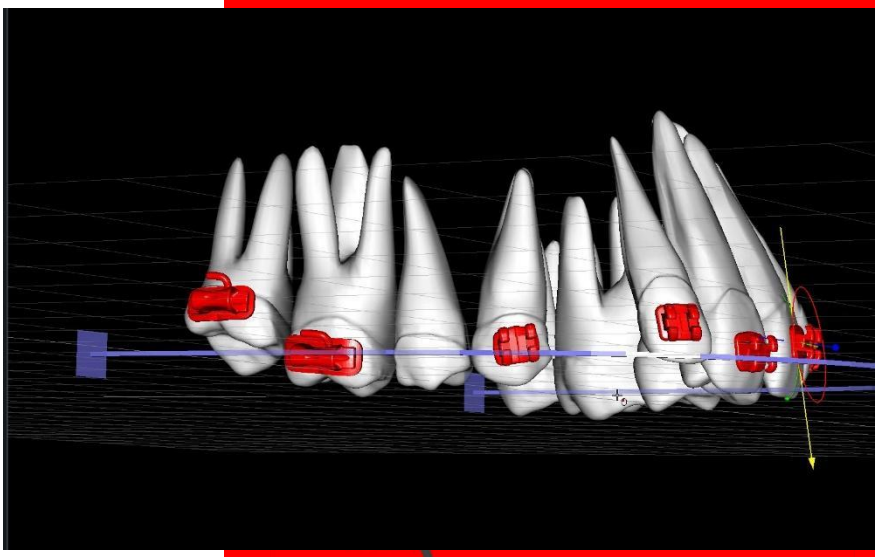
กลศาสตร์พื้นฐานในงานทางทันตกรรมจัดฟัน



Dr. Jean-Marc Retrouvey

Dr.Katherine Kousaie

แปลโดย

ทพญ.นันทินี นันทวณิชย์ แสงไฟ

(Dr. Nuntinee Nunthavanich Saengfai)

ทพ. พงศธร พู่ทองคำ

(Dr. Pongstorn Putongkam)

ทพญ. ยอดหทัย สาตราวาหะ

(Dr. Yodhathai Satravaha)

IFDE

INTERNATIONAL FOUNDATION FOR DENTAL EDUCATION

กลศาสตร์พื้นฐานในงานทางทันตกรรมจัดฟัน

Dr. Jean-Marc Retrouvey

Dr. Katherine Kousaie

แปลโดย

ทพญ. นันทินี นันทวณิชย์ แสงไฟ (Dr. Nuntinee Nanthavanich Saengfai)

ทพ. พงศธร พู่ทองคำ (Dr. Pongstorn Putongkam)

ทพญ. ยอดหทัย สาตราวาหะ (Dr. Yodhathai Satravaha)

1 สารบัญ

2 บทนำ 3

3 กลศาสตร์พื้นฐาน 3

3.1 กฎการเคลื่อนที่สามข้อของนิวตัน 3

3.1.1 กฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตันหรือกฎของความเฉื่อย 4

3.1.2 กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันหรือกฎของความเร่ง 4

3.1.3 กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สามของนิวตัน 4

4 แนวคิดของแรง 5

4.1 แรง 5

4.1.1 นิยาม 5

4.1.2 ตำแหน่งที่แรงมากระทำ 5

4.1.3 แนวแรงกระทำที่มีขนาดและทิศทาง 6

4.1.4 กฎการส่งผ่านของแรง 6

4.1.5 ตำแหน่งที่แรงกระทำ 7

4.1.6 จุดศูนย์กลางมวล 7

5 จุดศูนย์กลางความต้านทาน 9

5.1 การเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางของความต้านทานมีความสัมพันธ์กับเนื้อเยื่อปริทันต์ที่รองรับ 10

5.1.1 จุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันรากเดี่ยว 10

5.1.2 จุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันหลายซี่ 12

5.1.3 การรวมกันของแรง ผลรวมของแรงหรือแรงสุทธิ 13

6 ศูนย์กลางของจุดหมุน 14

6.1.1 แผนภาพวัตถุอิสระ 15

7 การเคลื่อนฟัน 15

7.1 การเคลื่อนฟันแบบเลื่อนขนาน 16

7.2 การเคลื่อนที่แบบหมุนที่ปราศจากการเลื่อนขนาน 16

7.3 การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียง 16

7.3.1 การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้ 17

7.3.2 การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้....17
7.3.3 การเคลื่อนที่ของรากฟัน....18
7.3.4 การเคลื่อนที่แบบกดลง และการดึงออกของฟัน.... 18
8 ระบบแรง.... 19
8.1 โมเมนต์.... 19
8.2 แรงคู่ควบ.... 20
8.3 อัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง.... 21
8.4 การเคลื่อนที่เมื่อแรงและระบบของแรงเปลี่ยนไป.... 23
8.5 ระบบแรงเทียบเท่า.... 27
9 หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟัน.... 29
9.1 การนำไปใช้.... 31
9.1.1 การดึงฟันเขี้ยว.... 31
9.1.2 การเคลื่อนที่แบบดึงออกเพื่อเพิ่มความยาวของตัวฟัน.... 31

2. บทนำ (Introduction)

ทันตกรรมจัดฟันอาศัยหลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนของวัตถุในอากาศ แต่ในการเคลื่อนฟันทางทันตกรรมจัดฟันนั้นเป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุในช่องปากและมีความซับซ้อนของระบบแรงมากกว่าการให้แรงอย่างง่ายที่สามารถคาดการณ์ได้ ชีวกลศาสตร์จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญทางทันตกรรมจัดฟันและเป็นการศึกษาสมดุลสถิต (Static equilibrium) และผลของแรงต่อระบบชีวภาพ หนังสือเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้ความรู้ทางชีวกลศาสตร์ทางทันตกรรมจัดฟันและนำความรู้ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ทางคลินิก

3. กลศาสตร์พื้นฐาน (Basic mechanics)

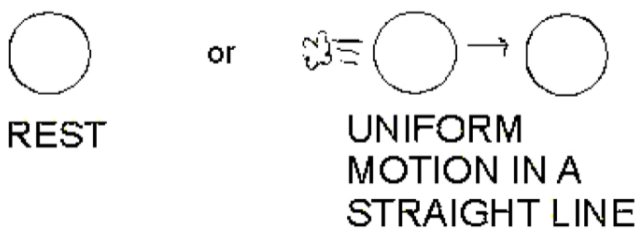
ความรู้พื้นฐานทางทฤษฎีทางฟิสิกส์นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งก่อนที่จะศึกษาเกี่ยวกับชีวกลศาสตร์ทางทันตกรรมจัดฟันเพื่อนำไปปรับใช้ในผู้ป่วย ในทางทันตกรรมจัดฟันได้นำกฎของนิวตันทั้งสามข้อมาใช้ในการอธิบายผลของแรงที่มีต่อวัตถุ

3.1 กฎการเคลื่อนที่สามข้อของนิวตัน

กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันอธิบายถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุเมื่อได้รับแรงกระทำ กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่สองและสามมีความสำคัญในทางทันตกรรมจัดฟันเป็นอย่างยิ่ง

3.1.1 กฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตันหรือกฎของความเฉื่อย

ในสภาวะที่ไม่มีแรงเสียดทาน วัตถุจะรักษาสภาวะอยู่นิ่งหรือสภาวะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอในแนวเส้นตรงจนกว่าจะมีแรงมากระทำที่วัตถุนั้น กฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตันนำมาใช้อธิบายทฤษฎีของความเฉื่อยหรือปฏิกิริยาของวัตถุต่อการเคลื่อนที่ที่เกิดจากแรงที่มากระทำ (**ภาพที่ 1**)



ภาพที่ 1 กฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตัน

3.1.2 กฎการเคลื่อนที่ ข้อที่สองของนิวตัน หรือกฎของความเร่ง

ความเร่งของมวลวัตถุอยู่ในทิศทางเดียวกับแรงที่มากระทำ ความเร่งนี้จะขึ้นกับขนาดของแรงและมวลของวัตถุ ดังสมการ

Fnet = ma (Force = mass x acceleration)

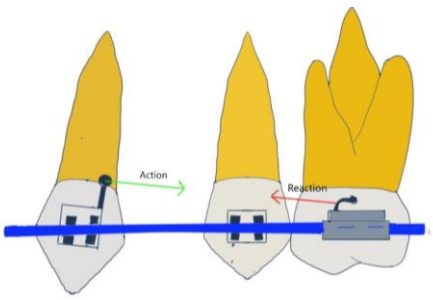
3.1.3 กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สามของนิวตัน

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สามของนิวตัน กล่าวไว้ว่าทุกแรงกระทำจะมีแรงโต้ตอบในทิศทางตรงข้ามกับแรงที่มากระทำ ตามหลักข้อนี้เมื่อวัตถุสองชิ้นมีแรงกระทำต่อกัน จะเกิดแรงกิริยาและแรงปฏิกิริยาต่อกันเสมอ โดยทุกการปฏิสัมพันธ์จะมีแรงสองแรงคู่กัน ซึ่งแรงคู่นี้ เรียกว่า แรงกิริยา (Action force) และแรงปฏิกิริยา (Reaction force) โดยแรงทั้งสองประกอบด้วยขนาดและทิศทาง ซึ่งขนาดของแรงที่กระทำต่อวัตถุแรกจะเท่ากับขนาดของแรงที่กระทำต่อวัตถุที่สองแต่มีทิศทางที่ตรงข้ามกัน

เมื่อพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ของล้อรถยนต์และพื้นถนน ขณะที่ล้อหมุนจะมีแรงกระทำบนพื้นถนน ในทางตรงกันข้ามพื้นถนนจะมีแรงกระทำต่อล้อรถยนต์ในปริมาณแรงที่เท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้ามกับแรงที่พื้นถนนได้รับจากล้อรถยนต์ จึงดูเหมือนว่าล้อรถยนต์ผลักถนนไปด้านหลัง และพื้นถนนดันล้อรถยนต์ไปด้านหน้าด้วยแรงที่เท่ากันและตรงกันข้ามทำให้รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปด้านหน้าได้

ตัวอย่างของแรงกิริยาและแรงปฏิกิริยาที่พบในช่องปาก เช่น ในการเคลื่อนฟันเขี้ยวไปด้านหลังโดยการใช้สปริง ร่วมกับการใช้ฟันกรามเพื่อเป็นหลักยึด พบว่ามีปริมาณแรงในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงที่กระทำต่อฟันเขี้ยว โดยแรงที่เกิดขึ้นจะดึงฟันกรามให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้าซึ่งเป็นผลข้างเคียงของการเคลื่อนฟันที่ไม่พึงประสงค์

ดังนั้นในการวางแผนการรักษาจึงควรนำผลข้างเคียงของการเคลื่อนฟันที่ไม่พึงประสงค์มาพิจารณา เพื่อป้องกันหรือลดการเกิดผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการ (**ภาพที่ 2**)



ภาพที่ 2 แรงกิริยาและแรงปฏิกิริยาในสภาวะสมดุล

4. แนวคิดของแรง (Concept of force) :

4.1 แรง

4.1.1 นิยาม

แรงคือการกระทำใด ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในการเคลื่อนที่ของวัตถุ แรงมีหน่วยเป็นออนซ์ กรัม หรือนิวตัน (ประมาณ 100 กรัมต่อ 1 นิวตันบนโลก เนื่องจากความเร่งจากแรงโน้มถ่วงถือเป็นค่าคงที่เท่ากับ 9.807 เมตร / วินาที^{2}) ในการจัดฟันหน่วยของแรงมักจะเป็น gram (2)

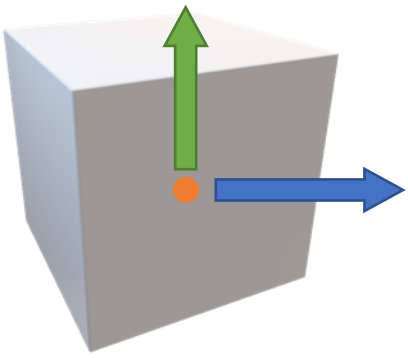
<u>ทิศทางและขนาดของแรง (Direction and magnitude of a force)</u>

เนื่องจากแรงเป็นเวกเตอร์ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทาง ในทางเรขาคณิตจึงสามารถแทนแรงได้ด้วยส่วนของเส้นตรงและลูกศร โดยที่ทิศทางของลูกศรแทนทิศทางของแรง และความยาวของลูกศรแทนขนาดของแรงตามแบบแผนของเวกเตอร์ ดังรูปที่ 3

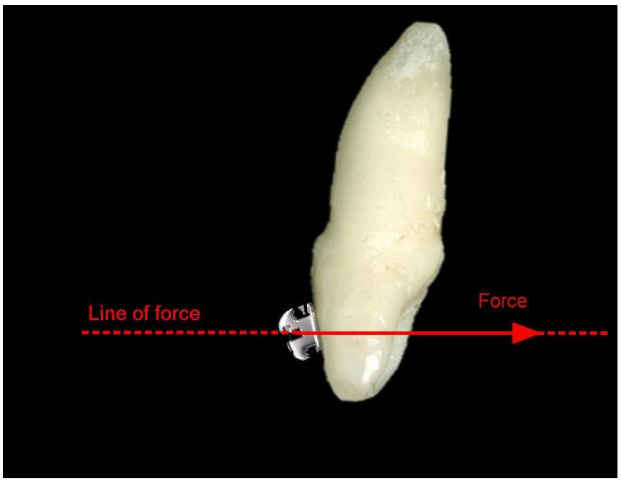
ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของ simple force ที่มีขนาดและทิศทาง

4.1.2 ตำแหน่งที่แรงมากระทำ (Point of application)

ตำแหน่งที่แรงมากระทำ คือ ตำแหน่งที่ให้แรงกับวัตถุ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของแรงหรือส่วนหางของลูกศร โดยความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ให้แรงกับจุดศูนย์กลางมวล (Center of mass) เป็นตัวกำหนดว่าวัตถุจะเคลื่อนที่แบบเลื่อนขนาน (Translation) หรือเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotation)



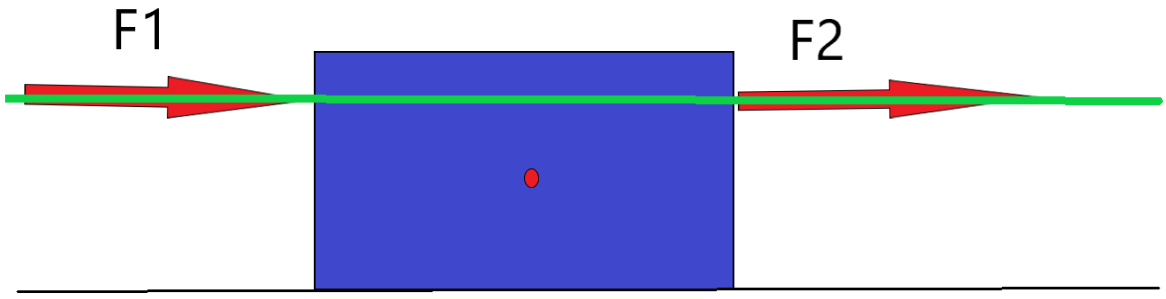
ภาพที่ 4 แสดงแนวที่มีทิศทางแตกต่างกัน แต่มีตำแหน่งที่แรงมากระทำเป็นจุดเดียวกัน



ภาพที่ 5 แสดงถึงแนวแรงกระทำ (Line of action) และเวกเตอร์ของแรง เมื่อให้แรงในลักษณะ Simple force ที่บริเวณแบรกเก็ตของฟันตัดแท้บนซี่กลาง

4.1.3 แนวแรงกระทำที่มีขนาดและทิศทาง (Line of action with direction and magnitude)

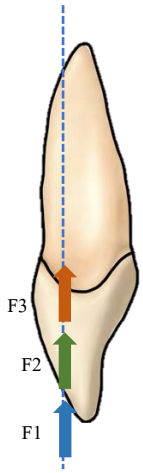
แนวแรงกระทำ (Line of action) มีลักษณะเป็นแนวแกนของแรงที่ให้ ทิศทางของแรงจะถูกแสดงในรูปแบบของลูกศร โดยความยาวของลูกศรแทนขนาดของแรงตามแบบแผนของเวกเตอร์ แรงสองแรงที่มีขนาดเท่ากัน (F1 และ F2) ดังภาพที่ 6 กระทำในทิศทางและวางบนแนวแรงกระทำเดียวกัน ไม่ว่าแรงดังกล่าวจะเป็นแรงผลักหรือแรงดึง ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นต่อวัตถุจะเหมือนกัน



ภาพที่ 6 แสดงแนวแรงกระทำ

4.1.4 กฎการส่งผ่านของแรง (Law of Transmissibility of Force)

เมื่อมีการให้แรงต่อวัตถุ ณ ตำแหน่งใดก็ตามที่อยู่บนแนวแรงกระทำเดียวกัน ผลที่เกิดขึ้นต่อวัตถุจะเหมือนกัน ดังภาพที่ 7 ตัวอย่างเช่น เมื่อแนวแรงกระทำคือแนวแกนทางยาวของฟันเมื่อมีการให้แรงที่มีขนาดเท่ากัน ทิศทางเหมือนกัน ไม่ว่าจะให้ ณ ตำแหน่งปลายฟัน แบรกเก็ตสำหรับจัดฟัน หรือซิงกิวลุม ผลที่เกิดขึ้นต่อฟันนั้นจะเหมือนกัน



ภาพที่ 7 กฎการส่งผ่านของแรง (Law of Transmissibility of Force) : F1, F2 และ F3 ส่งผลต่อฟันเหมือนกัน

4.1.5 ตำแหน่งที่แรงกระทำ (Point of application of force)

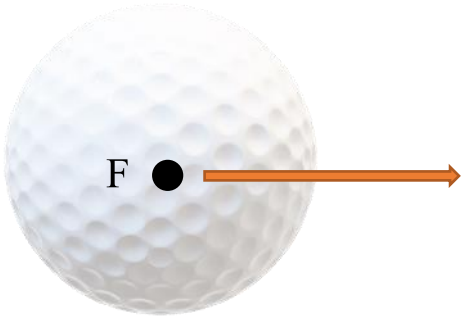
ตามกฎของการส่งผ่านของแรง เมื่อมีการให้แรงต่อวัตถุ ณ ตำแหน่งใดก็ตามที่อยู่บนแนวแรงกระทำเดียวกัน ผลที่เกิดขึ้นต่อวัตถุจะเหมือนกัน

สเกลลาร์ (Scalar) คือ ปริมาณที่มีแต่ขนาด ไม่มีทิศทาง ในขณะที่เวกเตอร์มีทั้งขนาดและทิศทาง เวกเตอร์จึงถูกนำมาใช้อธิบายแผนภาพอิสระของวัตถุ (Free Body Diagram) ซึ่งแสดงให้ทราบว่ามีแรงกี่แรงและแรงอะไรบ้างที่กระทำต่อวัตถุ

วัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) คือวัตถุที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงกระทำใดๆ ทั้งแรงดึง (Tensile force) หรือแรงบีบอัด (Compressive force) ฟันจัดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ซึ่งแตกต่างจากเนื้อเยื่ออ่อนต่างๆ (Soft tissue)

4.1.6 จุดศูนย์กลางมวล (Center of mass)

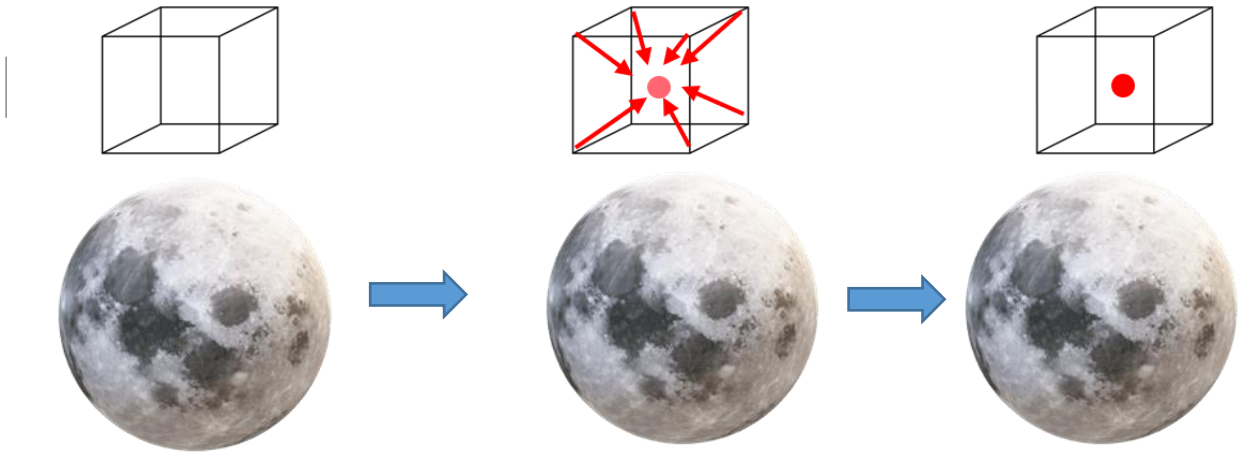
เป็นจุดรวมมวลของวัตถุซึ่งอยู่ภายนอกหรือภายในวัตถุก็ได้ ตัวอย่างวัตถุเช่นฟัน จุดศูนย์กลางมวลมักเป็นส่วนหนึ่งอยู่ในวัตถุหรือมีความเกี่ยวพันกับวัตถุนั้น ซึ่งจุดศูนย์กลางมวลของฟัน คือจุดที่ตำแหน่งของมวลกระจายเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 8 จุดศูนย์กลางมวล

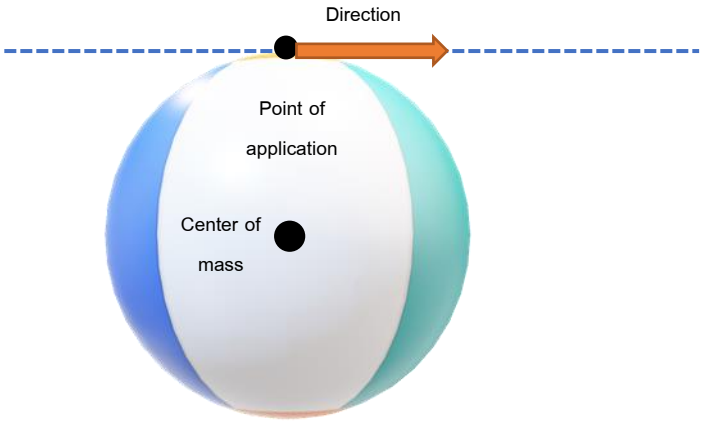
หากไม่มีแรงใดๆ มากระทำต่อวัตถุ จะถือว่ามวลทั้งหมดของวัตถุนั้นๆ รวมอยู่ที่จุดเดียวซึ่งก็คือจุดศูนย์กลางมวล (Center of mass) นั่นเองดังภาพที่ 8 เมื่อให้แรงผ่านจุดศูนย์กลางมวลวัตถุจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางของแรงโดยไม่มีการหมุน (Pure translation) โดยหลักการดังกล่าวสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นกับวัตถุเมื่อได้รับแรง ตัวอย่างเช่นวัตถุที่วางอยู่บน

ดวงจันทร์ซึ่งไม่มีแรงโน้มถ่วงมากระทำ ดังภาพที่ 9 ในทางทันตกรรมจัดฟันซึ่งฟันถือเป็นวัตถุที่อยู่ในกระดูกเบ้าฟัน จึงไม่สามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์เพื่ออธิบายผลที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุที่อยู่บนดวงจันทร์

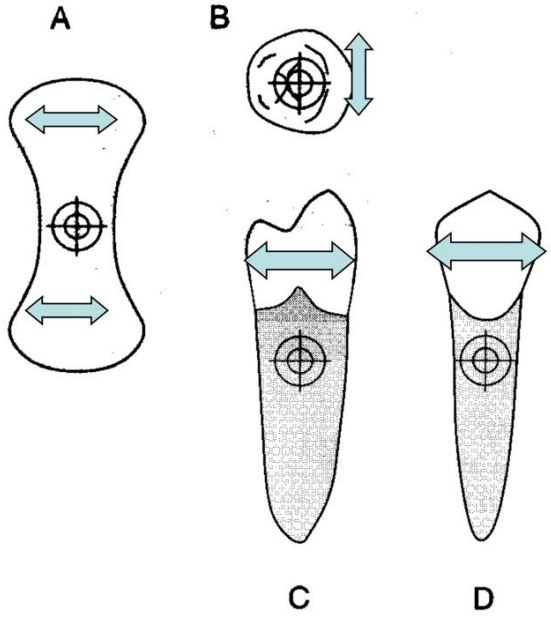
หากแนวแรงกระทำต่อวัตถุอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางมวล วัตถุจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางของแรงโดยมีการหมุนร่วมด้วย ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เมื่อให้แรงโดยที่แนวแรงกระทำอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางมวล

5. จุดศูนย์กลางของความต้านทาน Center of resistance (Cres) :

จุดศูนย์กลางของความต้านทานถือเป็นตำแหน่งที่สำคัญในทางทันตกรรมจัดฟัน เนื่องจากฟันไม่ใช่วัตถุที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และรากฟันถูกห่อหุ้มด้วยเอ็นยึดปริทันต์ซึ่งฝังอยู่ในกระดูกเบ้าฟันดังนั้น จุดศูนย์กลางมวลและจุดศูนย์กลางของความต้านทานจึงไม่ได้อยู่ตำแหน่งเดียวกัน จุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันจะอยู่ค่อนมาทางปลายรากฟันเมื่อเปรียบเทียบกับจุดซูนย์กลางมวล ดังนั้นการคำนวณระบบของแรงที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่หรือการหมุนของวัตถุจะอ้างอิงกับจุดศูนย์กลางของความต้านทานเป็นหลัก

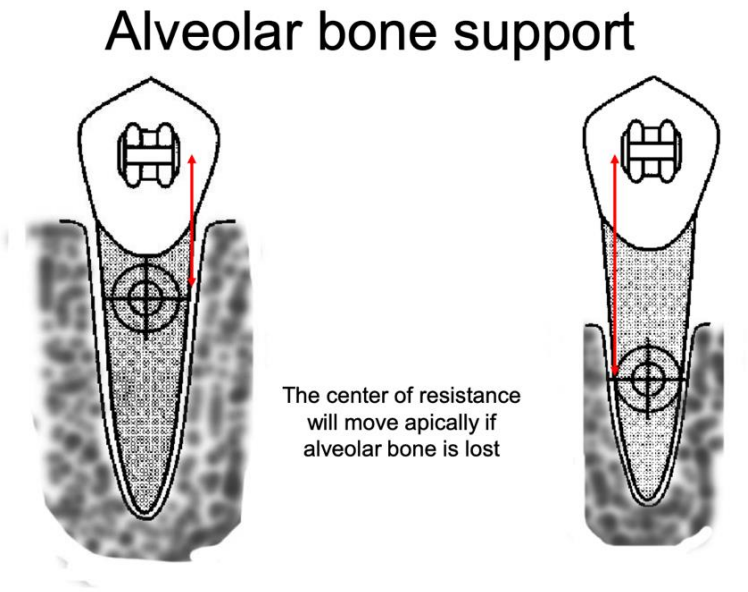


ภาพที่ 11 แสดงตำแหน่งของ center of resistance เมื่อมองจากมุมต่างๆ : A รากฟัน

B. ด้านบดเคี้ยว C. แนวด้านแก้ม-ด้านลิ้น D. แนวใกล้กลาง-ไกลกลาง

ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความต้านทานจะแตกต่างกันไปในฟันแต่ละซี่ และขึ้นอยู่กับปริมาณของเนื้อเยื่อปริทันต์ที่รองรับ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความต้านทานจะเป็นตำแหน่งที่เรานำมาใช้พิจารณาแรงทั้งระบบที่กระทำต่อวัตถุ ซึ่งสำหรับฟันนั้นแรงในระบบจะประกอบด้วยแรงจากเอ็นยึดปริทันต์ หลอดเลือด กระดูก และเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (รูปที่ 12) จุดศูนย์กลางของความต้านทานสามารถพิจารณาได้สำหรับฟันซี่เดียว โดยมักอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของรากฟัน หรือจุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันหลายๆ ซี่รวมกัน เช่น เมื่อทำหน้าที่ร่วมกันเป็นหลักยึดทางทันตกรรมจัดฟัน โดยเปรียบเหมือนฟันเหล่านั้นเป็นมวลก้อนเดียวกัน

ความสำคัญของจุดศูนย์กลางของความต้านทาน : เมื่อมีแรงมากระทำต่อฟัน จำเป็นจะต้องประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นใน 3 มิติ รวมถึงการเคลื่อนที่ของฟันที่จะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้ระบบแรงนี้



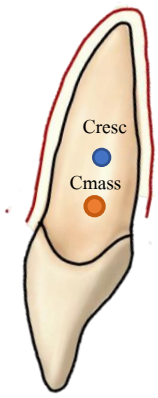
ภาพที่ 12 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของความต้านทาน เลื่อนต่ำลงมาทางปลายรากฟัน เมื่อระดับความสูงของกระดูกหุ้มรากฟันลดลง

5.1 การเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางของความต้านทานมีความสัมพันธ์กับเนื้อเยื่อปริทันต์ที่รองรับ

เมื่อเนื้อเยื่อปริทันต์ที่รองรับลดลง ตำแหน่งของสันกระดูกเบ้าฟัน (Alveolar bone crest) จะอยู่ต่ำลงมาโดยค่อนมาทางปลายรากฟัน ส่งผลให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของความต้านทานเลื่อนต่ำลงมาทางปลายรากฟันด้วยเช่นกัน ดังภาพที่ 12 แสดงถึงตำแหน่งของสันกระดูกเบ้าฟันของฟันทางด้านขวาที่อยู่ต่ำลงมา ทำให้ระยะทางระหว่างแบรกเก็ตกับจุดศูนย์กลางของความต้านทานเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า เมื่อมีแรงขนาดเท่ากันมากระทำที่แบรกเก็ตของฟันทั้งสอง ผลที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกัน โดยฟันทางด้านขวาจะเกิดการหมุนมากกว่าเนื่องจากระยะทางที่เพิ่มขึ้นระหว่างจุดศูนย์กลางของความต้านทานกับแบรกเก็ตหรือตำแหน่งที่แรงมากระทำ

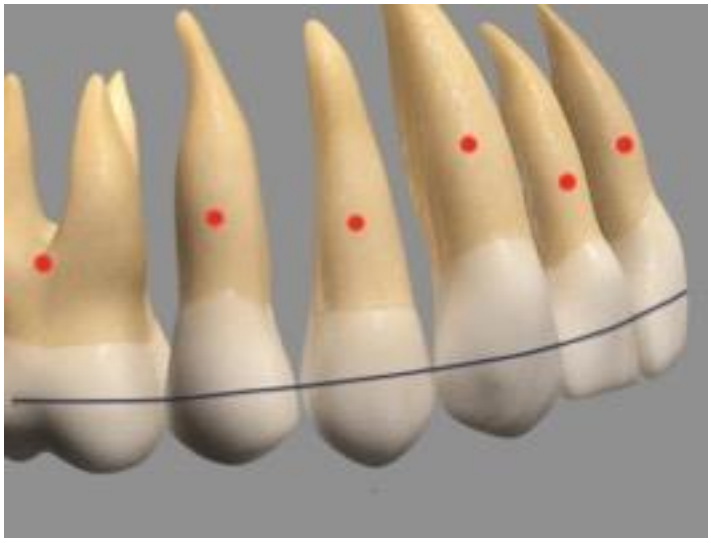
5.1.1 จุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันรากเดี่ยว

ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลจะอยู่ค่อนมาทางด้านบดเคี้ยวเสมอเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของความต้านทาน ดังภาพที่ 13 เนื่องจากแรงต้านทานจากเอ็นยึดปริทันต์และกระดูกเบ้าฟัน เนื่องจากแรงต้านทานนี้ไม่สามารถวัดได้ในฟันแต่ละซี่หรือในคนไข้แต่ละคน หลักการของจุดศูนย์กลางของความต้านทานจึงเป็นเพียงแนวคิดทางทฤษฎี แต่ก็สามารถนำมาใช้อธิบายและสร้างระบบแรงที่เหมาะสมได้



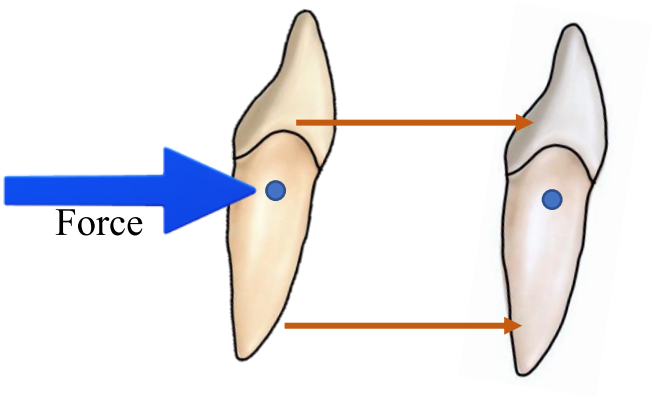
ภาพที่ 13 เปรียบเทียบตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความต้านทานและจุดศูนย์กลางมวลในฟันรากเดี่ยว

ในกรณีเนื้อเยื่อปริทันต์ที่รองรองรับปกติ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันแต่ละซี่จะมีความแตกต่างกัน ดังภาพที่ 14 ฟันเขี้ยวจะมีตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความต้านทานสูงกว่าฟันซี่อื่นๆ ในขณะที่ฟันกรามน้อยและฟันตัดซี่ข้างจะมีตำแหน่งที่ต่ำลงมา



ภาพที่ 14 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันแต่ละซี่ในกรณีที่เนื้อเยื่อปริทันต์ที่รองรองรับปกติ

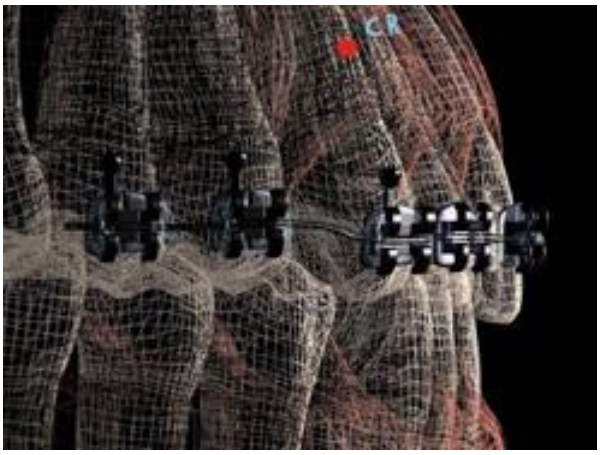
ดังนั้นตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความต้านทานจะแตกต่างกันไปในฟันแต่ละซี่ ซึ่งมีความยาวของรากฟันและรูปร่างของรากฟันแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับระดับความสูงของกระดูกเบ้าฟันอีกด้วย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าจุดศูนย์กลางของความต้านทานคือตำแหน่งใดๆ ของวัตถุที่เมื่อมีแรงมากระทำ ณ ตำแหน่งนี้แล้วทำให้วัตถุมีการเคลื่อนที่โดยไม่มีการหมุน ดังภาพที่ 15



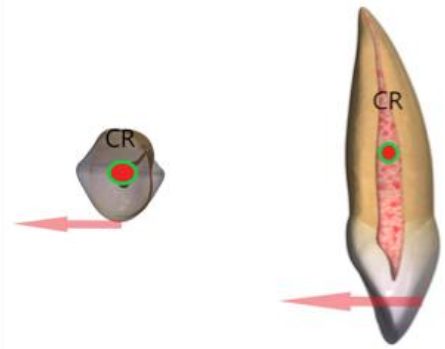
ภาพที่ 15 เมื่อแรงกระทำที่จุดศูนย์กลางของความต้านทาน ส่งผลให้มีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนขนานที่ปราศจากการหมุน

5.1.2 จุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันหลายซี่

เมื่อฟันหลายซี่ถูกยึดรวมกันด้วยแบรกเก็ตและลวดจัดฟัน ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความต้านทานจะถูกสร้างขึ้นมาใหม่ และถือว่าฟันกลุ่มนี้เป็นวัตถุชิ้นเดียวกัน ดังภาพที่ 16



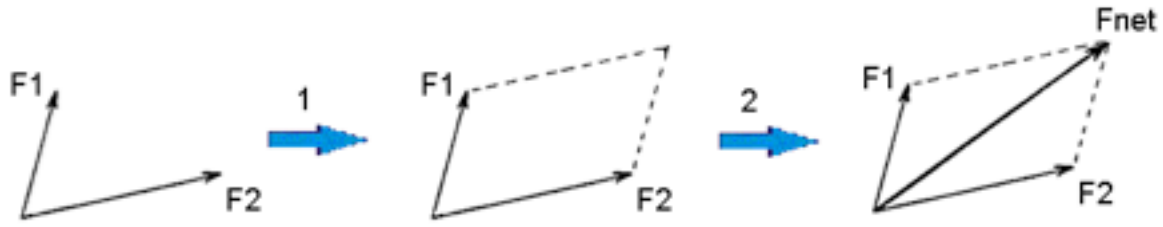
ภาพที่ 16 จุดศูนย์กลางของความต้านทานของฟันหลายซี่



ภาพที่ 17 เมื่อให้แรงที่แบรกเก็ต จะมีระยะห่างระหว่างแนวแรงและจุดศูนย์กลางของความต้านทานเสมอ

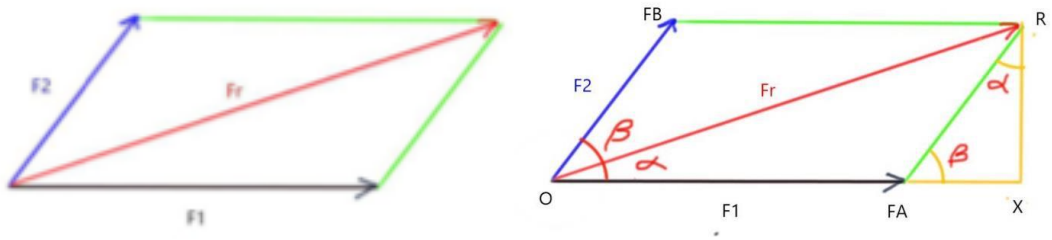
5.1.3 การรวมกันของแรง ผลรวมของแรงหรือแรงสุทธิ

ในทางทันตกรรมจัดฟัน มักพิจารณาผลรวมของแรงใน 3 มิติ และนำมาคำนวณแรงสุทธิที่เกิดขึ้น กฎของสี่เหลี่ยมด้านขนานถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณผลรวมเวกเตอร์ของแรง ตัวอย่างดังภาพที่ 18 เมื่อแรง F1 และ F2 ทำมุมกัน สี่เหลี่ยมด้านขนานจะถูกสร้างขึ้นโดยการวาดเส้นขนานของ F1 และ F2 เส้นทะแยงมุมของสี่เหลี่ยมด้านขนานที่ถูกสร้างขึ้นคือผลรวมของแรงหรือแรงสุทธิ



ภาพที่ 18 กฎของสี่เหลี่ยมด้านขนาน

การคำนวณผลรวมของ 2 เวกเตอร์ สามารถดูคำอธิบายโดยละเอียดได้จาก URL นี้ https://www.mathstopia.net/vectors/parallelogram-law-vector-addition โดยสามารถคำนวณปริมาณของแรงสุทธิได้จากสูตร Fr = F1 + F2 ซึ่งจำเป็นต้องวาดเส้นขนานต่อออกมาจากแนวของ F1 และ F2 และเพิ่มค่าของมุม α และ β ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การคำนวณผลรวมของ 2 เวกเตอร์

การคำนวณแอมพลิจูดของผลรวมของแรงหรือแรงสุทธิ

จากภาพที่ 19

$Fr^2 = OX^2 + RX^2$

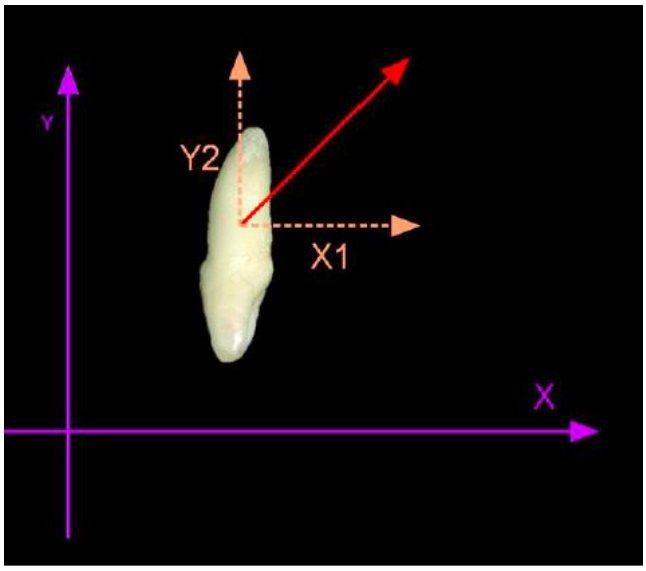
$OX = OFA + FAX$ or $Fr^2 = (OFa + FaX)^2 + Rx^2$

$FaX/F2$ or $FaX = F2Cos\beta$ and $sin\beta = Rx/F2$ or $Rx = F2sin\beta$

หลังจากแทนค่าจะพบว่า : $Fr = \sqrt{F1^2 + 2FaF2\cos\beta + F2^2}$

ในกรณีที่มีแรง 2 แรงทำมุมกัน 90 องศา เมื่อแทนค่ามุมแล้ว สมการจะถูกทำให้ง่ายขึ้นและสมการเป็น

$Fr = \sqrt{X1^2 + FY2^2}$ ดังภาพที่ 20

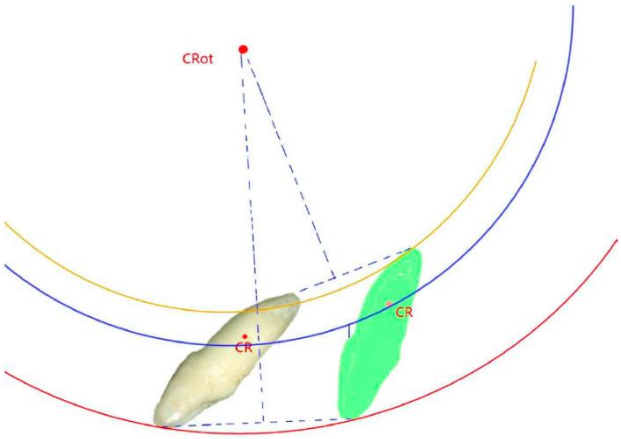


ภาพที่ 20 แรงสุทธิเมื่อมีแรง 2 แรงทำมุมกัน 90 องศา

6. ศูนย์กลางของจุดหมุน (Center of rotaion : Crot) :

ศูนย์กลางของจุดหมุน คือ จุดที่วัตถุหมุนรอบ ซึ่งตำแหน่งของจุดนี้จะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความต้านทานและแรงที่มากระทำต่อวัตถุ การหมุนที่ปราศจากการเลื่อนขนานเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของจุดหมุนอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางของความต้านทาน ส่วนการเลื่อนขนานที่ปราศจากการหมุนเกิดขึ้นเมื่อศูนย์กลางของจุดหมุนอยู่ที่ระยะทางอนันต์ห่างจากศูนย์กลางของความต้านทาน

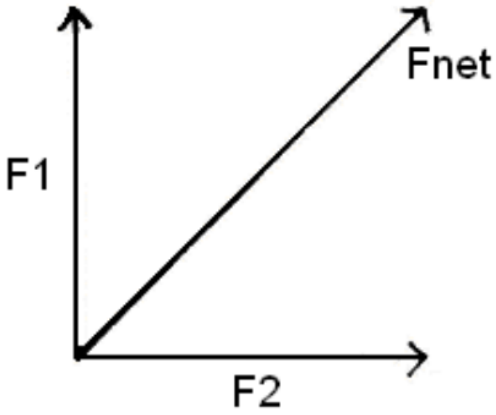
เมื่อฟันมีการเคลื่อนที่แบบหมุน การที่จะระบุตำแหน่งของศูนย์กลางของจุดหมุนนั้น ให้กำหนดจุด 2 จุดบนฟันหรือวัตถุนั้นๆ และลากเส้นเชื่อมระหว่างตำแหน่งก่อนและหลังจากมีการเคลื่อนที่ ลากเส้นตั้งฉากจากจุดกึ่งกลางของเส้นดังกล่าว จุดตัดของเส้นตั้งฉากทั้งสองเส้นคือศูนย์กลางของจุดหมุน ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 วิธีการหาตำแหน่งของศูนย์กลางของจุดหมุน

6.1.1 แผนภาพวัตถุอิสระ (Free body diagram)

แผนภาพวัตถุอิสระ ช่วยในการอธิบายผลกระทบของแรงต่างๆที่กระทำต่อวัตถุในเวลาเดียวกัน (แรงสุทธิ) หรือช่วยให้สามารถแตกแรงออกมาเป็นส่วนประกอบของที่รวมเป็นแรงสุทธินั้นๆ ตัวอย่างของแผนภาพวัตถุอิสระที่มีแรง F1, F2 และ Fnet (กฎขอสี่เหลี่ยมด้านขนาน) แสดงดังภาพที่ 22



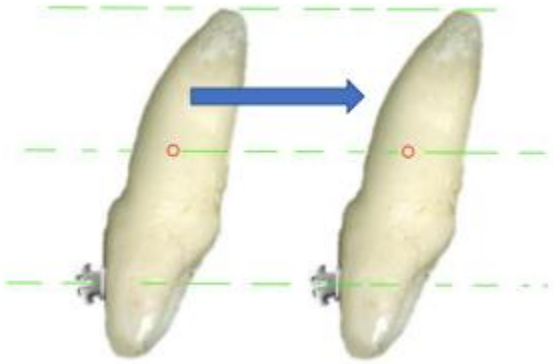
ภาพที่ 22 แผนภาพวัตถุอิสระ

7. การเคลื่อนฟัน (Tooth movement)

ในการรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน สำคัญมากที่ต้องตระหนักว่าการเคลื่อนฟันนั้นเป็นการเคลื่อนในลักษณะสามมิติ เพื่อใช้ในการวางแผนให้เกิดการเคลื่อนฟันที่ต้องการ และหลีกเลี่ยงการเคลื่อนฟันที่ไม่พึงประสงค์

7.1 การเคลื่อนฟันแบบเลื่อนขนาน (Translation)

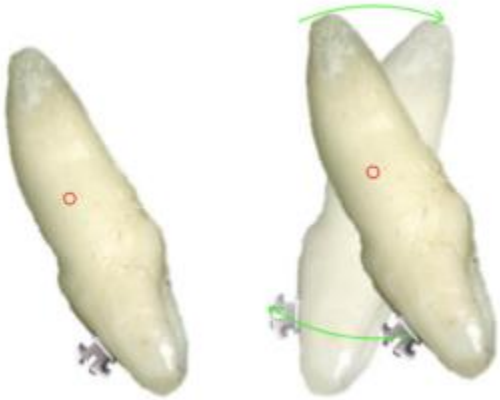
ในระหว่างที่เกิดการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนขนานนั้น ทุกจุดของตัวฟันและรากฟันจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน และมีระยะทางเท่ากัน (ภาพที่ 28) โดยศูนย์กลางของจุดหมุนนั้นจะอยู่ที่ระยะอนันต์ของฟัน



ภาพที่ 28 การเคลื่อนฟันแบบเลื่อนขนานของฟันตัดซี่กลาง

7.2 การเคลื่อนที่แบบหมุนที่ปราศจากการเลื่อนขนาน (Pure Rotation)

ในการเคลื่อนที่แบบหมุนที่ปราศจากการเลื่อนขนานนั้น เกิดขึ้นเมื่อตัวฟันหมุนรอบจุดศูนย์กลางของความต้านทานหรืออีกความหมายหนึ่งคือ ศูนย์กลางของจุดหมุนเป็นตำแหน่งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางของความต้านทาน



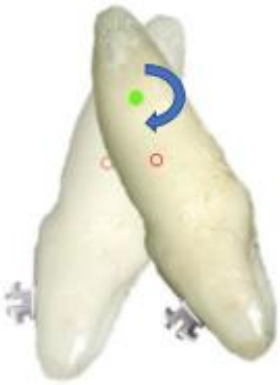
ภาพที่ 29 การเคลื่อนฟันแบบหมุนที่ปราศจากการเลื่อนขนาน

7.3 การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียง (Tipping)

เมื่อเกิดการเคลื่อนที่แบบล้มเอียงนั้น ลักษณะของการเคลื่อนฟันขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่แรงมากระทำ

7.3.1 การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้ (Uncontrolled tipping)

เมื่อมีแรงกระทำที่ตัวฟัน ตัวฟันจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางหนึ่ง ในขณะที่รากของฟันจะเคลื่อนที่ไปอีกทิศทางหนึ่ง การเคลื่อนที่ในลักษณะนี้ ศูนย์กลางของจุดหมุนจะอยู่ค่อนไปทางปลายราก (apical) เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของความต้านทาน



ภาพที่ 30 การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้

7.3.2 การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้ (Controlled tipping)

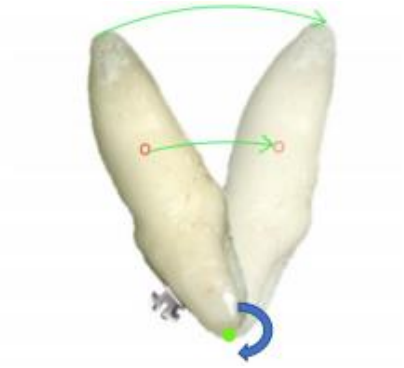
การเคลื่อนที่ลักษณะนี้จะมีศูนย์กลางของจุดหมุนนั้นอยู่ที่จุดปลายสุดของรากฟัน (apex)

ภาพที่ 31 การเคลื่อนที่แบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้

ตัวอย่างเช่น ในการรักษาและแก้ไขผู้ป่วยที่มีการสบฟันผิดปกติประเภทที่ 2 ดิวิชั่น 1 (Class II division I) ร่วมกับฟันหน้าบนยื่น ถ้ามีการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้ จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของรากฟันมาทิศทางตรงกันข้ามของตัวฟันได้ ทำให้เกิดผลที่ไม่พึงประสงค์ คือ รากฟันทะลุแผ่นกระดูกด้านแก้ม (buccal plate) ในขณะที่การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้ จะเกิดการเคลื่อนที่เฉพาะตรงตัวฟัน ทำให้รากฟันไม่ทะลุแผ่นกระดูกด้านแก้ม

7.3.3 การเคลื่อนที่ของรากฟัน (Root movement)

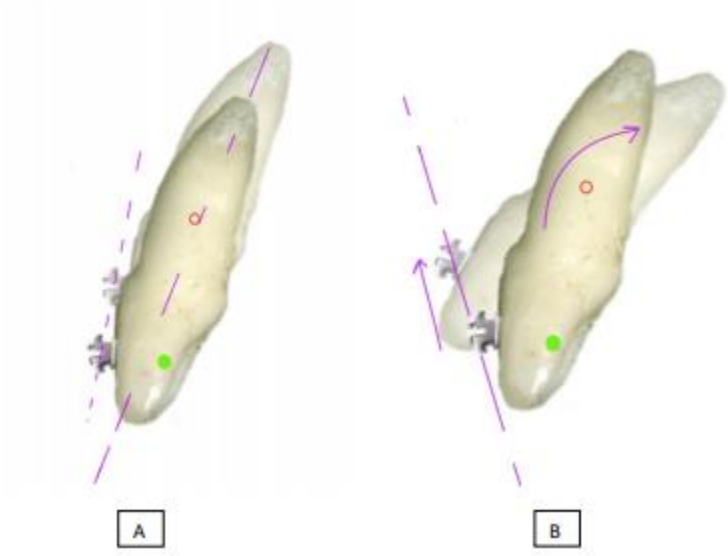
เกิดขึ้นเมื่อศูนย์กลางของจุดหมุนนั้นอยู่ที่ปลายฟัน (incisal edge) (รูปที่ 32) ทำให้การเคลื่อนของตัวฟันนั้นเกิดขึ้นน้อยกว่าการเคลื่อนของรากฟัน แต่การเคลื่อนของรากฟันนั้นจะใช้ระยะเวลาที่นานกว่า เนื่องจากต้องมีกระบวนการละลายตัวของกระดูกร่วมด้วย (bone resorption)



ภาพที่ 32 การเคลื่อนที่ของรากฟัน

7.3.4 การเคลื่อนที่แบบการกดลง (Intrusion) และ การดึงออก (Extrusion) ของฟัน

การเคลื่อนที่ประเภทนี้จะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ตามแกนแนวของฟัน (ภาพที่ 33 และ 34) ลักษณะเดียวกับการเคลื่อนที่แบบเลื่อนขนาน (ภาพที่ 28) ซึ่งศูนย์กลางของจุดหมุนนั้นอยู่ที่ระยะอนันต์ จึงไม่มีการหมุนเกิดขึ้น



ภาพที่ 33 A. การดึงออกของฟันตัดที่มีการยื่นยาวลงมาในแนวดิ่ง (extruded incisor) B. การกดลงแบบสัมพัทธ์ (Relative intrusion)

ในภาพที่ 33A ขณะที่มีการกดลงของฟันตัดโดยไม่มีการใช้หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันร่วมด้วย ทำให้ฟันซี่ข้างเคียงเกิดการเคลื่อนแบบดึงออก ซึ่งเป็นผลที่ไม่พึงประสงค์ของการกดลงของฟัน ในภาพ 33 B. แสดงถึงการกดลงแบบสัมพัทธ์ อันเป็นผลจากการเอนออกของฟันหน้าร่วมกับการกดลงของฟันในแนวดิ่ง

ในภาพ 34 ขณะที่มีการดึงออกของฟันตัดโดยไม่มีการใช้หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันร่วมด้วย ทำให้ฟันซี่ข้างเคียงเกิดการเคลื่อนแบบกดลง ซึ่งเป็นผลที่ไม่พึงประสงค์ของการดึงออกของฟัน

ภาพที่ 34 การดึงออกของฟัน

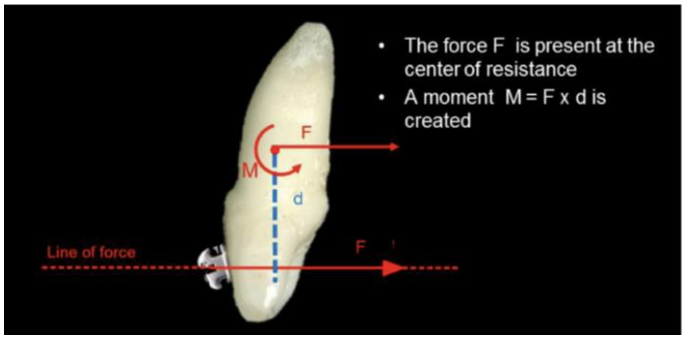
8. ระบบแรง (Force system)

ในการวางแผนการเคลื่อนฟันไปในทิศทางที่ต้องการนั้นควรจะมีความเข้าใจในระบบแรงเสียก่อน โดยระบบแรงประกอบด้วยแรงและโมเมนต์ของแรง ซึ่งอัตราส่วนจะบ่งบอกถึงลักษณะของการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น ในบทนี้จะกล่าวถึงโมเมนต์ แรงคู่ควบ อัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง และการเคลื่อนที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงและระบบของแรง

8.1 โมเมนต์ (Moment)

โมเมนต์ คือแนวโน้มของแรงที่ทำให้วัตถุหนึ่งบิดหรือหมุนไป การคำนวณโมเมนต์ของแรงทำได้โดยนำขนาดของแรงคูณกับระยะทางที่ตั้งฉากจากจุดศูนย์กลางของความต้านทาน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ (ภาพที่ 35)

$M = F \times d$

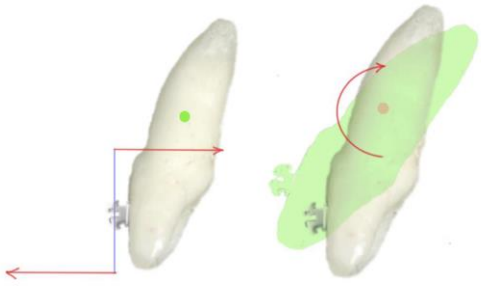


ภาพ 35 โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำต่อวัตถุ คูณกับระยะทางที่ตั้งฉากจากจุดศูนย์กลางของความต้านทาน

8.2 แรงคู่ควบ (Force couple)

แรงคู่ควบ หมายถึง โมเมนต์หรือการหมุนรอบตัวที่เกิดขึ้น โดยที่แรงสองแรง (F1, F2) นั้นมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้ามและมีตำแหน่งของแรงห่างกันในระยะทางที่ตั้งฉากกัน ในการคำนวณโมเมนต์ของแรงคู่ควบจะพิจารณาแรงแยกจากกัน

ยกตัวอย่างเช่น เมื่อแรงที่หนึ่งและสอง (F1, F2) ซึ่งมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกระทำต่อวัตถุเดียวกัน ผลที่เกิดขึ้นจะไม่มีการเลื่อนขนาน เนื่องจากขนาดและทิศทางของแรงหักล้างกัน แต่โมเมนต์ของแรงไม่ได้หายไปเพราะแรงทั้งสองทำให้เกิดการหมุนในทิศทางเดียวกันโดยหมุนรอบจุดศูนย์กลางของความต้านทานของวัตถุนั้น การหาผลรวมของโมเมนต์ในระบบแรง ซึ่งในที่นี้คือการเพิ่มโมเมนต์ของแรงคู่ควบ โดยไม่คำนึงถึงตำแหน่งที่แรงกระทำต่อวัตถุหรือฟันพิจารณาได้จากตัวอย่างในภาพที่ 36

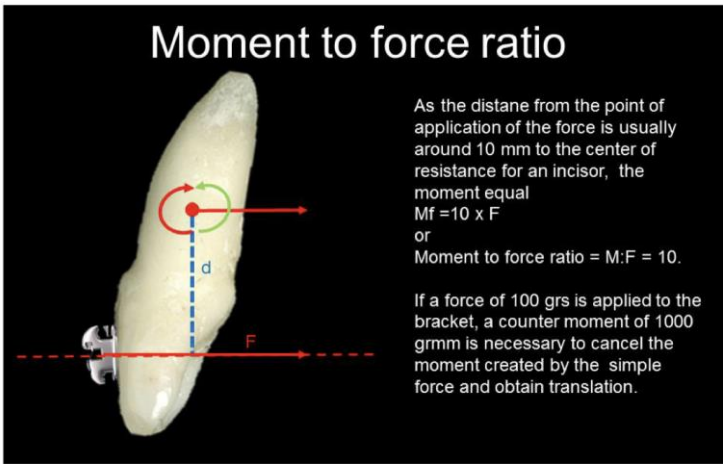


ภาพที่ 36 ตัวอย่างแรงคู่ควบ

เมื่อแรงคู่ควบนั้นไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่แรงกระทำต่อวัตถุ ผลลัพธ์จึงยังคงเหมือนเดิมแม้ว่าแรงที่หนึ่งและแรงที่สองจะอยู่ในตำแหน่งใหม่ซึ่งเป็นตำแหน่งทางชีวภาพที่ดีกว่าในทางคลินิก โดยสรุปไม่ว่าแรงคู่ควบจะกระทำต่อฟันในตำแหน่งไหน ผลลัพธ์ของโมเมนต์ในระบบแรงจะเท่ากับ แรง 1 แรง คูณระยะทางระหว่างแรงทั้งสองนั้น

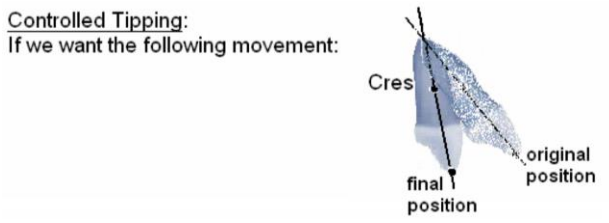
8.3 อัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง (Moment to force ratio)

อัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง เป็นการผสมผสานของการเลื่อนขนานและการหมุน โดยสัดส่วนนั้นจะถูกกำหนดโดยปริมาณของแรงคูณกับระยะทางที่ตั้งฉากต่อศูนย์กลางความต้านทานของฟันหรือกลุ่มของฟัน (ภาพที่ 37) แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์กับแรงในการเลื่อนขนาน สมมุติว่าระยะทางจากจุดที่ให้แรงห่างจากศูนย์กลางความต้านทานของฟันหน้า 10 มิลลิเมตร โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ M = 10 x F หรือ อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์กับแรง เท่ากับ M:F = 10

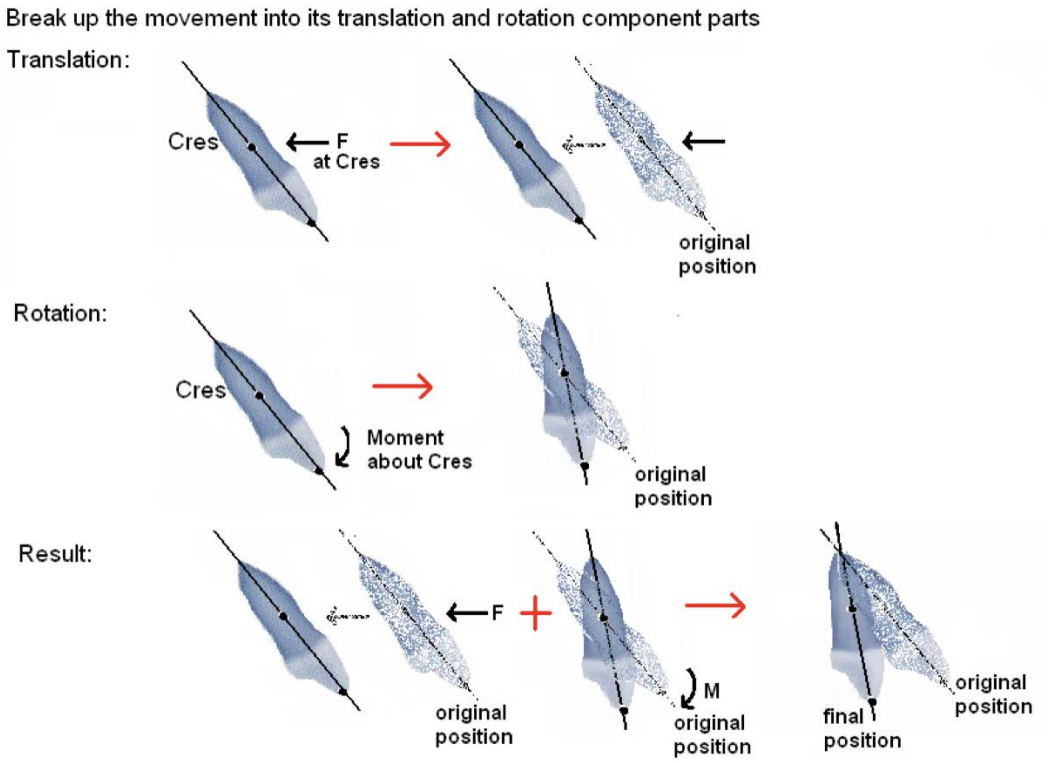


ภาพที่ 37 อัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงในการเลื่อน

ภาพที่ 38 และ 39 แสดงถึงการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ต้องการ เช่น การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้ (controlled tipping) ซึ่งเป็นการผสมผสานของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนขนานและการหมุน



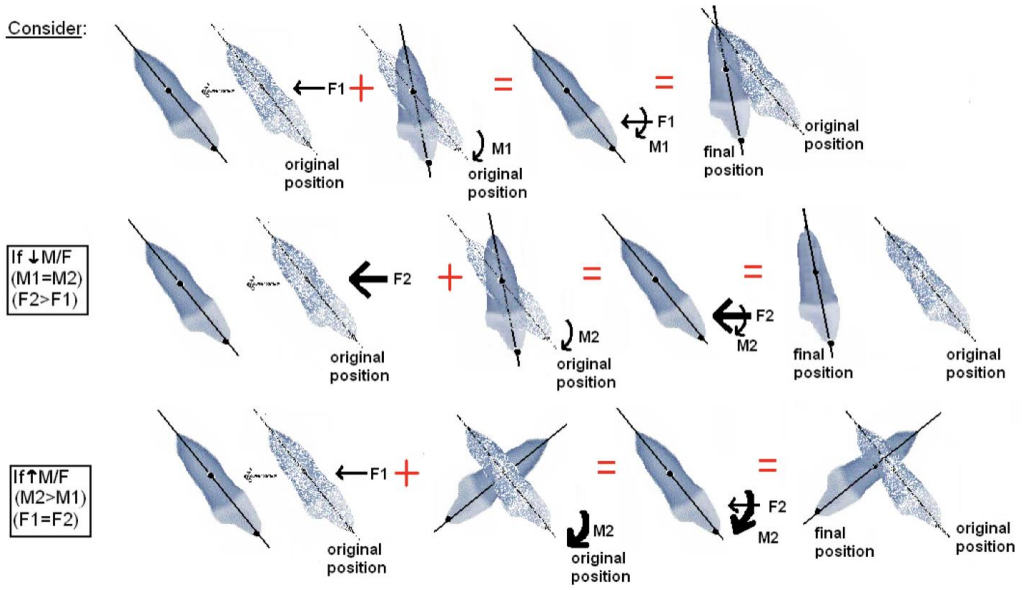
ภาพที่ 38 การเคลื่อนที่ในทิศทางที่ต้องการ



ภาพที่ 39 แสดงการแตกแรงและโมเมนต์ เพื่อให้เห็นถึงการเลื่อนและการหมุน ในการเกิดการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงนั้น ศูนย์กลางของจุดหมุนที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังภาพที่ 40 แสดงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงของการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้ ถ้าอัตราส่วนของโมเมนต์กับแรงลดลงหมายถึงโมเมนต์มีค่าคงที่หรือลดลงแต่แรงมีค่าเพิ่มขึ้น จะพบว่ามีการเลื่อนขนานมากขึ้นเพราะจุดศูนย์กลางของจุดหมุนได้เคลื่อนไปใกล้ปลายรากฟันมากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือจุดศูนย์กลางของจุดหมุนเคลื่อนห่างออกจากจุดศูนย์กลางของความต้านทาน

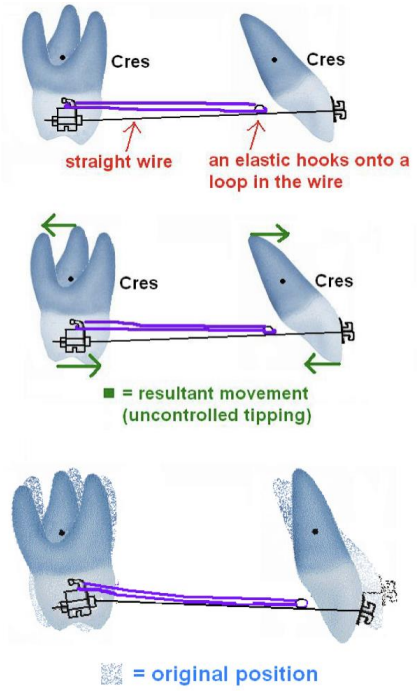
ในทางตรงกันข้าม ถ้าอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงเพิ่มขึ้น นั่นหมายถึงโมเมนต์เพิ่มขึ้นหรือแรงมีขนาดลดลง ทำให้มีการหมุนเกิดขึ้นมากกว่าการเลื่อนขนาน เนื่องจากศูนย์กลางของจุดหมุนเคลื่อนเข้าใกล้ศูนย์กลางของความต้านทาน หรืออีกนัยหนึ่งคือจุดศูนย์กลางของจุดหมุนเคลื่อนเข้าใกล้ปลายฟันมากขึ้น



ภาพที่ 40 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง (M/F)

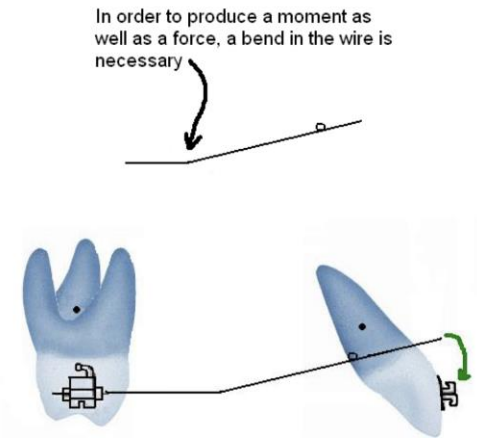
8.4 การเคลื่อนที่เมื่อแรงและระบบของแรงเปลี่ยนแปลงไป (Movement when forces and systems are varied)

เราสามารถนำความรู้จากระบบแรงเทียบเท่า (Equivalent force system) มาประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรมจัดฟันได้ เช่น การดึงฟันหน้า (Incisor retraction) ขณะที่เราใช้ฟันกรามใหญ่เพื่อเป็นหลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันนั้น หากเราใส่ลวดเส้นตรงระหว่างฟันหน้าและฟันกรามใหญ่ และใช้ยางดึงจากตะขอที่อยู่บนลวดไปยังตะขอบนแบรกเก็ตของฟันกรามใหญ่ จะทำให้เกิดการเคลื่อนของฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้ ทั้งที่ฟันหน้าและฟันกรามใหญ่ เนื่องจากศูนย์กลางของจุดหมุนจะอยู่ที่ศูนย์กลางของความต้านทาน ดังภาพที่ 41



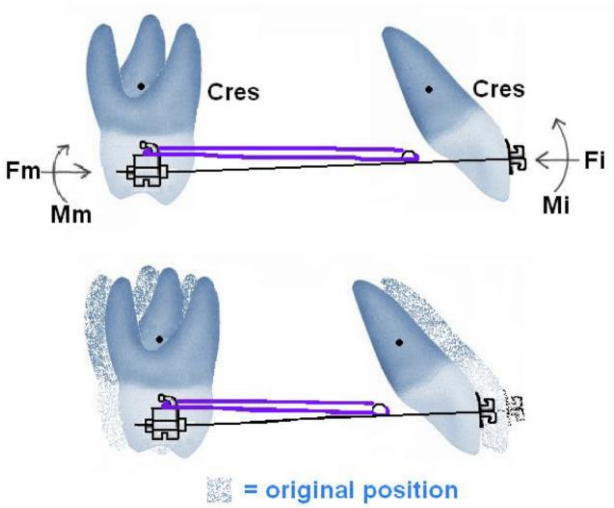
ภาพที่ 41 การดึงฟันเขี้ยวโดยใช้ยางดึงฟันจากตะขอที่อยู่บนลวด ผลคือเกิดการเคลื่อนของฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้

การควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของฟัน เราจำเป็นต้องเพิ่มโมเมนต์ที่ตัวฟันเพื่อต้านกับโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากแรงดึงของยาง เพื่อที่จะทำให้เกิดการเลื่อนขนานอย่างสมบูรณ์ โดยสามารถเพิ่มโมเมนต์ให้เกิดขึ้นที่ตัวฟันจากการดัดลวดในตำแหน่งที่มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้ ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 แสดงถึงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการดัดลวด และแรงที่เกิดขึ้นจากตะขอบนลวด

ในการใส่ลวดเข้าไปในแบรกเก็ตของฟันหน้าให้ใส่ลวดด้วยแรงเบาๆให้ตรงตำแหน่งของแบรกเก็ต เมื่อลวดอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องแล้วจะพบว่ามีแรงกระทำต่อฟันทั้งสองซี่คือฟันหน้าและฟันกรามใหญ่ โดย Fm และ Mm คือ แรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ฟันกรามใหญ่ ส่วน Fi และ Mi คือแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ฟันหน้า



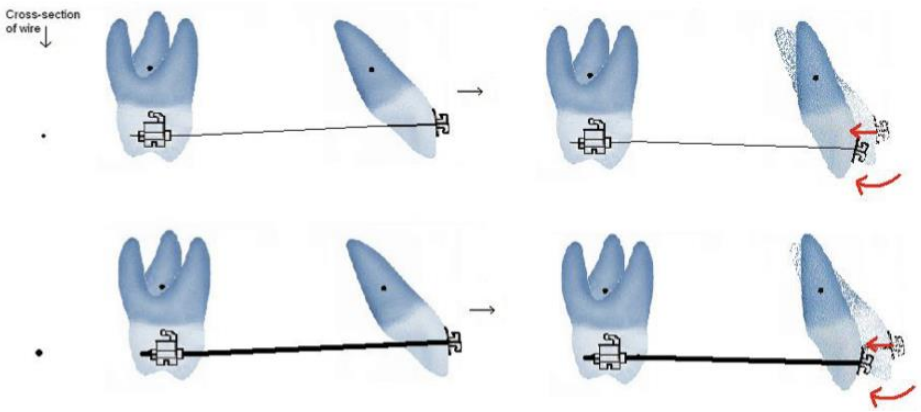
ภาพที่ 43 ผลของการเคลื่อนที่ของฟัน หลังจากการดัดลวดและตะขอบนลวดขณะที่มีการถอยฟันหน้า โดยพบว่าการเคลื่อนที่แบบล้มเอียงสามารถควบคุมได้และลดผลข้างเคียงที่เกิดขึ้น

ดังตัวอย่างที่กล่าวมานี้ แสดงให้เห็นถึงการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง สามารถให้ผลการเคลื่อนของฟันเป็นไปได้ตามที่ต้องการดังภาพที่ 43 ในการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมเมนต์และแรงนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการเคลื่อนฟันว่าต้องการเคลื่อนฟันแบบใด เช่น ในการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียง เราสามารถควบคุมและปรับอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงเพื่อให้การเคลื่อนฟันไปทิศทางที่ต้องการได้

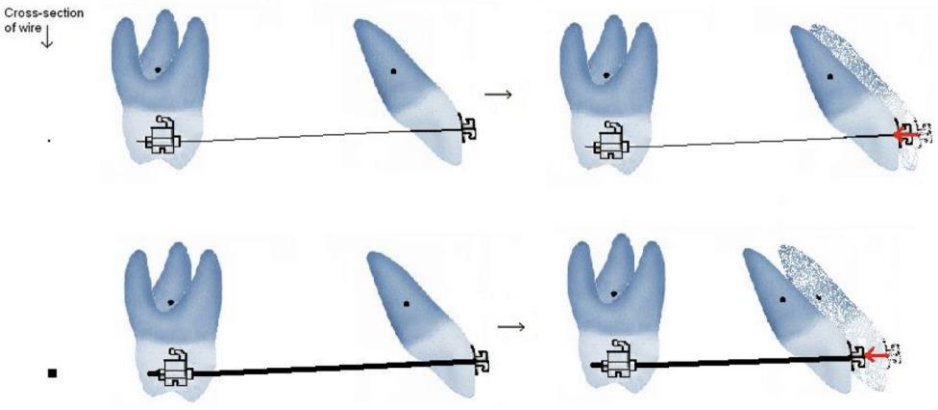
อัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงไม่เพียงได้รับผลจากแรงดึงของยางและการดัดลวดเท่านั้น แต่ชนิดของยางก็มีผลต่อปริมาณของแรงที่เกิดขึ้นในระบบ นอกจากนี้ชนิดของลวด (ลวดกลมหรือลวดเหลี่ยม) และขนาดของลวดก็มีผลต่ออัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงเช่นกัน

ถ้าใช้ลวดกลมแทนลวดเหลี่ยมจะพบว่ามีการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้ เนื่องจากฟันจะหมุนรอบลวด และแบรกเก็ตเองมีช่องใส่ลวดเป็นทรงสี่เหลี่ยมขณะที่ลวดเป็นทรงกลม ทำให้เหลือพื้นที่ระหว่างลวดและช่องใส่ลวดมาก (ภาพที่ 44) ในทางตรงกันข้ามถ้าใส่ลวดเหลี่ยมในแบรกเก็ตซึ่งมีช่องใส่ลวดเป็นทรงสี่เหลี่ยม จะมีพื้นที่ระหว่างลวดและช่องใส่ลวด

น้อยลง (ภาพที่ 45) ผลก็คือจะมีโมเมนต์ที่เกิดขึ้นขณะที่ฟันถูกดึง ซึ่งจะต้านกับโมเมนต์ที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้ นอกจากนี้ขนาดของลวดยังมีผลต่อการเคลื่อนฟันด้วย โดยลวดที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีการงอของลวดมากกว่าลวดที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นหากต้องการเคลื่อนฟันแบบเลื่อนขนานเพียงอย่างเดียวจะทำได้ดีเมื่อใช้ลวดที่มีขนาดใหญ่ เพราะจะมีการงอของลวดน้อยและลวดคงสภาพเดิมได้ดีกว่าลวดขนาดเล็ก ทั้งยังช่วยในการนำการเคลื่อนที่ให้ตรงตามชนิดของการเคลื่อนฟันตามต้องการ



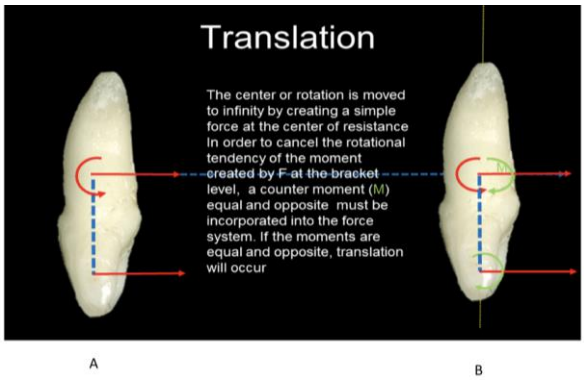
ภาพที่ 44 การดึงฟันเขี้ยวด้วยเทคนิกการเลื่อนไถลตามลวดหลัก โดยใช้ลวดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน



ภาพที่ 45 การดึงฟันเขี้ยวด้วยเทคนิกการเลื่อนไถลตามลวดหลัก โดยใช้ลวดเหลี่ยมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน

8.5 ระบบแรงเทียบเท่า (Equivalent force system)

ปัญหาของระบบแรงที่เกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น คือ การให้แรงที่ศูนย์กลางความต้านทาน ซึ่งในความเป็นจริงไม่สามารถวางแบรกเก็ตในตำแหน่งศูนย์กลางความต้านทานได้ เนื่องจากตำแหน่งนี้อยู่ที่ส่วนของรากฟัน ในการแก้ปัญหาให้พิจารณาถึงระบบแรงเทียบเท่า โดยที่ระบบแรงเทียบเท่าจะเกิดขึ้นต่อเมื่อระบบของแรงทั้งสองมีความสมดุลกันทั้งสามมิติ มีโมเมนต์ที่ขนาดเท่ากันและมีผลต่อวัตถุหรือฟันเหมือนกัน ในทางทันตกรรมจัดฟัน ระบบแรงเทียบเท่าจะให้ผลที่กระทำต่อระบบแรงเท่ากัน ถึงแม้ว่าตำแหน่งที่ให้แรงจะต่างกันไม่ว่าจะที่ตัวฟันหรือที่แบรกเก็ต จะต้องเท่ากับหรือเหมือนกับการให้แรงที่ตำแหน่งของศูนย์กลางความต้านทาน



ภาพที่ 46 ตัวอย่าง ระบบแรงเทียบเท่า

จากภาพที่ 46 ระบบแรงชนิดใดที่เกิดขึ้นที่ฟัน B เพื่อให้มีผลการเลื่อนขนานเหมือนกับที่เกิดขึ้นที่ฟัน A โดยตำแหน่งแรงที่กระทำที่ฟัน B อยู่ที่ตัวฟันไม่ใช่ที่ตำแหน่งของศูนย์กลางความต้านทานเหมือนที่ฟัน A ถ้านำระบบแรงเทียบเท่ามาพิจารณาในกรณีนี้จะพบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงจะสามารถแก้ปัญหาในเรื่องนี้ได้

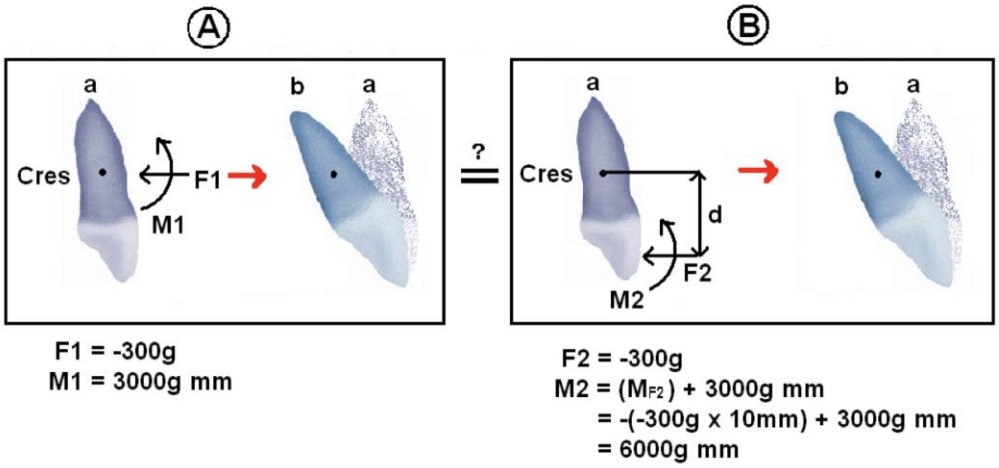
Ⓐ

F1 = -300g
ΣM = 0

Ⓑ

F2 = -300g
d = 10mm
M = F2 x d = -3000g mm
(this is the moment produced by the force F2 on the crown of the tooth)

แรง F2 เพียงแรงเดียวจะทำให้เกิดการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้ เนื่องจากมีโมเมนต์เกิดขึ้นที่ฟัน และฟันหมุนรอบตำแหน่งของศูนย์กลางความต้านทาน (Crot = Cres) ดังนั้นเพื่อจะให้มีการเลื่อนขนานของฟันในระบบแรง B ให้เหมือนกับฟันในระบบแรง A จึงต้องการโมเมนต์ที่ตัวฟันซึ่งมีทิศตรงข้ามกับโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจาก F2 ทั้งนี้เพื่อให้ผลรวมของโมเมนต์ในระบบแรง B มีค่าเป็นศูนย์เช่นเดียวกับโมเมนต์ในระบบแรง A ดังนั้นโมเมนต์ที่ต้องใช้ในระบบ คือ M = +3000 g mm.



ภาพที่ 47 แสดงการคำนวณในระบบแรงเทียบเท่าเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของรากฟัน

ในตัวอย่างนี้ระบบแรง A มีแรงและโมเมนต์กระทำที่ศูนย์กลางของแรงต้านทานเพื่อให้เกิดการเคลื่อนของรากฟันตามต้องการ ส่วนระบบแรง B มีโมเมนต์ที่เกิดจากแรง F2 เมื่อ F2 มีแรงไปกระทำที่ตัวฟันไม่ใช่ศูนย์กลางของแรงต้านทาน ดังนั้นเพื่อเป็นการต้านกับการหมุนที่เกิดขึ้น ในการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้จะต้องเพิ่มโมเมนต์ที่ตัวฟันเพื่อให้ผลลัพธ์ของแรงในระบบ B เท่ากับผลลัพธ์ของแรงในระบบ A

ข้อพึงสังเกตในการควบคุมการเคลื่อนที่ของฟัน

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดีกว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรง

ก) สำหรับการเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้ ทำได้โดยลดขนาดของโมเมนต์ หรือลดอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง

ข) สำหรับการเลื่อนขนานของฟัน ให้ปรับโมเมนต์จนกว่าจะได้ระบบแรงเทียบเท่า

ค) หลักยึดของฟันสำหรับการเคลื่อนรากฟัน เช่น การเพิ่มขนาดของโมเมนต์

ง) การเลื่อนขนานของฟันจะไม่เกิดขึ้นเพียงเพราะเพิ่มแรงไปบนวัตถุนั้นเพียงอย่างเดียว

อัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของความต้านทานเป็นตัวกำหนดผลที่มีต่อเอ็นยึดปริทันต์ ในบริเวณของเอ็นยึดปริทันต์ที่มีแรงดึงจะมีการสะสมของกระดูก ส่วนเอ็นยึดปริทันต์ที่อยู่ด้านเดียวกับการเคลื่อนที่ของฟัน จะพบมีการบีบตัวของเอ็นยึดปริทันต์ และมีการละลายตัวของกระดูก

อย่าลืมว่าขนาดของโมเมนต์ต่อแรงมีผลต่อความยาวรากและลักษณะของกระดูก เพราะระยะทางจากแบรกเก็ตไปยังศูนย์กลางของความต้านสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ดังตัวอย่างเช่น รากฟันที่สั้นกว่าต้องการอัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรงน้อยกว่าในการเลื่อนขนานของฟันเมื่อเปรียบเทียบกับฟันที่มีรากฟันที่ยาวกว่า

9. หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟัน (Anchorage)

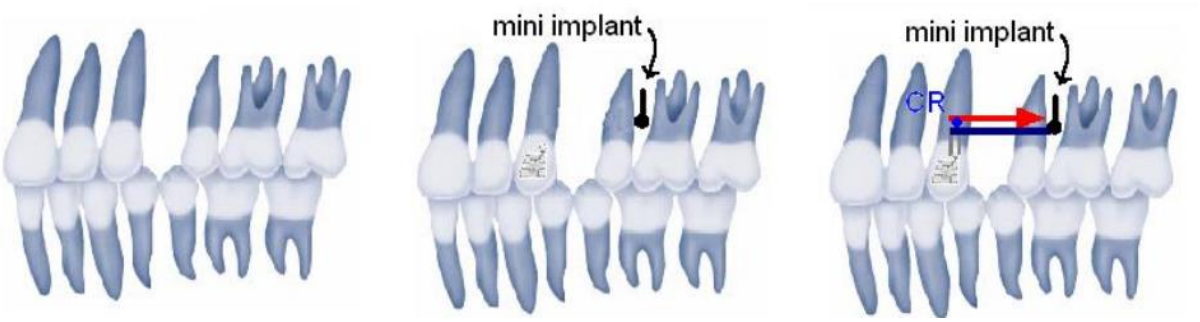
หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟัน หมายถึง “หลัก” ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานการต่อ การเคลื่อนของฟันที่ไม่พึงประสงค์ เราสามารถใช้กฎข้อที่ 3 ของนิวตันมาอธิบายได้ นั่นคือ สำหรับการกระทำใด ๆ จะมีการกระทำตรงกันข้ามที่เท่ากันเสมอ โดยในทางทันตกรรมจัดฟันนั้น ระบบแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟันจะมีแรงปฏิกิริยาในขนาดที่เท่ากันและมีทิศทางตรงกันข้าม โดยหลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันสามารถมาจากภายในขากรรไกรเดียวกันได้ ระหว่างขากรรไกร หรือภายนอกช่องปาก ซึ่งแต่ละหลักยึดนั้นจะให้ขนาดของความต้านทานของการเคลื่อนฟันที่ไม่พึงประสงค์ที่ต่างกัน ตัวอย่างของหลักยึด ได้แก่ ฟัน เพดานปาก ประสาทกล้ามเนื้อ (neuromuscular), หมุดทางทันตกรรมจัดฟัน (implants), หน้าผาก และ คาง เป็นต้น

ปริมาณของหลักยึดที่ต้องการขึ้นอยู่กับการวางแผนการรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน ตัวอย่างเช่น ในการรักษาทางทันตกรรมจัดฟันที่มีการถอนฟันร่วมด้วยนั้น ในการปิดช่องว่างมี 3 ประเภท คือ 1) การดึงส่วนของฟันหน้าไปทางด้านหลังเท่านั้น 2)การดึงส่วนของฟันหน้ามาด้านหลังร่วมกับดึงส่วนของฟันหลังมาด้านหน้า 3)การดึงส่วนฟันหลังมาด้านหน้าเท่านั้น

หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันสูงสุด (Maximum anchorage) จะเกิดขึ้นได้นั้นต้องอาศัยการใช้อุปกรณ์เสริมอย่างอื่นเพิ่มด้วย เช่นการใช้หมุดทางทันตกรรมจัดฟัน หรือการใช้เครื่องมือจัดฟันภายนอกช่องปาก เช่น เฮดเกียร์(headgear) โดยหลักยึดประเภทนี้จะอยู่ในสถานะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ในกรณีที่รักษาผู้ป่วยด้วยเครื่องมือจัดฟันชนิดติดแน่น หากปราศจากหมุดทางทันตกรรมจัดฟัน จะเกิดหลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันสูงสุดได้ยาก เพราะว่าจะมีการตอบสนองรอบ ๆฟัน (dentoalveolar response) ที่เป็นหลักยึด ทำให้หลักยึดนั้นมีการเคลื่อนที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟันที่ใช้ในช่องปาก เช่น เครื่องมือฟังค์ชั่นนอลแบบติดแน่นที่ให้หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันค่อนข้างมาก แม้ว่าจะไม่เท่ากับหลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันสูงสุดก็ตาม

การใช้หมุดทางทันตกรรมจัดฟันขนาดเล็กนั้น เป็นที่นิยมในการใช้รักษาทางทันตกรรมจัดฟันในปัจจุบัน ตัวอย่างตามภาพที่ 48 การดึงฟันเขี้ยวไปทางด้านหลังโดยใช้หมุดทางทันตกรรมจัดฟันจะเคลื่อนที่แบบเลื่อนขนาน เพราะแรงที่ให้อยู่ใกล้กับ

ศูนย์กลางของความต้านทาน แต่ในกรณีที่มีการใช้หมุดทางด้านข้างแก้มของกระดูกรอบรากฟันนั้น จะมีการเคลื่อนที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องจากฟันจะเคลื่อนที่ไปทางด้านแก้ม เราสามารถลดผลไม่พึงประสงค์นี้ได้โดยการเลือกใช้ชนิดของลวดที่เหมาะสม

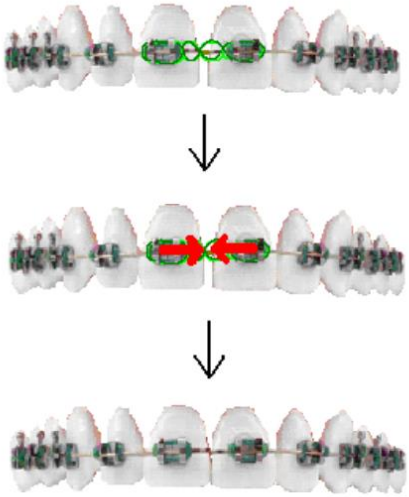


ภาพที่ 48 การใช้หมุดทางทันตกรรมจัดฟันขนาดเล็กในการเคลื่อนฟันเขี้ยว

หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันแบบปานกลาง (Moderate anchorage) เกิดขึ้นต่อเมื่อ กลุ่มของหลักยึด ยังสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่ในปริมาณที่น้อยกว่า กลุ่มของฟันที่ประสงค์จะเคลื่อน ซึ่งหลักยึดแบบปานกลางนี้ ได้แก่ เครื่องมือจัดฟันติดแน่นในช่องปาก หรือการรวมฟันหลายซี่เข้าด้วยกันทำให้ฟันเป็นกลุ่ม

เราสามารถผสมผสานกัน ระหว่าง หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันแบบสูงสุดและปานกลางได้ ตัวอย่างเช่น ผู้ป่วยจัดฟันที่รักษาร่วมกับการถอนฟันกรามน้อยซี่ที่สอง แต่ต้องการ หลีกเลี่ยงเคลื่อนฟันมาทางด้านหน้า (mesialization) ของฟันกรามแท้ซี่ที่หนึ่ง เราสามารถมัดฟันกรามแท้ซี่ที่หนึ่งและสองเข้าด้วยกัน ถ้าเราต้องการที่จะเคลื่อนส่วนของฟันหน้าทั้งหมดนั้น อาจต้องใช้ หลักยึดที่มากขึ้น เช่นให้ผู้ป่วยใส่เครื่องมือจัดฟันภายนอกช่องปากเพิ่มเติม นอกจากนั้น การเพิ่มหลักยึดทางทันตกรรมจัดฟัน นั้นสามารถทำได้โดย การเพิ่มจำนวนฟันเข้าไปในกลุ่มของหลักยึดให้มากขึ้น หรือเพิ่มหลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันภายนอกช่องปาก

จากภาพที่ 49 แสดงถึงการเคลื่อนฟันเสมือนปราศจากหลักยึด ทำให้ฟันทั้งสองด้านเคลื่อนที่เข้าหากันและกัน เช่นในการปิดช่องว่างของฟันหน้า



ภาพที่ 49 การเคลื่อนฟัน ในการปิดช่องว่างระหว่างฟัน

9.1 การนำไปใช้ (Application form)

9.1.1 การดึงฟันเขี้ยว (Canine retraction)

การปิดช่องว่างหลังจากที่ถอนฟันกรามน้อย เราสามารถดึงฟันเขี้ยวก่อน หลังจากนั้นตามด้วยการดึงฟันหน้า หรือ อีกทางเลือกหนึ่งคือการดึงฟันหน้าทั้งหกซี่พร้อมกัน (En masse retraction)

เมื่อนำหลักชีวกลศาสตร์ (Biomechanics) มาอธิบายในการดึงฟันเขี้ยวนั้น ฟันจะถูกแรงดึงไปทางด้านหลังตามเส้นลวดจัดฟัน เนื่องจากจุดที่ให้แรงอยู่ในตำแหน่งมาทางด้านบดเคี้ยวต่อจุดศูนย์กลางของความต้านทาน ทำให้มีการเคลื่อนที่แบบการล้มเอียง ซึ่งจะถูกต้านโดยแรงคู่ควบที่เกิดจากแบรกเก็ตและลวดจัดฟัน ส่งผลให้แนวแกนทางยาวของฟันมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แรงคู่ควบนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างหน้าตัด (cross-sectional shape) ของลวดจัดฟัน โดยลวดควรมีขนาดพอดีกับช่องของแบรกเก็ต เพื่อให้เกิดแรงคู่ควบ ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนขนานของฟันเขี้ยว

คำศัพท์ (Glossary)

จุดศูนย์กลางของความต้านทาน	Center of resistance, Cres
ศูนย์กลางของจุดหมุน	Center of rotation, C_{rot}
การเลื่อนขนาน	Translation
การหมุน	Rotational movement
การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมได้	Controlled tipping
การเคลื่อนฟันแบบล้มเอียงชนิดควบคุมไม่ได้	Uncontrolled tipping
อัตราส่วนของโมเมนต์ต่อแรง	Moment to force ratio
แบรกเก็ตสำหรับจัดฟัน	Orthodontic bracket
ตำแหน่งที่แรงมากระทำ	Point of application
จุดศูนย์กลางมวล	Center of mass
แนวแรงกระทำ	Line of action
วัตถุแข็งเกร็ง	Rigid body
กฎการส่งผ่านของแรง	Law of Transmissibility of Force
การหมุนที่ปราศจากการเลื่อนขนาน	Pure rotation
การเลื่อนขนานที่ปราศจากการหมุน	Pure translation
แผนภาพอิสระของวัตถุ	Free body diagram
แผ่นกระดูกด้านแก้ม	Buccal Plate
การสบฟันผิดปกติประเภทที่ 2 ดิวิชั่น 1	Class II Division I Malocclusion

การเคลื่อนที่ของรากฟัน	Root movement
กระบวนการละลายตัวของกระดูก	Bone resorption
การเอนออก	Proclination
ประสาทกล้ามเนื้อ	Neuromuscular
หมุดทางทันตกรรมจัดฟัน	Implants
หลักยึดทางทันตกรรมสูงสุด	Maximum anchorage
กลุ่มของหลักยึด	Anchored Unit
การตอบสนองรอบฟัน	Dentoalveolar response
หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันแบบปานกลาง	Moderate anchorage
การเคลื่อนฟันมาทางด้านหน้า	Mesialisation
หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันที่อยู่ภายนอกช่องปาก	Extraoral anchorage
หลักยึดทางทันตกรรมจัดฟันแบบซึ่งกันและกัน	Reciprocal anchorage
การดึงโดยการเคลื่อนที่ของฟันเขี้ยว	Canine retraction
การเพิ่มความยาวของตัวฟัน	Clinical crown lengthening