

## บทที่ 2

### การหามุมเรียงแถบไม้ที่เหมาะสม

#### 2.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีหาแบบการเรียงแถบไม้ที่เหมาะสมที่สุด จากการสำรวจเอกสารพบว่ามมมีอิทธิพลต่อความแข็งแรง แต่ความเข้าใจต่อสมบัติเชิงกลของไม้ก็เป็นสิ่งจำเป็นเพราะวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ทำโอเอสแอลคือไม้ ไม้เป็นวัสดุออร์โธโทรปิก คือพิจารณาสมบัติต่างๆ ตามแกนหลัก 3 แกนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันคือ แกนตามเส้น แกนตั้งฉากกับเส้นในแนวรัศมีหรือวงปีของไม้ และแกนตั้งฉากกับเส้นในแนวสัมผัสวงปี ดังนั้นการคำนวณความเค้นและความเครียดจะต้องแปลงเข้าสู่แกนหลักทั้งสาม ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดในแนวใดๆ เขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ สมการที่ใช้ถูกปรับจากระบบ 3 มิติให้เป็นระบบ 2 มิติคือคิดความเค้นในระนาบเพื่อง่ายแก่การคำนวณ ความเครียดที่เกิดขึ้นในโอเอสแอลเป็นไปตามสมมติฐานของเคิร์ชฮอฟฟ์ที่ประกอบด้วยความเครียดตามแนวแกนและความเครียดเนื่องจากความโค้ง ความเครียดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อโอเอสแอลเขียนอยู่ในรูปของระบบสมการ โดยเมทริกซ์ของน้ำหนักบรรทุกเท่ากับผลคูณของเมทริกซ์ความแข็งตั้งของโอเอสแอลและเมทริกซ์ความเครียดซึ่งเป็นระบบสมการที่ซับซ้อน

เมื่อทราบความเค้นที่เกิดขึ้นในโอเอสแอลแล้วความเค้นนี้จะทำให้วัสดุวิบัติเมื่อความเค้นเกินขอบเขตทฤษฎีความวิบัติ โครงงานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ความวิบัติ 2 ทฤษฎีเปรียบเทียบกันคือเกณฑ์ความเค้นสูงสุดและเกณฑ์ความวิบัติของไซ-ฮิลล์ เกณฑ์ความเค้นสูงสุดพิจารณาความเค้นในแต่ละแกนหลักเป็นอิสระต่อกัน ต่างจากเกณฑ์ความวิบัติของไซ-ฮิลล์ที่ความเค้นในแนวต่างๆ มีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน เกณฑ์ความวิบัติทำให้ทราบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สามารถรับได้ แต่โอเอสแอลนั้นเรียงตัวเป็นชั้นๆ และแต่ละชั้นก็สามารถเรียงมุมต่างกันได้ การหาแบบการเรียงมุมที่ดีที่สุดที่จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากที่สุดจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตโอเอสแอล และเป็นเนื้อหาหลักของบทนี้ด้วย วิธีหาแบบการเรียงที่เหมาะสมที่สุดใช้การหาแบบที่รับน้ำหนักบรรทุกที่สูงที่สุด และด้วยเงื่อนไขที่ว่าโอเอสแอลที่คำนวณนี้ใช้เป็นคาน ดังนั้นจึงพิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดเท่านั้น นอกจากนั้นในบทนี้ยังศึกษาความอ่อนไหวของความแข็งแรงต่อสมบัติเชิงกลและมุมแถบไม้ที่เปลี่ยนไปจากจุดออกแบบ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับความแข็งแรงดัดของโอเอสแอลเมื่อค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้อีกด้วย

2.2 การคำนวณความเค้นในโอเอสแอล

ไม้ที่ใช้ทำโอเอสแอลจัดเป็นวัสดุออร์โททรอปิก การคำนวณความเครียดและความเค้นจึงเป็นไปตามหลักการของวัสดุชนิดนี้ และเนื่องจากโอเอสแอลเรียงตัวเป็นชั้นๆ จึงใช้สมมติฐานของเคิร์ชอฟฟ์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่เรียงตัวเป็นชั้น แล้วจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโอเอสแอลกับความเครียด-ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ

2.2.1 วัสดุออร์โททรอปิก (Orthotropic Material)

ไม้จัดเป็นวัสดุออร์โททรอปิก ดังนั้นสมบัติเชิงกล ความเครียดและความเค้นต่างๆ จึงพิจารณาในทิศทางหลักของวัสดุ 3 ทิศทางและเป็นทิศทางที่ตั้งฉากกันคือ ทิศทางตามเส้น (L) หรือทิศทาง 1 ทิศทางแนวสัมผัสตั้งฉากกับเส้น (T) หรือทิศทาง 2 และทิศทางตามรัศมีตั้งฉากกับเส้น (R) หรือทิศทาง 3 ดังรูป Fig.2.1a

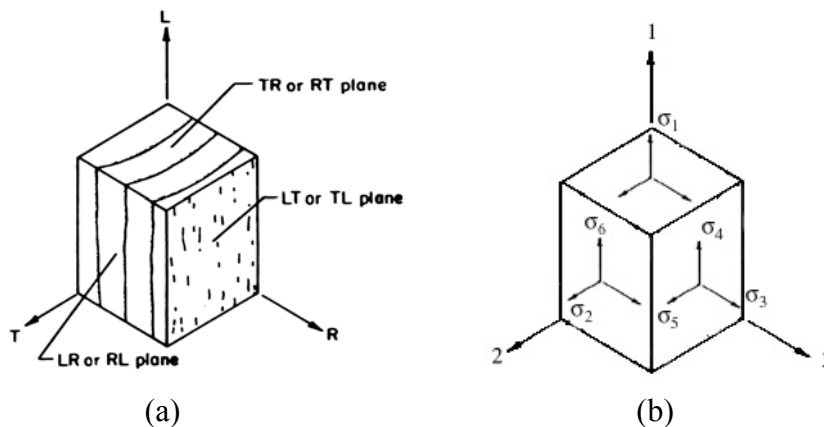


Fig.2.1 Principal stresses following principal axes and principal planes

ความเค้นที่เกิดขึ้นในองค์ประกอบเล็กๆ มีสัญลักษณ์ตามรูป Fig.2.1b สัญลักษณ์  $\sigma_1$   $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$  คือ ความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นในทิศทาง 1 2 และ 3 ตามลำดับ  $\sigma_4$   $\sigma_5$  และ  $\sigma_6$  คือ ความเค้นเฉือน อาจเขียนได้เป็น  $\tau_{13}$   $\tau_{23}$  และ  $\tau_{12}$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับวัสดุออร์โททรอปิกใน 3 มิติ ตามระบบแกนหลักของวัสดุ (principal material coordinate system) 1 2 และ 3 เขียนเป็นระบบของสมการคือ

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.1)$$

$\epsilon_1$  ,  $\epsilon_2$  ,  $\epsilon_3$  คือความเครียดตั้งฉากในทิศทาง 1 2 และ 3 ตามลำดับ

$\gamma_{13}$  ,  $\gamma_{23}$  ,  $\gamma_{12}$  คือความเครียดเฉือนในระนาบต่างๆ

เมทริกซ์สัมประสิทธิ์เรียกว่า เมทริกซ์คอมพลายแอนซ์ (compliance matrix)

และสำหรับภาวะความเค้นในระนาบ (plane stress)  $\sigma_3 = 0$  และ  $\tau_{13} = \tau_{23} = 0$  ระบบสมการที่

(2.1) จะกลายเป็น

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.2)$$

จะได้

$$\begin{aligned} \gamma_{23} &= 0 \quad \text{และ} \quad \gamma_{13} = 0 \\ \epsilon_3 &= S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \end{aligned}$$

และเมื่อพิจารณาเฉพาะสมการย่อยที่ 1 2 และ 6 ในระบบสมการ (2.2) ข้างต้น จะได้

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.3)$$

แปลงความเค้นให้เป็นฟังก์ชันของความเครียดได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_{12} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.4ก)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.4ข)$$

โดยที่

- $E_1$  คือโมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง 1 หรือ ทิศทางตามเส้น
- $E_2$  คือโมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง 2 หรือ ทิศทางตั้งฉากเส้น
- $G_{12}$  คือโมดูลัสเฉือนในระนาบ 12

$v_{12}$  คืออัตราส่วนพัชของสี่ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความเครียดในแกน 2 ต่อความเครียดในแกน 1 เมื่อมีแรงกระทำในแนวแกน 1 เท่านั้น มีความสัมพันธ์กับ  $v_{21}$  ดังนี้คือ

$$\frac{v_{12}}{E_1} = \frac{v_{21}}{E_2}$$

สมการ (2.4) อาจเขียนได้เป็น

$$\{\sigma\}_{12} = [Q]\{\epsilon\}_{12} \dots\dots\dots(2.5)$$

เมื่อ  $[Q]$  คือ เมทริกซ์ความแข็งเกร็ง (stiffness matrix)

สำหรับความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางหลัก 1 และ 2 สามารถหาได้จากความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทาง  $xy$  ใดๆ จากสมการ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & -(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots(2.6)$$

หรือเขียนย่อเป็น

$$\{\sigma\}_{12} = [T]\{\sigma\}_{xy} \dots\dots\dots(2.7)$$

เมื่อ  $[T]$  คือเมทริกซ์ตัวแปลง (transformation matrix) โดยที่

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & -(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix}$$

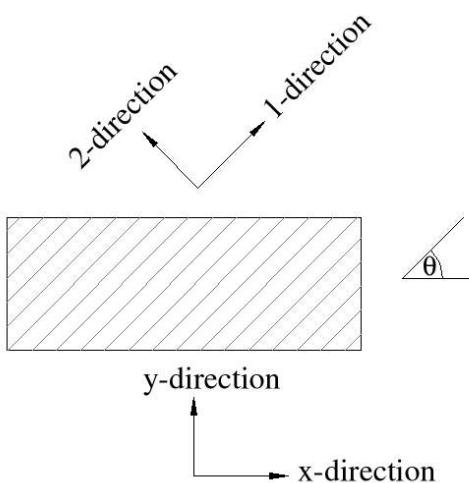


Fig.2.2 Principal axes (1-direction, 2-direction) and arbitrary axes (x-direction, y-direction) with angle  $\theta$

ความเค้นและความเครียดในทิศทางใด ๆ มีความสัมพันธ์กันคือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

หรืออาจเขียนได้เป็น

$$\{\sigma\}_{xy} = [\bar{Q}]\{\varepsilon\}_{xy} \quad \dots\dots\dots(2.9ก)$$

เมื่อ  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  คือความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

$\tau_{xy}$  คือความเค้นเฉือนในระนาบ xy

$[\bar{Q}]$  คือ เมทริกซ์ความแข็งตั้งทั่วไป (Overall Stiffness Matrix)

สมาชิกในเมทริกซ์สัมประสิทธิ์คือ

$$\left. \begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{22}n^4 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})n^2m^2 + Q_{12}(n^4 + m^4) \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})nm^3 + (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{66})n^3m \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{22}m^4 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})n^3m + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})nm^3 \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{66}(n^4 + m^4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.9ข)$$

เมื่อ  $m = \cos \theta, n = \sin \theta$

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-ความเค้นทั้งที่เกิดขึ้นในแกนหลักและแกนใด ๆ แล้ว ต่อไปก็จะกล่าวถึงที่มาของความเครียดตามสมมติฐานของเคอร์ชชอฟฟ์

### 2.2.2 สมมติฐานของเคอร์คอฟฟ์ (Kirchhoff Hypothesis)

ความเครียดที่เกิดขึ้นที่ระยะความลึก z จากแนวกึ่งกลางตามสมมติฐานของเคอร์ชชอฟฟ์ (Jones, 1975) คือ

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

เมื่อ  $\varepsilon_x^0$  และ  $\varepsilon_y^0$  คือความเครียดตั้งฉากในแนวกึ่งกลางตามแกน x และ y

$\gamma_{xy}^0$  คือความเครียดเฉือนในแนวกึ่งกลาง

$\kappa_x$ ,  $\kappa_y$  และ  $\kappa_{xy}$  คือความโค้งในแนวกึ่งกลาง

สมการ (2.10) เขียนย่อเป็น

$$\{\varepsilon\}_{xy} = \{\varepsilon\}^0 + z\{\kappa\} \dots\dots\dots(2.11)$$

ในกรณีที่วัสดุแบ่งออกเป็นชั้น ๆ สมบัติของวัสดุอาจต่างกันไปในแต่ละชั้น จึงต้องกำหนดให้ชัดเจนเช่น เมทริกซ์ความแข็งเกร็งทั่วไปของชั้นที่ k จะเขียนได้เป็น  $[\bar{Q}]_k$  เมื่อแทนค่าจากสมการ (2.10) ลงในสมการ (2.9) ความเค้นต่าง ๆ ของวัสดุในชั้นที่ k เป็นระยะ z จากแนวกึ่งกลางคือ

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 + z\kappa_x \\ \varepsilon_y^0 + z\kappa_y \\ \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.12)$$

ตัวห้อย k หมายถึง เป็นของวัสดุในชั้นที่ k

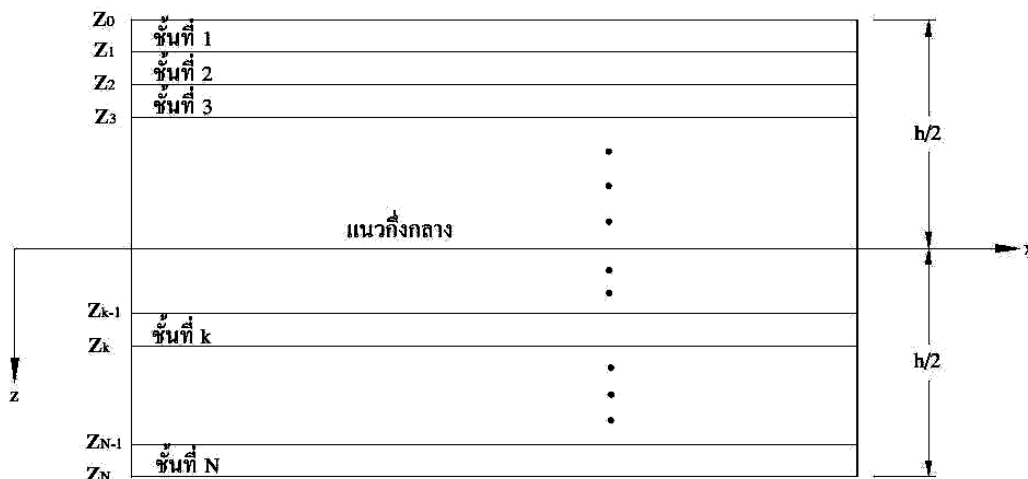


Fig.2.3 Layer k of distance z from center line datum

พฤติกรรมการโก่งงอหรือการยืดหดตัวทำให้เกิดความเครียดขึ้น และที่มาของการโก่งงอหรือยืดหดนั้นก็เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อวัสดุ จึงมีความจำเป็นต้องเชื่อมโยงพฤติกรรมเหล่านี้ให้สัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2.3 แรงลัพธ์และโมเมนต์ลัพธ์ที่กระทำกับวัสดุที่เป็นชั้น (Resultant Laminate Forces and Moments) (Jones, 1975)

น้ำหนักบรรทุกที่กระทำแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ แรงและโมเมนต์ดัด แรงลัพธ์และโมเมนต์ลัพธ์ที่กระทำกับวัสดุที่เป็นชั้นหาได้จากการอินทิเกรตความเค้นในแต่ละชั้นตลอดความหนา แล้วได้แรงและโมเมนต์ที่สัมพันธ์กับความเครียดและความโค้งที่แนวกึ่งกลางตามสมการ 2.13

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon\}^0 + [B]\{\kappa\} \dots\dots\dots(2.13-ก)$$

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon\}^0 + [D]\{\kappa\} \dots\dots\dots(2.13-ข)$$

เมื่อ

$$\{N\} = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix}, \{M\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix}, \{\epsilon\}^0 = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \text{ และ } \{K\} = \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix}$$

$N_x$   $N_y$  และ  $N_{xy}$  มีหน่วยเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยความยาว

$M_x$   $M_y$  และ  $M_{xy}$  เป็นโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว

[A] คือเมทริกซ์ความแข็งเกร็งยืดหด (Extensional Stiffnesses Matrix)

[B] คือเมทริกซ์ความแข็งเกร็งควบคู่ (Coupling Stiffnesses Matrix)

[D] คือเมทริกซ์ความแข็งเกร็งดัดโค้ง (Bending Stiffnesses Matrix)

โดยสมาชิกในเมทริกซ์ความแข็งเกร็งเหล่านี้มีค่าเท่ากับ

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z_k - z_{k-1}) \dots\dots\dots(2.13-ค)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z_k^2 - z_{k-1}^2) \dots\dots\dots(2.13-ง)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z_k^3 - z_{k-1}^3) \dots\dots\dots(2.13-จ)$$

$z_k$  คือระยะจากแกว่งกลางหรือแกว่งอ้างอิงถึงชั้นที่  $k$  ตามรูปที่ 4

$\bar{Q}_{ijk}$  คือสมาชิกในตำแหน่ง  $ij$  ของเมทริกซ์ความแข็งเกร็งทั่วไป  $[\bar{Q}]$  ในชั้นที่  $k$

$[\bar{Q}]$  คือเมทริกซ์ความแข็งเกร็งทั่วไป นิยามตามสมการ (2.9)

หรือเขียนได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ K \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.14)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความโค้งในแกว่งกึ่งกลางกับแรงและโมเมนต์ลัพธ์ที่กระทำ สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ K \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ H' & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.15ก)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} A' &= A^{-1} - (-A^{-1}B)(D - BA^{-1}B)^{-1}(BA^{-1}) \\ B' &= (-A^{-1}B)(D - BA^{-1}B)^{-1} \\ D' &= (D - BA^{-1}B)^{-1} \\ H' &= -(D - BA^{-1}B)^{-1}(BA^{-1}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.15ข)$$

### 2.2.4 ขั้นตอนการหาความเค้นในโอเอสแอล

เมื่อทราบสมการต่างๆที่ใช้สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดและน้ำหนักบรรทุกแล้ว ขั้นตอนการหาความเค้นในโอเอสแอลที่เรียงเป็นชั้นๆจึงสรุปได้ดัง Fig.2.4 ดังนี้

- 1) กำหนดน้ำหนักบรรทุก (load) ได้แก่  $N_x$   $N_y$   $N_{xy}$   $M_x$   $M_y$  และ  $M_{xy}$
- 2) คำนวณเมทริกซ์ความแข็งเกร็ง  $[A]$   $[B]$  และ  $[D]$  โดยสมการ 2.13ค – 2.13จ ซึ่งต้องการ  $\bar{Q}_{ij}$  จากสมการ 2.4 และ 2.9 และสมบัติเชิงกลของวัสดุ ได้แก่  $E_1$   $E_2$   $G_{12}$  และ  $\nu_{12}$
- 3) คำนวณความเครียดที่แนวอ้างอิงและความโค้ง ได้แก่  $\epsilon_x^0$   $\epsilon_y^0$   $\gamma_{xy}^0$   $k_x$   $k_y$  และ  $k_{xy}$  จากสมการ 2.15
- 4) คำนวณความเครียดของชั้นต่างๆ ได้แก่  $\epsilon_x$   $\epsilon_y$  และ  $\gamma_{xy}$  โดยใช้สมมติฐานของเคอร์ชชอฟฟ์จากสมการ 2.10
- 5) คำนวณความเค้นในแกน  $xy$  ใดๆ ได้แก่  $\sigma_x$   $\sigma_y$  และ  $\sigma_{xy}$  จากสมการ 2.8
- 6) คำนวณความเค้นตามแกนหลักของวัสดุ ได้แก่  $\sigma_1$   $\sigma_2$  และ  $\tau_{12}$  โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดและเมทริกซ์ตัวแปลงตามสมการ 2.6

อีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญคือ โอเอสแอลในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นคาน จึงสมมติให้รับโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนโอเอสแอล ได้แก่  $N_x$  ,  $N_y$  ,  $N_{xy}$ ,  $M_y$  ,  $M_{xy}$  ทุกตัวมีค่าเป็น 0 แต่  $M_x \neq 0$  ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคตรงกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ (Hyer, 1998) เป็นไปดังชุดสมการ 2.16

$$\sigma_1 = U \cdot M_x \quad \dots\dots\dots(2.16-ก)$$

$$\sigma_2 = V \cdot M_x \quad \dots\dots\dots(2.16-ข)$$

$$\tau_{12} = W \cdot M_x \quad \dots\dots\dots(2.16-ค)$$

เมื่อ  $U$   $V$  และ  $W$  เป็นค่าคงที่ หาได้โดยแทนค่า  $M_x = 1$  ในขั้นตอนการหาความเค้นตาม Fig.2.4

เมื่อทราบโมเมนต์ดัดก็จะทราบความเค้นที่เกิดขึ้น โดยค่าความแข็งแรงของวัสดุจะเป็นตัวบ่งบอกถึงขอบเขตความเสียหายของวัสดุ ในทางกลับกันถ้าทราบความแข็งแรงหรือขอบเขตความเสียหายของวัสดุเราก็สามารถทราบโมเมนต์ดัดสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้เช่นกัน



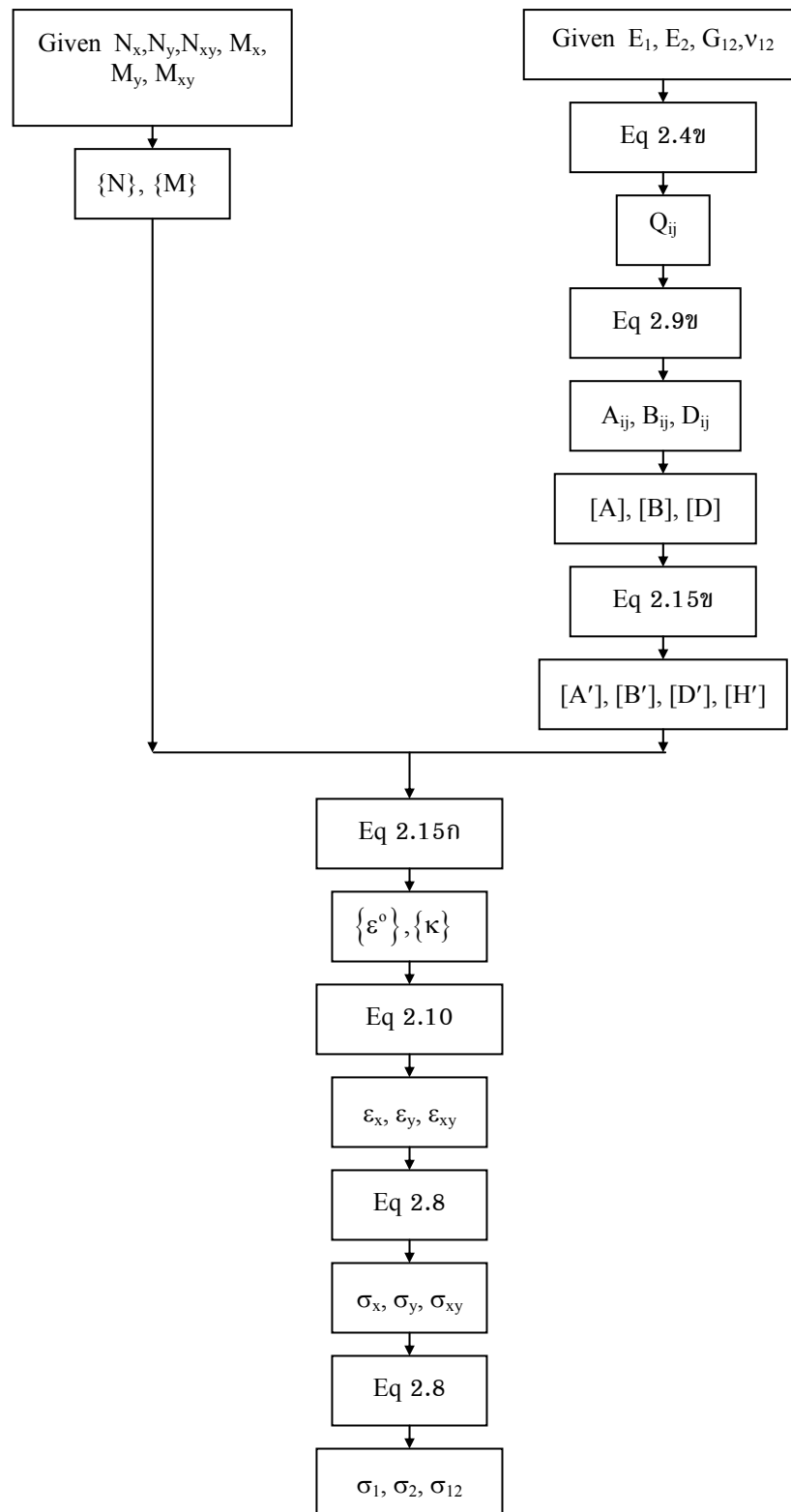


Fig.2.4 Principal stresses determination diagram

## 2.3 ขอบเขตที่ใช้กำหนดการวิบัติ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวัสดุออร์โททรอปิกมักจะพิจารณาเฉพาะความเค้นตามแกนหลัก ขอบเขตความเสียหายจึงถูกทำนายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตามแกนหลักในแนวต่าง ๆ ซึ่งจากการสำรวจเอกสารมี 2 ทฤษฎีที่จะนำมาใช้คือ ทฤษฎีความเค้นสูงสุด และทฤษฎีของไซ-ฮิลล์

### 2.3.1 ทฤษฎีความเค้นสูงสุด

ตามสมการ 1.1

$$C_1 < \sigma_1 < T_1 \quad \dots\dots\dots (1.1-ก)$$

$$C_2 < \sigma_2 < T_2 \quad \dots\dots\dots (1.1-ข)$$

$$|\tau_{12}| < S_{12} \quad \dots\dots\dots (1.1-ค)$$

วัสดุเกิดการวิบัติก็ต่อเมื่อ

$$\sigma_1 \leq C_1 \quad \dots\dots\dots(2.17-ก)$$

หรือ  $\sigma_1 \geq T_1 \quad \dots\dots\dots(2.17-ข)$

หรือ  $\sigma_2 \leq C_2 \quad \dots\dots\dots(2.17-ค)$

หรือ  $\sigma_2 \geq T_2 \quad \dots\dots\dots(2.17-ง)$

หรือ  $\tau_{12} \leq -S_{12} \quad \dots\dots\dots(2.17-จ)$

หรือ  $\tau_{12} \geq S_{12} \quad \dots\dots\dots(2.17-ฉ)$

โอเอสแอลรับโมเมนต์ตัดเพียงอย่างเดียวตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไว้แล้ว เมื่อแทนชุดสมการ 2.16 ลงในชุดสมการ 2.17 จะได้

$$M_x = \frac{-X_C}{U} \quad \dots\dots\dots(2.18-ก)$$

$$M_x = \frac{X_T}{U} \quad \dots\dots\dots(2.18-ข)$$

$$M_x = \frac{-Y_C}{V} \quad \dots\dots\dots(2.18-ค)$$

$$M_x = \frac{Y_T}{V} \quad \dots\dots\dots(2.18-ง)$$

$$M_x = \frac{-S}{W} \quad \dots\dots\dots(2.18-จ)$$

$$M_x = \frac{S}{W} \quad \dots\dots\dots(2.18-ฉ)$$

จากชุดสมการ 2.18 โมเมนต์ใดที่ให้ค่าต่ำสุดจะเป็นโมเมนต์สูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้สำหรับทฤษฎีความเค้นสูงสุด

### 2.3.2 เกณฑ์ความเสียหายของไซ-ฮิลล์

ตามสมการ 1.2 คือ

$$\frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} < 1 \quad \dots\dots\dots(1.2)$$

เมื่อแทนชุดสมการ 2.16 ลงในสมการ 1.2 เพื่อหาโมเมนต์สูงสุด แล้วกำหนดให้พจน์ทางซ้ายมือเท่ากับ 1 จะได้

$$\frac{(U \cdot M_x)^2}{X^2} - \frac{(U \cdot M_x)(V \cdot M_x)}{X^2} + \frac{(V \cdot M_x)^2}{Y^2} + \frac{(W \cdot M_x)^2}{S^2} = 1$$

ดังนั้นโมเมนต์สูงสุดสำหรับทฤษฎีไซ-ฮิลล์คือ

$$M_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{U^2}{X^2} - \frac{U \cdot U}{X^2} + \frac{V^2}{Y^2} + \frac{W^2}{S^2}}} \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

ความแข็งแรงในแต่ละทิศทางมีทั้งค่าที่เป็นบวกและลบคือ  $-X_C$  (เท่ากับ  $C_1$  ตามสมการ 1.1) กับ  $+X_T$  ( $T_1$ ) และ  $-Y_C$  ( $C_2$ ) กับ  $+Y_T$  ( $T_2$ ) ในทิศทาง 1 และ 2 ตามลำดับ จะเลือกใช้ค่าใดแทนลงสมการก็ขึ้นอยู่กับความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางนั้น ๆ ถ้าความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นลบหรือเกิดความเค้นอัด ความแข็งแรงที่แทนในสมการให้ใช้  $-X_C$  ( $C_1$ ) หรือ  $-Y_C$  ( $C_2$ ) แล้วแต่ทิศทาง 1 หรือ 2 แต่ถ้าความเค้นเป็นบวกหรือเกิดความดึงก็จะใช้  $+X_T$  ( $T_1$ ) หรือ  $+Y_T$  ( $T_2$ ) แทนลงในสมการ

โมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการ 2.18 และ 2.19 จะเป็นค่าความแข็งแรงของวัสดุที่ต้องการ แต่โอเอสแอลสามารถเรียงมุมได้หลายแบบ การหาแบบที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุดจึงเป็นเป้าหมายสำคัญที่สุดของงานวิจัยนี้

## 2.4 การหาแบบการเรียงตัวที่เหมาะสมของโอเอสแอล

### 2.4.1 รูปแบบการเรียงแถบไม้

การเรียงตัวที่เหมาะสมที่สุดถูกกำหนดด้วยความแข็งแรงสูงสุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งสำหรับคานไม้ประกอบโอเอสแอลก็คือ “แบบการเรียงที่รับโมเมนต์ดัดได้สูงสุดจะเป็นแบบการเรียงที่ดีที่สุด” แม้การเรียงตัวทำได้หลายแบบ แต่ก็พอจะสรุปคร่าว ๆ ได้ 3 แบบคือ

(1) การเรียงตัวแบบสมมาตร (Symmetry Laminate) ใช้สัญลักษณ์ตัวห้อย S โดยชั้นที่อยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางเป็นระยะที่เท่ากันจะมีสมบัติเหมือนกันและวางมุมในแนวเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น โอเอสแอล 6 ชั้นวางมุมแบบสมมาตรดังนี้  $[45^\circ, 30^\circ, 15^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ]_T$  หรือเขียนเป็น  $[45^\circ, 30^\circ, 15^\circ]_S$  เป็นต้น

(2) การเรียงตัวแบบไขว้สมมาตร (Anti-symmetry Laminate) ใช้สัญลักษณ์ตัวห้อย A โดยชั้นที่อยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางเป็นระยะที่เท่ากันจะมีสมบัติเหมือนกัน แต่มุมมี

เครื่องหมายตรงข้ามกัน เช่นโอเอสแอล 6 ชั้นวางมุมแบบไขว้สมมาตรดังนี้  $[45^\circ, 30^\circ, 15^\circ, -15^\circ, -30^\circ, -45^\circ]_T$  หรือเขียนเป็น  $[45^\circ, 30^\circ, 15^\circ]_A$  เป็นต้น

(3) การเรียงตัวแบบไม่สมมาตร (Non-symmetry Laminate) จะเรียงมุม นอกเหนือจาก 2 แบบข้างต้น มักจะใช้สัญลักษณ์ T ซึ่งหมายถึงแสดงมุมทุกชั้น

เมื่อพิจารณาสมการ 2.13-ข เมื่อมีโมเมนต์ดัด  $M_x$  เพียงอย่างเดียวจะได้

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.20)$$

ผลของการเรียงตัวแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร จะทำให้สมาชิกในเมทริกซ์ความแข็งดัดโค้งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ( $D_{16} \neq 0$ ) เมื่อมีโมเมนต์จะทำให้เกิดการบิดตัวตามแนวแกน ( $\kappa_{xy} \neq 0$ ) ต่างจากการเรียงตัวแบบไขว้สมมาตรที่  $D_{16} = 0$  เมื่อมีโมเมนต์มากกระทำจะไม่บิดตัว ( $\kappa_{xy} = 0$ ) โอเอสแอลที่จะทำขึ้นในงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้เรียงตัวแบบสมดุล

2.4.2 เทคนิคการหาแบบการเรียงที่ดีที่สุด

เทคนิคที่ใช้ในการหาการเรียงตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้คือ การค้นหาแบบสุ่มครั้งละหนึ่งตัวแปร (Univariate search) เมื่อทราบแบบของการเรียงตัวที่เหมาะสมที่สุดโดยประมาณจากวิธีการนี้แล้ว อาจจะใช้วิธีการค้นหาอย่างละเอียด (Exhaustive Search) ในบริเวณใกล้เคียงเพื่อหาการเรียงที่เหมาะสมที่สุดอีกครั้งหนึ่ง

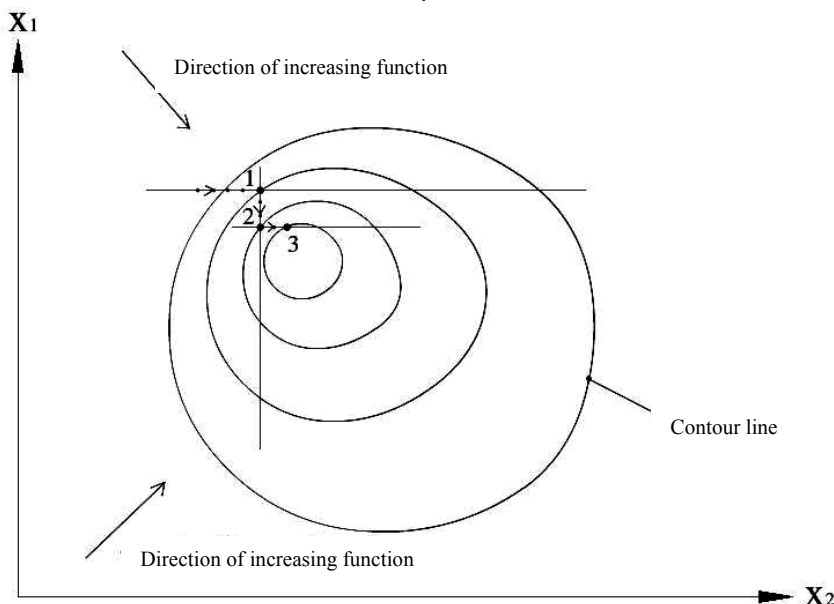


Fig.2.5 Optimized function by Univariate Search method

การค้นหาแบบสุ่มครั้งละหนึ่งตัวแปรเป็นวิธีการค้นหา (Search Method) วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพเมื่อตัวแปรแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ดัง Fig.2.5 ฟังก์ชันที่ต้องการขึ้นอยู่กับ

ตัวแปร  $x_1$  และ  $x_2$  เส้นคอนทัวร์แสดงถึงค่าฟังก์ชันที่มีค่าเท่ากัน การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเริ่มจากกำหนดตัวแปร  $x_1$  เป็นค่าคงที่และเปลี่ยนตัวแปร  $x_2$  จนได้ค่าสูงสุดที่จุดที่ 1 จากนั้นกำหนดตัวแปร  $x_2$  เป็นค่าคงที่แล้วเปลี่ยนตัวแปร  $x_1$  ได้ค่าสูงสุดที่จุดที่ 2 ต่อกำหนดตัวแปร  $x_1$  เป็นค่าคงที่และเปลี่ยนตัวแปร  $x_2$  จนได้ค่าสูงสุดที่จุดที่ 3 ทำซ้ำเช่นนั้นจนบรรลุค่าสูงสุด จึงสรุปว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าฟังก์ชันสูงสุด ณ จุดสิ้นสุดของการค้นหา

วิธีการค้นหาอย่างละเอียดจะแบ่งช่วงการออกแบบออกเป็นตาราง (สำหรับสองตัวแปร) โดยความละเอียดของ  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$  ขึ้นอยู่กับขนาดความไม่แน่นอนที่กำหนดขึ้นเอง หาค่าฟังก์ชันทุก ๆ จุดจนครอบคลุมช่วงที่ต้องการ แล้วเปรียบเทียบหาค่าที่ดีที่สุดตาม Fig.2.6

การค้นหาแบบสุ่มครั้งละหนึ่งตัวแปรจะเปลี่ยนมุมการเรียงทีละชั้นและหาค่ามุมที่สามารถให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด เมื่อหาค่ามุมที่ดีที่สุดสำหรับชั้นนั้นๆ แล้วก็ทำการเปลี่ยนค่ามุมสำหรับชั้นถัดไป ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบตามจำนวนชั้น ยกตัวอย่างเช่นเรียงวัสดุ 10 ชั้นเริ่มต้นจาก  $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]_s$  เปลี่ยนค่ามุมในชั้นที่ 1 ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่  $[15^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]_s$  จากนั้นเปลี่ยนค่ามุมในชั้นที่ 2 โดยยังคงค่ามุมในชั้นที่ 1 ที่  $15^\circ$  ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่  $[15^\circ, 8^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]_s$  และทำเช่นนี้ไปจนครบจำนวนชั้นที่กำหนดไว้ (ในตัวอย่างนี้คือ 10 ชั้น) สมมติได้การเรียงตัวเป็นดังนี้คือ  $[15^\circ, 8^\circ, 3^\circ, 0^\circ, 0^\circ]_s$  แต่การค้นหายังไม่สิ้นสุด โดยจะเริ่มกระบวนการทั้งหมดใหม่อีกครั้งหนึ่งโดยเริ่มต้นด้วยมุมเรียงชั้นต่าง ๆ ที่ได้จากการค้นหารอบที่ผ่านมาจนครบทุกชั้น ทำซ้ำจนกระทั่งการเรียงมุมในแต่ละชั้นไม่เปลี่ยนแปลงอีก จึงหยุดการค้นหา

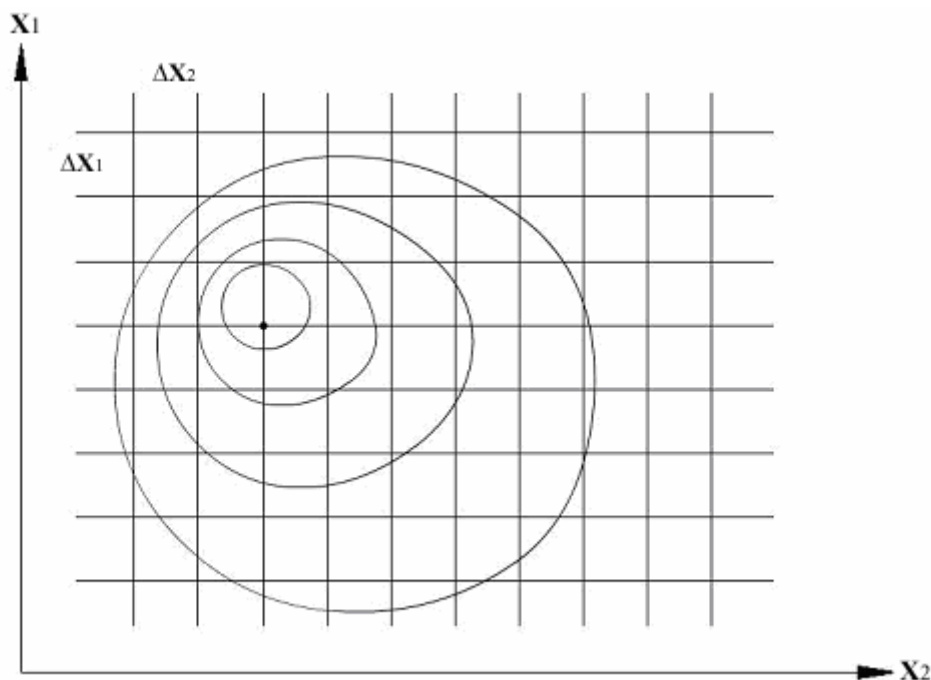


Fig.2.6 Optimized function by Exhaustive Search method

วิธีการค้นหาอย่างละเอียดตาม Fig.2.6 เป็นวิธีที่ต้องใช้เวลาในการคำนวณนานเพราะต้องคำนวณหาค่าความต้านทานแรงของการเรียงชั้นต่าง ๆ ทุก ๆ ค่ามุมแล้วนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาการเรียงตัวที่ให้ค่าความต้านทานแรงสูงสุด

#### 2.4.3 ขั้นตอนการหาแบบการเรียงที่ดีที่สุด

สำหรับกระบวนการหาการเรียงตัวที่เหมาะสมที่สุดหรือในโครงการนี้ก็คือนหาการเรียงตัวที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้มากที่สุดจะใช้แผนภาพดังรูปที่ 7 มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้คือ

- (1) กำหนดสมบัติต่าง ๆ ของไม้
- (2) การสุ่มมุมที่จะทำการเริ่มทำการค้นหาตามวิธีค้นหาแบบสุ่มครั้งละหนึ่งตัวแปร
- (3) หาความเค้นหลัก (principal stresses) ตามขั้นตอนการหาความเค้นตามรูปที่ 4
- (4) หาน้ำหนักบรรทุกที่สามารถรับได้สูงสุดในแต่ละชั้นตามสมการที่ (2.18) และ (2.19)
- (5) บันทึกมุมที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกได้สูงสุดในแต่ละชั้น  $\theta_{i,max}$  และจะบันทึกการเปลี่ยนแปลงทุกครั้งถ้ามุมที่ให้ค่าสูงสุดเปลี่ยนไป
- (6) ตรวจสอบว่าได้คำนวณครบทุกมุมหรือไม่ โดยมุมจะอยู่ในช่วง  $-90^\circ$  ถึง  $+90^\circ$  และจะเปลี่ยนมุมครั้งละ  $1^\circ$
- (7) เมื่อครบทุกมุมแล้ว จะตรวจสอบว่าได้คำนวณครบทุกชั้นแล้วหรือไม่ เริ่มจากชั้นบนสุดถึงชั้นล่างสุด
- (8) พิจารณาแบบการเรียงมุมที่ให้ค่าสูงสุดนั้นเปลี่ยนไปหรือไม่ โดยสังเกตจากการบันทึกการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนที่ (5) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะย้อนกลับไปยังขั้นตอนที่ (3) อีกครั้ง
- (9) ถ้าแบบการเรียงตัวตามขั้นตอนที่ (8) ไม่เปลี่ยนแปลงก็จะบันทึกแบบการเรียงตัวนั้นเป็นแบบการเรียงที่ดีที่สุด
- (10) สุ่มแบบการเรียงเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง และย้อนกลับไปทำตามขั้นตอนที่ (1) ถึง (9) ซ้ำจนครบจำนวนครั้งที่ต้องการสุ่มแบบการเรียงมุม ทั้งนี้การสุ่มมุมเริ่มต้นจะมีผลต่อทิศทางการลู่เข้าของคำตอบว่าจะวิ่งไปในทิศทางใด นั้นหมายความว่า แบบการเรียงมุมเริ่มต้นที่ต่างกันไม่จำเป็นต้องให้แบบการเรียงมุมที่ดีที่สุดเหมือนกัน จึงจำเป็นต้องสุ่มแบบเรียงมุมเริ่มต้นหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้ได้แบบที่ดีที่สุดซึ่งตัดสินโดยรูปแบบที่ให้  $M_x$  สูงสุด

แผนภาพ Fig.2.7 จะใช้เป็นแผนการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความเค้นโดยเขียนโปรแกรมภาษา C และใช้ Borland C++ เวอร์ชัน 5.02 เป็น compiler โปรแกรมที่เขียนขึ้นแสดงไว้ใน Appendix A

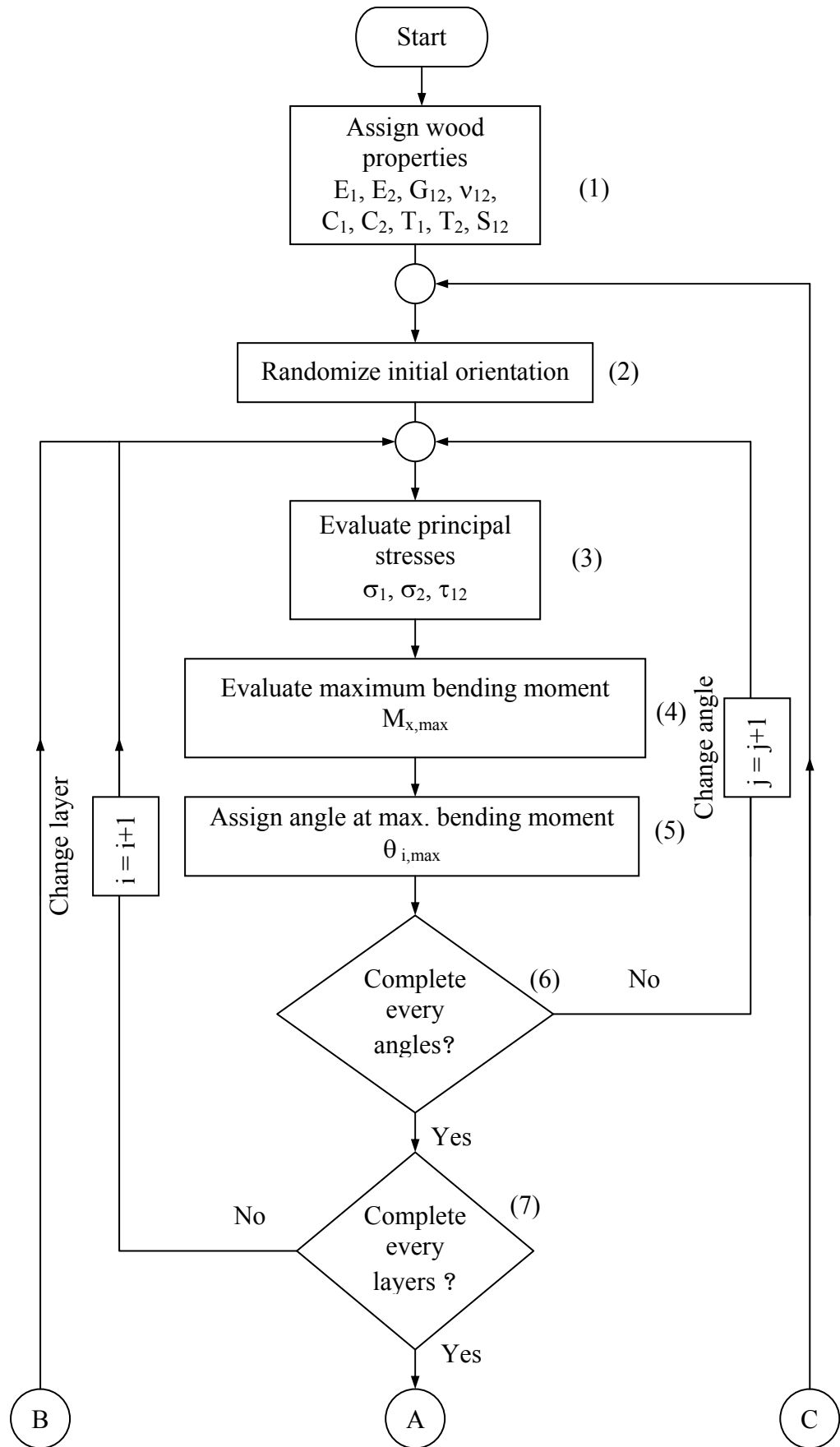


Fig.2.7 Flowchart of optimizing strand orientation by Univariate Search method

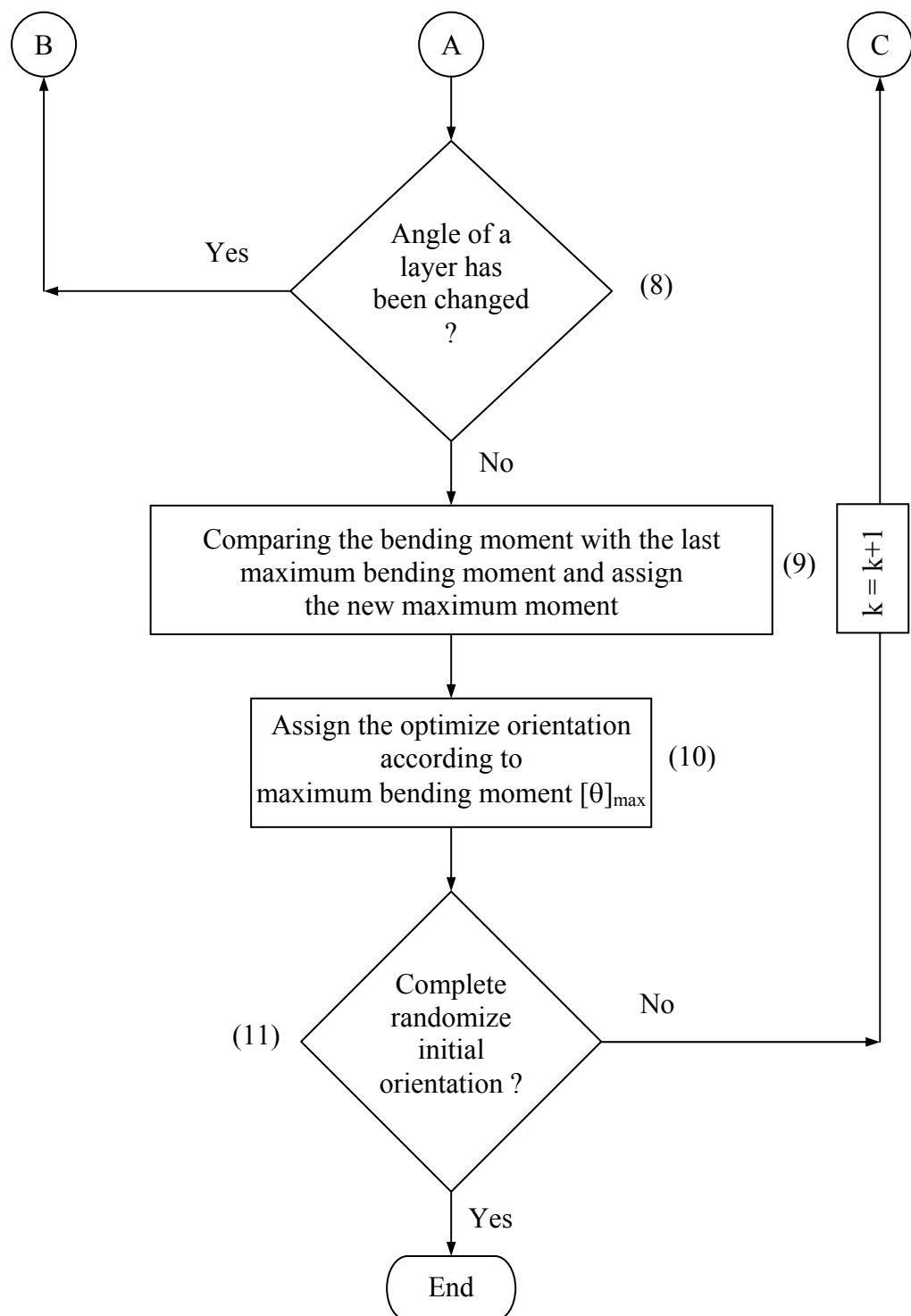


Fig.2.7 Flowchart of optimizing strand orientation by Univariate Search method (continue)



## 2.5 ผลการคำนวณ

การคำนวณแบบการเรียงมุมและความแข็งแรงของโอเอสแอลจะใช้ขั้นตอนดังแผนภาพ Fig.2.7 สมบัติเชิงกลต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณได้จากของไม้ยางพาราจริงยกเว้น โมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนพัลส์ของเท่านั้นที่ประมาณจากค่าเฉลี่ยของไม้จริงตามภาคผนวก ข และแสดงดัง Table 2.1

Table 2.1 Mechanical properties of rubberwood

Mechanical property	Symbol	Value	Unit
Tension strength parallel to grain <sup>1</sup>	T <sub>1</sub>	56.68	MPa
Tension perpendicular to grain <sup>2</sup>	T <sub>2</sub>	2.80	MPa
Compression strength parallel to grain <sup>1</sup>	C <sub>1</sub>	-35.89	MPa
Compression perpendicular to grain <sup>1</sup>	C <sub>2</sub>	-11.87	MPa
Shear modulus <sup>2</sup>	S <sub>12</sub>	±15.99	MPa
Modulus of elasticity parallel to grain <sup>1</sup>	E <sub>1</sub>	28.05	GPa
Modulus of elasticity perpendicular to grain <sup>1</sup>	E <sub>2</sub>	2.08	GPa
Modulus of rigidity**	G <sub>12</sub>	2.24	GPa
Poison's ratio**	ν <sub>12</sub>	0.35	

\*\* assumed from 20 species of solid woods (see Appendix B)

<sup>1</sup> Kasemset *et al.*, 2000

<sup>2</sup> Chunwarin, 1980

### 2.5.1 แบบการเรียงที่ดีที่สุด

การคำนวณเบื้องต้นสำหรับโอเอสแอลที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยที่จุดออกแบบโอเอสแอลมีความหนา 20 มม. กว้าง 50 มม. การเรียงตัวแบบไขว้สมมาตร (Anti-symmetry หรือ Balance) 20 ชั้น (Type I) โอเอสแอล Type I จะนำมาเปรียบเทียบกับโอเอสแอลที่เรียงแถบไม้ตามแนวยาวตลอดทุกชั้น (0°ทุกชั้น, หรือ Type 0) ดังรูปที่ 8 ความเค้นตามแกน 1 ก็คือความเค้นตามแนวยาว ( $\sigma_1 = \sigma_x$ ) เนื่องจากแนวเรียงแถบไม้ทับกับแนวตามยาว โมเมนต์ดัด  $M_x$  ที่รับได้จึงคิดจากการกระจายความเค้นในทิศทางแกน 1 ได้

โมเมนต์ดัดสูงสุดที่รับได้สำหรับโอเอสแอล Type 0 คือ 2,393 N·m/m หรือคิดเป็น 119.65 N·m เนื่องจาก  $|T_1| > |C_1|$  ความแข็งแรงอัดจึงเป็นค่าวิกฤต การบิดจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านที่รับความเค้นอัด ความเค้นสูงสุดในจุดบิดจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกสุดทั้งสองด้านและมีค่าเท่ากันคือเท่า  $|C_1|$  และความเค้นตามแกน 1 ( $\sigma_1$ ) ในชั้นต่างๆ จะลดลงเรื่อยๆ โดยมีอัตราการลดลงที่คงที่จนกระทั่งความเค้นมีค่าเท่ากับศูนย์ที่กึ่งกลาง ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของคานเมื่อรับโมเมนต์ดัดโดยแกนสะเทินอยู่ที่จุดกึ่งกลางคาน

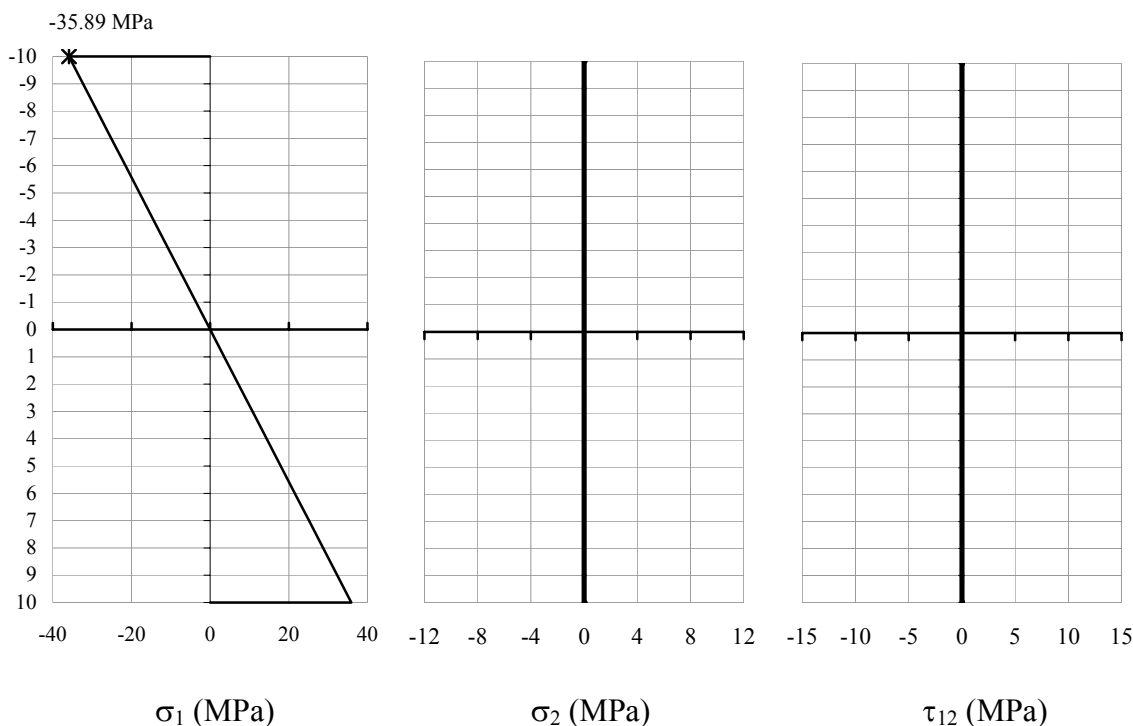


Fig 2.8 Stress profiles of OSL Type 0 (strand alignment with angle  $0^\circ$ )

#### 2.5.1.1 กรณี 1 พิจารณาตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุด (Maximum Stress Criterion)

มุมแถบไม้ที่ดีที่สุด เมื่อมุมเริ่มต้นต่างๆ แสดงในภาคผนวกที่ ซึ่งสรุปได้ว่า ชุดของมุมที่ให้คานโอเอสแอลรับโมเมนต์สูงสุดตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุดคือ  $[31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ]_A$  โมเมนต์ดัดสูงสุดคือ  $3,244 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{m}$  หรือคิดเป็น  $162.21 \text{ N}\cdot\text{m}$  (ความกว้างคาน 50 มม.) ความสามารถรับโมเมนต์เพิ่มขึ้นกว่า 35.56% เมื่อเทียบกับแบบที่ไม่ได้เรียงมุม ( $0^\circ$  ทุกชั้น) โดยมีการกระจายความเค้นในแนวต่างๆ ดัง Fig.2.9 และค่าเชิงตัวเลขแสดงไว้ในภาคผนวก

การกระจายความเค้นแสดงไว้ 2 ลักษณะคือ พิจารณาตามแกน 12 และพิจารณาตามแกน xy แม้ว่าเมื่อพิจารณาตามแกน xy ความเค้นในบางชั้นจะมีค่ามากกว่าความต้านทานแรง แต่ก็ไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความเสียหายนั้นจะพิจารณาในแกนหลักของวัสดุหรือแกน 12 ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ความเค้นสูงสุดในทิศทาง 1 แตกต่างจากโอเอสแอลแบบที่เรียงแถบไม้ตามยาวคือ ความเค้นของแต่ละชั้นมีค่าเกือบเท่ากับค่าความต้านทานแรงสูงสุดของไม้ในทิศทาง  $\sigma_1$  ซึ่งเป็นผลจากการเรียงมุมที่ดีที่สุด (optimum) ทำให้เมื่อคิดโมเมนต์ลัพธ์จึงให้ค่าสูงกว่าแบบที่เรียงแถบไม้ตามยาว

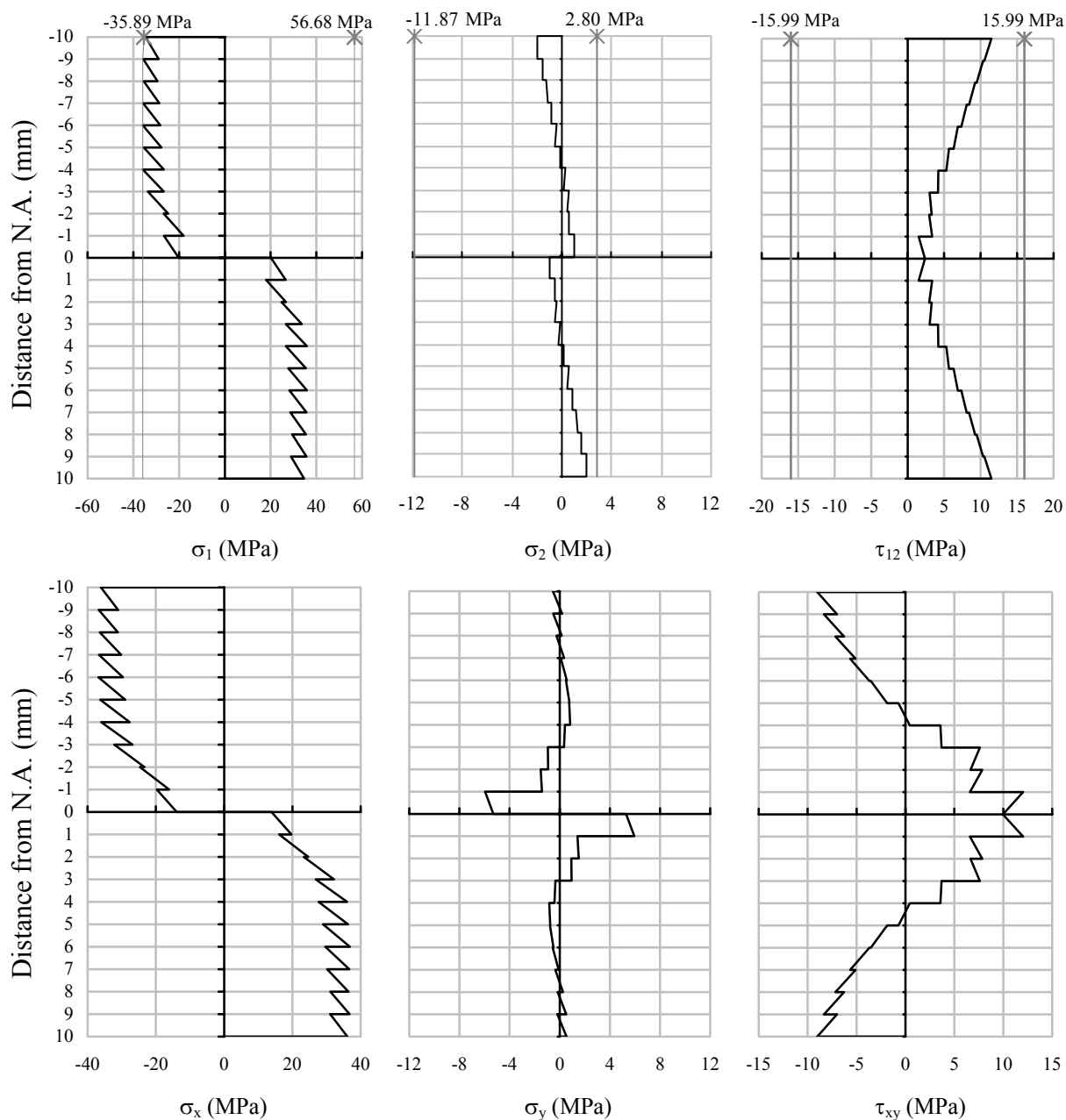


Fig.2.9 Stress profiles of OSL Type I oriented according to MSC  
 $[31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ]_A$

### 2.5.1.2 กรณี 2 พิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ (Tsai-Hill Criterion)

มุมแถบไม้ที่ดีที่สุด เมื่อมุมเริ่มต้นต่าง ๆ แสดงในภาคผนวกที่ ซึ่งสรุปได้ว่า ชุดของมุมที่ให้คานโอเอสแอลรับโมเมนต์สูงสุดตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์คือ  $[29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ]_A$  โมเมนต์ดัดสูงสุดคือ  $2,877 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{m}$  หรือคิดเป็น  $143.86 \text{ N}\cdot\text{m}$  (ความกว้างคาน 50 มม.) ความสามารถรับโมเมนต์เพิ่มขึ้นกว่า 20.25% เทียบกับแบบที่ไม่ได้เรียงมุม ( $0^\circ$ ทุกชั้น) แสดงการกระจายความเค้นในแนวต่างๆ ดัง Fig.2.10 และค่าเชิงตัวเขแสดงในภาคผนวก ง

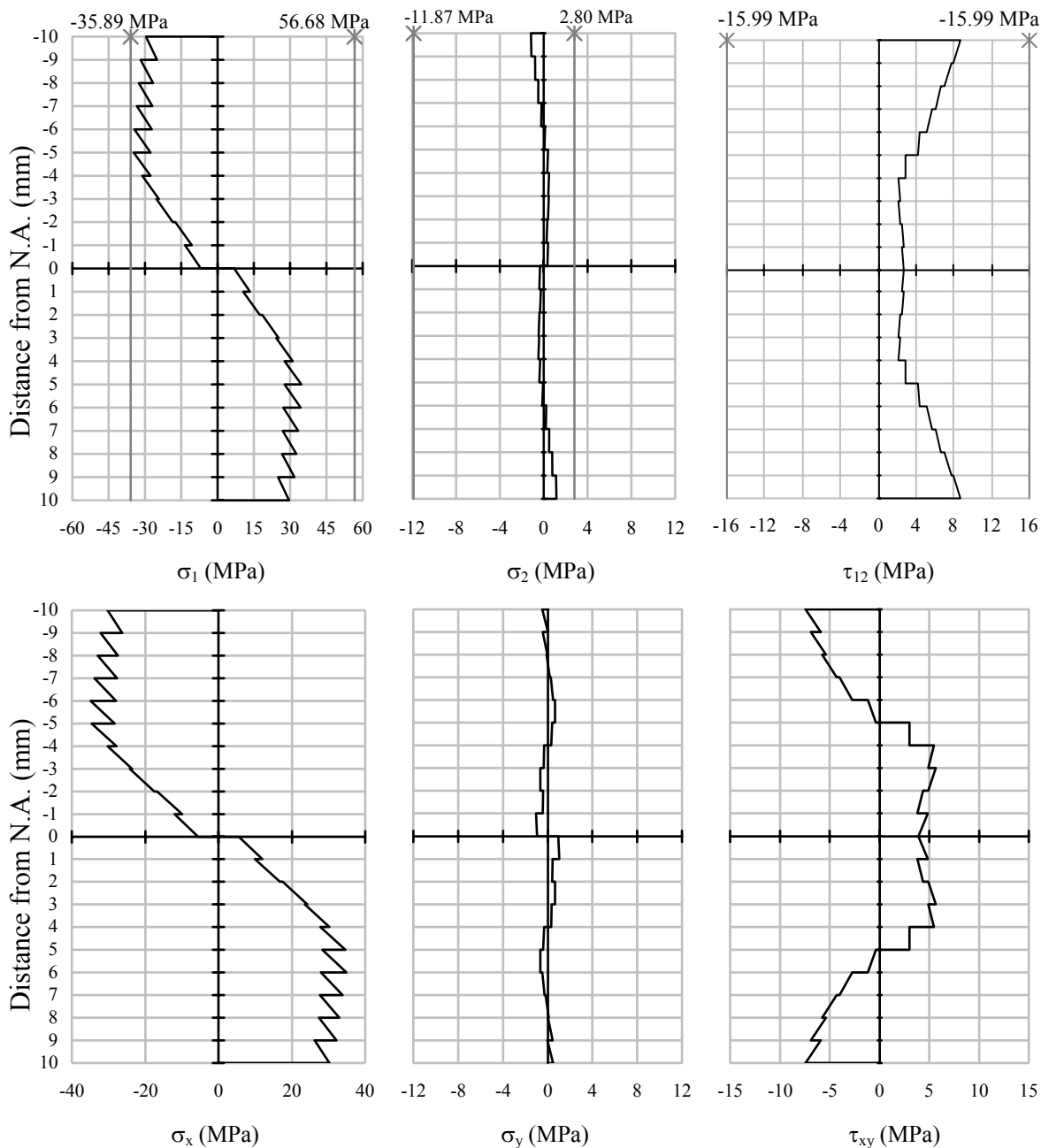


Fig.2.10 Stress profiles of OSL Type I oriented according to THC [29°, 25°, 21°, 16°, 9°, 0°, -6°, -8°, -6°, -11°]<sub>A</sub>

ความเค้นอัดสูงสุดเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลส์มีค่าน้อยกว่าความ  
 แข็งแรงอัด ( $\sigma_1 < C_1$ ) เนื่องจากเกณฑ์ความเสียหายของไซ-ฮิลส์ได้รวมผลของความเค้นในแนว  
 อื่นไว้ในสมการการวิบัติซึ่งสังเกตได้ชัดเจนในชั้นที่ 1 ที่ซึ่งความเค้นเฉือน ( $\tau_{12}$ ) และความเค้นตั้ง  
 จากเสี้ยนในทิศทาง 2 ( $\sigma_2$ ) มีค่าสูงกว่าในชั้นอื่นๆ ความเค้นตามเสี้ยนในทิศทาง 1 ของชั้นนี้จึง  
 ต้องมีค่าน้อยกว่าชั้นอื่นๆ เพื่อรักษาผลรวมทางด้านซ้ายของสมการ 1.2 ไม่ให้เกิน 1 แต่อย่างไร  
 ก็ตามความเค้นตามเสี้ยนในทิศทาง 1 ก็ยังมีอัตราส่วนที่มากกว่าความเค้นในแนวอื่นๆมาก

จากทั้ง 2 กรณี ความเค้นอัดในทิศทาง 1 จะกระจายตัวลงมาเกือบทั่วทั้งหน้าตัดคาน ซึ่งต่างจากการกระจายความเค้นในโอเอสแอลซึ่งเรียงตัวตามยาวเพียงอย่างเดียว เมื่อหาโมเมนต์ลัพท์โดยการอินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัด (พื้นที่ระหว่างเส้นกราฟและแกน y) ทำให้โอเอสแอลที่เรียงตัวตามที่ได้ออกแบบไว้ (แบบ I) รับโมเมนต์ลัพท์ได้มากกว่าแบบ 0 ดังแสดงไว้ใน Fig.2.11 นอกจากนี้ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทาง 2 มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานแรงและมีค่าน้อยกว่าความเค้นในแนว 1 อย่างมาก ซึ่งอาจจะแปลความหมายได้ว่าความเค้นในแนว 1 นั้นมีอิทธิพลมากกว่าความเค้นในแนวอื่น ๆ หรือแม้แต่ความเค้นในแนวตามยาวของโอเอสแอล (แกน x) เองก็ตาม ก็ยังมีค่ามากกว่าความเค้นในแนวตามขวาง (แกน y) อยู่มากเช่นเดียวกัน จึงกล่าวได้ว่า  $\sigma_1$  เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของโอเอสแอล การพิจารณาการวิบัติของโอเอสแอล จึงอาจพิจารณาเฉพาะความเค้นในแนวแกน 1 หรือแกนตามยาว (แกน x) ก็เพียงพอสำหรับมุมที่เบี่ยงเบนไปเล็กน้อยจากจุดออกแบบการศึกษาความอ่อนไหว (sensitivity) ของความแข็งแรงที่เกิดจากการเรียงมุมผิดพลาดในการผลิตจริงจะได้พิจารณาในหัวข้อต่อไป

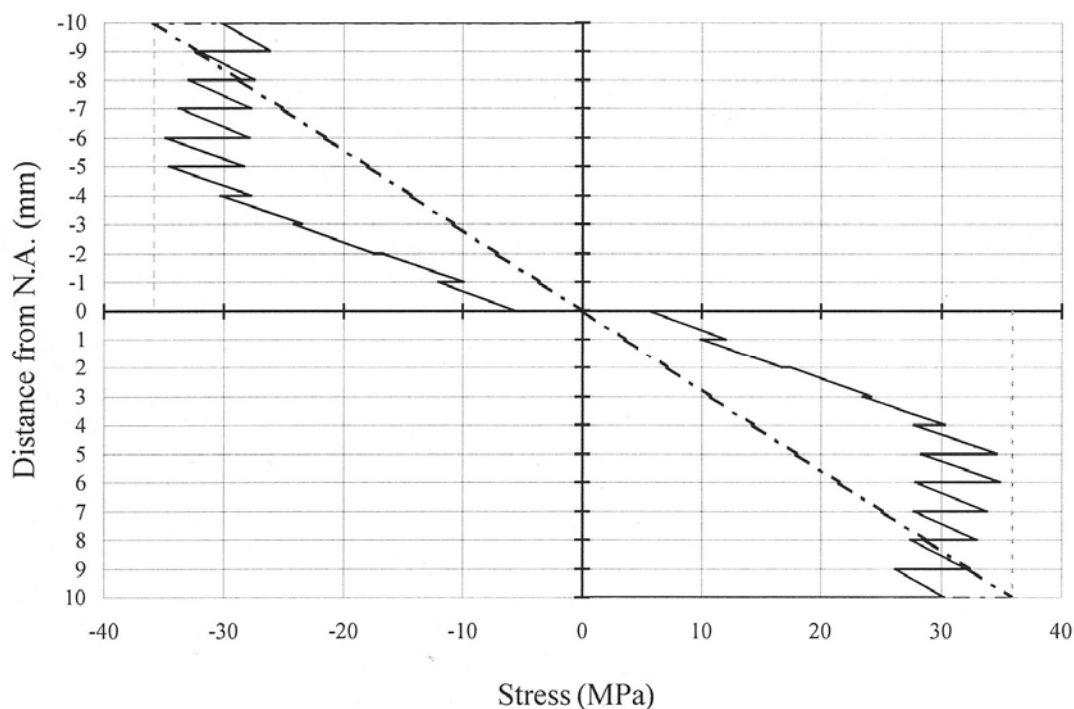


Fig.2.11 Stress profiles along x-direction of OSL Type 0 (dash line) and OSL Type I (continuous line)

## 2.5.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะครอบคลุมสมบัติเชิงกลและมุมเรียงแถบไม้ที่เปลี่ยนไปจากจุดออกแบบซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้เป็นปัจจัยหลักที่ใช้เป็นข้อมูลคำนวณในโปรแกรม ในการทำขั้นตอนทดสอบจริงสมบัติของไม้ที่นำมาทำเป็นโอเอสแอลและมุมที่เรียงแถบไม้อาจไม่เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวนี้จึงถูกพิจารณาเพื่อประเมินความผิดพลาดเทียบกับผลการทดลองจริง

### 2.5.2.1 ความอ่อนไหวต่อสมบัติเชิงกล

#### (Mechanical Properties Sensitivity)

สมบัติเชิงกลต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ 9 ค่าดังได้แสดงไว้แล้วใน Table 2.1 ซึ่งได้แก่ ความแข็งแรงดึงตามเส้น (T<sub>1</sub>) ความแข็งแรงดึงตั้งฉากเส้น (T<sub>2</sub>) ความแข็งแรงอัดตามเส้น (C<sub>1</sub>) ความแข็งแรงอัดตั้งฉากเส้น (C<sub>2</sub>) โมดูลัสยืดหยุ่นตามเส้น (E<sub>1</sub>) โมดูลัสยืดหยุ่นตั้งฉากเส้น (E<sub>2</sub>) โมดูลัสเฉือน (G<sub>12</sub>) และอัตราส่วนพัวส์ของ (ν<sub>12</sub>) สมบัติเชิงกลเหล่านี้ถ้ามีค่าที่แตกต่างไปจาก Table 2.1 ก็จะทำให้โอเอสแอลรับโมเมนต์ได้ต่างกัน จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อสมบัติเชิงกลของโอเอสแอลเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโดยจะแปรค่าอยู่ในช่วง 20%ของค่าใน Table 2.1 และผลที่ได้เป็นดังนี้

#### (ก) ความแข็งแรงดึงตามเส้น

#### (Tensile Strength Parallel to Grain : T<sub>1</sub>)

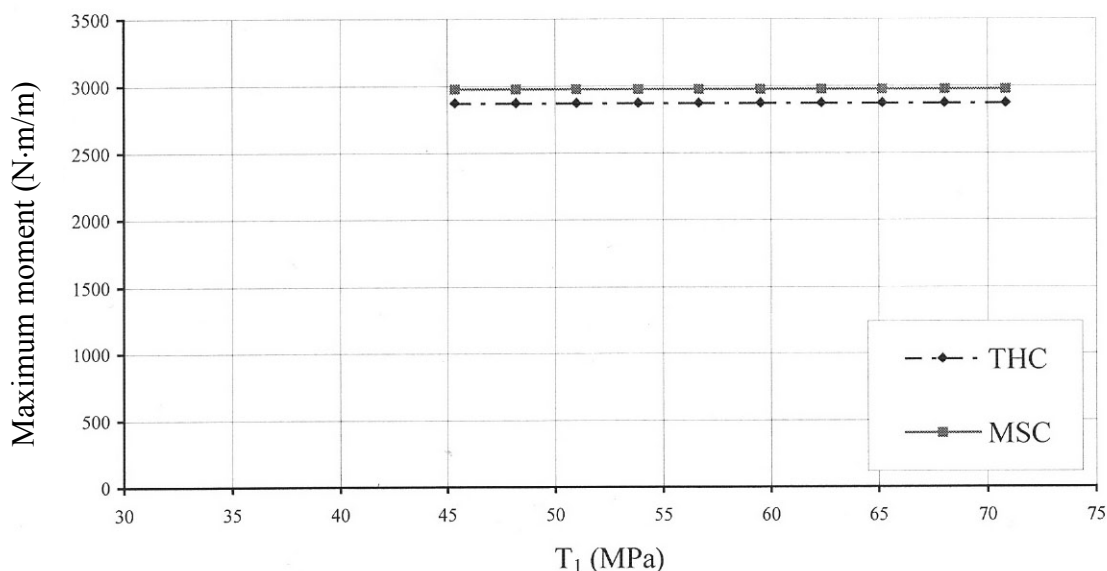


Fig.2.12 Sensitivity of OSL on tensile strength parallel to grain

จาก Fig.2.12 เมื่อความแข็งแรงดึงตามเส้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิมก็ไม่ได้ทำให้โมเมนต์สูงสุดที่โอเอสแอลสามารถรับได้เปลี่ยนแปลงไป สำหรับเกณฑ์ความเค้นสูงสุด ขณะที่ความเค้นอัดตามเส้นเหนือแกนสฟเทินเท่ากับความแข็งแรงอัดตามเส้น (35.89 MPa) แต่ความเค้นในแนวอื่น ๆ ยังมีค่าไม่ถึงค่าความแข็งแรงในแนวนั้น ๆ (Fig.2.9)

ความแข็งแรงอัดจึงเป็นค่าวิกฤตที่กำหนดขอบเขตการวิบัติตามสมการ 2.18-ก แม้ว่าความแข็งแรงดึงตามเส้นจะมากขึ้นหรือน้อยลงก็ตามก็ไม่มีผลต่อการวิบัติเพราะค่าวิกฤตถูกกำหนดด้วยความแข็งแรงอัดแล้ว สำหรับเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ การวิบัติเกิดขึ้นบริเวณเหนือแกนสเทินเนื่องจากผลรวมทางด้านซ้ายของสมการ 1.2 เหนือแกนสเทินมีค่าเท่ากับ 1 ก่อนผลรวมได้แกนสเทิน และเนื่องจากโอเอสแอลเหนือแกนสเทินต้องรับความเค้นอัดตามเส้น ความเค้นดึงตั้งฉากเส้น และความเค้นเฉือน (Fig.2.10) ค่าที่ใช้กำหนดความแข็งแรงจึงเป็นความแข็งแรงอัดตาม ความแข็งแรงดึงตั้งฉากเส้นและความแข็งแรงเฉือน ดังนั้นความแข็งแรงดึงตามเส้นซึ่งไม่ปรากฏในการพิจารณาความเค้นเหนือแกนสเทินจึงไม่ใช่ค่าวิกฤตในช่วงการวิเคราะห์ความอ่อนไหวความแข็งแรงดึงนี้ นอกจากนี้ความแข็งแรงดึงจะเป็นค่าวิกฤตได้ก็ต่อเมื่อความแข็งแรงดึงมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงอัดมาก ๆ ซึ่งเป็นไปไม่ได้เลยสำหรับไม้จริง

(ข) ความแข็งแรงดึงตั้งฉากเส้น

(Tensile Strength Perpendicular to Grain :  $T_2$ )

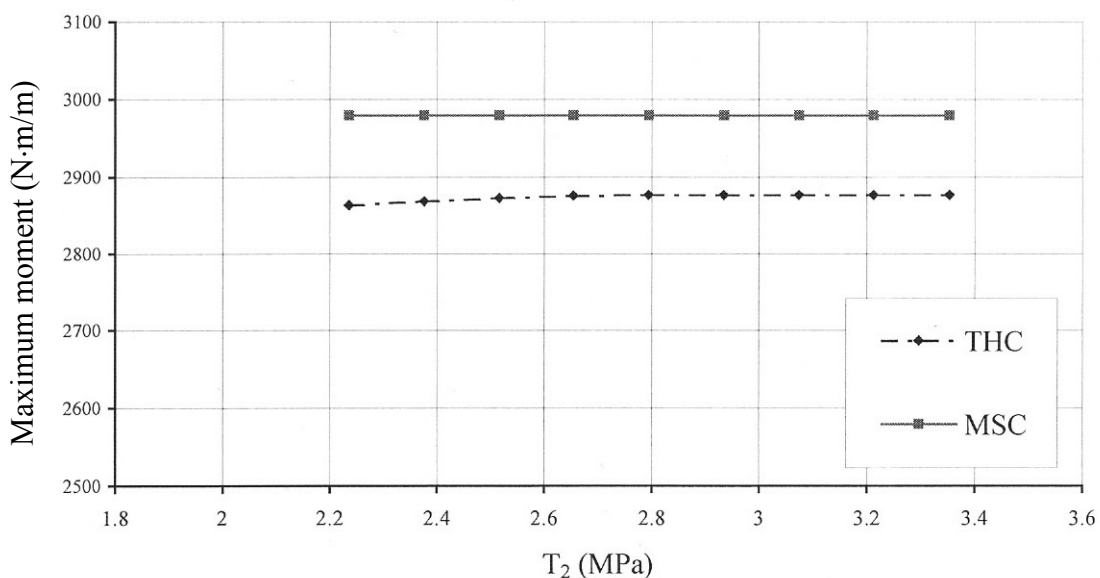


Fig.2.13 Sensitivity of OSL on tensile strength perpendicular to grain

ในช่วงวิเคราะห์ความไวตาม Fig.2.13 เมื่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากเส้นเพิ่มขึ้นหรือลดลง โมเมนต์ดัดสูงสุดของโอเอสแอลที่รับได้ไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับเกณฑ์ความเค้นสูงสุดแต่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์

สำหรับเกณฑ์ความเค้นสูงสุดขณะที่ความเค้นอัดตามเส้นเท่ากับความแข็งแรงอัดตามเส้น แต่ความเค้นในแนวอื่น ๆ ยังไม่ถึงค่าความแข็งแรงในแนวนั้น ๆ (Fig.2.9) แม้ว่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากเส้นจะมากขึ้นหรือน้อยลงก็ไม่มีผลต่อโมเมนต์ดัดสูงสุดเนื่องจากความแข็งแรงอัดตามเส้นเป็นค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวิบัติแล้ว และเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ การวิบัติเกิดขึ้นบริเวณเหนือแกนสเทินเนื่องจากผลรวมทางด้านซ้ายของสมการ 1.2 เหนือแกนสเทินที่มีค่าเท่ากับ 1 ก่อนผลรวมของโอเอสแอลได้แกนสเทิน โอเอส

แอลเหนือแกนสะเทินที่ต้องรับความเค้นอัดตามเส้น ความเค้นดึงตั้งฉากเส้น และความเค้นเฉือน (Fig.2.10) ดังนั้นค่าที่ใช้กำหนดความแข็งแรงจึงเป็นความแข็งแรงอัดตามเส้น ความแข็งแรงดึงตั้งฉากเส้นและความแข็งแรงเฉือน เมื่อความแข็งแรงตั้งตั้งฉากเส้นเพิ่มขึ้นจากจุดออกแบบ ( $T_2 > 2.80$  MPa) พจน์  $\frac{V^2}{Y^2}$  ในสมการ 2.19 ซึ่งตัวส่วนถูกแทนด้วย  $(T_2)^2$  จึงมีค่าน้อยลงอย่างมาก (เนื่องจากตัวส่วนถูกยกกำลังสอง) จึงไม่มีผลต่อโมเมนต์ตัดที่รับได้ ดังนั้นเส้นกราฟใน Fig.2.13 จึงคงที่ แต่เมื่อความแข็งแรงตั้งตั้งฉากเส้นลดลงจากจุดออกแบบ ( $T_2 < 2.80$  MPa) พจน์  $\frac{V^2}{Y^2}$  มีค่าเพิ่มขึ้นมากจึงส่งผลให้โมเมนต์ที่รับได้สูงสุดมีค่าลดลงดังจะเห็นได้จากในเส้นกราฟ Fig.2.13 มีค่าลดลงเรื่อย ๆ

(ค) ความแข็งแรงอัดตามเส้น

(Compressive Strength Parallel to Grain)

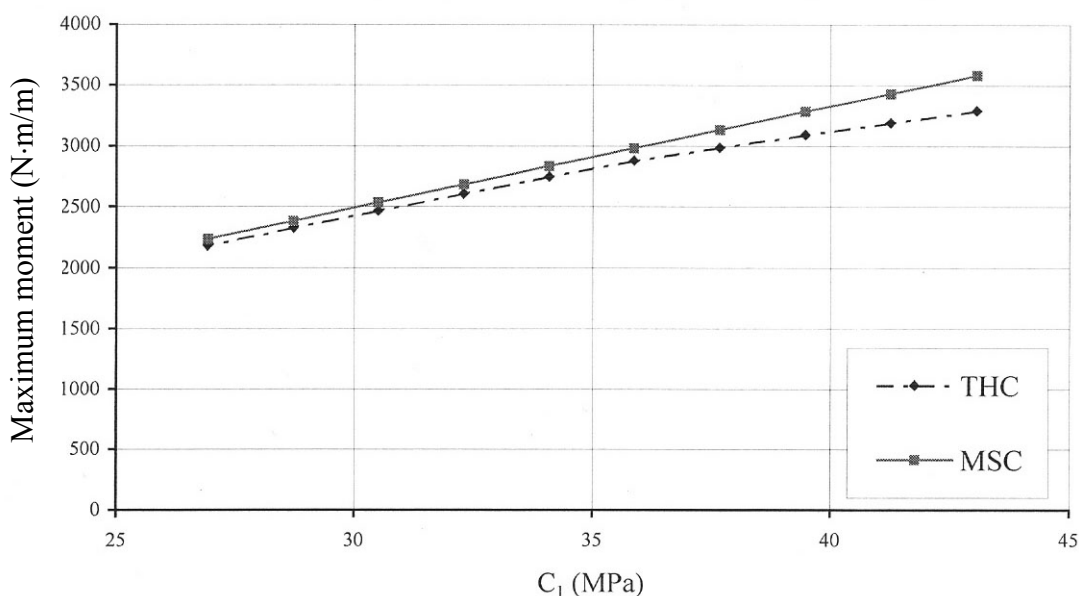


Fig.2.14 Sensitivity of OSL on compressive strength parallel to grain

จาก Fig.2.14 ในช่วงการวิเคราะห์ความอ่อนไหวนี้ เมื่อความแข็งแรงอัดตามเส้นเพิ่มขึ้นหรือลดลง โมเมนต์สูงสุดที่โอเอสแอลสามารถรับได้ก็จะเพิ่มขึ้นและลดลงตามไปด้วย โดยเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุดอัตราการเปลี่ยนแปลงของเมนต์จะคงที่แต่สำหรับเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ความชันจะลดลงเมื่อความแข็งแรงอัดตามเส้นเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุด ขณะที่ความเค้นอัดตามเส้นเท่ากับค่าความแข็งแรงอัดตามเส้นแต่ความเค้นในแนวอื่น ๆ ยังไม่ถึงค่าความแข็งแรงในแนวนั้น ๆ (Fig.2.9) เมื่อความแข็งแรงในแนวอื่น ๆ คงที่ ความแข็งแรงอัดตามเส้นจึงเป็นค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวิบัติ เมื่อความแข็งแรงอัดตามเส้นเพิ่มขึ้นโมเมนต์ที่รับได้จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทำนองเดียวกันถ้าความแข็งแรงอัดตามเส้นลดลงโมเมนต์สูงสุดก็จะลดลง แต่เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ การ



วิบัติเกิดขึ้นบริเวณเหนือแกนสะเทินเนื่องจากผลรวมทางด้านซ้ายของสมการ 1.2 เหนือแกนสะเทินมีค่าเท่ากับ 1 ก่อนผลรวมใต้แกนสะเทิน โอเอสแอลเหนือแกนสะเทินต้องรับความเค้นอัดตามเส้นและตั้งฉากเส้น ความเค้นตั้งตั้งฉากเส้น ความเค้นตั้งตั้งฉากเส้นและความเค้นเฉือน (Fig.2.10) ดังนั้นค่าที่ใช้กำหนดความแข็งแรงจึงเป็นความแข็งแรงอัดตามเส้นและตั้งฉากเส้น ความแข็งแรงตั้งตั้งฉากเส้นและความแข็งแรงเฉือน ในขณะที่ความแข็งแรงอื่น ๆ คงที่ ความแข็งแรงอัดตามเส้นจึงเป็นค่าวิกฤตตามสมการ 2.19 พจน์  $\frac{U^2}{X^2}$  ในสมการ 2.19 ซึ่งตัวส่วนถูกแทนด้วย  $(C_1)^2$  จึงเป็นตัวกำหนดโมเมนต์ที่รับได้สูงสุด เมื่อ  $C_1$  น้อยลง พจน์  $\frac{U^2}{X^2}$  ก็จะมากขึ้นทำให้โมเมนต์ลดลง แต่เมื่อ  $C_1$  เพิ่มขึ้น พจน์  $\frac{U^2}{X^2}$  ก็จะน้อยลงโมเมนต์จึงมากขึ้น พจน์  $\frac{U^2}{X^2}$  จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากกำลังสองของ  $C_1$  ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจึงทำให้พจน์  $\frac{U^2}{X^2}$  ไม่มีผลกับสมการ 2.19 ในที่สุด ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟ Fig.2.14 ที่ความชันลดลงเรื่อย ๆ เมื่อ  $C_1$  เพิ่มขึ้น

(ง) ความแข็งแรงอัดตั้งฉากเส้น

(Compressive Strength Perpendicular to Grain)

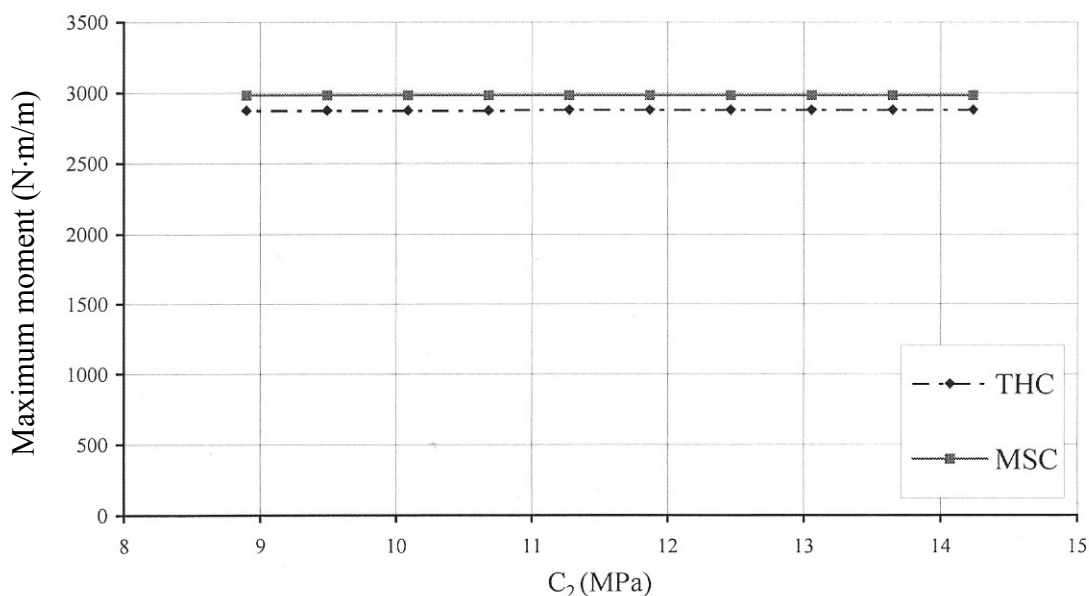


Fig.2.15 Sensitivity of OSL on compressive strength perpendicular to grain

เมื่อความแข็งแรงอัดตั้งฉากเส้นเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ได้ ออกแบบไว้ตาม Fig.2.15 โมเมนต์สูงสุดของโอเอสแอลกลับไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุด ขณะที่ความเค้นอัดตามเส้นเท่ากับความแข็งแรงอัดตามเส้นแล้วนั้น ความเค้นในแนวอื่น ๆ ยังไม่ถึงค่าความแข็งแรงในแนวนั้นเลย (Fig.2.9) ความแข็งแรงอัดตามเส้นจึงเป็นค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวิบัติ นอกจากนั้นความเค้นตั้งฉากเส้นมีค่าน้อยกว่าความ

แข็งแรงอัดตั้งฉากเสี้ยนมาก การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงอัดตั้งฉากเสี้ยนจึงไม่มีผลต่อโมเมนต์ดัดสูงสุดที่รับได้ สำหรับการพิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ การวิบัติเกิดขึ้นบริเวณเหนือแกนสะเทินเนื่องจากผลรวมทางด้านซ้ายของสมการ 1.2 เหนือแกนสะเทินมีค่าเท่ากับ 1 ก่อนผลรวมใต้แกนสะเทิน โอเอสแอลเหนือแกนสะเทินต้องรับความเค้นอัดตามเสี้ยนและตั้งฉากเสี้ยน ความเค้นดัดตั้งฉากเสี้ยน และความเค้นเฉือน (fig.2.10) ดังนั้นค่าที่ใช้กำหนดความแข็งแรงดัดของโอเอสแอลจึงเป็นค่าความแข็งแรงอัดตามเสี้ยนและตั้งฉากเสี้ยน ความแข็งแรงดัดตั้งฉากเสี้ยนและความแข็งแรงเฉือน แต่เมื่อความแข็งแรงอื่น ๆ คงที่ ยกเว้นความแข็งแรงอัดตั้งฉากเสี้ยนเปลี่ยนแปลงไปค่าเดียว ตัวที่ถูกหยาบยกขึ้นมาพิจารณาจึงเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยนและความแข็งแรงอัดตั้งฉากเสี้ยนหรือพจน์  $\frac{U^2}{Y^2}$  ในสมการ 2.19 และเนื่องจากถูกยกกำลังสองพจน์นี้จึงมีค่าน้อยกว่าพจน์อื่น ๆ ในสมการ จึงมีผลต่อสมการน้อย ความแข็งแรงอัดตั้งฉากเสี้ยนที่เปลี่ยนแปลงไปจึงไม่มีผลต่อโมเมนต์ดัดสูงสุดที่โอเอสแอลสามารถรับได้

(จ) ความแข็งแรงเฉือน (Shear Strength)

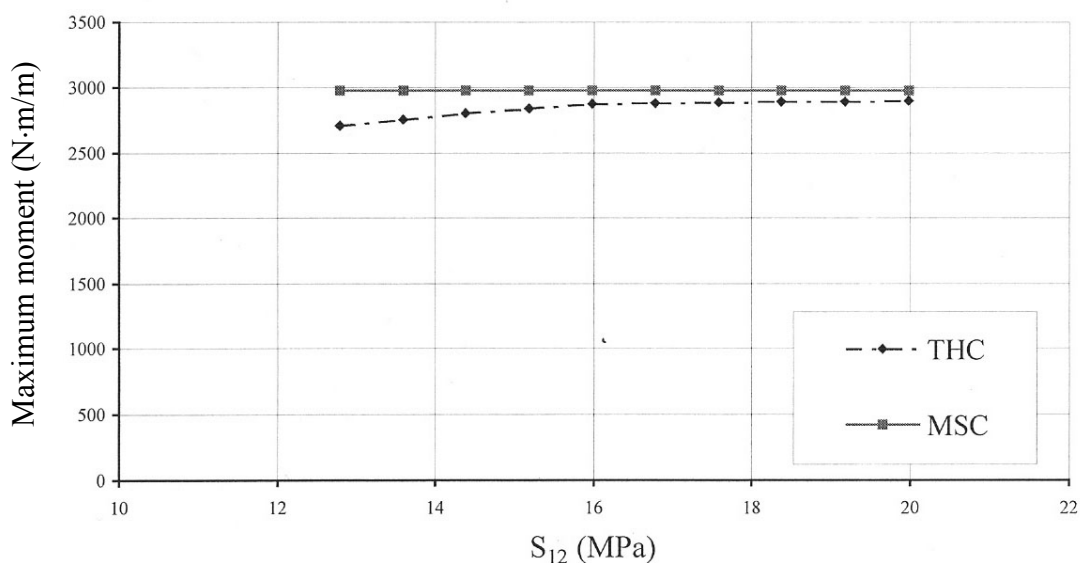


Fig.2.16 Sensitivity of OSL on shear strength

ในช่วงการวิเคราะห์ความอ่อนไหวตาม Fig.2.16 ความแข็งแรงเฉือนไม่มีผลต่อความแข็งแรงดัดของโอเอสแอลเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุด แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อความแข็งแรงเฉือนลดลงตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์

ตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุดในขณะที่ความเค้นอัดตามเสี้ยนเท่ากับค่าความแข็งแรงอัดตามเสี้ยนแล้วในขณะที่ความเค้นในแนวอื่น ๆ ยังไม่ถึงค่าความแข็งแรงในแนวอื่น ๆ (Fig.2.9) ความแข็งแรงอัดตามเสี้ยนจึงเป็นค่าวิกฤตที่บ่งบอกการเกิดการวิบัติ ความแข็งแรงเฉือนจึงไม่มีผลต่อโมเมนต์ดัดที่โอเอสแอลรับได้สูงสุด เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของไซ\*ฮิลล์ การวิบัติจะเกิดขึ้นบริเวณเหนือแกนสะเทินเนื่องจากผลรวมทางด้านซ้ายของสมการ 1.2

เหนือแกนสะเทินมีค่าเท่ากับ 1 ก่อนผลรวมใต้แกนสะเทิน โอเอสแอลเหนือแกนสะเทินต้องรับความเค้นอัดตามเส้นและตั้งฉากเส้น ความเค้นดึงตามเส้นและความเค้นเฉือน (Fig.2.10) ดังนั้นค่าที่กำหนดความแข็งแรงจึงเป็นความแข็งแรงอัดตามเส้นและตั้งฉากเส้น ความแข็งแรงดึงตั้งฉากเส้นและความแข็งแรงเฉือน ในขณะที่ความแข็งแรงค่าอื่น ๆ มีค่าคงและและความแข็งแรงเฉือนมีค่าต่ำลง พจน์  $\frac{W^2}{S^2}$  ในสมการ 2.19 ซึ่งตัวส่วนถูกแทนด้วย จึงมีค่ามากขึ้นอย่างมากเนื่องจากกำลังสองของตัวส่วน โมเมนต์สูงสุดที่รับได้จึงลดลง แต่เมื่อความแข็งแรงเฉือนเพิ่มขึ้นพจน์  $\frac{W^2}{S^2}$  กลับลดลงอย่างมากเนื่องจากกำลังสองของตัวส่วนพจน์  $\frac{W^2}{S^2}$  จึงมีผลกับสมการ 2.19 น้อยลง เส้นกราฟโมเมนต์จึงเกือบจะคงที่

(จ) โมดูลัสยืดหยุ่นตามเส้น

(Modulus of Elasticity Parallel to Grain)

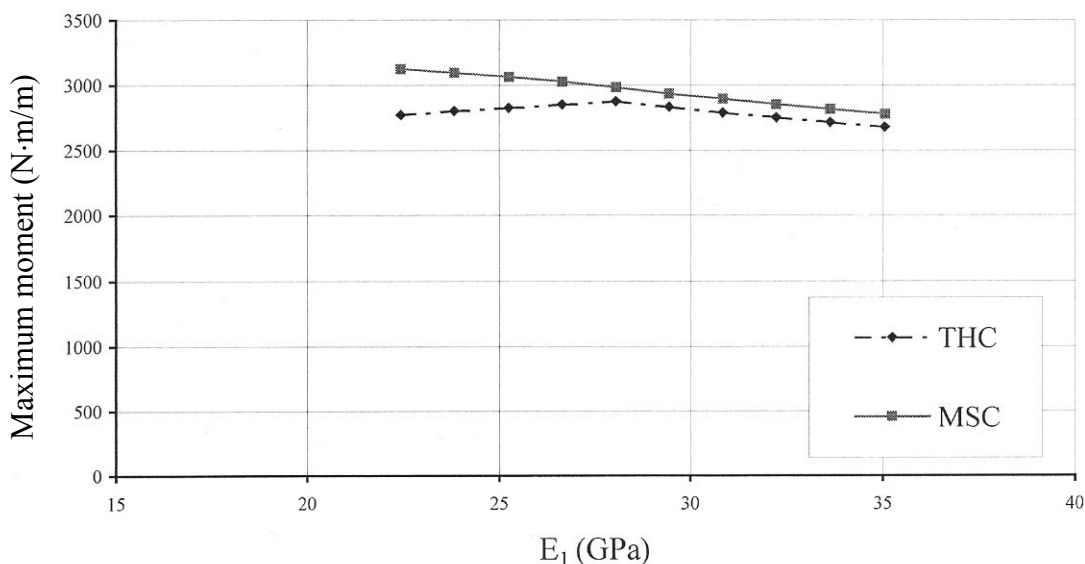


Fig.2.17 Sensitivity of OSL on modulus of elasticity parallel to grain

เมื่อโมดูลัสยืดหยุ่นตามเส้นเปลี่ยนแปลงไปดัง Fig.2.17 มีผลทำให้การกระจายความเค้นที่เกิดในโอเอสแอลเปลี่ยนแปลงไปจาก Fig.2.9 และ Fig.2.10 เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุดเมื่อโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าค่าที่ใช้ออกแบบ ( $E_1 < 28.05$  GPa) ยกตัวอย่างตามรูป Fig.2.18 (เส้นทึบ  $E_1 = 22.40$  GPa) ทำให้รูปแบบการกระจายความเค้นเปลี่ยนไปจากเดิม (เส้นประ  $E_1 = 28.05$  GPa) ความเค้นในชั้นต่างๆ สูงขึ้นเป็นผลให้เมื่ออินทิเกรตหาโมเมนต์ลัพธ์จึงได้ค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกันเมื่อโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นรูปแบบการกระจายความเค้นก็จะเปลี่ยนไป (Fig.2.19  $E_1 = 35.06$  GPa) แต่ความเค้นในชั้นต่างๆ ณ จุดวิบัติมีค่าน้อยกว่าเดิมทำให้โมเมนต์ที่ได้ก็น้อยลง

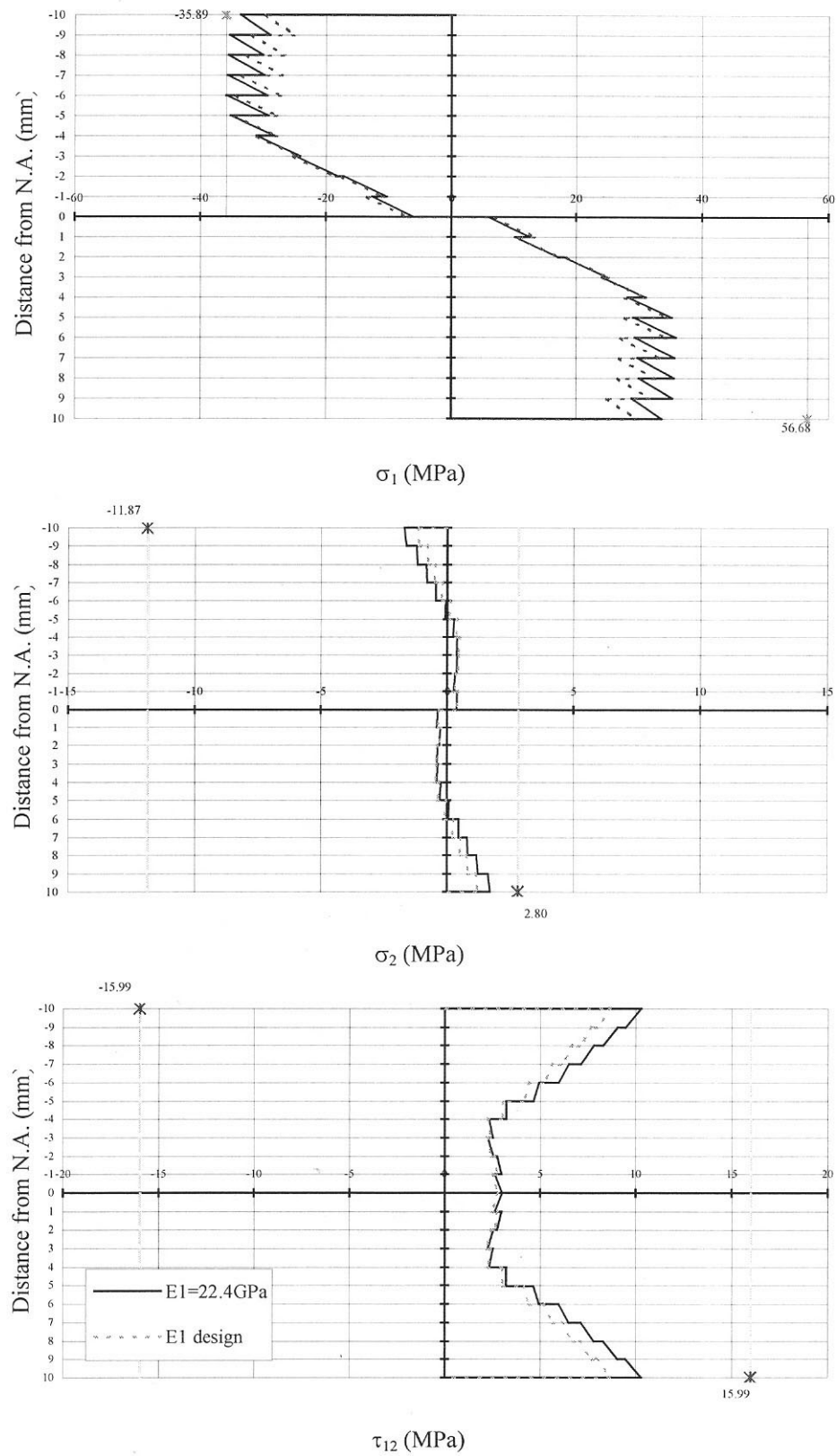


Fig.2.18 Stress profiles of OSL with  $E_1 = 22.4$  GPa (continuous line) and with  $E_1 = 28.05$  GPa (dash line) according to MSC

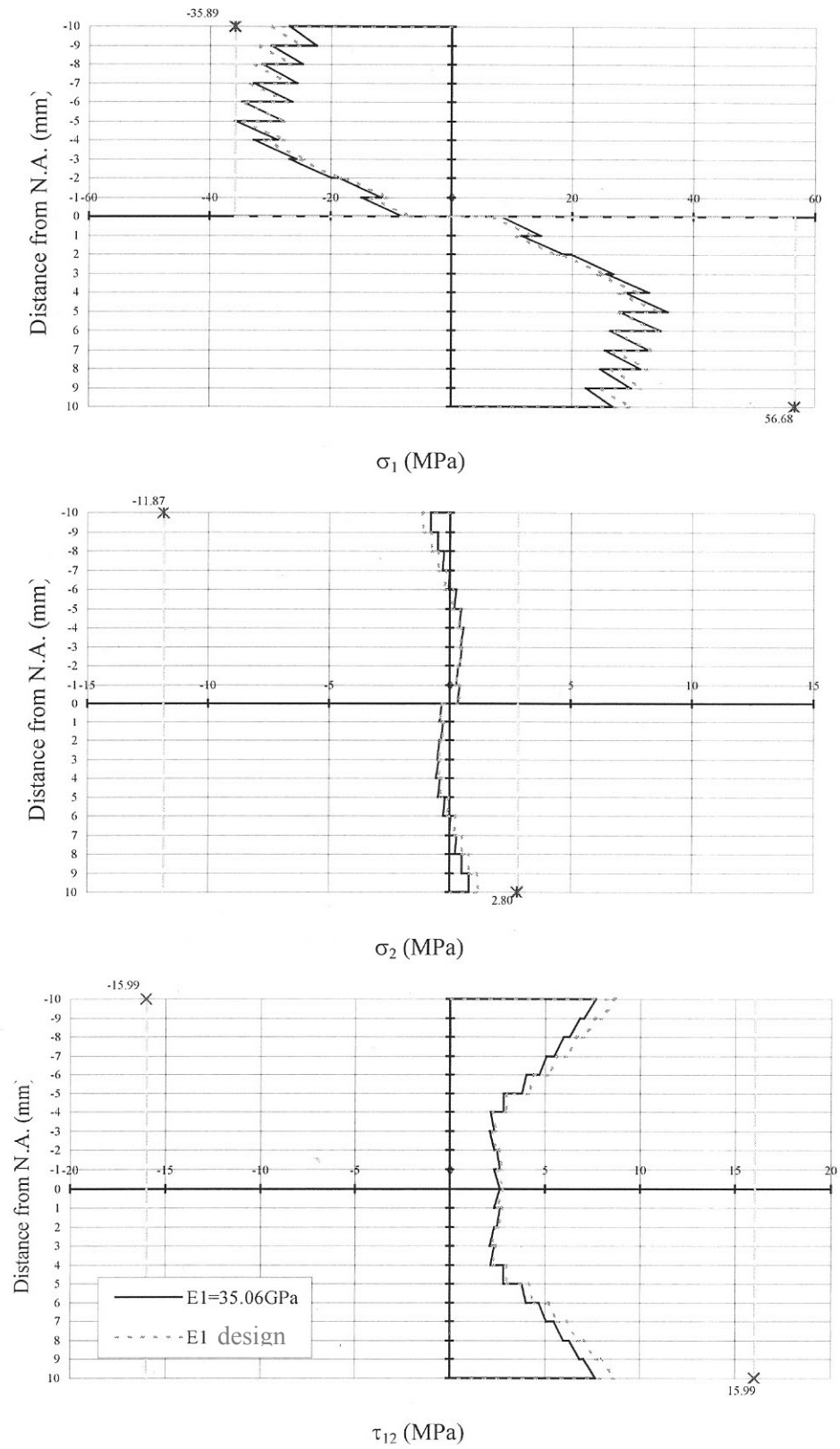


Fig.2.19 Stress profiles of OSL with  $E_1 = 35.06$  GPa (continuous line) and with  $E_1 = 28.05$  GPa (dash line) according to MSC

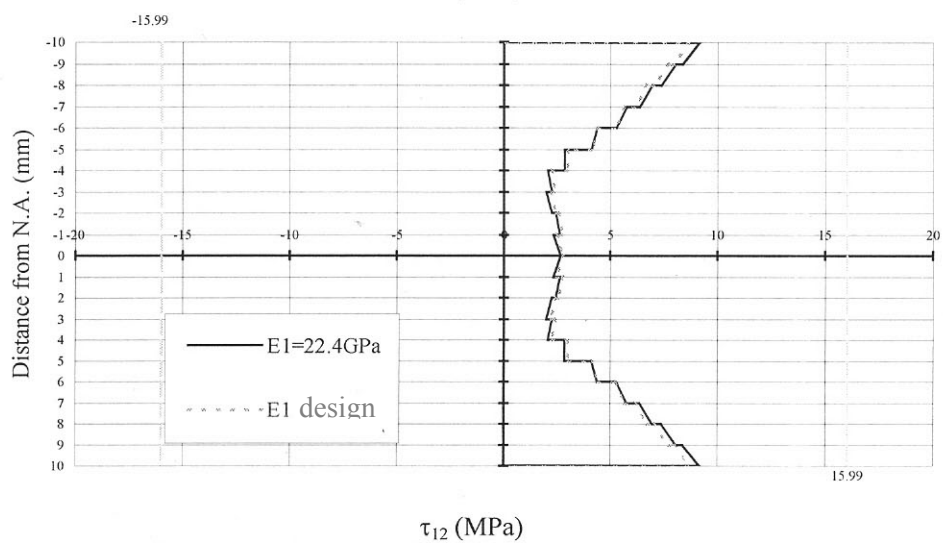
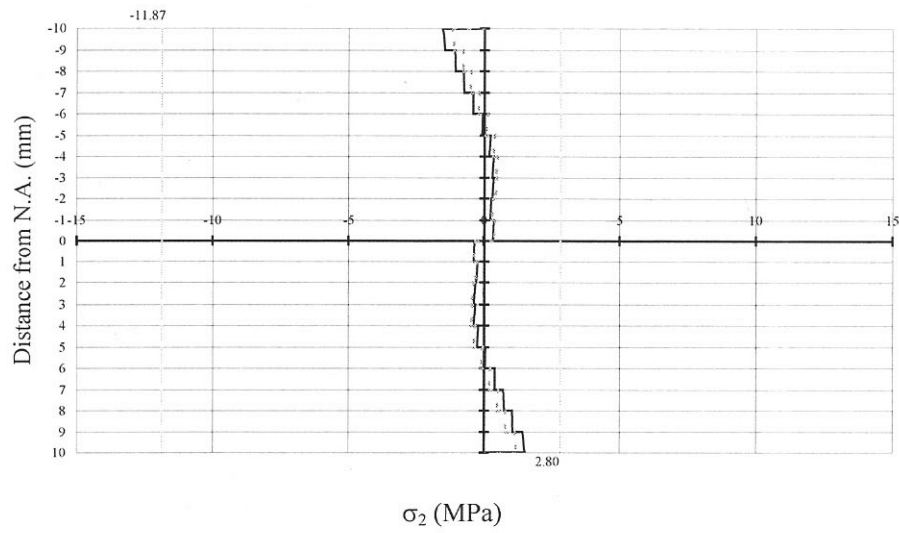
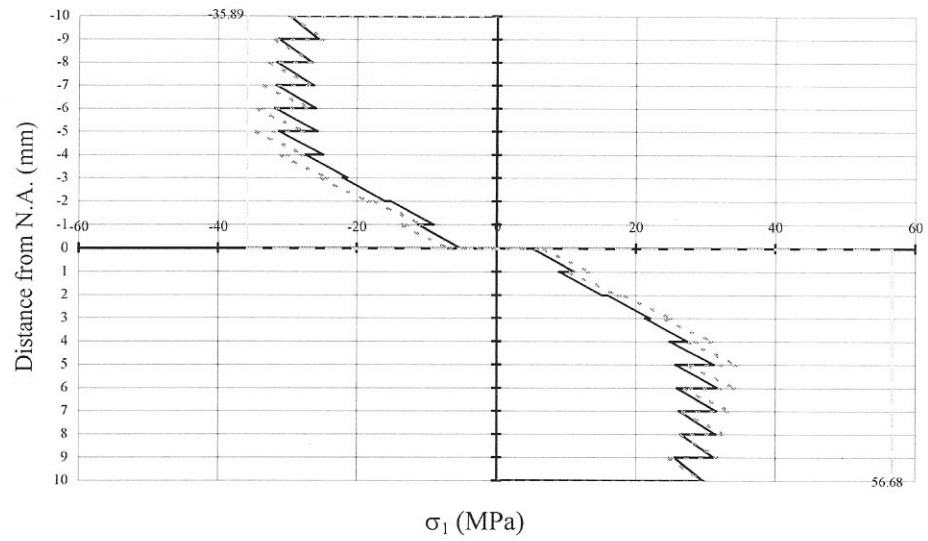


Fig.2.20 Stress profiles of OSL with  $E_1 = 22.4$  GPa (continuous line) and with  $E_1 = 28.05$  GPa (dash line) according to THC

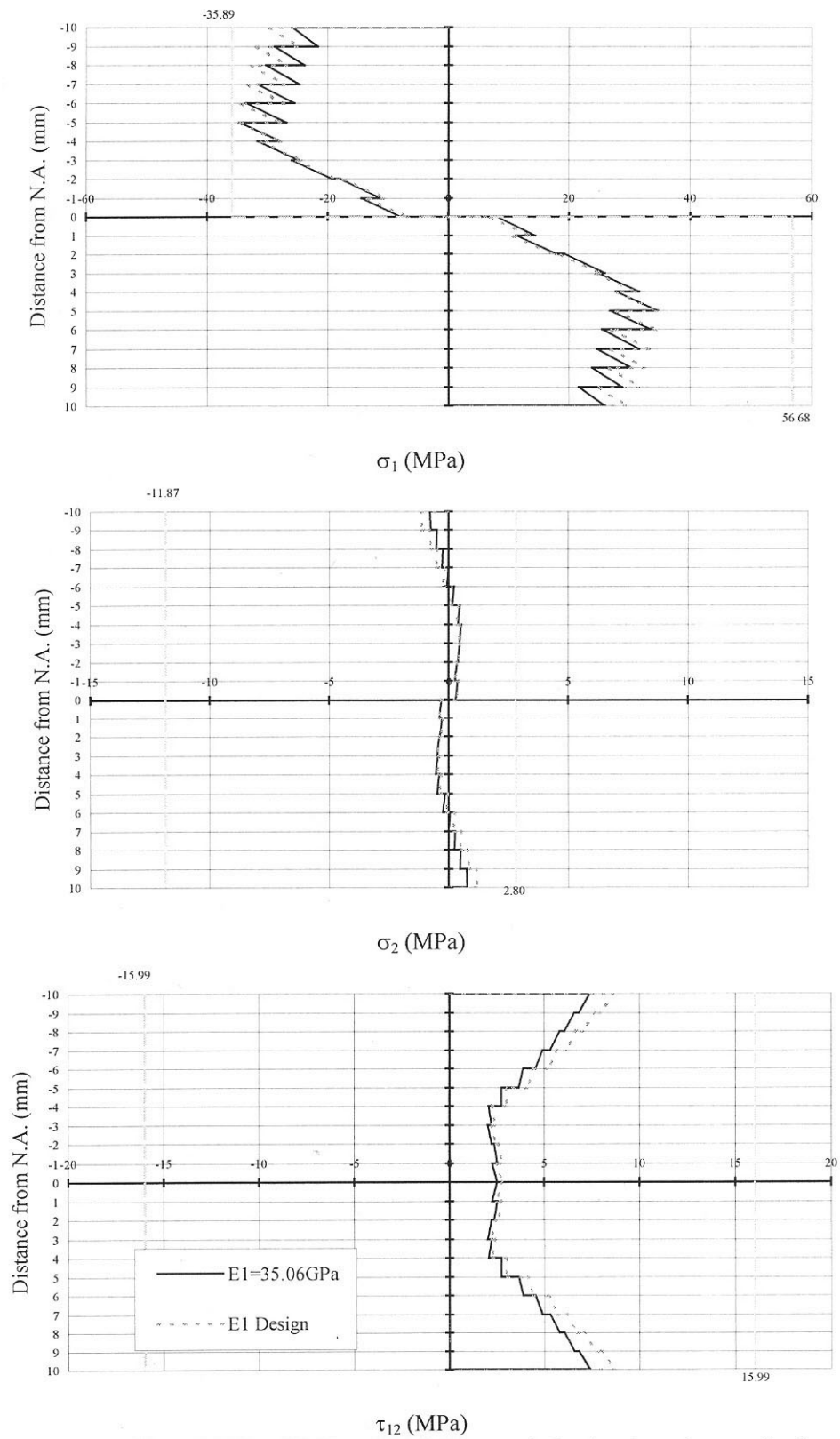


Fig.2.21 Stress profiles of OSL with  $E_1 = 35.06$  GPa (continuous line) and with  $E_1 = 28.05$  GPa (dash line) according to THC

เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ ขณะที่โมดูลัสยืดหยุ่นก น้อยกว่าที่จุดออกแบบ ( $E_1 < 28.05$  GPa) จาก Fig.2.20 โมเมนต์สูงสุดที่สามารถรับได้ลดลง เนื่องจากความเค้น  $\sigma_2$  และ  $\tau_{12}$  ในชั้นนอก ๆ (ระยะห่างจากแกนสะเทิน -10 มม.) สูงขึ้นกว่าปกติ พจน์  $\frac{V^2}{Y^2}$  และ  $\frac{W^2}{S^2}$  จึงมีค่ามากขึ้น โมดมเนตที่ได้จากสมการ 2.19 จึงมีค่าน้อยลง แต่เมื่อโมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้น ( $E_1 > 28.05$  GPa) ตาม Fig.2.21 ความเค้นตามเส้นในบางชั้นสูงขึ้น กว่าปกติ ในขณะที่ความเค้นในแนวอื่น ๆ เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเทียบกับค่าเดิม (ระยะห่าง จากแกนสะเทิน -5 มม.) พจน์  $\frac{U^2}{X^2}$  จึงสูงขึ้นดังนั้นโมเมนต์ตัดตามสมการ 2.19 จึงน้อยลง

(ช) โมดูลัสยืดหยุ่นตั้งฉากเส้น (Modulus of Elasticity Perpendicular to Grain:  $E_2$ )

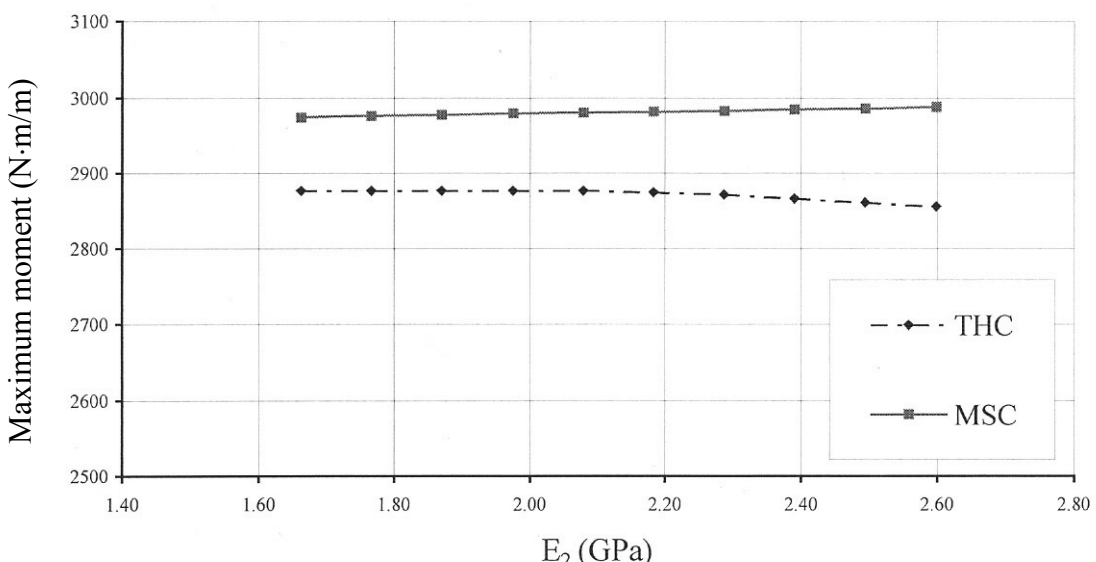


Fig.2.22 Sensitivity of OSL on modulus of elasticity perpendicular to grain

จาก Fig.2.22 เมื่อโมดูลัสยืดหยุ่นตั้งฉากเส้นเพิ่มขึ้นโมเมนต์ สูงสุดเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสยืดหยุ่นตั้งฉากเส้นทำให้ การกระจายความเค้นเปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาการกระจายความเค้นตามเกณฑ์ความเค้น สูงสุดแล้ว (Fig.2.23) พบว่า ความเค้นที่รับได้ทุกชั้นสูงขึ้นจึงทำให้เม้นต์ลัธที่ได้สูงขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของไซฮิลล์ โมดูลัสยืดหยุ่นตั้งฉากเส้นมากขึ้นทำให้ความเค้นตั้งฉาก เส้น ( $\sigma_2$ ) และความเค้นเฉือน ( $\tau_{12}$ ) มีค่ามากขึ้นตามรูป Fig.2.24 พจน์  $\frac{V^2}{Y^2}$  และ  $\frac{W^2}{S^2}$  ใน สมการ 2.19 จึงมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้โมเมนต์ลัธพีธี่ที่ได้มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามโมเมนต์ เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับจุดออกแบบ



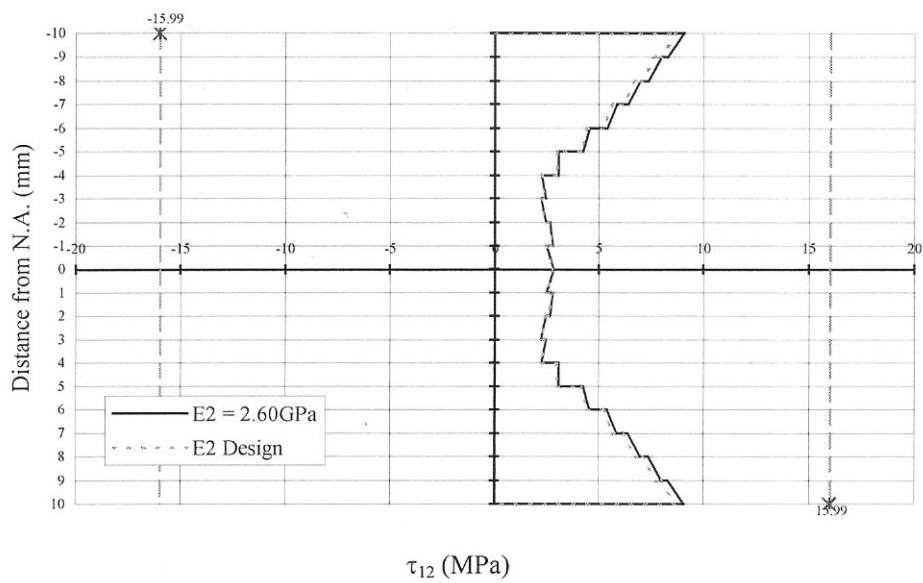
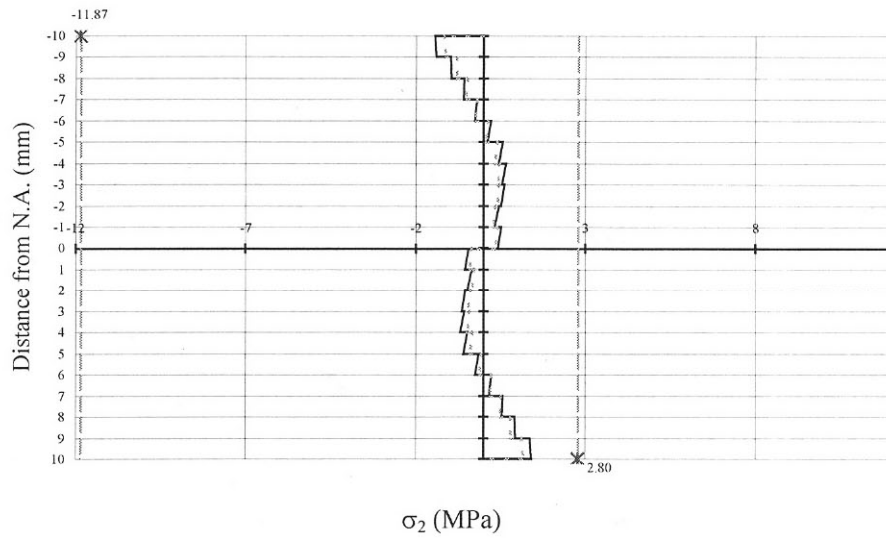
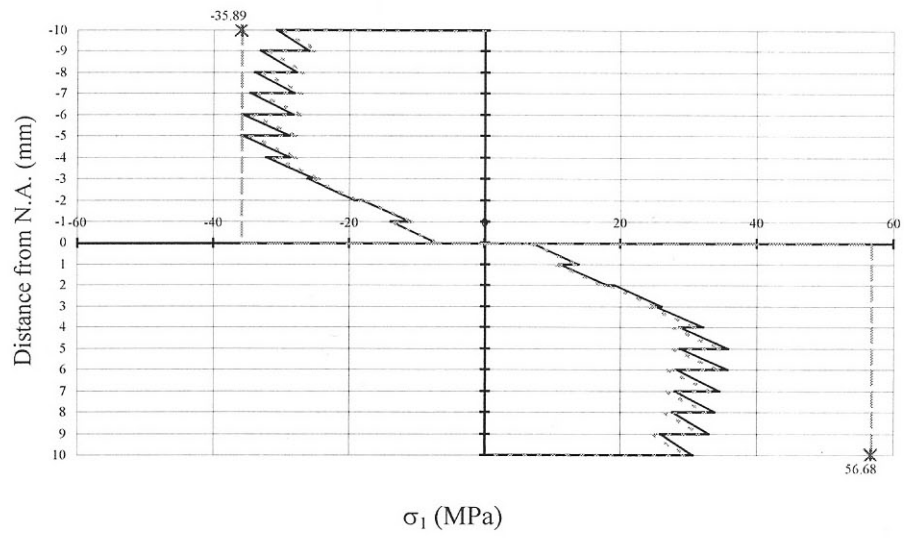


Fig.2.23 Stress profiles of OSL with  $E_2 = 2.60$  GPa (continuous line) and with  $E_2 = 2.08$  GPa (dash line) according to MSC

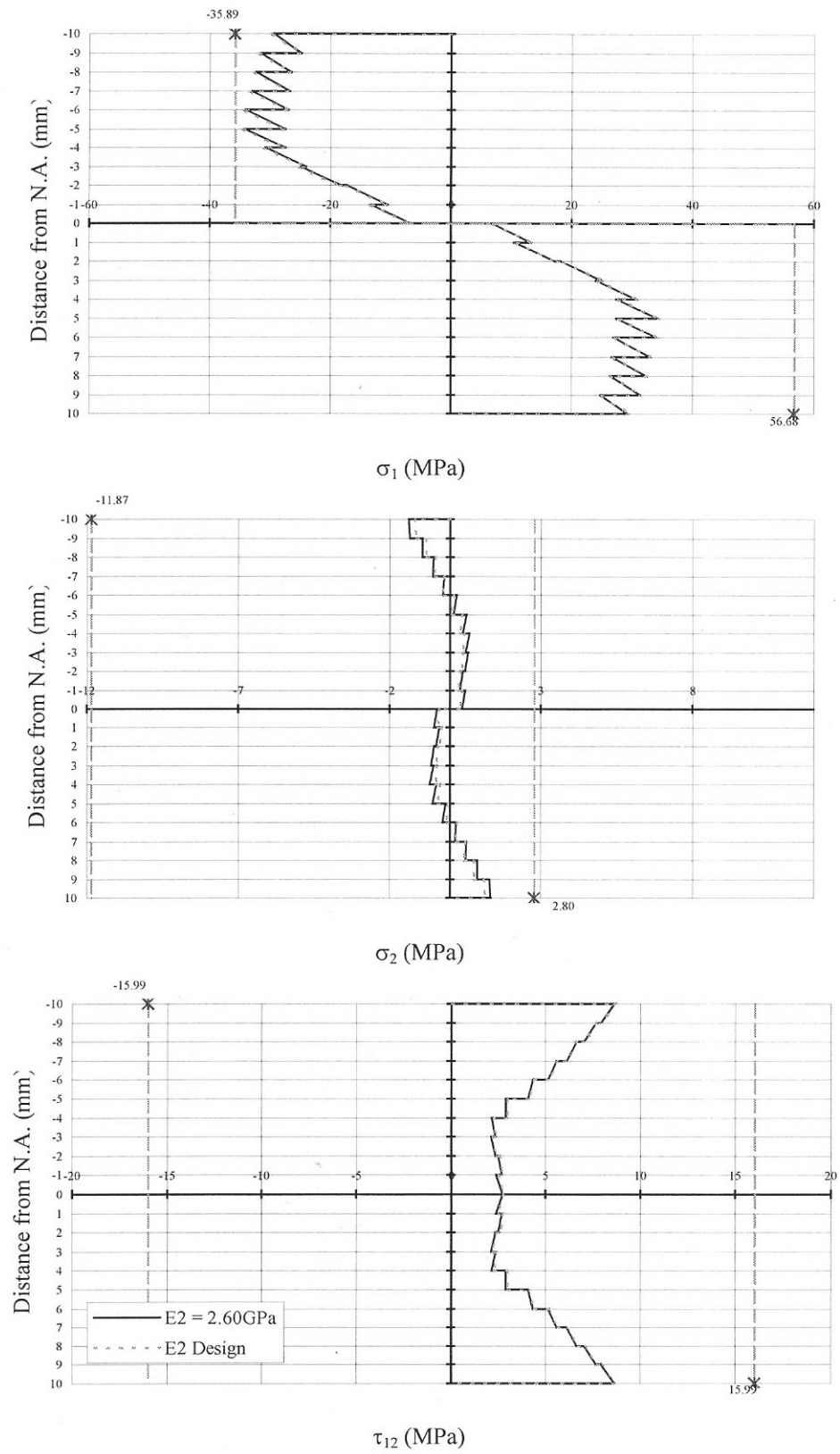


Fig.2.24 Stress profiles of OSL with  $E_2 = 2.60$  GPa (continuous line) and with  $E_2 = 2.08$  GPa (dash line) according to THC

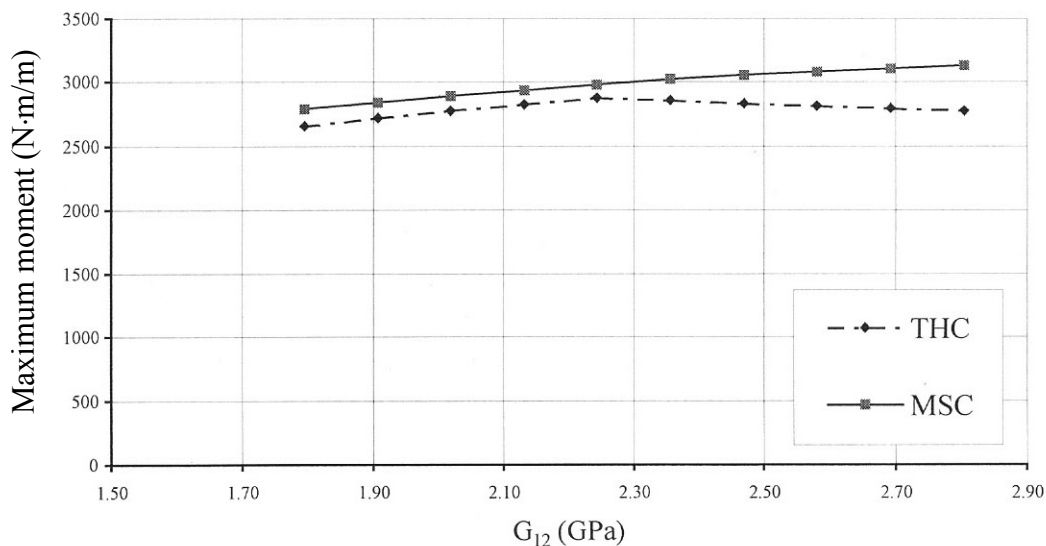
(ช) โมดูลัสเฉือน (Shear Modulus :  $G_{12}$ )

Fig.2.25 Sensitivity of OSL on shear modulus

Fig.2.25 แสดงให้เห็นว่า เมื่อโมดูลัสเฉือนเปลี่ยนแปลงไป โมเมนต์สูงสุดที่รับได้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเนื่องจากการกระจายความเค้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามโมดูลัสเฉือน เมื่อพิจารณาการกระจายความเค้นตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุดจาก Fig.2.26 พบว่า โมดูลัสเฉือนที่ลดลง ( $G_{12} < 2.24$  GPa) ทำให้รูปแบบการกระจายความเค้นเปลี่ยนไปจากเดิมโดยความเค้นชั้นนอก ๆ มีค่าลดลง (ระยะห่างจากแกนสะเทิน 10 มม. 7 มม. และ -10 มม. ถึง -7 มม.) ในขณะที่ชั้นที่อยู่ถัดเข้ามาความเค้นสูงขึ้นและในชั้นนี้เองที่เป็นชั้นที่เกิดการวิบัติ และเมื่ออินทิเกรตหาโมเมนต์ตัดลัพท์จึงได้ค่าน้อยกว่าจุดออกแบบ แต่เมื่อโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้น ( $G_{12} > 2.24$  GPa) ตาม Fig.2.27 ความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นต่าง ๆ ก็เพิ่มขึ้นและมากกว่าความเค้นที่เกิดขึ้น ณ จุดออกแบบ โมเมนต์ลัพท์จึงมากกว่าที่จุดออกแบบ หรือกล่าวได้ว่าตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุด เมื่อโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นโมเมนต์ที่โอเอสแอลสามารถรับได้ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ ขณะที่โมดูลัสเฉือนลดลง ( $G_{12} < 2.24$  GPa) จาก Fig.2.28 ความเค้นในชั้นต่าง ๆ ก็ลดลง แต่มีบางชั้นที่ความเค้นสูงขึ้นกว่าปกติจนเป็นชั้นที่กำหนดการวิบัติเช่นเดียวกับที่เกิดในเกณฑ์ความเค้นสูงสุด โมเมนต์ลัพท์จึงมีค่าลดลง แต่เมื่อโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นจากจุดออกแบบ ( $G_{12} < 2.24$  GPa) ตาม Fig.2.29 ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นต่าง ๆ เพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วกว่าความเค้นในแนวอื่น ๆ

อย่างมากโดยเฉพาะชั้นที่อยู่นอกสุด (ระยะห่างจากแกนสะเทิน -10 มม.) พจน์  $\frac{W^2}{S^2}$  ในสมการ 2.19 ที่สูงขึ้นทำให้โมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการ 2.19 มีค่าน้อยลง และจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อโมดูลัสเฉือนเปลี่ยนไปจากจุดออกแบบจะทำให้โมเมนต์ลัพท์ที่สามารถรับได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่จุดออกแบบทั้งสิ้น แม้เกณฑ์ความเค้นสูงสุดและเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์จะได้ข้อสรุปที่แตกต่างกันแต่ก็แสดงให้เห็นว่าโมดูลัสเฉือนมีผลต่อโมเมนต์สูงสุดที่โอเอสแอลสามารถรับได้

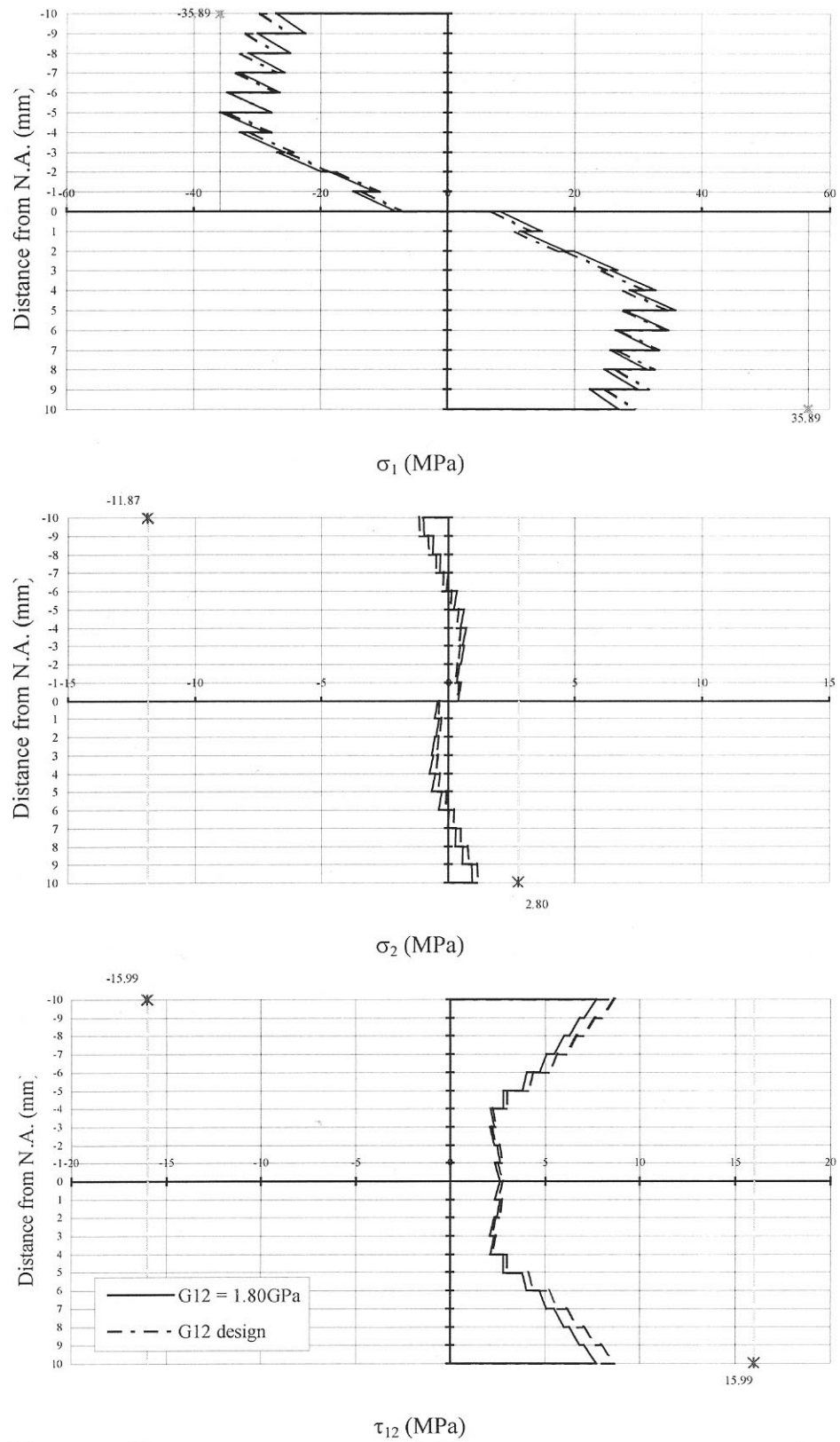


Fig.2.26 Stress profiles of OSL with  $G_{12} = 1.80 \text{ GPa}$  (continuous line) and with  $G_{12} = 2.24 \text{ GPa}$  (dash line) according to MSC

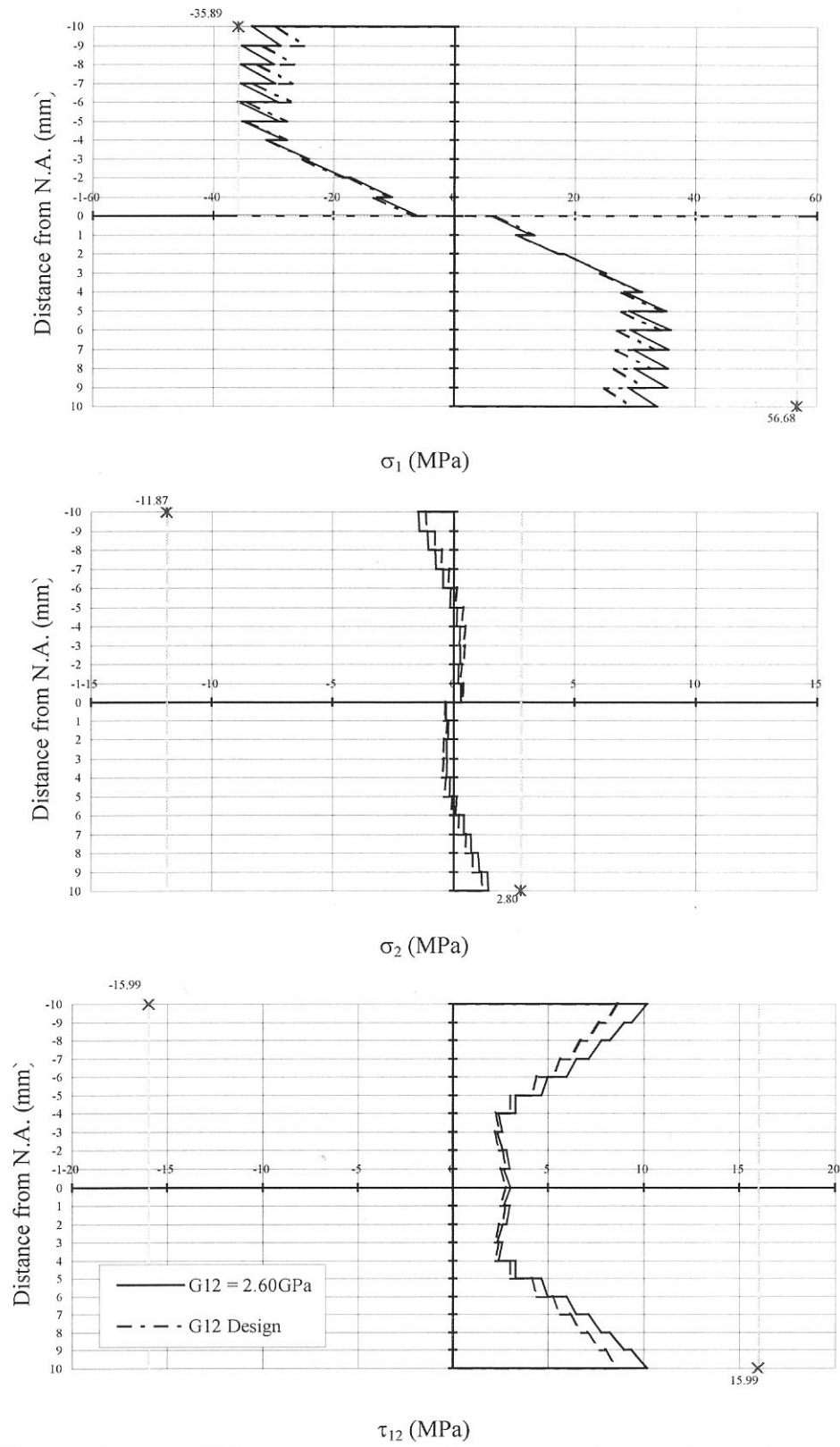


Fig.2.27 Stress profiles of OSL with  $G_{12} = 2.60$  GPa (continuous line) and with  $G_{12} = 2.24$  GPa (dash line) according to MSC

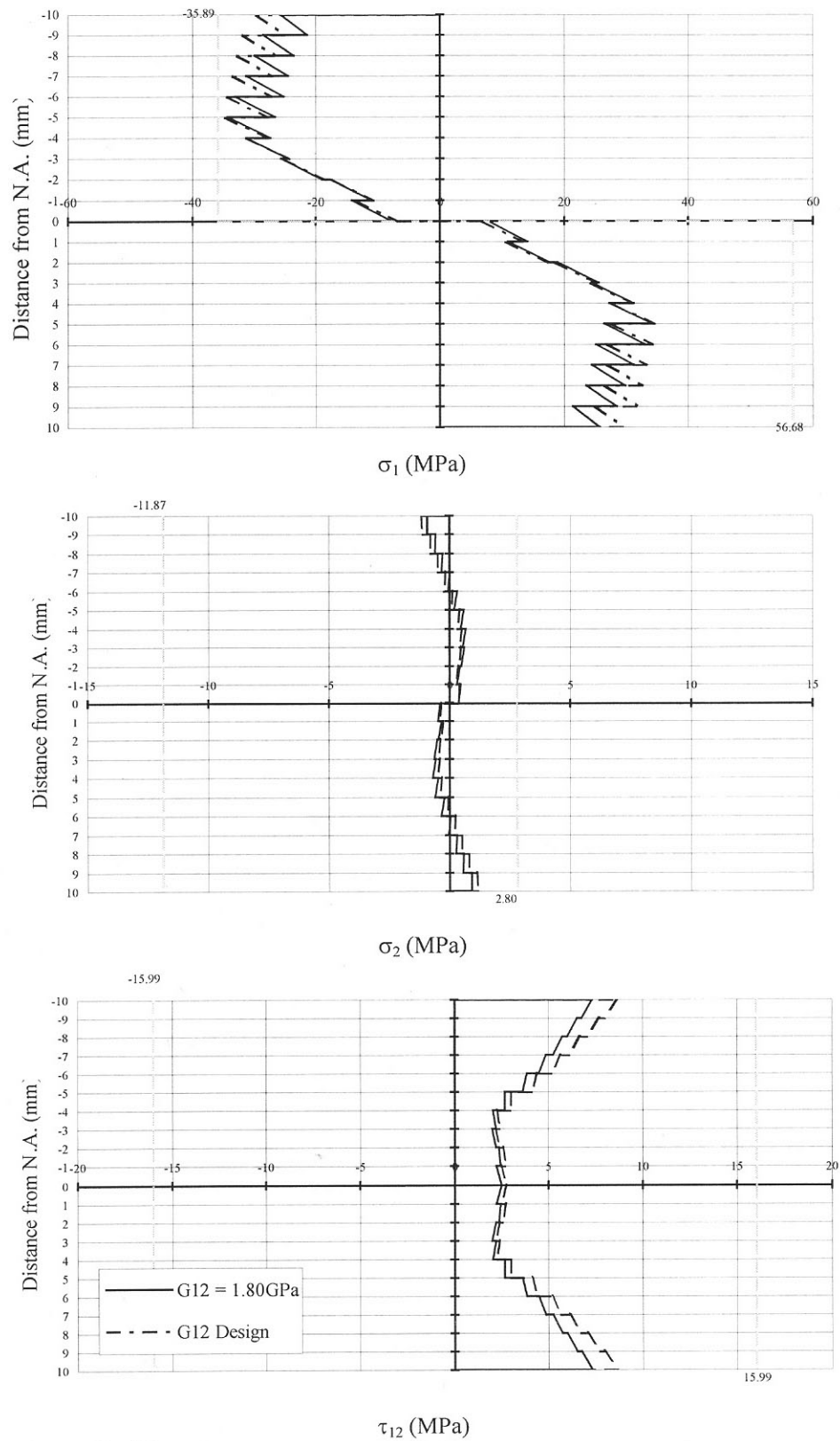


Fig.2.28 Stress profiles of OSL with  $G_{12} = 1.80$  GPa (continuous line) and with  $G_{12} = 2.24$  GPa (dash line) according to THC

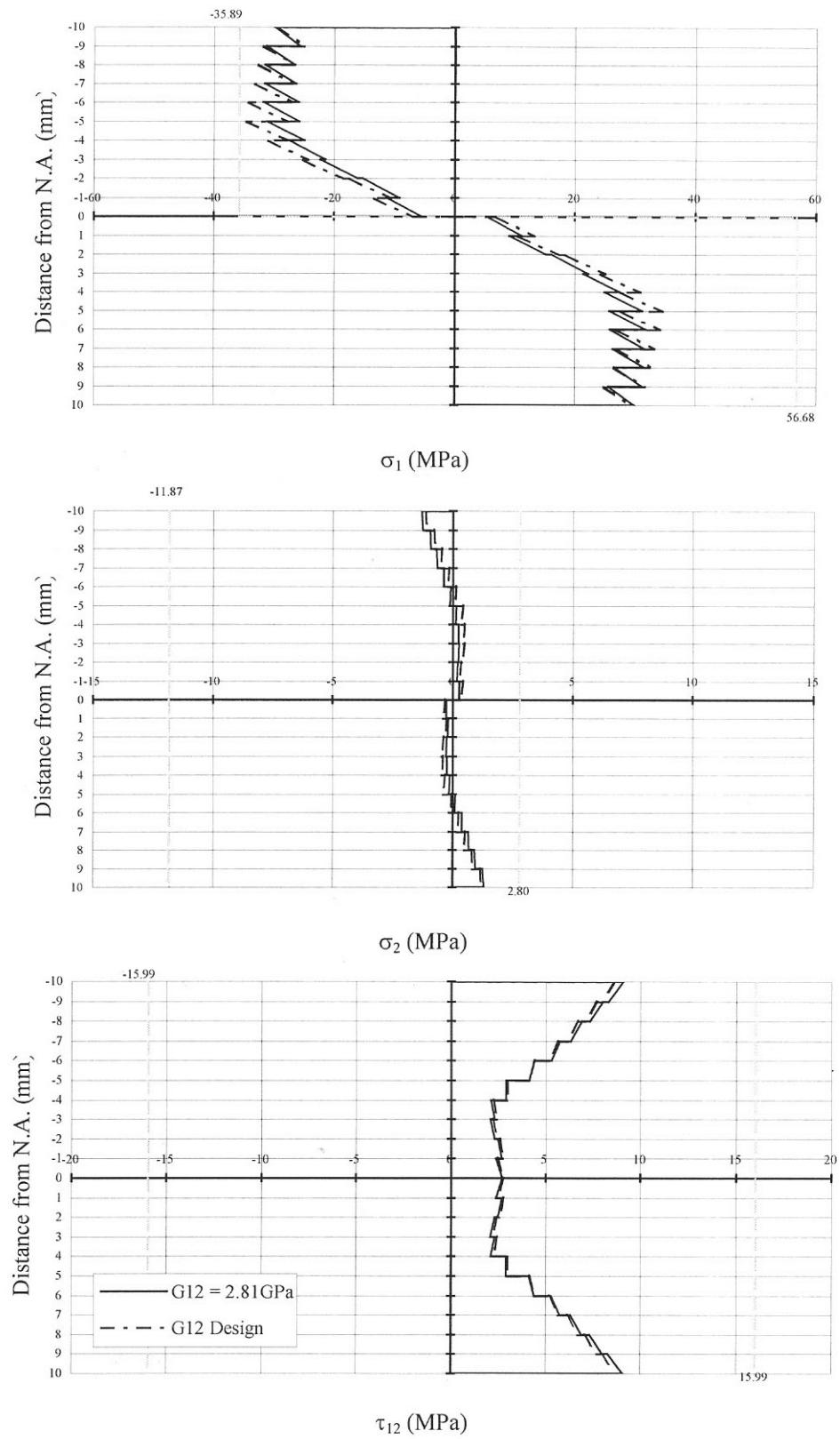


Fig.2.29 Stress profiles of OSL with  $G_{12} = 2.81$  GPa (continuous line) and with  $G_{12} = 2.24$  GPa (dash line) according to THC

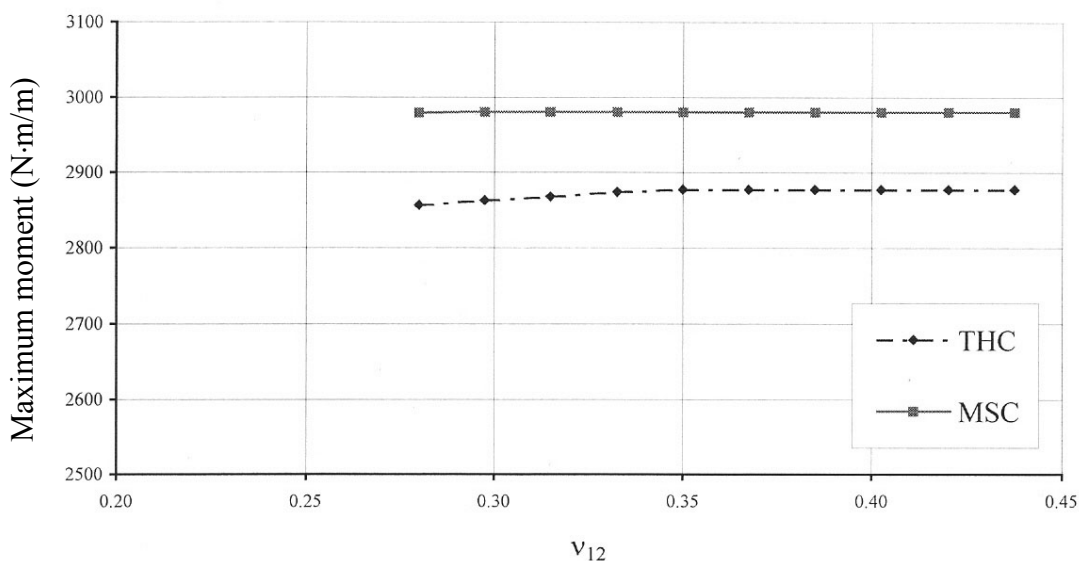
(ณ) อัตราส่วนพัทธ์ของ (Poisson's Ratio :  $\nu_{12}$ )

Fig.2.30 Sensitivity of OSL on Poisson's ratio

Fig.2.30 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนพัทธ์ของลดลงทำให้ค่าโมเมนต์ลัพท์ที่รับได้สูงสุดมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาการกระจายความเค้นตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุดใน Fig.2.31 และ Fig.2.32 ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากและความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่รูปแบบของความเค้นตามเสี้ยนยังคงเดิม ทำให้โมเมนต์ลัพท์ที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก ในขณะที่เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ ความเค้นตั้งฉากเสี้ยนและความเค้นเฉือนที่มากขึ้นแม้เพียงเล็กน้อยแต่ก็มีผลต่อพจน์  $\frac{V^2}{Y^2}$  และ  $\frac{W^2}{S^2}$  ในสมการ 2.19 ให้มีค่าเพิ่มขึ้น โมเมนต์ลัพท์ของไอเอสแอลจึงมีค่าลดลงนั่นเอง

ผลของการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของไม้ที่ใช้ทำไอเอสแอลทำให้ขอบเขตการวิบัติของไอเอสแอลเปลี่ยนแปลงไปโดยตรงจึงทำให้ความแข็งแรงตัดของไอเอสแอลเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ที่จุดออกแบบความแข็งแรงอัดตามเสี้ยนมีผลต่อโมเมนต์ลัพท์มากที่สุดโดยความแข็งแรงอัดตามเสี้ยนมีค่ามากขึ้นทำให้โมเมนต์ลัพท์มากขึ้นด้วย ในขณะที่ความแข็งแรงตั้งฉากเสี้ยนและความแข็งแรงเฉือนจะมีผลต่อโมเมนต์ลัพท์ก็ต่อเมื่อความแข็งแรงทั้งสองค่านี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ใช้ออกแบบมากๆ แล้วจะทำให้โมเมนต์ลัพท์มีค่าน้อยลง สมบัติเชิงกลอีกกลุ่มหนึ่งได้แก่มอดูลัสยืดหยุ่นต่างๆและอัตราส่วนพัทธ์ของมีผลทำให้รูปแบบการกระจายความเค้นเปลี่ยนแปลงไปจากรูปแบบการกระจายความเค้น ณ จุดออกแบบเมื่ออินทิเกรตหาโมเมนต์ลัพท์จึงได้ค่าแตกต่างจากจุดออกแบบ มอดูลัสยืดหยุ่นตามเสี้ยนและมอดูลัสเฉือนมีผลต่อรูปแบบการกระจายความเค้นมากกว่ามอดูลัสยืดหยุ่นตั้งฉากเสี้ยนและอัตราส่วนพัทธ์ของ จึงมีผลต่อโมเมนต์ลัพท์หรือความแข็งแรงตัดของไอเอสแอลมากกว่าตามลำดับ



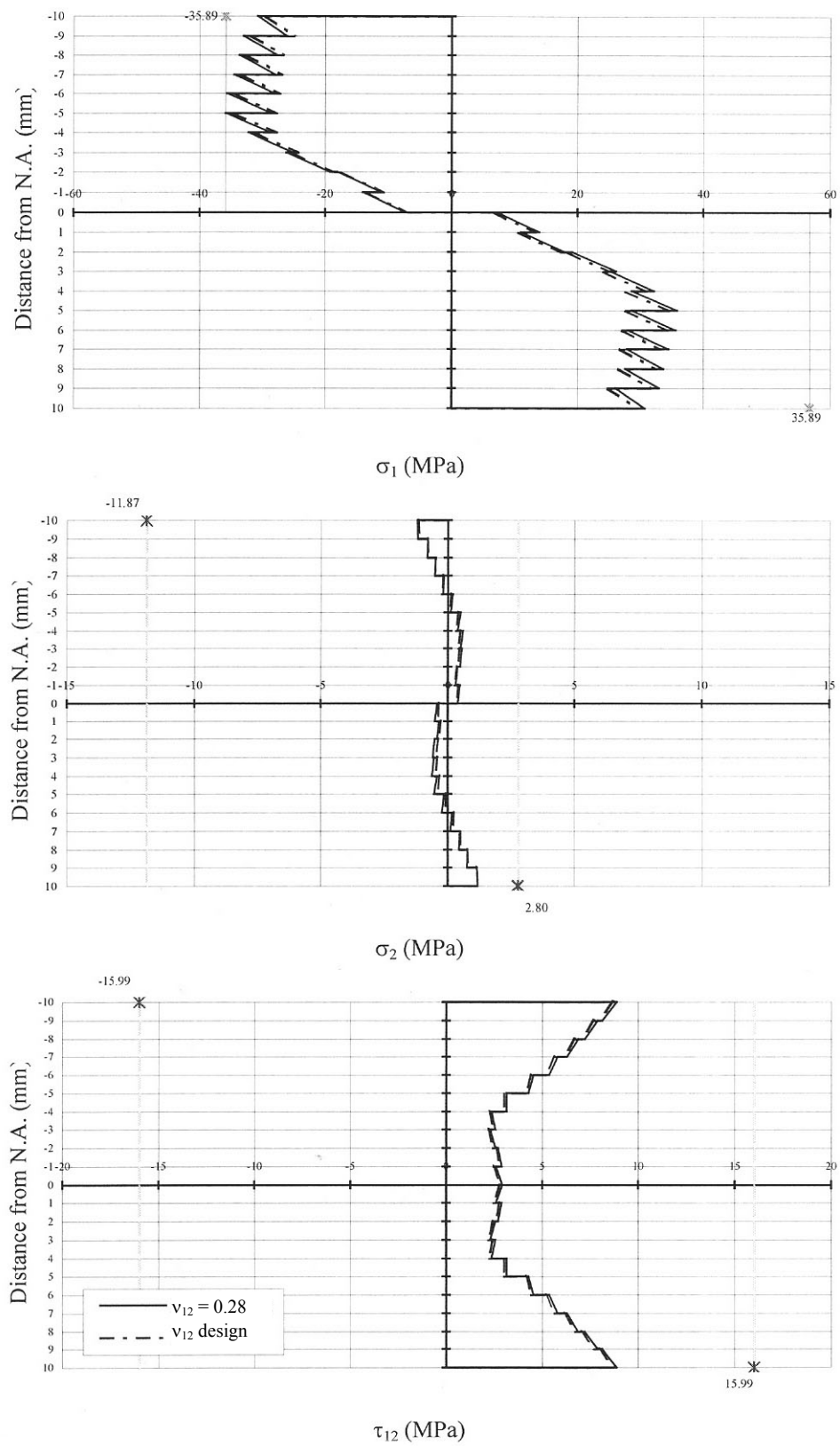


Fig.2.31 Stress profiles of OSL with  $\nu_{12} = 0.28$  (continuous line) and with  $\nu_{12} = 0.35$  (dash line) according to MSC

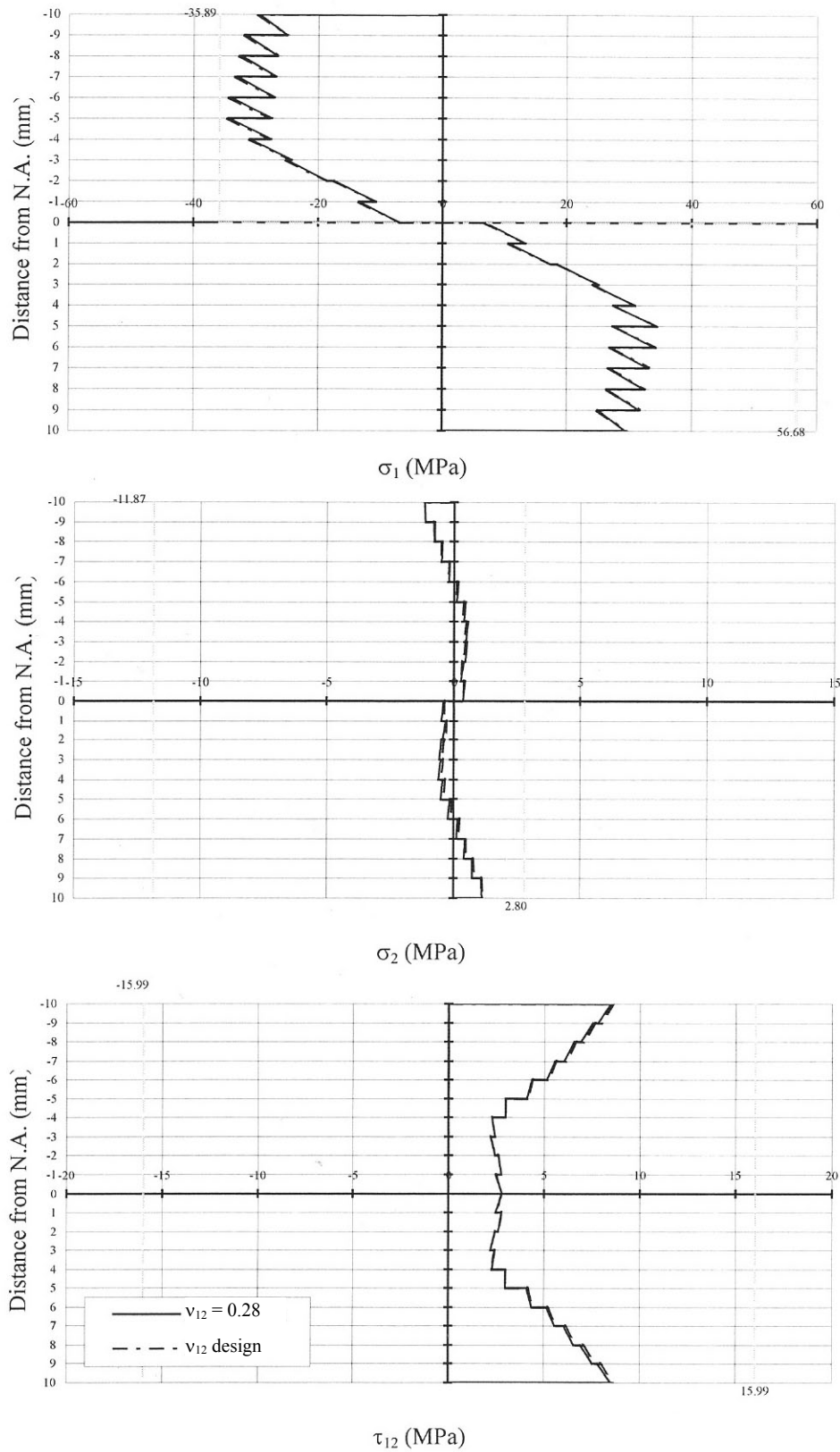


Fig.2.32 Stress profiles of OSL with  $\nu_{12} = 0.28$  (continuous line) and with  $\nu_{12} = 0.35$  (dash line) according to THC

### 2.5.2.2 ความอ่อนไหวต่อมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากจุดออกแบบ

(Angle Sensitivity)

ตั้งได้กล่าวไว้แล้วว่า มุมเรียงแถบไม้ที่เปลี่ยนไปมีผลต่อความแข็งแรงของโอเอสแอล และสำหรับการผลิตโอเอสแอลในระดับอุตสาหกรรมนั้น การเรียงมุมให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้เป็นเรื่องที่เป็นไปได้ยาก จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาความแข็งแรงของโอเอสแอลเมื่อมุมแถบไม้ไม่เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

ขั้นตอนการผลิตโอเอสแอลโดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จะโปรยแถบไม้ผ่านตัวเรียงแถบไม้โดยมีระยะตกจากตัวเรียงจนถึงแผ่นเตรียมอัดระยะตกนี้เองที่ทำให้มุมผิดเพี้ยนไป การคำนวณเปรียบเทียบจะสมมติให้มุมที่ผิดเพี้ยนจากจุดออกแบบอยู่ในช่วงไม่เกิน  $10^\circ$  คือมีทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ ( $\pm 5^\circ$ ) และได้แสดงค่าคำนวณเปรียบเทียบกับค่าสูงสุดไว้ใน Table 2.2 และ Table 2.3 ส่วนลักษณะการกระจายความเค้นเปรียบเทียบกับแบบการเรียงที่ดีที่สุดแสดงไว้ดังรูปที่ 15 - 34

Table 2.2 Angle sensitivity analysis of OSL Type I (MSC) when the angle of a layer changed to  $\pm 5^\circ$  and compared with the optimum orientation [  $31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ]<sub>A</sub> , optimum moment of  $3,244 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{m}$   
(Bold was the angle in the changed layer)

Changed Layer	Angle (Degree)	Bending Moment (Nm/m)	Difference from optimum moment (%)
Layer 1	[ <b>26</b> $^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,655.2	-18.15%
Layer 2	[ $31^\circ, $ <b>23</b> $^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,630.8	-18.91%
Layer 3	[ $31^\circ, 28^\circ, $ <b>20</b> $^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,686.8	-17.18%
Layer 4	[ $31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, $ <b>16</b> $^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,722.3	-16.08%
Layer 5	[ $31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, $ <b>11</b> $^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,773.5	-14.51%
Layer 6	[ $31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, $ <b>5</b> $^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,879.4	-11.24%
Layer 7	[ $31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, $ <b>-4</b> $^\circ, -8^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,965.4	-8.59%
Layer 8	[ $31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, $ <b>-3</b> $^\circ, -11^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	3,210.4	-1.04%
Layer 9	[ $31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, $ <b>-6</b> $^\circ, -27^\circ$ ] <sub>A</sub>	3,219.8	-0.75%
Layer 10	[ $31^\circ, 28^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 10^\circ, 1^\circ, -8^\circ, -11^\circ, $ <b>-22</b> $^\circ$ ] <sub>A</sub>	3,227.8	-0.50%

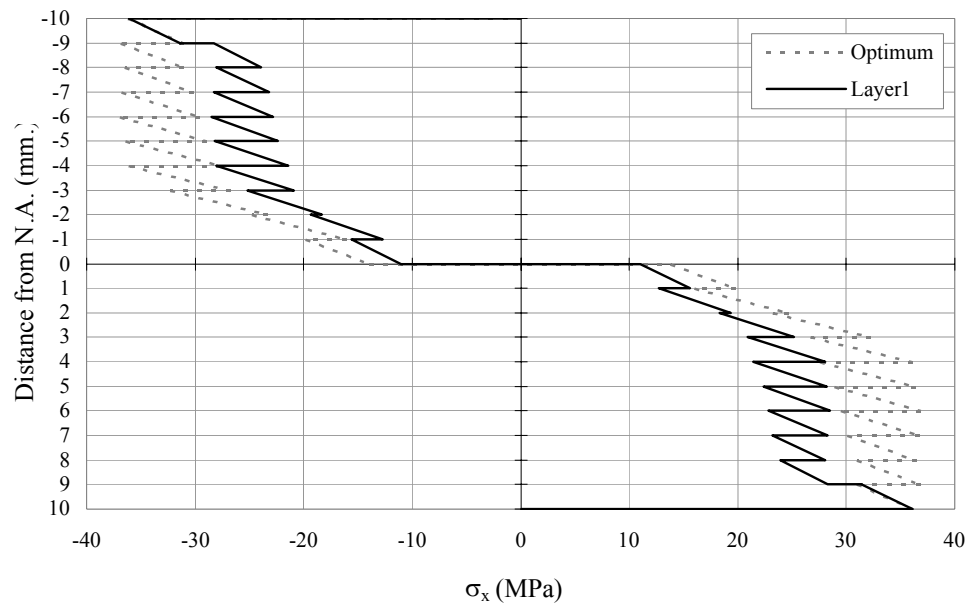


Fig.2.33 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 1 changed  $5^\circ$  (continuous line)

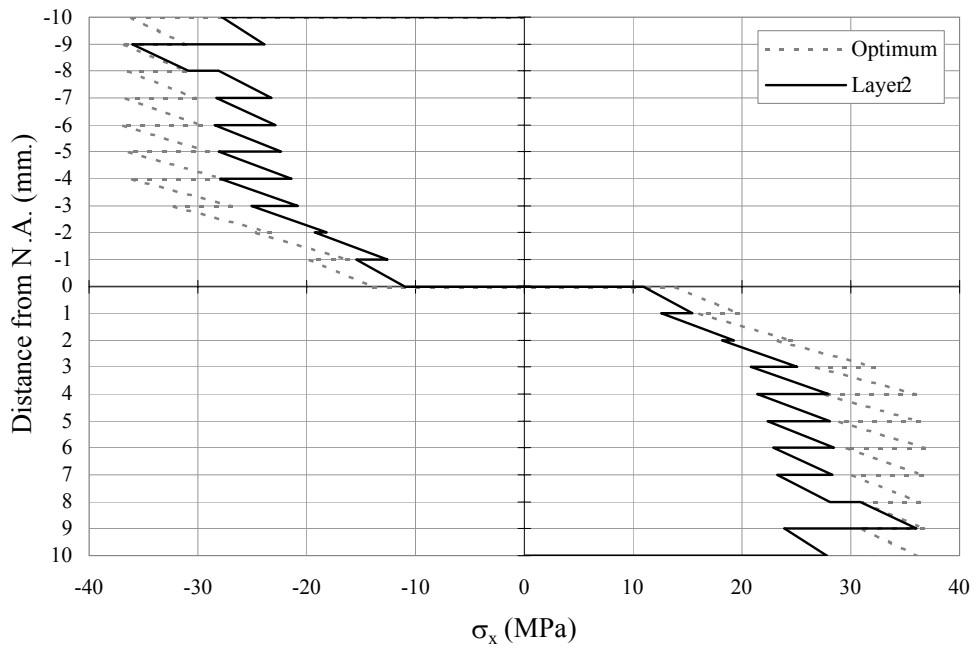


Fig.2.34 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 2 changed  $5^\circ$  (continuous line)

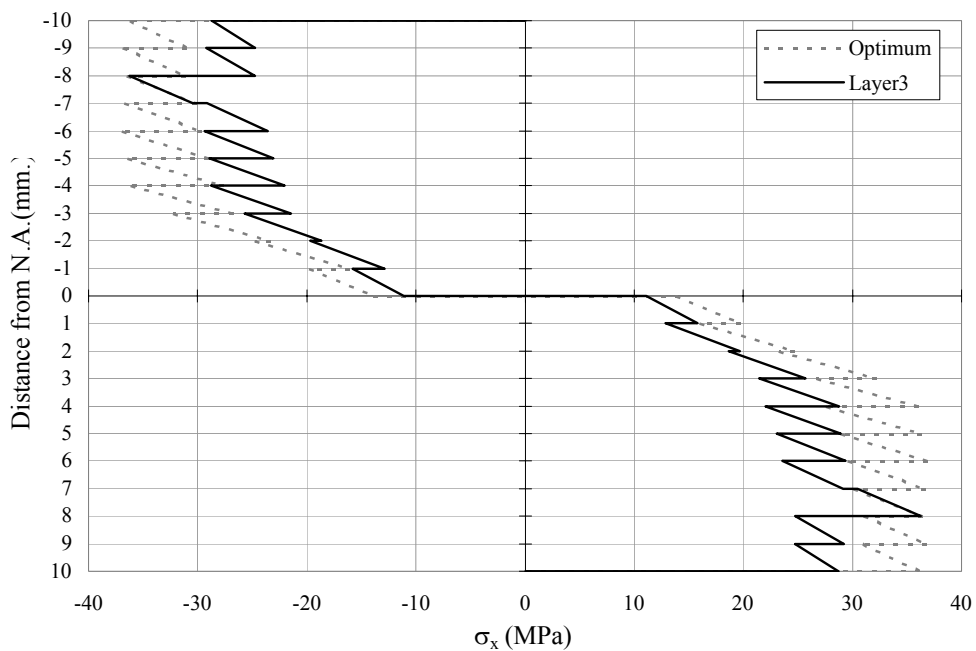


Fig.2.35 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 3 changed  $5^\circ$  (continuous line)

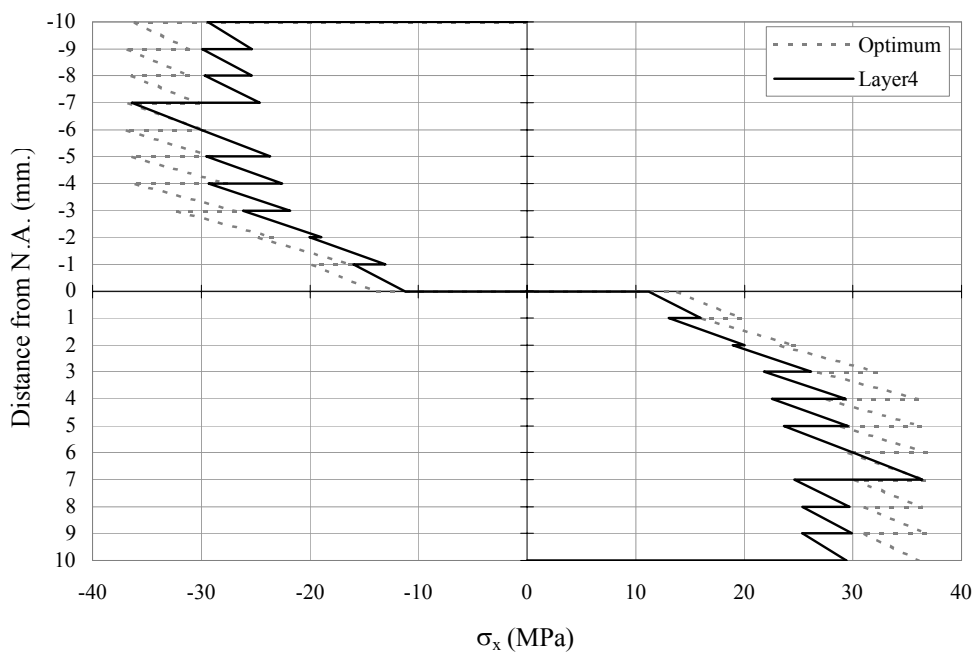


Fig.2.36 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 4 changed  $5^\circ$  (continuous line)

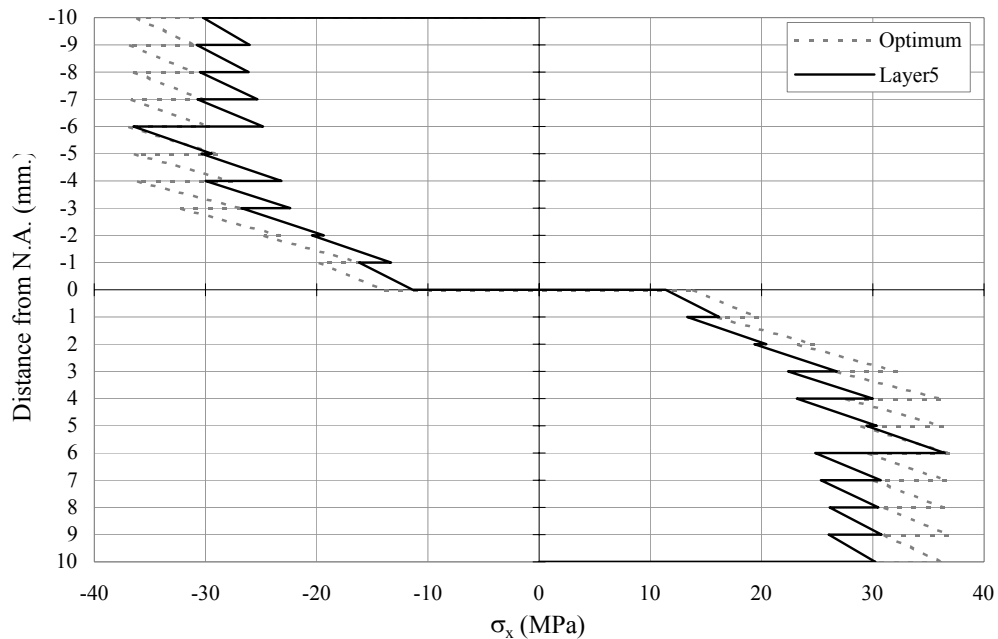


Fig.2.37 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 5 changed  $5^\circ$  (continuous line)

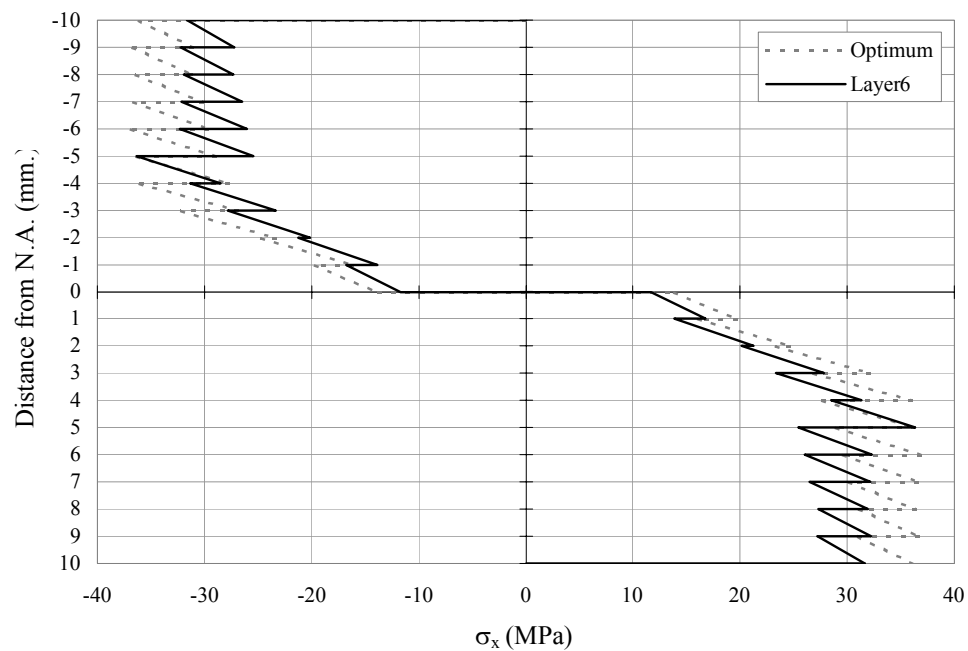


Fig.2.38 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 6 changed  $5^\circ$  (continuous line)

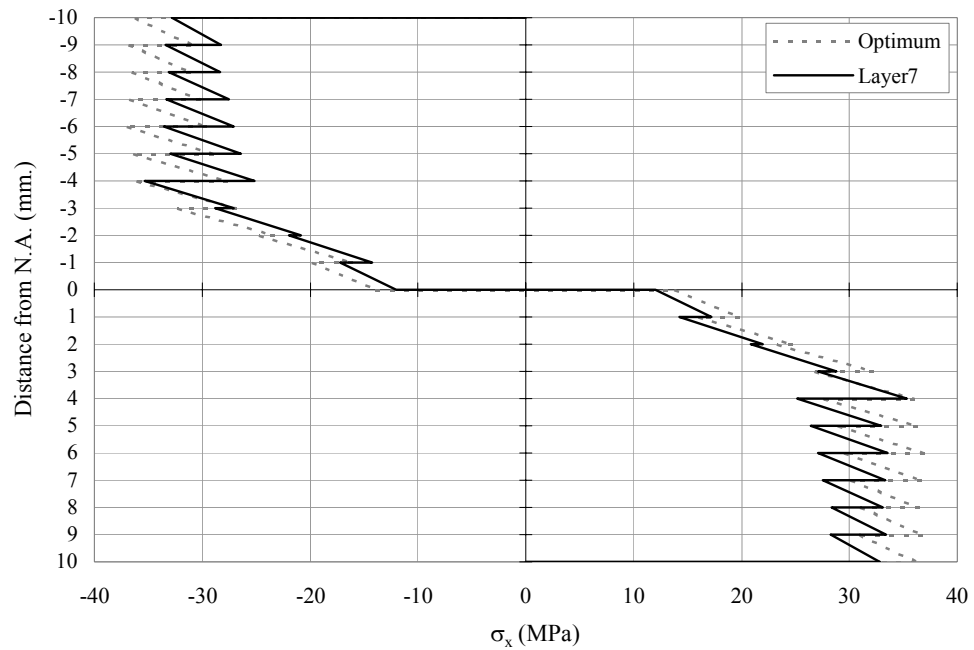


Fig.2.39 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 7 changed  $5^\circ$  (continuous line)

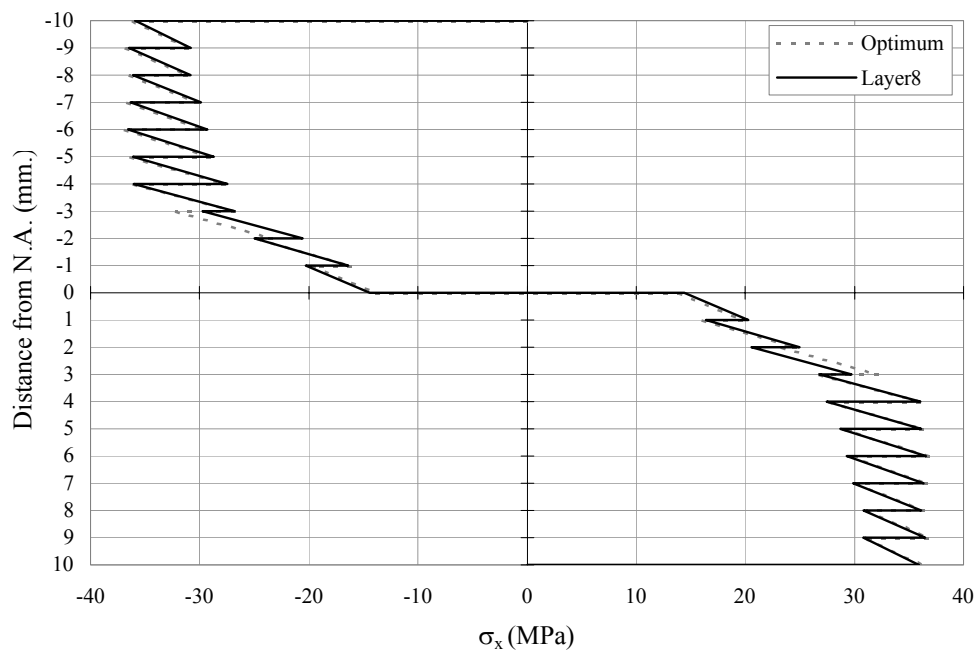


Fig.2.40 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 8 changed  $5^\circ$  (continuous line)

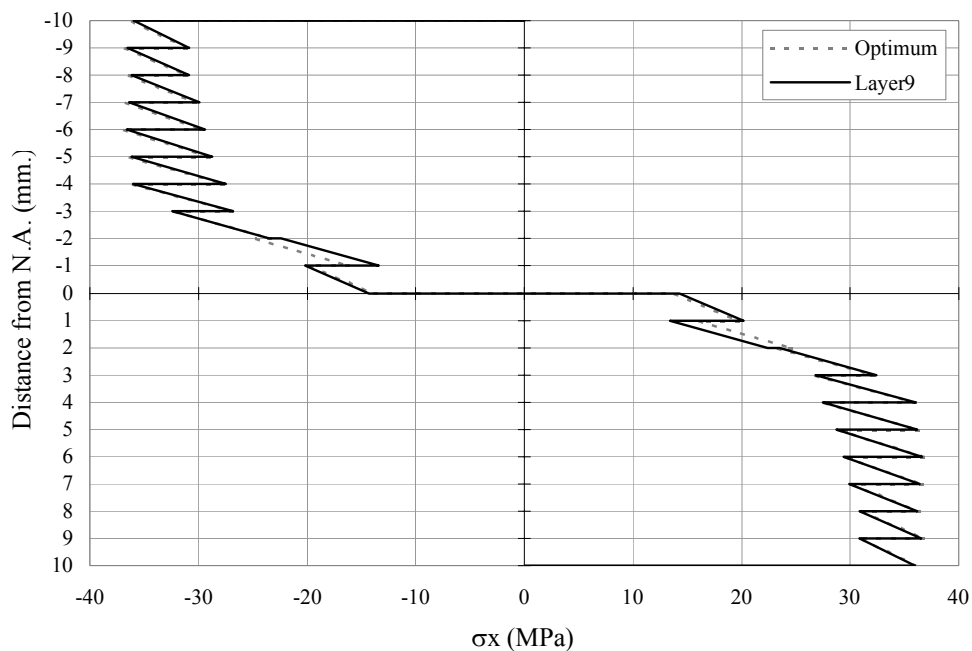


Fig.2.41 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 9 changed  $5^\circ$  (continuous line)

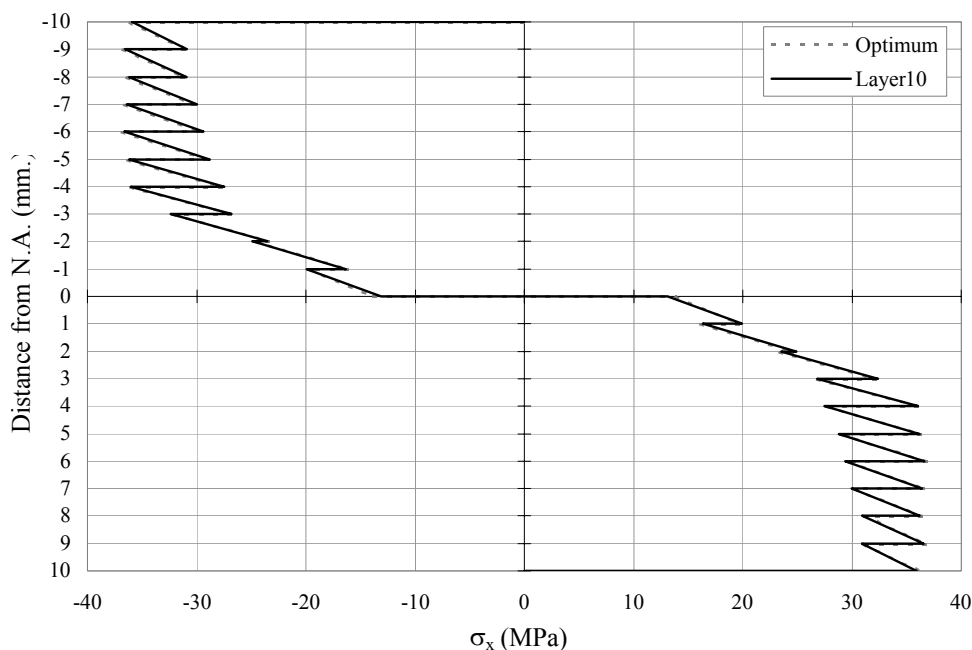


Fig.2.42 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type I (MSC) with layer 10 changed  $5^\circ$  (continuous line)



Table 2.3 Angle sensitivity analysis of OSL Type I (MSC) when the angle of a layer changed to  $\pm 5^\circ$  and compared with the optimum orientation [  $29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ$  ]<sub>A</sub>, optimum moment of  $2,877.50 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{m}$   
(Bold was the angle in the changed layer)

Changed Layer	Angle (Degree)	Bending Moment (Nm/m)	Difference from optimum moment (%)
Layer 1	[ <b>24</b> $^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,556.1	-11.17%
Layer 2	[ $29^\circ, $ <b>20</b> $^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,524.1	-12.28%
Layer 3	[ $29^\circ, 25^\circ, $ <b>16</b> $^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,560.9	-11.00%
Layer 4	[ $29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, $ <b>11</b> $^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,607.4	-9.39%
Layer 5	[ $29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, $ <b>4</b> $^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,648.9	-7.94%
Layer 6	[ $29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, $ <b>-5</b> $^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,766.7	-3.85%
Layer 7	[ $29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, $ <b>-1</b> $^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,862.7	-0.51%
Layer 8	[ $29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, $ <b>-3</b> $^\circ, -6^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,868.3	-0.32%
Layer 9	[ $29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, $ <b>-1</b> $^\circ, -11^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,871.8	-0.20%
Layer 10	[ $29^\circ, 25^\circ, 21^\circ, 16^\circ, 9^\circ, 0^\circ, -6^\circ, -8^\circ, -6^\circ, $ <b>-6</b> $^\circ$ ] <sub>A</sub>	2,872.4	-0.18%

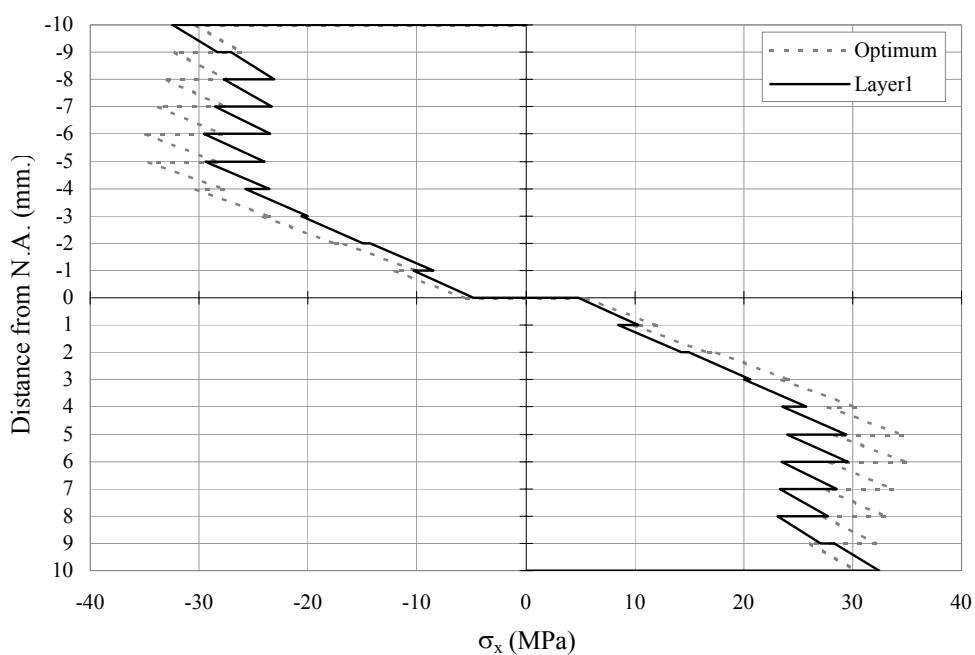


Fig.2.43 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 1 changed  $5^\circ$  (continuous line)

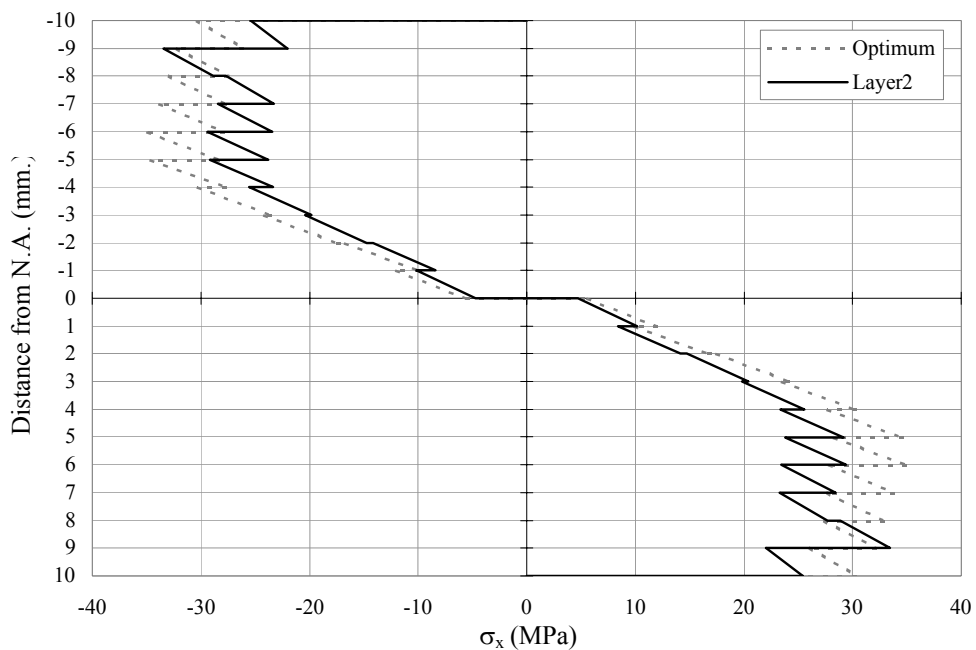


Fig.2.44 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 2 changed  $5^\circ$  (continuous line)

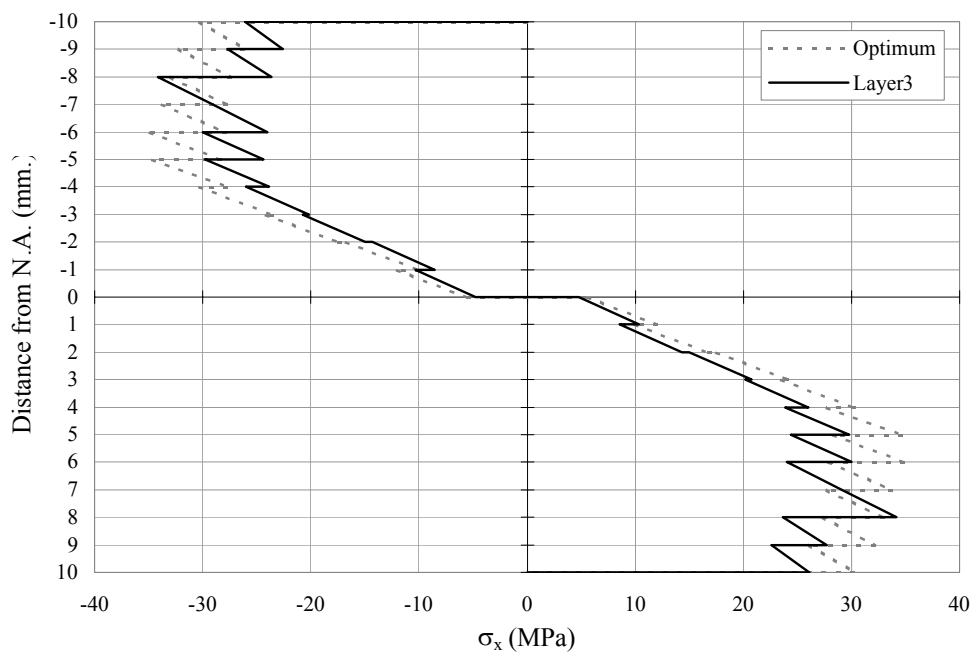


Fig.2.45 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 3 changed  $5^\circ$  (continuous line)

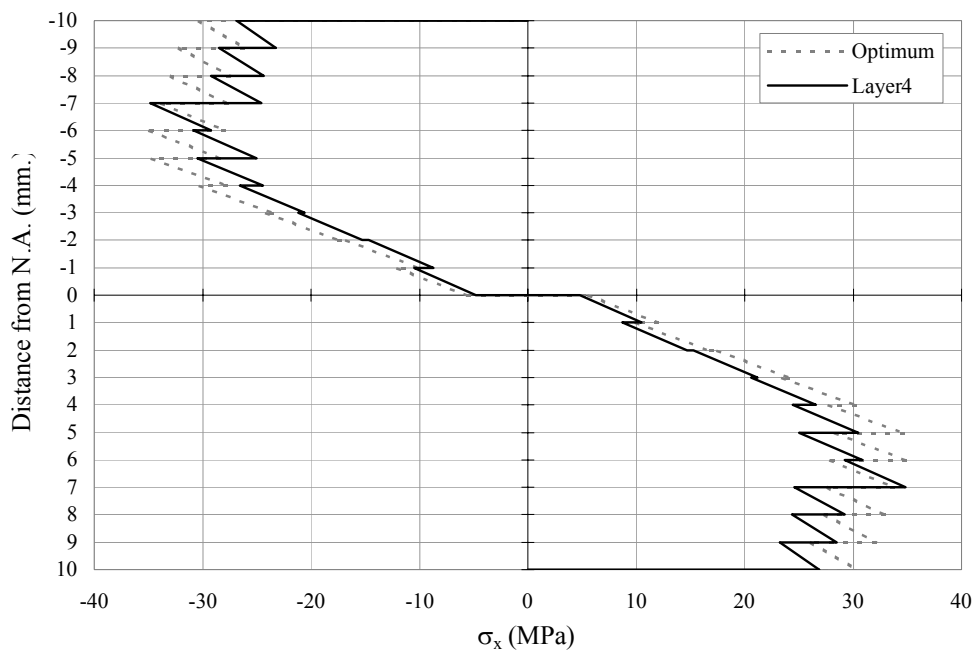


Fig.2.46 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 4 changed  $5^\circ$  (continuous line)

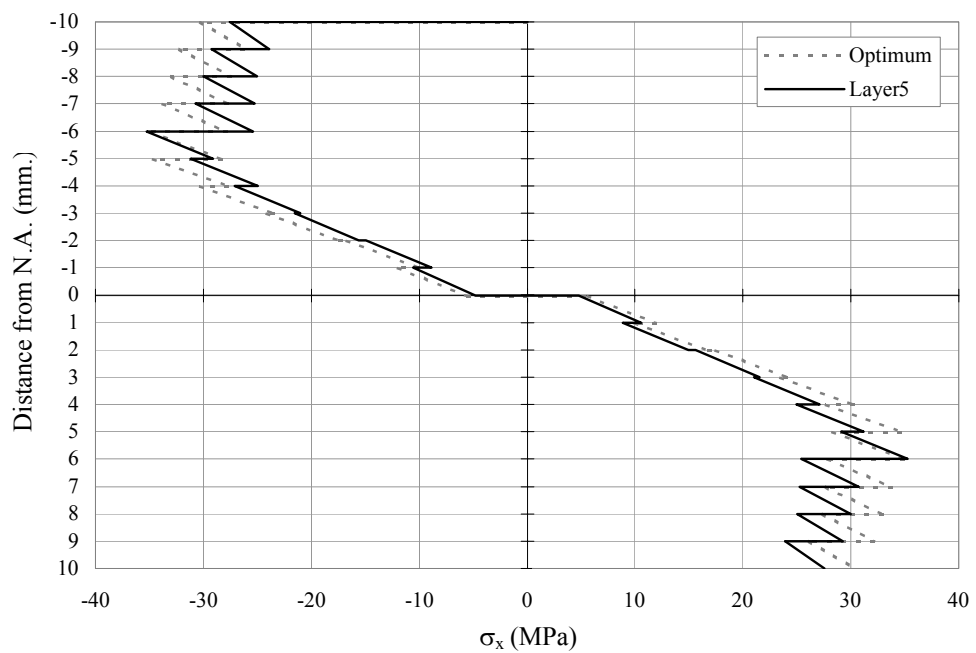


Fig.2.47 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 5 changed  $5^\circ$  (continuous line)

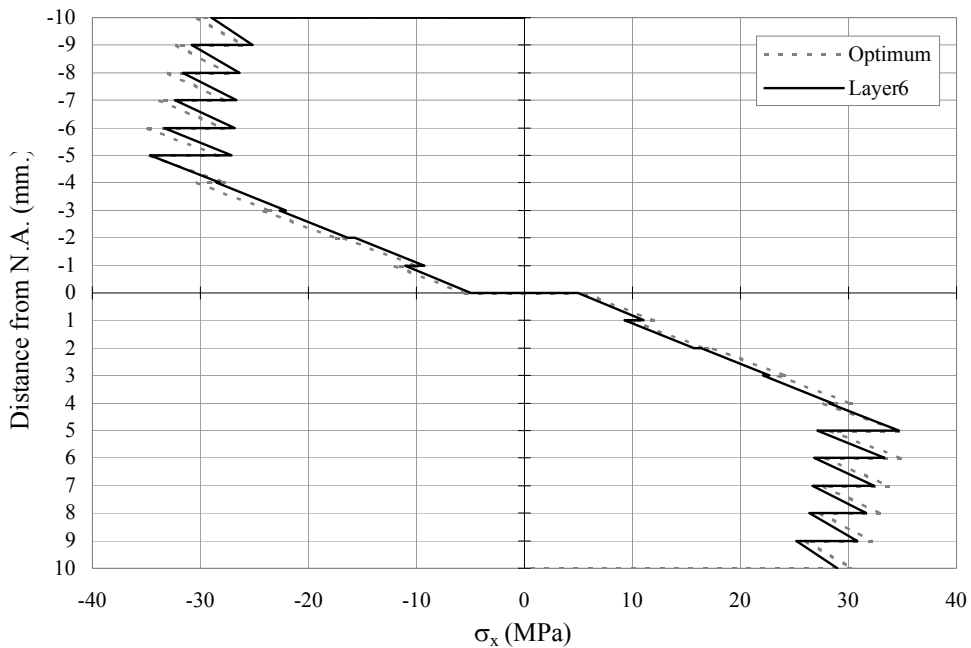


Fig.2.48 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 6 changed 5° (continuous line)

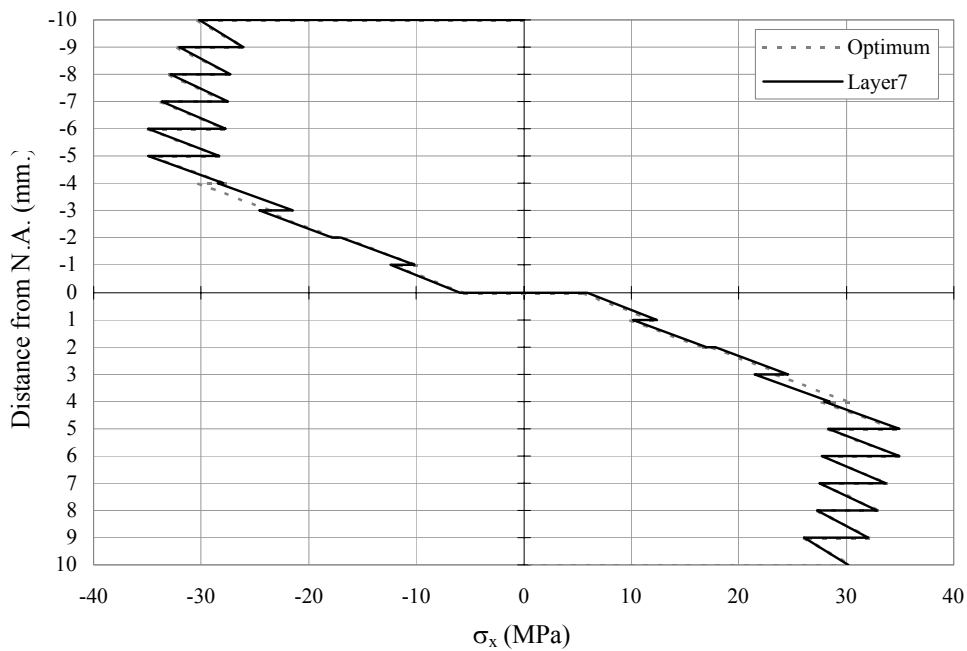


Fig.2.49 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 7 changed 5° (continuous line)

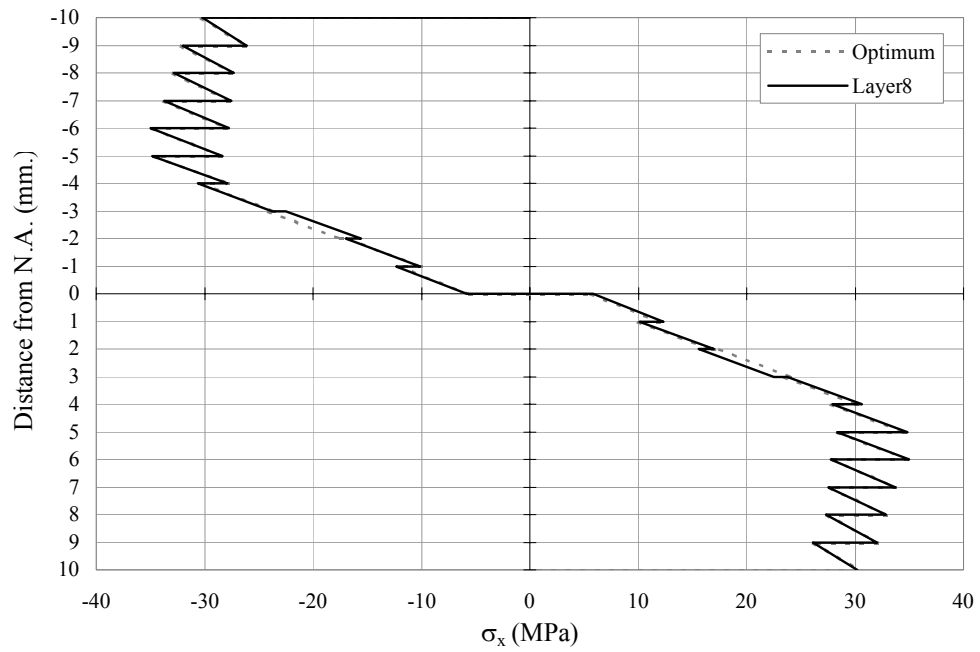


Fig.2.50 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 8 changed  $5^\circ$  (continuous line)

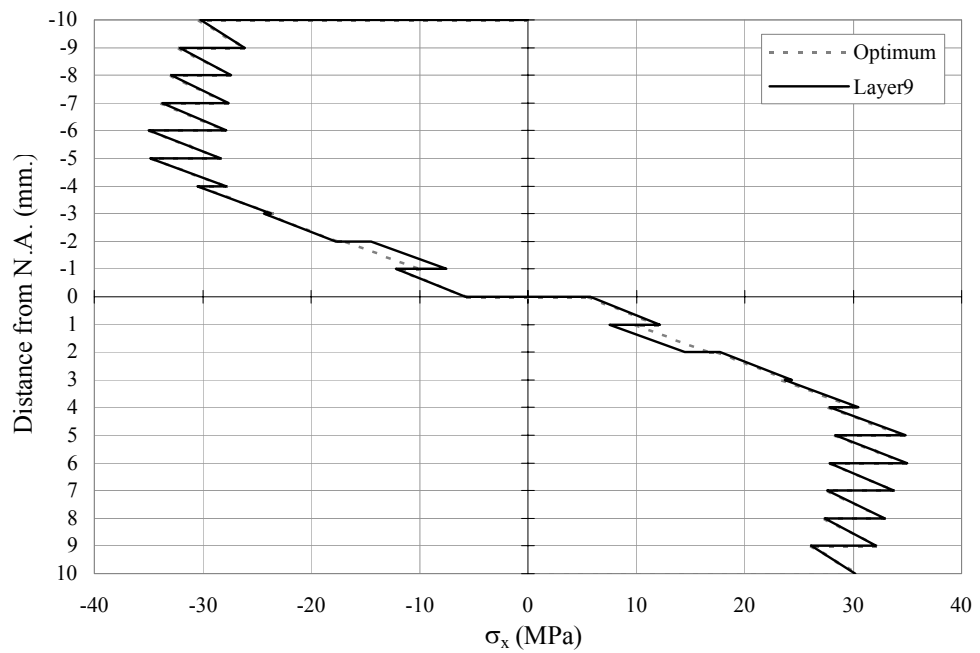


Fig.2.51 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 9 changed  $5^\circ$  (continuous line)

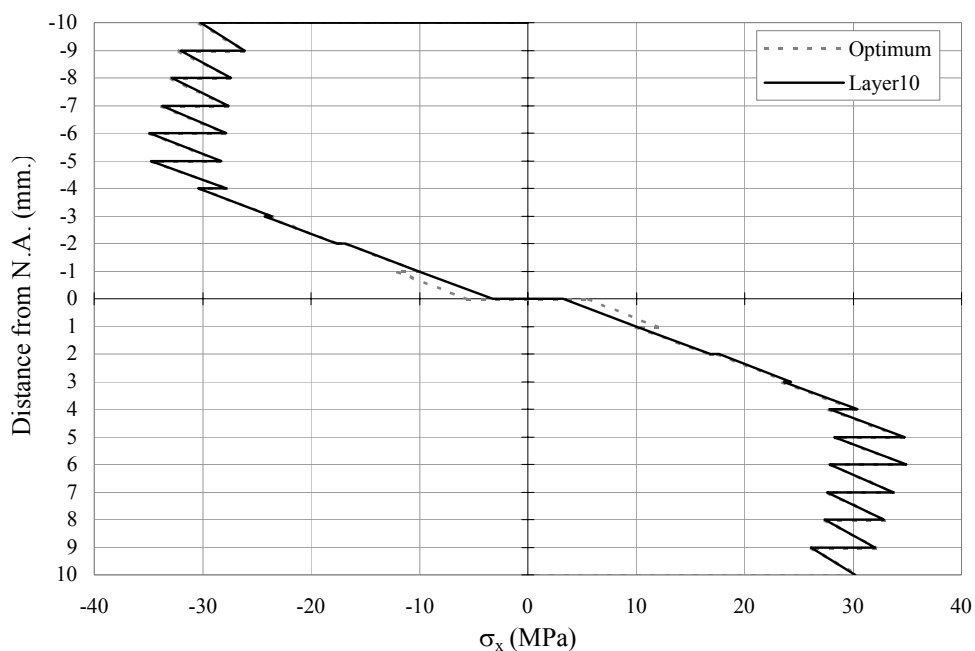


Fig.2.52 Stress profiles comparison of optimum OSL (dash line) and of OSL Type II (THC) with layer 10 changed 5° (continuous line)

จาก Table 2.2 และ Table 2.3 การเปลี่ยนแปลงในชั้นที่ 2 หรือชั้นผิวนอก ๆ ทำให้โมเมนต์ดัดสูงสุดที่รับได้เปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือมีค่าลดลง 18.91% สำหรับเกณฑ์ความเค้นสูงสุดและ ลดลง 12.28% สำหรับเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ การเปลี่ยนแปลงในชั้นถัดเข้ามาด้านในทำให้โมเมนต์ที่รับได้มีค่าต่างกับโมเมนต์สูงสุดน้อยลงเรื่อยๆ จนต่างกันน้อยที่สุดในชั้นที่ 10 หรือชั้นที่อยู่กึ่งกลางโดยลดลงจากค่าสูงสุดเพียง 0.50% และ 0.18% ตามลำดับ การเปลี่ยนมุมในชั้นที่ 6 ถึงชั้นที่ 10 ให้ค่าโมเมนต์แตกต่างจากโมเมนต์สูงสุดน้อยมาก คือน้อยกว่า 11.24% ตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุดและเพียง 3.85%ตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์

เมื่อมุมเปลี่ยนไปจากเดิม 5° ในแต่ละชั้น (มุมเปลี่ยนค่ามากที่สุดตามที่กำหนดไว้) ทำให้โมเมนต์ที่รับได้ลดลงจากค่าสูงสุดและค่ามุมนี้มักจะปรับเข้าสู่ 0° เสมอและมักเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือมุมลดลงเข้าหา 0° และมุมเพิ่มขึ้นเข้าหา 0° ตัวอย่างเช่นสำหรับเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ในชั้นที่ 5 มุมลดลงจาก 9° เป็น 4° และในชั้นที่ 7 มุมเพิ่มจาก -6° เป็น -1° เป็นต้น

ลักษณะที่ 1 (มุมบวกลดลงเข้าหาศูนย์ตาม Fig.2.33 – 2.38 สำหรับเกณฑ์ความเค้นสูงสุดและ Fig.2.43 – 2.47 ตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์) เกิดขึ้นในชั้นที่ 1 – 6 สำหรับผลการวิเคราะห์ตามทฤษฎีความเค้นสูงสุดและในชั้นที่ 1 – 5 สำหรับผลการวิเคราะห์ตามทฤษฎีความเสียหายไซ-ฮิลล์ มุมที่ลดลงและปรับเข้าสู่แนวตามยาวของคาน (0°) เช่นตาม Table 2.3 ในชั้นที่ 1 เปลี่ยนจาก 29° เป็น 24° ทำให้เกิดความเค้นสูงขึ้นในสัดส่วนที่ผิดปกติเมื่อเทียบกับชั้นอื่นๆ ชั้นดังกล่าวจึงเกิดความเสียหายก่อนชั้นอื่นๆ และกลายเป็นชั้นที่กำหนดความแข็งแรง

ของโอเอสแอล ที่จุดวิบัตินั้นความเค้นในชั้นอื่น ๆ มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเค้นของแบบการเรียงที่ดีที่สุด โมเมนต์ที่หาจากการอินทิเกรตทั่วทั้งหน้าตัดสำหรับกรณีนี้จึงมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ของแบบการเรียงที่ดีที่สุด

ลักษณะที่ 2 (มุมนับเพิ่มขึ้นเข้าหาศูนย์กลางตาม Fig.2.39 – 2.42 ตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุดและ Fig.2.48 – 2.52 ตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์) เกิดขึ้นในชั้นที่ 7 – 10 สำหรับผลวิเคราะห์ตามทฤษฎีความเค้นสูงสุดและในชั้นที่ 6 – 10 สำหรับผลวิเคราะห์ตามเกณฑ์ไซ-ฮิลล์ มุมที่เพิ่มขึ้นและปรับเข้าสู่ศูนย์แนวตามยาวของคาน ( $0^\circ$ ) เช่นตาม Table 2.3 ชั้นที่ 7 เปลี่ยนจาก  $-6^\circ$  เป็น  $-1^\circ$  ทำให้ความเค้นในชั้นดังกล่าวต่ำลงในขณะที่ความเค้นในชั้นอื่น ๆ ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบการเรียงที่ดีที่สุด โมเมนต์ที่ได้จึงมีค่าต่ำลง สองลักษณะนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเค้นที่ต่างกันแต่ให้ผลเหมือนกันคือ โมเมนต์ที่รับได้น้อยลง

แม้สองทฤษฎีนี้ให้ค่าความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงไปต่างกัน แต่ก็ให้แนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยมุมนับเพิ่มขึ้นไปมากยิ่งมีผลต่อความแข็งแรงมาก เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั้นแล้วปรากฏว่าชั้นที่มีระยะห่างจากแนวกึ่งกลางมากกว่ามีผลต่อความแข็งแรงตัดมากกว่าชั้นที่มีระยะห่างน้อยกว่า ในการผลิตจึงต้องเอาใจใส่ควบคุมการเรียงที่ชั้นที่อยู่ภายนอกให้มาก

ชั้นที่อยู่ใกล้แนวกึ่งกลางมีผลกับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่รับได้น้อยมากเมื่อเทียบกับชั้นที่อยู่ภายนอก การวิเคราะห์ในชั้นต่อไปจึงปรับให้ชั้นที่อยู่ใกล้แนวกลาง 5 ชั้นเรียงตัวตามแนวยาวของคาน ( $0^\circ$ ) หรือการเรียงแบบ II เพื่อแยกแ่งการผลิตและการเรียงมุมตามแนวยาวของแถบไม้บริเวณกึ่งกลางคานโอเอสแอลน่าจะมีผลทำให้ความแข็งแรง (stiffness) ของคานดีขึ้นด้วย และเมื่อคำนวณใหม่ตามวิธีการใน Fig.2.7 จะได้การเรียงมุมที่ดีที่สุดก็จะเป็นดังนี้

(ก) พิจารณาตามเกณฑ์ความเค้นสูงสุด

$[25^\circ, 22^\circ, 18^\circ, 14^\circ, 8^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]_A$  โมเมนต์สูงสุดคือ 3,096  $\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}$  มีค่าน้อยกว่าเพียง 4.56% เทียบกับโอเอสแอลแบบ I

(ข) พิจารณาตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์

$[26^\circ, 22^\circ, 18^\circ, 12^\circ, 5^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]_A$  โมเมนต์สูงสุดคือ 2,843  $\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}$  มีค่าน้อยกว่าเพียง 1.21% เมื่อเทียบกับโอเอสแอลแบบ I

มุมที่ได้ทั้ง 2 ทฤษฎีแตกต่างกันในแต่ละชั้นเพียง  $1^\circ$ – $3^\circ$  เท่านั้น โมเมนต์ดัดสูงสุดที่รับได้เมื่อเทียบกับค่าสูงสุดแล้วก็ต่างกันไม่มากนักคือมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดของแต่ละทฤษฎีไม่ถึง 5% เมื่อเปรียบเทียบแบบการเรียงในแต่ละทฤษฎี พบว่าทฤษฎีของไซ-ฮิลล์มีแบบการเรียงของ 5 ชั้นแรกใกล้เคียงกับแบบเรียงมุมที่ให้ค่าสูงสุดมากกว่า ผลต่อโมเมนต์ที่รับได้ต่อมุมที่เปลี่ยนไปก็น้อยกว่าด้วย จึงเลือกให้แบบการเรียงตามข้อ (ข) ทฤษฎีของไซฮิลล์ เป็นแบบที่ดีที่สุดของโครงการวิจัยนี้

## 2.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นในโอเอสแอล กระบวนการวิเคราะห์แบบการเรียงที่ดีที่สุดแล้วคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ผลการคำนวณของโอเอสแอลที่ได้แต่ละแบบนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งโอเอสแอลที่เรียงมุมตามที่ได้ออกแบบไว้ (โอเอสแอลแบบ I และแบบ II) รับโมเมนต์ดัดได้สูงกว่าโอเอสแอลที่ไม่ได้เรียงมุม (เรียงมุม  $0^\circ$  ทุกชั้น) หรือแบบ 0 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาความเค้นมีผลต่อความแข็งแรงของโอเอสแอลต่างกันโดยโมดูลัสยืดหยุ่นตามเส้น โมดูลัสเฉือน ความแข็งแรงอัดตามเส้นมีผลต่อความแข็งแรงดัดของโอเอสแอลอย่างมาก ในขณะที่แบบการเรียงที่เปลี่ยนไปจากจุดออกแบบจะทำให้โอเอสแอลมีความแข็งแรงดัดน้อยลงโดยมุมแถบไม้เปลี่ยนแปลงจากจุดออกแบบยิ่งมากทำให้ความแข็งแรงดัดยิ่งน้อยและมุมแถบไม้ในชั้นที่อยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางมากจะมีผลต่อความแข็งแรงดัดมากกว่าชั้นที่อยู่ใกล้แนวกึ่งกลาง แบบการเรียงที่ได้จากการคำนวณและจะนำไปใช้ทำโอเอสแอลคือแบบที่เรียงมุม  $10^\circ$  ชั้นภายนอก และภายใน  $10^\circ$  ชั้นเรียงตามยาว ( $0^\circ$ ) หรือแบบ II ตามการคำนวณตามเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ และจะได้ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงต่อไป