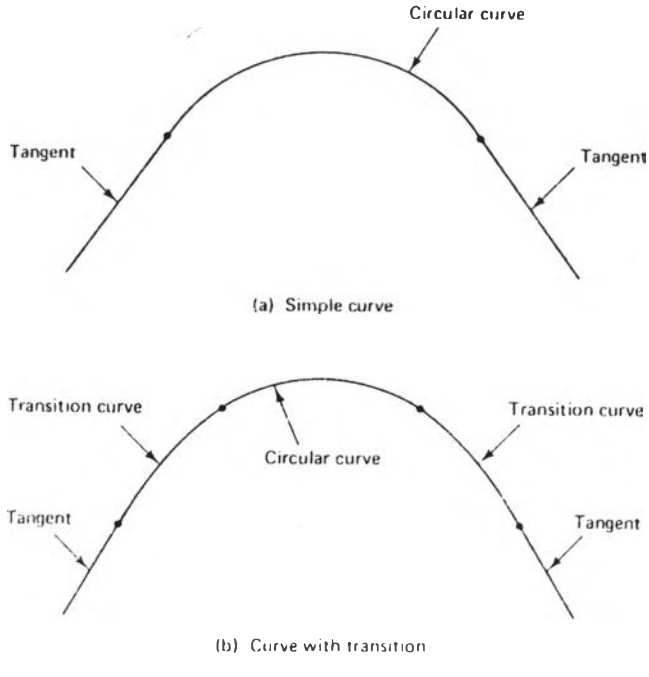
บทที่ 3

การออกแบบทางเรขาคณิตของแนวทางราบ

3.1 บทนำ

การออกแบบแนวเส้นทางทางหลวงที่สมดุลย์ องค์ประกอบต่าง ๆ ของทางหลวงจะต้องมีคุณสมบัติทางเรขาคณิตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แนวเส้นทางที่สามารถให้การบริการได้อย่างปลอดภัย มีความสะดวกสบายในการขับขี่ ผู้ขับขี่สามารถขับขี่ยวดยานได้อย่างต่อเนื่องและราบรื่นในทุกสภาวะ และมีความหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุน



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบทั่วไปของแนวทางราบทางหลวง

แนวทางราบของทางหลวง ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแนวเส้นตรง (Tangent) และส่วนโค้ง (Curve) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 การออกแบบแนวทางราบของทางหลวง ก็คือการออกแบบการเปลี่ยนทิศทางของทางหลวงในแนวระนาบ องค์ประกอบสำคัญในการพิจารณาออกแบบด้านเรขาคณิตของ แนวทางราบ คือ โค้งราบ (Horizontal curve) เนื่องจาก เป็นตัวเชื่อมการแปลี่ยนทิศทางของแนวเส้นตรงของทางหลวง และ ช่วยให้ยวดยานที่วิ่งบนทางหลวงสามารถค่อย ๆ เปลี่ยนทิศทางไปตามแนวทางหลวงได้อย่างปลอดภัย โค้งราบที่ใช้กันมาก ได้แก่ โค้งวงกลม (Circular curve) และโค้งเปลี่ยนสไปรอล (Spiral curve) โค้งเหล่านี้อาจอยู่ในสภาพของโค้งเดี่ยว หรือ มีหลายโค้งต่อชนกันเป็นโค้งวงกลมรวม (Compound circular curve) ก็ได้ ทั้งนี้ เพื่อให้การเปลี่ยนทิศทางของรถ เป็นไปได้อย่างเหมาะสมกับสภาพของรถ สามารถวิ่งได้อย่างสะดวกสบายและปลอดภัย นอกจากนี้การใส่โค้งบนทางหลวงยังทำให้ประหยัดค่าก่อสร้าง เนื่องจากโค้งมีหลายชนิด และมีลักษณะทางเรขาคณิต ที่ส่งผลต่อการวิ่งของรถแตกต่างกัน

ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการพิจาณาประกอบการออกแบบแนวทางราบ หรือ กำหนดคุณสมบัติทางด้านเรขาคณิต คือ สภาพภูมิประเทศ สภาพแวดล้อม ปริมาณการจราจร คุณลักษณะของการจราจร คุณลักษณะของยานพาหนะ และความเร็วของยวดยาน ปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดมาตราฐานชั้นทาง ข้อกำหนดขั้นต่ำของการออกแบบ (Minimum Design Standard) ซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วออกแบบ (Design speed) ขนาดเขตทาง ความกว้างช่องทางจราจร ความกว้างไหล่ทาง รัศมีเลี้ยว ฯลฯ

ความเร็วออกแบบ (Design speed) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการหาความสัมพันธ์หรือกำหนดองค์ประกอบทางเรขาคณิตของแนวทาง ความเร็วออกแบบ คือ ความเร็วสูงสุดที่ผู้ขับขี่สามารถยวดยานได้อย่างปลอดภัยในสภาพที่กำหนด ความเร็วออกแบบ ที่ใช้จะต้องสมเหตุสมผลโดยพิจารณาจากความเหมาะสมของสภาพภูมิประเทศ และประเภทของทางหลวง องค์ประกอบต่าง ๆ ของทางหลวงจะขึ้นกับ ความเร็วออกแบบ เช่น การยกขอบผิวถนน (Superelevation) และระยะมองเห็น เป็นต้น ความสัมพันธ์ของความเร็วออกแบบและองค์ประกอบดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางด้านกลศาสตร์

เนื่องให้การออกแบบแนวเส้นทางของทางหลวงมีความเหมาะสมตามหลักวิศวกรรม และมีมาตรฐานข้อกำหนดขั้นต่ำเป็นไปในแนวทางเดียวกัน จึงมีการกำหนดข้อกำหนด หรือมาตรฐานการออกแบบขั้นต่ำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางดังกล่าว หน่วยงานที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับ

มากที่สุดในการกำหนดนโยบายข้อกำหนด และมาตรฐานการออกแบบทางเรขาคณิตของทางหลวง คือ AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

3.2 โค้งราบ

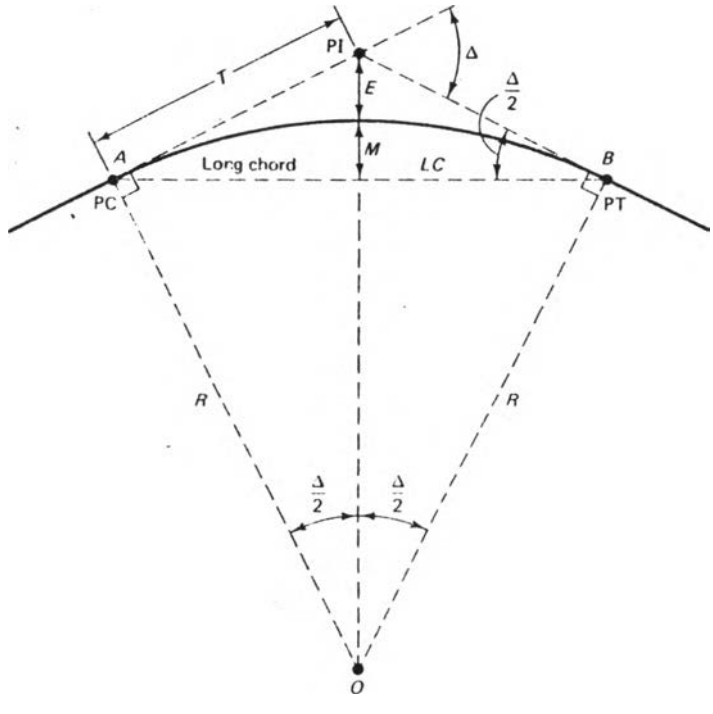
โค้งราบทำหน้าที่เชื่อมแนวเส้นตรง 2 แนว(2 ทิศทาง)ของทางหลวงเข้าด้วยกัน ในการออกแบบโค้งราบ จะต้องพิจารณาให้มีความสอดคล้องกับแนวทางหลวงช่วงที่เป็นแนวเส้นตรง และ ความเร็วออกแบบ หรือ ควรออกแบบให้แนวทาง มีลักษณะคงเส้นคงวา (Cosistency)ไม่เปลี่ยนแปลงมาก เช่นควรหลีกเลี่ยงการเชื่อมโค้งราบที่มีรัศมีสั้นกับแนวทางตรงที่มีความยาวมาก ๆ เนื่องจากจะทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย การออกแบบโค้งราบที่ดีควรออกแบบให้โค้งราบมีรัศมี และ ความยาวโค้งมาก ๆ เพื่อทำให้ผู้ขับขี่มีความรู้สึกสะดวกสบายและมีความปลอดภัยในการขับขี่ที่บริเวณโค้ง

เมื่อรถวิ่งเข้าสู่ทางโค้ง การเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ซึ่งจะถูกต้านทานโดยแรงเสียดทานระหว่างยางล้อรถกับผิวถนนและแรงเนื่องจากการยกขอบถนน (Superelevation) ดังนั้นในการออกแบบโค้งราบจะต้องพิจารณาคุณสมบัติทางเรขาคณิตของโค้ง ให้มีความสอดคล้องกับองค์ประกอบอื่น ๆ ของทางหลวงด้วย

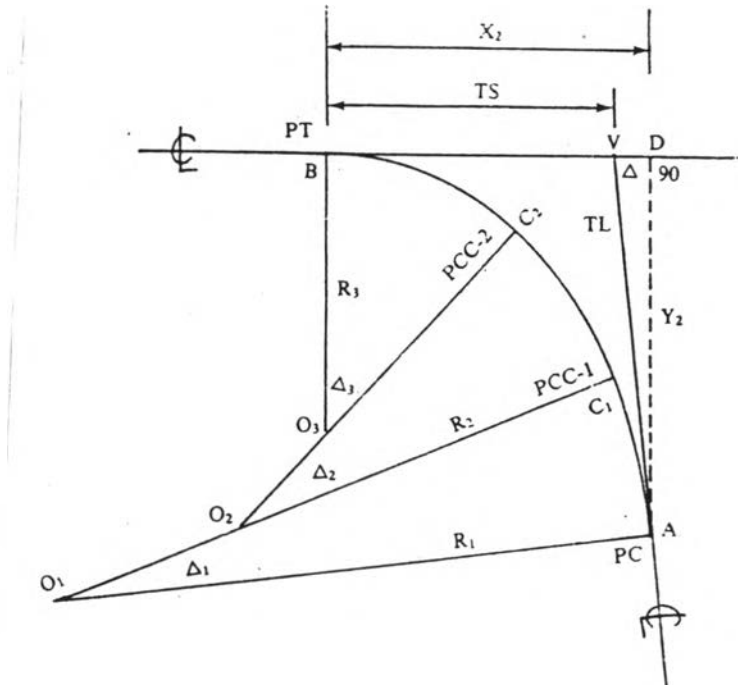
โค้งราบที่นิยมใช้ในการออกแบบแนวทางราบ คือ โค้งวงกลม (Circular curve) และโค้งเปลี่ยนสไปรอล (Spiral curve) ปัจจุบันเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านภูมิประเทศและอาคารบ้านเรือนต่าง ๆ ที่อยู่ในแนวทางของทางหลวง วิศวกรผู้ออกแบบได้เริ่มนำโค้ง Spline มาใช้หลีกเลี่ยงจุดที่เป็นข้อจำกัดดังกล่าว อย่างไรก็ตามโค้ง Spline นี้เหมาะกับการออกแบบทางหลวงในเมืองมากกว่า

3.2.1 โค้งวงกลม

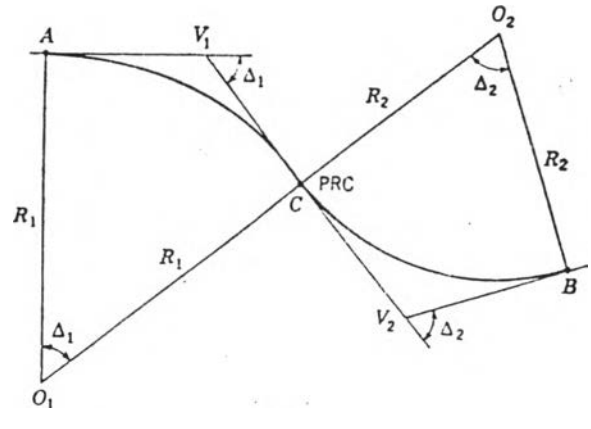
โค้งวงกลมที่นิยมใช้ในการออกแบบแนวทางราบอาจจำแนกตามลักษณะของโค้งได้ 4 ประเภท คือ โค้งวงกลมเดี่ยว (Simple circular curve) โค้งวงกลมรวม (Compound circular curve) โค้งวงกลมผกผัน (Reverse circular curve) และโค้งหลังหัก (Broken back curve) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก,ข,ค,และ ง ตามลำดับ



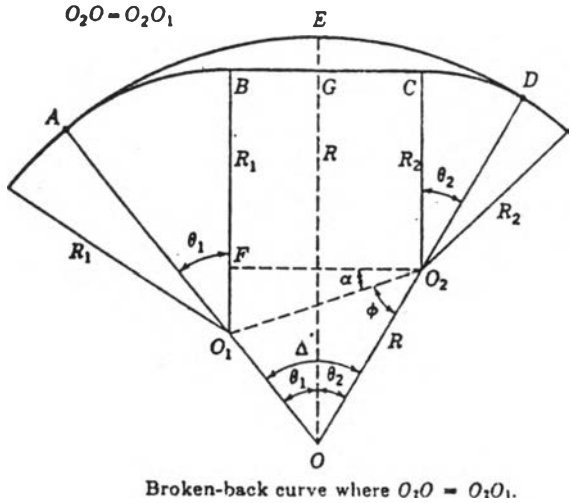
ก) โค้งวงกลมเดี่ยว



ข) โค้งวงกลมรวม



ค) โค้งวงกลมผกผัน



Broken-back curve where $O_1O = O_2O_1$.

ง) โค้งหลังหัก

รูปที่ 3.2 โค้งวงกลมที่ใช้ในงานออกแบบแนวทางราบประเภทต่าง ๆ

3.2.1.1 โค้งวงกลมเดี่ยว

โค้งวงกลมเดี่ยว คือ โค้งที่ได้จากการนำเอาส่วนหนึ่งของโค้งวงกลมวงหนึ่งมาใช้เป็นแนวสำหรับเปลี่ยนทิศทางระหว่างแนวเส้นตรง 2 แนว โค้งวงกลม เป็นโค้งที่นิยมใช้มากที่สุด เพราะง่ายต่อการคำนวณออกแบบหาค่าองค์ประกอบทางเรขาคณิต และง่ายต่อการปฏิบัติงานวางโค้งในสนาม

รูปที่ 3.3 แสดงรูปทรง และส่วนประกอบทางเรขาคณิตของโค้งวงกลมเดี่ยว ซึ่งประกอบไปด้วย

1) จุดตัดของแนวเส้นตรง (Point of intersection) หรือ จุดยอด (Vertex) , PI

2) มุมหักเหของแนวเส้นตรง (Deflection angle) , Δ

3) จุดเริ่มของโค้ง (Point of curve) , PC คือจุดที่ Backward Tangent สัมผัสกับโค้ง รถจะเริ่มเข้าสู่ทางโค้งเมื่อผ่านจุดเริ่มของโค้งแล้ว

4) จุดปลายโค้ง (Point of tangent) , PT คือจุดที่ Foreward Tangent สัมผัสกับโค้ง ณ จุดนี้รถจะออกจากโค้งและเริ่มเข้าสู่แนวเส้นตรงต่อไป

5) รัศมีโค้ง (Radius) , R มีจุดศูนย์กลางที่จุด O มุมที่จุดศูนย์กลางที่รองรับส่วนโค้ง ABC จะมีค่าเท่ากับมุม Δ

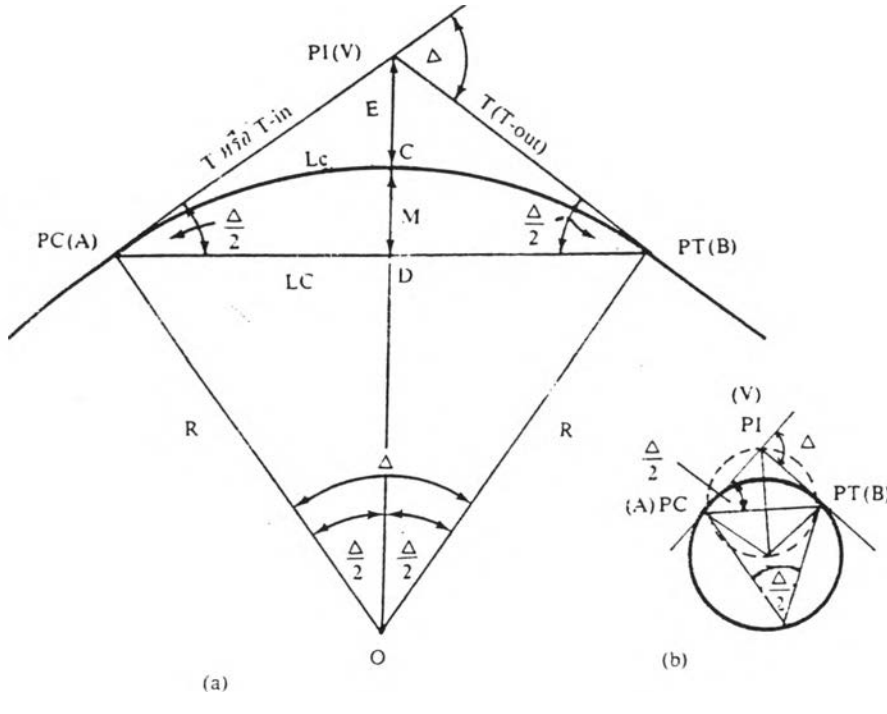
6) ความยาวเส้นสัมผัส (Tangent),T คือระยะ AV = BV

7) ระยะ AB เรียกว่า Long Chord , LC

8) ความยาว VC เรียกว่า External distance , E

9) ความยาว CD เรียกว่า Middle ordinate , M

10) ความยาวส่วนโค้ง ACB เป็นความยาวของโค้งวงกลม (Length of curve) , L



รูปที่ 3.3 รูปแบบ และองค์ประกอบทางเรขาคณิตของโค้งวงกลมเดี่ยว

โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางด้านพีชคณิต เรขาคณิตและตรีโกณมิติ เราสามารถหาความสัมพันธ์ของส่วนประกอบทางเรขาคณิต ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$T = R\tan\frac{\Delta}{2} \qquad (3.1)$$

$$L = 2R\sin\frac{\Delta}{2} \qquad (3.2)$$

$$E = R\left(\sec\frac{\Delta}{2} - 1\right) \qquad (3.3)$$

$$M = R\left(1 - \cos\frac{\Delta}{2}\right) \qquad (3.4)$$

ความยาวของรัศมีโค้งวงกลม สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางด้านกลศาสตร์ ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วออกแบบ อัตราการยกขอบถนน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทางด้านข้างของผิวทาง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.5 , 3.6

$$R = \frac{V^2}{g(e+f)} \qquad (3.5)$$

หรือ

$$R = \frac{V^2}{15(e+f)} \qquad (3.6)$$

เมื่อ

R = ความยาวรัศมีโค้งวงกลม , ฟุต

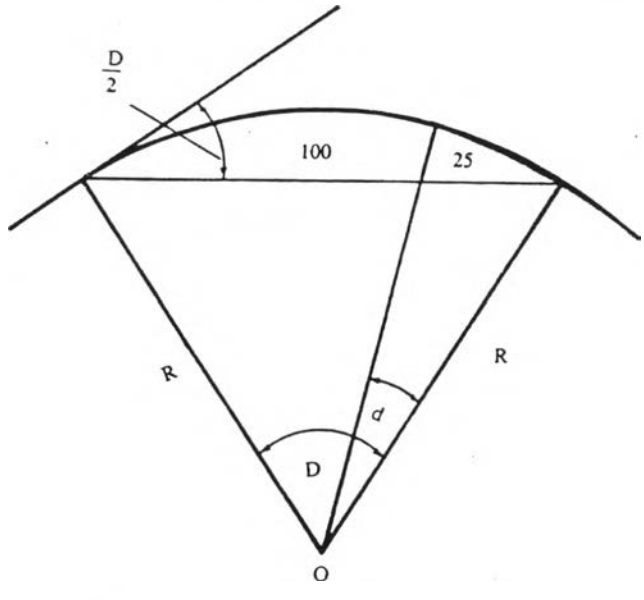
V = ความเร็วออกแบบ , ไมล์ ต่อ ชั่วโมง

e = อัตราการยกขอบถนน , ฟุต ต่อ ฟุต

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทางด้านข้าง

ในบางครั้งโค้งวงกลมอาจไม่ได้นูดในรูปของความยาวรัศมีโค้ง แต่นูดในรูปของ Degree of curve (D) แทน Degree of curve สามารถนิยามได้เป็น 2 แบบ คือ Arc definition และ Chord definition

Arc definition ให้คำนิยามว่า Degree of curve , D หมายถึงมุมที่ศูนย์กลางของวงกลมที่รองรับส่วนโค้งที่มีความยาว 1 สถานี ในงานออกแบบโค้งราบทางหลวง มักใช้วิธีนี้ในการกำหนดความยาวรัศมีของโค้งวงกลม



รูปที่ 3.4 Arc definition

$$D = \frac{a*360}{2\pi R} \qquad (3.7)$$

เมื่อ

a = ความยาวส่วนโค้ง 1 สถานี

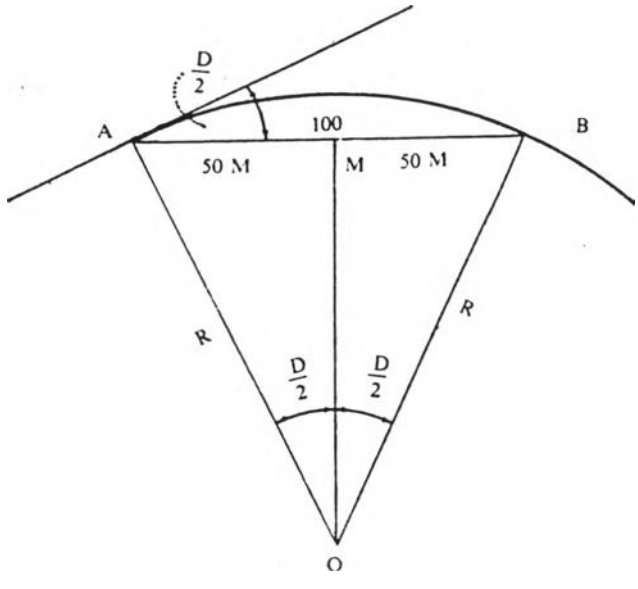
หน่วยในระบบอังกฤษใช้ความยาว 1 Station = 100 ฟุต

หน่วยในระบบเมตริกใช้ความยาว 1 Station = 25 เมตร

$$D\ (100\ \text{ฟุต}) = \frac{100*360}{2*\pi} = \frac{5729.58}{R} \quad (3.8)$$

$$D\ (25\ \text{เมตร}) = \frac{25*360}{2*\pi} = \frac{1432.395}{R} \quad (3.9)$$

Chord definition ให้คำนิยามว่า Degree of curve , D หมายถึงมุมที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่รองรับคอร์ดที่มีความยาว 1 สถานี ปกติในงานทางหลวงมักไม่ใช้วิธีนี้



รูปที่ 3.5 Chord definition

l = ความยาวส่วนคอร์ด 1 station

$$D = \text{Sin}^{-1}\left(\frac{l}{2R}\right) \quad (3.10)$$

$$D\ (100\ \text{ฟุต}) = \text{Sin}^{-1}\left(\frac{50}{2R}\right) \quad (3.11)$$

$$D\ (25\ \text{เมตร}) = \sin^{-1}\left(\frac{25}{2R}\right) \qquad (3.12)$$

3.2.1.2 <u>โค้งวงกลมรวม</u>

โค้งวงกลมรวม คือ โค้งที่ได้จากการนำเอาส่วนของเส้นรอบวงของวงกลมที่มีรัศมีต่างกันแต่มีทิศทางของโค้งไปในทิศทางเดียวกัน ตั้งแต่สองวงขึ้นไปมาเชื่อมประกอบกัน และใช้เป็นแนวสำหรับเปลี่ยนทิศทางของแนวเส้นตรงสองแนว ในการออกแบบ ควรหลีกเลี่ยง การนำเอาโค้งวงกลมตั้งแต่สองโค้งขึ้นไป ที่มีรัศมีต่างกันมาเชื่อมต่อกัน โดยควรจะแก้ไขเป็นโค้งวงกลมเดี่ยวโค้งเดียวแทน ในกรณีที่ไม่สามารถแก้ไขได้ ความยาวของรัศมีของสองโค้งไม่ควรแตกต่างกันมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

3.2.1.3 <u>โค้งวงกลมผกผัน</u>

โค้งวงกลมผกผัน คือ โค้งที่ได้จากการนำส่วนของเส้นรอบวงของวงกลมสองวงที่มีทิศทางของโค้งตรงกันข้ามกันมาเชื่อมต่อกัน ใช้เป็นแนวสำหรับเปลี่ยนทิศทางระหว่างแนวเส้นตรงสองแนว ในกรณีที่จำเป็นต้องใส่โค้งวงกลมผกผันควรจะใช้

1) โค้งเปลี่ยนสไปรอล (Transition Spirals)

2) รัศมีของความโค้งมาก ๆ

3) ในกรณีที่รัศมีของความโค้งน้อย ๆ ควรจะแก้ไขให้มีแนวเส้นตรง (Tangent) เชื่อมระหว่างโค้ง โดยให้ความยาวของแนวเส้นตรงมีค่าไม่น้อยกว่า 0.6 เท่าของความเร็วออกแบบ (0.60*V) ทั้งนี้เพื่อให้รถสามารถวิ่งได้ภายในช่องทางจราจร ช่วงเปลี่ยนจากโค้งหนึ่งสู่อีกโค้งหนึ่ง และเพื่อให้มีระยะทางเพียงพอที่จะจัดระยะทางของการยกขอบถนนได้

3.2.1.4 <u>โค้งหลังหัก</u>

โค้งหลังหัก คือ โค้งที่ได้จากการนำเอาเส้นรอบวงของวงกลมสองวงที่มีทิศทางของโค้งไปในทิศทางเดียวกัน มาเชื่อมต่อกันด้วยแนวเส้นตรงที่มี

ความยาวสั้นกว่า 0.75 เท่าของความเร็วออกแบบ (0.75*V) ใช้เป็นแนวทางสำหรับเปลี่ยนทิศทางแนวเส้นตรงสองแนว โค้งหลังหักนี้ควรจะหลีกเลี่ยงเป็นอย่างยิ่ง โดยควรแก้ไขเป็นโค้งวงกลมเดี่ยวโค้งเดียวแทน ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ให้ใช้การยกขอบถนนในช่วงแนวเส้นตรงช่วย โดยรักษาอัตราการยกขอบถนนของช่วงนี้เช่นเดียวกับช่วงตอนออกจากโค้ง

3.2.2 โค้งเปลี่ยน

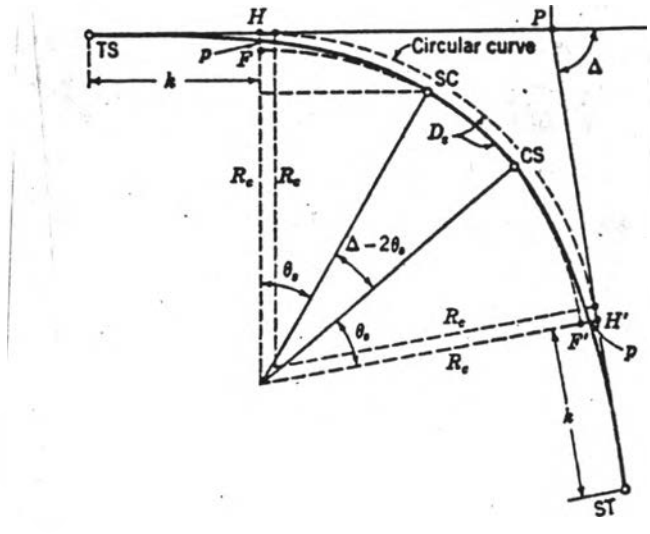
เมื่อความเร็วออกแบบมีค่าสูง การใส่เฉพาะโค้งวงกลมเชื่อมระหว่างแนวเส้นตรงในการออกแบบแนวทางราบอาจไม่เพียงพอและไม่ปลอดภัย เนื่องจากรถที่วิ่งเข้าสู่ทางโค้งด้วยความเร็วสูงอาจหลุดเข้าไปอยู่ในช่องทางจราจรที่อยู่ติดกันได้ ซึ่งจะทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย เพื่อความปลอดภัยและสะดวกสบายในการขับขี่ เรามักจะใส่โค้งเปลี่ยน (Transition Curve) แทรกระหว่างโค้งวงกลม กับ แนวเส้นตรง วัตถุประสงค์หลักของการใส่โค้งเปลี่ยนประกอบเข้ากับโค้งวงกลม พอจะสรุปได้ 4 ประการ คือ

1) เพื่อให้รถที่วิ่งด้วยความเร็วสูงผ่านจากแนวเส้นตรงเข้าสู่หรือออกจากโค้งเข้าสู่แนวเส้นตรงได้อย่างสะดวกสบาย โค้งเปลี่ยนที่ใส่ได้อย่างเหมาะสมจะเป็นทางที่รถสามารถวิ่งได้สะดวก สำหรับผู้ขับขี่ แรงหนีศูนย์กลางจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ๆ ทีละน้อย และลดลง ๆ ทีละน้อย เมื่อรถวิ่งเข้าและออกจากโค้งวงกลมตามลำดับ นอกจากนี้ยังช่วยลดการล้ำช่องการจราจรระหว่างอยู่ในโค้ง ซึ่งจะทำให้รถทั้งหมดวิ่งด้วยความเร็วสม่ำเสมอ เป็นการเพิ่มความปลอดภัย

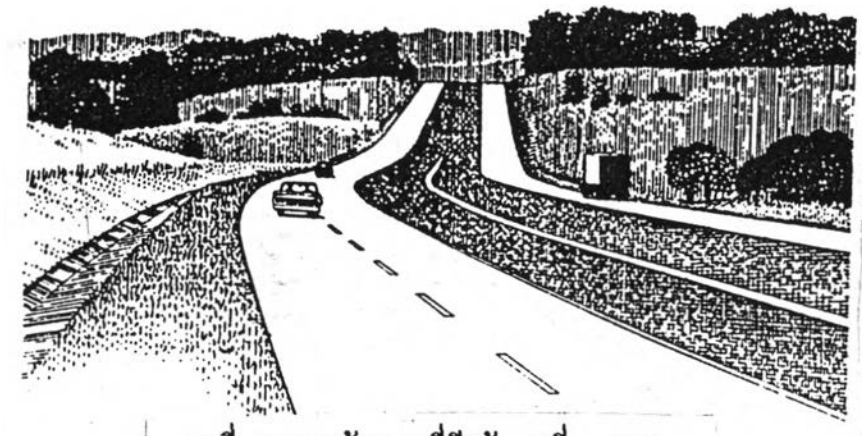
2) ใช้โค้งเปลี่ยนช่วยในการยกขอบถนน (Superelevation) การยกระดับของขอบถนนจากสภาพโค้งหลังทาง (Normal crown) ในช่วงแนวทางตรงจนเอียงเต็มที่ (Fully superelevation) ในช่วงโค้งวงกลม จะสามารถทำได้ในโค้งเปลี่ยน

3) ทำหน้าที่เป็นส่วนต่อระหว่างถนนที่กว้างธรรมดากับช่วงที่มีการขยายความกว้างในบริเวณโค้ง (Widening section)

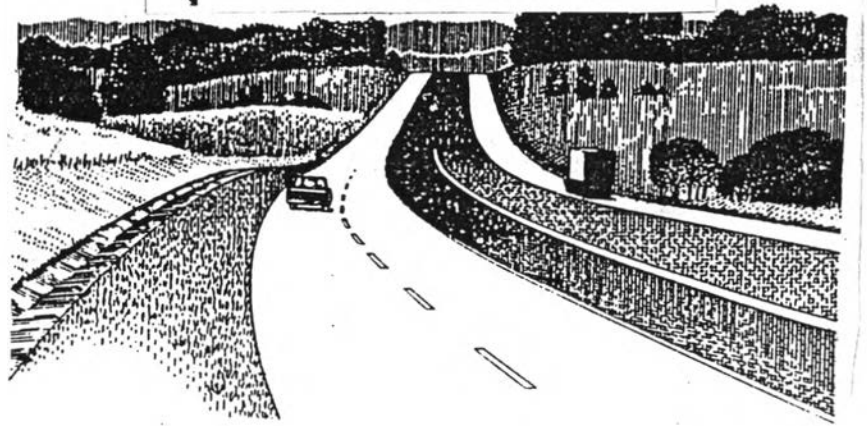
4) เพื่อช่วยให้ผู้ขับขี่เห็นภาพปรากฏของทางหลวงได้อย่างชัดเจน ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการเหยียบเบรคที่บริเวณเริ่มต้นเข้าสู่และออกจากโค้งวงกลมโดยไม่จำเป็น ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 รูปแบบและองค์ประกอบทางเรขาคณิตของโค้งเปลี่ยนสไปรอล



รูปที่ 3.7 โค้งราบที่มีโค้งเปลี่ยนสไปรอล



Curve with and without spiral transition. The sharp "corners" at the juncture of curve and straight line in the top view are quite obvious from the driver's seat.

Manmade America, New Haven, Connecticut: Christopher Tunnard and Boris Pushkarev, Yale University Press, 1963. Used by permission.

รูปที่ 3.8 โค้งราบที่ไม่มีโค้งเปลี่ยนสไปรอล

โค้งเปลี่ยนที่นิยมใช้ คือ โค้งเปลี่ยนออย์เลอร์สไปรอล (Euler Spiral) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Clothoid Degree of curve ของโค้งเปลี่ยนจะเริ่มจากศูนย์ ที่บริเวณจุดเริ่มต้นโค้งเปลี่ยนและมีค่าเท่ากับ Degree of curve ของโค้งวงกลมที่จุดเริ่มต้นของโค้งวงกลม ค่า Degree of curve ที่จุดต่าง ๆ บนโค้งสไปรอลจะเปลี่ยนไปตามความยาวของโค้งสไปรอล ในกรณีนี้ที่ใส่โค้งเปลี่ยนสไปรอลเชื่อมระหว่างโค้งวงกลมสองโค้ง ค่า Degree of vurve เริ่มต้นจะไม่เท่ากับศูนย์

สมการหาความยาวของโค้งสไปรอล พัฒนาขึ้นใน ปี พ.ศ. 2453 โดย W.H. Short. ดังแสดงในสมการที่ 3.13

$$L = \frac{3.15\ V^3}{RC} \qquad (3.13)$$

เมื่อ L = ความยาวต่ำสุดของโค้งสไปรอล , ฟุต
V = ความเร็ว , ไมล์/ชั่วโมง
R = รัศมีโค้งวงกลม , ฟุต
C = อัตราการเพิ่มขึ้นของ centripetal acceleration , ฟุต / วินาที ^{3}

ค่า C เป็นค่าเอ็มไพริกัล (Empirical value) มีค่าระหว่าง 1 ถึง 3

3.3 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบภายในโค้งราบ

เพื่อความปลอดภัย และ สะดวกสบาย ในการขับขี่ยวดยานในบริเวณทางโค้ง องค์ประกอบต่าง ๆ ของทางหลวงในบริเวณโค้งราบ จะต้องถูกออกแบบอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรมและเหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของทางหลวง องค์ประกอบที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบได้แก่ การเลือกใช้รัศมีโค้งวงกลม อัตราการยกขอบถนน ความยาวโค้งสไปรอล วิธียกขอบถนน การขยายช่องทางจราจรในบริเวณโค้งราบ และระยะมองเห็นในโค้งราบ

I 15230806

นโยบายการออกแบบทางเรขาคณิตของ AASHTO (1984) ได้กล่าวถึงลักษณะความสัมพันธ์ ข้อกำหนด และ มาตรฐานการออกแบบขั้นต่ำขององค์ประกอบดังกล่าวไว้ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้รถใช้ถนนเป็นเป้าหมายหลัก การเลือกใช้ค่าต่าง ๆ ในการออกแบบขึ้นอยู่กับวิจารณญาณของวิศวกรหรือผู้ออกแบบ ซึ่งนอกจากจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยความสะดวกสบายแล้วยังต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในแง่อื่น ๆ อีก เช่น เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ การจราจร ลักษณะของยวดยาน และความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ อย่างไรก็ตามข้อกำหนดหรือมาตรฐานการออกแบบขั้นต่ำจะเป็นแนวทางให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดและเลือกใช้ค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม และ มีความปลอดภัยแก่ผู้ใช้รถใช้ถนน

3.3.1 ความโค้งสูงสุดหรือความยาวรัศมีโค้งต่ำสุด

ความโค้งสูงสุด (Maximum degree of curvature) หรือความยาวรัศมีโค้งต่ำสุด คือ ค่ากำหนดบังคับความโค้งของวงกลม ภายใต้ความเร็วออกแบบที่กำหนดสามารถคำนวณหาได้โดยใช้ค่าสูงสุดของอัตราการยกขอบถนน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างระหว่างล้อรถกับผิวถนนที่เป็นจริงในทางปฏิบัติ นั่นคือ เมื่อใช้โค้งวงกลมที่มีค่าความโค้งสูงสุด (ความยาวรัศมีโค้งต่ำสุด) จะทำให้ต้องเลือกใช้ค่าสูงสุดของอัตราการยกขอบถนนด้วย ดังนั้นค่าความโค้งสูงสุดของโค้งวงกลมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบแนวทางราบ เพราะจะเป็นตัวกำหนดการเลือกใช้ค่าอัตราการยกขอบถนนด้วย

โดยปกติแล้วโค้งวงกลมที่มีความโค้งน้อย ๆ (รัศมีโค้งยาว) เป็นสิ่งที่เราต้องการ ทั้งนี้เพื่อให้อัตราการเปลี่ยนแปลงทิศทางของรถภายในโค้งเป็นไปอย่างช้า ๆ รถสามารถวิ่งในโค้งได้โดยไม่ต้องลดความเร็วลงมามากและมีความปลอดภัย แต่บางครั้งเราไม่สามารถใช้โค้งที่มีรัศมีโค้งยาว ๆ ได้ ทั้งนี้เพื่อความประหยัดในการก่อสร้างหรือมีข้อจำกัด เนื่องจากสภาพพื้นที่ ค่าความยาวต่ำสุดของรัศมีโค้งวงกลม (Rmin) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.14

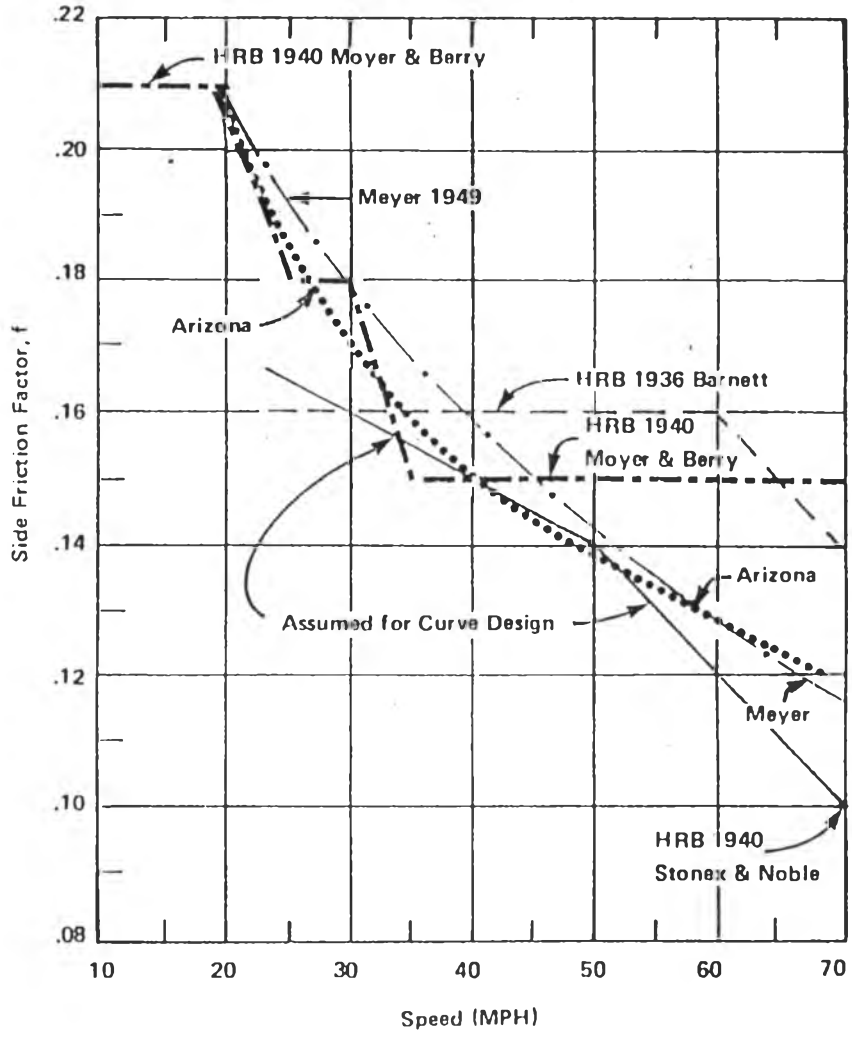
$$R_{min} = \frac{V^2}{127(e_{max} + f_{max})} \qquad (3.14)$$

และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.8 และ 3.14 เราสามารถคำนวณหาค่าความโค้งสูงสุด ได้ จากสมการที่ 3.15

$$D_{max} = \frac{85,660(c_{max}+f_{max})}{V^2} \qquad (3.15)$$

รูปที่ 3.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างของทางหลวงนอกเมืองและถนนในเมืองที่มีความเร็วสูง โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ปลอดภัยที่ยอมให้ใช้ในการออกแบบโค้ง คือ เส้นทึบที่แสดงไว้ในรูป ที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าค่าจะแปรเปลี่ยนโดยตรงกับความเร็วออกแบบ คือ มีค่าเท่ากับ 0.17 ที่ความเร็ว 20 ไมล์ต่อชั่วโมง ถึง 0.14 ที่ความเร็ว 50 ไมล์ต่อชั่วโมง และ 0.10 ที่ความเร็ว 70 ไมล์ต่อชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความโค้งสูงสุด และความยาวรัศมีต่ำสุด สำหรับค่าอัตราการยกโค้งสูงสุด 4 ค่า ที่ความเร็วออกแบบตั้งแต่ 20 ไมล์ต่อชั่วโมงถึง 70 ไมล์ต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.9 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างสำหรับทางหลวงนอกเมือง และถนนในเมือง (AASHTO, 1984)

Design Speed (mph)	Maximum e	Maximum f	Total (e + f)	Maximum Degree of Curve	Rounded Maximum Degree of Curve	Minimum Radius (ft)
20	.04	.17	.21	44.97	45.0	127
30	.04	.16	.20	19.04	19.0	302
40	.04	.15	.19	10.17	10.0	573
50	.04	.14	.18	6.17	6.0	955
60	.04	.12	.16	3.81	3.75	1,528
20	.06	.17	.23	49.25	49.25	116
30	.06	.16	.22	20.94	21.0	273
40	.06	.15	.21	11.24	11.25	509
50	.06	.14	.20	6.85	6.75	849
60	.06	.12	.18	4.28	4.25	1,348
65	.06	.11	.17	3.45	3.5	1,637
70	06	.10	.16	2.80	2.75	2,083
20	.08	.17	.25	53.54	53.5	107
30	.08	.16	.24	22.84	22.75	252
40	.08	.15	.23	12.31	12.25	468
50	08	.14	.22	7.54	7.5	764
60	.08	.12	.20	4.76	4.75	1,206
65	.08	.11	.19	3.85	3.75	1,528
70	.08	.10	.18	3.15	3.0	1,910
20	.10	.17	.27	57.82	58.0	99
30	.10	.16	.26	24.75	24.75	231
40	.10	.15	.25	13.38	13.25	432
50	.10	.14	.24	8.22	8.25	694
60	.10	.12	.22	5.23	5.25	1,091
65	.10	.11	.21	4.26	4.25	1,348
70	.10	.10	.20	3.50	3.5	1,637

NOTE: In recognition of safety considerations, use of e_{max} = 0.04 should be limited to urban conditions.

ตารางที่ 3.1 ค่าสูงสุดของ Degree of curve และความยาวรัศมีโค้งวงกลมต่ำสุด คำนวณจากค่าสูงสุดของ e และ f สำหรับทางหลวงนอกเมือง และถนนในเมือง

3.3.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้าง

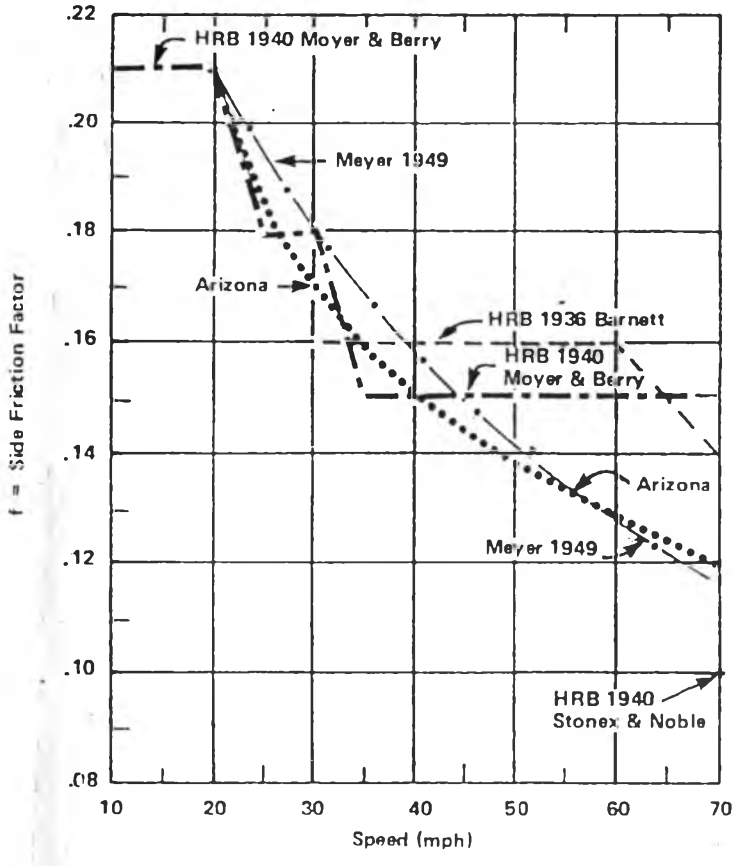
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้าง คือ อัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทาน (Friction force) หารด้วย น้ำหนักที่กระทำในแนวตั้งฉากกับผิวจราจร สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.16

$$f = \frac{V^2}{127R} - e \qquad (3.16)$$

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นกับความเร็วของรถที่วิ่ง ชนิดและสภาพของผิวทาง และชนิดและสภาพของยางล้อรถ เนื่องจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างมีค่าแตกต่างกันในสภาพที่ต่างกัน ดังนั้นค่าสูงสุด คือ ค่าที่จุดที่ล้อรถเริ่มเกิดการลื่นไถล และในการออกแบบควรใช้ค่าต่ำกว่าค่า ดังกล่าวนี้

จากการศึกษาของ AASHTO พบว่า ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้าง เมื่อยางล้อรถมีสภาพใหม่ ผิวทางเป็นคอนกรีตที่มีสภาพเปียกจะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.50 ที่ความเร็ว 20 ไมล์ต่อชั่วโมง ถึง 0.30 ที่ความเร็ว 60 ไมล์ต่อชั่วโมง และเมื่อยางล้อรถมีสภาพเรียบ ผิวทางเป็นคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียก ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วของรถมีค่าสูงขึ้น

การออกแบบโค้งไม่ควรใช้ค่าสูงสุดแต่ควรใช้ค่าสูงสุดที่ยอมให้ได้ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้รู้สึกสะดวกสบาย และ ปลอดภัยในการขับขี่ ในทางปฏิบัติค่าสูงสุดที่เลือกใช้นี้จะต้องเหมาะสม และ ใช้ได้กับสภาพผิวถนนที่แห้ง และเกิดความปลอดภัยในการขับขี่ เมื่อผิวถนนอยู่ในสภาพเปียกด้วย



รูปที่ 3.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่แนะนำให้ใช้ในการออกแบบโค้ง

3.3.3 อัตราการยกขอบถนนและอัตรการยกขอบถนนสูงสุด

เมื่อรถวิ่งเข้าสู่ทางโค้ง การเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะถูกต้านทานโดยแรงเสียดทาน ระหว่างล้อรถกับผิวถนนและแรง เนื่องจากการยกขอบถนน (Superelevation) เราสามารถคำนวณหาอัตรการยกขอบถนนได้โดยอาศัยสมการที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าที่ค่าความเร็วออกแบบและรัศมีโค้งเดียวกัน อัตรการยกขอบถนนจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับว่าเราจะเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างมากหรือน้อยเพียงใด

ณ ความเร็วออกแบบที่กำหนด อัตราการยกขอบถนนสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุด จะให้ค่าความโค้งสูงสุด (Maximum degree of curvature) ค่าสูงสุดของอัตราการยกขอบถนนจะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ และจำนวนยานพาหนะ ความเร็ว–ช้า ที่วิ่งบนถนน

ค่าสูงสุดของอัตราการยกขอบถนนสำหรับทางหลวงทั่วไป มีค่าประมาณ 0.100 ถึงแม้ว่าการกำหนดให้อัตรการยกขอบถนนมีค่าสูง ๆ จะเป็นผลดีต่อยวดยานที่วิ่งด้วยความเร็วสูงก็ตาม ในทางปฏิบัติค่าสูงสุดที่ใช้ คือ 0.120 โดยคำนึงถึงความเหมาะสม ความยากง่ายในการก่อสร้างด้วย ข้อพิจารณาในการเลือกใช้ อัตราการยกขอบถนนมี 4 ประการ คือ

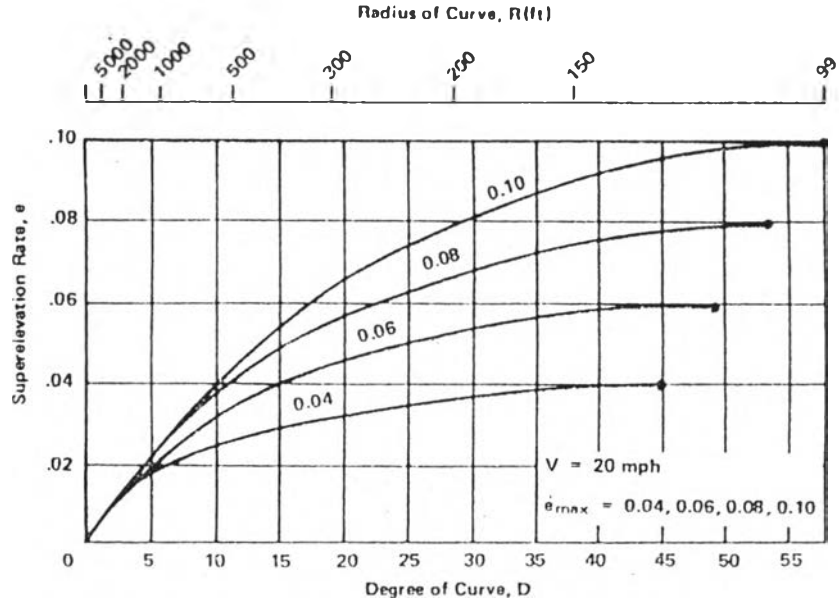
1) ควรเลือกใช้ค่าอัตราการยกขอบถนนหลาย ๆ ค่าในการออกแบบโค้งมากกว่าที่จะใช้เพียงค่าเดียว

2) อัตราการยกขอบถนนไม่ควรมีค่าเกิน 0.100

3) อัตราการยกขอบถนนสำหรับถนนในเมือง ควรใช้ค่าเท่ากับ 0.04 และ 0.06

4) อาจไม่ต้องมีการยกขอบถนนสำหรับถนนในเมืองที่มีความเร็วต่ำ

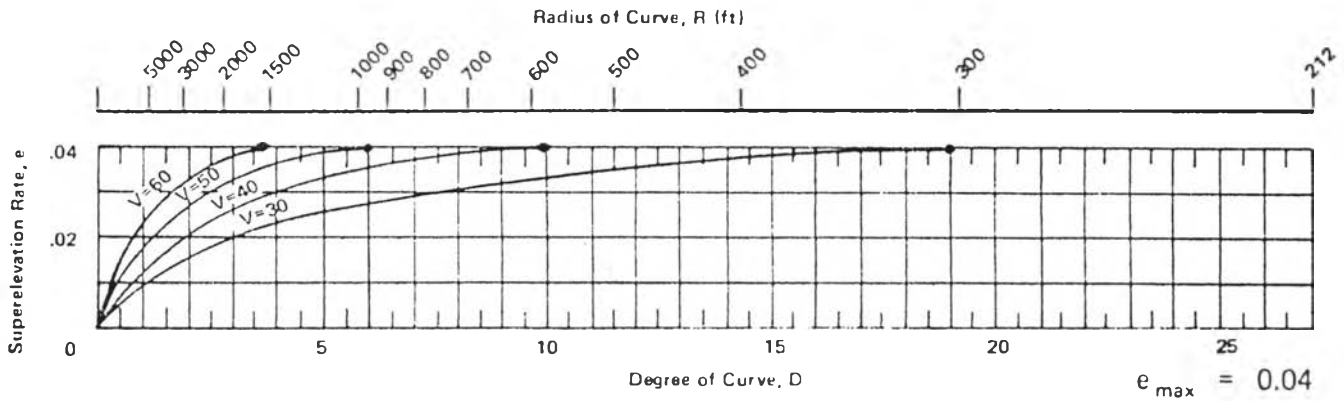
อัตราการยกขอบถนนที่แนะนำในหนังสือนโยบายการออกแบบทางเรขาคณิตทางหลวง ของ AASHTO มีค่า 0.04,0.06,0.08, และ 0.10



Note: In recognition of safety considerations, use of e_{max} = 0.04 should be limited to urban conditions.

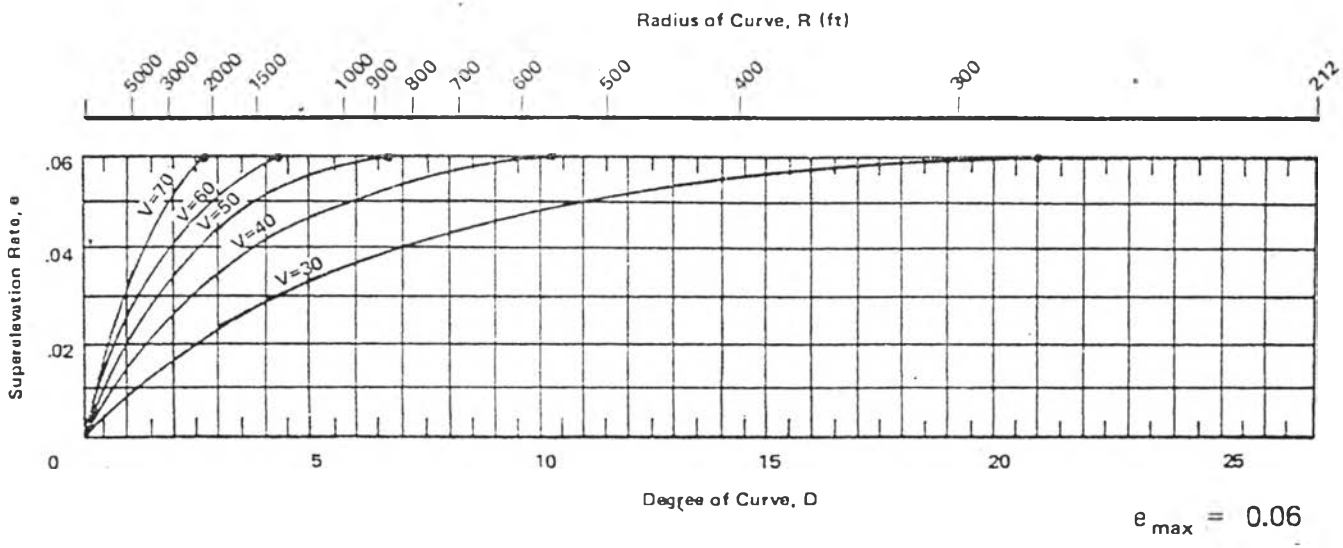
รูปที่ 3.11 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้าง

(AASHTO, 1984)

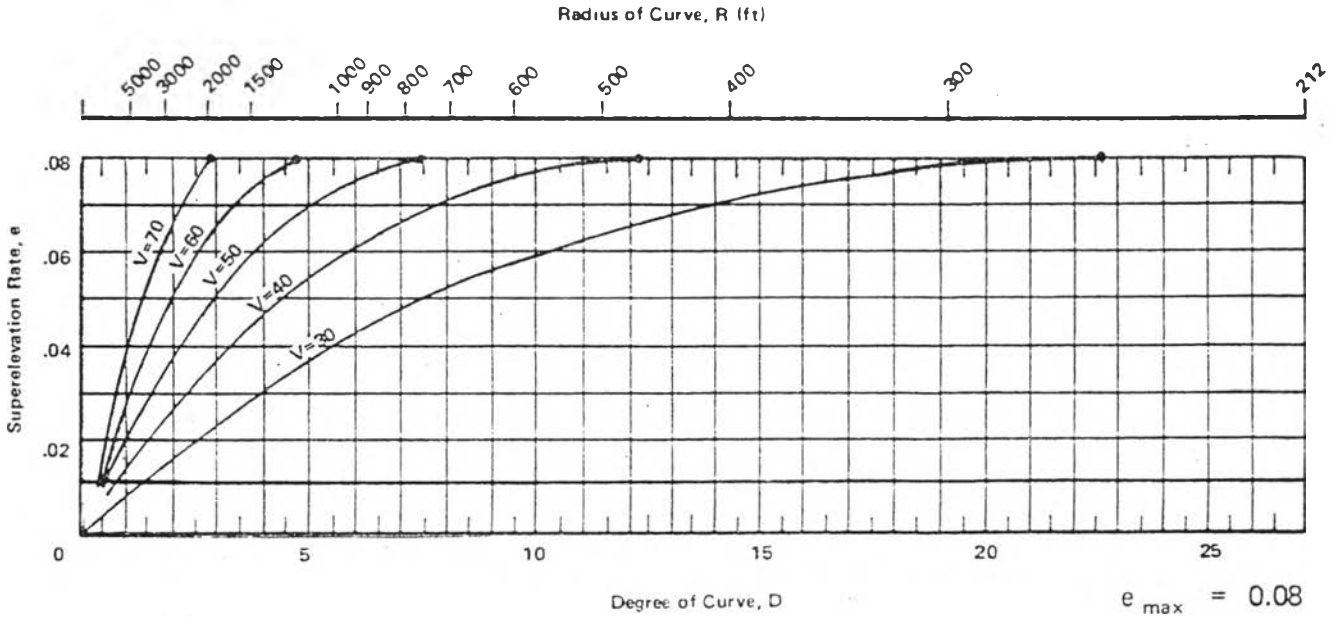


Note: In recognition of safety considerations, use of $e_{max} = 0.04$ should be limited to urban conditions.

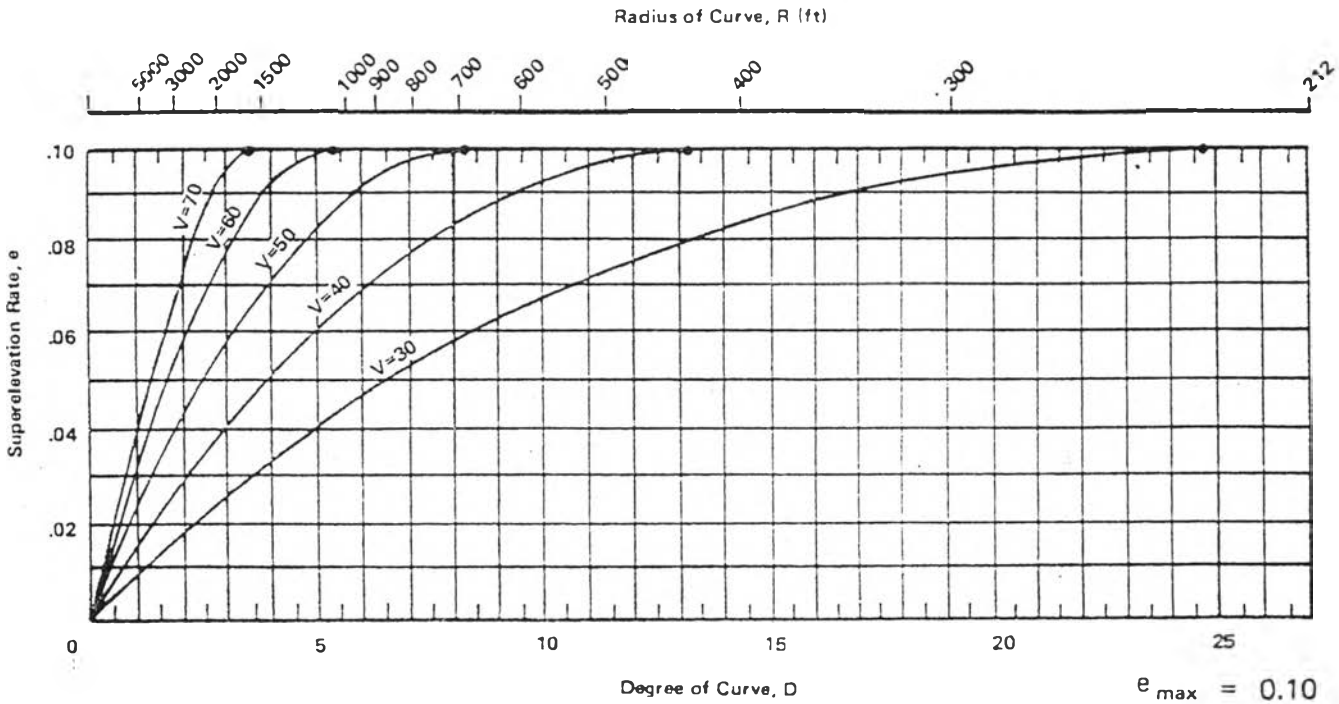
รูปที่ 3.12 ค่าออกแบบอัตราการยกขอบถนน (AASHTO, 1984)



รูปที่ 3.13 ค่าออกแบบอัตราการยกขอบถนน (AASHTO, 1984)



รูปที่ 3.14 ค่าออกแบบอัตราการยกขอบถนน (AASHTO, 1984)



รูปที่ 3.15 ค่าออกแบบอัตราการยกขอบถนน (AASHTO, 1984)

3.3.4 ความยาวโค้งสไปรอล และ Superelevation runoff

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการใส่โค้งเปลี่ยนสไปรอลต่อเชื่อมระหว่างแนวเส้นตรงกับโค้งวงกลม โค้งสไปรอลจะต้องยาวพอที่จะให้ผู้ขับขี่มีเวลาในการปรับตัวเปลี่ยนสภาพการขับขี่บนแนวทางตรงมาเป็นการวิ่งในโค้ง (บางหน่วยงานคิดความยาวโค้งสไปรอลโดยกำหนดเวลาที่ต้องการต่ำสุดเท่ากับ 4 วินาที) ในปัจจุบันมีสูตรคำนวณความยาวโค้งสไปรอลหลายสูตรซึ่งได้ค่าตอบไม่เท่ากัน และยังไม่สามารถสรุปได้เด่นชัดว่าสูตรใดจะได้ค่าความยาวโค้งที่ถูกต้องที่สุด ดังนั้นในการออกแบบไม่จำเป็นต้องพยายามคำนวณความยาวโค้งที่แม่นยำจริง ๆ ออกมา ในทางปฏิบัติมักกำหนดให้ใช้ความยาวโค้งสไปรอลเท่ากับความยาวของ Superelevation runoff

Superelevation runoff หมายถึง ระยะทางการเปลี่ยนลาดหลังทางจากช่วงลาดหลังปกติ (Normal crown) ไปถึงช่วงยกขอบถนนเต็มอัตรา (Full Superelevation) ในโค้งวงกลม ความยาวของ runoff (Length of runoff) สำหรับทางหลวง 2 ช่องทางจราจร ซึ่งมีความกว้าง 10 และ 12 ฟุต

สำหรับถนนที่มีจำนวนช่องจราจรมากกว่า 2 ช่อง AASHTO แนะนำให้ใช้ความยาวของ Superelevation runoff ดังนี้

1) ถนน 3 ช่องจราจร ให้ใช้ 1.20 เท่าของถนน 2 ช่องจราจร

2) ถนน 4 ช่องจราจร ไม่แยกทิศทาง ให้ใช้ 1.50 เท่าของถนน 2 ช่องจราจร

3) ถนน 6 ช่องจราจร ไม่แยกทิศทาง ให้ใช้ 2.00 เท่าของถนน 2 ช่องจราจร

ตารางที่ 3.3,3.4,3.5,3.6,3.7 แสดงค่าความยาว ของ Superelevation runoff ที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบการออกแบบค่าต่าง ๆ

Superelevation Rate, e	L—Length of Runoff (ft) for Design Speed (mph) of:						
	20	30	40	50	60	65	70
	12-ft lanes						
.02	30	35	40	50	55	60	60
.04	60	70	85	95	110	115	120
.06	95	110	125	145	160	170	180
.08	125	145	170	190	215	230	240
.10	160	180	210	240	270	290	300
	10-ft lanes						
.02	25	30	35	40	45	50	50
.04	50	60	70	80	90	95	100
.06	80	90	105	120	135	145	150
.08	105	120	140	160	180	190	200
.10	130	150	175	200	225	240	250
Design minimum length regardless of superelevation	50	100	125	150	175	190	200

ตารางที่ 3.2 ความยาวต่ำสุดของ Superelevation runoff สำหรับถนน 2 ช่องจราจร (AASHTO,1984)

D	R (ft)	e_{max} = 0.04, V = 20 mph: e	L (ft) Two Lanes	e_{max} = 0.08, V = 20 mph: e	L (ft) Two Lanes	e_{max} = 0.08, V = 20 mph: e	L (ft) Two Lanes	e_{max} = 0.10, V = 20 mph: e	L (ft) Two Lanes
1°00	5 730	NC	0	NC	0	NC	0	NC	0
2°00	2 866	NC	0	NC	0	NC	0	NC	0
3°00	1 910	NC	0	NC	50	NC	50	NC	50
4°00	1 432	NC	50	RC	50	RC	50	RC	50
5°00	1 146	RC	50	020	50	021	50	022	50
6°00	966	020	50	023	50	025	50	026	50
7°00	819	022	50	026	50	028	50	029	50
8°00	716	023	50	029	50	031	50	033	50
9°00	637	024	50	031	50	035	50	036	60
10°00	573	025	50	033	50	037	60	040	60
12°00	477	027	50	037	60	043	60	046	70
14°00	409	028	50	039	60	047	70	052	70
16°00	358	030	50	041	60	051	70	057	80
18°00	318	031	50	044	70	054	80	062	90
20°00	286	032	50	046	70	057	90	066	100
24°00	239	035	60	049	70	062	100	073	110
28°00	205	036	60	052	80	067	100	079	120
32°00	179	038	60	055	80	070	110	084	130
36°00	159	039	60	057	90	074	110	089	140
40°00	143	040	60	059	90	076	120	092	140
44°00	130	040	60	060	90	078	120	095	150
48°00	119	D_{max} = 45°00		060	90	079	120	098	150
52°00	110			D_{max} = 49°15'		080	120	099	150
56°00	102					D_{max} = 53°30'		100	150
								D_{max} = 58°00'	

e_{max} = 0.04, 0.06, 0.08, 0.10

D = degree of curve
R = radius of curve
V = assumed design speed
e = rate of superelevation
L = minimum length of runoff
NC = normal crown section
RC = reverse adverse crown superelevate at normal crown slope

V = 20 mph

NOTES. Speeds seldom used above heavy line

In recognition of safety considerations use of e_{max} = 0.04 should be limited to urban conditions

ตารางที่ 3.3 ค่าองค์ประกอบการออกแบบต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับความเร็วออกแบบ และ ความโค้งของโค้งราบ (AASHTO, 1984)

		V = 30 mph			V = 40 mph			V = 50 mph			V = 60 mph		
			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)	
D	R (ft)	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes
0°15'	22,918	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
0°30'	11,459	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	175	265
0°45'	7,639	NC	0	0	NC	0	0	NC	150	225	RC	175	265
1°00'	5,730	NC	0	0	NC	125	190	RC	150	225	025	175	265
1°30'	3,820	NC	100	150	RC	125	190	024	150	225	029	175	265
2°00'	2,866	NC	100	150	022	125	190	027	150	225	033	175	265
2°30'	2,292	RC	100	150	025	125	190	030	150	225	036	175	265
3°00'	1,910	020	100	150	027	125	190	033	150	225	039	175	265
3°30'	1,637	022	100	150	028	125	190	035	150	225	040	175	265
4°00'	1,432	024	100	150	030	125	190	037	150	225			
5°00'	1,148	026	100	150	033	125	190	039	150	225			
6°00'	966	028	100	150	035	125	190	040	150	225			
7°00'	819	030	100	150	037	125	190						
8°00'	716	031	100	150	039	125	190						
9°00'	637	033	100	150	040	125	190						
10°00'	573	034	100	150									
11°00'	521	035	100	150									
12°00'	477	038	100	150									
13°00'	441	037	100	150									
14°00'	409	038	100	150									
16°00'	358	039	100	150									
18°00'	318	040	100	150									
19°00'	302	040	100	150									
		D_{max} = 19°00'			D_{max} = 10°00'			D_{max} = 6°00'			D_{max} = 3°45'		

D = degree of curve
R = radius of curve
V = assumed design speed
e = rate of superelevation
L = minimum length of runoff
NC = normal crown section
RC = remove adverse crown, superelevate at normal crown slope

e_{max} = 0.04

NOTES: Spirals seldom used above heavy line.

Lengths rounded in multiples of 25 or 50 ft permit simpler calculations.

In recognition of safety considerations, use of e_{max} = 0.04 should be limited to urban conditions.

ตารางที่ 3.4 ค่าองค์ประกอบการออกแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วออกแบบ และความโค้งของโค้งราบ (AASHTO, 1984)

		V = 30 mph			V = 40 mph			V = 50 mph			V = 60 mph			V = 65 mph			V = 70 mph		
			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)	
D	R (ft)	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes
0°15'	22,918	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
0°30'	11,459	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	175	175	RC	190	190	RC	200	200
0°45'	7,639	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	.021	175	175	.024	190	190	.026	200	200
1°00'	5,730	NC	0	0	NC	125	125	.020	150	150	.027	175	175	.030	190	190	.033	200	200
1°30'	3,820	NC	100	100	.020	125	125	.028	150	150	.037	175	175	.041	190	190	.046	200	200
2°00'	2,865	RC	100	100	.025	125	125	.035	150	150	.045	175	180	.050	190	210	.055	200	230
2°30'	2,292	.020	100	100	.030	125	125	.040	150	150	.051	175	200	.056	190	230	.059	200	260
3°00'	1,910	.023	100	100	.034	125	125	.045	150	160	.055	175	220	.059	190	250	D_{max} = 2°45		
3°30'	1,637	.026	100	100	.038	125	125	.048	150	170	.058	175	230	.062	190	250			
4°00'	1,432	.029	100	100	.041	125	130	.052	150	180	.060	175	240	D_{max} = 3°30					
5°00'	1,146	.034	100	100	.046	125	140	.056	150	200	D_{max} = 4°15								
6°00'	955	.038	100	100	.050	125	160	.056	150	210									
7°00'	819	.041	100	110	.053	125	170	D_{max} = 6°45											
8°00'	716	.043	100	120	.056	125	180												
9°00'	637	.046	100	120	.058	125	180												
10°00'	573	.048	100	130	.059	125	190												
11°00'	521	.050	100	140	.060	130	190												
12°00'	477	.052	100	140	D_{max} = 11°15														
13°00'	441	.054	100	140															
14°00'	409	.056	100	150															
16°00'	358	.058	100	160															
18°00'	318	.059	110	160															
20°00'	286	.060	110	160															
21°00'	273	.060	110	160															
D_{max} = 21°00																			

D = degree of curve
R = radius of curve
V = assumed design speed
e = rate of superelevation
L = minimum length of runoff
NC = normal crown section
RC = remove adverse crown, superelevate at normal crown slope

e_{max} = 0.06

NOTES: Spirals seldom used above heavy line

Lengths rounded in multiples of 25 or 50 ft permit simpler calculations

ตารางที่ 3.5 ค่าองค์ประกอบการออกแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วออกแบบ และความโค้งของโค้งราบ (AASHTO, 1984)

		V = 30 mph			V = 40 mph			V = 50 mph			V = 60 mph			V = 65 mph			V = 70 mph		
			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)	
D	R (ft)	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes
0°15'	22,918	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
0°30'	11,459	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	175	175	RC	190	190	NC	200	200
0°45'	7,639	NC	0	0	NC	0	0	RC	150	150	022	175	175	025	190	190	028	200	200
1°00'	5,730	NC	0	0	NC	125	125	021	150	150	029	175	175	032	190	190	036	200	200
1°30'	3,820	NC	100	100	021	125	125	030	150	150	041	175	175	046	190	200	051	200	240
2°00'	2,865	RC	100	100	027	125	125	038	150	150	051	175	210	058	190	250	065	200	290
2°30'	2,292	021	100	100	033	125	125	046	150	170	061	175	240	068	190	300	075	220	330
3°00'	1,910	025	100	100	038	125	125	053	150	190	068	180	270	075	210	320	080	230	350
3°30'	1,637	029	100	100	043	125	140	058	150	210	074	200	300	079	220	330	D_{max} = 3°00'		
4°00'	1,432	031	100	100	047	125	150	063	150	230	078	210	310	D_{max} = 3°45'					
5°00'	1,146	038	100	100	056	125	170	071	170	260	D_{max} = 4°45'								
6°00'	956	043	100	120	062	130	190	077	180	280									
7°00'	819	048	100	130	067	140	210	080	190	280									
8°00'	716	053	100	140	071	150	220	D_{max} = 7°30'											
9°00'	637	056	100	150	075	160	240												
10°00'	573	060	110	160	078	150	240												
11°00'	521	063	110	170	079	170	250												
12°00'	477	065	120	180	080	170	250												
13°00'	441	068	120	180	D_{max} = 12°15'														
14°00'	409	070	130	190															
16°00'	358	074	130	200															
18°00'	318	077	140	210															
20°00'	286	079	140	210															
22°00'	260	080	140	220															
		D_{max} = 22°45'																	

D = degree of curve
R = radius of curve
V = assumed design speed
e = rate of superelevation
L = minimum length of runoff
NC = normal crown section
RC = remove adverse crown, superelevate at normal crown slope

e_{max} = 0.08

NOTES: Spirals seldom used above heavy line.
Lengths rounded in multiples of 25 or 50 ft permit simpler calculations.

ตารางที่ 3.6 ค่าองค์ประกอบการออกแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วออกแบบ และความโค้งของโค้งราบ (AASHTO,1984)

		V = 30 mph			V = 40 mph			V = 50 mph			V = 60 mph			V = 65 mph			V = 70 mph		
			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)			L (ft)	
D	R ft	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes	e	Two Lanes	Four Lanes
0°15'	22,918	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
0°30'	11,459	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	175	175	RC	190	190	RC	200	200
0°45'	7,639	NC	0	0	NC	0	0	RC	150	150	.023	175	175	.025	190	190	.028	200	200
1°00'	5,730	NC	0	0	NC	125	125	.021	150	150	.030	175	175	.033	190	190	.037	200	200
1°30'	3,820	NC	100	100	.021	125	125	.031	150	150	.043	175	190	.048	190	220	.054	200	260
2°00'	2,865	RC	100	100	.029	125	125	.040	150	150	.056	175	230	.062	190	290	.070	220	330
2°30'	2,292	.021	100	100	.034	125	125	.049	150	180	.067	190	280	.075	220	330	.085	260	390
3°00'	1,910	.025	100	100	.040	125	125	.057	150	210	.077	210	320	.087	250	380	.096	280	420
3°30'	1,637	.029	100	100	.046	125	140	.065	150	240	.086	230	350	.095	270	400	.100	300	450
4°00'	1,432	.033	100	100	.051	125	160	.072	180	260	.093	250	380	.099	280	420	D_{max} = 3°30		
5°00'	1,146	.040	100	110	.061	130	190	.083	200	300	.096	270	400	D_{max} = 4°15					
6°00'	956	.046	100	120	.070	150	220	.092	220	330	D_{max} = 5°15								
7°00'	819	.053	100	140	.078	160	240	.098	240	350									
8°00'	716	.056	110	160	.084	180	260	.100	240	360									
9°00'	637	.063	120	170	.089	190	280	D_{max} = 8°15											
10°00'	573	.068	120	180	.094	200	290												
11°00'	521	.072	130	200	.097	200	310												
12°00'	477	.076	140	210	.099	210	310												
13°00'	441	.080	140	220	.100	210	320												
14°00'	409	.083	150	220	D_{max} = 13°15														
16°00'	358	.089	160	240															
18°00'	318	.093	170	250															
20°00'	286	.097	170	260															
22°00'	260	.099	180	270															
24°00'	239	.100	180	270															
		D_{max} = 24°45																	

D = degree of curve
R = radius of curve
V = assumed design speed
e = rate of superelevation
L = minimum length of runoff
NC = normal crown section
RC = remove adverse crown, superelevate at normal crown slope

e_{max} = 0.10

NOTES: Spiral seldom used above heavy line.

Lengths rounded in multiples of 25 or 50 ft permit simpler calculations.

ตารางที่ 3.7 ค่าองค์ประกอบการออกแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วออกแบบ และความโค้งของโค้งราบ (AASHTO, 1984)

3.3.5 วิธียกขอบถนน

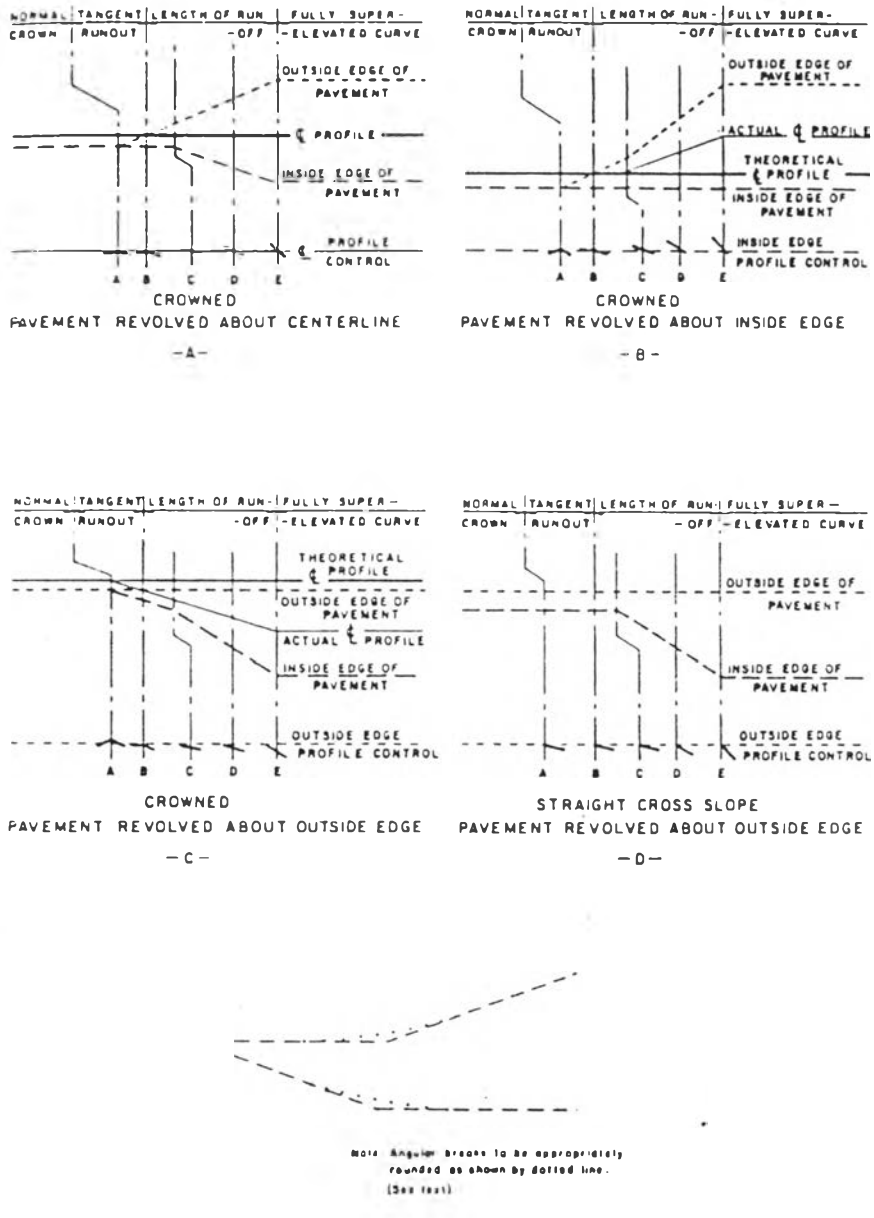
การเปลี่ยนลาดหลัง (Cross slope) ทางจากโค้งหลังทางปกติในช่วงแนวทางตรงไปเป็นยกขอบถนนเต็มอัตรา จะต้องกระทำโดยยึดความปลอดภัย และความสะดวกสบายในการขับขี่ยวดยานในบริเวณโค้งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ นอกจากนั้นขอบทางทั้งสองจะต้องไม่บิดเบี้ยว (Distortion) ในสายตาของผู้ขับขี่ยวดยาน

วิธีการยกขอบถนน มี 4 วิธี ด้วยกัน คือ

1) วิธีหมุนลาดหลังทางรอบศูนย์กลางทาง
2) วิธีหมุนลาดหลังทางรอบทางด้านไม่โค้ง
3) วิธีหมุนลาดหลังทางรอบขอบทางด้านนอกโค้ง
4) วิธีหมุนลาดหลังทางเป็นเส้นตรงรอบขอบทางด้านนอกโค้ง

รูปที่ 3.15 ก,ข,ค, และ ง แสดงวิธีการยกขอบถนน ทั้ง 4 วิธี ที่กล่าวมาแล้ว ตามลำดับ

การเลือกใช้วิธียกขอบถนนในแต่ละแบบ จะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับองค์ประกอบอื่น ๆ และสภาพภูมิประเทศในบริเวณดังกล่าวซึ่งเป็นการยากที่จะบอกได้ว่าวิธีใดเหมาะสมกว่ากัน อย่างไรก็ตามวิธีหมุนรอบศูนย์กลางทางเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด และสามารถปรับเปลี่ยนให้เข้ากับสภาพภูมิประเทศได้ดีที่สุด วิธีที่แสดงในรูปที่ 3.15ข เหมาะสมในกรณีที่ต้องการควบคุมระดับหลังทางที่บริเวณขอบถนนด้านในโค้ง เช่นเพื่อการระบายน้ำเป็นต้น ส่วนวิธีที่แสดงในรูปที่ 15ค และ ง เหมาะสมในกรณีที่ต้องการควบคุมระดับหลังทางที่บริเวณขอบถนนด้านนอกโค้งซึ่งจะทำให้ผู้ขับขี่มองเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 3.16 ไดอะแกรมระดับหลังทาง แสดงวิธีการยกขอบถนน
สำหรับโค้งราบที่มีทิศทางไปทางขวามือ
(AASHTO, 1984)

3.3.6 การขยายช่องทางจราจรในบริเวณทางโค้ง

วัตถุประสงค์ในการขยายช่องทางจราจรในบริเวณทางโค้ง มี 2 ประการ คือ

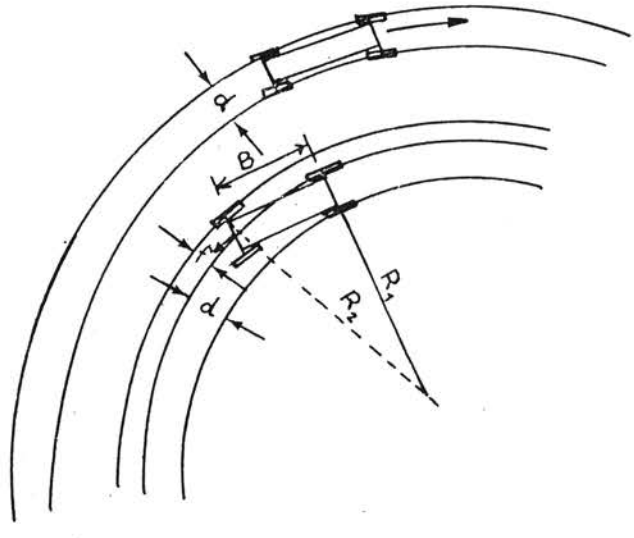
1) เนื่องจากเวลารถวิ่งเข้าสู่ทางโค้งนั้นล้อหลังของรถจะใช้รัศมีน้อยกว่าล้อหน้า เพราะฉะนั้นจึงต้องขยายช่องทางจราจรให้มากกว่าทางตรง เพื่อให้ความห่างของรถที่วิ่งสวนกัน ห่างเท่ากับมาตรฐานที่รถวิ่งในทางตรง และเพื่อให้ความเร็วคงที่เหมือนกับที่วิ่งในทางตรง

2) เพื่อผลทางจิตวิทยาของคนขับขี่ที่รู้สึกเกิดความปลอดภัยไม่เคร่งเครียดในขณะขับรถเข้าโค้ง

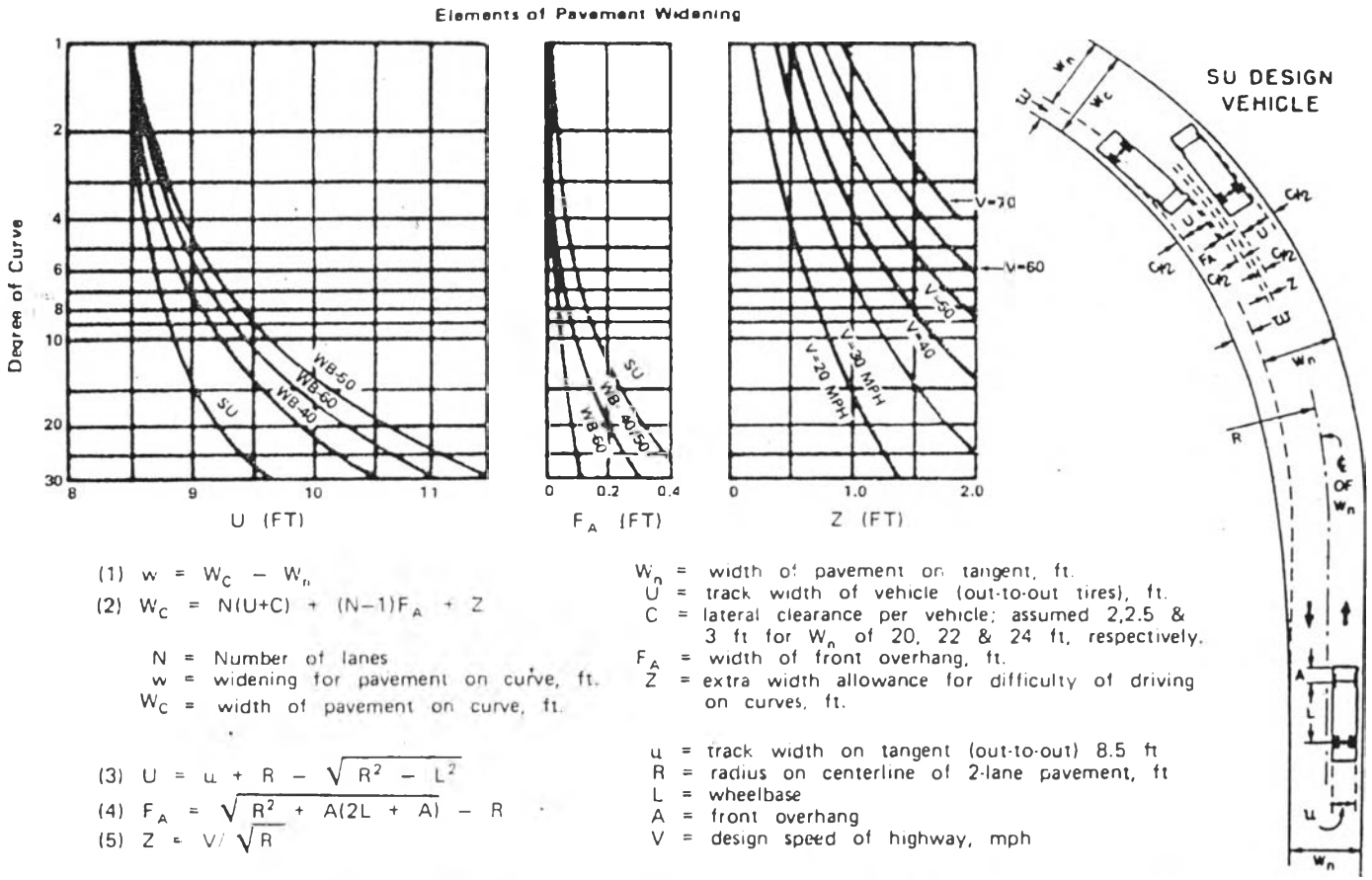
เมื่อรถวิ่งในโค้งด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วสมดุลย์ (Equilibrium Speed) แนวรอบล้อหลังจะเยื้องเข้ามาด้านในโค้งด้วยระยะ (เมื่อวัดเทียบกับทางวิ่งของล้อหน้า) เท่ากับ $R - \sqrt{R^2 - L^2}$ (ดูรูปที่ 3.17) เมื่อรถวิ่งด้วยความเร็วไม่เท่ากับความเร็วสมดุลย์แนวร่องล้อจะเยื้องเข้ามา (สู่ศูนย์กลาง) หรือถอยออกไปขึ้นกับว่าความเร็วนั้นน้อยกว่าหรือมากกว่าความเร็วสมดุลย์ ดังนั้น จึงเป็นการยากที่จะคำนวณหาความกว้างผิวจราจรที่ต้องขยายออกเพื่อรองรับแนวล้อที่ขยับไปดังกล่าว สูตรหนึ่งซึ่งแนะนำความกว้างของช่องทางจราจรที่ขยายออกสำหรับถนนสองช่องจราจร W

$$W = 2*(R - \sqrt{R^2 - L^2}) + \frac{35}{I} \qquad (3.17)$$

สมการนี้เป็นสมการแบบ Empirical โดย W,R,L มีหน่วยเป็นฟุต



รูปที่ 3.17 การขยายผิวจราจรในบริเวณโค้งราบ



(1) $w = W_C - W_n$

(2) $W_C = N(U+C) + (N-1)F_A + Z$

N = Number of lanes
w = widening for pavement on curve, ft.
W_C = width of pavement on curve, ft.

(3) $U = u + R - \sqrt{R^2 - L^2}$

(4) $F_A = \sqrt{R^2 + A(2L + A)} - R$

(5) $Z = V/\sqrt{R}$

W_n = width of pavement on tangent, ft.
U = track width of vehicle (out-to-out tires), ft.
C = lateral clearance per vehicle; assumed 2,2.5 & 3 ft for W_n of 20, 22 & 24 ft, respectively.
F_A = width of front overhang, ft.
Z = extra width allowance for difficulty of driving on curves, ft.

u = track width on tangent (out-to-out) 8.5 ft
R = radius on centerline of 2-lane pavement, ft
L = wheelbase
A = front overhang
V = design speed of highway, mph

รูปที่ 3.18 ค่าออกแบบสำหรับการขยายผิวจราจรในบริเวณโค้งราบ , 2 ช่องจราจร เดินรถทิศทางเดียว หรือ สองทิศทาง (AASHTO, 1984)

Degree of Curve	Widening (ft) for Two-Lane Pavements on Curves for Width of Pavement on Tangent of: 24 ft Design Speed (mph) 30	40	50	60	70	22 ft Design Speed (mph) 30	40	50	60	70	20 ft Design Speed (mph) 30	40	50	60
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	2.0
2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5
3	0.0	0.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5
4	0.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	3.0
5	0.5	0.5	1.0	1.0		1.5	1.5	2.0	2.0		2.5	2.5	3.0	3.0
6	0.5	1.0	1.0	1.5	–	1.5	2.0	2.0	2.5		2.5	3.0	3.0	3.5
7	0.5	1.0	1.5	–		1.5	2.0	2.5			2.5	3.0	3.5	
8	1.0	1.0	1.5			2.0	2.0	2.5			3.0	3.0	3.5	
9	1.0	1.5	2.0			2.0	2.5	3.0			3.0	3.5	4.0	
10-11	1.0	1.5				2.0	2.5				3.0	3.5		
12-14.5	1.5	2.0				2.5	3.0				3.5	4.0		
15-18	2.0					3.0					4.0			
19-21	2.5					3.5					4.5			
22-25	3.0					4.0					5.0			
26-26.5	3.5					4.5					5.5			

NOTES: Values less than 2.0 may be disregarded.

3-lane pavements: multiply above values by 1.5.

4-lane pavements: multiply above values by 2.

Where semitrailers are significant, increase tabular values of widening by 0.5 for curves of 10° to 16°, and by 1.0 for curves 17° and sharper.

ตารางที่ 3.8 ค่าออกแบบสำหรับการขยายผิวจราจรบนทางหลวงทั่วไป (2 ช่องจราจร เดินรถทางเดียว หรือ 2 ทิศทาง) (AASHTO, 1984)

3.3.7 ระยะมองเห็นในโค้งราบ

เมื่อมีอาคาร กำแพง ลาดดินตัด (Cut slope) ป่า หรือ สิ่งกีดขวางอื่น ๆ ที่อยู่ด้านในของโค้ง สิ่งเหล่านี้อาจบดบังสายตาของผู้ขับขี่ยวดยาน เมื่อออกแบบโค้งราบเสร็จแล้ว ผู้ออกแบบควรจะตรวจสอบว่าขณะที่รถวิ่งอยู่นั้นระยะมองเห็นของคนขับเป็นอย่างไร

3.3.7.1 ระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถ

สำหรับการออกแบบโค้งราบโดยทั่วไป แนวสายตาของผู้ขับขี่ในบริเวณโค้งก็คือ Chord ของโค้งนั่นเอง ระยะมองเห็นในโค้งราบจะถูกวัดไปตามแนวศูนย์กลางของช่องทางจราจรด้านในของโค้งราบ

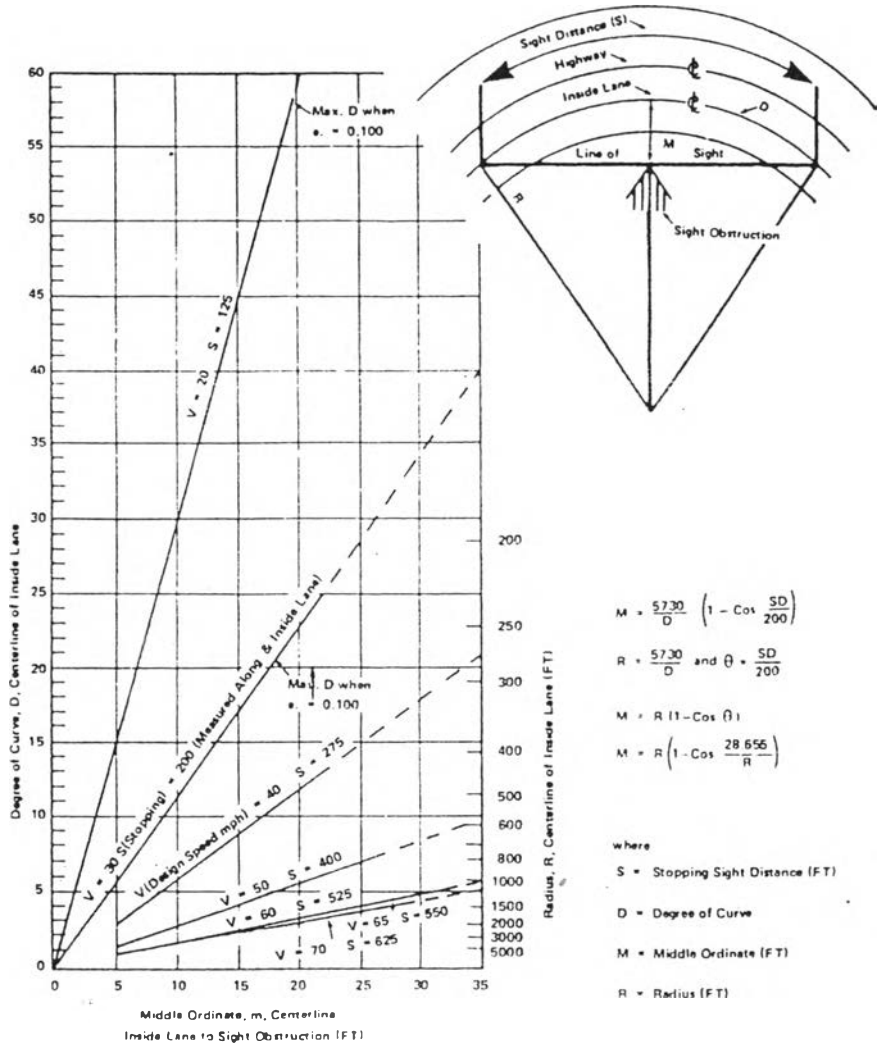
รูปที่ 3.18 ก และ ข เป็น Chart ที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งแสดงค่า Middle ordinates (M) ต่าสุด ของพื้นที่ว่างสำหรับการมองในโค้งราบ โดยเป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดของระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถที่ต้องการ สำหรับโค้งวงกลมที่มีค่าความโค้งต่าง ๆ

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าออกแบบของระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถในบริเวณโค้งราบ ซึ่งได้จากการใช้ Chart ในรูปที่ 3.18 ก และ ข

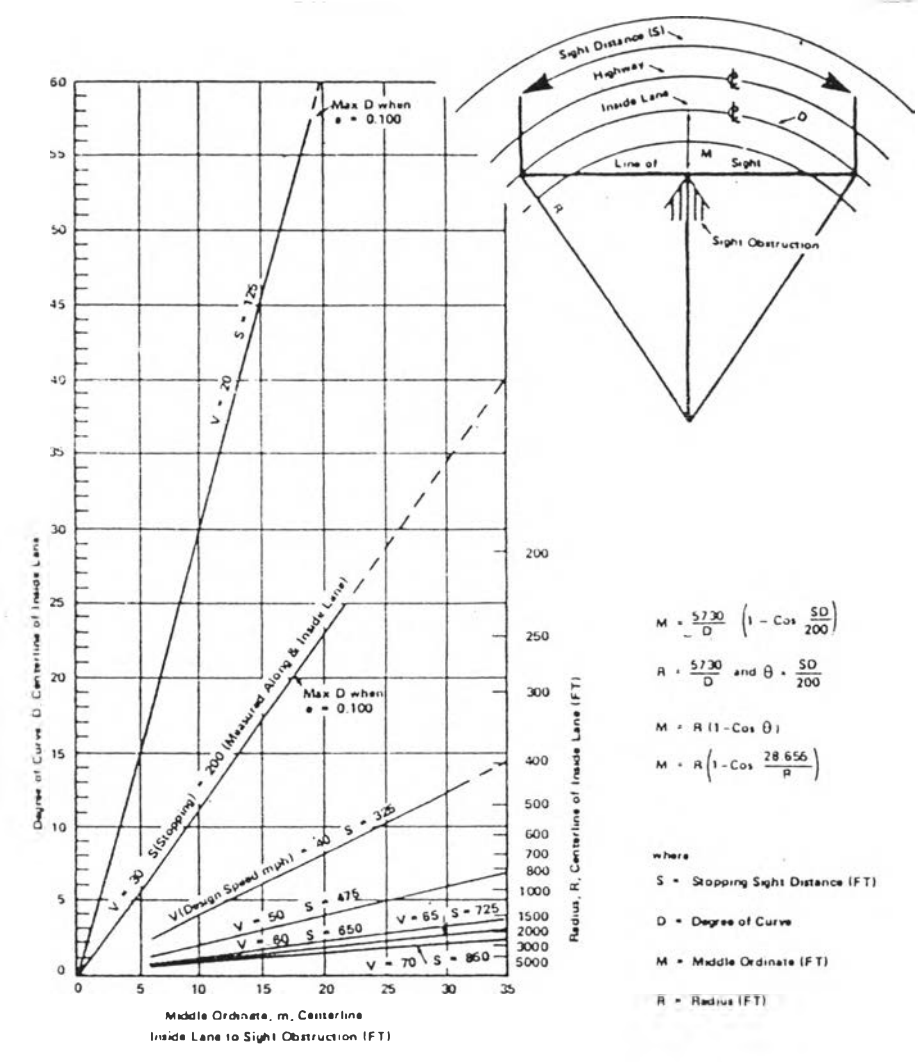
3.3.7.2 ระยะมองเห็นสำหรับการแซง

ค่าต่ำสุดของระยะมองเห็นสำหรับการแซง สำหรับทางหลวง 2 ช่องทางจราจร จะมีค่ามากกว่า ค่าระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถมากถึงประมาณ 4 เท่าที่ความเร็วออกแบบเดียวกัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะรักษาระยะมองเห็นสำหรับการแซงในบริเวณโค้งราบได้ เนื่องจากต้องการพื้นที่ว่างสำหรับการมองอย่างมหาศาล

รูปที่ 3.18 ก และ ข อาจนำมาประยุกต์ใช้หาค่าระยะมองเห็นสำหรับการแซงได้โดยตรง แต่สามารถใช้ได้อย่างจำกัด ยกเว้นว่าโค้งราบนั้นจะมีรัศมีโค้งยาวมาก ๆ เท่านั้น ปกติในการออกแบบโค้งราบจะไม่นำเอาระยะมองเห็นสำหรับการแซงมาพิจารณา



รูปที่ 3.19ก ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of curve กับค่าของ Middle ordinate ที่จำเป็นสำหรับหาค่าระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถในโค้งราบในสภาพทั่วไปของถนน , ค่าในช่วงต่ำ (AASHTO,1984)



รูปที่ 3.19ข ความสัมพันธ์ระหว่าง Deggree of curve กับค่า Middle ordinate ที่จำเป็นสำหรับการหยุดรถในโค้งราบในสภาพทั่วไปของถนน - ค่าในช่วงสูง (AASHTO, 1984)

Design Speed (mph)	Assumed Speed for Condition (mph)	Brake Reaction		Coefficient of Friction f	Braking Distance on Level[a] (ft)	Stopping Sight Distance	
		Time (sec)	Distance (ft)			Computed[a] (ft)	Rounded for Design (ft)
20	20-20	2.5	73.3- 73.3	0.40	33.3- 33.3	106.7-106.7	125-125
25	24-25	2.5	88.0- 91.7	0.38	50.5- 54.8	138.5-146.5	150-150
30	28-30	2.5	102.7-110.0	0.35	74.7- 85.7	177.3-195.7	200-200
35	32-35	2.5	117.3-128.3	0.34	100.4-120.1	217.7-248.4	225-250
40	36-40	2.5	132.0-146.7	0.32	135.0-166.7	267.0-313.3	275-325
45	40-45	2.5	146.7-165.0	0.31	172.0-217.7	318.7-382.7	325-400
50	44-50	2.5	161.3-183.3	0.30	215.1-277.8	376.4-461.1	400-475
55	48-55	2.5	176.0-201.7	0.30	256.0-336.1	432.0-537.8	450-550
60	52-60	2.5	190.7-220.0	0.29	310.8-413.8	501.5-633.8	525-650
65	55-65	2.5	201.7-238.3	0.29	347.7-485.6	549.4-724.0	550-725
70	58-70	2.5	212.7-256.7	0.28	400.5-583.3	613.1-840.0	625-850

[a]Different values for the same speed result from using unequal coefficients of friction.

ตารางที่ 3.9 ระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถ สภาพผิวถนนเปียก

(AASHTO, 1984)

3.3.8 ข้อพิจารณาทั่วไปเกี่ยวกับการออกแบบแนวทางราบ

ในการกำหนดแนวทางราบของถนน จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายทางนั้น ควรจะยึดหลักการที่ว่า แนวถนนที่ดีนั้นจะต้อง สามารถใช้งานได้อย่างสะดวกปลอดภัย และประหยัดทั้งในแง่การก่อสร้าง การบำรุงรักษาและการใช้ทาง เมื่อได้กำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลายทางของทางหลวงแล้ว แนวทางที่เหมาะสม ควรมีลักษณะ ดังนี้

1) ณ จุดเริ่มต้น หรือจุดปลายทาง หากทางที่จะออกแบบแยกจากทางหลวงที่มีอยู่เดิมแล้ว ควรจะ

1.1) แยกออกจากทางหลวงเดิม ณ จุดที่หลังทาง (Grade) มีลักษณะเป็นที่ราบ หรือค่อนข้างราบไม่เป็นที่ต่ำสุดหรือที่ลุ่ม

1.2) เป็นจุดที่ผู้ขับขี่รถสามารถมองเห็นได้รอบด้าน

1.3) แนวแยกออกเป็นมุมฉาก ถ้าถูกบังคับด้วยลักษณะของพื้นที่ แนวทางจะต้องทำมุมเฉียงไม่น้อยกว่า 60 องศา

1.4) แนวถนนที่แยกออกจากทางหลวงเดิม ควรเป็นทางตรงประมาณ 250 เมตรแล้วจึงเลี้ยวเข้าสู่ทิศทางที่ต้องการ

2) เลือกจุดสำคัญที่แนวทางจะต้องผ่าน เช่นหมู่บ้าน โรงเรียน จุดที่ต้องการข้ามแม่น้ำ หรือจุดที่แนวจะข้ามเทือกเขา ในกรณีที่เป็นเมืองหรือหมู่บ้าน ฯลฯ หากเป็นไปได้ควรให้แนวทางเฉียดห่างไปประมาณ 1 กิโลเมตร แล้วทำทางแยกเข้า

3) เป็นแนวที่ตรงที่สุดและสั้นที่สุด เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

4) พยายามหลีกเลี่ยงบริเวณดินอ่อน แนวทางควรจะผ่าน ที่ดอน ที่สูง หลีกเลี่ยงที่ลุ่ม ที่นา และที่ทำประโยชน์อื่น ๆ

5) แนวทางผ่านใกล้แหล่งวัสดุ เพื่อประหยัดค่าก่อสร้าง

6) ควรเป็นแนวที่สามารถจัดหาเขตทางได้ง่าย และขยายเขตทางได้สะดวกในอนาคต

7) การออกแบบทางเรขาคณิตของแนวทางราบ ควรจะ

7.1) หลีกเลี่ยงโค้งหลังหัก (Broken back curve)

7.2) หลีกเลี่ยงโค้งวงกลมรวม (Compound curve) ที่มีรัศมีแตกต่างกันมากกว่า 50 เปอร์เซนต์ และหากเป็นไปได้ควรแก้ให้เป็นโค้งวงกลมเดี่ยว

7.3) ทางหลวงที่มีมาตรฐานการออกแบบสูง และช่วงที่มีความเร็วออกแบบสูง โค้งเปลี่ยนของโค้งราบ ควรออกแบบเป็นโค้งสไปรอล

7.4) หลีกเลี่ยงแนวทางตรงยาว ๆ ที่ตามด้วยโค้งที่มีรัศมีโค้งสั้น ๆ

7.5) โค้งวงกลมผกผัน (Reverse curve) ที่มีรัศมีน้อย ๆ ควรแก้ไขให้มีแนวเส้นตรงเชื่อมต่อระหว่างโค้ง โดยความยาวของแนวเส้นตรงไม่ควรน้อยกว่า 0.6 เท่าของความเร็วออกแบบ

7.6) ไม่ควรให้มีแนวทางโค้งหรือช่วงโค้งเปลี่ยนล้ำเข้าไปในช่วงของสะพาน ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ควรให้ทุกส่วนของสะพานอยู่ในโค้งวงกลมเดี่ยว

7.7) ทุกจุดวิกฤติบนทางหลวง เช่น ทางแยก ทางเชื่อม โค้งดิ่ง สะพาน ฯลฯ จะต้องออกแบบให้มีระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถอย่างเพียงพอ