



ทฤษฎีบทและวรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีบทของโพโรอีลาสติซิตี

(General or Theory of Photoelasticity)

โพโรอีลาสติกเทคนิค (Photoelastic technic) คือ วิธีทดลอง เพื่อวัดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสาร ที่เรียกว่า สารไบรฟรินเจน สารดังกล่าว สามารถแยกแสงตกเหวออกเป็นสองลำแสง นิยมใช้ในการหาความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัตถุซึ่งไม่มีรูปร่างทางเรขาคณิตแบบง่าย ๆ ลักษณะของความเค้นศึกษาจากภาพถ่าย

สารไบรฟรินเจน ซึ่งนิยมใช้หล่อแบบจำลอง ได้แก่ Bakelite Celluloid Gelatin Synthetic Resins คุณสมบัติสำคัญคือ เป็นสารที่โปร่งใส ยืดหยุ่นได้ และมีคุณสมบัติสมลักษณะทางแสง กล่าวคือ เมื่อปราศจากความเค้นหรือความเครียด จะมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง เมื่อได้รับแรงเค้น จะเปลี่ยนเป็นสารอสมลักษณะ เมื่อมองผ่านเครื่องมือโพลาไรสโคปจะพบการตอบสนองต่อแสงโดยคลื่นแสงจะสั่นตามแนวแกนของความเค้นหลัก (Principal stress) ทั้งสองนั้นด้วยความเร็วที่ต่างกัน จึงทำให้คลื่นแสงทั้งสองมี phase ต่างกันด้วย ความเร็วของแสงขึ้นกับขนาดของความเค้น คลื่นแสงที่มี phases หรือช่วงจังหวะคลื่นที่ต่างกัน 180 องศา เมื่อรวมกันจะหักล้างกัน ปรากฏเป็นแถบมืด ส่วนคลื่นแสงที่มี phases เหมือนกันจะเสริมกันปรากฏเป็นแถบสว่าง แถบสว่างและมืดซึ่งมีลำดับที่เท่ากัน เรียกว่า Isochromatic fringes

และลำดับที่ของแถบสว่างและมืด จะสัมพันธ์กับความเค้นที่กระทำกับวัตถุ ดัง
รูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการกระจายของความเค้น แบบ
Isochromatic fringes

การวิเคราะห์ความเค้นโรคย์พริคอีลาสติกเทคนิค แบ่งเป็น 3 แบบ
คือ

1. Two-Dimensional photoelasticity เป็นการศึกษาใน
แบบจำลอง ซึ่งสร้างด้วยสาร ไบรฟรินเจน เป็น 2 มิติ
2. Three-Dimensional photoelasticity เป็นการศึกษา
ในแบบจำลอง ซึ่งสร้างด้วยสาร ไบรฟรินเจน เป็น 3 มิติ
3. Photoelastic coating analysis เป็นการศึกษาในแบบ
จำลองซึ่งเคลือบด้วยสาร ไบรฟรินเจน

ทฤษฎีของแสงซึ่งเกี่ยวข้องกับโฟโตนิกส์

(Light and Optics as related to Photoelasticity)

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของ Maxwell (15) ใช้อธิบายปรากฏการณ์
โฟโตนิกส์ แสง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Amplitude ของแสง A หาได้จากสมการ

$$A = f(z-ct) + g(z+ct) \quad (1)$$

z = ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแสง

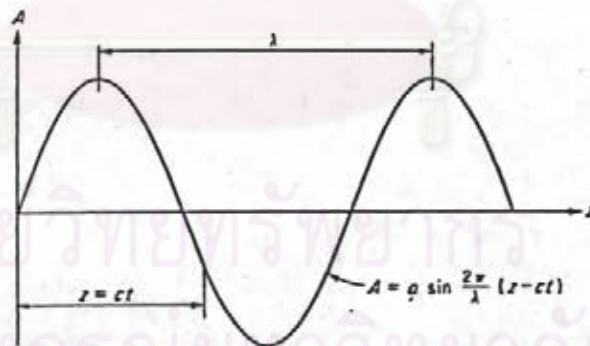
t = เวลา

c = ความเร็วของแสง (3×10^{10} ซม./วินาทีในสุญญากาศ)

ในการอธิบายปรากฏการณ์โฟโตนิกส์ จะกำหนดให้แสงเคลื่อน
ที่ในทิศทาง z อยู่ในฟังก์ชันของ sine ดังสมการ

$$A = f(z-ct) = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z-ct) \quad (2)$$

และ Amplitude ของแสง แสดงในรูปกราฟของ sine ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดง Amplitude ของแสงในรูปของฟังก์ชัน Sine ตาม
ทิศทางของการเคลื่อนที่ของแสง

ระยะทางระหว่างจุดยอดสุดของกราฟ คือ ความยาวคลื่นของแสง
คาบ (period, T) ของคลื่นแสง คำนวณได้จากสมการ

$$T = \lambda / c \quad (3)$$

และเมื่อ f = ความถี่ของแสงซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ
amplitude ต่อวินาที ความถี่จะมีความสัมพันธ์กับคาบคาบตามสูตร

$$f = 1/T \quad (4)$$

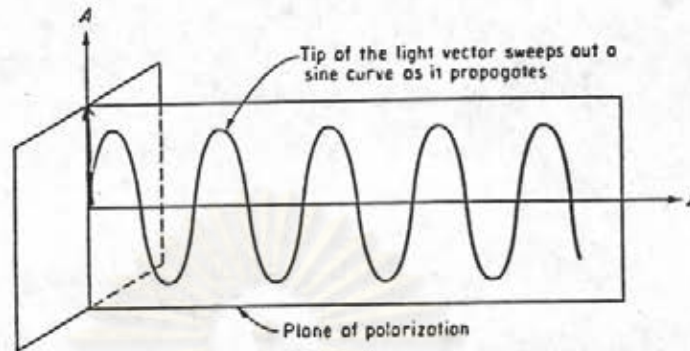
สีของแสงที่มองเห็นกำหนดโดยความถี่ของแสง การทดสอบทาง
ฟิสิกส์คลาสสิกซึ่งจะใช้แสงในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ แสงที่มีความถี่และความ
ยาวคลื่นแสงเดียวกัน จะปรากฏเป็นแสงสีเดียว เรียกว่า Monochromatic
light ส่วนแสงที่มีความถี่ต่างกัน สีของแสงต่าง ๆ จะผสมกัน และตาของเราจะ
รู้สึกมองเห็นเป็นสีเดียว.

โพลาริซโคป เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์แรงเค้นทางฟิสิกส์คลาสสิก
เทคนิค วิชาใช้กระบวนการ โพลาริเซชัน และ Interference ของแสงซึ่ง
เป็นคลื่นตามขวางมาอธิบาย.

Polarized Light

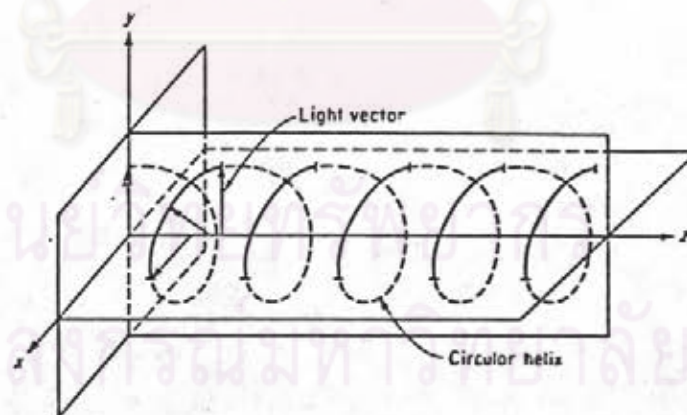
จากการที่แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีการสั่นสะเทือนในแนวขวาง
จากจุดกำเนิดและถ้าระนาบของการสั่นของคลื่น วางตัวอยู่ในระนาบเดียว เรียก
แสงนี้ว่า Polarized light ในการทดลองฟิสิกส์คลาสสิกซึ่ง แบ่ง
Polarized light เป็น 3 ประเภท คือ

1. Linear หรือ Plane Polarized Light เกิดจากการ
บังคับให้ vector ของการสั่นของคลื่นแสงอยู่ในระนาบเดียวตลอดเวลา ซึ่ง
เรียกว่า ระนาบของการโพลาริเซชัน (Plane of Polarization)
ผังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดง vector ของ Plane-Polarized light

2. Circularly polarized light เกิดขึ้นเมื่อระนาบของการสั่นเปลี่ยนไปตามตำแหน่งแบบที่จุดยอดของคลื่นแสงเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมาประกอบแกน x ดังรูปที่ 6.



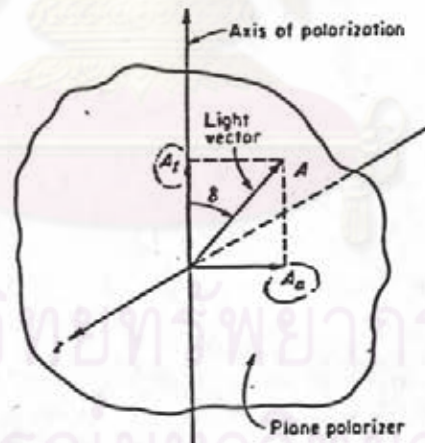
รูปที่ 6 แสดง vector ของ circularly polarized light

3. Elliptically polarized light ได้จากจุดยอดของคลื่นแสงเคลื่อนที่เป็นเกลียวแบบวงรี เมื่อแสงเคลื่อนไปตามแกน z

ในทางปฏิบัติ Plane polarized light เกิดจากระนาบ(plane) หรือ linear polarizer และสามารถสร้างเป็น circular หรือ Elliptical polarized light ได้โดยใช้ ควอเตอร์ เวฟ เพลต (Quarter-wave plates)

Plane Polarizer (Linear Polarizer)

เป็นเครื่องมือซึ่งสามารถดูดกลืนแสง ที่มีทิศทางตั้งฉากกับแกน polarized และยอมให้แสงที่มีทิศทางขนานกับแกน polarized ผ่านไปได้ แสงประเภทนี้เรียกว่า Plane-Polarized light ดังรูปที่ 7.



รูปที่ 7 แสดงถึงการดูดกลืนและการยอมให้แสงผ่าน Plane polarizer

๗ จุภาคจุดหนึ่งตามแกน z Amplitude ของแสง A คือ

$$A = a \sin (2\pi / \lambda) ct$$

จากสมการ (3) และ (4)

$$A = a \sin 2\pi ft = a \sin \omega t \tag{5}$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f$ สมการของแสงที่ถูกหักเหและผ่านได้ คือ

$$A_a = a \sin \omega t \sin \delta$$

$$A_t = a \sin \omega t \cos \delta \tag{6}$$

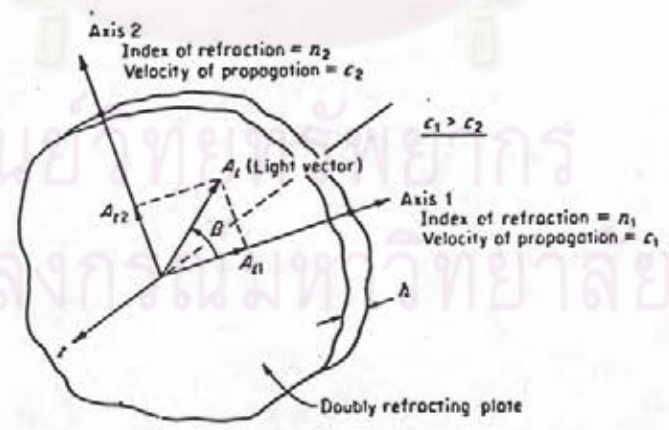
เมื่อ δ เป็นมุมระหว่างแกนของ Polarized กับทิศทางของแสง

A_a เป็นเวกเตอร์ของแสงในแนวแกน Polarized

A_t เป็นเวกเตอร์ของแสงในแนวตั้งฉากกับแกน Polarized

Wave Plate

เป็นวัสดุที่สามารถแยกระนาบการสั่นของลำแสงออกเป็น 2 ทิศทาง
 ทามุมตั้งฉากต่อกัน และลำแสงทั้งสองที่แยกออกมาจะมีความเร็วไม่เท่ากัน
 ดังรูปที่ 8.



รูปที่ 8. แสดงลักษณะแสง Polarized เมื่อผ่านเข้าสู่ wave plate

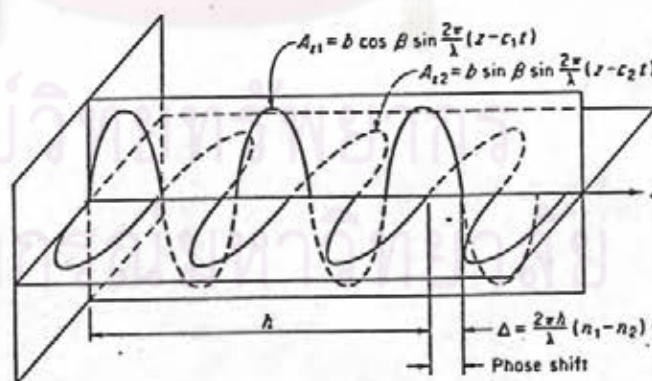
ซึ่งมีแนวแกนหลัก 2 แกน คือ Axis 1 และ Axis 2 แสงที่ผ่านใน Axis 1 จะมีความเร็ว c_1 และผ่าน Axis 2 จะมีความเร็ว c_2 เมื่อ c_1 มากกว่า c_2 จะเรียก Axis 1 ว่า fast axis และเรียก Axis 2 ว่า slow axis

ถ้าลำคลื่นที่ลงนบริเวณที่มีแสง Plane-polarized เช่น A_t ซึ่งทำมุมกับ Axis 1 (fast axis) แสงผ่านวัตถุนี้จะแตกออกเป็น 2 แนว คือ A_{t_1} และ A_{t_2} ตามแนวแกนหลัก

ดังนั้น $A_{t_1} = A_t \cos \beta = a \cos \delta \sin \omega t \cos \beta = k \sin \omega t \cos \beta$

$$A_{t_2} = A_t \sin \beta = a \cos \delta \sin \omega t \sin \beta = k \sin \omega t \sin \beta \quad (7)$$

เมื่อ $k = a \cos \delta$ ภัยแสงมีความเร็ว c_1 และ c_2 ตามลำดับ แสงที่มีความเร็วต่างกันจะผ่านวัสดุใช้เวลาต่างกัน หรืออีกนัยหนึ่งแนวแกนหนึ่ง จะมีความหน่วงช้ากว่าอีกแนวแกนหนึ่ง ซึ่งความหน่วงช้าเชิงมุมนี้ เรียกว่า Angular retardation สามารถนำมาหาความแตกต่างของ phase ระหว่างแกนทั้งสองได้ ดังรูปที่ 9.



รูปที่ 9 แสดง Retardation ของแสง ซึ่งถูกสร้างโดย Wave Plate

สมการที่แสดงถึง Angular Retardation ของแสงแต่ละแนว คือ

$$\begin{aligned} 1 &= (2\pi h/\lambda) (n_1 - n) \\ 2 &= (2\pi h/\lambda) (n_2 - n) \end{aligned} \quad (8)$$

เมื่อ n_1 และ n_2 เป็นดัชนีหักเหแนว Axis1 และ Axis2

n เป็นดัชนีหักเหอากาศ

Δ เป็น Angular retardation

ความแตกต่างของ $\Delta_1 - \Delta_2$ จะแทนมุมที่แตกต่างระหว่างแกนทั้งสอง เมื่อผ่าน wave plate นี้คือ

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = (2\pi h/\lambda) (n_1 - n_2) \quad (9)$$

ดังนั้น ความแตกต่างของ phase ทั้งสอง จึงขึ้นกับความหนา h ความยาวคลื่นแสงและคุณสมบัติของวัสดุที่เป็น wave plate ($n_1 - n_2$)

เมื่อวัสดุถูกสร้างให้มีความหน่วง $= \pi/2$ เรียกว่า Quarter wave plate

$= \pi$ เรียกว่า Half wave plate

$= 2\pi$ เรียกว่า Full wave plate

ดังนั้นโดยทั่วไป แสงที่มีการหน่วง แสงทั้ง 2 แกน จะมี Amplitude ดังนี้

$$\begin{aligned} A'_{t_1} &= K \cos \beta \sin (wt + \Delta) \\ A'_{t_2} &= K \sin \beta \sin wt \end{aligned} \quad (10)$$

ค่า Amplitude ของแสงรวมทั้งสองแกนที่ผ่านออกมา คือ

$$A'_t = \sqrt{A'^2_{t_1} + A'^2_{t_2}} = K \sqrt{\sin^2 (wt + \Delta) \cos^2 \beta + \sin^2 wt \sin^2 \beta} \quad (11)$$

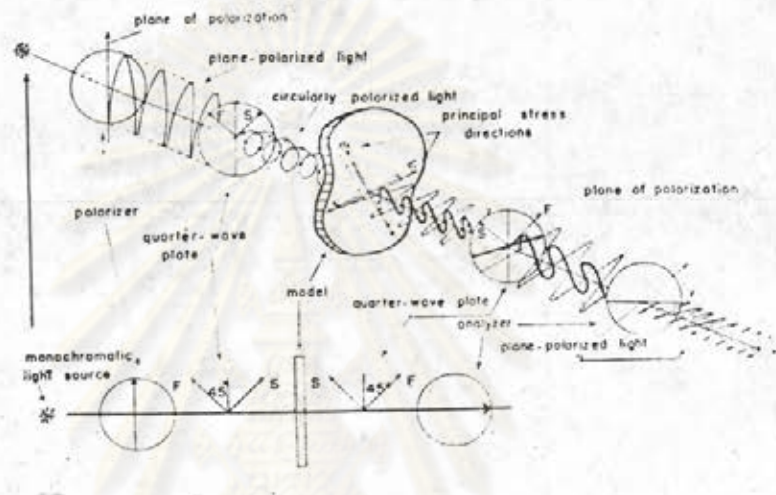
ดังนั้นมุมของแสงที่ผ่านหามุมกับ Axis1 (fast axis) จะเป็น

$$\tan \delta = A'_{t_2}/A'_{t_1} = \sin wt \tan \beta / \sin (wt + \Delta)$$

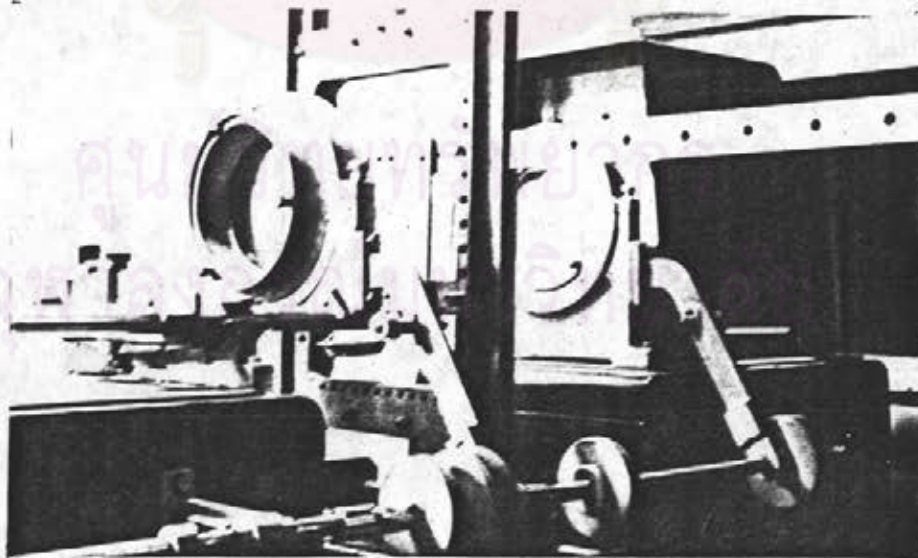
จะเห็นว่า Amplitude ของแสงที่ผ่าน plate สามารถควบคุมได้ ซึ่งขึ้นกับความแตกต่างของ phase และมุมที่หมุนไป ซึ่งจะทำให้แสงที่ผ่านออกมาเป็น plane, circular หรือ elliptically polarized light

การวางตัวของระนาบการสั่นของแสงในเครื่องมือโพลาไรสโคป

Polariscope ที่ใช้ในการทดสอบหาแรงเค้นในแบบจำลอง เป็นชนิด เซอร์คิวลาร์ โพลาไรสโคป ดังรูปที่ 10ก และ 10ข



รูป 10ก แสดงการวางตัวของระนาบการสั่นของแสงในเครื่องมือเซอร์คิวลาร์ โพลาไรสโคป



รูป 10ข แสดงเครื่องมือ โพลาไรสโคป ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือประกอบค้ำย

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) เป็นแสงสีเดียวที่มีความถี่และความยาวคลื่นแสงเดียวกัน (Monochromatic light) ได้แก่ แสงสีเหลืองของโซเดียมทำให้เกิดแถบสว่างและแถบมืด แสดงการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้น.

2. โพลาริเซอร์ ทำหน้าที่กรองแสงจากแหล่งกำเนิดให้เหลือเพียงระนาบเดียว ก่อนผ่านไปยังแบบจำลองหิน

3. ควอเตอร์ เวฟ เพลต แบ่งเป็น 2 แผ่น

แผ่นที่ 1 วางค้ำยจาก โพลาริเซอร์ ทามุม $= \pi/4$ ต่อระนาบ polarized มีหน้าที่เปลี่ยน Plane-polarized light ให้เป็น Circular polarized light แสงนี้เมื่อผ่านแบบจำลองซึ่งหล່อกจากสารที่มีคุณสมบัติเป็น ไบรีฟรินเจน และได้รับแรงกระทำจะหักเหแสงออกเป็นลำแสงสองระนาบตั้งฉากซึ่งกันและกัน ตามแนวความเค้นหลักในวัตถุ (Principal stresses) แต่ละลำแสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค้ำยกัน คือ ลำแสง c_1 ตาม Axis 1 เรียกว่า fast axis และลำแสง c_2 ตาม Axis 2 เรียกว่า slow axis ผลจากการที่ลำแสงมีความเร็วค้ำยกัน จะทำให้เกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกันขึ้น ซึ่งผลขึ้นกับความยาวคลื่นแสง ความหนาของ plate (h) และความแตกต่างระหว่างดัชนีการหักเห ($n_1 - n_2$)

แผ่นที่ 2 ทำหน้าที่เปลี่ยน circularly polarized light จากแผ่นที่ 1 ให้กลับเป็น Plane polarized light โดยจัดวางให้ fast axis ขนานกับ slow axis ของ wave-plate อันแรก

4. อะนาลิเซอร์ (Analyzer) เป็น โพลาริเซอร์ แผ่นที่ 2 ซึ่งวางไว้ทางค้ำยหลังของ ควอเตอร์ เวฟ เพลต แผ่นที่สอง เราสามารถเปลี่ยนมุมของ อะนาลิเซอร์ ได้ให้ขนานหรือตั้งฉาก กับ โพลาริเซอร์ แผ่นที่หนึ่ง และกับ wave plate การจัดระบบค้ำยกล่าวนี้จะให้ไลท์ฟิลด์ (light field) หรือคาร์คฟิลด์ (dark field) ก็ได้ ค้ำยตารางที่ 1



Table 1 Four Arrangements of the Optical Elements in a Circular Polariscopes

Arrangement	Quarter-wave plates	Polarizer and analyzer	Field
A	Crossed	Crossed	Dark
B	Crossed	Parallel	Light
C	Parallel	Crossed	Light
D	Parallel	Parallel	Dark

ตารางที่ 1 แสดงการเรียงตัวทั้ง 4 ระบบของอนุภาคทางแสงในเครื่องมือเซอร์คิวลาร์ โพลาริสโคป

ในการทดลอง คาร์ค ฟิล กระทำโดยจัดให้ ควอเตอร์ เวบ เฟลค ทั้งสองแผ่นตั้งฉากซึ่งกันและกัน ขณะเดียวกัน โพลาไรเซอร์ และอะนาลิเซอร์ จะวางตั้งฉากซึ่งกันและกันด้วย ใน ไลท์ ฟิล กระทำโดยจัดให้ ควอเตอร์ เวบ เฟลค ทั้งสองแผ่นตั้งฉากซึ่งกันและกัน ส่วนโพลาไรเซอร์และอะนาลิเซอร์วางขนานกัน

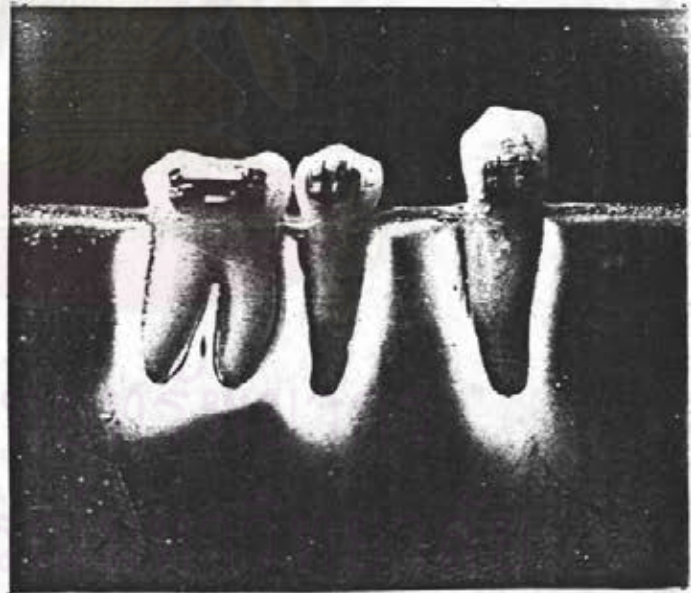
ใน คาร์ค ฟิล เมื่อนำแบบจำลองที่ปราศจากแรงเค้น วางระหว่างควอเตอร์ เวบ เฟลค ทั้งสองจะเห็นแถบมืดทั่วทั้งแบบ เมื่อมีแรงกระทำต่อแบบจำลองจะปรากฏแถบสว่างและแถบมืดสลับกันไปในแบบจำลองนั้น แถบมืดอันแรก ที่เริ่มสังเกตเห็น เรียกว่า ฮีฟ ออเคอร์ ต่อมาจะเป็นลำดับที่ 1, 2, 3, ..., (n), ... ความลึกลับ ลำดับของแถบมืด แสดงถึงปริมาณของความเค้นที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลอง

ใน ไลท์ ฟิล เมื่อไม่มีแรงกระทำต่อแบบจำลองแถบสว่างจะเห็นทั่วทั้งแบบ เมื่อได้รับแรงกระทำจะทำให้เห็นแถบสว่างและแถบมืดสลับกันไปเช่นกัน แต่ลำดับแถบมืดที่เกิดขึ้น จะเป็น ฮาฟ ออเคอร์ คือ แถบมืดอันแรกจะเป็น ฮาฟ ออเคอร์ และต่อมาจะเป็น $3/2, 5/2, 7/2, \dots, [n + (1/2)], \dots$ ความลึกลับดังรูปที่ 11, 12

ก. ไลท์ฟิล

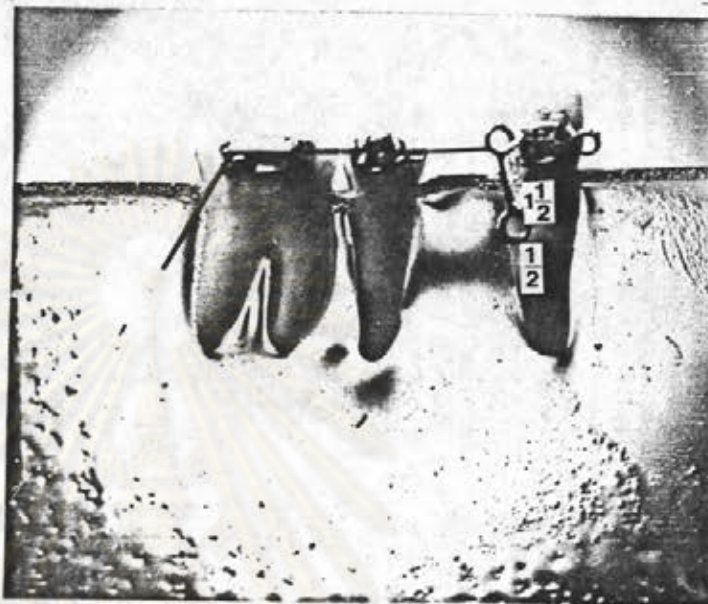


ข. คาร์คฟิล

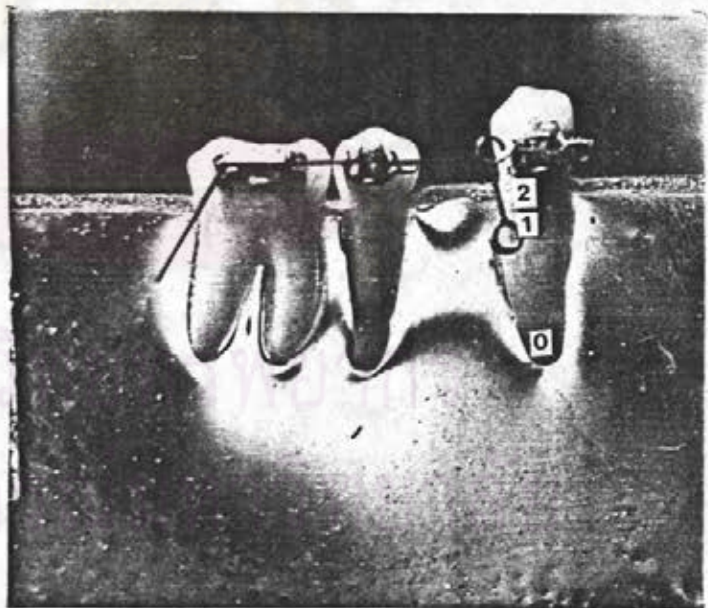


รูปที่ 11 แสดงแบบจำลองเมื่อไม่ได้รับแรงกระทำ (ก) แถบสว่าง
บน ไลท์ฟิล และ (ข) แถบมืดบน คาร์คฟิล

ก. ไลท์ ฟील



ข. คาร์ค ฟील



รูปที่ 12 แสดงแบบจำลองเมื่อได้รับแรงกระทำจากเครื่องมือในการค้ำพื้นซึ่งจะปรากฏรูปแบบแถบมืด ดังรูป (ก) ใน ไลท์ ฟील และ (ข) ใน คาร์ค ฟील

ผลของแบบจำลองที่มีแรงเค้นจากเครื่องมือ โพลาริไซเซอร์

ในกรณีที่แบบจำลองไม่มีแรงกระทำ และมีดัชนีหักเห (n) เท่ากันทุกจุด เมื่อแบบจำลองได้รับแรงจะแสดงคุณสมบัติ คับเบิล รีแฟรกชัน แนวแกนหลักของแรงที่จุดใด ๆ จะเป็นแรงในแนว Fast Axis และ Slow Axis ดัชนีหักเหของแบบจำลองจะเปลี่ยนไป ใกล้เคียงสัมพันธ์กับแรงมีค่าเท่ากับ n_1 และ n_2

โพลาริไซเซอร์เป็นเครื่องมือซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการหักเหเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหของแบบจำลองจากความเค้น แปรผันโดยตรงกับความเค้นบนแบบจำลองดังสมการ

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= c_1 \epsilon_1 + c_2 \epsilon_2 \\ n_2 - n_0 &= c_1 \epsilon_2 + c_2 \epsilon_1 \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อ n_0 คือ ดัชนีหักเหของแบบจำลอง เมื่อไม่มีแรงกระทำ

n_1, n_2 ดัชนีหักเหตามแนวแกน 1 และแนวแกน 2 ตามลำดับ

c_1, c_2 สัมประสิทธิ์ของความเค้นในแนวแกน 1 และแนวแกน 2 ตามลำดับ

ϵ_1, ϵ_2 ความเค้นหลักในแนวแกนทั้งสอง

ดังนั้น
$$n_1 - n_2 = (c_1 - c_2)(\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (12)$$

แบบจำลองที่มีความเค้นจะมีคุณสมบัติเหมือน wave plate ดังนั้น

ความแตกต่างของดัชนีหักเหจะได้จากสมการ (9) คือ

$$n_1 - n_2 = \lambda \Delta / 2 \pi h \quad (13)$$

$$\Delta = (2 \pi h / \lambda) (c_1 - c_2)(\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (14)$$

เมื่อ $c_1 - c_2 = c$ เป็นสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของความเค้น จะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของ Angular retardation กับความเค้น ดังนี้

$$= (2 \pi hc / \lambda) (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (15)$$

สมการที่ 15 สามารถอธิบายกฎของความเค้นและความสัมพันธ์กับแสงได้ uly ค่าของ Δ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความ

เค้นหลัก ($\delta_1 - \delta_2$)

ค่าของ c ขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแบบจำลอง แปรผันตรงกับความหนาของวัสดุ (h) และแปรผกผันกับความยาวคลื่นของแสงที่ผ่านแบบจำลอง ดังนั้นสมการ ของความแตกต่างของความเค้นหลัก เขียนได้อีก รูปหนึ่ง คือ

$$\delta_1 - \delta_2 = Nf_0/h \quad (16)$$

เมื่อ $N = \Delta/2\lambda$ เป็นค่าลำดับที่ของแถบมืด (fringe order) ที่เกิดขึ้น (ลำดับที่ 1, 2, 3, ..., n)

$f_0 = \lambda/c$ เป็นค่า ฟริน แวลยู (fringe value) หรือ ค่าคงที่ของสาร

h = ความหนาของแบบจำลอง

ดังนั้นค่าความแตกต่างของความเค้น ($\delta_1 - \delta_2$) ในแบบจำลอง สามารถศึกษาได้เมื่อทราบค่า

1. ความหนาของแบบจำลอง (h)
2. ลำดับที่ของแถบมืด (N)
3. ฟรินจ แวลยู ของวัสดุ (f_0)

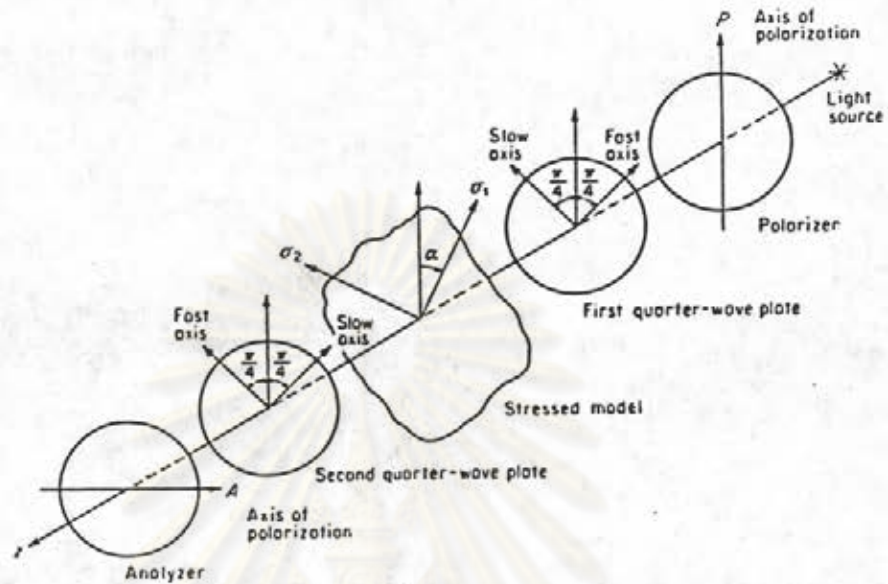
ความเข้มของแสงที่ผ่านแบบจำลองใน คาร์ค ฟิล

แบบจำลองที่ได้รับแรงกระทำใน เซอร์คิวลาร์ โพลาไรสโคป ตามแนวแกน z จะมีเฉพาะ Isochromatic fringes เท่านั้น และสมการแสงจากควอเตอร์ เวบ เฟลค แผ่นที่ 1 จะเป็น

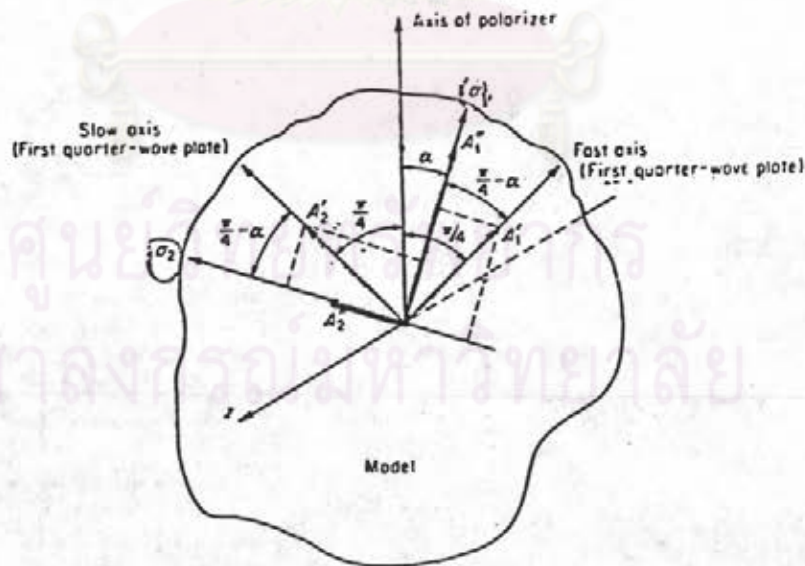
$$A'_1 = (\sqrt{2}/2) K \cos wt \quad \text{ตามแนว Fast axis} \quad (17)$$

$$A'_2 = (\sqrt{2}/2) K \sin wt \quad \text{ตามแนว Slow axis} \quad (18)$$

แสงนี้เป็นแบบเซอร์คิวลาร์ และมี A'_1, A'_2 ที่มี Amplitude คงที่ เมื่อแสงผ่านแบบจำลอง ดังรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 13 แสดงลักษณะของแบบจำลองใน เซอร์คิวลาร์ โพลาไรสโคป
 ในลักษณะ A คือ โพลาไรเซอร์ และ อะนาลิเซอร์ วางตั้งฉากซึ่งกันและกัน
 กับ ควอเตอร์ เวฟ เพลต ทั้ง 2 แผ่นซึ่งวางตั้งฉากซึ่งกันและกันเช่นกัน



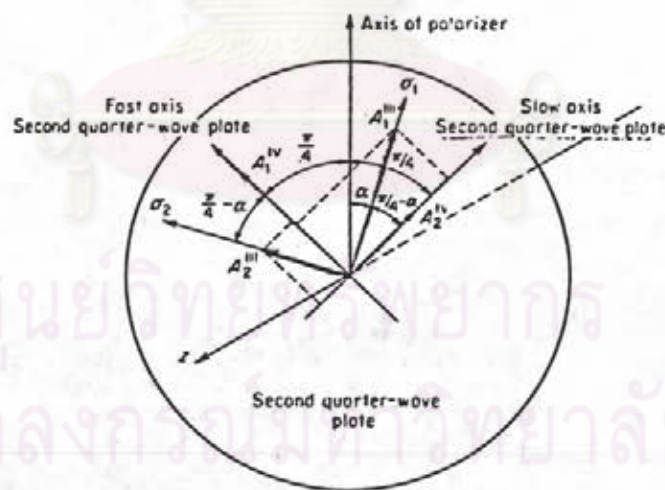
รูปที่ 14 แสดงผลลัพธ์ของทิศทางและขนาดของแสง เมื่อผ่านเข้าสู่
 แบบจำลองที่ไว้รับแรงกระทำ

เมื่อแตกสนาม A_1' และ A_2' ในแนว A_1'' และ A_2'' ตามแนวความ
เค้นหลัก σ_1 และ σ_2 จะได้

$$A_1'' = (\sqrt{2}/2) K [\cos wt \cos(\pi/4 - \alpha) + \sin wt \sin(\pi/4 - \alpha)]$$

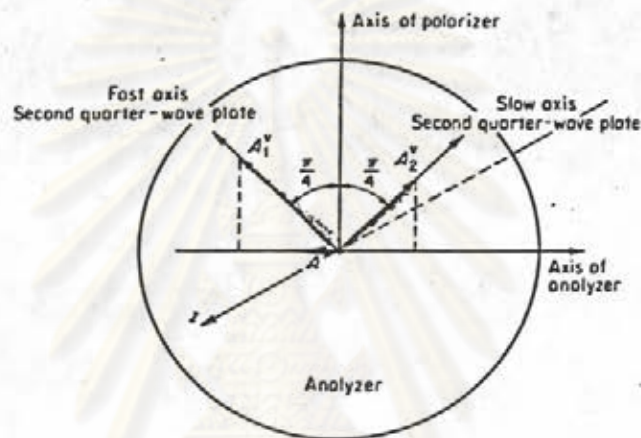
$$A_2'' = (\sqrt{2}/2) K [\sin wt \cos(\pi/4 - \alpha) - \cos wt \sin(\pi/4 - \alpha)] \quad (19)$$

แสง A_1'' และ A_2'' เมื่อผ่านแบบจำลองที่มีคุณสมบัติเป็น wave plate จะมีความเร็วต่างกัน และมีความแตกต่างของ phase (Δ) แปรตามกับความแตกต่างของแรงเค้น ($\sigma_1 - \sigma_2$) ถ้าความแตกต่างของ Δ เท่ากับ $\pi/2$ และ $A_2'' - \Delta/2$ ดังนั้นแสงที่ผ่านออกจากแบบจำลองจะเป็น A_1''' และ A_2''' และจะผ่าน ควอเทอร์ เวบ เฟลค ที่ สองตั้งแสดงในรูป 14 A_1''' และ A_2''' จะถูกแยกในแนว slow และ fast axis ใต้ A_1^{IV} และ A_2^{IV}



รูปที่ 15 ผลลัพธ์ของทิศทาง และขนาดของแสง เมื่อผ่านเข้า
ควอเทอร์ เวบ เฟลค ที่ 2

ถ้าให้ความแตกต่างของ Phase ทั้งสอง $= \pi/2$ ขณะผ่าน
 ควอเตอร์ เวบ เพลค ที่ 2 ดังนั้นแสงที่ผ่านออกจาก plate จะเป็น A_1^V และ
 A_2^V ซึ่งท้ายสุดแสงที่ผ่านเข้า อะนาลิเซอร์ จะแสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดงผลลัพธ์ของทิศทางและขนาดของแสง เมื่อผ่านเข้า
 อะนาลิเซอร์ ใน คาร์ต ฟิล

แสง A_1^V และ A_2^V จะแยกเป็นส่วนในแนวตั้งและแนวระนาบ แสงที่สั่นใน
 แนวตั้งจะถูกหักเหเหลือเพียงแสงที่สั่นในแนวระนาบผ่านออกมา สมการของ
 Amplitude สุดท้ายที่ผ่านออกจาก อะนาลิเซอร์ คือ

$$A = (\sqrt{2}/2)(A_2^V - A_1^V)$$

$$= (1/2)K \sin(\Delta/2)[\cos(\alpha + \omega t) - \sin(\alpha - \omega t)] \quad (20)$$

ความเข้มของแสงจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของ Amplitude ดังนั้น

$$I = K \sin^2 \Delta/2 [\cos(\alpha + \omega t) - \sin(\alpha - \omega t)]^2 \quad (21)$$

จากสมการนี้ $I = 0$ เมื่อ

$$\sin^2 \Delta / 2 = 0 \text{ หรือ } [\cos(\alpha + \omega t) - \sin(\alpha - \omega t)] = 0 \quad (22)$$

เนื่องจาก ω จะอยู่ในช่วงที่สูงกว่าค่าที่เครื่องมือเคาจะบันทึกได้ จึงเขียน

$$\text{สมการใหม่ได้เป็น } I = K \sin^2 \Delta / 2 \quad (23)$$

และ $I = 0$ เมื่อ $\sin^2 \Delta / 2 = 0$ ดังนั้น $\Delta / 2 = n\pi$ จะปรากฏเป็นแถบมืดคม

$n = 0, 1, 2, 3$ และเป็นทางเคินของจุดของ Isochromatic fringe

เท่านั้น

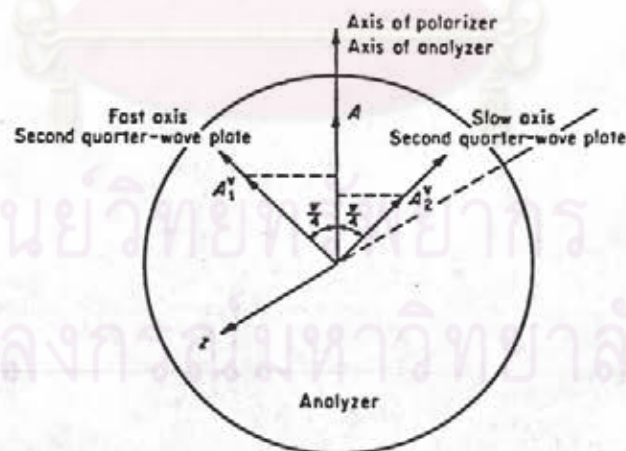
ความเข้มของแสงที่ผ่านแบบจำลองใน ๖.๓.๓

การทำให้เกิด ๖.๓.๓ ใน เซอร์คิวลาร์ โพลาไรเซอร์ ทำได้โดย

การเปลี่ยนมุม อะนาลิเซอร์ ๖.๓.๓ องศา และ $N = [n + (1/2)]$ ดังนั้น

การนับลำดับของแถบมืด จะเป็น $1/2, 3/2, 5/2, 7/2$ ตามลำดับ โดยมี

A_1^V และ A_2^V ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงผลลัพธ์ของทิศทางและขนาดของแสง เมื่อผ่านเข้า
อะนาลิเซอร์ ใน ๖.๓.๓

เมื่อผ่านอะนาลิเซอร์ ส่วนประกอบแนวระนาบของ A_1^V และ A_2^V จะถูกกูดกลืน และส่วนที่เป็นแนวตั้งจะผ่านใบ ดังนั้น แสงที่ผ่านออกมาจะมี Amplitude ค้างสมการ

$$\begin{aligned} A &= (\sqrt{2}/2) (A_1^V + A_2^V) \\ &= 2K \cos \omega t \cos \Delta/2 \end{aligned} \quad (24)$$

ส่วนความเข้มของแสงจะเป็น

$$I = K \cos^2 \omega t \cos^2 \Delta/2 \quad (25)$$

ค่า ω อยู่ในช่วงที่สูงกว่าที่เครื่องมือควมบันทึกได้ ดังนั้น

$$I = K \cos^2 (\Delta/2) \quad (26)$$

และ $I = 0$ เมื่อ $\Delta/2 = (1+2n\pi)/2$ เมื่อ $n = 0, 1, 2, 3$

$$N = \Delta/2 \pi = (1/2) + n \quad (27)$$

ซึ่งแสดงว่าแถบมืดแรกของ าลท์ พิล เป็น $1/2$ เมื่อ $n=0$

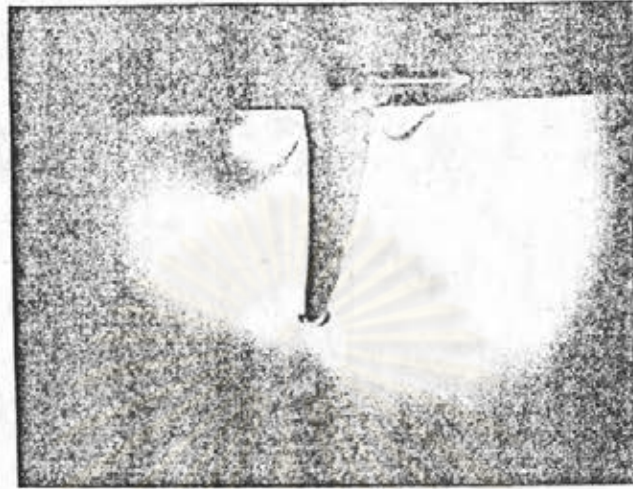
ศูนย์วิทย์ทรัพย์จักร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

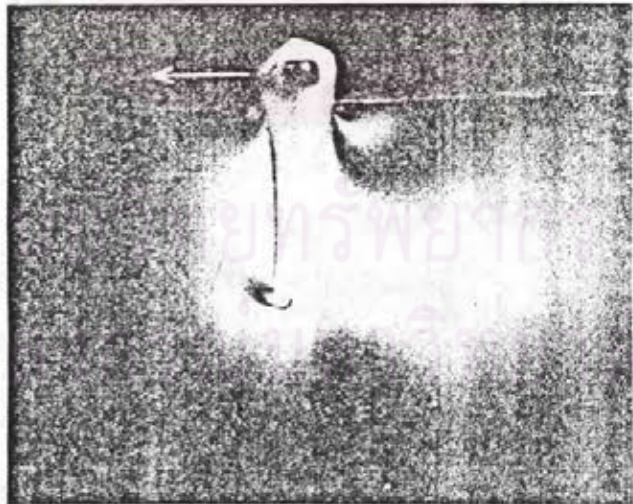
โฟรติอัสติคซิติในงานทันตกรรม
(Photoelasticity in Dentistry)

Hayashi, Chaconas and Caputo (21) ศึกษาถึงการตอบสนองของกระดูกรองรับฟันต่อแรงซึ่งใช้เคลื่อนฟันด้วยวิธีโฟรติอัสติค ศึกษาค้นหลักการที่ว่า เมื่อมีแรงกระทำต่อตัวฟันจะทำให้เกิดการตอบสนองของเซลล์ภายในกระดูกรองรับฟัน วัสดุสร้างแบบจำลองประกอบด้วยฟันกรามและฟันเขี้ยว ผังอยู่ในสารประกอบของ Urethane

แรงที่กระทำต่อฟันแบ่งเป็น 4 ทิศทาง คือ แรงในทิศทางใกล้กลาง (mesial) ไกลกลาง (distal) แรงตั้งฉากกับ อะวีโวลาร์ เครส และแรงที่ผ่านแนวแกนของฟัน และเมื่อนำแบบจำลองไปผ่าน Polariscope พบว่าการกระจายของแรงไปยังอวัยวะรองรับตัวฟันขึ้นอยู่กับทิศทางและรูปร่างของฟันเป็นสำคัญ กล่าวคือในฟันรากเขี้ยวได้แก่ ฟันเขี้ยว เมื่อมีแรงกระทำทางด้านใกล้กลางของฟันเขี้ยว (รูปที่ 18) จะทำให้เกิดแรงอัด (Compression) ที่ อะวีโวลาร์ เครส ทางด้านใกล้กลาง และแรงดึง (Tension) บริเวณปลายราก เนื่องจากฟันเขี้ยวเป็นฟันที่มีรูปร่างสมคูล ลักษณะการกระจายของแรงที่กระทำทางด้านใกล้กลางและด้านไกลกลางจึงเหมือนกัน แตกต่างเพียงตำแหน่งที่เกิดแรงอัดและแรงดึงจะตรงข้ามกันเท่านั้น (ดังรูปที่ 19)



รูปที่ 18 แสดงลักษณะการกระจายของแรง เมื่อกระทาค้อนพื้นเขียว
ทางด้านในกลาง



รูปที่ 19 แสดงลักษณะการกระจายของแรง เมื่อกระทาค้อนพื้นเขียว
ทางด้านนอกกลาง



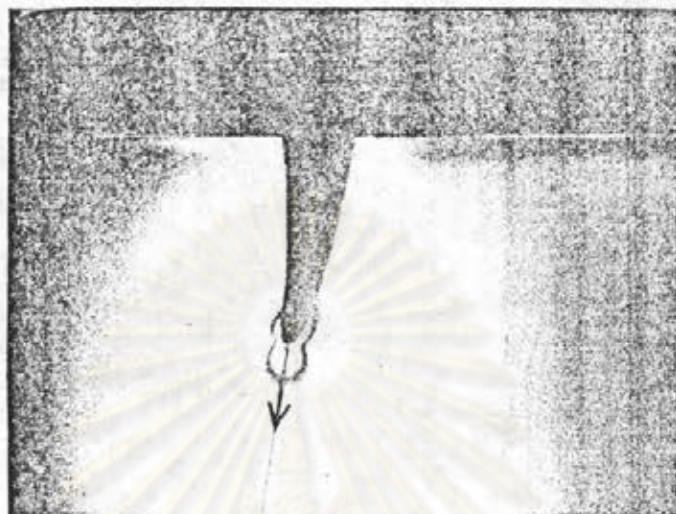
เมื่อมีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับ อะวีโวลาร์ เครส และไม่ผ่านแนวแกนของฟัน (รูปที่ 20) จะเกิดแรงอัดบริเวณปลายรากฟัน ณ ตำแหน่งประมาณ $1/3$ ของความยาวราก ิद्यมีความเข้มมากทางด้านใกล้กลางของฟัน



รูปที่ 20 แสดงลักษณะแรงอัดที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำตั้งฉากกับอะวีโวลาร์ เครส แต่ไม่ผ่านแนวแกนของฟัน

เมื่อปรับให้แรงตั้งกล่าวผ่านแนวแกนของฟัน พบว่าแรงอัดที่เกิดขึ้นบริเวณปลายรากฟันมีความเข้มสูง และสมมูลกันทั้งสองด้าน (ตั้งรูปที่ 21)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 21 แสดงลักษณะการกระจายของแรง เมื่อกระทำไปตามแนวแกนของฟัน

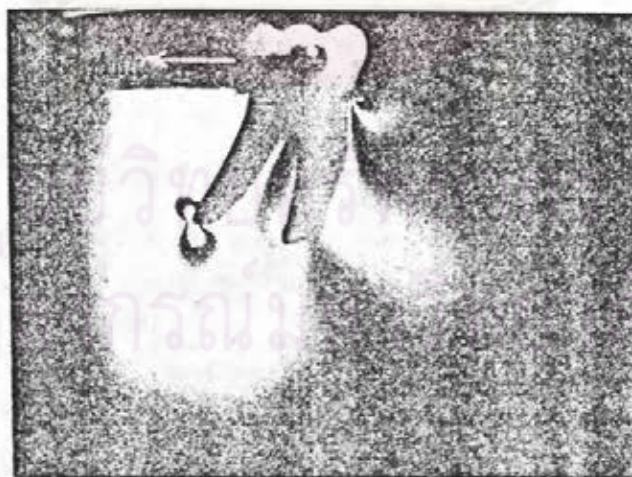
ในฟันสองรากได้แก่ ฟันกราม เมื่อมีแรงกระทำทางด้านใกล้กลางจะทำให้เกิดแรงอัดที่ อะวีรอลาร์ เครส ทางด้านใกล้กลาง แรงดังกล่าวมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านใกล้กลางของรากฟันด้านใกล้กลาง (Mesial root) ขณะเดียวกันจะเกิดแรงดึงที่บริเวณด้านไกลกลางของรากฟันด้านไกลกลาง และแรงอัดบริเวณปลายรากฟัน ดังรูปที่ 22

ศูนย์วิจัยทันตวิทยา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



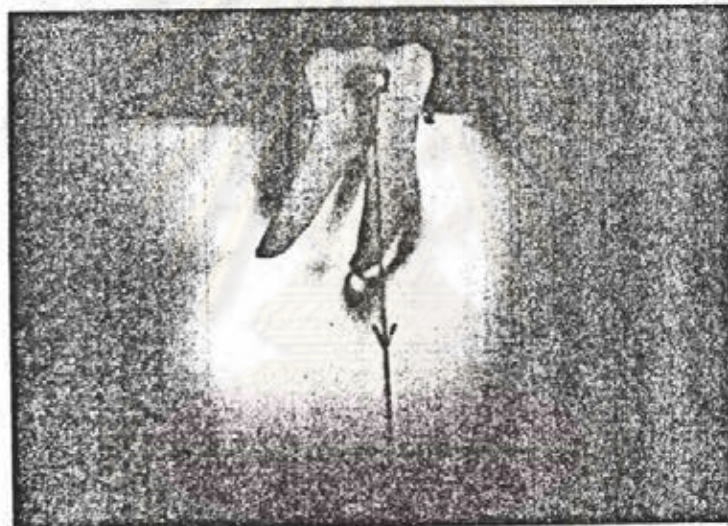
รูปที่ 22 แสดงลักษณะการกระจายของแรง เมื่อกระทำทางด้านใกล้
กลางต่อพื้นกราม

ในทางตรงข้าม เมื่อมีแรงกระทำทางด้านไกลกลางจะทำให้เกิดแรง
ดึงที่ด้านใกล้กลางของรากพื้นด้านใกล้กลาง รอยแรงมีค่ามากที่สุดบริเวณ
อะวีรอลาร์ เครส ขณะเดียวกันจะเกิดแรงอัดที่ด้านไกลกลางของรากพื้นด้าน
ไกลกลาง และแรงมีค่ามากที่สุดที่บริเวณปลายราก (ดังรูปที่ 23)



รูปที่ 23 แสดงลักษณะการกระจายของแรง เมื่อกระทำทางด้านไกล
กลางต่อพื้นกราม

เมื่อให้แรงกระทำตั้งฉากกับ อะวีโรลาร์ เครส (รูปที่ 24) จะเกิดแรงอัดทางด้านใกล้กลางของรากฟันด้านใกล้กลาง ณ ตำแหน่ง $1/2$ ของความยาวราก และมีค่ามากที่สุดบริเวณปลายรากด้านใกล้กลาง บริเวณ อะวีโรลาร์ เครส พบแรงอัดเพียงเล็กน้อย ขณะเดียวกันจะพบแรงดึงที่ด้านไกลกลางของ เครส



รูปที่ 24 แสดงลักษณะและการกระจายของแรงเมื่อกระทำทิศทางตั้งฉากกับ อะวีโรลาร์ เครส ของฟันกราม

เมื่อปรับให้แรงนี้ผ่านแนวแกนของฟันกราม (ตั้งรูปที่ 25) พบความเค้นที่เกิดขึ้นแตกต่างกับแบบอื่น กล่าวคือ ความเค้นจะกระจายเท่าๆกันทั้งด้านใกล้กลางและไกลกลางของรากฟันทั้งสอง แรงอัดส่วนใหญ่พบระหว่างรากฟันทั้งสองมากกว่าบริเวณปลายรากฟัน



รูปที่ 25 แสดงลักษณะการกระจายของแรงที่กระทำค้ำฉากกับ
อะวีโวลาร์ เครส และฟานแนวแกนของพินแกรม

Hayashi และคณะสรุปว่า ลักษณะการกระจายของความเค้นที่เกิด
กับพินเขียวเมื่อมีแรงกระทำทางด้านใจกลางและไกลกลางคล้ายคลึงกัน กล่าว
คือบริเวณ อะวีโวลาร์ เครสของด้านที่อยู่ตรงข้ามกับทิศทางของแรงมีความเค้น
เกิดขึ้นมากที่สุด

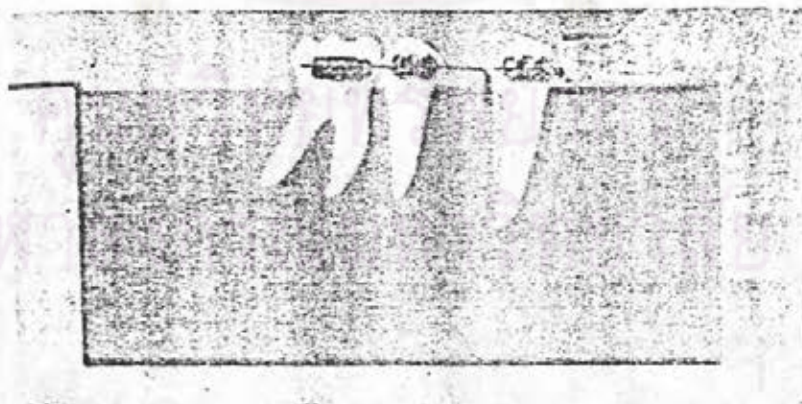
สำหรับพินแกรม การออกแรงทางด้านใจกลางหรือไกลกลาง พบว่า
ความเค้นมีค่ามากที่สุดบริเวณด้านใจกลางของ อะวีโวลาร์ เครส และด้าน
ไกลกลางของปลายรากไกลกลาง และแรงค้ำทางด้านใจกลางที่เกิดขึ้นโดย
แรงทางด้านไกลกลางมีค่าประมาณ 3 เท่าของแรงอัดที่ใจกลางของ
อะวีโวลาร์ เครส ที่เกิดจากแรงทางด้านใจกลาง โดยวัดได้จากจำนวนของ
ความเค้นที่เกิดขึ้นในพื้นที่นั้น ดังนั้นการปรากฏของความเค้นที่ปลายรากของราก

ไกลกลาง แสดงว่าปลายรากเคลื่อนที่โดยแรงไกลกลางและค้ำยันค้ำเขี้ยวเคลื่อนที่โดยแรงใกล้กลาง และจากการสังเกตของ Reitan(30) พบว่าการเกิด Hyalinization อย่างมาก จะสัมพันธ์กับการเกิดเคลื่อนที่เฉพาะส่วนตัวฟันมากกว่าทั้งซี่ฟันซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนโดยการใช้แรงชนิด Intrusive force ต่อฟันที่มีสองราก

แรงที่มีทิศทางตั้งฉากกับอะวีจอลาร์ เครส จะพบการเคลื่อนที่เฉพาะส่วนตัวฟัน และการมีความเข้มของแรงอัดเกิดที่รากใกล้กลางและ อะวีจอลาร์ เครส ทางค้ำใกล้กลาง

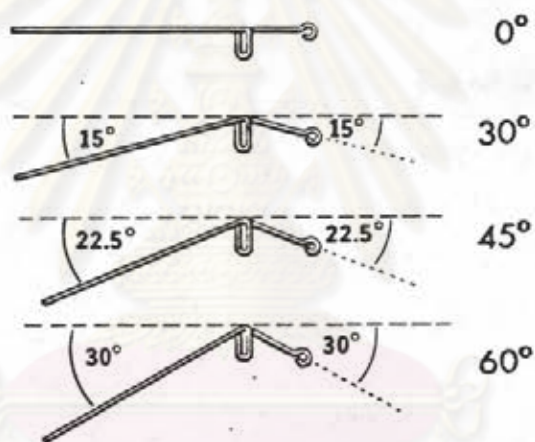
แรงที่มีทิศทางไปตามแนวแกนของฟัน จะมีการกระจายของแรงอย่างเป็นระเบียบไปตามรากฟันทั้งสองและมีลักษณะของ Bodily intrusion โดยมีความอัดเกิดที่ปลายรากทั้งสองเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับฟันเขี้ยวพบว่าความเค้นซึ่งเกิดขึ้นที่ปลายรากฟันเขี้ยวมีความเข้มมากกว่าที่ปลายรากของฟันกราม ทั้งนี้เพราะฟันกรามมีพื้นที่ของรากฟันมากกว่า จึงกระจายแรง Intrusive ได้มากกว่า

Caputo, Chaconas and Hayashi(12) วิเคราะห์ความเค้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของฟันเขี้ยวด้วยสปริงชนิดบางส่วนของซากกระดูก(ดังรูป 26)



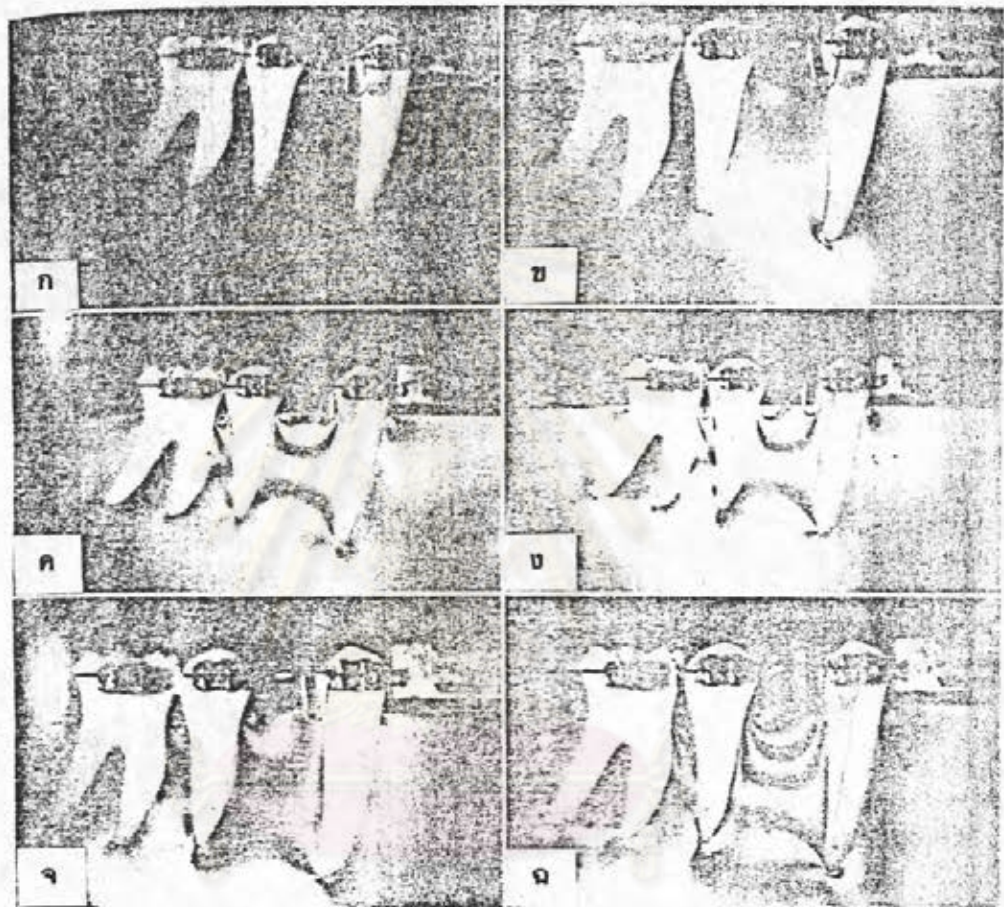
รูปที่ 26 แสดงแบบจำลองซึ่งหล่อด้วยสารโพลิฟรินเจนชนิด 2 มิติ

วิจัยสปริงชนิดบางส่วนของซากรโรกร ทำจากลวด Blue-Elgiloy ชนิด Unheat-treated คัดให้มีลักษณะต่างกันได้แก่ Squash loop, Closed vertical loop, Double closed vertical loop และ Double Helices spring แต่ละชนิดคัดให้มี เกเบอร์ แองเกิล (มุมระหว่างแขนทั้งสองของ ลูป) ขนาดต่างกัน ตั้งแต่ 0 องศา 30 องศา 45 องศา และ 60 องศา ตามลำดับ (ดังรูปที่ 27)



รูปที่ 27 แสดงลักษณะของ สปริงชนิดบางส่วนของซากรโรกรชนิด Closed vertical loop ที่มี เกเบอร์ แองเกิล ขนาดต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 28 แสดงผลของ เกเบอร์ แองกิล ที่เกิดขึ้นก่อนการกระตุ้น
 ลวคขนาด 0.016×0.022 นิ้ว

รูป ก. เกเบอร์ แองกิล = 0 องศา

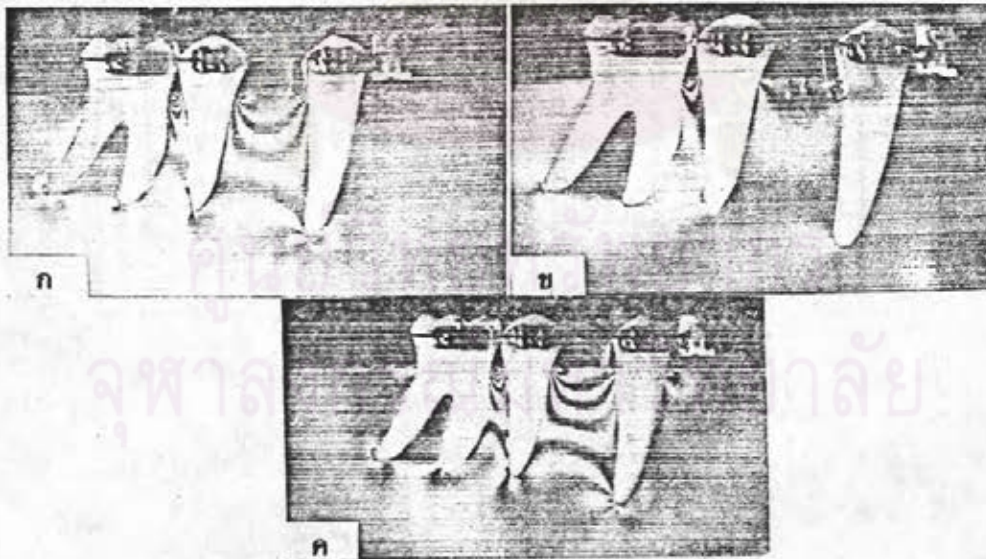
รูป ข. เกเบอร์ แองกิล = 60 องศา

รูปที่ 28 ค. ลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นจาก 0.016×0.016 นิ้ว ซึ่งมี เกเบอ์ แองเกิล = 0 องศา ภายหลังกระตุ้น 1 มม. ความเค้นมีลักษณะเป็นแบบ Counterclockwise tipping ภัยมีความเข้มมากที่สุดบริเวณปลายราก และที่ อะวีโวลาร์ เครส

ง. เมื่อทำ เกเบอ์ แองเกิล 30 องศา และกระตุ้น พบว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณปลายรากและ อะวีโวลาร์ เครส ทางด้านใกล้กลางลดลง ทำให้ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่หึ่งซี่ฟัน

รูปที่ 28 จ. ลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นจาก 0.016×0.022 นิ้ว Close Vertical loop มี helix และมี เกเบอ์ แองเกิล 60 องศา ภายหลังกระตุ้น 1 มม. ความเค้นที่ปรากฏทางด้านใกล้กลางของฟันเขี้ยวค่อนข้างสม่ำเสมอ ฟันเคลื่อนที่หึ่งซี่ฟัน

ฉ. เมื่อกระตุ้นสปริงเพิ่มขึ้นเป็น 2 มม. พบว่าความเค้นมีค่ามากขึ้นบริเวณปลายรากและ อะวีโวลาร์ เครส ฟันเคลื่อนที่แบบ Counterclockwise



รูปที่ 29 เปรียบเทียบลักษณะของความเค้นซึ่งเกิดจากการใช้ แสกซันแนล อาร์ช สปริง ลักษณะต่างกัน

ก. 0.016×0.016 นิ้ว Closed vertical loop มี Helix เกเบออร์ แองเกิล 60 องศา และกระตุ้นประมาณ 2 มม.

ข. Double vertical loop มี Double helix เกเบออร์ แองเกิล 60 องศา พบว่ากระตุ้นประมาณ 2 มม. แรง 331 กรัม ทำให้เกิดความเค้นที่เป็นระเบียบกว่าการทำ เกเบออร์ แองเกิล 30 องศา

ค. แสดงผลที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ใช้เป็นหลักยึด เมื่อกระตุ้นสปริงมากขึ้น กล่าวคือใช้ 0.016×0.016 นิ้ว Squashed loop เกเบออร์ แองเกิล 60 องศา แรง 850 กรัม จะปรากฏความเค้นรอบพินกราม

จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่า การควบคุมให้ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่ ทั้งซี่ฟัน ค้ำยสปริงชนิดบางส่วนของชากรรไกรขึ้นกับ ขนาดของแรงที่ใช้ และ เกเบออร์ แองเกิล กล่าวคือแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันเขี้ยวไม่ควรเกิน 300 กรัม และ Gable angle 45-60 องศา การใช้แรงมากเกินไปโดยไม่มีค้ำย ถึง เกเบออร์ แองเกิล จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่เฉพาะส่วนตัวฟันและการสูญเสียหลักยึด

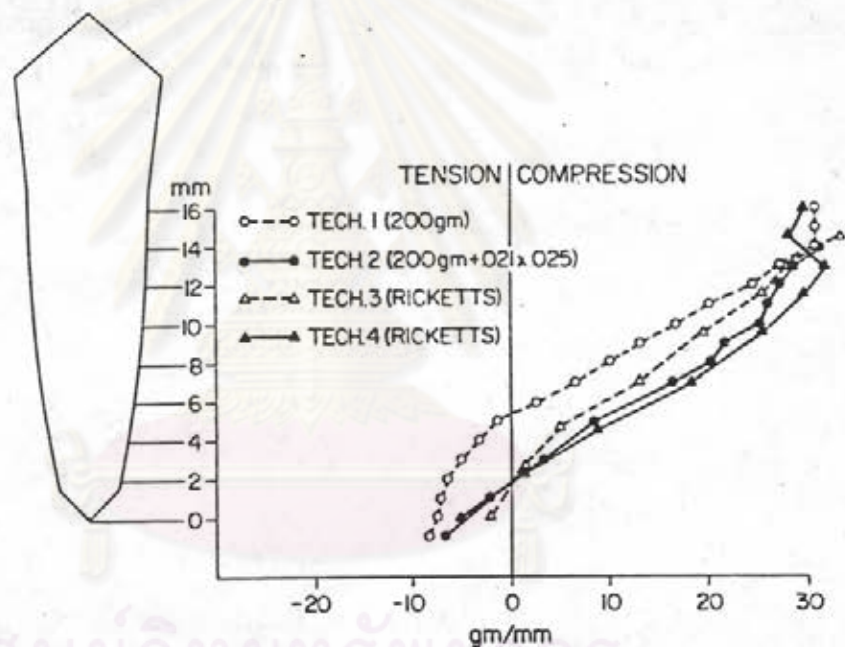
Baeten (6) กล่าวว่าเมื่อมีแรงในแนวระนาบกระทำที่ตัวฟันเขี้ยว จะทำให้ฟันหมุนรอบจุดศูนย์กลางการหมุนตามทิศทางของแรง แรงคู่ควบที่ผนวก เข้าไปจะต้านทานการหมุนและทำให้แรงในแนวระนาบนั้นผ่านจุดศูนย์กลางความ ต้านทานของฟันได้ ฟันเขี้ยวจะเคลื่อนที่ทั้งซี่ฟัน รีมเมนต์ของแรงคู่ควบจะเท่ากับ ขนาดของแรง \times ระยะตั้งฉากกับแรง การควบคุมอัตราส่วนระหว่างริมเมนต์ คู่แรง เป็นสิ่งจำเป็นต่อการเคลื่อนที่ของฟัน

สำหรับการศึกษาการกระจายของความเค้นซึ่งเกิดขึ้นจากการเคลื่อน ฟันเขี้ยวด้วยสปริงชนิดบางส่วนของชากรรไกร ลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้น วิเคราะห์ด้วยวิธี Pointwise ด้วย Babinet compensator

Babinet compensator ประกอบด้วย Double quartz

crystal ซึ่งเคลื่อนที่ไปตามด้านไกลกลางรากฟันเขี้ยว Optical effect มีค่าเป็นบวกและลบ ค่าบวกคือแรงอัด ค่าลบคือแรงดึง การเคลื่อนฟันเขี้ยว แบ่งเป็น 17 เทคนิค

เทคนิคที่ 1 Elastic ligature wire ซึ่งใช้แรง 200 กรัม พบว่าแรงอัดมีค่ามากที่สุด = 30.7 กรัม/มม. ivotอยู่ห่างจากปลายราก 14-16 มม. แรงดึงมีค่ามากที่สุด = 7.6 กรัม/มม. บริเวณปลายราก



รูปที่ 30 แสดงแรงดึงและแรงอัด ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนฟันเขี้ยว ด้วยเทคนิคที่ 1-4

จุดศูนย์กลางการหมุนอยู่ห่างจากปลายราก 5.3 มม. สำหรับเทคนิคที่ 2-17 ที่ใช้วิธีวัดเช่นเดียวกับวิธีที่ 1 แต่แตกต่างกันที่ขนาดของลวด เกเบอร์ แองเกิล แรงที่ใช้เคลื่อนฟันและการทำ Heat treatment

ผลการทดลองสรุปได้ว่า การควบคุมการเคลื่อนที่ของรากฟันเขี้ยวขึ้นกับขนาดของแรงอัดและแรงดึง ขนาดของแรงอัดที่มีค่าใกล้เคียงกับคลอดผิวรากฟันค้ำานไกลกลางของฟันเขี้ยว แสดงถึงการเคลื่อนที่ทั้งซี่ฟัน

Brodsky, Caputo และ Furstman(8) ศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนฟันเขี้ยว ศึกษาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงทาง Histopathology กับ การกระจายของความเค้นในหุ่นจำลองแบบฟันด้วยวิธีโพโรอีลาสติค การทดลองกระทำในแมว 2 ตัว ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 350 กรัม แรงที่ใช้เคลื่อนฟันเขี้ยวมีขนาด 185 กรัม ได้จากสปริงชนิดเกลียวบิด ดังรูปที่

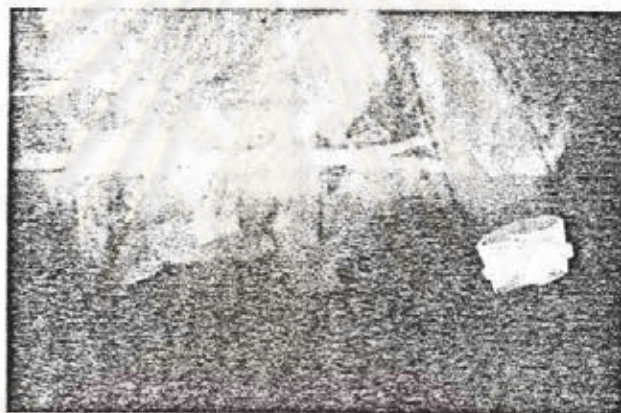
31



รูปที่ 31 แสดงการทดลองดึงฟันเขี้ยวด้วย สปริงชนิดเกลียวบิดใน

แมว

ขณะเดียวกันพิมพ์ปากแมวเพื่อทำหุ่นจำลองแบบฟัน ด้วยวัสดุที่สามารถ
หักเหแสงได้ 2 แนว ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำหุ่นจำลองแบบฟันที่หล่อด้วยปูน
ปลาสเตอร์ มาพิมพ์ด้วย Silicone rubber base อีกครั้งหนึ่ง แล้วเทปูน
ปลาสเตอร์หิน เฉพาะบริเวณตัวฟันเขียว ฟันกรามน้อยซี่ที่สอง และฟันกราม
รากฟันของฟันเหล่านี้ทำด้วยซีเมนต์ วัสดุลักษณะของรากฟันศึกษาจากภาพถ่ายรังสี
กะโหลกศีรษะด้านข้าง ดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 แสดงลักษณะของรากฟันที่ปรากฏในภาพถ่ายรังสี
กะโหลกศีรษะด้านข้าง

พิมพ์ฟันที่แต่งซีเมนต์ เรียบร้อยแล้วด้วย Silicone rubber base
หล่อแบบพิมพ์ด้วย Epoxy base photoelastic plastic A ดังรูป ที่ 33
แล้วเคลือบบริเวณรอบรากฟันด้วยซีเมนต์ เพื่อแทนเนื้อเยื่อปริทันต์ หลังจากนั้นหล่อ
แบบจำลองของขากรรไกร วัสดุที่ใช้ Epoxy base birefringent plastic
C แกะตัวฟันออกจากขากรรไกรปลอมขึ้นเพื่อกำจัดซีเมนต์ออกจากตัวฟันทั้งหมด ใช้
Birefringent liquid urethane plastic ใสลงไปบนเข้าฟัน แล้วจึง

ค่อยๆ คัดฟันให้เข้าไปสู่ตำแหน่งเดิม ร่องนิ้วสุดแข็งตัวจึงติดสปริงลักษณะเดียวกับที่ใส่ในสัตรีทคลอง นำแบบทคลองจุ่มในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 180 องศาฟาเรนไฮต์ แล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง ความร้อนทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นคงอยู่ในตำแหน่งเดิม แม้จะถอดเครื่องมือออกแล้วก็ตาม ดังรูปที่ 33



รูปที่ 33 แสดงแบบจำลองซากกรรไกรบนชนิดเรซินอีลาสติก ซึ่งประกอบด้วยสารเรซินอีลาสติกดังนี้

A = ฟันชนิด Stiff Epoxy plastic

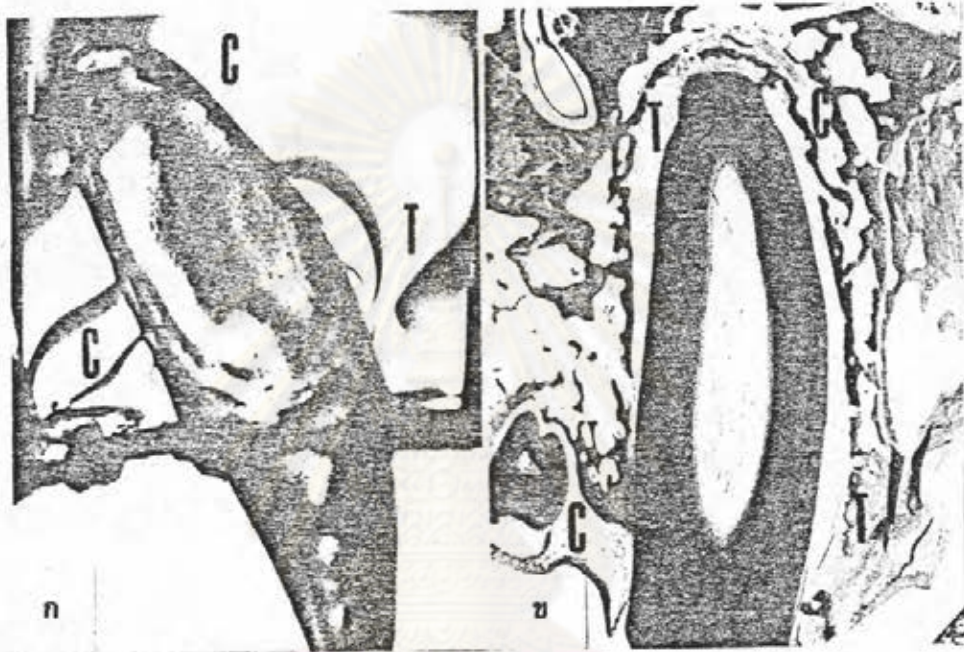
B = Membrane ทำด้วยชนิด Urethane plastic

C = ซากรรไกรบนทำด้วยชนิด Epoxy plastic

จากนั้นตัดหุ่นจำลองด้วย High Speed horizontal circular saw ใต้อุณหภูมิเย็นเป็นตัวระบายความร้อน นำหุ่นจำลองที่ตัดแล้วมาศึกษาด้วยเครื่องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ความเค้นภายในหุ่นจำลองบันทึกด้วยภาพถ่ายจากกล้องขนาด 35 มม.

สำหรับในสัตรีทคลอง หลังจากทคลอง 7 วัน คัดศีรษะแมวในแนว Midsagittal เพื่อถ่ายภาพรังสีกะโหลกศีรษะด้านข้าง หลังจากนั้นละลาย

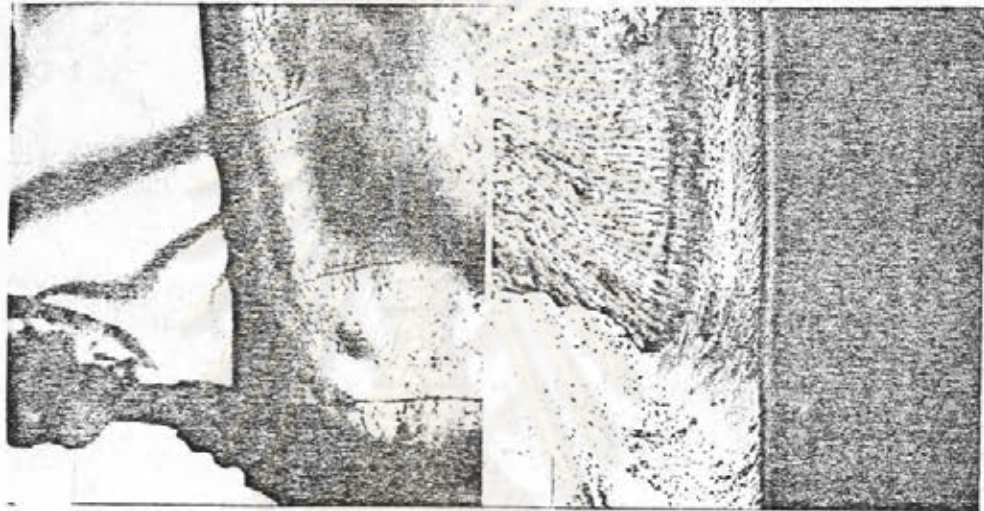
แคลเซียมด้วย 10% Nitric acid ใน 10% formalin เพื่อเตรียมเนื้อเยื่อ
ที่มีหินสีขาว และพันกรามสำหรับศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 34 ก. ชิ้นส่วนภาคตัดขวาง (Section) ของแบบจำลอง
รูปครีโอลาสติก บริเวณ T = แรงคิ่ง , C = แรงอืด

ข. แสดงถึงลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูก
ขากรรไกร

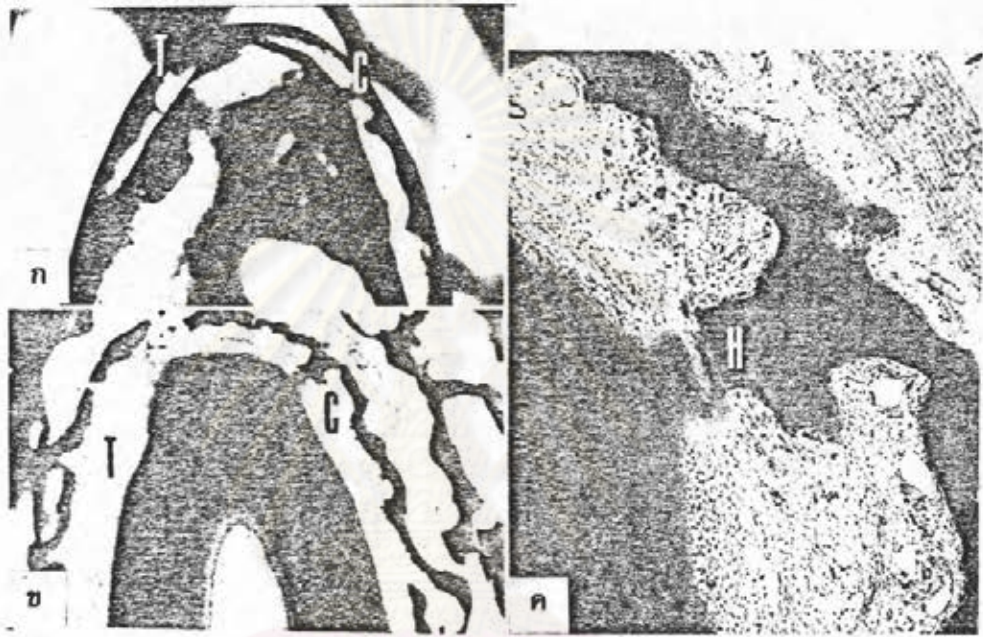
ตามรูปที่ 34 ก. ทางด้านนอกกลางบริเวณที่มีแรงอืดสูงสุด คือ
อะวีโวลาร์ เครส และลดลงตามลำดับจนถึงระยะ 1/3 จากบริเวณปลายราก
ฟัน และเปลี่ยนเป็นแรงคิ่งทางด้านในกลาง บริเวณที่มีแรงอืดสูงคือ บริเวณสูง
จากปลายรากขึ้นมาประมาณ 1/3 ของความยาวราก หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็น
แรงคิ่ง



รูปที่ 35 ก. ด้านใกล้กลางของฟันเขี้ยวบริเวณขอกกระดูกเข้าฟัน
ซึ่งมีแรงอัดสูง และลักษณะทางจุลกายวิภาคที่บริเวณเดียวกัน

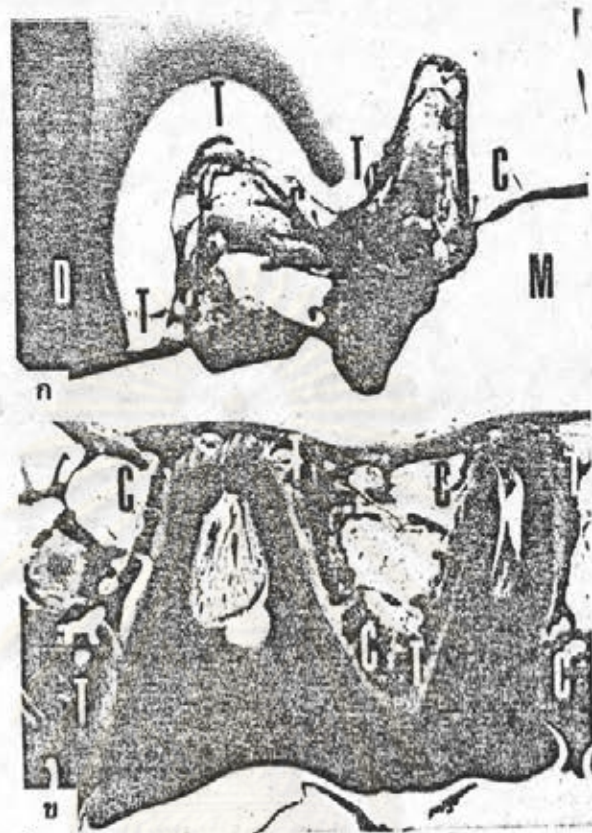
ข. พบว่าเกิด Hyalinization เนื่องจากแรงกดเส้น
เลือดที่มาหล่อเลี้ยงเนื้อเยื่อปริทันต์ ทาที่เนื้อเยื่อซาคอาหารและออกซิเจน
ตลอดจนช่องว่างของเนื้อเยื่อปริทันต์ลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 36 ก. แสดงลักษณะของ เนื้อเยื่อปริทัศน์ทางค้ำานไกลกลาง
ของปลายรากซึ่งมีแรงอัดสูง ส่วนทางค้ำานไกลกลางมีแรงดึงสูง แรงดึงกล่าวทา
ให้ปลายรากล้มเอียงไปทางค้ำานไกลกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับรูป 36 ข,ค จะ
พบว่า มี Hyalinization(H) ในบริเวณปลายรากทางค้ำานไกลกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 37 ก. ภาพถ่ายโพลาไรซ์แสง บริเวณพื้นกรามพบแรงดึงเล็กน้อย บริเวณด้านไกลกลางของกระดูกเข้าฟัน ขณะเดียวกันมีแรงอัดเล็กน้อย บริเวณยอดกระดูกเข้าฟันด้านใกล้กลาง (M) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 37 ข. ลักษณะทางจุลกายวิภาค พบว่ามีแรงดึงและแรงอัดสอดคล้องกัน ไม่เกิด Hyalinization

ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

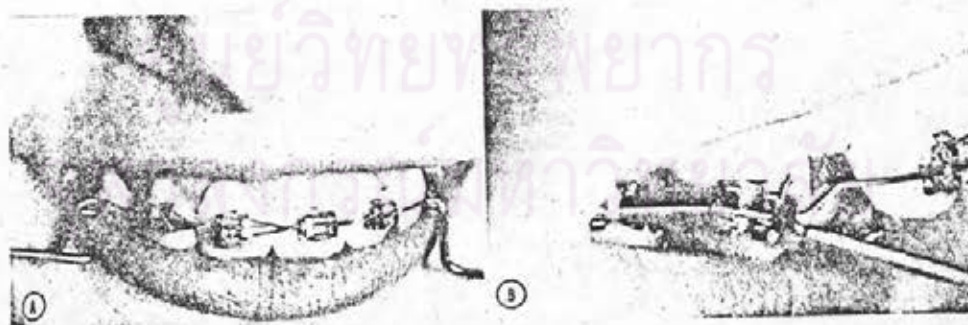
1. บริเวณที่พบแรงอัดสูง ได้แก่ ยอดกระดูกเข้าฟันทางด้านไกลกลางของฟันเขี้ยว บริเวณดังกล่าวเกิด Hyalinization กว้าง
2. บริเวณที่มีแรงดึงสูง ได้แก่ บลาวยรากฟันเขี้ยวมี Hyalinization แคบ

3. ทางด้านโกลกลางของฟันเขี้ยว มีแรงดึงภายในเนื้อเยื่อปริทันต์ จากบริเวณปลายรากขึ้นมาจนถึงครึ่งหนึ่งของความยาวราก

4. แรงดึงและแรงอัด เกิดขึ้นบริเวณ ฟันกรามน้อยกว่าบริเวณฟันเขี้ยว

ลักษณะทางด้านโพธิ์ลาสติก และจุลกายวิภาค สอดคล้องกัน กล่าวคือ บริเวณเขตที่พบแรงดึงในโพธิ์ลาสติก เนื้อเยื่อปริทันต์จะถูกดึง บริเวณเขตที่พบแรงอัดเนื้อเยื่อปริทันต์ถูกอัดด้วยเช่นกัน

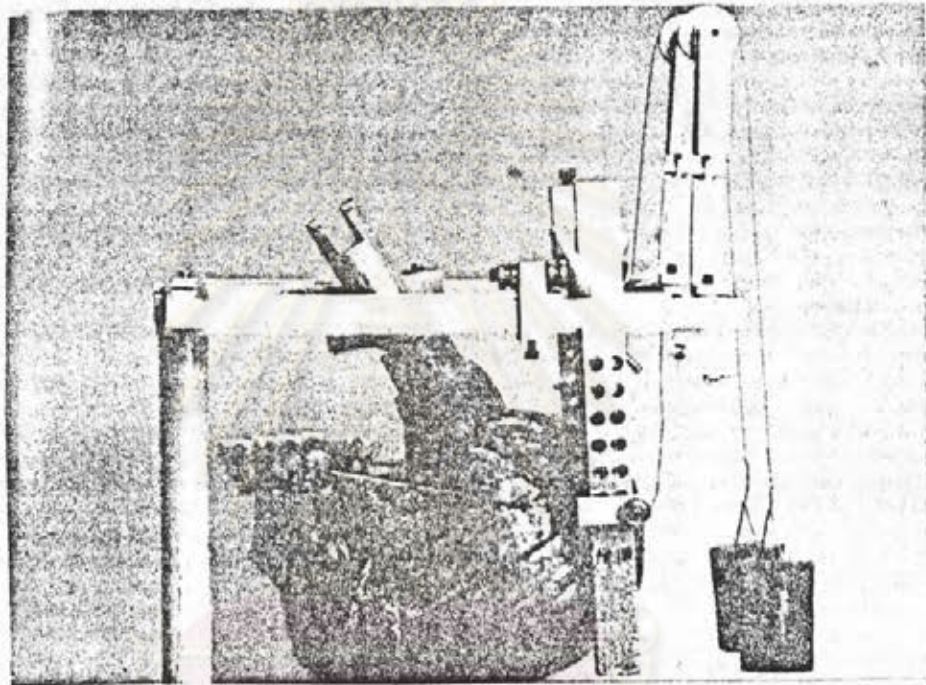
Perez, Alba, Caputo และ Chaconas (29) ศึกษาการเคลื่อนฟันเขี้ยวไปทางด้านโกลกลางและป้องกันการสูญเสียหลักยึดด้วยการใช้ J hook headgear ในหุ่นจำลองกะโหลกศีรษะซึ่งหล่อจากสารไบรพรีนเจน เพื่อวิเคราะห์การกระจายของแรงกดที่ใช้เทคนิคโพธิ์ลาสติก แขนนอก (outer bow) ของ Headgear ทามุม 40, 20 และ 0 องศาตามลำดับ ค่อยระนาบคดเคี้ยว พบว่าฟันเขี้ยวเคลื่อนที่ทั้งซี่ฟันมากขึ้น เมื่อแรงที่ใช้เคลื่อนฟันทามุมกับระนาบคดเคี้ยวมากขึ้น ยิ่งกว่านั้นยังได้ศึกษาถึงการกระจายของความเค้นซึ่งผ่านไปตาม Frontozygomatic suture, Zygomaticomaxillary suture, Zygomaticotemporal suture



รูปที่ 38 แสดงลักษณะของ J-Hooks ที่ใช้ในการศึกษาของ Perez และคณะ

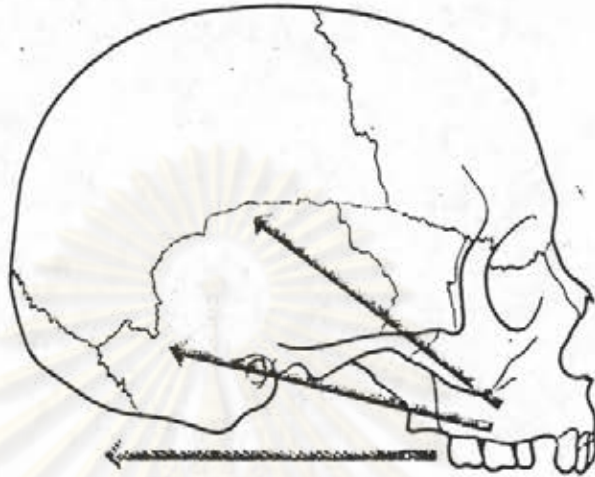


กะโหลกศีรษะของมนุษย์ ตามรูปที่ 39 หล่อกจากสาร PLM-1Z ซึ่งเป็นสารพอลิเอทิลีนชนิดหนึ่ง และฟันในขากรรไกรบนหล่อด้วยวัสดุพวก Ivory Epoxy ส่วนเนื้อเยื่อปริทันต์ใช้สาร Urethane plastic สารทั้งหมดมีคุณสมบัติในการหักเหแสงสองครั้ง เมื่อได้รับแรง Archwire ทำจากลวดขนาด 0.016×0.016 นิ้ว Blue Elgiloy



รูปที่ 39 แสดงแบบจำลองกะโหลกศีรษะ และกรอบลึงนิยมนที่ยึด J-Hooks

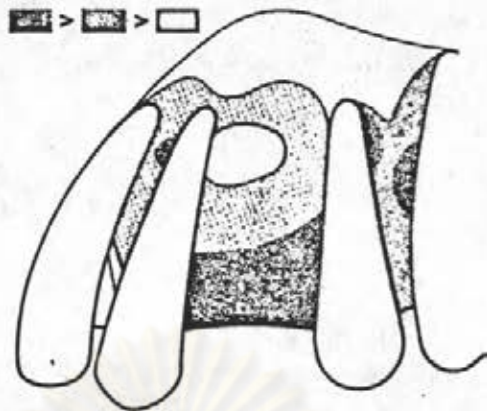
ติด J-Hook ในตำแหน่งใกล้กลางของฟันเขี้ยว และใช้แรงดึงข้างละ 200 กรัม ในระดับต่าง ๆ ดังรูปที่ 40 แรงในระดับสูงถึงห้ามุม 40 องศา กับระนาบคเคี้ยว ระดับกลางถึงห้ามุม 20 องศา กับระนาบคเคี้ยว และระดับต่ำทิศทางของแรงขนานกับระนาบคเคี้ยว นำแบบจำลองไปจุ่มลงในน้ำมัน ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึง Stress-freezing temperature ของวัสดุ นำออกมาปล่อยให้เย็นในอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 40 แสดงทิศทางของแรงที่เกิดจาก J-Hook 3 ระดับ คือ
ระดับสูง=40 องศา , ระดับกลาง=20 องศา, ระดับต่ำ=0 องศา

ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. แรงซึ่งหามุม 40 องศา กับระนาบดเคี้ยวทำให้เกิดความเค้นรอบปลายรากฟันเขี้ยวและผิวรากฟันทั้งสองด้านและกระจายมาจนกระทั่งถึงคานใกล้กลางของรากฟันกรามน้อยซี่ที่สอง บริเวณระหว่างฟันกรามน้อยและฟันกรามคานลำดับ ดังรูปที่ 41 และบริเวณที่มีแรงอัดสูงสุด ได้แก่ คานใกล้กลางบริเวณที่อยู่สูงจากค้ำฟันเขี้ยวขึ้นไปประมาณ $1/3$ ของความยาวรากและคานใกล้กลางห่างจากปลายรากฟันเขี้ยวลงมา $1/3$ ของความยาวราก



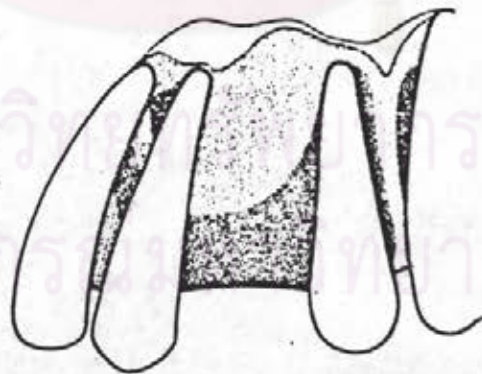
รูปที่ 41 แสดงพื้นที่ที่ได้รับบาดเจ็บ เมื่อใช้ J-Hook headgear ซึ่งให้แรงทามุม 40 องศา กับระนาบคเคี้ยว

พื้นที่สีคา แสดงถึง บริเวณที่มีแรงอัดสูง

พื้นที่เป็นจุดใหญ่ แสดงถึง บริเวณที่มีแรงอัดปานกลาง

พื้นที่เป็นจุดเล็ก แสดงถึง บริเวณที่มีแรงอัดน้อย

2. แรงซึ่งทามุม 20 องศา กับระนาบคเคี้ยว ทำให้เกิดแรงอัดทางด้านใกล้กลางของฟันเขี้ยวบริเวณ $1/3$ ของความยาวราก แรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าประเภทแรก ดังรูปที่ 42



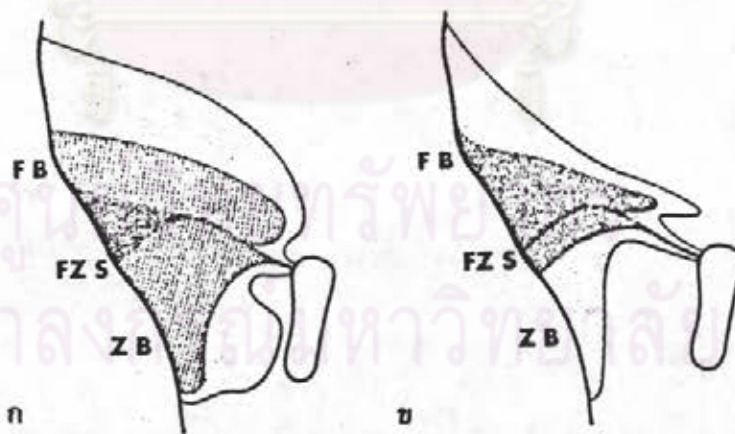
รูปที่ 42 แสดงพื้นที่ที่ได้รับบาดเจ็บ เมื่อใช้ J-Hook headgear ซึ่งให้แรงทามุม 20 องศา กับระนาบคเคี้ยว

3. แรงซึ่งขนานกับระนาบคเคี้ยว ทำให้เกิดแรงอัดสูงขึ้นบริเวณ 1/3 ของความยาวรากฟันเขี้ยว และระหว่างฟันกรามและฟันกรามน้อย ดังรูปที่ 43



รูปที่ 43 แสดงพื้นที่ที่ได้รับความเค้นเมื่อใช้ Headgear ซึ่งทำให้แรงขนานกับระนาบคเคี้ยว แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่เฉพาะส่วนตัวฟันเขี้ยว

บริเวณ Frontozygomatic suture (ดังรูปที่ 44) แรงผ่านไปยังขอบเข้าคาน และ Body ของกระดูก Zygomatic ความเข้มของความเค้นลดลงเมื่อแรงทำมุมกับระนาบคเคี้ยวมากขึ้น



รูปที่ 44 ก. แสดงลักษณะในแนวด้านหน้า-ใกล้กลางของ Frontozygomatic suture เมื่อได้รับแรง แสดงพื้นที่ที่ได้รับความเค้นเมื่อใช้ J-Hook headgear ชนิดตั้งในระดับท่ำ = 0 องศา

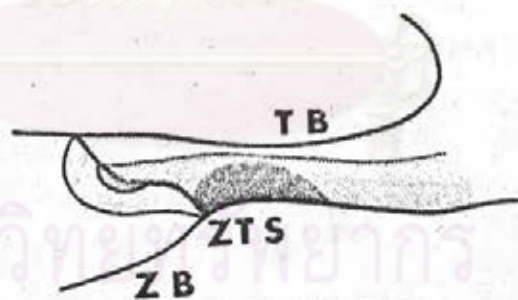
ข. แสดงพื้นที่ที่ Frontozygomatic suture ถูก กระตุ้นด้วยการใช้แรงจาก headgear ชนิดดึงในระดับสูง = 40 องศา

FB = Frontal bone

ZB = Zygomatic bone

FZB = Frontozygomatic suture

บริเวณ Zygomatic arch เมื่อทิศทางของแรงดึงทำมุม 20 องศา กับระนาบคเคี้ยว ทำให้เกิดความเค้นบริเวณ Zygomatico-temporal suture และขยายไปทางด้านหลังถึง Zygomatic process ของกระดูก Temporo Mandibular fossa ความเข้มของความเค้นสูงในบริเวณส่วนล่าง ของ Suture ดังรูปที่ 45 ส่วนแรงที่ทำมุม 40 องศา และ 0 องศา กับ ระนาบคเคี้ยวทำให้เกิดความเค้นน้อยกว่าและไม่ขยายขอบเขตไปถึงฐานของ Zygomatic process ของกระดูก Temporal



รูปที่ 45 แสดงความเค้นที่เกิดบริเวณ Zygomatic arch เมื่อใช้ แรงทำมุม 20 องศา กับระนาบคเคี้ยว

ZTS = Zygomaticotemporal suture

TB = Temporal bone

ZB = Zygomatic bone

บริเวณ Zygomaticomaxillary suture แรงทั้ง 3 ประเภททำให้เกิดความเค้นที่มีความเข้มและตำแหน่งใกล้เคียงกัน คือขยายขอบเขตขึ้นไปจนถึง Body ของกระดูก Zygomatic

Perez และคณะ อ้างถึงการค้นคว้าของ Burstone ซึ่งพบว่าจุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันรากเดี่ยวที่มีลักษณะเป็น Parabolic จะอยู่ในตำแหน่ง 4/10 ของระยะห่างจากยอดกระดูกเบ้าฟันถึงปลายราก แรงที่ผ่านจุดศูนย์กลางความต้านทาน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หึ่งซี่ฟัน ดังนั้นความเค้นที่เกิดจากการใช้ J-Hook ซึ่งมีทิศทางของแรงทาบมุมกับระนาบบดเคี้ยวเพิ่มขึ้น จึงทำให้เคลื่อนเฉพาะส่วนตัวฟันน้อยลง สิ่งเกิดได้จากแรงดึงทางด้านใกล้กลางของรากฟันเขี้ยวจะน้อยกว่าแบบอื่น เนื่องจากแรงผ่านจุดศูนย์กลางความต้านทาน ขณะเคี้ยวกันทำให้เกิดแรงอัดน้อยกว่า สิ่งเกิดได้จากความเข้มของความเค้นรอบวปลายราก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Canine Retraction

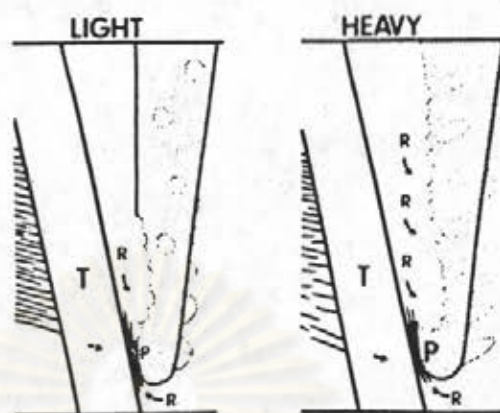
ธรรมชาติของการเคลื่อนฟัน (The Nature of tooth movement)

Storey(33) กล่าวว่า องค์ประกอบที่ควรคำนึงถึงในการเคลื่อนฟัน ได้แก่

1. Bioelastic, Bioplastic และ Biodisruptive deformation ของเนื้อเยื่อ
2. แรงภายนอกที่จะทำให้เกิดแรงอัดและแรงดึง ค่ออวัยวะรองรับฟัน
3. ลักษณะและการตอบสนองของเนื้อเยื่อ ระยะเวลา และ ระยะทางที่ใช้เคลื่อนฟัน

ความปกติเมื่อฟันงอกขึ้นมาในช่องปาก รากฟันยังคงสัมผัสอยู่กับกระดูก โดยมีเนื้อเยื่อปริทันต์ทำหน้าที่รองรับแรงบดเคี้ยว การสูญเสีย Bioelastic เกิดขึ้นหลังจากฟันได้รับแรงมากกว่าปกติ จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงในเนื้อเยื่อ และกระดูกที่รองรับฟันถ้าแรงนั้นมาก

Bioelastic ประกอบด้วย Interstitial fluid ทำหน้าที่ คล้ายตัวหล่อลื่นและเนื้อเยื่อปริทันต์ซึ่งมีความต้านทานแรงสูง อย่างไรก็ตามเมื่อฟันได้รับแรงเป็นเวลานานติดต่อกัน จะทำให้เนื้อเยื่อปริทันต์ไม่อาจรับตัวได้ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อ และการไหลเวียนของโลหิต ทำให้เซลล์ตาย มีการอักเสบและฉีกขาดของเนื้อเยื่อ การเคลื่อนฟันผ่านกระดูกที่รองรับอยู่ ดังรูปที่ 46 ทำให้เนื้อเยื่อปริทันต์ถูกกดชิดกับกระดูก ถ้าใช้แรงที่มีขนาดสูง จะทำให้เนื้อเยื่อถูกกดมากในชั่วโมงแรก ผลของการใช้แรงขนาดต่างกันเป็นเวลา 7 วัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันทางด้าน Pressure side ดังรูป 46



รูปที่ 46 แสดงถึงความแตกต่างบนด้าน Pressure side เมื่อ
ใช้เครื่องมือที่มีแรงมากและใช้แรงน้อยต่อพื้นประมาณ 7 วัน

T = ฟัน

R = ทิศทางที่เกิดการละลายของกระดูก

p, P = พื้นที่ของกระดูกที่ตายแล้วภายใต้ความดันที่เกิดจาก
การใช้แรงน้อย(p) และแรงมาก(P)

Storey สรุปว่าการรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน ควรมีหลัก 2ประการ

คือ

1. ห้ามใช้แรงมาก เนื่องจากหาที่ฟันที่ใช่เป็นหลักยึดเคลื่อนที่
2. แรงขนาดต่ำและอยู่ในขอบเขตที่เนื้อเยื่อสามารถปรับตัวได้ จะ
หาที่ฟันเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ไม่สูญเสียหลักยึด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลไกในการเคลื่อนฟันเขี้ยว

(Mechanism of canine movement)

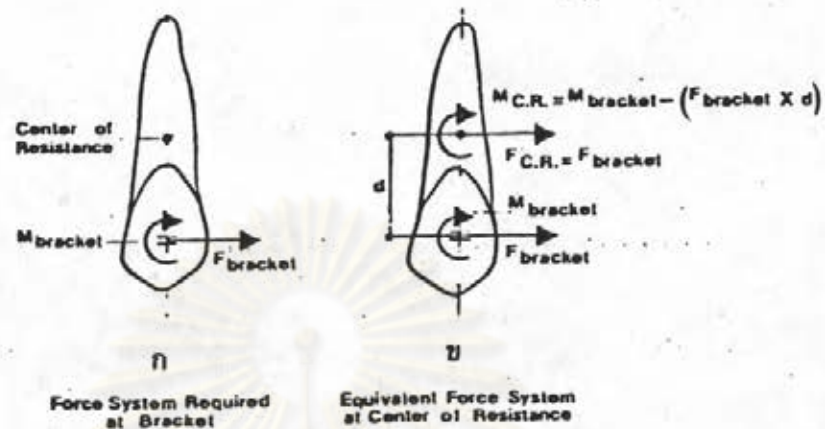
สมรศรี วิถีพร(4) ได้รวบรวมบทความเกี่ยวกับกระบวนการเคลื่อนฟันเขี้ยวไปทางด้านไกลกลาง เพื่อแทนที่ฟันกรามน้อยซี่แรกซึ่งถอนด้วยวิธีการต่าง ๆ ซึ่งทำให้ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่หึ่งซี่ฟันด้วยเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟันชนิดคิกแน่น วิทยาสัยหลักเบื้องต้นทางฟิสิกส์ในการวิเคราะห์ และออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการเคลื่อนฟัน กล่าวคือ

เมื่อมีแรงเวเดียวกระทำต่อวัตถุที่เป็นของแข็ง จะทำให้วัตถุนั้นเคลื่อนที่และหมุน แต่ถ้าแรงตั้งกล่าวผ่านจุดศูนย์กลางของความต้านทานของวัตถุจะเกิดการเคลื่อนที่หึ่งซี่ฟันเพียงอย่าง เดียว

เมื่อมีแรงควบคู่ (Couple force) มากกระทำต่อวัตถุ จะทำให้วัตถุหมุนเพียงอย่าง เดียว ไม่มีการเคลื่อนที่

เมื่อมีแรงเดี่ยว (Single force) และแรงควบคู่ (Couple force) มากกระทำต่อวัตถุพร้อมกันจะเกิดแรงลัพธ์กระทำต่อวัตถุเสมือนเพียงแรง เดียวซึ่งมีขนาดและทิศทาง เดียวกับแรง เริ่มต้น แต่กระทำในจุดที่ต่างกันออกไป

จากหลักดังกล่าว จึงนำมาใช้ออกแบบเครื่องมือจัดฟันให้มีแรง เดียว และแรงควบคู่ กระทำต่อตัวฟันในขนาดที่พอเหมาะ เพื่อให้เกิดแรงลัพธ์เพียงแรง เดียวผ่านจุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันซึ่งอยู่บริเวณรากฟัน ฟันเคลื่อนที่หึ่งซี่ฟันได้ (รูปที่ 47)



- รูปที่ 47 ก. แสดงถึง ระบบของแรงที่ระดับ แบริทเกต
 ข. แสดงถึง ระบบของแรงที่สมมูล ณ จุดศูนย์กลางความ
 ค้ำทาน

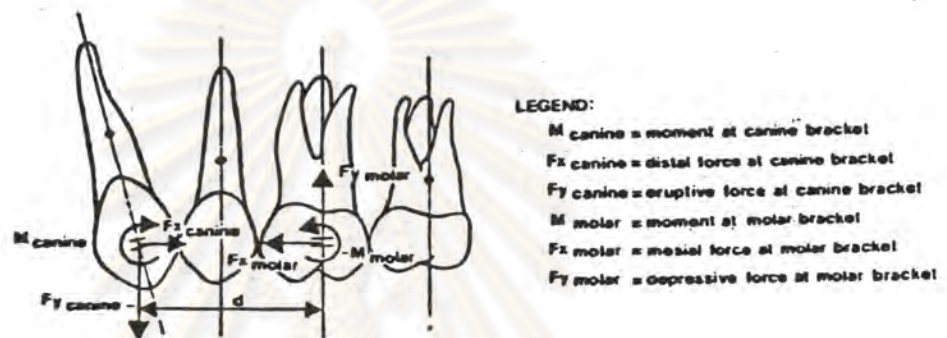
จากรูป 47 ก. ถ้ามีแรงควบคุมกระทำที่ฟันเขี้ยว ฟันจะหมุนรอบจุดศูนย์กลางของความค้ำทาน โดยตัวฟันจะเคลื่อนมาทางด้านใกล้กลาง ดังนั้นจึงต้องใช้แรงอีกแรงหนึ่ง ได้แก่ แรง F ดังรั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ดังกล่าว

รูป 47 ข. ผลของแรงควบคุมและแรง F ซึ่งดึงฟันเขี้ยวไปทางด้านหลัง คือ จุดหมุนของรากฟันที่เคลื่อนไปทางด้านใกล้กลาง จะอยู่ชิดหรือใกล้กับแบริทเกตของฟันซี่นั้น ในขณะที่เขี้ยวกันจะเกิดแรงสมมูลที่จุดศูนย์กลางความค้ำทาน มีค่า

$$\text{โมเมนต์}(M) = \text{โมเมนต์ที่ใกล้แบริทเกต} - (F \times \text{ระยะทาง } d)$$

แรงที่กระทำต่อฟันเขี้ยว จะส่งผลไปยังฟันกรามที่ใช้เป็นหลักยึดด้วย ตามหลักของนิวตันที่ว่า แรงตกเท่ากับแรงกระทบ กล่าวคือ จะเกิดแรงทำให้ฟันกรามเคลื่อนมาทางด้านหน้า ในขณะที่ฟันเขี้ยวเคลื่อนไปทางด้านหลัง ขณะเขี้ยว

กัน ตามกฎของความสมดุล (Law of Equilibrium) ถ้าแรงกระทำต่อฟัน
 เขี้ยวและฟันกรามไม่เท่ากัน จะเกิดแรง Intrusive ทางด้านที่มีริมเมนต์ต่ำ
 และแรง Extrusive ทางด้านที่มีริมเมนต์สูง ดังรูปที่ 48



รูปที่ 48 แสดงทิศทางของแรงสุทธิบนฟันเขี้ยว และฟันหลัง

กรรมวิธีในการเคลื่อนฟันเขี้ยว แบ่งเป็น 2 ประเภท

1. การเคลื่อนฟันเขี้ยวไปตาม Archwire ด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่
 - 1.1 Elastic thread
 - 1.2 A-Elastic chain module
 - 1.3 Intra หรือ Intermaxillary elastic to Kobayashi Ligatures
 - 1.4 Coil spring
 - 1.5 Universal appliance
 - 1.6 Sliding jig และ Traction
 - 1.7 Extra-oral traction (J hook head gear)
 - 1.8 Canine retraction with vertical spur

2. การเคลื่อนฟันเชื่อมด้วย Archwire

- 2.1 Section arches
- 2.2 Full archwire without banding incisors
- 2.3 Full archwire with incisor bands
- 2.4 Auxillary wire soldered onto base archwire

ขนาดของ แบริกเกต และ สลอค

Edgewise Bracket ชนิด Single หรือ Siamese bracket

ขนาด wide ใช้กับฟันเชื่อม ขนาด medium ใช้กับฟันกรามเล็กซี่ที่สอง

ขนาด สลอค .018 นิ้ว (.045 มม.) - .022 นิ้ว (.055 มม.)

ขนาด Archwire เริ่มจาก

- .014 นิ้ว (.035 มม.) ใช้กับ สลอค .018 นิ้ว
- .016 นิ้ว (.04 มม.)
- .018 นิ้ว (.045 มม.) ใช้กับ สลอค .022 นิ้ว
- .017 x .022 นิ้ว
- .020 x .025 นิ้ว

หลักทั่วไปที่ใช้ในการเคลื่อนฟันเชื่อมไปตาม Archwire

1. ปรับให้รากฟันเชื่อมมีแนวแกนเอียงไปทางด้านใกล้กลาง ก่อนการเคลื่อนฟันทั้งซี่ โดยติด แบริกเกต บริเวณฟันเชื่อมหามุมประมาณ 5 องศา ร่วมกับการใช้ Archwire ซึ่งมีขนาดเล็ก

2. ฟันเชื่อมควรยึดกับ Archwire อย่างหลวมๆ ด้วย Ligature wire เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานระหว่าง แบริกเกต กับ Archwire น้อยที่สุด ทางด้านใกล้ลิ้น ควรใช้ Elastic chain คล้องจาก Lingual cleat หรือ Button ของฟันเชื่อม ฟันกรามน้อยและฟันกรามแท้ เพื่อป้องกันการหมุนของฟัน

เชี้ยว และการโค้งงอของ Archwire

3. เพื่อป้องกันฟันกรามเคลื่อนมาด้านหน้า ควรทำ Anchorage bend ทางด้านหน้า ริมลาร์ ทิว ประมาณ 2 มม. และผูกฟันกรามน้อยติดกับ ฟันกรามด้วย Ligature wire เพื่อป้องกันฟันกรามน้อยเคลื่อนมาทางด้านหน้า

4. เพิ่มหลักยึดคดษาใช้ -Extraoral traction ที่ฟันกราม
 -Class III traction
 -Lingual หรือ Palatal arch
 (Nance holding arch)

การเคลื่อนฟันเชี้ยวคดษาใช้ Elastic thread

Elastic thread มักมีขนาด $-.025$ นิ้ว (.625 มม.)
 $-.030$ นิ้ว (.75 มม.)

แบ่งเป็น 2 ชนิด

1. Cotton covered thread ผูกบ่ง่าย และแน่นกว่า แต่เศษอาหารติดง่าย
2. Uncovered elastic thread ผูกบ่ง่าย สิ้นหลดง่าย แต่ ทาความสะอาดง่าย

การใช้

สอด Elastic thread ใต้ Archwire ผูกจากฟันเชี้ยวไปยังฟัน กรามแบบ Figure eight Archwire ควรมีความใหญ่

A-Elastic chain module

แรงเคลื่อนฟันใต้จากการคล้อง Elastic chain จาก Distal wing ของฟันเชี้ยวไปยัง Mesial wing ของฟันกรามน้อย ไม่ควรผูก Archwire แน่นเกินไป เนื่องจากอาจเกิดแรงเสียดทานทำให้ฟันเชี้ยวเคลื่อน ช้า

Intra หรือ Intermaxillary elastics to Kobayashi Ligatures
 แรงเคลื่อนที่ฟันเขี้ยวได้มาจาก Intra หรือ Intermaxillary
 elastics ขนาด 1/4 นิ้ว Light force, 1/4 นิ้ว Heavy force, 3/16
 นิ้ว Heavy force

Kobayashi ligature เป็น ligature wire ซึ่งออกแบบให้มี
 ลักษณะเป็น pig tail หรือ hook สำหรับเกี่ยวอีลาสติกโดยผูกอยู่กับฟันเขี้ยว
 ใช้ได้กับกรณีที่ต้องการให้ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่เฉพาะส่วนตัวฟันเล็กน้อยขณะเคลื่อน
 ที่ไปทางด้านกลาง แต่ต้องอาศัยความร่วมมือของผู้ป่วยในการเปลี่ยน
 อีลาสติกทุกวัน ไม่เหมาะที่จะใช้เคลื่อนฟันทั้งซี่ฟัน เพราะใช้แรงมากฟันอาจ
 หมุนได้ ดังรูปที่ 49



รูปที่ 49 แสดงลักษณะของ Intra หรือ Intermaxillary
 elastics ที่คล้องจากฟันหลักไปยังฟันเขี้ยวที่มี Kobayashi ligature

Closed Coil Spring

ขนาดของแรงที่เกิดจาก Closed Coil Spring ขึ้นกับ

1. ขนาดลวด ในกรณีที่ Lumen ของ coil spring เท่ากัน ลวดใหญ่จะให้แรงมากกว่า
2. ขนาดของ Lumen Coil spring ซึ่งหาจากลวดขนาดเดียวกัน จะให้แรงลดลงเมื่อ Lumen มีขนาดใหญ่ขึ้น
3. ชนิดของลวด

วิธีใช้

ใช้สปริงยาวประมาณ 5 มม. ร้อย Ligature wire เข้าไปใน ส่วนปลายของสปริงทั้งสองข้างประมาณ 3-4 coil สุดท้าย ผูก Ligature wire กับ แบริกเกคของฟันเขี้ยว ส่วนอีกปลายหนึ่งนำไปผูกกับ Mesial hook ของ บัคเคลิล ทิว บริเวณฟันกราม จึงลวดให้ตึงเพื่อให้ coil spring ยึดออก จะเกิดแรงดึงฟันเขี้ยวมาทางด้านหลัง ข้อดีของการใช้ coil spring คือ สามารถวัดขนาดแรงที่ใช้ได้ง่าย และฟันเขี้ยวสามารถเคลื่อนทั้งซี่ฟันไปตาม Archwire โดยที่กระชับกับสลอคของแบรคเกตได้ดี แต่ข้อเสียคือสปริงมักหลุดง่าย เนื่องจากไม่ได้รับร้อยเข้าไปใน Archwire และหาความสะอาดยาก ดังรูป ที่ 50



รูปที่ 50 แสดงลักษณะของ Closed coil spring ขณะยึดออก เพื่อใช้ในการเคลื่อนฟันเขี้ยว

Canine Retraction with vertical spur

ลักษณะของเครื่องมือประกอบด้วย Vertical spur ห่างจากลวด
เหลี่ยมขนาด 0.018 x 0.025 นิ้ว คัดปลายข้างหนึ่งไว้ตั้งเป็นตะขอสำหรับ
เกี่ยวอีลาสติคปลายข้างหนึ่งใช้ลวดกลมขนาด 0.016 นิ้ว เชื่อมขวางทางหน้า
ที่เป็น stop ดังรูปที่ 51



รูปที่ 51 แสดงลักษณะของ Vertical spur ที่ใช้คล้อง อีลาสติค
ในการดึงฟันเขี้ยว

ศูนย์วิทยุทันตวิทยา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Vertical spur นี้ใช้ร่วมกับ Canine bracket ซึ่งมี Vertical slot ขนาด .020 x .030 มม.

Distal wing ของ Canine bracket ยึดติดกับ Archwire ด้วยอีลาสติกหรือ Ligature wire ขนาด 0.010" ป้องกัน Distolingual rotation ขณะเคลื่อนฟันเชื่อมด้วย Elastic band ซึ่งคล้องจาก Mesial hook ของ บัคเคิล ทิว มายัง Hook ของ Vertical spur เปลี่ยน อีลาสติก ทุกวัน

วิธีนี้มีข้อดี คือ สามารถเคลื่อนฟันเชื่อมทั้งซี่ฟันโดยไม่มีข้อบังคับ แก้วแนวแกนของฟันในภายหลัง และการใช้ Continuous archwire ร่วมกับ จะช่วยป้องกันฟันเชื่อมหมุนและปรับระดับของฟันไปในเวลาเดียวกัน

ข้อเสีย คือ หากความสะอาดของอาจระคายเคืองต่อเหงือกถ้า Spur ยาวเกินไปและต้องอาศัยความร่วมมือของผู้ป่วยในการเปลี่ยน อีลาสติก ทุกวัน

การเคลื่อนฟันเชื่อมด้วย Archwire

หลักการเบื้องต้นของการเคลื่อนฟันเชื่อมด้วย Archwire คือ การแบ่ง Continuous archwire ออกเป็นส่วนๆ เรียกว่า Segmented arch แล้วผูกเข้ากับฟันเชื่อม เพื่อดึงไปทางด้านหลังด้วยการผูกหีบปลายลวด แบ่งเป็น

1. Sectional arches
 - Round wire sectionals
 - Edgewise sectionals
2. Full arch without Banding incisors
3. Full arch with Incisors bands
4. Auxillary wire soldered on to base archwire

Sectional arches

เป็น Archwire ซึ่งมีคจากฟันกรามและฟันกรามน้อย มายังฟันเขี้ยว ด้านเดียวกัน ประกอบด้วย Vertical loop ลักษณะต่างวกันทางด้านหลังฟันเขี้ยว

กลไกของการเคลื่อนฟันเขี้ยวด้วย Sectional arch

Burstone และ Koenig (10) กล่าวว่า Vertical loop หรือ Modified vertical loop ที่ใช้ในการเคลื่อนฟันเขี้ยว วดขไม่มีแรงเสียดทาน ควรมีลักษณะดังนี้

1. อัตรส่วนระหว่างมเเมนต์ต่อแรงสูง เพื่อให้จุดหมุนเคลื่อนไปทางปลายรากฟัน สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรากฟันได้ดีขึ้น ป้องกันมิให้รากฟันเอียงมาทางด้านใกล้กลาง องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับอัตรส่วนระหว่างมเเมนต์ต่อแรง คือ

1.1 ความสูงของ Loop อัตรส่วนระหว่างมเเมนต์ต่อแรงเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงของ Loop เพิ่มขึ้น

1.2 ความกว้างของ Loop ในแนวใกล้กลางไกลกลาง บริเวณ Gingiva อัตรส่วนระหว่างมเเมนต์ต่อแรงลดลง เมื่อระยะนี้เพิ่มขึ้น

1.3 ความกว้างของ Loop ในแนวใกล้กลางไกลกลาง บริเวณด้าน Occlusal อัตรส่วนระหว่างมเเมนต์ต่อแรงเพิ่มขึ้น เมื่อระยะนี้เพิ่มขึ้น

1.4 Helix ไม่มีผลต่ออัตรส่วนนี้

1.5 Gable bend จะช่วยลดแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟัน

2. อัตราส่วนของแรงต่อการเบี่ยงเบน (Force to deflection) F/A คือ อัตราของแรงที่ลดลงใน Retraction spring เกี่ยวข้องกับลักษณะของ Loop คือ

2.1 Vertical loop ที่ไม่มี Helix จะมีอัตราส่วนของแรงต่อการเบี่ยงเบนสูงกว่าชนิดที่มี Helix

2.2 ความกว้างของ Loop บริเวณ Gingival ที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนของแรงต่อการเบี่ยงเบนลดลง

3. Force at yield หมายถึง แรงมากที่สุดซึ่งเกิดจากสปริงที่ไม่เปลี่ยนแปลง พบว่าองค์ประกอบสำคัญที่เกี่ยวข้องกับขนาดของ Force at yield ได้แก่

3.1 ขนาดลวด สปริงที่ทอจากลวดขนาดเล็กจะให้ Force at yield สูงกว่าสปริงที่ทอจากลวดขนาดใหญ่

3.2 ความสูงของ Loop สปริงที่มี Loop สูงจะให้ Force at yield เพิ่มขึ้น

3.3 Helix ช่วยเพิ่ม Flexibility ของลวด และ Force at yield สูงขึ้นด้วย

อนึ่งสปริงซึ่งทอจากลวดที่ Flexible มาก ย่อมให้แรงค่อนข้างคงที่เป็นเวลานาน แต่ควบคุมการเคลื่อนที่ของฟันเขี้ยวได้ยากกว่า สปริงซึ่งทอจากลวดใหญ่ ซึ่งกระชับพอดีกับ Slot bracket นิยมใช้ Double coiled helix

ในกรณีที่ฟันเขี้ยวมีแนวแกนของฟันเอียงไปทางด้านในเล็กน้อยมาก ควรเริ่มต้นเคลื่อนฟันเขี้ยวด้วย Flexible spring ก่อน เมื่อฟันตั้งตรง จึงใช้สปริงซึ่ง Flexible น้อยกว่าเคลื่อนฟันต่อไป

Burstone(11) กล่าวว่าในการเคลื่อนฟันซี่ขาวด้วย Segmented arch จำเป็นต้องควบคุมองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรง เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรงที่แตกต่างกัน ทำให้ตำแหน่งจุดหมุนแตกต่างกัน ดังนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของฟันซี่ขาว จึงมีหลายวิธีขึ้นกับประสิทธิภาพของ เครื่องมือ

2. ขนาดของโมเมนต์ หรือขนาดของแรงซึ่งทำให้ฟันเคลื่อนที่เร็วที่สุด มีความเจ็บปวดและอันตรายต่อเนื้อ เยื่ออ่อนที่สุด

3. ความคงที่ของโมเมนต์หรือของแรง

เครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟันควรให้แรงที่มีขนาดเท่า เคมีตลอดการเคลื่อนที่ฟัน แต่เนื่องจากแรงที่เกิดจากสปริงจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในระหว่างที่ฟันเคลื่อนที่ไป สปริงที่ดีควรมี Force deflection rate น้อยที่สุด

Burstone แนะนำว่า ในกรณีที่ต้องการควบคุมให้หลักยึดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ควรเคลื่อนฟันซี่ขาวเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกทำให้ตัวฟันเคลื่อนที่โดยมีจุดหมุนอยู่ที่ปลายราก ระยะที่สองทำให้ปลายรากเคลื่อนที่โดยมีจุดหมุนอยู่ที่ระดับ แบริกเกต

การเคลื่อนฟันซี่ขาวในลักษณะนี้ จะรวมฟันหลังทั้งหมดให้เป็นหน่วยเดียวกัน สปริงดึงฟันซี่ขาวมาจากลวด .010 x .020 นิ้ว โดยมีส่วนประกอบดังรูปที่ 52

ศูนย์วิทยุทันตวิทยา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 52 แสดงสปริงค้ำฟันเขี้ยวออกแบบโดย Burstone

A = Tie-back Loop

B = Base arch

C = Adjustment washer

D = สปริงซึ่ง เป็นส่วนที่สามารถปรับให้มีแรง เคลื่อนฟัน
เขี้ยว

พบว่าแรงเฉลี่ย 25 กรัม จะทำให้ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่ 1 มม. การใช้แรงดึงฟันไปทางด้านหลังเพียงอย่างเดียว (Distal force) จะทำให้รากฟันเขี้ยวเคลื่อนมาทางด้านหน้า ในขณะที่ตัวฟันเคลื่อนไปทางด้านหลัง และคานไกลกลางหมุนมาทางด้านใกล้ขึ้น ป้องกันโดยทำ Antitip และ Antirotation ที่สปริง

ผลข้างเคียงของการทำ Tip-back bend เพื่อป้องกันไม่ให้ฟันหลังเคลื่อนมาทางด้านหน้า คือ ฟันเขี้ยวจะถูก Intrude ได้

สปริงที่ดีควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรงเหมาะสม เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของจุดหมุน และอัตราส่วนนี้ควรคงที่
2. เครื่องมือต้องไม่มีความเสียหาย เพื่อมิให้สูญเสียแรงขณะที่ฟันเคลื่อนไป
3. สปริงควรให้แรงที่คงอยู่นาน และสามารถวัดขนาดของแรงที่เกิดขึ้นได้
4. สปริงควรมี
 - Load-deflection rate ค่า
 - Elastic Limit (Yield point) สูง
 - Modulus of elasticity ค่า

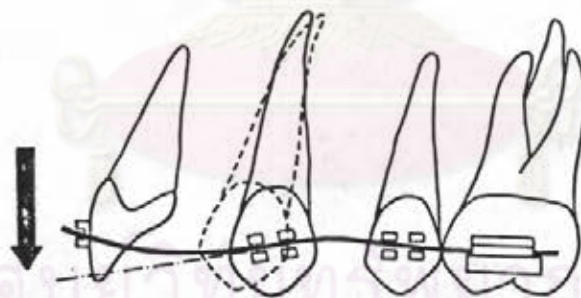
การเพิ่มความสูงและความยาวของสปริงช่วยลด Load-deflection rate ขณะเดียวกัน Helix จะช่วยการลด Residual stress ในลวดตลอดจนลด Load-deflection rate และ Permanent deformation

Gjessing(19) ศึกษาและออกแบบสปริงสำหรับดึงฟันเขี้ยวแบบใหม่ โดยอาศัยหลักทางกลชีวภาพ (Biomechanical) ร่วมกับการประเมินผลทางคลินิก สำหรับรายที่มีการถอนฟันเพื่อจัดฟันซึ่งจำเป็นต้องกำหนดขนาดของแรงและอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรงไว้คงที่เพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่เฉพาะส่วน

ตัวฟันและการหมุน และกล่าวถึงปฏิกิริยาของแรงควบคุมที่มีต่อหลักยึดว่า ควรอยู่ในระดับที่ไม่ทำให้ฟันเคลื่อนไปในตำแหน่งที่ไม่ต้องการ หรือมีระดับของระนาบคดเคี้ยวเปลี่ยนแปลงไป วิชาใช้ลวด 0.016 x 0.022 นิ้ว ทำเป็นสปริงซึ่งมี Vertical loop สูงประมาณ 10 มม. กำหนด Load-deflection และ อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสปริง พบว่าเมื่อ Load-deflection = 45 กรัม/มม. ของการกระตุ้นทำให้เกิด Antitip ซึ่งได้จากอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรง ประมาณ 11:1 และ Antirotation: อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรง ประมาณ 7:1

Gjessing พบว่าการใช้สปริง หรือยางค้ำฟันเชื่อมร่วมกับ Continuous arch wire ทำให้เกิดผลข้างเคียงดังนี้

1. Arch wire ที่มี Load-deflection ค่าจะเสียรูปได้ง่ายทำให้เคลื่อนเฉพาะส่วนตัวฟัน ความคุมตำแหน่งของฟันในแนวตั้งได้ยาก ฟันหน้ามักเกิด Extrusion ในขณะที่ฟันหลังเคลื่อนมาทางด้านหน้าได้ง่าย ดังรูปที่ 53

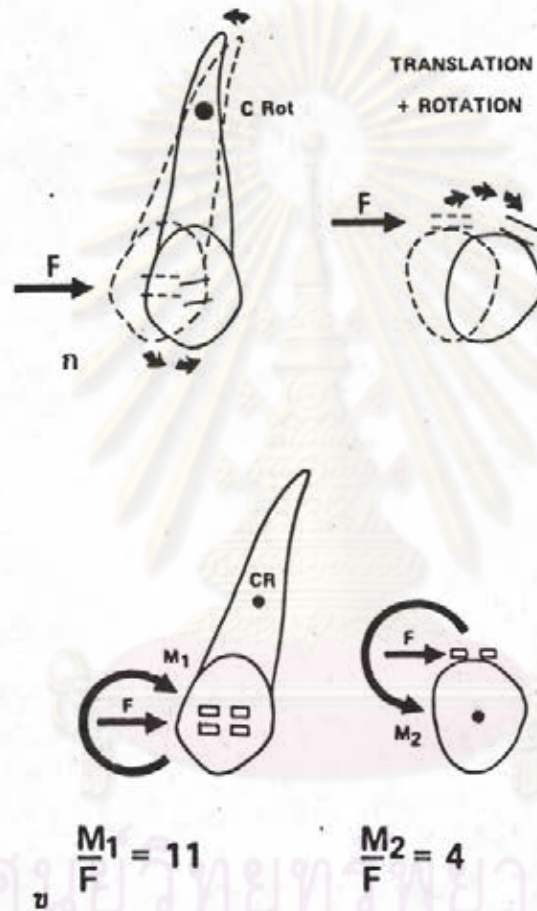


รูปที่ 53 แสดงผลข้างเคียงจากการเคลื่อนฟันเชื่อมไปตาม Archwire

2. Archwire ที่แข็งเกินไปอาจทำให้ฟันเชื่อมไม่เคลื่อนที่ และสูญเสียหลักยึดเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีความเสียดทานมาก

จุดมุ่งหมายของการศึกษานี้ที่ใช้คิงฟันเขียว คือ

1. ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ โดยมีค่า Antitip ซึ่งได้จากอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงประมาณ 11:1 และมีค่า Antirotation ซึ่งได้จากอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง 4:1 ดังรูปที่ 54



รูปที่ 54 ก แสดงผลของแรงในแนวระนาบ เมื่อมีแรงเดียวกระทำต่อฟันเขียว จะทำให้ฟันเขียวเคลื่อนที่ทั้งซีฟัน ร่วมกับการหมุน

ข แสดงถึงการทำให้ Antitip โดยมี $M_1/F = 11$ และ Antirotation โดยมี $M_2/F = 4$ จะทำให้ฟันเขียวสามารถเคลื่อนที่ทั้งซีฟันได้

2. ทำให้สปริงมี Load- deflection ค่า ทลอคการใช้แรงดึง ระหว่าง 50-200 กรัม

3. ป้องกันไม่ให้เกิดผลข้างเคียงเนื่องจากการทำ Antitip และ Antirotation ระหว่างคั้งฟัน

4. สามารถใช้กับ Edgewise bracket ที่มี สลอค ขนาด 0.018 นิ้ว และ 0.022 นิ้ว

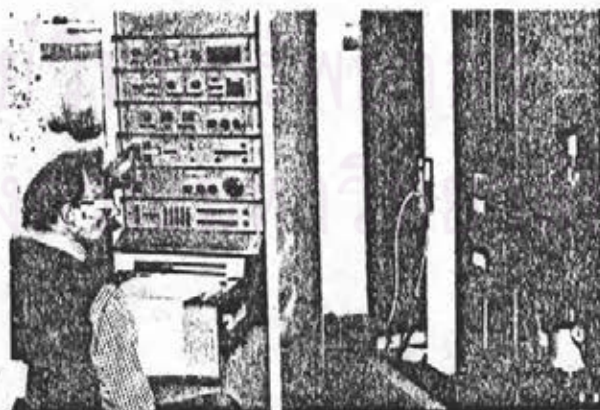
ระบบของแรงกำหนดจาก พารามิเตอร์ 2 ตัวคือ

1. ขนาดของแรง

2. อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรง โดยวัดเป็นหน่วยแรงคั้ง (Tension) ต่อ ตาราง มม. ของเนื้อเยื่อปริทันต์

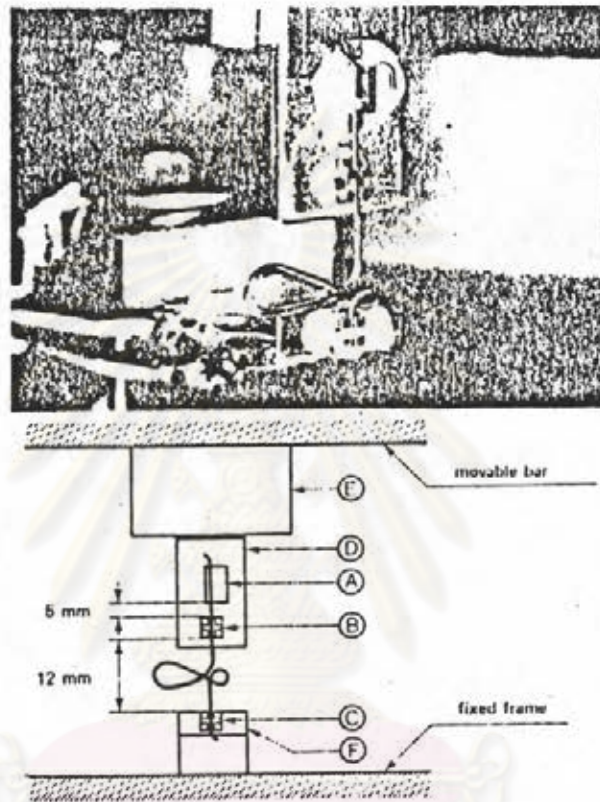
และได้อ้างถึงบทความของ Nikoli(27) เกี่ยวกับแรงทางทันตกรรม จัดฟันที่เหมาะสมซึ่งทำให้เกิดการตอบสนองทางชีวภาพสูงที่สุด และเนื้อเยื่อเป็น อันตรายน้อยที่สุด โดยศึกษาจากอัตราส่วนของแรงและระยะทาง เมื่อการกระตุ้น สปริงสิ้นสุดลง

อัตราส่วนนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด ขนาดและความยาวของลวด รวมทั้ง ลักษณะของ Loop



รูปที่ 55 แสดงเครื่องมือ ซึ่งใช้ศึกษาอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรงที่เกิดจากการใช้ Retraction springs

สำหรับการวัด ไขมันต์ ที่เกิดบนสปริงวัดที่ฟันเขี้ยวและฟันกรามน้อย
ที่ต้องการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 56



รูปที่ 56 แสดงเครื่องมือที่ใช้ทดสอบความสัมพันธ์ของ Antitip
กับอัตราส่วนระหว่างไขมันต์ค่อแรง ใดๆ

A = บัคเคิล ทิว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.016 x 0.022 นิ้ว

B, C = แบริกเกต ของฟันกรามน้อย และฟันเขี้ยวตามลำดับ ติดบัคเคิล
ทิว และแบริกเกต ของฟันกรามน้อยบนฐานซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ
Load cell

E = Load cell ซึ่งจะบันทึกแรงสุทธิ ใดๆ เน้นที่ไขมันต์

F = Moment transducer ทาหน้าที่บันทึกขนาดของแรงควบคู่ คือ แอลฟาและเบต้า โมเมนต์ โดยสัญญาณของแรงจะถูกขยายผ่าน Instron load cell amplifier (2-1,000 Newton) และสัญญาณของโมเมนต์ จะถูกขยายผ่าน Instron strain data module (2.6 - 134 Newton mm.) และตำแหน่งของสปริงค้ำรูปที่ 56 จะถูกบันทึกความสัมพันธ์ของ Antitip ซึ่งได้จากอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง ส่วนความสัมพันธ์ของ Antirotaion ซึ่งได้จากอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง ถูกบันทึกโดยจัดตำแหน่งสปริงให้ห้ามุมฉากกับตำแหน่งเดิมนี้

ส่วน Beta moment วัดที่ฟันกรามน้อยซี่ที่สอง และบันทึกโดยการนำ Moment transducer (F) วางในตำแหน่ง Bracket B และนำ Load cell มาวางในตำแหน่ง Bracket C เมื่อทำการกระตุ้นสปริงจะบันทึกความละเอียดได้ 0.01 มม. สปริงถูกทำให้เคลื่อนที่โดย F และ E เคลื่อนออกจากกัน หลังจากกระตุ้นแล้ว ก่อนอ่านค่าของแรงและโมเมนต์ กำจัด Friction ระหว่างส่วนของสปริง โดยการใช้ Slight tapping ในทางปฏิบัติเมื่อนำเบรชกับผู้ป่วย Friction เหล่านี้ ถูกกำจัดโดยการทำงานของ Perioral musculature

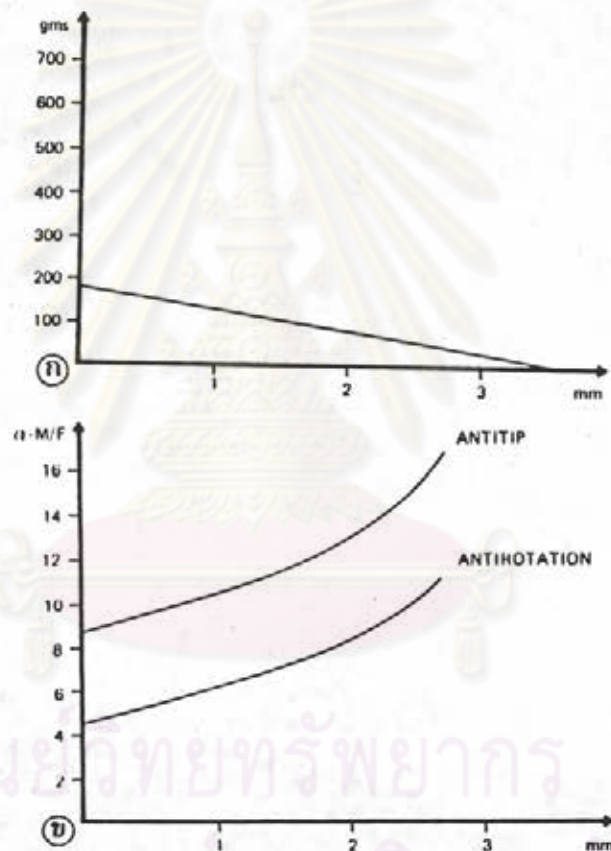
เครื่องมือชนิดนี้ สามารถใช้ทดสอบสปริงต่าง ๆ ที่ทำขึ้นจากวัสดุต่าง ๆ กัน และรูปร่าง Loop ต่าง ๆ กัน โดยสรุปในคอนทายเป็น

1. Moment to force ratio มีค่าสูงเมื่อ
 - เพิ่มความสูงของ Loop ทาง Occlusogingival
 - ลดขนาดความกว้างของ Occlusal ทางแนวระนาบ
 - เพิ่มขนาดทาง Gingival ในแนวระนาบ
 - ตั้งจุดศูนย์กลางของ Loop ไว้ที่ฟันเขี้ยว
 - ทาเกเบอร์ แองเกิล

2. การใช้สปริง Sectional Spring ต้องมี

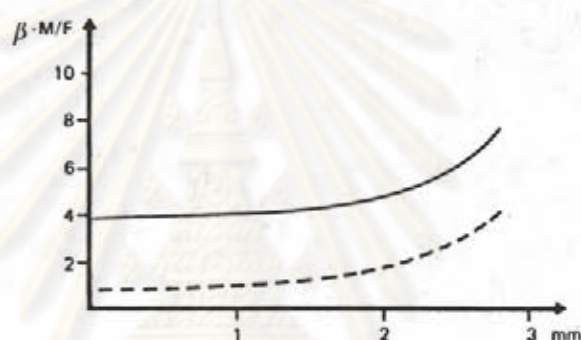
Load-deflection ค่า เพื่อป้องกันอันตรายต่อเนื้อเยื่อปริทันต์จากแรงดึง ตลอดช่วงเวลาของการดึงฟันเขียวให้เคลื่อนที่ไป และ Moment to force จะต้องสูงพอที่จะป้องกัน ทิปบิง และ การหมุน ของฟันจากการดึง

อธิบายค่าของ Load-deflection, Alpha moment to force และ Beta moment to force ratio ดังรูปที่ 57 ก, ข และรูปที่ 58



รูปที่ 57 ก กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ของ Load-deflection หรือ F/Δ ของสปริง บอกให้ทราบว่าเมื่อการกระตุ้นสปริงสิ้นสุดลง แรงที่ได้จากสปริงจะลดลงเป็นแบบ Decay curve

ข แสดงถึงคุณสมบัติของสปริงเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของ Alpha-moment to force ต่อระยะทางหลังจากการกระตุ้นสิ้นสุดลง (deactivation) ซึ่งพบว่า ภายใน 4 สัปดาห์ของการรักษา แรงที่เกิดจากสปริงจะลดลง (จาก 190 กรัม เหลือ 90 กรัม) เมื่อระยะทางของการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนของ Antitip ซึ่งได้จาก moment to force ratio จะเพิ่มขึ้น (จาก 10 เป็น 12.5)



รูปที่ 58 กราฟแสดงถึง Beta moment to force ซึ่งวัดในแนว Saggital ที่พินกรามน้อยที่เป็นหลักยึดต่อระยะทางหลังจากการกระตุ้นสิ้นสุดลง

เส้นประ แสดงถึง ผล Moment to force ratio เพิ่มขึ้น และขณะเดียวกัน Moment จะถูกส่งผ่านจากพินกรามน้อย ไปยังพินกรามด้วยมือขวาของสปริงทางด้านไกลกลางทำเป็น Sweep curve

ชนิดของ Sectional arch

1. Round sectional arch

ขนาด 0.015 นิ้ว หรือ 0.016 นิ้ว สำหรับ สลอค 0.018 นิ้ว
0.018 นิ้ว หรือ 0.020 นิ้ว สำหรับ สลอค 0.022 นิ้ว

เมื่อใช้ลวดกลม ควรมี stop อยู่ทางด้านหน้าค่อ แบริกเกต ของฟันเขี้ยว เพื่อ
ให้มีจุดสัมผัสกับตัวฟัน 2 จุด ป้องกันลวดหมุน

2. Edgewise sectional arch

ขนาด 0.016 นิ้ว x 0.016 นิ้ว สำหรับ สลอค 0.018 นิ้ว
0.017 นิ้ว x 0.022 นิ้ว สำหรับ สลอค 0.018 นิ้ว

การใช้ลวดเหลี่ยมทำ Sectional arch ไม่จำเป็นต้องทำ stop ด้านหน้าฟัน
เขี้ยว เพื่อป้องกันการหมุนเพราะลวดเหลี่ยมกระชับพอดีกับสลอคของ แบริกเกต
มากกว่าลวดกลม จึงควบคุมการเคลื่อนฟันเขี้ยวได้ทุกทิศทาง ลวดที่ใส่ควรวาง
อยู่ใน แบริกเกตของฟันกรามน้อยหรือขาไม่มีแรงกระทำต่อฟันซี่นี้ ขณะตั้งฟันเขี้ยว
ให้ผูกฟันกรามน้อยกับฟันกรามเป็นหน่วยเดียวกันด้วย Ligature wire

Chaconas, Caputo และ Hayashi(13) เสนอแนะว่าองค์ประกอบ
ที่มีผลต่อแรงที่ใช้ในการกระตุ้นสปริง ได้แก่

1. ขนาดของลวด
2. ลักษณะของสปริงคัตเป็น Loop ต่างๆ
3. เกเบอ์ แองเกิล
4. ขนาดและชนิดของ แบริกเกต

โฆษณาลวดชนิด Unheat-treated blue elgiloy ขนาด

0.016 นิ้ว x 0.016 นิ้ว

0.016 นิ้ว x 0.022 นิ้ว

0.017 นิ้ว x 0.022 นิ้ว

0.017 นิ้ว x 0.025 นิ้ว

มาตรฐานเป็นสปริง 4 ลักษณะ คือ

1. Squash loop
2. Closed vertical loop
3. Closed vertical loop with helix
4. Double closed vertical loop with double helix

ซึ่งใช้เฉพาะลวด 0.016 นิ้ว x 0.016 นิ้ว

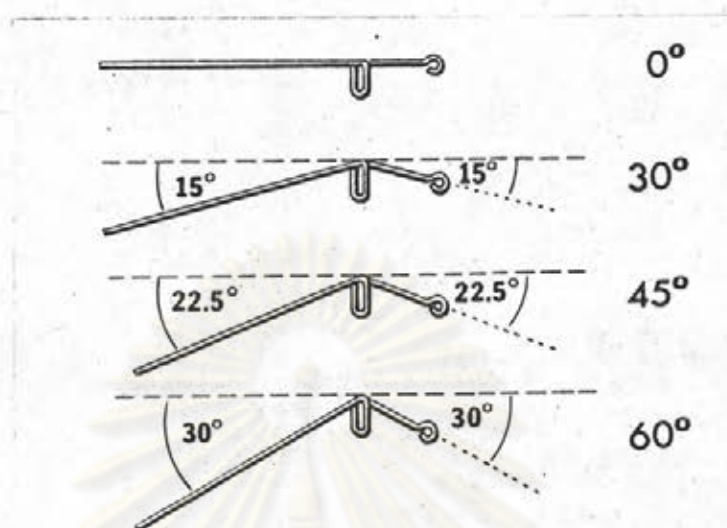
ดังตารางรูปที่ 2

Table 2 Canine-retraction sections

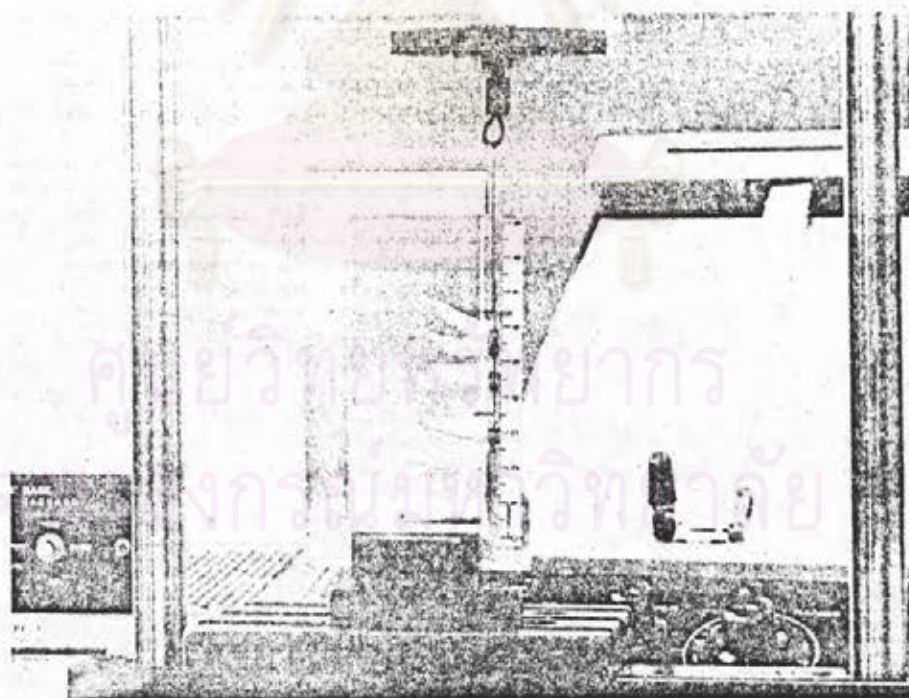
WIRE SIZE	SQUASHED LOOP	CLOSED VERT LOOP	CLOSED VERT LOOP with HELIX	CLOSED LOOP DOUBLE HELIX
.016 x .016	*	*	*	*
.016 x .022	*	*	*	▲
.017 x .022	*	*	*	▲
.017 x .025	*	*	*	▲
GABLE ANGLE				
0°	*	*	*	*
30°	*	*	*	*
45°	▲	▲	*	*
60°	*	*	*	*

* Tested ▲ Not Tested

ตารางรูปที่ 2 แสดงถึงขนาดของลวดลักษณะของสปริง และขนาดของ เกเบอ์ แองเกิล



รูปที่ 59 แสดงขนาดของ Gable angle ในสปริงชนิด Closed vertical loop



รูปที่ 60 แสดง เครื่องมือที่ใช้ทดสอบสปริงแบบต่างๆ



ผลการทดลองพบว่า

-Squash loop ใช้แรงในการกระตุ้นมากที่สุด รองลงมาได้แก่ Closed vertical loop และ Closed vertical loop with helix ในขณะที่ Double close loop with helix ใช้แรงน้อยที่สุด

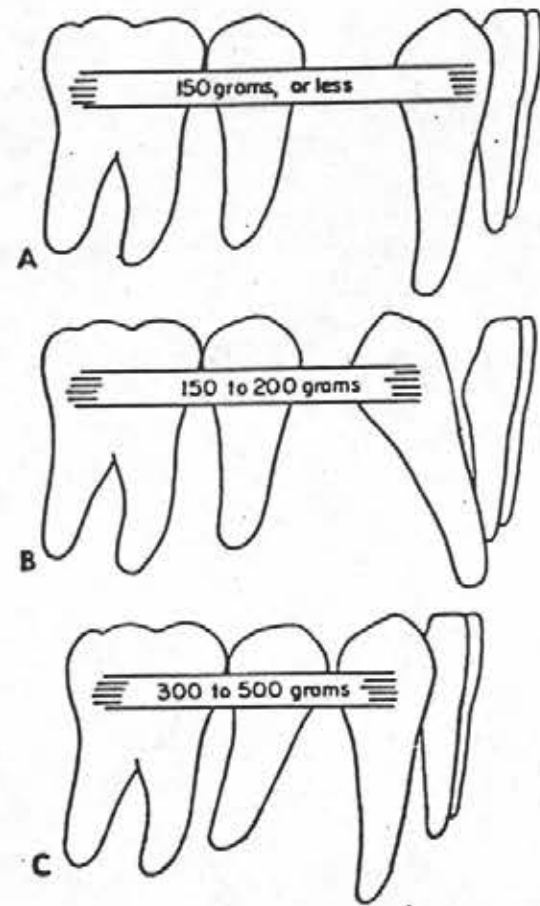
-ผลของเกเบอร์ แองเกิล พบว่า Squash loop และ Double helix spring ใช้แรงเพิ่มขึ้น เมื่อมุมเพิ่มขึ้น Closed vertical loop ใช้แรงลดลงเมื่อมุมเพิ่มขึ้น Closed vertical loop with helix มีผลเพิ่มขึ้นน้อยมากจนถึงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อมุมเพิ่มขึ้น

-ผลของขนาดลวด พบว่าเมื่อใช้ลวดขนาดเท่ากัน Closed vertical loop จะต้องใช้ขนาดของแรงเพิ่มขึ้น

แรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันเขี้ยว

Storey และ Smith(34) กล่าวว่าแรงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟันเขี้ยวล่างได้เร็วที่สุด มีอันตรายน้อยต่อฟันและอวัยวะรองรับฟันน้อยที่สุด มีค่าประมาณ 150-200 กรัม ถ้าใช้แรงมากกว่านี้ฟันเขี้ยวจะเคลื่อนที่ช้าลงและถ้าแรงมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 300-500 กรัม จะทำให้ฟันกรามเคลื่อนมาด้านหน้า ในขณะที่ฟันเขี้ยวคงอยู่ในตำแหน่งเดิม ดังรูป 61

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 61 แสดงผลของแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันเขี้ยว

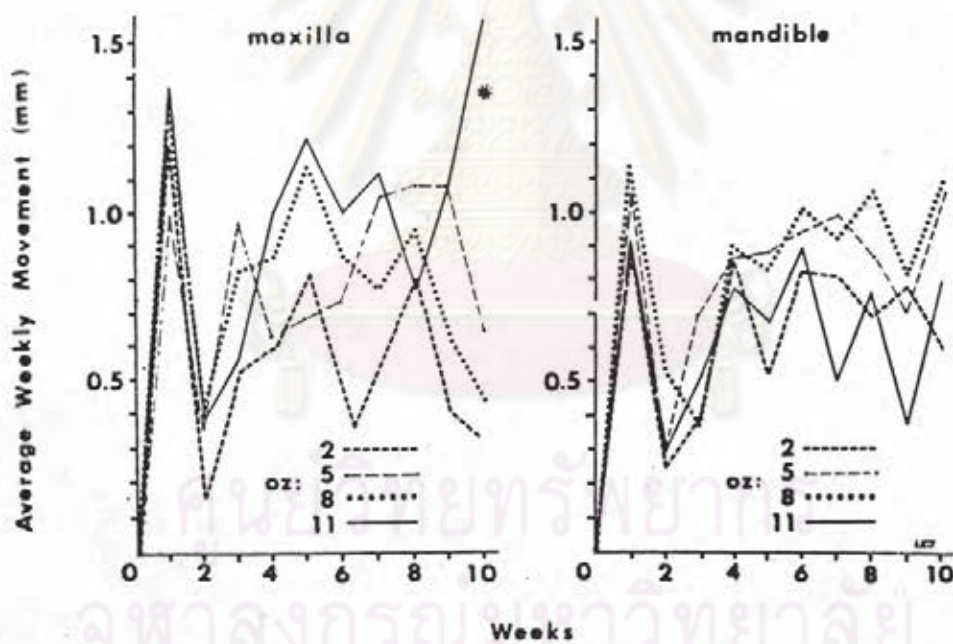


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขนาดของแรงที่ใช้เป็นสัดส่วนกับเนื้อที่ของฉีกรากฟัน การใช้แรงมากเกินไป ทำให้เกิด Undermine resorption ทางด้านที่ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่ไป เนื่องจากเนื้อเยื่อปริทันต์ถูกบีบให้ชิดกับกระดูกรองรับฟันจนเส้นเลือดฝอยขาด ฟันเขี้ยวจะไม่เคลื่อนที่จนกว่าร่างกาย จะกำจัด Necrotic tissue ใต้หมุดและสร้าง Living tissue ขึ้นมาใหม่ ดังนั้นการใช้แรงมากเกินไปทำให้ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่แบบ Intermittant

Reitan (30) เน้นว่าแรงที่ใช้เคลื่อนฟันเขี้ยวหึ่งซี่ฟันไม่ว่าในระยะใดก็ตามไม่ควรเกิน 250 กรัม

Boester และ Johnston (7) ทดสอบอัตราการเคลื่อนที่ของฟันเขี้ยว เมื่อใช้แรงขนาดต่างกัน ดังรูปที่ 62



รูปที่ 62 กราฟแสดงอัตราการเคลื่อนที่ของฟันเขี้ยว เมื่อใช้รับแรงขนาดต่างกัน

พบว่า Initial phase ฟันเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว

แรง 2 ออนซ์ ทำให้ฟันเคลื่อนที่น้อยกว่าแรง 5, 8, และ 11 ออนซ์

แรง 5, 8, 11 ออนซ์ ทำให้ฟันเคลื่อนที่เท่ากัน

แรง 2-11 ออนซ์ ไม่ทำให้หลักยึดเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของฟันเขี้ยว จากการใช้แรงขนาดต่างวามีลักษณะเหมือนกัน คือ 2 อาทิตย์แรกที่ได้รับแรง ฟันจะเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการเคลื่อนที่จะลดลงจนกว่าจะได้รับแรงใหม่

Nikolai(27) กล่าวว่า ขนาดของแรงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟันเขี้ยว ขึ้นกับ

1. รูปร่างลักษณะ และขนาดของรากฟัน
2. ชนิดของการเคลื่อนฟัน
3. ระยะเวลาในการเคลื่อน
4. การตอบสนองของเนื้อเยื่อ

แรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันเขี้ยว แบ่งเป็น 2 ชนิด

1. Concentrated force เป็นแรงที่ให้กับตัวฟัน ณ ตำแหน่งของ แบริกเกต

2. Distributed force เป็นแรงที่กระจายไปทั่วเนื้อเยื่อปริทันต์ที่มีอยู่ตลอดความยาวของรากฟัน

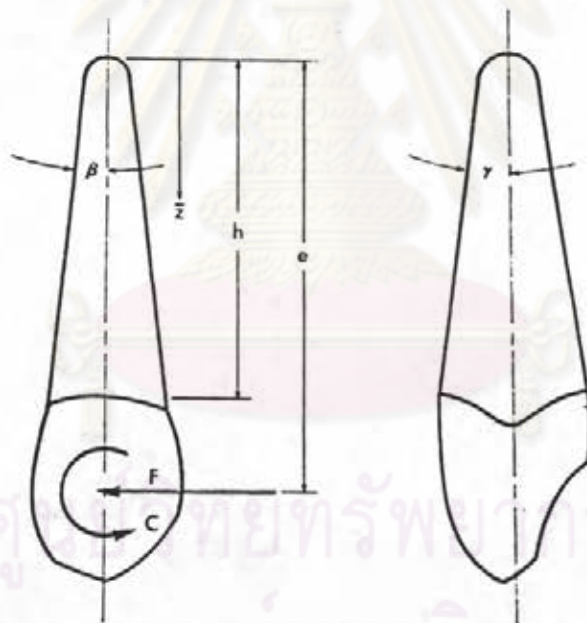
ความเข้มของแรงในลักษณะนี้ เรียกว่า Stress มีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ และ Pressure หรือ Compressive stress จะเป็นความเข้มที่เกิดจากแรงอัด และ Tensile force เป็นความเข้มของแรงที่เกิดจากแรงดึง ซึ่งมักเกิดขึ้นพร้อมกัน

การกระตุ้นฟันเขี้ยวให้เคลื่อนที่ไม่ว่าจะใช้วิธีใดก็ตาม เครื่องมือส่วนใหญ่จะสัมผัสกับตัวฟันด้านใกล้แก้ม ในลักษณะที่ทำให้เกิด

1. การเคลื่อนเฉพาะส่วนตัวฟันเพราะจุดศูนย์กลางความต้านทานของฟันอยู่ค่อนข้างไปทางปลายราก เมื่อเทียบกับทิศทางของแรงที่ใช้เคลื่อนฟัน
2. ฟันเขี้ยวมักเคลื่อนในลักษณะ Disto-lingual เนื่องจากเกิดโมเมนต์รอบแนวแกนฟัน

การผูก Ligature wire ที่ Distal wing ของ แบริกเกตหรือที่ Lingual button จะทำให้เกิดโมเมนต์ที่ต่อต้านการหมุนนี้ไว้ได้

นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึง ความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้เคลื่อนฟันเขี้ยว และรูปร่างทางเรขาคณิตของฟันเขี้ยวใน 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 63



รูปที่ 63 รูปร่างของฟันเขี้ยวทางด้านริมฝีปาก และด้านใกล้กลาง และแรงที่กระทำกับฟันเขี้ยว ประกอบด้วย แรงควบคู่ และแรงเคี้ยว

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันไปทางด้านใกล้กลาง

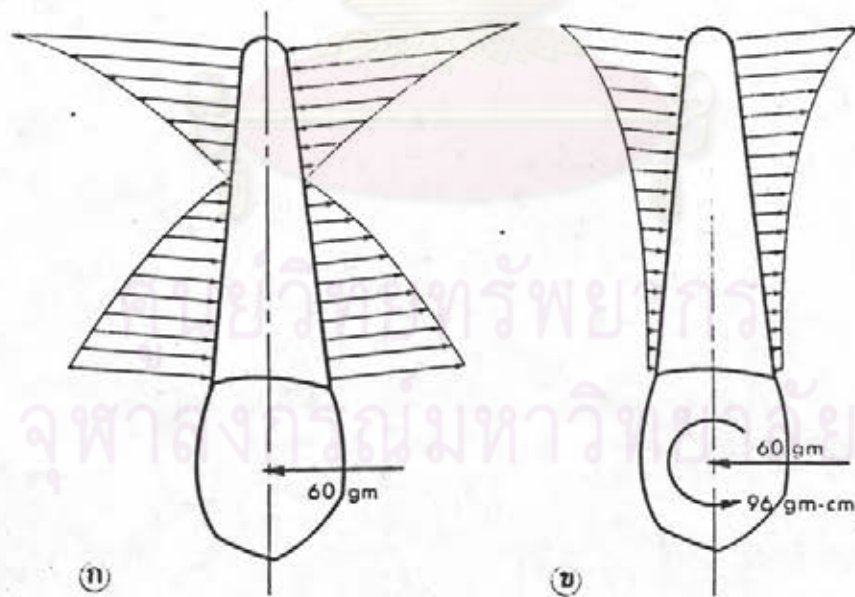
C คือ แรงควบคู่ซึ่งกระทำเพื่อต้านต่อการเคลื่อนเฉพาะส่วนตัวฟัน

h คือ ความยาวของฟัน

- ๐ คือ ระยะแบรคเกตถึงปลายรากฟัน
- ๒ คือ ระยะจากปลายรากฟัน ถึง จุดหมุน วัดตามแนวแกนฟัน
คือ ความกว้างของตัวฟันวัดจากผิวฟันด้านริมฝีปากมายังแนวแกนฟัน
- คือ ความกว้างของตัวฟันวัดจากผิวฟันด้านโกลกลางมายังแนวแกนฟัน

แรงที่กระทำต่อฟันเขี้ยว กระจายไปยัง เนื้อเยื่อปริทันต์ทั้งทางด้านโกลกลางและด้านไกลกลาง ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบของแรงที่เกิดขึ้นจะพิจารณาในลักษณะของ Couple-force ratios การกระจายของความเค้น และตำแหน่งของจุดหมุน เมื่อมีการเคลื่อนที่ของฟันเขี้ยวเท่านั้น

Nikolai กล่าวว่า การใช้แรง 60 กรัม ในการเคลื่อนฟันไปทางด้านไกลกลางแบบ Simple tipping จะทำให้เกิดระบบของแรงตอบสนอง ดังรูปที่ 64



รูปที่ 64 เปรียบเทียบการกระจายของแรงซึ่งทำให้ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่ Simple Tipping และ เคลื่อนทั้งซี่ฟัน

ก. ลักษณะการกระจายของแรงชนิด Simple tipping การตอบสนองต่อแรงจะเป็นลักษณะของการกระจายแรงจากเนื้อเยื่อปริทัศน์ตามแนวของราก และเป็นแรงขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้ามกันซึ่งจะถูกส่งผ่านจากเนื้อเยื่อปริทัศน์ไปยังกระดูกต่อไป

ข. แสดงถึงแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่หิ้งซี่ฟัน พบว่าการกระจายของ Reactive stress ไม่มีแบบแผนที่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะความเสียหายของปลายราก แต่จะทำให้ตัวฟันและรากฟันเคลื่อนที่เท่าเทียมกัน เมื่อจัด Moment to force ratio ให้เหมาะสม

โดยอาศัยทฤษฎี Optimum force สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของฟันได้ดังนี้

1. สำหรับฟันรากเดี่ยว ซึ่งเคลื่อนที่แบบ Simple tipping จะมีจุดหมุนอยู่ที่ระยะ $3/10$ หรือ $4/10$ ของระยะจากปลายรากมายัง อะวีโวลาร์เครส ส่วนจุดศูนย์กลางความต้านทานอยู่ที่กึ่งกลางของรากฟัน
2. ถ้าจุดศูนย์กลางของการหมุนเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากที่กล่าวแล้วในข้อที่ 1 ไปยังปลายราก พบว่าแรงจากเครื่องมือที่จะใช้ในการทำให้ตัวฟันเคลื่อนที่ จะน้อยกว่าที่ใช้ในการเคลื่อนที่หิ้งซี่ฟัน
3. ความเค้นเฉื่อยที่เกิดขึ้นในส่วนของเนื้อเยื่อปริทัศน์ ใช้แสดงขนาดของแรงที่เกิดจากฟันรากเดี่ยวหรือฟันหลายราก ซึ่งมีพื้นที่ผิวของรากต่างกัน
4. ระดับของความเค้นในเนื้อเยื่อปริทัศน์ โดยเฉพาะที่ปลายรากและ อะวีโวลาร์เครส จะเป็นตัวบอกขนาดของแรงที่ใช้กับตัวฟัน และจากการทดลองพบว่า แรงที่เหมาะสมสำหรับทำให้ฟันเขี้ยวบนเคลื่อนที่หิ้งซี่ฟัน ประมาณ 210 กรัม ส่วนแรงประมาณ 365 กรัม ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เฉพาะส่วนตัวฟัน
5. การควบคุมการเคลื่อนที่ของรากฟัน ขึ้นกับเครื่องมือแต่ละชนิด