

P200 = เปอร์เซ็นต์มวลรวมผ่านตระแกรงเบอร์ 200

f = ความถี่ของน้ำหนักที่กระทำ

VV = เปอร์เซ็นต์ฟองอากาศ

VS = ความหนืดสมบูรณ์ (Absolute Viscosity) ที่ 70°C (poise x 10⁶)

Pac = ปริมาณยางแอสฟัลท์ เป็น เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทั้งหมด

tp = อุณหภูมิของส่วนผสม (°F)

ความถี่ของน้ำหนักที่กระทำนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มล้อหลักถ้าเป็น dual ความถี่ 4 cps, dual tandem 2 cps และ triple tandem 1 cps ซึ่งเป็นค่าที่นำมาใช้สำหรับเครื่องบินที่วิ่งด้วยความเร็ว 15 ไมล์ต่อชั่วโมง

อุณหภูมิของส่วนผสมแอสฟัลท์หาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{MMPT} = 1.05 \text{ MMAT} + 5 \quad \dots\dots\dots(2.39)$$

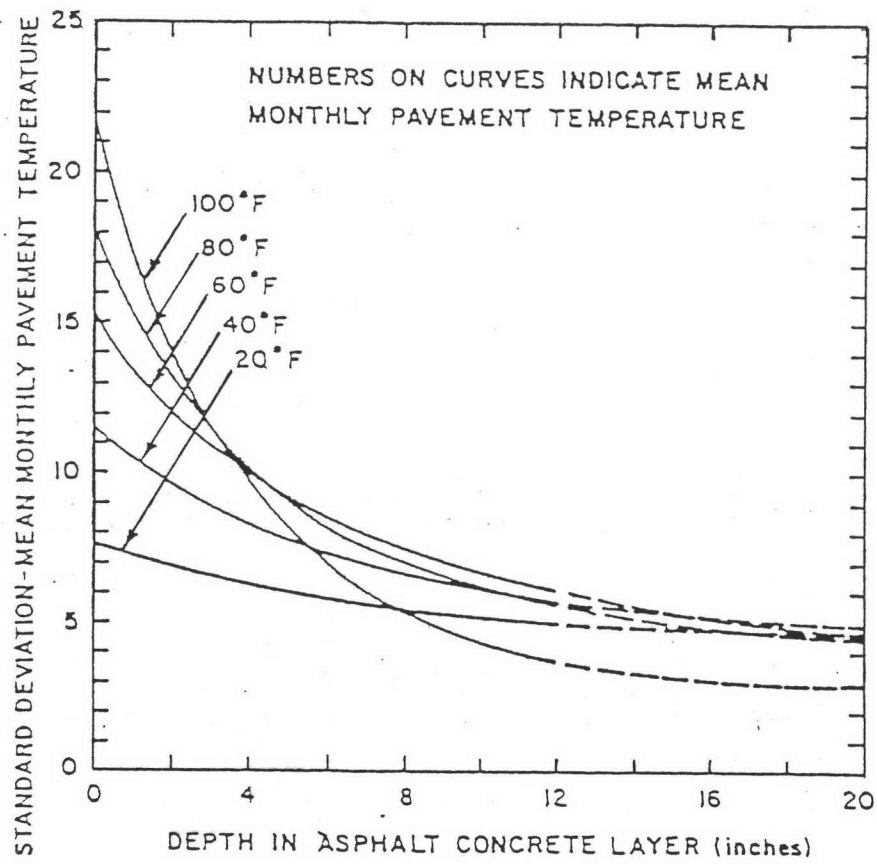
โดยที่ MMPT = ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวจราจร (°F) ประจำเดือน

MMPT = ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศ (°F) ประจำเดือน

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิผิวจราจรประจำเดือน แสดงอยู่ในรูปที่ 2.6 ในบริเวณที่อุณหภูมิค่า (MAAT น้อยกว่า 25 องศาเซลเซียส) ควรใช้ยางแอสฟัลท์ความหนืดค่า (AC-5 หรือ AC-10) ซึ่งค่า E_1 ค่า (วัสดุค่อนข้างอ่อน) เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดรอยแตก ตรงข้ามสำหรับบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (MAAT มากกว่า 25 องศาเซลเซียส) โอกาสที่จะเกิดร่องล้อบนทางวิ่งสูง จึงควรใช้วัสดุที่ค่อนข้างแข็ง (E_1 สูง) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นยางแอสฟัลท์เกรดความหนืดสูง (AC-20 หรือ AC-40)

2.4.2 โมดูลัสของชั้นดินเดิม (E_s , M_r)

โมดูลัสของชั้นดินเดิม (E_s) หรือ Resilient Modulus (M_r) สามารถหาได้จากการเก็บตัวอย่างดินและทดสอบตามคู่มือทดสอบดิน MS-10 ของ The Asphalt Institute (1986) สำหรับดินเม็ดละเอียดตัวอย่างดินทดสอบแบบ 3 แกน โดยถูกความเค้นกระทำซ้ำในแนวตั้ง (σ_1) ด้วยขนาดของความถี่ครั้งที่ และรอบตัวอย่างถูกกระทำความเค้น (σ_3) ขนาดคงที่



รูปที่ 2.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิเฉลี่ยประจำเดือนของชั้นแอสฟัลท์คอนกรีต

ที่ความลึกและอุณหภูมิต่าง ๆ

สำหรับดินเหนียวค่า M_r ลดลงเมื่อ Deviator Stress ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) เพิ่มดังรูปที่ 2.7 ส่วนค่าความเค้นโดยรอบ (σ_3) มีผลน้อยมากต่อค่า M_r นอกจากนี้ M_r ยังขึ้นอยู่กับความชื้นและความหนาแน่นโดยแสดงอยู่ในรูปที่ 2.8

สำหรับดินเม็ดหยาบ (Granular Soil) ค่า M_r เป็นฟังก์ชันค้ของ First Stress Invariant (Θ) ดังรูป 2.9 โดยมีสัมพันธเป็น

$$M_r = k_1 \Theta^{k_2} \quad \dots\dots\dots (2-40)$$

โดยที่ $K_1, K_2 =$ ค่าคงที่ได้จากการทดลองช่วงโดยประมาณแสดงอยู่ในตารางที่ 2.2

$$\Theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

M_r สามารถระบุเป็นฟังก์ชันค้ของ σ_3 เมื่อ k และ n เป็นค่าที่คงที่

$$M_r = k \sigma_3^n \quad \dots\dots\dots (2-41)$$

นอกจากนี้ค่า M_r ยังขึ้นอยู่กับ degree of saturation ดังรูป 2.9

เนื่องจาก M_r ขึ้นอยู่กับค่า Θ เพราะฉะนั้นการหาความเค้นในดินเม็ดหยาบจึงใช้วิธี Iterative ปรับค่า M_r จนสอดคล้องกับค่า Θ

กรณีที่ไม่มีการทดสอบหาค่า M_r โดยตรง อาจใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง E_3 และ CBR Huekelom และ Fortor ได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง E_3 - CBR โดยแสดงผลที่ได้ในรูปที่ 2.10 มีความสัมพันธ์ดังนี้

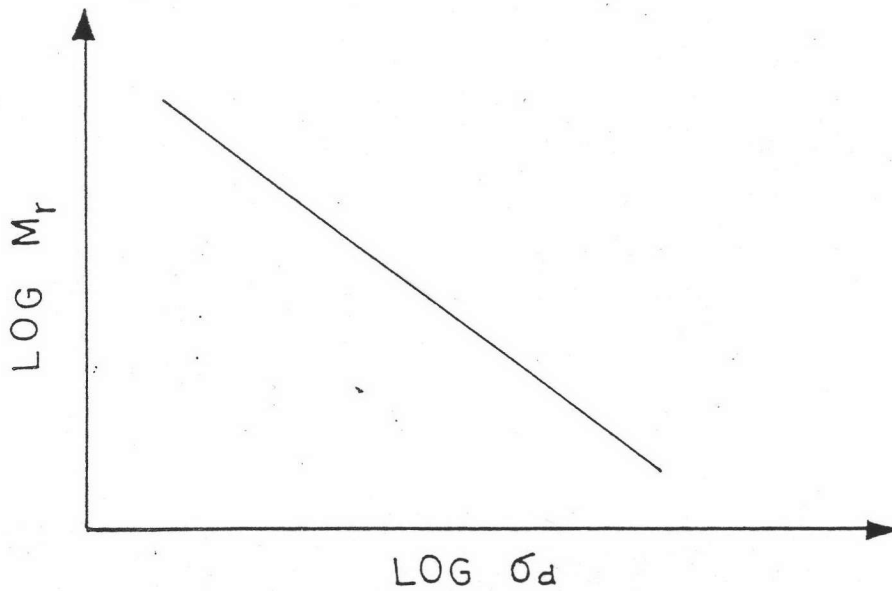
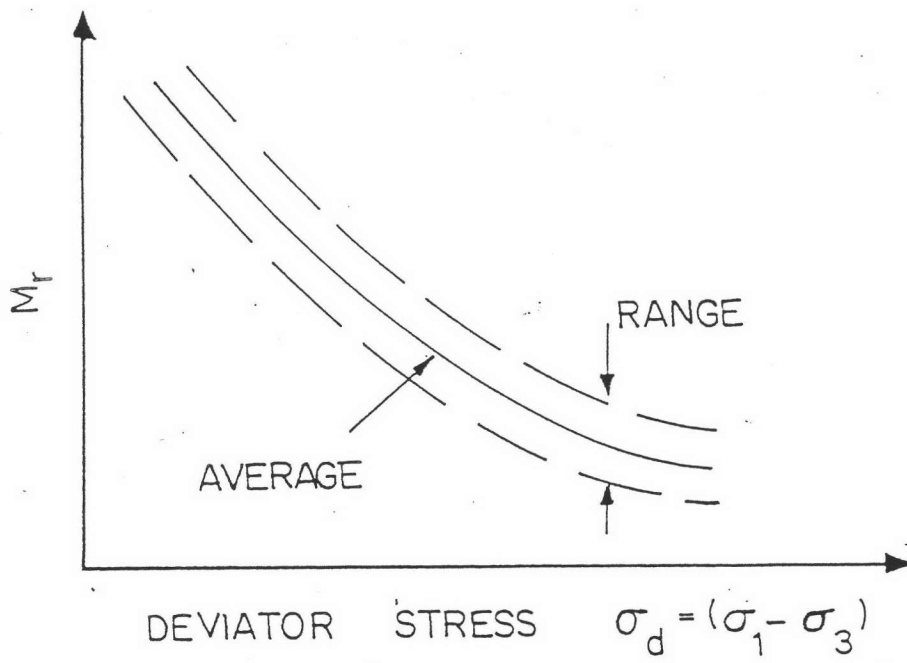
$$E_3 = 1500 \text{ CBR (psi)} \quad \dots\dots\dots (2-42)$$

นอกจากนั้นค่า E_3 ยังหาได้จากการทดสอบ Plate Bearing Test ทดสอบตามคู่มือการทดสอบดิน MS - 10 โดยใช้ bearing plate ๓๐ นิ้ว กระทำซ้ำ 10 ครั้ง เอาค่าเฉลี่ยที่การทรุดตัว 0.5 นิ้วมาใช้ค่า E_3 หาได้จากรูปที่ 2.11

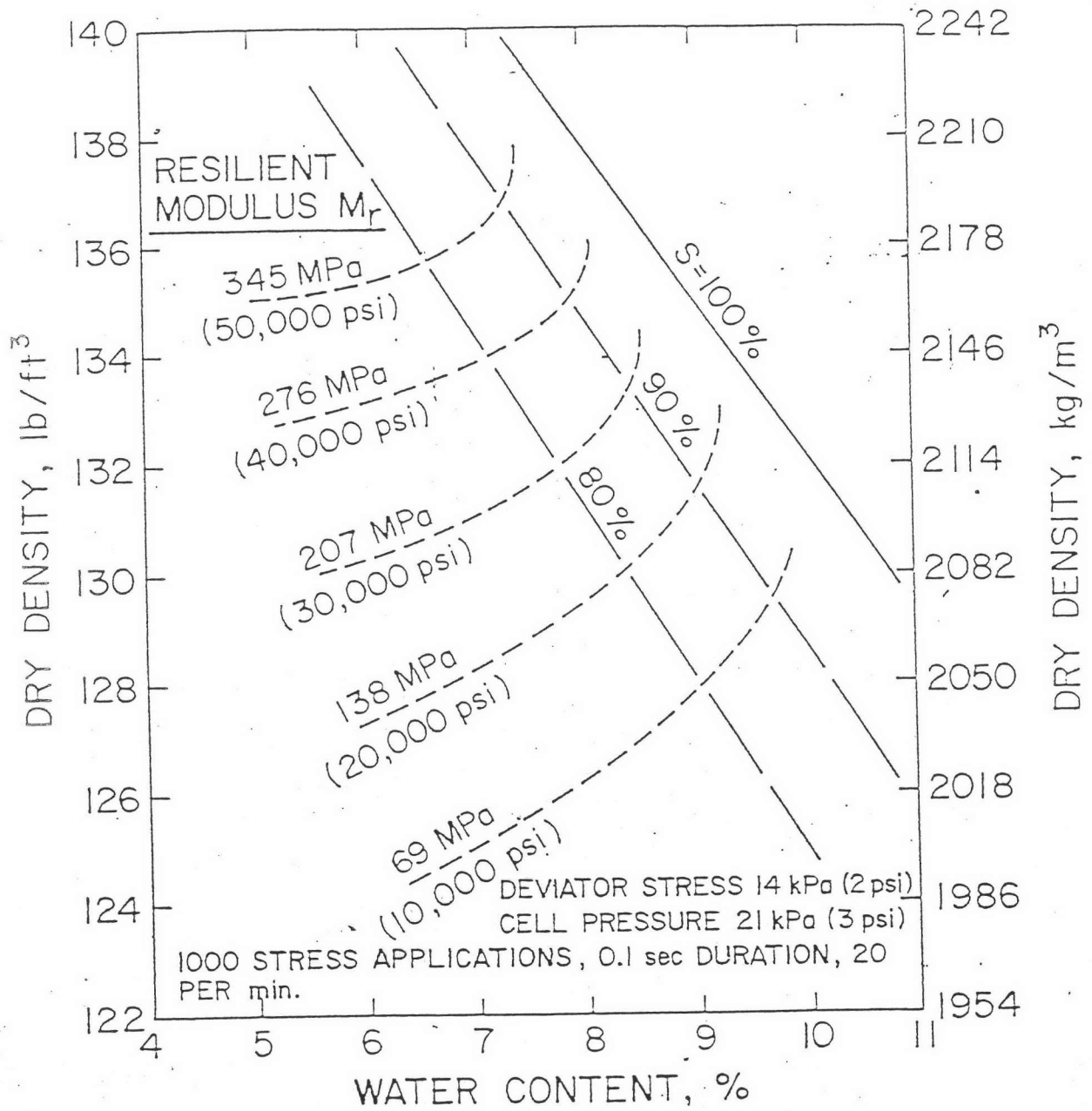
ค่า CBR หรือค่าแรง เลือกเอาค่าดังกล่าวที่มากกว่าหรือเท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์ มาใช้หาค่า E_3

2.4.3 อีลาสติคโมดูลัสของชั้นพื้นทาง

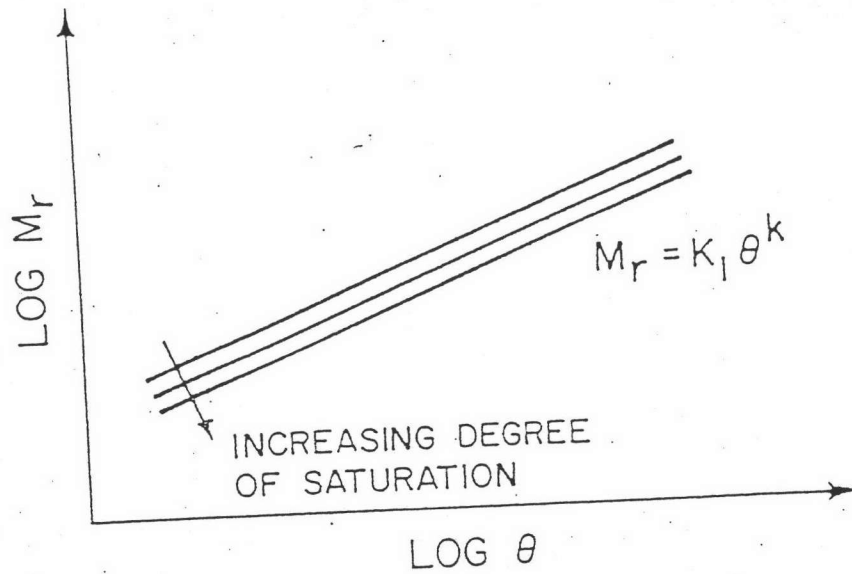
เนื่องจากชั้นพื้นทางเป็นวัสดุเม็ดหยาบ ค่าอีลาสติคโมดูลัส หรือ Resilient Modulus (M_r) ขึ้นอยู่กับค่า Θ ตามสมการ 2.40 เพื่อหลีกเลี่ยงวิธี



รูปที่ 2.7 ผลของ DEVIATOR STRESS ต่อค่า RESILIENT MODULUS (M_r)
ของหินเม็ดละเอียด



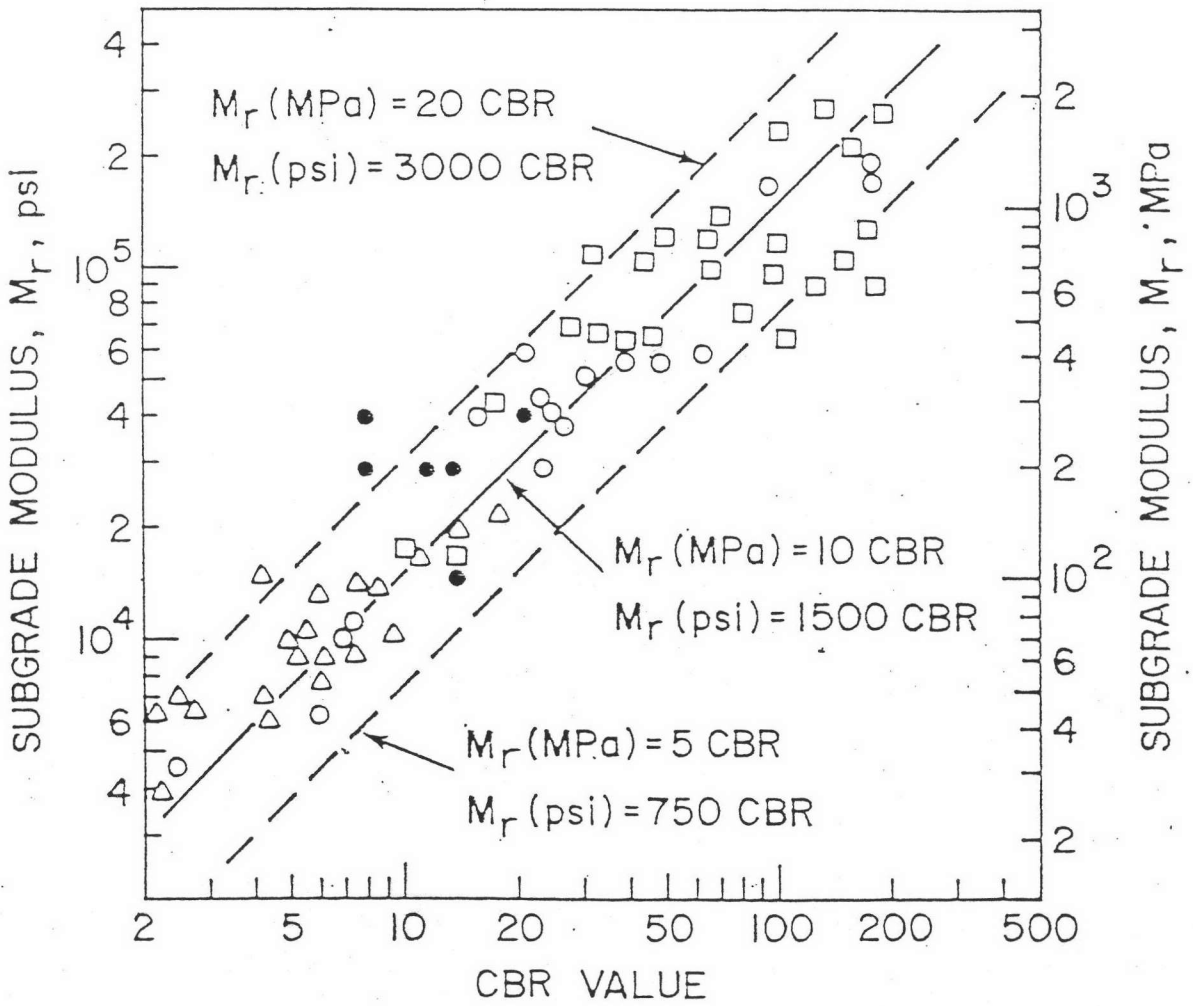
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้น-ความหนาแน่นแห้ง และ ค่า RESILIENT MODULUS ของชั้นดินเดิม



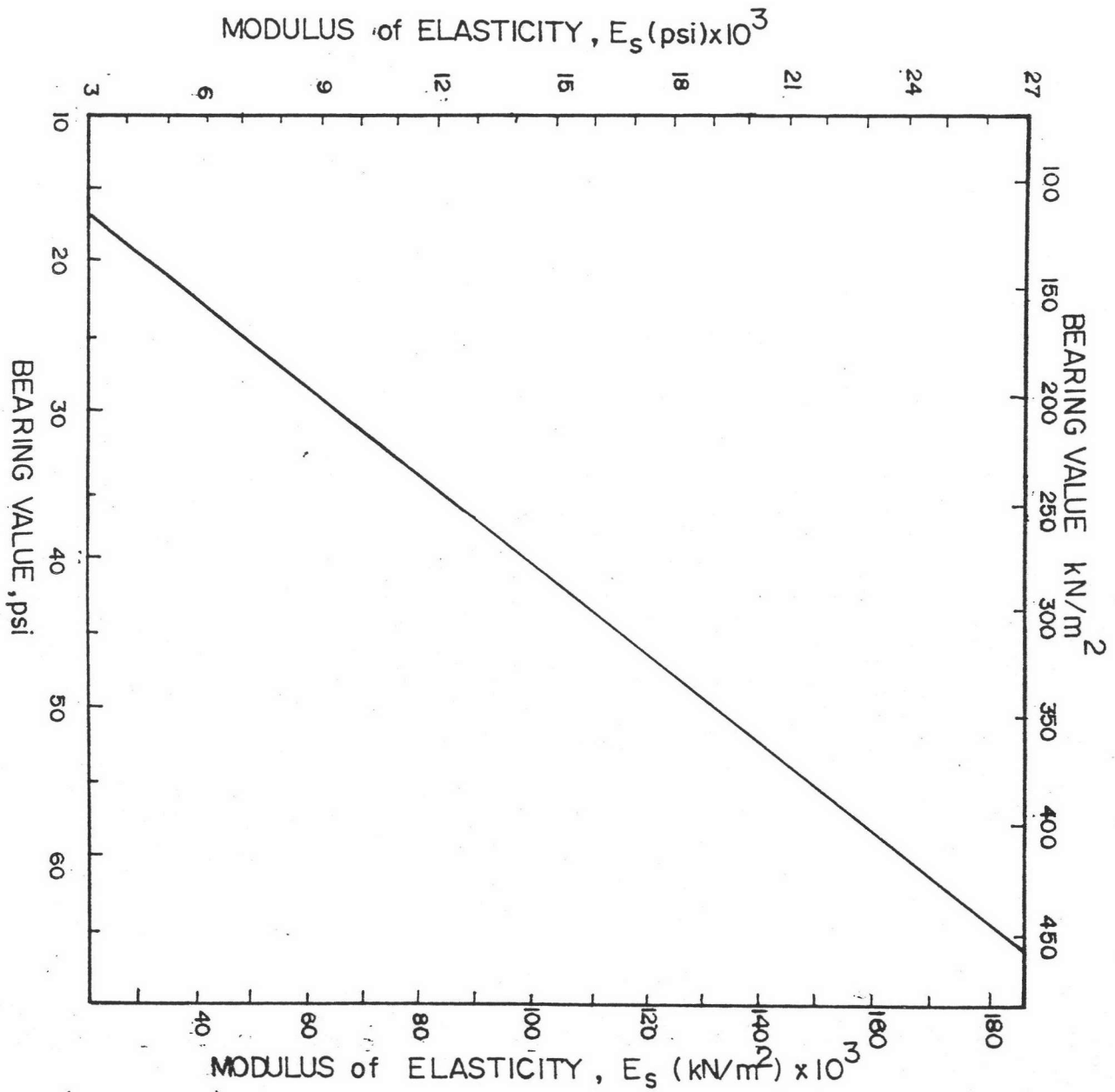
รูปที่ 2.9 ผลของค่า RESILIENT MODULUS กับค่าผลรวมความเค้นในแนวแกนหลัก

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ k_1 และ k_2 สำหรับหาค่า RESILIENT MODULUS

Investigator(s)	Material(s)	k_1	k_2
Hicks (36)	partially crushed gravel; crushed rock	1,600-5,000	0.57-0.73
Hicks, Finn (37)	untreated base - San Diego Test Road	2,100-5,400	0.61
Allen (38)	gravel, crushed stone	1,800-8,000	0.32-0.70
Kalcheff and Hicks (39)	crushed stone	4,000-9,000	0.46-0.64
Boyce, Brown, Peil (40)	well graded crushed limestone	8,000	0.67
U.C. Berkeley (24)	in service base and subbase materials	2,900-7,750	0.46-0.65



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง RESILIENT MODULUS ของชั้นดินเดิมกับค่า CBR



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแบริ่งและอีลาสติซิโมดูลัสของชั้นดินเดิม

Itevative ในการวิเคราะห์โครงสร้างผิวจราจรสามารถใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Mr ของชั้นพื้นทาง (E₂) และชั้นดินเดิม (E₃) เสนอโดย Classen และคณะ (1977) ในการออกแบบผิวจราจรแอสฟัลท์ของสนามบิน (The Shell Method)

$$E_2 = K_2 E_3 \dots\dots\dots(2.43)$$

โดยที่ $K_2 = 0.2 h_2^{0.45}$ เมื่อ h_2 เป็นความหนาของชั้นพื้นทาง (มม.) และ $2 < K_2 < 4$

ในการออกแบบครั้งนี้ยึดการหาค่า E₂ ตามคู่มือ MS-1 ซึ่งใช้ในโปรแกรม DAMA ของ The Asphalt Institute (1982,1983) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_2 = g_0 (h_1^{-g_1}) (h_2^{-g_2}) (E_1^{-g_3}) (E_3^{-g_4}) (K_1^{-g_5}) \dots\dots (2.44)$$

โดยที่

E ₃	=	Mr ของชั้นดินเดิม (psi)
E ₂	=	Mr ของชั้นพื้นทาง (psi)
h ₁	=	ความหนาชั้น A.C
h ₂	=	ความหนาชั้นพื้นทาง
g ₀ -g ₄	=	Regression Constant มีค่าดังนี้
g ₀	=	10.447
g ₁	=	0.471
g ₂	=	0.041
g ₃	=	0.139
g ₄	=	0.287
g ₅	=	0.868
K ₁	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุพื้นทาง (ในตารางที่ 2.2)

2.4.4 บัวของเรโซ (v)

บัวของเรโซ เป็นอัตราส่วนระหว่างความเครียดด้านข้าง (Lateral Strain) กับความเครียดตามแนวแกน (Axial Strain) ในทิศทางที่น้ำหนักกระทำ ค่าบัวของเรโซ อยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.5 ถ้าค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าไม่มีความเครียดด้านข้าง ถ้าค่าเท่ากับ 0.5 แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุที่สภาวะความเค้นใด ๆ นั่นคือวัสดุอัดตัวไม่ได้ (Imcompressible)

ค่าบัวของเรโซประมาณค่าได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรขณะทดสอบ

$$v = 0.5 (1 - (1/e_a)(\nabla V/V_o))$$

โดยที่ e_a = ความเครียดตามแนวแกน(Axial Strain)
 ∇V = การเปลี่ยนแปลงปริมาตร
 V_o = ปริมาตรเดิมของตัวอย่างที่ทดสอบ

สำหรับวัสดุที่เป็นชั้นทาง แพลคเตอร์ต่าง ๆ มีผลกระทบต่อค่าบัวของเรโซแนนซ์ จึงนิยมใช้ค่าที่กำหนดขึ้นสำหรับวัสดุใด ๆ มากกว่าการทดสอบวัสดุโดยตรง สำหรับชั้นดินเดิมถ้าเป็นดินเหนียวใช้ 0.5 และ 0.3 สำหรับดินทราย ส่วนค่าบัวของเรโซแนนซ์ของชั้น A.C. มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูป 2.12 บัวของเรโซแนนซ์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.5 ค่าบัวของเรโซแนนซ์ที่ใช้ในแต่ละหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับออกแบบผิวจราจรแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3

2.5 การประเมินค่าความเสียหายเทียบเท่า (Prediction of Equivalent Damage)

การประเมินค่าความเสียหายเทียบเท่าเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบที่พิจารณาความวิบัติจากน้ำหนักจราจรกระทำซ้ำ เนื่องจากมีเครื่องบินหลายชนิดที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งทำให้ชั้นทางวิ่งสนามบินเสียหายแตกต่างกัน

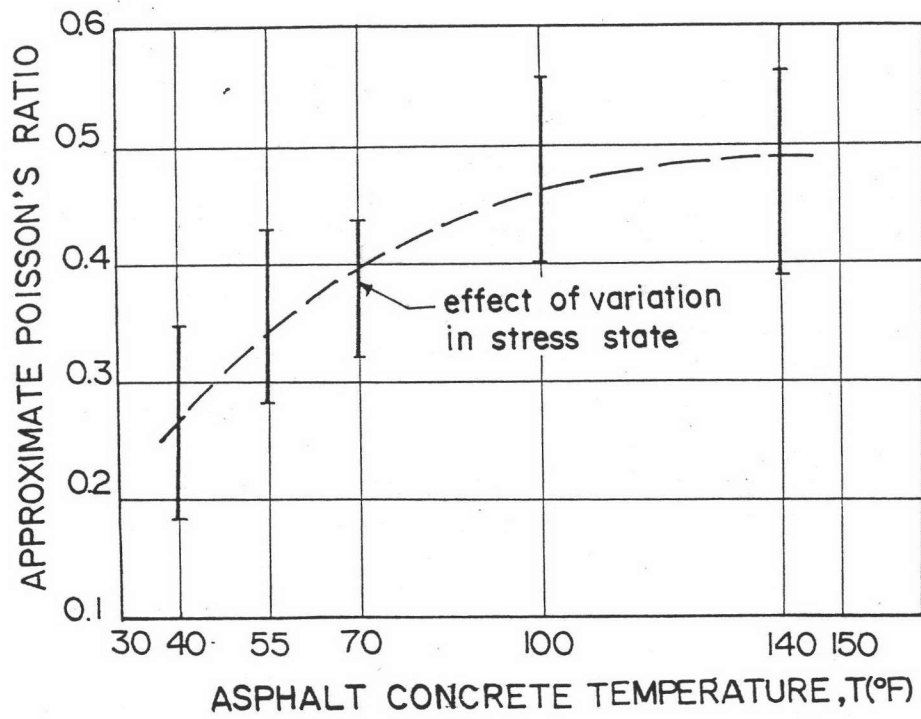
Deacon (1969,1971) ได้เสนอการหาค่าการประเมินค่าความเสียหายเทียบเท่า (F_i) ของเครื่องบินใด ๆ โดยการเปรียบเทียบค่าจำนวนครั้งที่เกิดความเครียดซ้ำจากวิบัติของเครื่องบินนั้น (N_i) กับเครื่องบินมาตรฐาน (N_s) ซึ่งเป็นเครื่องบินที่กลุ่มล้อหลักทั้งหมด 8 ล้อ โดยกำหนดความเสียหาย 1 หน่วย เมื่อเกิดความเครียด 1 ครั้ง เป็น $1/N_i$ สำหรับเครื่องบินที่ออกแบบ และ $1/N_s$ สำหรับเครื่องบินมาตรฐาน เพราะฉะนั้นค่าความเสียหายเทียบเท่าเป็น

$$F_i = (1/N_i)/(1/N_s) \quad \dots\dots (2.45)$$

เมื่อ n_i เป็นจำนวนเครื่องบินออกแบบใด ๆ ที่ผ่านทางวิ่งจะได้ค่าความเสียหายเทียบเท่าของเครื่องบินทั้งหมด (Mixed Aircraft) ในรูปผลรวมเชิงเส้น (Linear Summation) เป็น

$$E = \sum F_i n_i \quad \dots\dots (2.46)$$

และการวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อ $E=1$



รูปที่ 2.12 ผลของอุณหภูมิต่อค่า ν ของเรโซของชั้นแอสฟัลท์คอนกรีต

ตารางที่ 2.3 ค่า POISSON'S RATIO ที่ใช้บนหน่วยงานต่าง ๆ

วัสดุ	ORIGINAL Shell Oil Co.	REVISED Shell Oil Co.	The Asphalt Institute	Kentucky Highway
แอสฟัลท์ คอนกรีต	0.50	0.35	0.40	0.40
พื้นทาง	0.50	0.35	0.45	0.45
ชั้นดินเดิม	0.50	0.35	0.35	0.35

Deacon ได้ใช้หลักการดังกล่าวสำหรับการเกิดความวิบัติเนื่องจากการเกิดรอยแตก
ในชั้น A.C. (Fatigue Cracking) โดยนำความน่าจะเป็นที่เครื่องบินจะลงที่ตำแหน่งใด ๆ
ตามขบวนการทางวิ่งมาพิจารณาด้วยดังนี้

จากสมการที่ 2.1 เมื่อเครื่องบินลงที่ตำแหน่ง b แล้วทำให้เกิด tensile strain
ที่จุด a เป็น $e_b(a)$ จะได้จำนวนครั้งที่เกิดความเครียดจนวิบัติเป็น

$$N_b(a) = K[1/e_b(a)]^c \quad \dots\dots (2.47);$$

จากสมการที่ 2.46 และ 2.47 เมื่อ f_b เป็นความน่าจะเป็นที่เครื่องบินจะลงที่ตำแหน่ง b

$$F_1(a) = [f_b (e_b(a))^c]_i / [f_b (e_b(a))^c]_s \quad \dots\dots(2.48)$$

ถ้ากำหนดให้ ERD (a) เป็นความเสียหายสัมพัทธ์ที่คาดไว้ที่จุด a (Expected
Relative Fatigue Damage)

$$ERD(a) = f_b (e_b(a))^c \quad \dots\dots\dots(2.49)$$

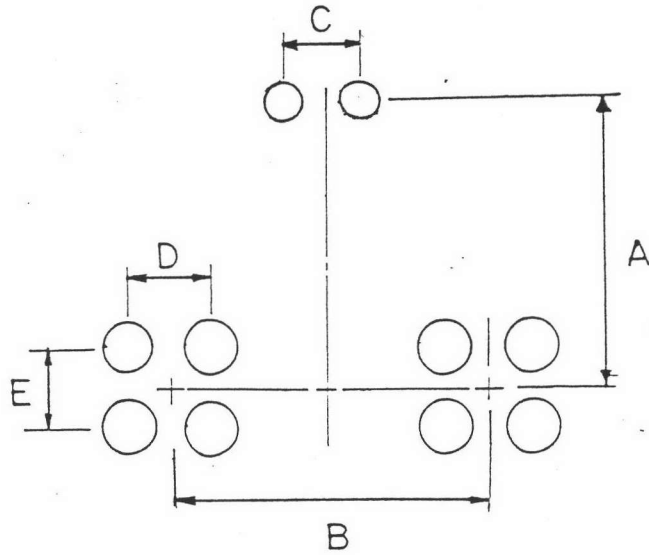
จะได้

$$F_i(a) = ERD_i(a) / \max ERD_s(a) \quad \dots\dots(2.50)$$

ค่า ERD (a), $F_1(a)$ หาโดย Deacon สำหรับเครื่องบินที่มีกลุ่มล้อหลัก 4 ล้อ
(TYP4), 8 ล้อ (TYP8) และ 16 ล้อ (TYP16) แสดงอยู่ในรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตาม
ลำดับ รูปที่ 2.16 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแห่งกลุ่มล้อที่ลงบนทางวิ่งต่อค่า ERD(a)
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าการแจกแจงความถี่ของเครื่องบินที่ลงบนทางวิ่ง และตารางที่ 2.6 แสดง
ผลของค่าแสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุ คุณสมบัติของเครื่องบินและการเลือกน้ำหนักของเครื่องบิน
ในการคำนวณหา

หลักการของ Deacon ได้ถูกปรับปรุงโดย Witczak (1973) โดยไม่ต้องใช้รูปแบบ
ความเครียด (Strain Profile) ที่เกิดขึ้นจริง แต่ได้ตั้งสมมุติฐานว่าความเครียดสูงสุดจาก
ล้อเครื่องบินกระจายสม่ำเสมอตลอดความกว้างประสิทธิพลค่าหนึ่ง (W_e) ดังรูปที่ 2.17 โดยค่า
ที่ออกมายอมรับได้ว่าใกล้เคียงกับของ Deacon

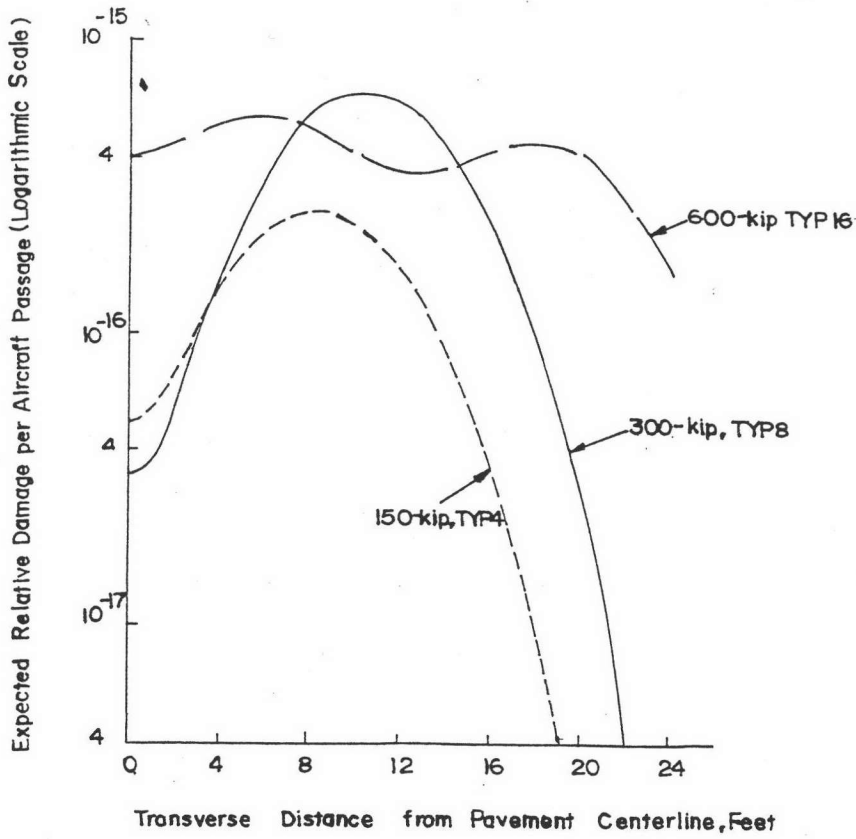
Witczak ได้ใช้เครื่องบินมาตรฐานที่มีกลุ่มล้อหลัก 8 ล้อ เป็นเครื่อง DC-8-63 F
โดยเหตุผลเดียวกับของ Deacon คือ น้ำหนักของเครื่องบินมีค่าปานกลาง ไม่น่ามากไม่น้อยเกินไป
เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องบินที่ใช้กันอยู่ทั่วไป การจัดเรียงของกลุ่มล้อและคุณสมบัติของเครื่องบิน
แสดงอยู่ในรูปที่ 2.13 และตารางที่ 2.4 ตามลำดับ



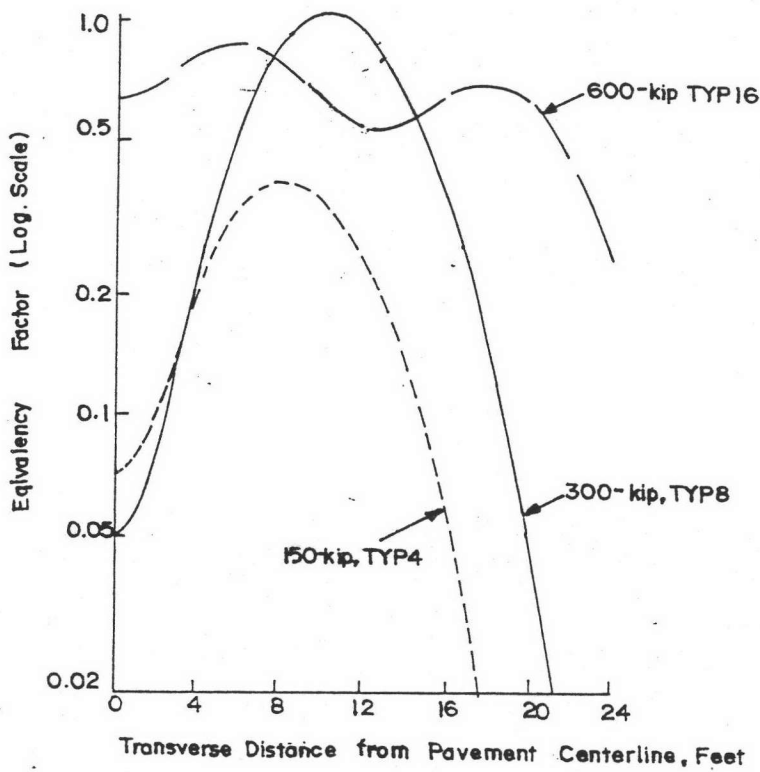
รูปที่ 2.13 การจัดเรียงของล้อ เครื่องบิน DC-8-63F

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของเครื่องบิน DC-8-63F

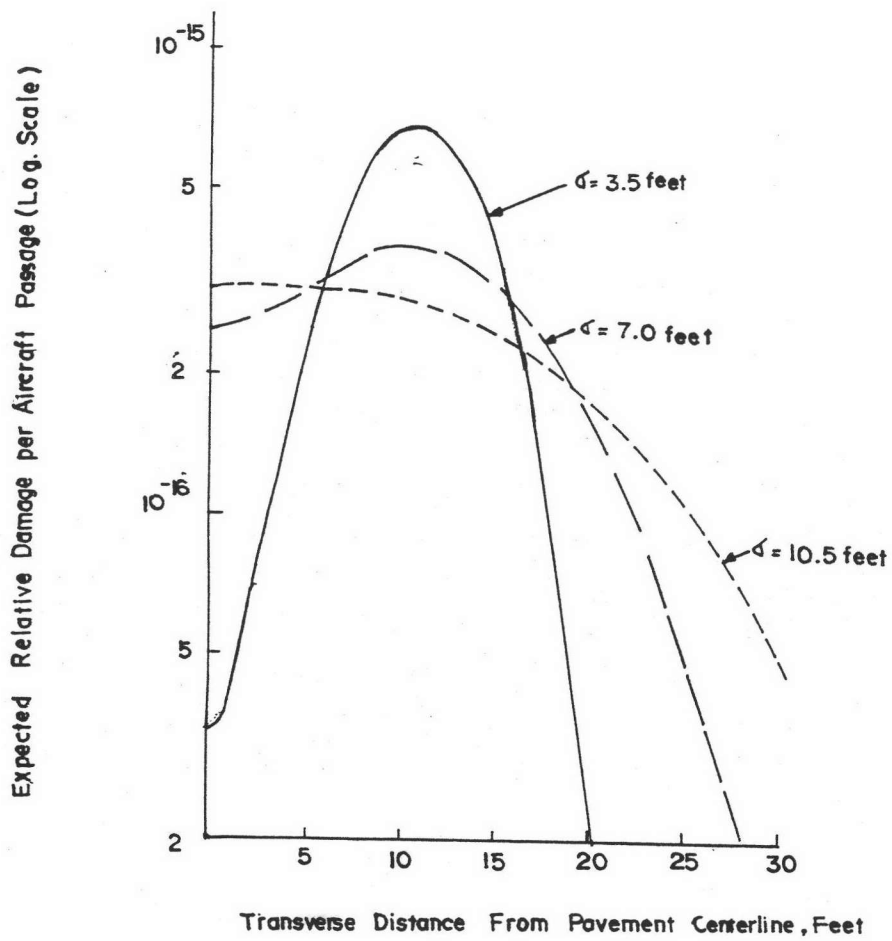
น้ำหนักของเครื่องบินทั้งหมด	358.0	lbx10 ³
น้ำหนักของ NOSE GEAR	13.8	lbx10 ³
น้ำหนักต่อล้อใน NOSE GEAR	6.9	lbx10 ³
น้ำหนักของ MAIN GEAR ทั้งหมด	172.1	lbx10 ³
น้ำหนักต่อล้อใน MAIN GEAR	43.0	lbx10 ³
แรงดันลมในล้อของ NOSE GEAR	143	psi
แรงดันลมในล้อของ MAIN GEAR	196	psi
ระยะ A	77' 6"	
ระยะ B	21'	
ระยะ C	18.5"	
ระยะ D	32"	
ระยะ E	55"	



รูปที่ 2.14 ผลการหาค่า ERD ที่หน้าตัดชั้นทางหมายเลข 2



รูปที่ 2.15 ผลการหาค่า Equivalency Factor ที่หน้าตัดชั้นทางหมายเลข 2



รูปที่ 2.16 ผลของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อค่า ERD

ตารางที่ 2.5 TRAVERSE FREQUENCY DISTRIBUTION ของเครื่องบินที่เคลื่อนที่บนทางวิ่ง

Taxiway Interval ¹ (Feet)	Percentage of Operations with Aircraft Centerline within Interval	
	Experimental ² (Approximate)	Normal ($\mu = 0, \sigma = 3.5$ ft.)
-11.5 to -10.5	0.5	0.1
-10.5 to -9.5	1.1	0.2
-9.5 to -8.5	1.4	0.5
-8.5 to -7.5	1.1	0.8
-7.5 to -6.5	1.6	1.6
-6.5 to -5.5	2.2	2.6
-5.5 to -4.5	3.0	4.2
-4.5 to -3.5	4.4	5.9
-3.5 to -2.5	7.0	7.9
-2.5 to -1.5	10.0	9.6
-1.5 to -0.5	11.0	10.9
-0.5 to 0.5	12.0	11.4
0.5 to 1.5	11.3	10.9
1.5 to 2.5	9.7	9.6
2.5 to 3.5	7.7	7.9
3.5 to 4.5	5.6	5.9
4.5 to 5.5	4.0	4.2
5.5 to 6.5	2.7	2.6
6.5 to 7.5	1.2	1.6
7.5 to 8.5	1.4	0.8
8.5 to 9.5	0.1	0.5
9.5 to 10.5	0.0	0.2
10.5 to 11.5	0.0	0.1

ตารางที่ 2.6 a คุณสมบัติของวัสดุแต่ละหน้าตัดของทางวิ่ง

Designation	Bound Layers		Unbound Base		Subgrade Modulus (psi)
	Modulus (psi)	Thickness (in.)	Modulus (psi)	Thickness (in.)	
1	300,000	4	30,000	48	6,000
2	300,000	12	30,000	36	6,000
3	300,000	20	30,000	24	6,000
4	300,000	6	30,000	46	6,000
5	300,000	8	30,000	42	6,000
6	150,000	12	30,000	36	6,000
7	600,000	12	30,000	36	6,000
8	300,000	12	30,000	36	3,000
9	300,000	12	30,000	36	15,000
10	300,000	5	30,000	46.5	6,000
11	300,000	7	30,000	43.5	6,000
12	300,000	10	30,000	39	6,000
13	150,000	5	30,000	34.5	12,000
14	600,000	9	30,000	52.5	3,000
15	300,000	20	-	-	6,000
16	300,000	30	-	-	6,000
17	300,000	40	-	-	6,000
18	600,000	20	-	-	6,000
19	150,000	20	-	-	6,000
20	300,000	10	-	-	6,000
21	300,000	50	-	-	6,000
22	450,000	20	-	-	6,000
23	750,000	20	-	-	6,000

* Poisson's ratios for the bound layers, unbound base, and subgrade are 0.35, 0.40, and 0.45, respectively.

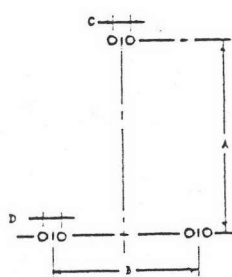
ตารางที่ 2.6 b การเลือกน้ำหนักของเครื่องบินการวิเคราะห์

	Loads (kips)		
	Minimum	Midpoint	Maximum
Total Load			
TYP4	100.0	150.0	200.0
TYP8	200.0	300.0	400.0
TYP16	400.0	600.0	800.0
Main Gear Load			
TYP4	92.5	138.8	185.0
TYP8	185.0	277.5	370.0
TYP16	370.0	555.0	740.0
Main Gear Tire Load			
TYP4	23.125	34.688	46.250
TYP8	23.125	34.688	46.250
TYP16	23.125	34.688	46.250
Nose Gear Load			
TYP4	7.500	11.200	15.000
TYP8	15.000	22.500	30.000
TYP16	30.000	45.000	60.000
Nose Gear Tire Load			
TYP4	3.750	5.625	7.500
TYP8	7.500	11.250	15.000
TYP16	15.000	22.500	30.000

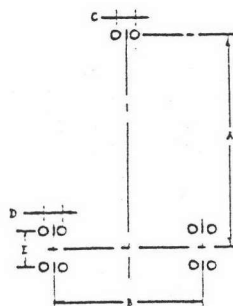
ตารางที่ 2.6 c คุณสมบัติของเครื่องบินที่ใช้ในการวิเคราะห์

Aircraft	Dimension (in.) ^b						
	A	A'	E	E'	C	D	E
4 Main-Gear Tires							
B-727-100	639.0		225.0		24.0	34.0	
B-727-100C	639.0		225.0		24.0	34.0	
B-727-200	759.0		225.0		24.0	34.0	
B-737-100	412.0		206.0		15.0	30.5	
B-737-200	448.0		206.0		15.0	30.5	
DC-9-15	524.0		197.0			24.0	
DC-9-32	638.0		197.0			25.0	
DC-9-41	676.0		192.0		14.0 ^c	26.0	
TYP4	650.0		200.0		20.0	30.0	
8 Main-Gear Tires							
B-707-320B	708.0		265.0		22.2	34.6	56.0
Convair 880	637.0		227.0		19.0	21.5	45.0
DC-8-55	692.0		250.0			30.0	55.0
DC-8-61	930.0		250.0			30.0	55.0
DC-8-62	730.0		250.0			30.0	55.0
DC-8-63	930.0		250.0		18.5 ^c	32.0	55.0
TYP8	800.0		250.0		22.0	30.0	55.0
16 Main-Gear Tires							
B-747	947.5	1068.5	433.0	150.0	36.0	44.0	58.0
TYP16	947.5	1068.5	433.0	150.0	36.0	44.0	58.0

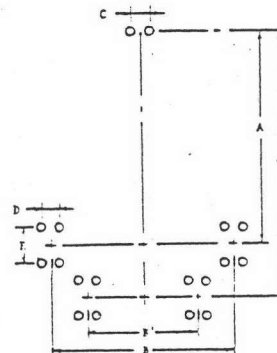
Aircraft	Maximum Load (kips)			Tire Pressure (psi)	
	Total	Main Gear	Nose Gear	Main Gear	Nose Gear
4 Main-Gear Tires					
B-727-100	161.0	149.0	17.1	150	100
B-727-100C	170.0	156.4	19.0	165	100
B-727-200	170.0	158.2	16.8	165	100
B-737-100	97.8	88.0	14.0	130	135
B-737-200	108.0	97.0	15.9	144	135
DC-9-15	90.7	84.2	6.7	124	105
DC-9-32	108.0	99.9	10.9	148	129
DC-9-41	114.0	107.0	10.8	159	130
TYP4	-b	-b	-b	160	130
8 Main-Gear Tires					
B-707-320B	328.0	298.8	34.5	180	115
Convair 880	185.0	174.1	14.5	150	118
DC-8-55	325.0	306.7	32.8	180	168
DC-8-61	325.0	312.2	27.2	184	115
DC-8-62	335.0	316.0	32.9	189	155
DC-8-63	350.0	336.4	29.3	190	191
TYP8	-b	-b	-b	185	150
16 Main-Gear Tires					
B-747	683.0	662.8	68.3	206	170
TYP16	-b	-b	-b	206	170



Aircraft With 4 Main Gear Tires



Aircraft With 8 Main Gear Tires



Aircraft With 16 Main Gear Tires

การประเมินค่าจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำของ Witeczak ค่าประเมินจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำเทียบเท่า (Predicted Traffic Valve) ให้เป็นค่าของเครื่องบินมาตรฐาน โดยมีสมการเป็น

$$N_p = \text{Max}_x \sum_j P_j \times F_j \times f_{jx} \quad \dots\dots(2.51)$$

- โดยที่ P_j = จำนวนเที่ยวที่ผ่านทางวิ่งของเครื่องบินชนิด j
 f_{jx} = แพลตเตอร์การแจกแจงความถี่ของการเกิดความเครียดสูงสุดที่ตำแหน่ง x ตามขวางทางวิ่ง
 F_j = แพลตเตอร์ความเสียหายเทียบเท่า เครื่องบิน j เทียบกับเครื่องบินมาตรฐาน
 N_p = ค่าประเมินจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำเทียบเท่า

2.5.1 แพลตเตอร์การแจกแจงความถี่ตามขวางของทางวิ่ง (Transverse Distribution Factor, f_{jx})

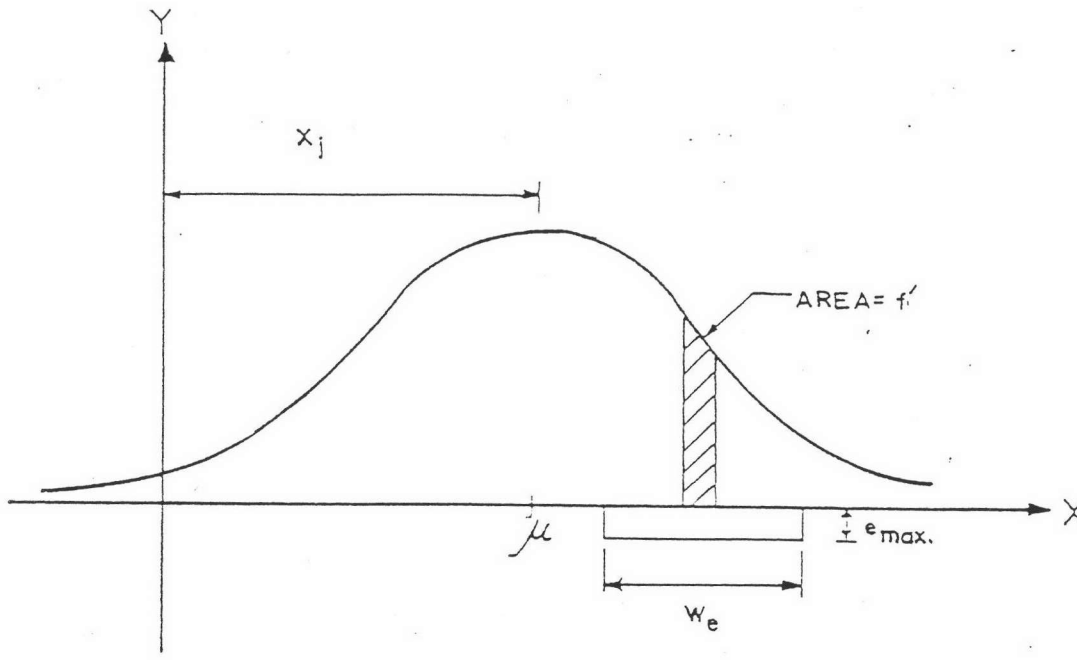
f_{jx} เป็นค่าที่แสดงความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเครียดสูงสุดที่ตำแหน่ง x ตามขวางจากเส้นศูนย์กลางทางวิ่งเมื่อเครื่องบินผ่าน 1 ครั้ง จากการศึกษาค่าแห่งของกลุ่มล้อหลักทางด้านขวางทางวิ่งของเครื่องบินที่ผ่าน พบว่าการแจกแจงความถี่เป็นแบบปกติ (Normal Distribution) ตำแหน่งของกลุ่มล้อหลักจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $m = + X_j$ จากกึ่งกลางทางวิ่ง ดังรูป 2.17 เมื่อ X_j เป็นระยะจากเส้นผ่าศูนย์กลางเครื่องบินถึงกึ่งกลางของกลุ่มล้อหลัก (Main Gear) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $s = 3.5$ ฟุต สมการการแจกแจงความถี่ที่ตำแหน่ง x ใด ๆ จะเป็น

$$y = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{s}\right)^2} \quad \dots\dots (2.52)$$

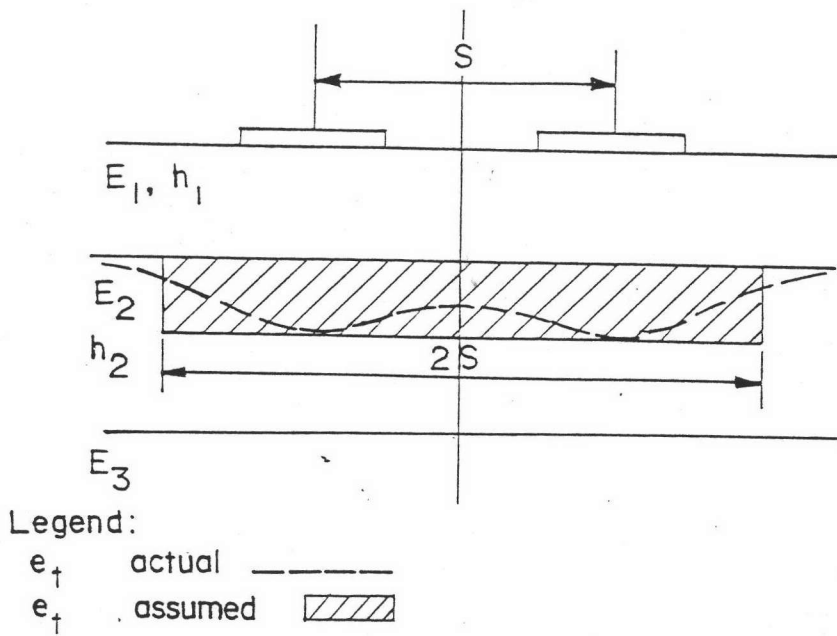
ในรูปของความน่าจะเป็นที่กลุ่มล้อหลักจะอยู่ที่ตำแหน่ง $x = a-b$ เป็น discrete frequency, f' คือ

$$f' = P(x > a) - P(x > b) \quad \dots\dots (2.53)$$

เมื่อตำแหน่งกลุ่มล้อหลักอยู่ที่ x ใด ๆ จำนวน f' ครั้งจะทำให้เกิดความเครียดสูงสุดจำนวน f' ครั้งออกไปทั้งสองข้างจากตำแหน่ง x เป็นความกว้าง $2s$ ค่าหนึ่ง เพราะฉะนั้นค่า f_{jx} ได้จากการรวมค่า f' ใต้ช่อง $x = a-b$ ทั้งหมดที่เกิดจากตำแหน่งของกลุ่มล้อหลักอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 การแจกแจงความถี่ของค่าแห่งกลุ่มล้อยหลัก



รูปที่ 2.18 a สมมุติฐานการเกิด Max. Tensile Strain บริเวณล่างสุดของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต

ในกรณีที่เครื่องบินมีหลายกลุ่มล้อหลักให้หน้า f_{jx} ของแต่ละกลุ่มล้อมารวมกัน และในกรณีพิจารณาความวิบัติจากการเกิดร่องล้อถาวร (Rutting) บนชั้นดินเดิมต้องนำจำนวนแถวของล้อบนทางวิ่งมาคิดด้วยโดยการคูณค่า f_{jx} ที่ได้ด้วยจำนวนแถวของล้อในหนึ่งกลุ่มล้อหลัก

ค่า W_e นี้จะแตกต่างกัน ถ้าเกิดกรณีความวิบัติจาก Fatigue Cracking ในชั้น A.C. ค่า $W_e = 2S$ เมื่อ S เท่ากับระยะระหว่างล้อด้านนอกสุด (ศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 a ถ้าเกิดกรณีวิบัติ Rutting บนชั้นดินเดิม $W_e = S + 2 W_t$ เมื่อ W_t คือความกว้างของล้อที่สัมผัสผิวจราจร (มีค่าเท่ากับ น้ำหนักต่อล้อ / $\sqrt{(\text{แรงดันลมยาง} \times 1.452)}$) ดังแสดงในรูป 2.18 b

2.5.2 แพคเตอร์ความเสียหายเทียบเท่า (Equivalent Traffic Value, F_j)

ค่า F_j เป็นค่าเปรียบเทียบความเสียหายหนึ่งหน่วยของเครื่องบินชนิด j กับเครื่องบินมาตรฐาน DC-8-63F

เมื่อเครื่องบิน j ผ่านทางวิ่งทำให้เกิดความเครียด (e_v หรือ e_t) N_j ครั้ง ทางวิ่งจึงวิบัติ ความเสียหายหนึ่งหน่วยเมื่อเกิดความเครียด 1 ครั้ง จะเป็น

$$d_j = l/N_j \quad \dots\dots(2.54)$$

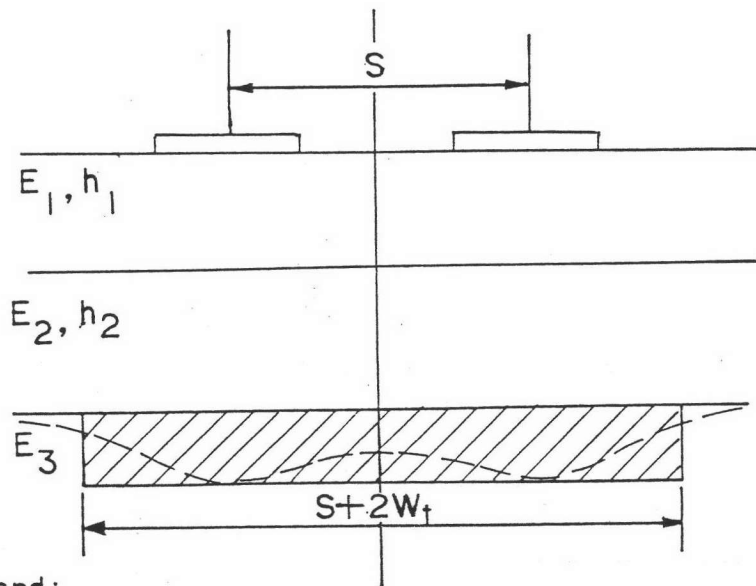
เพราะฉะนั้นค่า F_j เขียนได้เป็น


$$F_j = d_j/d_s = N_s/N_j \quad \dots\dots(2.55)$$

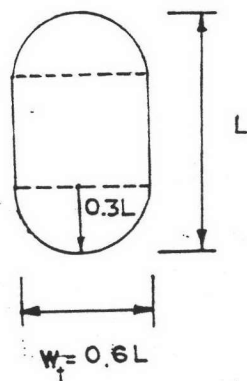
เมื่อ d_s, N_s เป็นความเสียหายหนึ่งหน่วยและจำนวนครั้งที่เกิดความเครียดจนวิบัติของเครื่องบินมาตรฐานตามลำดับค่า N_s, N_j หาได้จากการนำค่า e_v สูงสุดบนชั้นดินเดิมหรือ e_t ได้ชั้น A.C. สูงสุดของเครื่องบิน j หรือเครื่องบินมาตรฐานภายใต้ระบบชั้นทางเดียวกันมาหาค่าตามลักษณะการวิบัติที่พิจารณา โดยใช้ตารางที่ 2.1 หรือสมการที่ 2.1 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.6 ค่าจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำที่ยอมรับได้ (Allowable Traffic Value, N_a)

ค่า N_a เป็นค่าจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำที่ยอมรับได้ของเครื่องบินมาตรฐานหาได้จากค่า e_v และ e_t ของระบบชั้นทางวิ่งใด ๆ ภายใต้น้ำหนักกระทำของเครื่องบินมาตรฐาน โดยเป็นค่าการเกิดความเครียดซ้ำจนผิวจราจรเกิดการวิบัติซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.1 ในกรณีพิจารณาการเกิดรอยแตกในชั้น A.C. และตารางที่ 2.1 ในกรณีพิจารณาการเกิดร่องล้อถาวรบนชั้นดินเดิม



Legend:
 e_v actual ———
 e_v assumed 



รูปที่ 2.18 b สมมุติฐานการเกิด Max. Vertical Compressive Strain บนชั้นดินเดิม

ค่า N_a นี้จะหาที่ความหนาชั้นทางต่าง ๆ เช่นเดียวกับการหาค่า N_p ในหัวข้อ 2.5 ซึ่งความหนาชั้นทางต่างกันทำให้เกิดความเครียดในชั้นทางแตกต่างกันความหนาของชั้นทางที่ออกแบบนั้นต้องเป็นความหนาที่ N_p เท่ากับ N_a นั่นคือค่าจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำที่เกิดขึ้นในรูปเทียบเท่าเครื่องบินมาตรฐาน เท่ากับค่าจำนวนการเกิดความเครียดซ้ำที่ยอมให้ของเครื่องบินมาตรฐาน

2.7 วิธีการออกแบบความหนาผิวจราจร

แบ่งออกเป็น Tensile Strain (e_t) and Compressive Strain (e_c)

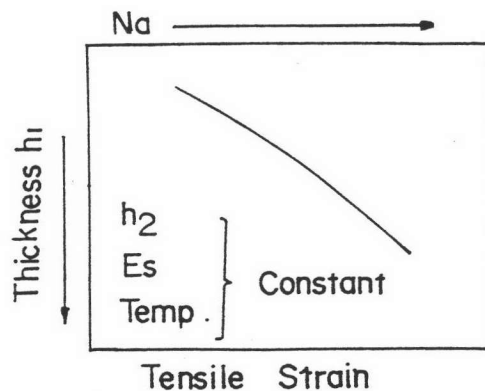
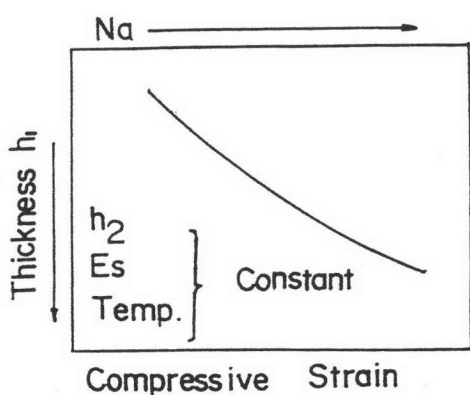
Criteria มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุชั้นทาง ลักษณะแวลล์อมที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ
2. เตรียมข้อมูลคุณลักษณะของเครื่องบินที่ออกแบบ (j) แต่ละชนิดและเครื่องบินมาตรฐาน รวมทั้งจำนวนเที่ยวของเครื่องบินที่ออกแบบ P_j
3. คำนวณอีลาสติกโมดูลัสของชั้น A.C. (E_1)
4. คำนวณ f_{jx} ของเครื่องบินเครื่องบิน j ที่ออกแบบทุกชนิด
5. กำหนดความหนาชั้นพื้นทาง (h_2)
6. สุ่มความหนาชั้น A.C. (h_1)
7. คำนวณอีลาสติกโมดูลัสของชั้นพื้นทาง (E_2)
8. คำนวณหาค่า e_c หรือ e_t แล้วแต่ชนิดการพิจารณาของเครื่องบิน j และเครื่องบินมาตรฐาน
9. คำนวณหาค่า F_j
10. คำนวณหาค่า $N_p = \text{Max}_x \sum_j P_j \times F_j \times F_{jx}$
11. คำนวณหาค่า $N_a = f(e_t)$ หรือ $f(e_c)$ ของเครื่องบินมาตรฐาน
12. เปลี่ยนค่าความหนา h_1 ของชั้น A.C. ใหม่ แล้วดำเนินการต่อไปตามขั้นตอนที่ 6
13. หาความสัมพันธ์ $h_1 - N_a$ และ $h_1 - N_p$
14. หาค่า h_1 ออกแบบที่ $N_a = N_p$ จากกราฟรูปที่ 2.19 เลือกค่า h_1 ออกแบบที่ได้สูงสุดจากทั้ง 2 กรณีมาใช้
15. กำหนดค่าความหนาชั้นพื้นทาง (h_1) ใหม่ถ้าต้องการ แล้วดำเนินการต่อไปตามขั้นตอนที่ 5

ลักษณะหน้าตัดชั้นทางที่ออกแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 2.20

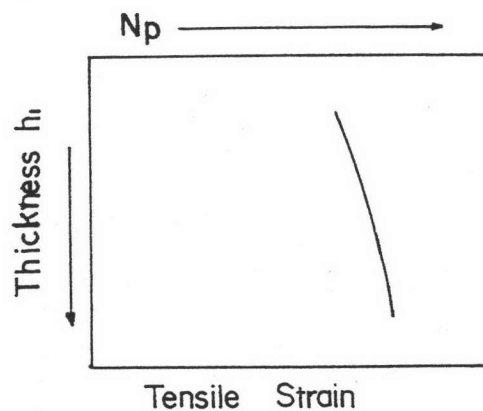
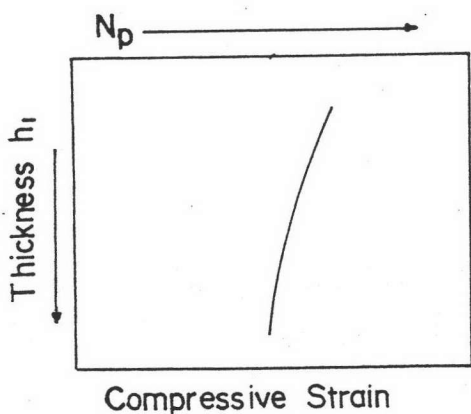
ALLOWABLE TRAFFIC VALUE ANALYSIS

Allowable Equivalent DC-8-63F Strain Repetitions



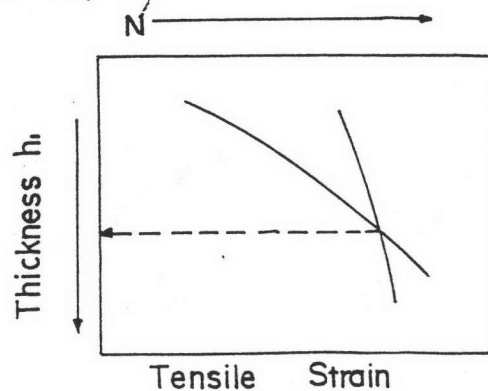
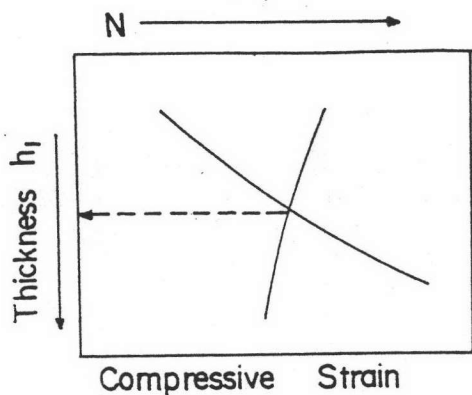
PREDICTED TRAFFIC VALUE ANALYSIS

Predicted Equivalent DC-8-63F Strain Repetitions



GRAPHICAL SOLUTION TO OBTAIN DESIGN h_i

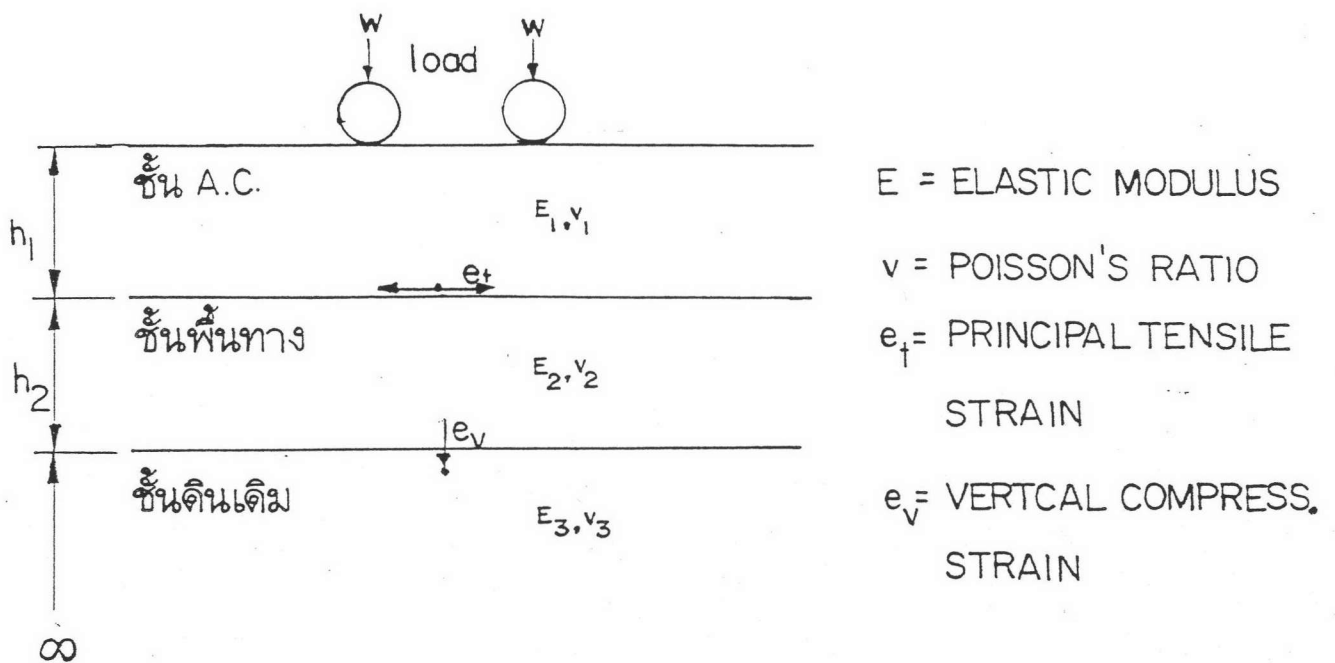
Equivalent DC-8-63F Strain Repetitions



Top of Subgrade

Bottom of Asphalt Concrete

รูปที่ 2.19 การหาค่าความหนาชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้กราฟ



รูปที่ 2.20 หน้าตัดทางวงสนามบนแบบ 3 ชั้น