

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ลักษณะการเกิดอุบัติเหตุของรถโดยสารขนาดใหญ่บนเส้นทางที่เป็นภูเขา

ลักษณะการเกิดอุบัติเหตุของรถโดยสารขนาดใหญ่ที่พบบ่อยครั้งบนทางที่เป็นภูเขาซึ่งมีรูปแบบในการเกิดอุบัติเหตุเนื่องจากการใช้ความเร็วเกินสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้ (Gillespie T.D., 1994)

2.1.1 รถพลิกคว่ำ

การพลิกคว่ำเป็นลักษณะของการเสียการควบคุมรถเมื่อเข้าโค้ง มีสาเหตุเนื่องมาจากล้อด้านในโค้งของรถยกตัวขึ้นเหนือพื้นถนน จนทำให้รถพลิกคว่ำหรือตะแคงออกนอกโค้งในที่สุด

2.1.2 รถไถลออกนอกโค้ง

การที่รถไถลออกนอกโค้ง เป็นลักษณะของการเสียการควบคุมรถเมื่อเข้าโค้งที่มีรัศมีแคบด้วยความเร็วสูงจนทำให้ล้อรถปัดและส่งผลให้รถเสียหลักไถลออกนอกโค้งไปในที่สุด

2.1.3 รถแหกโค้ง

การที่รถแหกโค้ง เป็นลักษณะที่คนขับไม่สามารถบังคับพวงมาลัยให้รถเลี้ยวไปตามโค้งได้ จึงทำให้รถหลุดออกนอกถนนในที่สุด ซึ่งการแหกโค้งลักษณะนี้ตัวรถอาจจะไม่เกิดการพลิกคว่ำก็ได้

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการเกิดอุบัติเหตุ

อุบัติเหตุเกิดขึ้นเมื่อรถเสียการควบคุม (Loss of control) และ หรือเกิดการชน การเสียการควบคุมรถเกิดขึ้นบ่อยครั้งในช่วงโค้งที่มีโอกาสจะออกนอกทางวิ่งได้ง่าย ซึ่งอาจชนหรือไม่ชนกับวัตถุข้างทางก็ได้ แต่การเสียหลักที่ทำให้รถคว่ำ หรือตะแคงอยู่บนทางก็เกิดขึ้นได้เช่นกัน

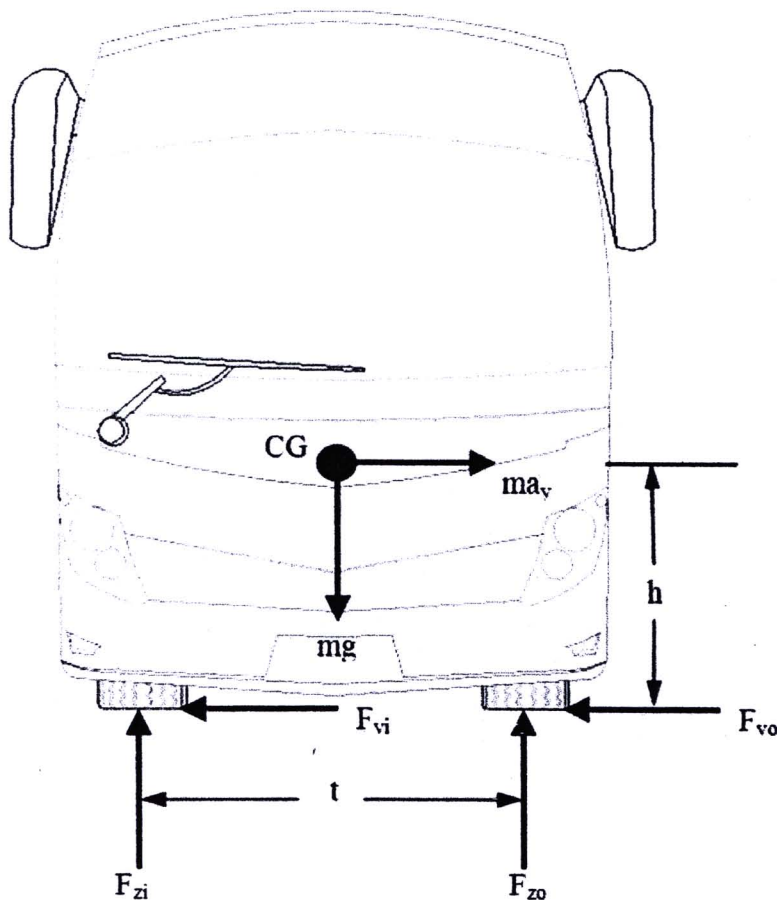
การเสียการควบคุมรถและการชนสามารถเกิดขึ้นจากลักษณะการวิ่งและลักษณะของตัวรถ ได้แก่ การพลิกคว่ำ (Rollover) การที่รถไถลออกนอกโค้ง (Sliding out of curve) และการที่รถหลุดโค้ง หรือออกนอกถนน เนื่องจากรถไม่สามารถเลี้ยวบนโค้งที่มีรัศมีแคบได้ (Fail to negotiate curve)

2.2.1 การพลิกคว่ำ (Rollover)

เมื่อรถวิ่งในโค้งราบ รถมีโอกาสที่จะไถลออกด้านนอกโค้ง หรืออาจพลิกคว่ำ โดยเฉพาะรถหนักที่จุดศูนย์กลางอยู่สูงจากพื้นและมีน้ำหนักมาก ในการวิเคราะห์การพลิกคว่ำของรถยนต์ สามารถเริ่มต้นจากแบบจำลองที่ง่าย เช่น Quasi-Static model ไปจนถึงแบบจำลองที่พิจารณาพลศาสตร์ในรถยนต์ละเอียดขึ้น (การศึกษาประยุกต์ใช้ตัวแบบหน่วยสืบสวนอุบัติเหตุจากการขนส่งและจราจร เพื่อนำไปสู่การปฏิบัติ, 2552)

Quasi-Static Model : สมมติว่า รถเป็น Rigid body

เมื่อรถยนต์ที่มีมวลเท่ากับ m จุดศูนย์กลางรถอยู่สูงจากพื้นเท่ากับ h และระยะห่างระหว่างล้อด้านในกับล้อด้านนอกเท่ากับ t กำลังวิ่งในโค้งที่มีรัศมีโค้งเท่ากับ R ด้วยความเร็วเท่ากับ v รถจะมีอัตราเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง $(a_y) = v^2 / R$ รูป 2.2-1 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับรถ



รูป 2.2-1 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับรถขณะวิ่งในโค้งราบ
(Gillespie T.D., 1994, p. 310)



โดยที่ F_{zi} และ F_{zo} แรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งที่ล้อด้านในและล้อด้านนอก ตามลำดับ

F_{yi} และ F_{yo} เป็นปฏิกิริยาในแนวราบที่ล้อด้านในและล้อด้านนอก ตามลำดับ

mg = น้ำหนักรถ

ma_y = แรงหนีศูนย์กลาง

จากรูป 2.2-1 ผลรวมของโมเมนต์ที่จุดสัมผัสระหว่างยางกับล้อด้านนอก = 0

$$ma_y h + F_{zi} t - mg \left(\frac{t}{2} \right) = 0 \quad (1)$$

เมื่อรถจะพลิกคว่ำ แรงในแนวดิ่งบนล้อด้านใน F_{zi} จะเป็น 0 เพราะฉะนั้น อัตราเร่งด้านข้าง (Lateral acceleration) ที่ทำให้พลิกคว่ำ รู้จักกันแพร่หลายว่าเป็นค่า “Rollover threshold”

$$\frac{a_y}{g} = \frac{t}{2h} \quad (2)$$

โดยที่

a_y คือ อัตราเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง

t คือ ระยะห่างระหว่างล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวา

h คือ ความสูงจากจุดศูนย์กลางถ่วงของรถถึงพื้น

Rollover threshold คือ อัตราเร่งทางด้านข้าง (Lateral acceleration) ที่ทำให้รถเริ่มพลิกคว่ำ (Gillespie T.D., 1994, p. 311) โดยอัตราเร่งสูงสุดนี้ วัดได้ในหน่วยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Acceleration of gravity, g) ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำ ตัวอย่างของ Rollover threshold ดังแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 แสดงค่าทั่วไปของ “Rollover threshold” ของรถประเภทต่างๆ

ประเภทรถ	ความสูงของจุดศูนย์กลางถ่วง, นิ้ว	ระยะห่างระหว่างล้อด้านในกับล้อด้านนอก (thread), นิ้ว	Rollover threshold
รถสปอร์ต	18-20	50-60	1.2-1.7g
รถยนต์นั่ง (Compact car)	20-23	50-60	1.1-1.5g
รถยนต์นั่งหรูหรา (Luxury car)	20-24	60-65	1.2-1.6g

ตาราง 2.1 แสดงค่าทั่วไปของ “Rollover threshold” ของรถประเภทต่างๆ (ต่อ)

ประเภทรถ	ความสูงของ จุดศูนย์กลางถ่วง, นิ้ว	ระยะห่างระหว่างล้อด้านใน กับล้อด้านนอก (thread), นิ้ว	Rollover threshold
รถกระบะ	30-35	65-70	0.9-1.1g
รถตู้โดยสาร	30-40	65-70	0.8-1.1g
รถบรรทุกขนาดกลาง	45-55	65-75	0.6-0.8g
รถบรรทุกขนาดใหญ่	60-85	70-73	0.4-0.6g

(Gillespie T.D., 1994, p. 312)

จากสมการที่ 1 ค่า Rollover threshold หาได้โดย

$$a_y = \left(\frac{t}{2h} \right) g \quad (3)$$

เมื่อ

 a_y คือ อัตราเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง t คือ ระยะห่างระหว่างล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวา h คือ ความสูงจากจุดศูนย์กลางถ่วงของรถถึงพื้น

จะเห็นว่ารถชนิดนี้จะมีค่า Rollover threshold ที่สูง การที่รถเข้าโค้งที่ทำให้เกิดอัตราเร่งด้านข้างสูงถึงค่า Rollover threshold หรือเกิดการพลิกคว่ำ เช่นถึง 1.1-1.5g นั้น แทบเป็นไปได้ เพราะรถจะไถลออกนอกโค้งเสียก่อน ส่วนในกรณีรถใหญ่ที่มีจุดศูนย์กลางถ่วงสูง รถมีโอกาสพลิกได้ง่ายขณะเลี้ยวในโค้ง

การสมมติว่ารถเป็น Rigid body ทำให้ได้ค่า Rollover threshold ที่สูงเกินไป (Over estimate) และในสถานการณ์จริง รถสามารถพลิกคว่ำได้ทั้งๆที่อัตราเร่งด้านข้าง ยังไม่ถึงค่า Rollover threshold ที่แสดงไว้ในตาราง 2.1 ดังนั้นถ้าจะให้การประมาณการค่า Rollover threshold ใกล้เคียงความจริงมากขึ้นก็ต้องพิจารณาผลจากระบบ Suspension และยางของรถ (Quasi-Static rollover with suspension) หรือเพิ่ม Roll moment of inertia ของรถเข้ามาพิจารณาด้วย (Roll Model) (Gillespie, 1994). จากโมเดลที่ปรับเปลี่ยนดังกล่าวจะพบว่า ได้ค่า Rollover threshold ที่ลดลงกว่าการสมมติว่ารถเป็น Rigid body หรือ Quasi-Static model (ดูในตาราง 2.2)

ตาราง 2.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่า Rollover threshold ของรถยนต์นั่งขนาดเล็กทั่วไป
จากโมเดลประเภทต่างๆ

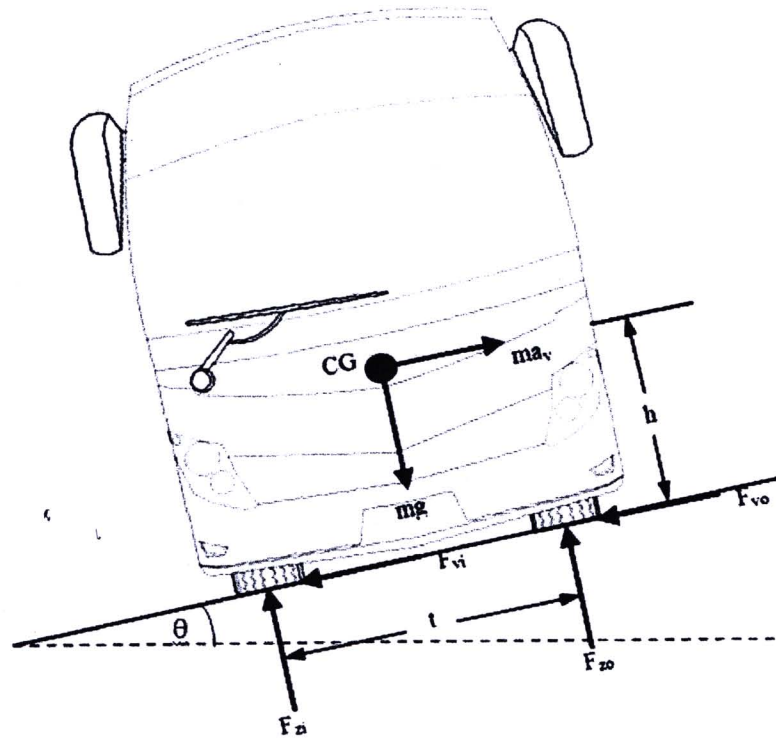
โมเดล	ค่า Rollover threshold, g	ลดลงจาก Quasi-Static Model, %
Quasi-Static	1.25	-
Quasi-Static-suspended	1.19	4.80
Roll model (Step input)	0.92	26.4
Roll model (Harmonic forcing)	0.80	36.0

(Stone R. and Ball J.K., 2004, Table 7.2, p. 342)

ค่า Rollover threshold ของรถจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบของการบรรทุกน้ำหนักเป็นอย่างมาก นอกจากตัวแปรที่ปรากฏในสมการที่ 3 แล้ว ยังมีตัวแปรอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อค่า Rollover threshold อีกซึ่งได้แก่

- น้ำหนักรวมทั้งหมดของตัวรถ
- การกระจายน้ำหนักตามยาว
- การกระจายน้ำหนักทางด้านข้าง

สำหรับการพลิกคว่ำของขยวดยานบนทางโค้งเอียง เกิดจาก โมเมนต์ที่เป็นผลมาจากแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำกับระยะความสูงของจุดศูนย์ถ่วงมีค่ามากกว่าโมเมนต์ด้านที่เกิดจากปัจจัยอื่นได้แก่ มุมลาดเอียงที่ยกขึ้นของพื้นถนน ความเร็วของรถเมื่อเข้าโค้งเอียง และมิติต่างๆของตัวรถ เป็นต้น รูป 2.2-2 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับรถขณะวิ่งบนโค้งเอียง



รูป 2.2-2 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับรถขณะวิ่งในโค้งเอียง
(อำพล ช่อตรง, 2551, p. 149)

โดยที่ F_{zi} และ F_{zo} แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งที่ล้อด้านในและล้อด้านนอก ตามลำดับ

F_{yi} และ F_{yo} เป็นปฏิกิริยาในแนวราบที่ล้อด้านในและล้อด้านนอก ตามลำดับ

mg = น้ำหนักรถ

ma_y = แรงหนีศูนย์กลาง

จากรูป 2.2-2 ผลรวมของโมเมนต์ตาม = ผลรวมของโมเมนต์ทวน จะได้

$$F_{yo} \left(\frac{t}{2} \right) = \left(F_{yi} \frac{t}{2} \right) + (F_{zi} \cdot h) + (F_{zo} \cdot h) \quad (4)$$

$$(F_{yo} - F_{yi}) \left(\frac{t}{2} \right) = (F_{zi} + F_{zo}) h \quad (5)$$

และ

$$F_{zi} + F_{zo} = \left(\frac{m}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \right) \cdot \cos \theta - m \sin \theta \quad (6)$$

เมื่อแทนค่า $F_{zi} + F_{zo}$ ลงในสมการที่ 5 จะได้

$$(F_{yo} - F_{yi}) \left(\frac{t}{2} \right) = \left[\left(\frac{m}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \right) \cdot \cos \theta - m \sin \theta \right] h \quad (7)$$

$$F_{yo} - F_{yi} = \left[m \cdot h \cdot \left(\frac{2}{t} \right) \left(\frac{v^2}{gR} \right) \cdot \cos \theta \right] - \sin \theta \quad (8)$$

ในการเกิดการพลิกคว่ำนั้น ขณะที่แรงเหวี่ยงกระทำผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงของตัวรถอยู่นั้นล้อด้านนอกโค้งจะรับภาระมากที่สุดจนล้อด้านในโค้งไม่มีภาระกระทำจนไม่เกิดแรงปฏิกิริยาที่ล้อด้านในโค้ง ดังนั้น $F_{zi} = 0$ จะได้

$$v^2 = gR \left[\frac{(h \cdot \tan \theta) + (t/2)}{h - ((t/2) \tan \theta)} \right] \quad (9)$$

ดังนั้น สมการความเร็วสูงสุดที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนทางโค้งเอียง (มีการขกโค้ง) คือ

$$v = \sqrt{gR \left[\frac{(h \cdot \tan \theta) + (t/2)}{h - ((t/2) \tan \theta)} \right]} \quad (10)$$

การคำนวณความสูงของจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of gravity, CG.)

คำนวณความสูงของจุดศูนย์กลางถ่วงโดยยึดถือการเอียงตามยาวตัวรถเป็นหลัก และควรมีการยึดระบบกันสะเทือนของตัวรถเพื่อไม่ให้เกิดการสปริงตัว การเก็บค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณได้จากวัด การวัดน้ำหนักกระทำทำได้โดยให้ตำแหน่งล้อหน้าของรถอยู่บนแท่นระดับ และแท่นระดับต้องมีความสูงเหนือพื้นเพียงพอที่จะไม่ให้น้ำรถสัมผัสพื้นเมื่อมีการเอียง เพื่อใช้ในการวัดมุม ส่วนตำแหน่งของล้อถัดไปก็อยู่บนแท่นระดับเช่นเดียวกัน จากนั้นก็ทำการยกส่วนท้ายรถขึ้น โดยจุดขับเคลื่อนต้องมีความสูงเพียงพอ (มากกว่า 25 องศา) หากมุมเพิ่มขึ้นมากเท่าไรจะทำให้ความแม่นยำในการคำนวณเพิ่มมากยิ่งขึ้น ดังรูป 2.2-2 ควรมีการหนุนล้อหน้าเพื่อไม่ให้ตำแหน่ง

ของน้ำหนักกระทำที่ล้อทั้ง 4 คลาดเคลื่อน และทำการบันทึกค่าน้ำหนักกระทำรวมถึงองศาการเอียงด้วย (วัดจากกึ่งกลางวงล้อทั้งล้อหน้าและล้อหลัง)

ดังนั้น ผลรวมโมเมนต์ที่จุดสัมผัสระหว่างล้อหน้ากับแท่นระดับ ทำให้ได้ระยะในแนวราบระหว่างล้อหน้าถึงแนวที่จุดศูนย์ถ่วงกระทำกับตัวรถ ดังสมการที่ 11

$$L_a = \frac{L_t(F_3 + F_4)}{M_k} \quad (11)$$

เมื่อ

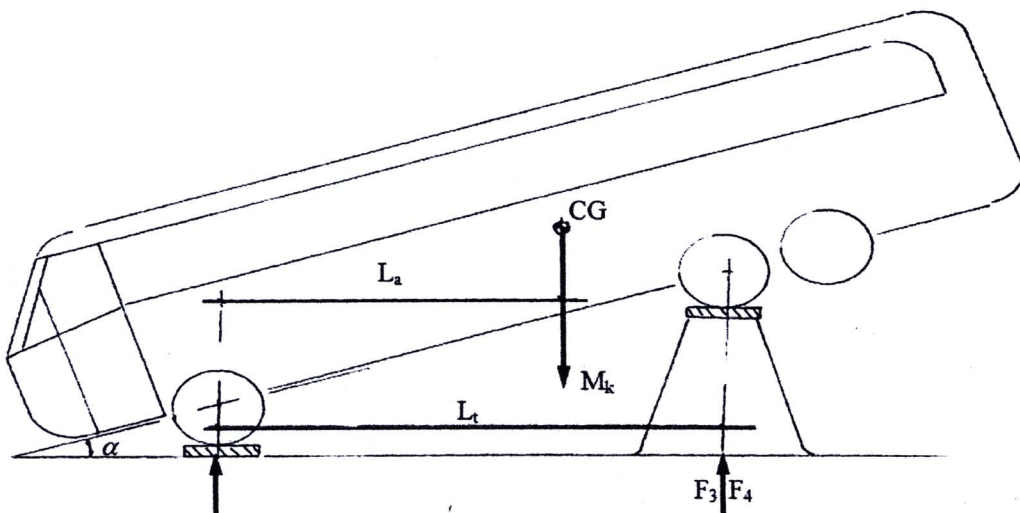
F_3 = แรงปฏิกิริยาที่กระทำกับล้อซ้ายตรงแนวเพลลาที่ 2 ของรถ

F_4 = แรงปฏิกิริยาที่กระทำกับล้อขวาตรงแนวเพลลาที่ 2 ของรถ

L_t = ระยะในแนวราบระหว่างจุดสัมผัสที่ล้อหน้าถึงจุดสัมผัสล้อหลัง

L_a = ระยะในแนวราบระหว่างจุดสัมผัสที่ล้อหน้าถึงแนวที่
จุดศูนย์ถ่วงกระทำกับตัวรถ

M_k = ผลรวมของแรงปฏิกิริยาที่กระทำทั้ง 6 ล้อ ($P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6$)



รูป 2.2-3 แสดงตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาและตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงที่กระทำกับตัวรถ

(UN-ECE Regulation 66, 2009, p 14-16)

2.2.2 การหลุดโค้งหรือแหกโค้งเนื่องจากล้อของรถไถออกนอกโค้ง (Sliding out of curve)

เมื่อพิจารณากลไกการเคลื่อนที่ของขบวนรถในทางโค้งที่มีการยกกระดักขอบถนน ตามรูป 2.2-4 จะได้ว่า

$$\text{แรงหนีศูนย์กลาง, } F_c = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \quad (12)$$

เมื่อ

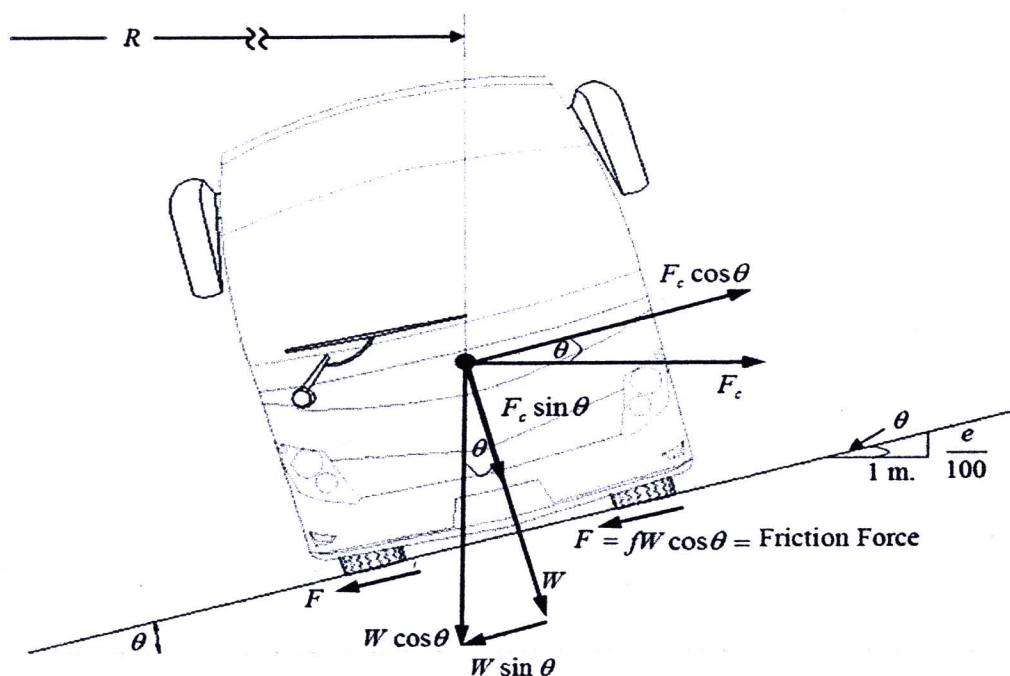
W คือ น้ำหนักของขบวนรถ

v คือ ความเร็วของขบวนรถ

R คือ รัศมีโค้ง

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

แรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่อขบวนรถซึ่งวิ่งตามทางโค้ง จะทำให้ขบวนรถมีโอกาสปลิกคว่ำหรือไถลออกนอกโค้ง ในการออกแบบเพื่อให้สามารถต้านทานแรงหนีศูนย์กลางนี้ ทำได้โดยการยกขอบถนนด้านนอกโค้งให้สูงขึ้น หรือทำให้ผิวถนนเอียงลงจากขอบนอกเข้าหาขอบใน



รูป 2.2-4 แสดงแรงต่างๆที่กระทำกับรถขณะวิ่งในโค้งที่มีการยกกระดักขอบถนน (AASHTO, 2004)

จากรูป 2.2-4 θ = มุมระหว่างพื้นในแนวเอียงกับแนวนอน

$e = \tan \theta$ = ความลาดเอียงของการขุดระดับขอบทางโค้ง

สมดุลของแรงในระนาบเอียง

$$W \sin \theta + F = F_c \cos \theta \quad (13)$$

และ

$$F = fW \cos \theta \quad (14)$$

เมื่อแทนค่า F ลงในสมการที่ 14 จะได้

$$W \sin \theta + fW \cos \theta = F_c \cos \theta \quad (15)$$

และ F_c คือ แรงหนีศูนย์กลาง $= \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R}$ นำไปแทนค่าในสมการที่ 15 จะได้

$$W \sin \theta + fW \cos \theta = \frac{Wv^2}{gR} \cos \theta \quad (16)$$

$$\tan \theta + f = \frac{v^2}{gR} \quad (17)$$

$$e + f = \frac{v^2}{gR} \quad (18)$$

และทำให้ได้สมการ

$$R = \frac{v^2}{g(e + f)} \quad (19)$$

โดยที่

R คือ รัศมีโค้ง

v คือ ความเร็วรถ

e คือ อัตราการยกโค้ง

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไถลทางด้านข้างระหว่างล้อรถกับผิวถนน

เมื่อใดก็ตามที่ ตัวรถมีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง จะทำให้เกิดแรงที่ไม่สมดุล ในกรณีที่รถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่เป็นวงกลมหรือทางโค้ง จะมีแรงที่ทำให้ตัวรถสามารถแล่นอยู่บนทางโค้งได้ซึ่งเรียกว่า แรงสู่ศูนย์กลาง (Centripetal force) และช่วยป้องกันยานพาหนะไถลออกนอกโค้ง ในการเพิ่ม Side-slope หรือมีการยก Superelevation ที่ถนน จะทำให้เพิ่มความสะดักสบายแก่ผู้ขับขี่ โดยสำหรับอัตราการยก Superelevation สูงสุดที่ทำให้ผู้ขับขี่จะสะดวกสบายจะอยู่ที่ 12%

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Side friction) จะแปรผันตามความเร็วของยานพาหนะ ซึ่งค่าของ Side friction ที่สะดวกสบายต่อผู้ขับขี่ที่ความเร็วต่างๆ ได้ยกมาแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ค่า Side friction ที่ใช้ในการออกแบบโค้งที่ความเร็วต่างๆ

Speed (km/h)	Comfortable Side-Friction Factor
40	0.23
50	0.19
55-80	0.14
> 110	< 0.11

(AASHTO, 2004, Exhibit 3-15, p. 147)

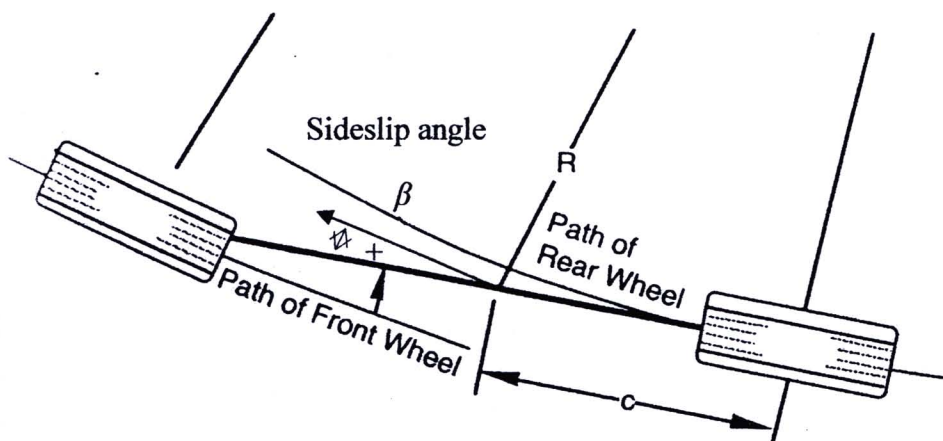
โดยค่าที่ใช้ในการออกแบบนั้น ควรปรับให้มีความปลอดภัยและสะดวก สบายต่อผู้ใช้งาน สำหรับเกณฑ์ในการออกแบบโค้งต่ำสุดเป็นการนำผลของ ค่า Side friction และอัตราการยก Superelevation มาคิดร่วมกัน ซึ่งทำให้ได้การวางแนวสุดท้ายของโค้ง

2.2.3 การหลุดโค้งหรือแหกโค้งเนื่องจากรถไม่สามารถเลี้ยวบนโค้งที่รัศมีแคบได้ (Fail to negotiate curve)

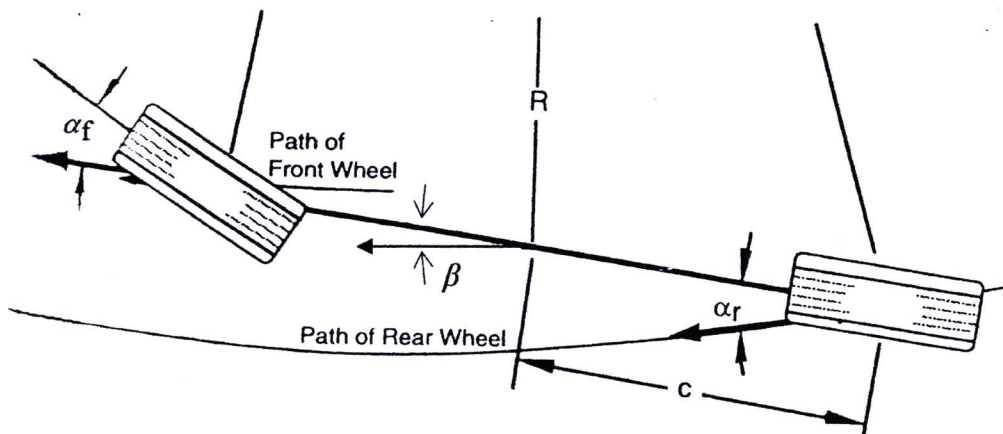
กลไกในการเลี้ยวของรถ ที่ความเร็วสูง จะแตกต่างกับกลไกในการเลี้ยวของรถ ด้วยความเร็วต่ำ เนื่องจากความเร่งทางดัดข้างในขณะที่ยานเลี้ยวด้วยความเร็วสูงจะกลายเป็นแรงทางดัดข้าง และจะเกิดมุมไถลที่แต่ละล้อในขณะนั้นด้วย ซึ่งกลไกการเลี้ยวของรถด้วยความเร็วต่ำจะขึ้นอยู่กับ มุมบิดที่ล้อหน้าของรถ (δ) ระยะห่างระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง (L) รัศมีโค้ง (R) และค่ามุม (องศา) แปลงเป็น radian โดยที่ $1 \text{ radian} = 180/\pi = 57.3$ ซึ่งจะสัมพันธ์กันดังสมการ 20

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} \quad (20)$$

ในขณะที่ยานเคลื่อนที่ไปตามโค้งด้วยความเร็วต่ำจะไม่เกิดมุมไถล (Slip angle) ซึ่งแตกต่างกับการที่ยานเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเนื่องจากจะเกิดมุมไถลที่ล้อหน้า (α_f) และเกิดมุมไถลล้อหลัง (α_r) รวมไปถึงรัศมีการเลี้ยวของรถก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูป 2.2-5 และ 2.2-6

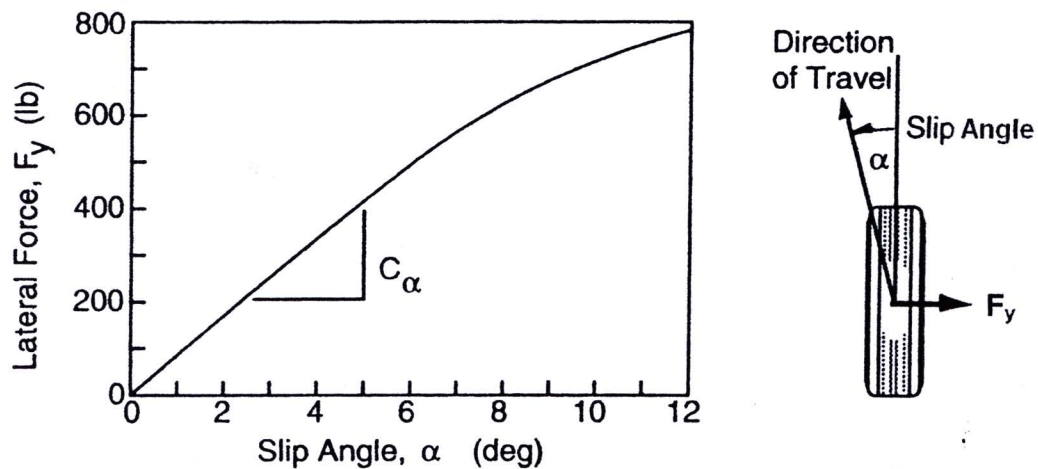


รูป 2.2-5 Sideslip angle เมื่อรถเลี้ยวที่ความเร็วต่ำ
(Gillespie T.D., 1994, Fig 6.7, p. 207)



รูป 2.2-6 Sideslip angle เมื่อรถเลี้ยวที่ความเร็วสูง มุม slip angle ที่ล้อหน้า (α_f) และล้อหลัง (α_r)
(Gillespie T.D., 1994, Fig 6.8, p. 207)

ภายใต้เงื่อนไขในการเลี้ยวซึ่งความเร่งกลายเป็นแรงทางด้านข้างจะเกิดการไถลทางด้านข้างของล้อยางในขณะที่มันกำลังกลิ้ง โดยจะเกิดมุมระหว่าง Direction of heading และ Direction of travel หรือเรียกว่ามุมไถล (Slip angle, α) ดังแสดงในรูป 2.2-7



รูป 2.2-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral force กับ Slip angle
(Gillespie T.D., 1994, Fig 6.2, p. 198)

แรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral force, F_y) เป็นแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นตอนรถเลี้ยวโค้ง (Cornering force) จุดที่น้ำหนักลงตรงล้อยาง และ Cornering force จะเพิ่มขึ้น รวมถึง

มุมระหว่างแนววิ่งของล้อยางกับ Direction of travel หรือเรียกว่า Slip angle (α) ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สังเกตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับมุมไถลดังรูป 2.2-7 มุมไถลที่ 5 องศาหรือต่ำกว่านั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับมุมไถลจะเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็นสมการ 21

$$F_y = C_\alpha \alpha \quad (21)$$

เมื่อ

F_y คือ แรงกระทำทางด้านข้าง

C_α คือ Cornering stiffness

α คือ มุมไถล (Slip angle)

ค่าคงที่ของ Cornering stiffness, C_α นิยามให้แรงกระทำทางด้านข้าง (F_y) ทำมุม α ที่ 0 องศา โดยมุมไถลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดแรงเป็นค่าลบ (ทางซ้ายมือของล้อยาง) กลไกในการเลี้ยวได้มาจากการประยุกต์ใช้ตามกฎที่ 2 ของนิวตัน ($F=Ma$) หรือเรียกว่าสมการเรขาคณิตในการเลี้ยว (ดัดแปลงตามเงื่อนไขของมุมไถลที่เกิดกับล้อยาง) ในการวิเคราะห์เพื่อให้เข้าใจถึงแสดงขบวนการเป็นแบบจำลองของรถจักรยานดังรูป 2.2-8 ที่ความเร็วสูงระสิทธิภาพการเลี้ยวจะมากกว่าระยะ Wheelbase (ระยะห่างระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง) ของรถมาก ดังนั้นมุมที่เกิดขึ้นจะเป็นมุมที่น้อยมาก เพื่อความสะดวกคู่ล้อหน้าของรถสามารถแสดงมุมของการบิดพวงมาลัย (Steer angle, δ) ได้เป็นล้อเดียว เนื่องจากแรงกระทำของทั้งสองล้อจะมีขนาดเท่ากัน และล้อหลังก็ใช้หลักการเช่นเดียวกันกับล้อหน้า ในขณะที่รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็ว (v) ผลรวมของแรงที่กระทำทางด้านข้างของล้อ จะเท่ากับแรงเหวี่ยงที่เกิดจากความเร่งสู่ศูนย์กลาง (Centripetal acceleration) ขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้ได้สมการ 22

$$\Sigma F_y = F_{yf} + F_{yr} = Mv^2 / R \quad (22)$$

เมื่อ

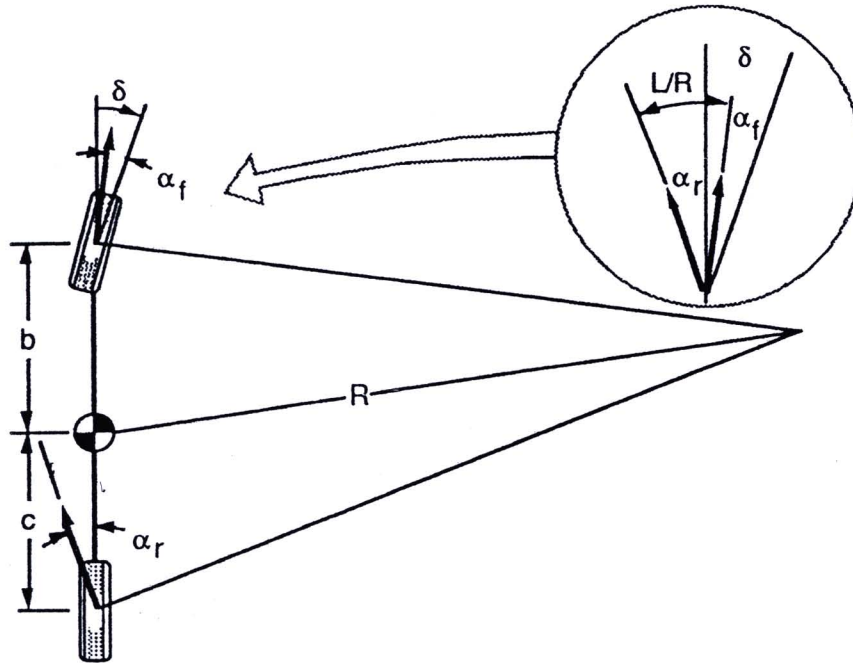
F_{yf} คือ แรงกระทำทางด้านข้างของเพลาหน้า

F_{yr} คือ แรงกระทำทางด้านข้างของเพลาหลัง

M คือ มวลของรถ

v คือ ความเร็วรถ

R คือ รัศมีโค้ง



รูป 2.2-8 การเลี้ยวของ Bicycle model
(Gillespie T.D, 1994, Fig 6.4, p. 201)

ผลรวมโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางถ่วงของตัวรถโดยรวมโมเมนต์จากแรงกระทำทางด้านข้างของล้อหน้าและล้อหลังเท่ากับศูนย์ทำให้ได้สมการ

$$F_{yf}b - F_{yr}c = 0 \quad (23)$$

ดังนั้น

$$F_{yf} = F_{yr}c/b \quad (24)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 24 จะได้

$$Mv^2/R = F_{yr}(c/b + 1) = F_{yr}(b+c)/b = F_{yr}L/b \quad (25)$$

$$F_{yr} = (Mb/L)(v^2/R) \quad (26)$$

แต่ Mb/L คือมวลของขบวนเพียงบางส่วนที่ลงเพลาหลังเท่านั้น ดังนั้นในสมการที่ 26 แรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำกับเพลาหลัง ณ เวลานั้นจะกลายเป็น W_r/g คูณอัตราเร่งด้านข้างที่จุดนั้นและเช่นเดียวกัน แรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำกับเพลาหน้า (F_{yf}) จะกลายเป็น W_f/g คูณอัตราเร่งด้านข้าง เราสามารถหามุมไถลที่ล้อหน้าและล้อหลังได้จากแรงกระทำทางด้านข้าง จากสมการที่ 21 จะได้เป็น

$$\alpha_f = W_f v^2 / (C_{af} g R) \quad (27)$$

และ

$$\alpha_r = W_r v^2 / (C_{ar} g R) \quad (28)$$

เมื่อพิจารณาจากรูป 2.2-8 ทำให้ได้มุมบิดที่ล้อหน้า (δ) ดังสมการ

$$\delta = 57.3 L / R + \alpha_f - \alpha_r \quad (29)$$

และเมื่อนำค่า α_f และ α_r จากสมการที่ 27 และสมการที่ 28 มาแทนค่า ลงในสมการที่ 29 จะได้

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} + \frac{W_f v^2}{C_{af} g R} - \frac{W_r v^2}{C_{ar} g R} \quad (30)$$

ดังนั้นเราสามารถหามุมบิดที่ล้อหน้าได้โดยสมการ

$$\delta = 57.3 \left(\frac{L}{R} \right) + \left(\frac{W_f}{C_{af}} - \frac{W_r}{C_{ar}} \right) \frac{v^2}{g R} \quad (31)$$

โดยที่

δ คือ มุมบิดที่ล้อหน้าของรถ, องศา

L คือ ระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง

v คือ ความเร็วรถ

W_f คือ น้ำหนักจากล้อหน้า

W_r คือ น้ำหนักจากล้อหลัง

C_{af} คือ ค่า Cornering stiffness ของล้อหน้า

C_{ar} คือ ค่า Cornering stiffness ของล้อหลัง

R คือ รัศมีโค้ง

ค่า Cornering stiffness จะเพิ่มขึ้นประมาณ 16-17% ของน้ำหนักที่กระทำต่อล้ออย่างต่อเนื่องต่อการเกิดมุมไถลที่เพิ่มขึ้น 1 องศา (McHenry R. R., 2009)

รัศมีการเลี้ยวที่น้อยที่สุดของรถทั่วไปกำหนดจากแนวของล้อหน้าด้านนอกสุดที่แล่นตามแนวเส้นโค้งเมื่อความเร็วต่ำสุด และมีข้อจำกัดด้วยกลไกจากการบังคับพวงมาลัยรถ ซึ่งถ้าหากมีการใช้ความเร็วมากจะทำให้ล้อหลุดออกจากแนวเส้นโค้งและทำให้รถเหวี่ยงออกนอกโค้งได้

ตัวแปรต่างๆของรถ เช่น น้ำหนักของตัวรถ การกระจายน้ำหนักและ คุณสมบัติของระบบช่วงล่างนั้น มีบทบาทเพียงเล็กน้อยในการเลี้ยวที่ความเร็วต่ำมากๆ เช่น ความเร็วน้อยกว่า 16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง [10 ไมล์ต่อชั่วโมง] ในปัจจุบันค่าของขนาด และรัศมีการเลี้ยวของรถแต่ในละประเภทแนะนำให้ใช้จาก AASHTO ซึ่งได้ยกมาแสดงในตาราง 2.4

ตาราง 2.4 ค่า Minimum turning radii ของรถที่ใช้ออกแบบ จาก AASHTO ปี 2004

หน่วยเมตร

Design Vehicle Type	Passenger Car	Single Unit Truck	Inter-city Bus (Motor Coach)		City Transit Bus	Conventional School Bus	Large School Bus (84 pass.)	Articulated Bus	Intermediate Semi-trailer	Intermediate Semi-trailer
Symbol	P	SU	BUS-12	BUS-14	CITY-BUS	S-BUS11	S-BUS12	A-BUS	WB-12	WB-15
Minimum Design Turning Radius (m)	7.3	12.8	13.7	13.7	12.8	11.9	12.0	12.1	12.2	13.7
Centerline Turning Radius (CTR)	6.4	11.6	12.4	12.4	11.5	10.6	10.8	10.8	11.0	12.5
Minimum Inside Radius (m)	4.4	8.6	8.4	7.8	7.5	7.3	7.7	6.5	5.9	5.2
Design Vehicle Type	Interstate Semi-trailer		"Double Bottom" Combination	Triple Semi-Trailer/Trailers	Turn-pike Double Semi-Trailer/Trailers	Motor Home	Car and Camper Trailer	Car and Boat Trailer	Motor Home and Boat Trailer	Farm Tractor w/One Wagon
Symbol	WB-19*	WB-20** or WB-20	WB-20D	WB-30T	WB-33D*	MH	P/T	P/B	MH/B	TR/W
Minimum Design Turning Radius (m)	13.7	13.7	13.7	13.7	18.3	12.2	10.1	7.3	15.2	5.5
Centerline Turning Radius (CTR)	12.5	12.5	12.5	12.5	17.1	11.0	9.1	6.4	14.0	4.3
Minimum Inside Radius (m)	2.4	1.3	5.9	3.0	4.5	7.9	5.3	2.8	10.7	3.2

NOTE: Numbers in table have been rounded to the nearest tenth of a meter.

* = Design vehicle with 14.63 m trailer as adopted in 1982 Surface Transportation Assistance Act (STAA).

** = Design vehicle with 16.16 m trailer as grandfathered in with 1982 Surface Transportation Assistance Act (STAA).

1 = The turning radius assumed by a designer when investigating possible turning paths and is set at the centerline of the front

axle of a vehicle. If the minimum turning path is assumed, the CTR approximately equals the minimum design turning radius

minus one-half the front width of the vehicle.

2 = School buses are manufactured from 42 passenger to 84 passenger sizes. This corresponds to wheelbase lengths of 3,350

mm to 6,020 mm, respectively. For these different sizes, the minimum design turning radii vary from 8.78 m to 12.01 m and the

minimum inside radii vary from 4.27 m to 7.74 m.

3 = Turning radius is for 150–200 hp tractor with one 5.64 m long wagon attached to hitch point. Front wheel drive is disengaged

and without brakes being applied.

(AASHTO, 2004, Exhibit 2-2, p. 19)

ตารางนี้แสดงค่า Turning radius ที่ความเร็วต่ำเท่านั้น ส่วนค่า Turning radius ที่ความเร็วสูงที่มีผลกับมุมไถล (Slip angle) ของล้อยางนั้น ได้จากการคำนวณในสมการที่ 31

2.3 การคำนวณหาความเร็วปลอดภัย

ปัจจัยการเกิดอุบัติเหตุของรถโดยสารส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ความเร็วเกิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับเรขาคณิตของถนน และมิติหรือขนาดของยานพาหนะ นอกจากนั้นยังสามารถคำนวณความเร็วปลอดภัยของรถได้โดย การคำนวณด้วยกฎทางฟิสิกส์ของการเกิดอุบัติเหตุในลักษณะที่ต่างกันออกไป อันได้แก่

2.3.1 การคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำ (Rollover)

จากกลไกการพลิกคว่ำของรถในหัวข้อ 2.2.1 ทำให้เราสามารถหาความเร็วมากที่สุดที่ทำให้รถเริ่มพลิกคว่ำบนโค้งราบจากค่า $a_y = \frac{v^2}{R}$ เมื่อ $R =$ รัศมีโค้ง และเมื่อนำค่า a_y แทนค่าลงไปในสมการที่ 3 ทำให้ได้สมการ

$$\left(\frac{t}{2h}\right)g = \frac{v^2}{R} \quad (32)$$

ดังนั้น เราสามารถคำนวณความเร็วปลอดภัย (v) ที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งราบ ได้โดย

$$v = \sqrt{gR\left(\frac{t}{2h}\right)} \quad (33)$$

และสมการคำนวณความเร็วสูงสุดที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนทางโค้งเอียง (สมการ 10) คือ

$$v = \sqrt{gR \left[\frac{(h \cdot \tan \theta) + (t/2)}{h - ((t/2) \tan \theta)} \right]} \quad (34)$$

เมื่อ



- v คือ ความเร็วที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำ
 R คือ รัศมีโค้ง
 t คือ ระยะห่างระหว่างล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวา
 h คือ ความสูงจากจุดศูนย์กลางถ่วงของรถถึงพื้น
 θ คือ มุมที่มีการยกโค้ง

เพื่อเป็นการตรวจสอบระหว่างสมการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งราบ (สมการ 33) และสมการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งเอียงหรือมีการยกโค้ง (สมการ 34) ว่าระหว่างสองสมการนี้ สมการใดเหมาะสมที่จะนำมาใช้คำนวณความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำมากที่สุด ดังตัวอย่าง 1) และ 2)

โดยสมมติให้รถมีระยะห่างระหว่างล้อซ้ายกับล้อขวา (t) เท่ากับ 2.08 เมตร และความสูงจากจุดศูนย์กลางถ่วงของรถถึงพื้น (h) เท่ากับ 1.344 เมตร รัศมีตามทางวิ่งของรถ (R) เท่ากับ 50 เมตร และรถวิ่งบนโค้งที่มีการยกโค้งเป็นมุม 20°

- 1) ตัวอย่างการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งราบ มีสมการดังนี้

$$v = \sqrt{gR\left(\frac{t}{2h}\right)} \quad (35)$$

แทนค่าลงในสมการ 28 จะได้

$$v = \sqrt{(9.81)(50)\left(\frac{2.08}{(2)(1.344)}\right)}$$

$$v = (19.482)(3.6)$$

$$v = 70 \text{ กิโลเมตรต่อชั่วโมง}$$

ดังนั้นความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งราบเท่ากับ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

2) ตัวอย่างการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งเอียงหรือโค้งที่มีการยกโค้ง มีสมการดังนี้

$$v = \sqrt{gR \left[\frac{(h \cdot \tan \theta) + (t/2)}{h - ((t/2) \tan \theta)} \right]} \quad (36)$$

แทนค่าลงในสมการ 29 จะได้

$$v = \sqrt{(9.81)(50) \left(\frac{(1.344 \tan 20^\circ) + (2.08/2)}{1.344 - ((2.08/2) \tan 20^\circ)} \right)}$$

$$v = (27.873)(3.6)$$

$$v = 100 \text{ กิโลเมตรต่อชั่วโมง}$$

จากตัวอย่างการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำทั้งบนโค้งราบและบนโค้งเอียง (ตัวอย่าง 1 และ 2) จะเห็นว่าความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งเอียงมีค่าสูงกว่าความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งราบ และเนื่องจากในกรณีที่รถเริ่มเข้าโค้งจะมีการยกโค้งน้อยมากหรือแทบไม่มีการยกโค้ง ($e = 0$) ดังนั้นความเร็วปลอดภัยที่คำนวณได้จากสมการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำบนโค้งราบ (สมการ 35) จึงเป็นความเร็วที่มีความปลอดภัยมากที่สุดที่ไม่ทำให้รถพลิกคว่ำในขณะที่เข้าโค้ง

2.3.2 สมการที่ใช้คำนวณความเร็วสูงสุดที่ไม่ทำให้รถไถลออกนอกโค้ง (Sliding out of curve)

จากการพิจารณาหลักการเคลื่อนที่ของยานในทางโค้งที่มีการยกกระดักขอบถนนในหัวข้อ 2.2.2 ทำให้สามารถคำนวณความเร็วสูงสุดที่ไม่ทำให้รถไถลออกนอกโค้งได้ดังสมการ

$$v = \sqrt{gR (e + f)} \quad (37)$$

โดยที่

v คือ ความเร็วที่ไม่ทำให้รถไถลออกนอกโค้ง

R คือ รัศมีโค้ง

e คือ อัตราการยกโค้ง

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไถลทางด้านข้างระหว่างล้อรถกับผิวถนน

2.3.3 สมการที่ใช้คำนวณความเร็วสูงสุดที่ทำให้รถสามารถเลี้ยวไปตามโค้งได้โดยไม่หลุดออกนอกโค้ง (Fail to negotiate curve)

จากการพิจารณาการเลี้ยวของรถที่ความเร็วสูงในหัวข้อ 2.2.3 ทำให้เราสามารถคำนวณความเร็วปลอดภัยของรถให้สามารถเลี้ยวไปตามรัศมีโค้ง (R) โดยไม่ทำให้รถหลุดออกนอกโค้งได้โดย

$$v = \sqrt{\left[\frac{\delta - \left(\frac{57.3L}{R} \right)}{\left(\frac{W_f}{C_{af}} - \frac{W_r}{C_{ar}} \right)} \right] gR} \quad (38)$$

โดยที่

v คือ ความเร็วที่ทำให้รถไม่หลุดออกนอกโค้ง

δ คือ มุมบิดที่ล้อหน้าของรถ, องศา

L คือ ระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง

W_f คือ น้ำหนักจากล้อหน้า

W_r คือ น้ำหนักจากล้อหลัง

C_{af} คือ ค่า Cornering stiffness ของล้อหน้า

C_{ar} คือ ค่า Cornering stiffness ของล้อหลัง

g คือ แรงโน้มถ่วงโลก

R คือ รัศมีโค้ง

เพื่อเป็นการตรวจสอบระหว่างสมการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถเลี้ยวไปตามโค้งราบ (สมการ 38) และสมการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถเลี้ยวไปตามโค้งเอียงหรือมีการยกโค้ง ว่าระหว่างสองสมการนี้ สมการใดเหมาะสมที่จะนำมาใช้คำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถเลี้ยวไปตามโค้งมากที่สุด ดังตัวอย่าง 3) และ 4)

โดยสมมติให้รถใช้มุมบิดที่ล้อหน้า (δ) เท่ากับ 8.12 องศา ระยะห่างระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง (L) เท่ากับ 6.02 เมตร น้ำหนักของล้อหน้าหนึ่งล้อ (W_f) เท่ากับ 3,500 กิโลกรัม น้ำหนักของล้อหลังหนึ่งล้อ (W_r) เท่ากับ 1,875 กิโลกรัม ค่า Cornering stiffness ที่ล้อหน้า (C_{af}) เท่ากับ 258.548 กิโลกรัม/องศา และค่า Cornering stiffness ที่ล้อหลัง (C_{ar}) เท่ากับ 190.509 กิโลกรัม/องศา รัศมีตามทางวิ่งของรถ (R) เท่ากับ 50 เมตร และรถวิ่งบนโค้งที่มีการยกโค้งเป็นมุม 20°

3) ตัวอย่างการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถสามารถเลี้ยวไปตามโค้งราบ มีสมการดังนี้

$$v = \sqrt{\left[\frac{\delta - \left(\frac{57.3L}{R} \right)}{\left(\frac{W_f}{C_{af}} - \frac{W_r}{C_{ar}} \right)} \right] gR} \quad (39)$$

$$v = \sqrt{\left[\frac{8.12 - \left(\frac{(57.3)(6.02)}{50} \right)}{\left(\frac{3,500}{258.548} - \frac{1,875}{190.509} \right)} \right] (9.81)(50)}$$

$$v = (12.731)(3.6)$$

$$v = 46 \text{ กิโลเมตรต่อชั่วโมง}$$

4) ตัวอย่างการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถสามารถเลี้ยวไปตามโค้งเอียงหรือมีการยกโค้ง จากสมการ 39 เมื่อคิดผลของการยกโค้งเป็นมุม θ ทำให้น้ำหนักที่ลงล้อในแนวตั้ง (Vertical Load, W) กระทำเป็นแนวตั้งฉากกับพื้นถนน ดังนั้นน้ำหนักที่ลงล้อจะกลายเป็น $W \cos \theta$ หรือ W' และค่า C_α จะเปลี่ยนไปเป็น ' C_α' ' แต่เมื่อ θ มีค่าน้อย $\cos \theta$ มีค่า ≈ 1.0 และ W กับ W' ต่างกันน้อย จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Normal load กับ C_α (Clark S. K. et. al., 1981, fig.1.27, p.36) จะพบว่าผลจาก W / C_α กับ W' / C_α' แตกต่างกันน้อยมาก เมื่อแทนค่าลงในสมการ 39 จะได้

$$v = \sqrt{\left[\frac{\delta - \left(\frac{57.3L}{R} \right)}{\left(\frac{W_f \cos \theta}{C_{af}} - \frac{W_r \cos \theta}{C_{ar}} \right)} \right] gR}$$

$$v = \sqrt{\left[\frac{8.12 - \left(\frac{(57.3)(6.02)}{50} \right)}{\left(\frac{3,288.924}{242.96} - \frac{1,761.924}{179.02} \right)} \right] (9.81)(50)}$$

$$v = (12.731)(3.6)$$

$$v = 46 \text{ กิโลเมตรต่อชั่วโมง}$$

จากตัวอย่างการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถสามารถเลี้ยวไปตามโค้งได้ ทั้งบนโค้งราบและบนโค้งเอียง (ตัวอย่าง 3 และ 4) จะเห็นว่าความเร็วปลอดภัยที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากัน ทำให้ทราบว่าการศึกษาผลกระทบของโค้งที่มีและไม่มีการยกโค้งร่วมกับสมการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถสามารถเลี้ยวไปตามโค้งได้นั้น ได้ผลของความเร็วปลอดภัยเท่ากัน ดังนั้นความเร็วปลอดภัยที่คำนวณได้จากสมการคำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถสามารถเลี้ยวไปตามโค้งราบ (สมการ 39) จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้คำนวณความเร็วปลอดภัยที่ทำให้รถสามารถเลี้ยวไปตามโค้งได้

2.4 การออกแบบด้านเรขาคณิตเพื่ออำนวยความสะดวกในการขับขี่ของยานในโค้ง

2.4.1 การแบ่งระหว่างการใช้การยกโค้ง (Superelevation, e) และ side friction, f

การออกแบบทางโค้งของถนนสายหลักในเขตนอกเมือง อัตราการยกโค้งที่จะนำมาพิจารณาควบคู่กับความเร็วที่ใช้ออกแบบไม่ควรเกิน 12 % ซึ่ง AASHTO 2004 เสนอการออกแบบไว้ 5 วิธี ได้แก่

- 1) อัตราการยกโค้ง (e) และความเสียดทานระหว่างล้อกับผิวถนน (f) จะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีโค้งของถนนลดลง โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง
- 2) อัตราการยกโค้งจะถูกลดลง เมื่อรถใช้ความเร็วตามที่ออกแบบโดยการรักษาอัตราเร่งทางด้านข้าง (Lateral acceleration) จะเกิดจากความเสียดทานระหว่างล้อกับผิวถนน (Side

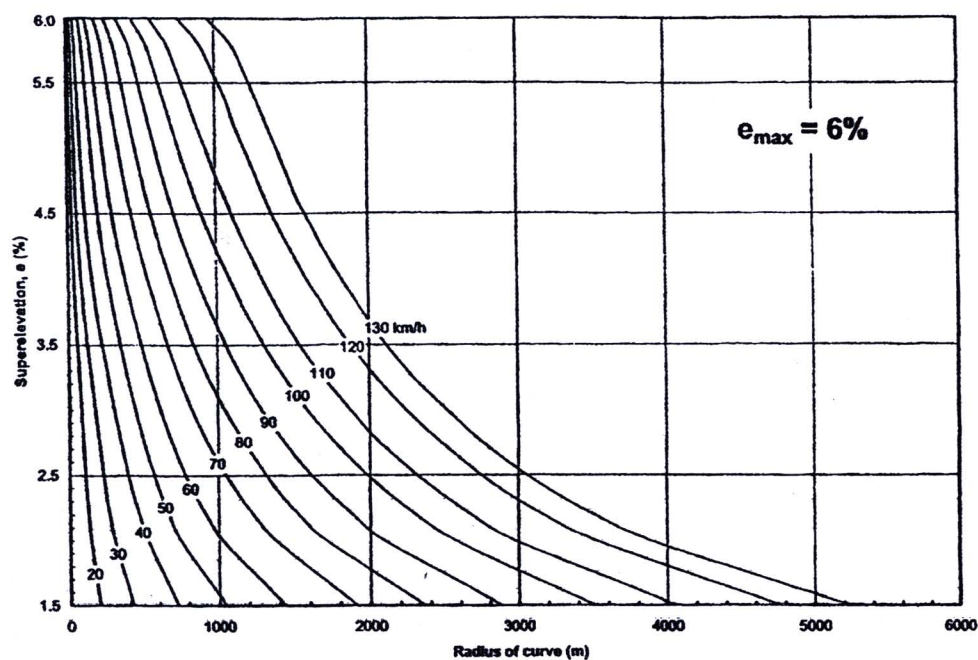
friction) จนถึงค่าความเสียดทานสูงสุด สำหรับโค้งอันตราย (Sharp curve) ค่า Side friction จะมีค่าสูงสุดเสมอ ดังนั้นอัตราการยกโค้งจะถูกเพิ่ม เพื่อรักษาสมดุลกับอัตราเร่งทางด้านข้าง จนกระทั่ง $e = e_{\max}$

3) อัตราการยกโค้งจะถูกเพิ่มขึ้น เมื่อรถใช้ความเร็วตามที่ออกแบบโดยการรักษาอัตราเร่งทางด้านข้าง (Lateral acceleration) จะเกิดจากการยกกระดักขอบถนน (Superelevation) จนถึงอัตราการยกกระดักขอบถนนสูงสุด สำหรับโค้งอันตราย (Sharp curve) อัตราการยกกระดักขอบถนนจะมีค่าสูงสุดเสมอ ดังนั้นค่า Side friction จะถูกเพิ่ม เพื่อรักษาสมดุลกับอัตราเร่งทางด้านข้างจนกระทั่ง $f = f_{\max}$

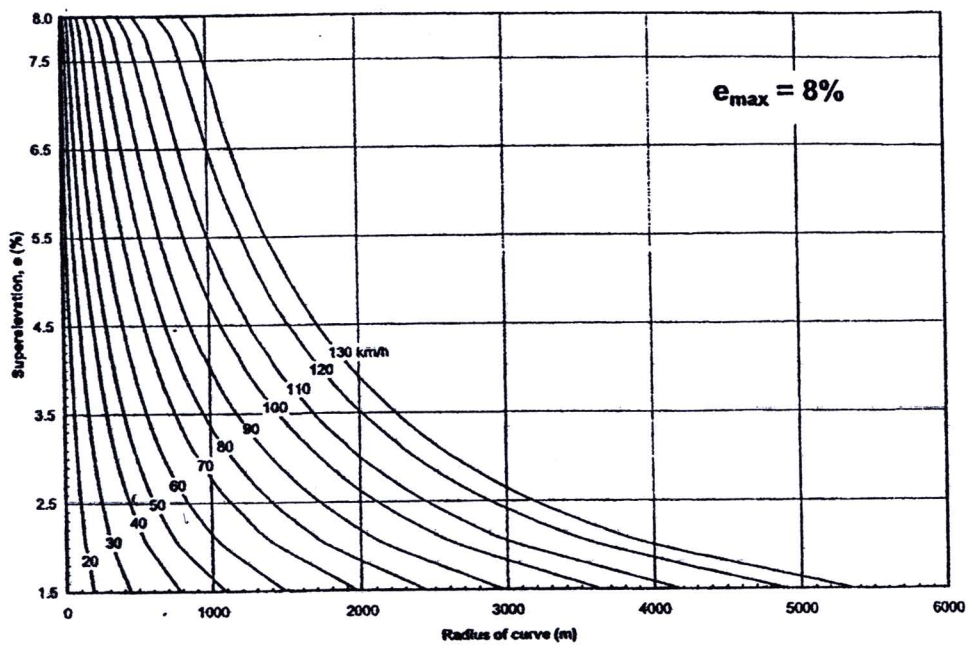
4) การออกแบบด้วยวิธีนี้เป็นการออกแบบลักษณะเดียวกันกับวิธีที่ 3 แต่เปลี่ยนจากการใช้ความเร็วออกแบบ (Design speed) มาใช้ความเร็วเฉลี่ยของรถแทน

5) การออกแบบวิธีนี้จะใช้ค่าระหว่างวิธีที่ 1 และ 3 ดังนั้นค่าอัตราการยกโค้งเหมาะที่จะใช้กับโค้งที่มีรัศมีโค้งไม่ต่ำมาก

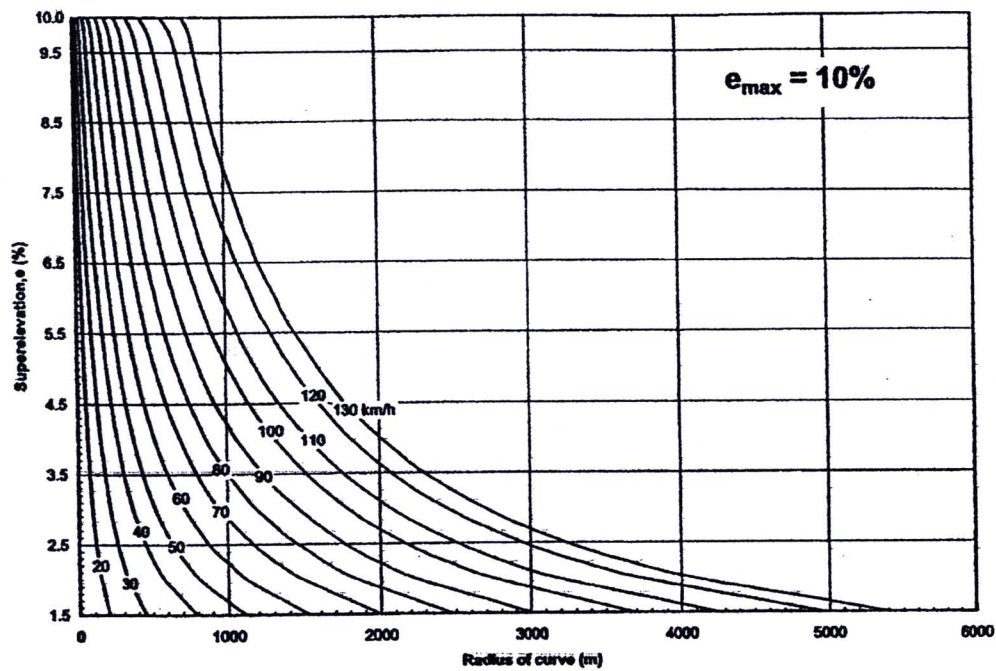
รูป 2.4-1 ถึงรูป 2.4-4 แสดงค่าอัตราการยกโค้ง (e) ที่เหมาะสมสำหรับความเร็วออกแบบ (v) และรัศมีโค้งกลม (R) เมื่อจำกัดอัตราการยกโค้งสูงสุด ($e_{\max}$) ไว้ที่ 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 ตามลำดับ



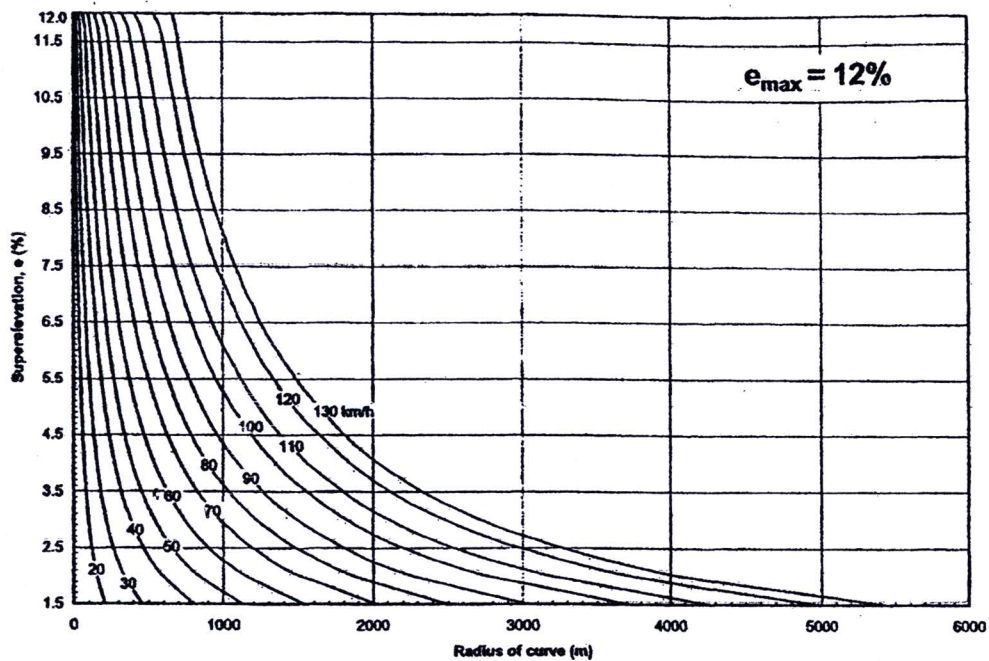
รูป 2.4-1 อัตราการยกโค้งออกแบบ $e_{\max} = 6\%$ (AASHTO, 2004, Exhibit 3-20, p. 156)



รูป 2.4-2 อัตราการยกโค้งออกแบบ $e_{\max} = 8\%$ (AASHTO, 2004, Exhibit 3-21, p. 157)



รูป 2.4-3 อัตราการยกโค้งออกแบบ $e_{\max} = 10\%$ (AASHTO, 2004, Exhibit 3-22, p. 158)



รูป 2.4-4 อัตราการยกโค้งออกแบบ $e_{\max} = 12\%$ (AASHTO, 2004, Exhibit 3-23, p. 159)

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถ, รัศมีโค้ง, สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน และอัตราการยกโค้ง ได้แสดงไว้ในตาราง 2.5

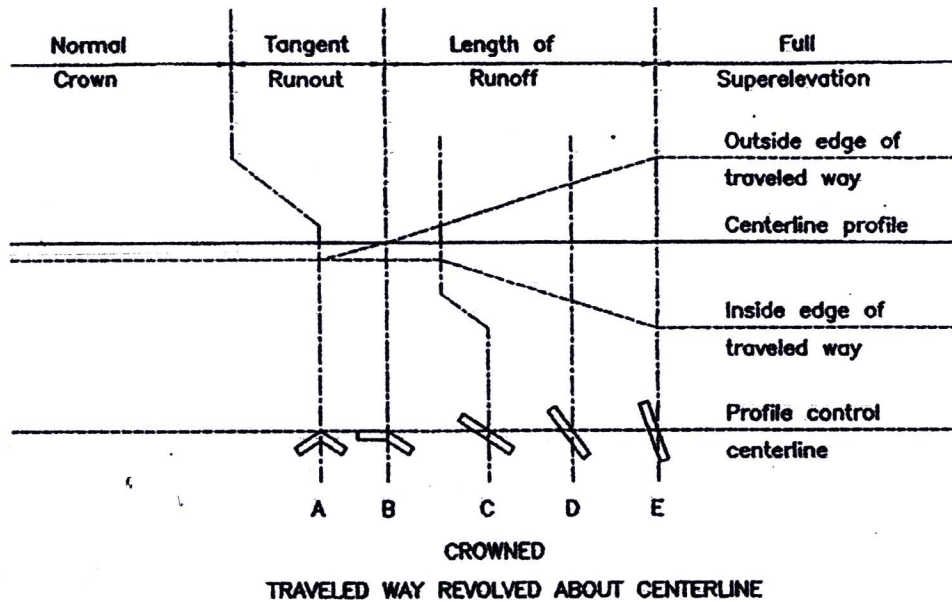
ตาราง 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถ, รัศมีโค้ง, สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน และอัตราการยกโค้ง

Design Speed, v (KPH.)	Radius, R		สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน		Superelevation, S.E. (M/H)	
	Desirable	Min	ลาดยางหรือผิวคอนกรีต	ลูกรัง	Desirable	Max
40	50	40	0.19	0.14	0.06	0.12
50	90	70	0.17	0.12	0.06	0.12
60	130	105	0.16	0.11	0.06	0.10
80	225	195	0.14	0.10	0.06	0.10
100	440	330	0.12	0.09	0.06	0.10
120	670	495	0.11	0.08	0.06	0.10

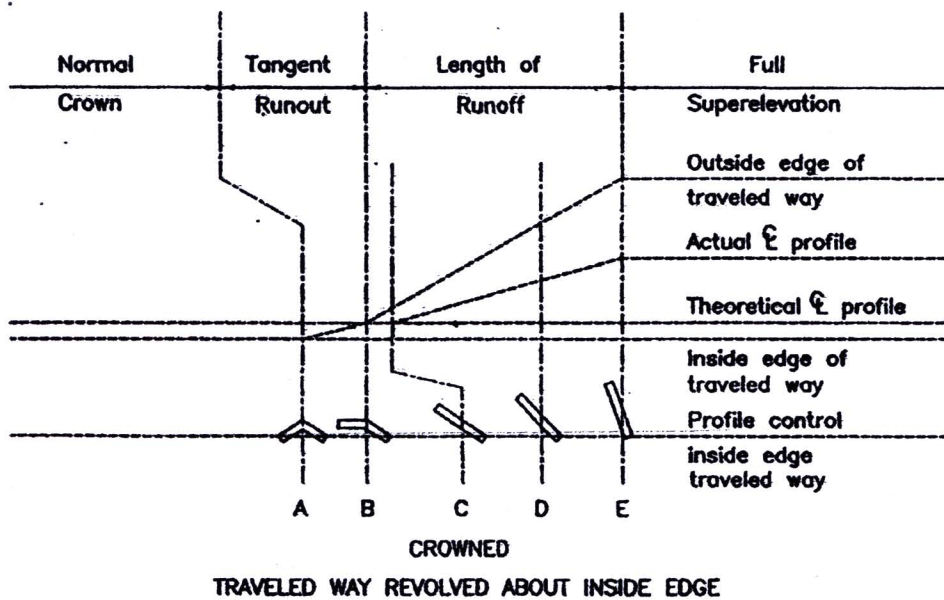
ข้อกำหนดกรมทางหลวง ให้ใช้ค่า S.E. สูงสุดไม่เกิน 0.10 เมตร/เมตร
(www.ntc.ac.th, Accessed: December 17, 2009, p. 7-3)

2.4.2 วิธียกโค้ง (Method of attaining superelevation)

การเปลี่ยนระดับของผิวทางจากช่วงทางตรงที่ Cross slope เป็นแบบปกติ (ระดับศูนย์กลางทางสูงกว่าขอบ) ไปเป็นการยกโค้งเต็มที่ให้ระดับขอบนอกสูงกว่าศูนย์กลางทางและขอบในสามารถทำได้ 4 วิธีด้วยกันคือ 1) วิธีหมุนผิวจราจรรอบศูนย์กลางทาง ระดับศูนย์กลางทางคงที่ 2) วิธีหมุนรอบขอบในของทางวิ่งหรือให้ระดับขอบใน (Inner edge) คงที่ 3) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทางวิ่ง (ระดับของขอบนอกคงที่) และ 4) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทางวิ่ง (แกนหมุนของขอบทางและจุดกึ่งกลางทางอยู่ในแนวเดียวกัน) รูป 2.4-5 และรูป 2.4-6 แสดงวิธีการหมุนทางวิ่งด้วยวิธีการทั้งสี่

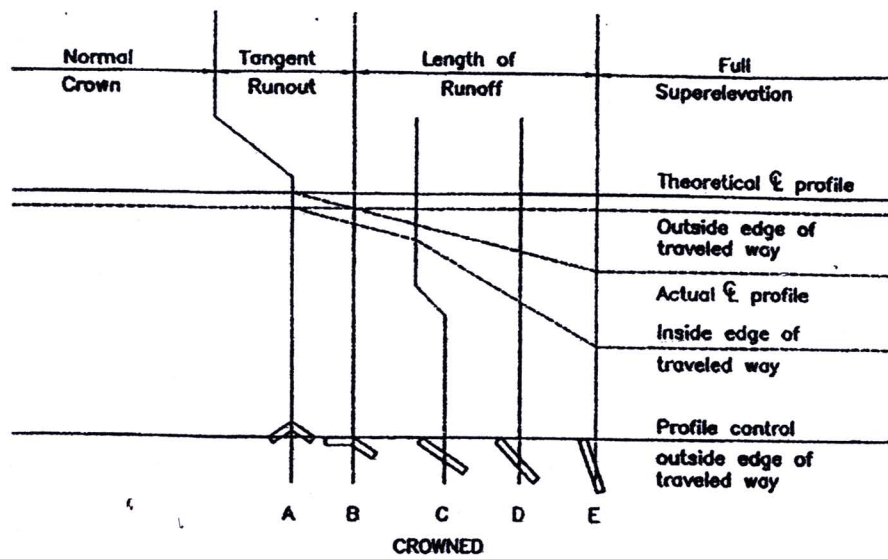


-A-



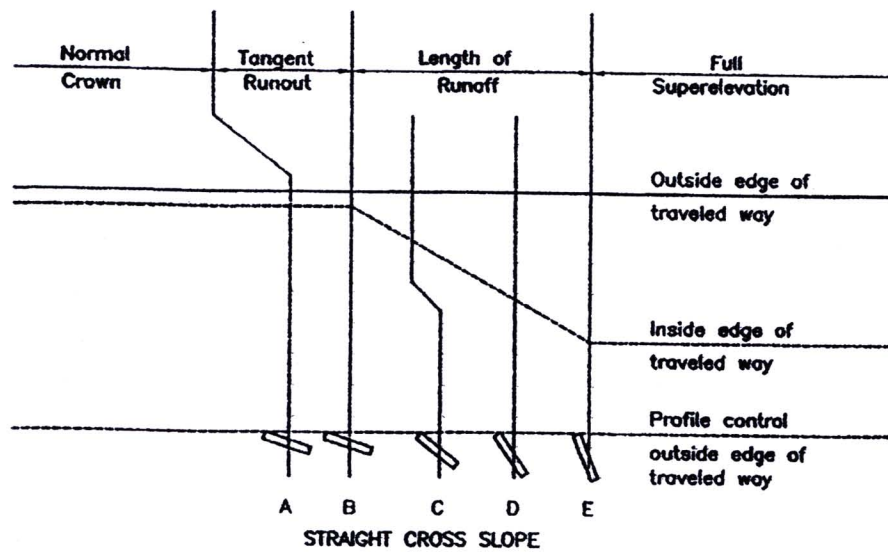
-B-

รูป 2.4-5 ผังโปรไฟล์และรูปตัด แสดงวิธีการยกโค้งทางจากช่วงนอร์มอลคราวน์เข้าสู่โค้งไปขวา โดยการ (A) หมุนเพพเมนต์ (Pavement) รอบเส้นศูนย์กลางทาง และ (B) หมุนเพพเมนต์รอบ ขอบใน (AASHTO, 2004, Exhibit 3-40, p. 19)



TRAVELED WAY REVOLVED ABOUT OUTSIDE EDGE

-C-



TRAVELED WAY REVOLVED ABOUT OUTSIDE EDGE

-D-

NOTE: ANGULAR BREAKS TO BE APPROPRIATELY ROUNDED AS SHOWN.

รูป 2.4-6 ผังโปรไฟล์และรูปตัด แสดงวิธีการยกโค้งทางจากช่วงนอร์มอลคราวน์เข้าสู่โค้งไปขวา โดยการ (C) หมุนเพพเมนต์ (Pavement) รอบขอบนอก และ (D) หมุนเพพเมนต์รอบขอบนอก โดยให้แกนหมุนของขอบทางและจุดกึ่งกลางทางอยู่ในแนวเดียวกัน (AASHTO, 2004, Exhibit 3-40, p. 195)

การยกโค้งปกติแล้วเริ่มทำตั้งแต่ช่วงทางตรงก่อนเข้าโค้งและจะยกโค้งเสร็จได้อัตราการยกโค้งตามกำหนดก่อนหรือ ณ จุดที่เริ่มต้นโค้งกลม ในโค้งที่มีโค้งสไปรอลอยู่ด้วย การยกโค้งสามารถทำเสร็จได้ในช่วงโค้งสไปรอล เพราะฉะนั้นการยกโค้งเต็มที่เสร็จเมื่อถึงจุด TS (Tangent to Spiral) อยู่ในช่วงทางตรงก่อนเข้าโค้ง เพราะฉะนั้น ถ้าออกแบบโดยให้ความยาวสไปรอลเท่ากับ Superelevation runoff. Station TS (Tangent to Spiral) จะอยู่ที่จุด B และ Station SC จะอยู่ที่จุด E. ความยาวของ Superelevation runoff กำหนดโดยหลักเกณฑ์ที่ไม่ให้การเปลี่ยนแปลงของระดับของขอบเทียบกับของเส้นศูนย์กลางทางเปลี่ยนเร็วเกินไป (ตาราง 2.6 ถึง ตาราง 2.9)

2.4.3 ความยาวโค้งสไปรอล (Spiral curve transitions)

เมื่อได้ออกแบบหรือกำหนดครีสมิของโค้งกลม (R) และหาอัตราการยกโค้ง (e) แล้ว การกำหนดความยาวของโค้งสไปรอลที่ใส่เพื่อเชื่อมแนวทางตรงกับโค้งกลม ต้องคำนึงถึงความยาวของโค้งสไปรอลให้พอที่จะให้คนขับมีเวลาในการปรับตัว เปลี่ยนสภาพขับขึ้นบนแนวด้วย ในปัจจุบันมีข้อเสนอแนะสูตรสำหรับคำนวณความยาวโค้งสไปรอลหลายสูตรซึ่งให้คำตอบแตกต่างกัน และยังไม่สามารถสรุปได้ว่าควรจะใช้สูตรใดเป็นบรรทัดฐาน นอกจากนั้นการออกแบบก็ไม่จำเป็นต้องพยายามคำนวณความยาวโค้งสไปรอลที่แม่นยำจริงๆ ออกมา ในทางปฏิบัติ AASHTO(2004) แนะนำให้ใช้ค่า Superelevation Runoff เป็นความยาวขั้นต่ำของ ความยาวโค้ง สไปรอล Superelevation Runoff คือความยาวของทางที่ต้องการเพิ่มเปลี่ยนระดับของทางจาก Station ที่ Cross slope ของเลนนอกถูกปรับเป็นศูนย์แล้วจนถึง Station ที่ยกโค้งเต็มที่ หรือ สลับกัน ตาราง 2.3 ถึงตาราง 2.6 แสดงอัตราการยกโค้ง (e) และความยาวขั้นต่ำของ Runoff ที่ความเร็วออกแบบและรัศมีโค้งกลมต่างๆ กัน $e_{\max} = 6\%, 8\%, 10\%$ และ 12% ตามลำดับ (ค่า e ที่ได้จากตาราง 2.6 ถึงตาราง 2.9 สอดคล้องกับที่ได้จากรูป 2.4-7 ถึงรูป 2.4-8 ตามลำดับ)

ตาราง 2.6 ค่าออกแบบส่วนต่างๆ ของทางสัมพันธ์กับความเร็วออกแบบและโค้ง $e_{max} = 6\%$

e (%)	$V_d = 20$ km/h R (m)	$V_d = 30$ km/h R (m)	$V_d = 40$ km/h R (m)	$V_d = 50$ km/h R (m)	$V_d = 60$ km/h R (m)	$V_d = 70$ km/h R (m)	$V_d = 80$ km/h R (m)	$V_d = 90$ km/h R (m)	$V_d = 100$ km/h R (m)	$V_d = 110$ km/h R (m)	$V_d = 120$ km/h R (m)	$V_d = 130$ km/h R (m)
1.5	194	421	733	1050	1440	1910	2360	2880	3510	4080	4770	5240
2.0	138	299	525	750	1030	1390	1710	2090	2580	2970	3510	3880
2.2	122	265	465	688	919	1230	1530	1880	2300	2670	3160	3500
2.4	109	236	416	598	825	1110	1390	1700	2080	2420	2870	3190
2.6	97	212	372	540	746	1000	1260	1540	1890	2210	2630	2930
2.8	87	190	334	488	676	910	1150	1410	1730	2020	2420	2700
3.0	78	170	300	443	615	831	1050	1290	1590	1870	2240	2510
3.2	70	152	269	402	561	761	959	1190	1470	1730	2080	2330
3.4	61	133	239	364	511	697	882	1100	1360	1600	1940	2180
3.6	51	113	208	329	465	640	813	1020	1260	1490	1810	2050
3.8	42	96	177	284	422	586	749	939	1170	1390	1700	1930
4.0	36	82	155	261	390	535	690	870	1090	1300	1590	1820
4.2	31	72	138	234	343	488	635	808	1010	1220	1500	1720
4.4	27	63	121	210	311	446	584	748	938	1140	1410	1630
4.6	24	56	108	190	283	408	538	692	873	1070	1330	1540
4.8	21	50	97	172	258	374	496	641	812	987	1260	1470
5.0	19	45	88	156	235	343	457	594	755	933	1190	1400
5.2	17	40	79	142	214	315	421	549	701	871	1120	1330
5.4	15	36	71	128	195	287	386	506	648	810	1060	1260
5.6	13	32	63	115	176	260	351	463	594	747	980	1190
5.8	11	28	56	102	158	232	316	416	537	679	900	1110
6.0	8	21	43	79	123	184	252	336	437	560	756	951

(AASHTO, 2004, Exhibit 3-26, p. 168)

ตาราง 2.7 ค่าออกแบบส่วนต่างๆ ของทางสัมพันธ์กับความเร็วออกแบบและโค้ง $e_{max} = 8\%$

e (%)	$V_d = 20$ km/h R (m)	$V_d = 30$ km/h R (m)	$V_d = 40$ km/h R (m)	$V_d = 50$ km/h R (m)	$V_d = 60$ km/h R (m)	$V_d = 70$ km/h R (m)	$V_d = 80$ km/h R (m)	$V_d = 90$ km/h R (m)	$V_d = 100$ km/h R (m)	$V_d = 110$ km/h R (m)	$V_d = 120$ km/h R (m)	$V_d = 130$ km/h R (m)
1.5	184	443	784	1080	1480	1970	2440	2870	3330	3800	4280	4760
2.0	133	322	571	791	1090	1450	1790	2190	2660	3090	3580	4000
2.2	119	288	512	711	978	1300	1620	1980	2320	2650	3010	3320
2.4	107	261	463	644	885	1190	1470	1800	2090	2340	2660	2950
2.6	97	237	421	587	808	1080	1390	1650	1920	2180	2450	2690
2.8	88	216	385	539	742	992	1240	1520	1730	1980	2220	2430
3.0	81	199	354	496	684	916	1180	1410	1610	1870	2090	2280
3.2	74	183	326	458	633	849	1080	1310	1490	1740	1950	2130
3.4	66	169	302	425	588	790	988	1220	1400	1640	1850	2000
3.6	62	156	279	395	548	738	924	1140	1320	1540	1740	1900
3.8	57	144	259	368	512	690	868	1070	1240	1460	1650	1800
4.0	52	134	241	344	479	648	813	1010	1180	1380	1550	1700
4.2	48	124	224	321	448	608	768	948	1100	1280	1440	1580
4.4	43	115	208	301	421	573	722	885	1030	1190	1340	1470
4.6	38	106	192	281	395	540	682	847	986	1120	1260	1390
4.8	33	96	178	263	371	509	645	803	947	1070	1200	1320
5.0	30	87	163	246	348	480	611	762	901	1020	1150	1260
5.2	27	78	148	229	328	454	579	724	859	975	1100	1200
5.4	24	71	136	213	307	429	548	689	819	933	1050	1150
5.6	22	65	125	198	286	405	521	656	781	894	1000	1100
5.8	20	59	115	185	270	382	494	625	746	854	950	1050
6.0	19	55	108	172	253	360	469	595	713	817	910	1000
6.2	17	50	98	161	238	340	445	567	681	783	870	950
6.4	16	46	91	151	224	322	422	540	651	750	830	900
6.6	15	43	85	141	210	304	400	514	620	717	800	870
6.8	14	40	79	132	198	287	379	489	591	684	760	820
7.0	13	37	73	123	185	270	358	464	561	651	720	770
7.2	12	34	68	115	174	254	338	440	531	617	680	730
7.4	11	31	62	107	162	237	318	415	501	581	640	680
7.6	10	29	57	99	150	221	298	399	482	557	610	650
7.8	9	26	52	90	137	202	273	369	452	521	570	610
8.0	7	20	41	73	113	168	229	304	384	451	500	530

(AASHTO, 2004, Exhibit 3-27, p. 169)

ตาราง 2.8 ค่าออกแบบส่วนต่างๆ ของทางสัมพันธ์กับความเร็วออกแบบและโค้ง $e_{max} = 10\%$

e (%)	$V_d = 20$ km/h R (m)	$V_d = 30$ km/h R (m)	$V_d = 40$ km/h R (m)	$V_d = 50$ km/h R (m)	$V_d = 60$ km/h R (m)	$V_d = 70$ km/h R (m)	$V_d = 80$ km/h R (m)	$V_d = 90$ km/h R (m)	$V_d = 100$ km/h R (m)	$V_d = 110$ km/h R (m)	$V_d = 120$ km/h R (m)	$V_d = 130$ km/h R (m)
1.5	197	454	790	1110	1520	2000	2480	3010	3590	4250	4980	5410
2.0	145	333	580	815	1120	1480	1840	2230	2740	3160	3700	4050
2.2	130	300	522	735	1020	1340	1660	2020	2480	2860	3360	3680
2.4	118	272	474	669	920	1220	1520	1840	2280	2620	3070	3370
2.6	108	249	434	612	844	1120	1390	1700	2080	2410	2830	3110
2.8	99	229	399	564	778	1030	1290	1570	1920	2230	2620	2880
3.0	91	211	368	522	720	952	1190	1460	1780	2070	2440	2690
3.2	85	198	342	485	670	887	1110	1360	1670	1940	2280	2520
3.4	79	182	318	453	626	828	1040	1270	1560	1820	2140	2370
3.6	73	170	297	424	586	777	974	1200	1470	1710	2020	2230
3.8	68	159	278	398	551	731	917	1130	1390	1610	1910	2120
4.0	64	149	261	374	518	686	868	1060	1310	1530	1810	2010
4.2	60	140	245	353	490	652	820	1010	1240	1450	1720	1910
4.4	56	132	231	333	464	617	777	953	1180	1380	1640	1820
4.6	53	124	218	315	439	586	738	907	1120	1310	1560	1740
4.8	50	117	208	299	417	557	703	864	1070	1250	1490	1670
5.0	47	111	194	283	396	530	670	824	1020	1200	1430	1600
5.2	44	104	184	269	377	505	640	788	975	1150	1370	1540
5.4	41	98	174	256	359	482	611	754	934	1100	1320	1480
5.6	39	93	164	243	343	461	585	723	898	1060	1270	1420
5.8	36	88	155	232	327	441	561	693	861	1020	1220	1370
6.0	33	82	146	221	312	422	538	666	827	978	1180	1330
6.2	31	77	138	210	298	404	518	640	795	941	1140	1280
6.4	28	72	130	200	285	387	496	616	766	907	1100	1240
6.6	26	67	121	191	273	372	478	593	738	878	1060	1200
6.8	24	62	114	181	261	357	458	571	712	848	1030	1170
7.0	22	58	107	172	249	342	441	551	686	819	993	1130
7.2	21	55	101	164	238	328	425	532	664	792	963	1100
7.4	20	51	95	156	228	315	409	513	642	767	934	1070
7.6	18	48	90	148	218	303	394	496	621	743	907	1040
7.8	17	45	85	141	208	291	380	478	601	721	882	1010
8.0	16	43	80	135	199	279	366	463	582	699	857	981
8.2	15	40	76	128	190	268	353	448	564	679	834	956
8.4	14	38	72	122	182	257	339	432	546	660	812	932
8.6	14	36	68	116	174	246	326	417	528	641	790	910
8.8	13	34	64	110	166	236	313	402	509	621	770	888
9.0	12	32	61	105	158	225	300	386	491	602	751	867
9.2	11	30	57	99	150	215	287	371	472	582	731	847
9.4	11	28	54	94	142	204	274	364	453	560	709	828
9.6	10	26	50	88	133	192	259	337	432	537	685	809
9.8	9	24	46	81	124	179	242	316	407	509	656	786
10.0	7	19	38	68	105	154	210	277	358	454	597	739

(AASHTO, 2004, Exhibit 3-28, p. 171)



ตาราง 2.9 ค่าออกแบบส่วนต่างๆ ของทางสัมพันธ์กับความเร็วออกแบบและโค้ง $e_{max} = 12\%$

e (%)	$V_d = 20$ km/h R (m)	$V_d = 30$ km/h R (m)	$V_d = 40$ km/h R (m)	$V_d = 50$ km/h R (m)	$V_d = 60$ km/h R (m)	$V_d = 70$ km/h R (m)	$V_d = 80$ km/h R (m)	$V_d = 90$ km/h R (m)	$V_d = 100$ km/h R (m)	$V_d = 110$ km/h R (m)	$V_d = 120$ km/h R (m)	$V_d = 130$ km/h R (m)
1.5	210	459	804	1130	1440	2030	2510	3040	3720	4280	4980	5440
2.0	155	338	594	835	1040	1510	1870	2270	2810	3280	3740	4080
2.2	139	306	536	755	940	1360	1690	2090	2510	2900	3360	3710
2.4	127	278	486	688	865	1250	1550	1880	2300	2650	3110	3400
2.6	116	255	446	631	805	1140	1420	1730	2110	2440	2860	3140
2.8	107	235	413	583	742	1060	1320	1600	1960	2260	2680	2910
3.0	99	218	382	541	692	990	1220	1480	1820	2110	2480	2720
3.2	92	202	356	504	648	914	1140	1390	1700	1970	2320	2560
3.4	86	189	332	472	608	856	1070	1300	1580	1850	2180	2400
3.6	81	177	312	443	569	805	1010	1230	1510	1780	2080	2270
3.8	76	165	293	417	533	759	947	1160	1420	1680	1980	2160
4.0	71	157	276	393	502	718	896	1100	1350	1600	1880	2040
4.2	67	148	261	372	481	680	850	1040	1280	1520	1780	1940
4.4	64	140	247	353	467	648	808	988	1220	1460	1690	1850
4.6	60	132	234	336	443	615	770	941	1160	1390	1600	1770
4.8	57	126	222	319	421	588	734	899	1110	1330	1530	1700
5.0	54	119	211	304	402	560	702	860	1060	1280	1470	1630
5.2	52	114	201	290	402	535	672	824	1020	1240	1410	1570
5.4	49	108	192	277	384	513	644	790	973	1140	1360	1510
5.6	47	103	183	265	368	492	618	759	936	1100	1310	1460
5.8	45	98	175	254	353	472	594	730	900	1060	1260	1410
6.0	43	94	167	244	339	454	572	703	867	1020	1220	1360
6.2	41	90	159	234	326	438	551	678	837	981	1180	1310
6.4	39	86	153	225	313	420	531	654	808	948	1140	1270
6.6	37	82	146	216	302	405	512	632	781	917	1100	1230
6.8	35	78	140	208	290	391	494	611	755	888	1070	1200
7.0	34	75	134	200	280	377	478	591	731	860	1040	1160
7.2	32	71	128	192	270	364	462	572	708	834	1010	1130
7.4	30	68	122	185	260	352	447	554	686	810	974	1100
7.6	29	65	117	178	251	340	433	537	666	786	947	1070
7.8	27	61	112	172	243	329	420	521	646	764	921	1040
8.0	26	58	107	165	235	319	407	506	628	743	897	1020
8.2	24	55	102	159	227	309	395	481	610	723	874	989
8.4	23	52	97	154	219	298	383	477	593	704	852	965
8.6	22	50	93	148	212	290	372	464	577	686	831	942
8.8	20	47	88	142	205	281	361	451	562	668	811	921
9.0	19	46	85	137	196	273	351	439	547	652	792	900
9.2	18	43	81	132	191	264	341	428	533	636	774	880
9.4	18	41	77	127	185	256	332	416	520	621	756	861
9.6	17	39	74	123	179	249	323	408	507	606	738	843
9.8	16	37	71	118	173	241	314	395	494	582	723	826
10.0	15	36	68	114	167	234	305	385	482	579	706	809
10.2	14	34	65	110	161	228	296	375	471	568	693	783
10.4	14	33	62	105	155	219	288	365	459	553	679	778
10.6	13	31	59	101	150	212	279	355	448	541	665	763
10.8	12	30	57	97	144	204	270	345	436	529	652	749
11.0	12	28	54	93	139	197	261	335	423	516	639	735
11.2	11	27	51	89	133	189	252	324	411	503	626	722
11.4	11	25	48	85	127	182	242	312	397	488	613	709
11.6	10	24	46	80	120	173	232	300	382	472	598	697
11.8	9	22	43	75	113	163	219	285	364	453	578	685
12.0	7	18	38	64	98	143	194	255	328	414	540	665

(AASHTO, 2004, Exhibit 3-29, p. 173)

2.4.4 การขยายผิวจราจรในโค้ง (Roadway Widening)

เมื่อรถวิ่งในโค้งแนวร่องล้อของล้อหลังจะเอียงเข้ามาด้านในของโค้งเมื่อวัดเทียบกับทางวิ่งของล้อหน้า นอกจากนั้นคนขับต้องการช่องว่างระหว่างรถที่สวนกันในทางโค้งมากขึ้นกว่าตอนวิ่งในทางตรง รูป 2.4-7 แสดงความกว้างผิวจราจรในโค้ง (W_c) เทียบกับความกว้างผิวจราจรปกติในทางตรง (W_n) หรือส่วนขยายผิวจราจร (w) เท่ากับ $W_c - W_n$ ส่วนขยายผิวจราจร (w) ขึ้นอยู่กับรัศมีโค้ง (R), ความกว้างผิวจราจรปกติ (W_n), ประเภทยานพาหนะที่ออกแบบ (ซึ่งในกรณีรูป 2.4-7 ใช้รถบรรทุกทุกแชสซีเดี่ยว) และความเร็วออกแบบ AASHTO(2004) ได้เสนอแนะความกว้างของผิวจราจรที่จะขยายสำหรับทางสองช่องจราจรที่กว้าง 6.0, 6.6 และ 7.2 เมตร การขยายจะเริ่มทำเมื่อความต้องการผิวจราจรเพิ่มไม่น้อยกว่า 0.60 เมตรขึ้นไป (ตาราง 2.10)

$$(1) w = W_c - W_n$$

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

N = Number of lanes

w = widening for traveled way on curve, m.

W_c = width of traveled way on curve, m.

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

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

$$(5) Z = (0.104) (V / \sqrt{R})$$

W_n = width of traveled way on tangent, m.

U = track width of vehicle (out-to-out tires), m

C = lateral clearance per vehicle assumed 0.6, 0.75 & 0.9 m for W_n of 6.0, 6.6 & 7.2 m respectively

F_A = width of overhang, m.

Z = extra width allowance for difficulty of driving on curves, m.

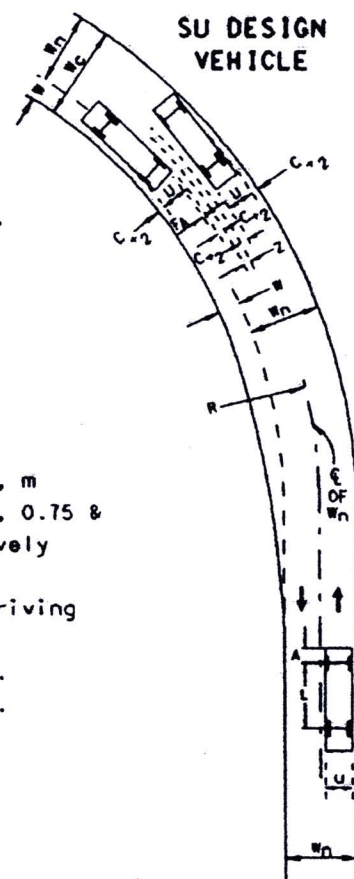
u = track width on tangent (out-to-out) 2.6 m.

R = radius on centerline of 2-lane highway, m.

L = wheelbase

A = front overhang

V = design speed of highway, km/h



รูป 2.4-7 การขยายทางวิ่งในโค้ง พื้นฐานสำหรับการหาค่า
(AASHTO, 2004, Exhibit 3-46, p. 209)

ตาราง 2.10 ค่าคำนวณและค่าออกแบบสำหรับขยายผิวทางในโค้งทางหลวง (ทางหลวงสองช่องจราจร, เคนรถทางเดียวหรือสองทาง)

Radius of curve (m)	Metric																	
	Roadway width = 7.2 m						Roadway width = 6.6 m						Roadway width = 6.0 m					
	Design Speed (km/h)						Design Speed (km/h)						Design Speed (km/h)					
	50	60	70	80	90	100	50	60	70	80	90	100	50	60	70	80	90	100
3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
2500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7
1500	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
1000	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
900	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
800	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
700	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0
600	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
500	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1
400	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
300	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4
250	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9		0.9	1.0	1.1	1.1	1.2		1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	
200	0.8	0.9	1.0	1.0			1.1	1.2	1.3	1.3			1.4	1.5	1.6	1.6		
150	1.1	1.2	1.3	1.3			1.4	1.5	1.6	1.6			1.7	1.8	1.9	1.9		
140	1.2	1.3					1.5	1.6					1.8	1.9				
130	1.3	1.4					1.6	1.7					1.9	2.0				
120	1.4	1.5					1.7	1.8					2.0	2.1				
110	1.5	1.6					1.8	1.9					2.1	2.2				
100	1.6	1.7					1.9	2.0					2.2	2.3				
90	1.8						2.1						2.4					
80	2.0						2.3						2.6					
70	2.3						2.6						2.9					

Notes: Values shown are for WB-15 design vehicle and represent widening in meters. For other design vehicles.

Values less than 0.6 m may be disregarded.
For 3-lane roadways, multiply above values by 1.5.
For 4-lane roadways, multiply above values by 2.

(AASHTO, 2004, Exhibit 3-47, p. 211)

การขยายโค้งควรขยายทีละน้อย โดยเริ่มขยายจากขอบถนนช่วงเข้าโค้งซึ่งมีความกว้างพอดีเพื่อให้ยานสามารถขับผ่านโค้งได้ โดยมีจุดสำคัญที่ใช้ในการออกแบบ ดังนี้

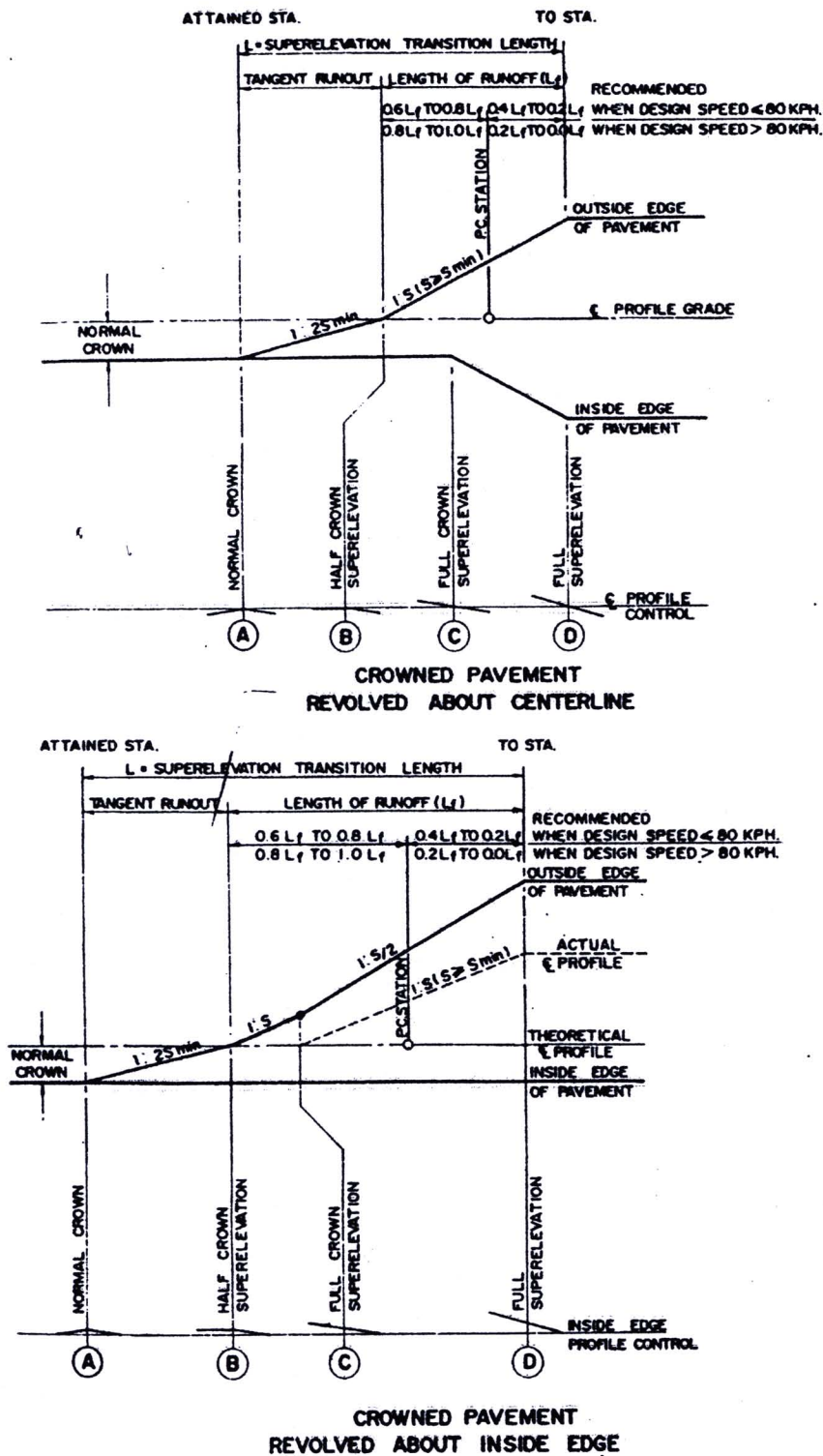
- โค้งทั่วไป (Simple curve) ควรขยายจากขอบด้านในของเส้นทางเท่านั้น ในการออกแบบโค้งก้นหอย (Spiral curve) การขยายโค้งอาจจะขยายจากขอบในหรือทั้งสองข้างเท่าๆกันก็ได้

- การขยายโค้งควรค่อยๆขยาย โดยให้ความยาวเพียงพอต่อการใช้งาน แม้ว่าการกระด้างกล่าวจะเป็นที่ต้องการ แต่จะทำให้ขอบทางแคบลง และการขยายโค้งไม่ควรทำในช่วงที่มีการยกโค้ง (Superelevation) โดยปกติการขยายความกว้างควรจะให้มีระยะทาง 30 ถึง 60 เมตร

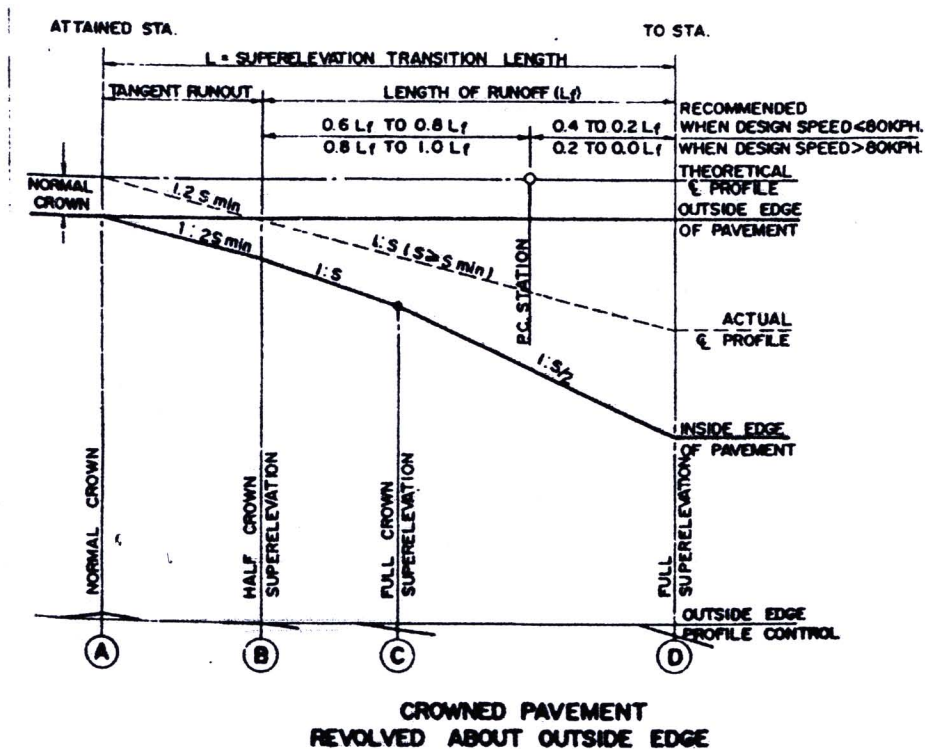
2.5 มาตรฐานชั้นทางสำหรับทางหลวงในประเทศไทย

2.5.1 วิธียกโค้งสำหรับโค้งกลม (Circular curve)

การยกโค้งกลมที่กรมทางหลวงใช้ในการออกแบบถนนมี 5 วิธีด้วยกันคือ 1) วิธีหมุนผิวจราจรรอบศูนย์กลางทาง ระดับศูนย์กลางทางคงที่ 2) วิธีหมุนรอบขอบในของทางวิ่งหรือให้ระดับขอบใน (Inner edge) คงที่ 3) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทางวิ่ง (ระดับของขอบนอกคงที่) 4) วิธีหมุนรอบขอบในของทาง กรณีนี้ใช้ออกแบบถนนเลนเดี่ยว (Single Lane) และ 5) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทาง กรณีนี้ใช้ออกแบบถนนเลนเดี่ยว (Single Lane) รูป 2.5-1 ถึงรูป 2.5-3 แสดงวิธีการหมุนทางวิ่งด้วยวิธีการทั้ง 5

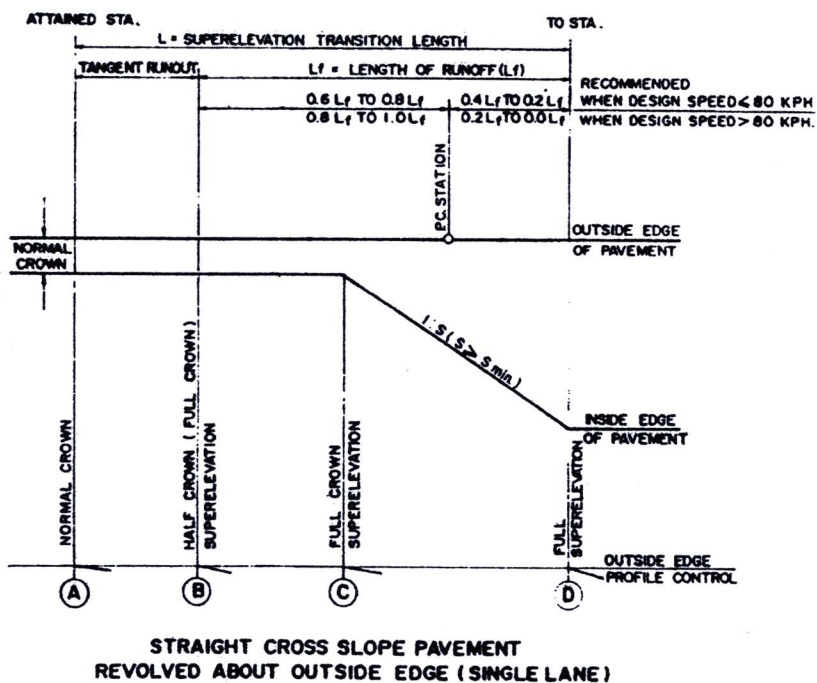
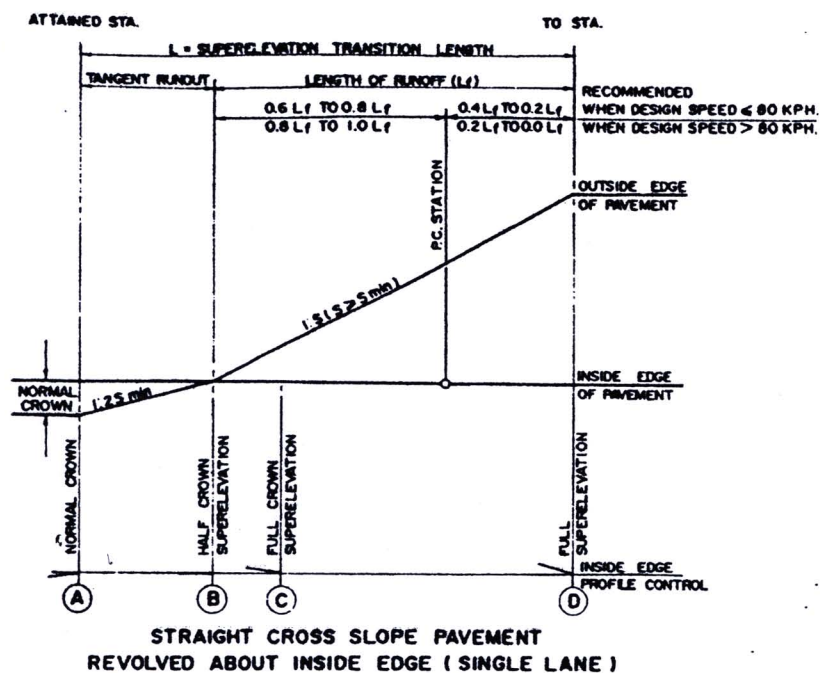


รูป 2.5-1 ผังโปรไฟล์และรูปตัด แสดงวิธีการยกโค้งทางจากช่วงนอร์มอลคราวน์เข้าสู่โค้งไปขวา โดยวิธี (1) หมุนเพพเมนต์ (Pavement) รอบเส้นศูนย์กลางทาง และ (2) หมุนเพพเมนต์รอบขอบใน - กรณีไค้กลม (Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications Department of Highways, 1994, Sheet 2)



รูป 2.5-2 ผังโปรไฟล์และรูปตัด แสดงวิธีการยกโค้งทางจากช่วงนอร์มอลคราวน์เข้าสู่โค้งไปขวา โดยวิธี (3) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทางวิ่ง (ระดับของขอบนอกคงที่) - ในกรณีโค้งกลม

(Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications Department of Highways, 1994, Sheet 2)



รูป 2.5-3 ผังโปรไฟล์และรูปตัด แสดงวิธีการยกโค้งทางจากช่วงนอร์มอลคราวน์เข้าสู่โค้งไปขวา โดยวิธี 4) วิธีหมุนรอบขอบในของทาง กรณีนี้ใช้ออกแบบถนนเลนเดียว (Single Lane) และ 5) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทาง กรณีนี้ใช้ออกแบบถนนเลนเดียว - กรณีโค้งกลม (Single Lane) (Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications Department of Highways, 1994, Sheet 2)

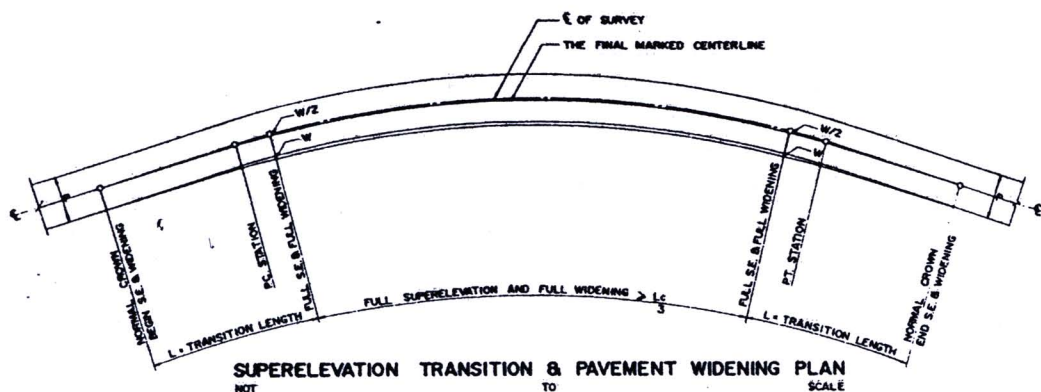
ตาราง 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วออกแบบ (Design speed) กับ อัตราส่วนของความชันระหว่างขอบถนนสองช่องจราจรและจุดกึ่งกลางถนน

Design Speed KPH.	Maximum Relative Slopes 1 : S min
30	1 : 120
35	1 : 128
40	1 : 135
45	1 : 143
50	1 : 150
55	1 : 158
60	1 : 165
65	1 : 173
70	1 : 180
75	1 : 188
80	1 : 195
85	1 : 203
90	1 : 210
95	1 : 218
100	1 : 225
105	1 : 233
110 and over	1 : 240

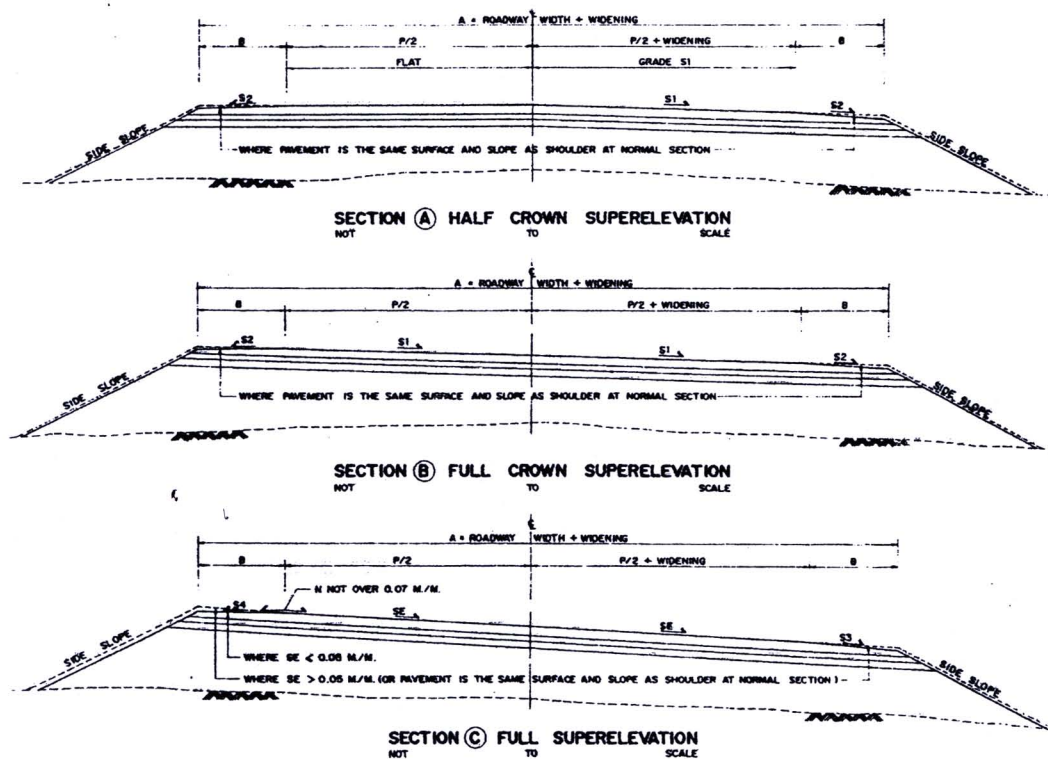
หมายเหตุ : ค่าต่างๆในตารางใช้ในการออกแบบโค้งกลม (Circular Curve) และโค้งสไปรอล (Spiral Curve)
(Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications
Department of Highways, 1994, Sheet 2)

2.5.2 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการยกโค้ง และการขยายผิวจราจรในโค้งวงกลม (Circular curve)

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการยกโค้งที่ตำแหน่งต่างๆ ในโค้ง และการขยายผิวจราจรในโค้งวงกลม กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบดังรูป 2.5-4 และรูป 2.5-5



รูป 2.5-4 รูปแปลน แสดงตำแหน่งต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการยกโค้ง และการขยายผิวจราจรในโค้งวงกลม (Circular curve)
(Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications
Department of Highways, 1994, Sheet 2)



NOTES :

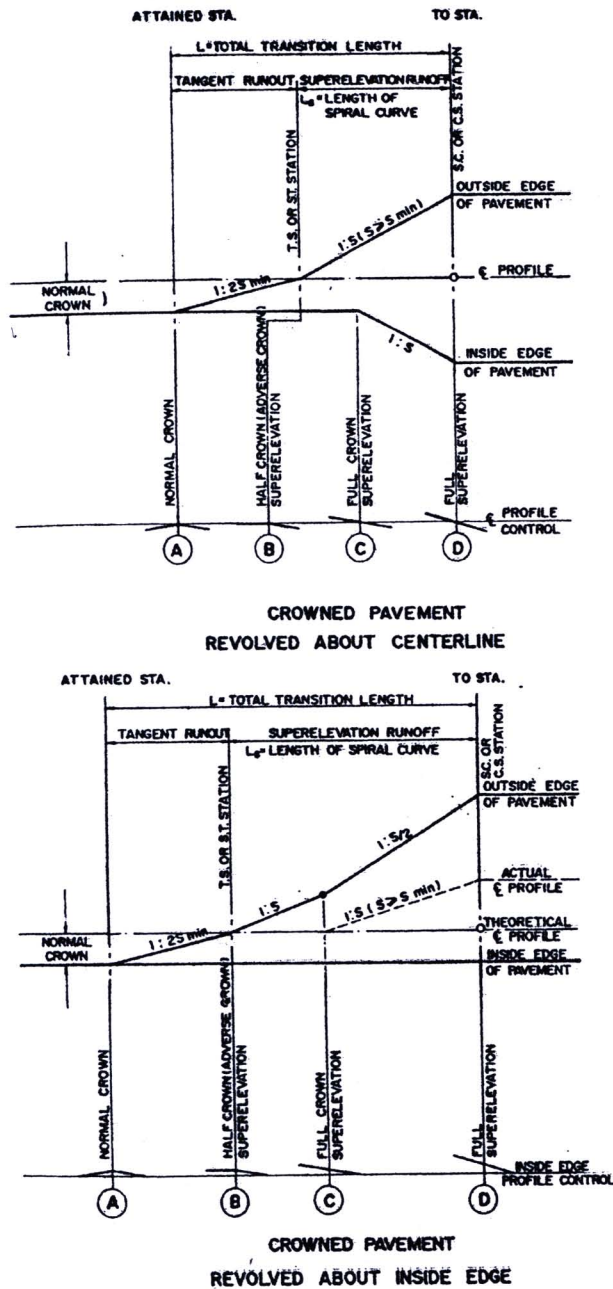
1. THE MAXIMUM ROLLOVER OF PAVEMENT SLOPE "N" SHALL NOT EXCEED 0.07 M/M, "N" IS ALGEBRAIC DIFFERENCE IN CROSS SLOPE RATES "SE" AND "S4", WHICH SHALL BE ADJUSTED TO CONFORM TO THE SUPERELEVATION RATES (SE) WHENEVER "SE" IS GREATER THAN 0.05 M/M.
2. THE ROADWAY SHALL BE CONSTRUCTED IN ACCORDANCE WITH DETAILS SHOWN ON THE TYPICAL CROSS - SECTION, PLAN & PROFILE AND THIS DRAWING.
3. THE REQUIRED WIDENING (W) AND SUPERELEVATION RATE (SE) ARE GIVEN ON THE ALIGNMENT DRAWINGS.
4. THE RELATIONSHIP BETWEEN DESIGN SPEED AND MAXIMUM RELATIVE SLOPE ARE SHOWN IN THE TABLE.
5. MINIMUM - DESIGN SUPERELEVATION RUNOFF LENGTH FOR THREE - LANE PAVEMENTS SHOULD BE 1.2 TIMES THE CORRESPONDING LENGTH FOR TWO - LANE HIGHWAYS.
6. MINIMUM - DESIGN SUPERELEVATION RUNOFF LENGTH FOR FOUR - LANE PAVEMENTS SHOULD BE 1.5 TIMES THE CORRESPONDING LENGTH FOR TWO - LANE HIGHWAYS.
7. MINIMUM - DESIGN SUPERELEVATION RUNOFF LENGTH FOR SIX - LANE PAVEMENTS SHOULD BE 2.0 TIMES THE CORRESPONDING LENGTH FOR TWO - LANE HIGHWAYS.

รูป 2.5-5 รูปตัด A, B และ C แสดงตำแหน่งต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตรายกโค้ง และการขยายผิวจราจรในโค้งกลม (Circular curve)
(Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications
Department of Highways, 1994, Sheet 2)

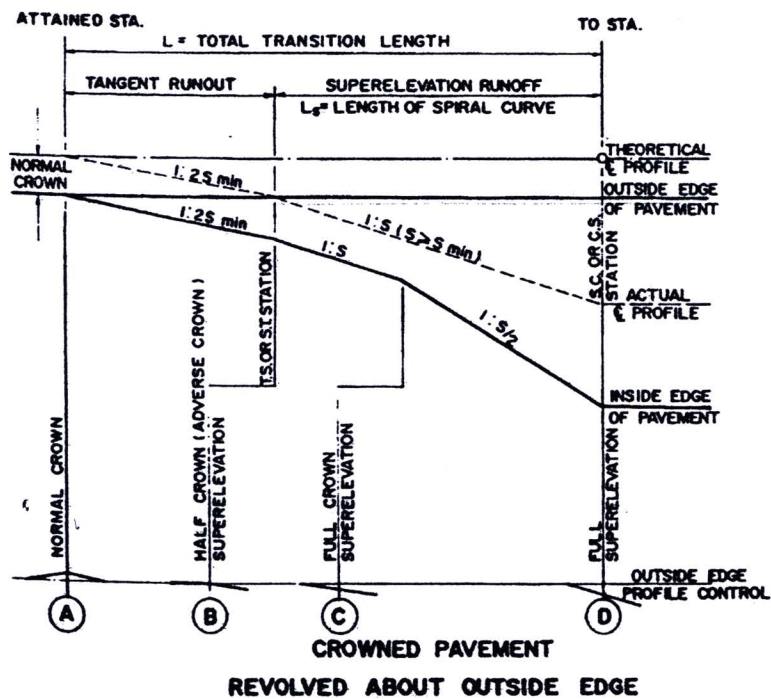
2.5.3 วิธียกโค้งสำหรับโค้งสปโรด (Spiral curve)

การยกโค้งสปโรดที่กรมทางหลวงใช้ในการออกแบบถนนมี 5 วิธีด้วยกันคือ 1) วิธีหมุนผิวจราจรรอบศูนย์กลางทาง ระดับศูนย์กลางทางคงที่ 2) วิธีหมุนรอบขอบในของทางวิ่งหรือให้ระดับขอบใน (Inner edge) คงที่ 3) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทางวิ่ง (ระดับของขอบนอกคงที่)

4) วิธีหมุนรอบขอบในของทาง กรณีนี้ใช้ออกแบบถนนเลนเดี่ยว (Single Lane) และ 5) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทาง กรณีนี้ใช้ออกแบบถนนเลนเดี่ยว (Single Lane) รูป 2.5-6 ถึงรูป 2.5-8 แสดงวิธีการหมุนทางวิ่งด้วยวิธีการทั้ง 5

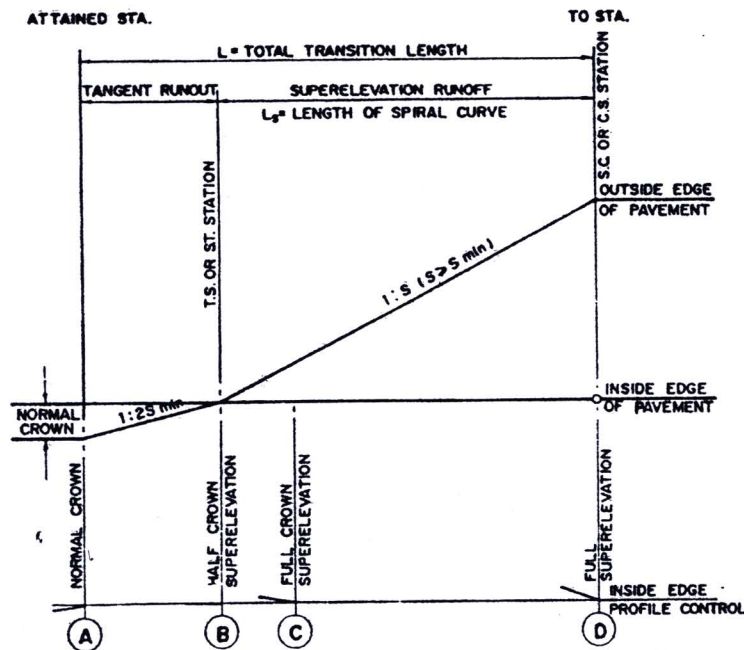


รูป 2.5-6 พังโปรไฟล์และรูปตัด แสดงวิธีการยกโค้งทางจากช่วงนอร์มอลคราวน์เข้าสู่โค้งไปขวา โดยวิธี (1) หมุนเพพเมนต์ (Pavement) รอบเส้นศูนย์กลางทาง และ (2) หมุนเพพเมนต์รอบขอบใน - กรณีโค้งสไปรอล (Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications Department of Highways, 1994, Sheet 3)

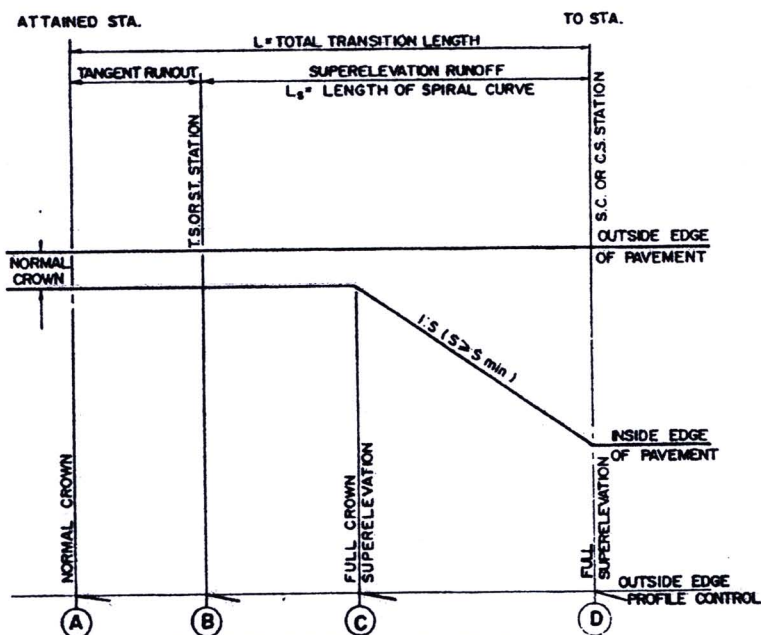


รูป 2.5-7 ผังโปรไฟล์และรูปตัด แสดงวิธีการยกโค้งทางจากช่วงนอร์มอลเทราน์เข้าสู่โค้งไปขวา โดยวิธี (3) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทางวิ่ง (ระดับของขอบนอกคงที่) – กรณีโค้งสไปรอล

(Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications
Department of Highways, 1994, Sheet 3)



STRAIGHT CROSS SLOPE PAVEMENT
REVOLVED ABOUT INSIDE EDGE (SINGLE LANE)



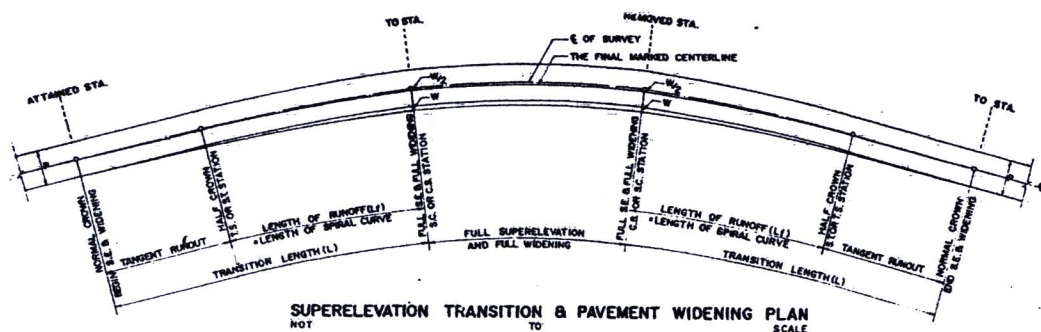
STRAIGHT CROSS SLOPE PAVEMENT
REVOLVED ABOUT OUTSIDE EDGE (SINGLE LANE)

รูป 2.5-8 ผังโปรไฟล์และรูปตัด แสดงวิธีการยกโค้งทางจากช่วงนอร์มอลคราวน์เข้าสู่โค้งไปขวา โดยวิธี 4) วิธีหมุนรอบขอบในของทาง กรณีนี้ใช้ออกแบบถนนเลนเดียว (Single Lane) และ 5) วิธีหมุนรอบขอบนอกของทาง กรณีนี้ใช้ออกแบบถนนเลนเดียว (Single Lane) – กรณีโค้งสไปรอล

.(Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications
Department of Highways, 1994, Sheet 3)

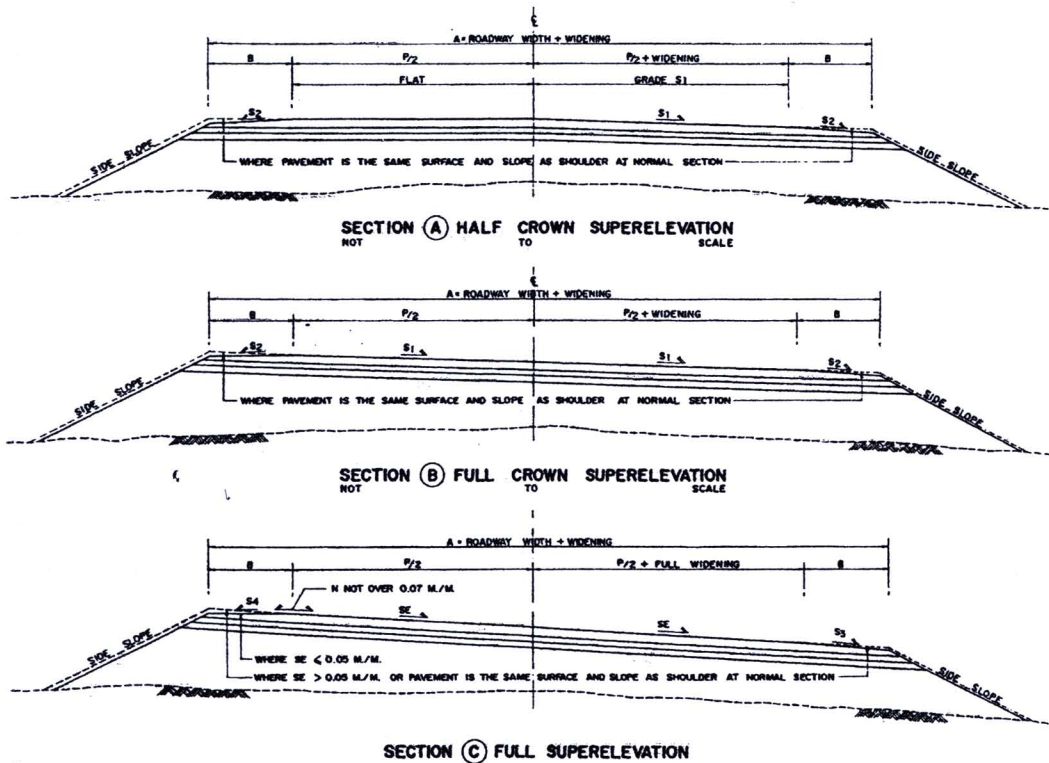
2.5.4 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการยกโค้ง และการขยายผิวจราจรในโค้งสไปรอล (Spiral curve)

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการยกโค้งที่ตำแหน่งต่างๆ ในโค้ง และการขยายผิวจราจรในโค้งสไปรอล กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบดังรูป 2.5-9 และรูป 2.5-10



รูป 2.5-9 รูปแปลน แสดงตำแหน่งต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการยกโค้ง และการขยายผิวจราจรในโค้งสไปรอล (Spiral curve)

(Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications Department of Highways, 1994, Sheet 3)



NOTES :

1. THE MAXIMUM ROLLOVER OF PAVEMENT SLOPE "N" SHALL NOT EXCEED 0.07 M/M, "N" IS ALGEBRAIC DIFFERENCE IN CROSS SLOPE RATES "SE" AND "S4", WHICH SHALL BE ADJUSTED TO CONFORM TO THE SUPERELEVATION RATES (SE) WHENEVER "SE" IS GREATER THAN 0.05 M/M.
2. THE ROADWAY SHALL BE CONSTRUCTED IN ACCORDANCE WITH DETAILS SHOWN ON THE TYPICAL, CROSS-SECTION, PLAN & PROFILE AND THIS DRAWING.
3. THE REQUIRED WIDENING (W) AND SUPERELEVATION RATE (SE) ARE GIVEN ON THE ALIGNMENT DRAWINGS.
4. THE RELATIONSHIP BETWEEN DESIGN SPEED AND MAXIMUM RELATIVE SLOPE ARE SHOWN IN THE TABLE.
5. MINIMUM - DESIGN SUPERELEVATION RUNOFF LENGTH FOR THREE - LANE PAVEMENTS SHOULD BE 1.2 TIMES THE CORRESPONDING LENGTH FOR TWO - LANE HIGHWAYS.
6. MINIMUM - DESIGN SUPERELEVATION RUNOFF LENGTH FOR FOUR - LANE PAVEMENTS SHOULD BE 1.5 TIMES THE CORRESPONDING LENGTH FOR TWO - LANE HIGHWAYS.
7. MINIMUM - DESIGN SUPERELEVATION RUNOFF LENGTH FOR SIX - LANE PAVEMENTS SHOULD BE 2.0 TIMES THE CORRESPONDING LENGTH FOR TWO - LANE HIGHWAYS.

รูป 2.5-10 รูปตัด A, B และ C แสดงตำแหน่งต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการยกโค้ง และการขยายผิวจราจรในโค้งสไปรอล (Spiral curve)
(Kingdom of Thailand Ministry of Transport and Communications
Department of Highways, 1994, Sheet 3)

สำหรับการออกแบบด้านเรขาคณิตของถนนโดยกรมทางหลวง ได้กำหนดมาตรฐานชั้นทางดังแสดงในตาราง 2.12

ตาราง 2.12 แสดงมาตรฐานชั้นทางสำหรับทางหลวงทั่วประเทศ

ชั้นทาง	พิเศษ	1	2	3	4	5	เขตเมือง	ทาง ขนาน
ปริมาณการจราจร เฉลี่ยต่อวัน	> 8,000	4,000 - 8,000	2,000 - 4,000	1,000 - 2,000	300 - 1,000	< 300		
Design speed km./h.								
- ทางรวม		90 - 110			70 - 90	60 - 80	60	70 - 80
- ทางเนิน		80 - 110			55 - 70	50 - 60	60	70 - 80
- ทางเขา		70 - 90			40 - 55	30 - 50	60	60 - 70
Grade (%)								
- ทางรวม	4		4		4	4	ตามสภาพพื้นที่	4
- ทางเนิน	6		6		8	8	ตามสภาพพื้นที่	6
- ทางเขา	6		8		12	12	ตามสภาพพื้นที่	8
ประเภทผิวทาง จราจรที่เสนอแนะ และไหล่ทาง		ชั้นสูง	กลาง-สูง			ลูกรัง	ชั้นสูง	กลาง-สูง
ความกว้างของผิว จราจร (เมตร)	อย่างน้อย ข้างละ 7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	8.00	ช่องจราจรละ 3.00 - 3.50	ช่อง จราจรละ 3.00 - 3.50
ความกว้างของ ไหล่ทาง (เมตร)	ซ้าย 2.50 - 3.00 ขวา ทาง 1.00 - 1.50	2.50	2.00	1.50	1.00	-	2.50 หรือ เป็น ทางเท้า	อย่างน้อย 2.00 ม. หรือเป็น ทางเท้า
ความกว้างของผิว จราจรบนสะพาน (เมตร)	11	12	11	11	11	11	สะพานกว้างตามรูปแบบ Ultimate Design หรืออย่างน้อย 11.00 ม.	
ความกว้างของเขต ทาง (เมตร)	60-80		40-60		30-40		ตามความ เหมาะสม	-
ยกโค้งสูงสุด				10%			6%	10%

หมายเหตุ :

- 1) ความกว้างไหล่ทางที่ปรากฏเป็นไหล่ทาง โดยทั่วไปสำหรับบางช่วง หากมีความจำเป็นอาจขยายความกว้างได้ตามความจำเป็นของทางในช่วงนั้นๆ
 - 2) การแบ่งผิวจราจรและไหล่ทางแบ่งด้วยเส้นขอบทาง
 - 3) สะพานที่มีทางเท้าความกว้างทางเท้าอย่างน้อยข้างละ 1.50 เมตร
 - 4) ความกว้างสะพานในทางชั้น 4 และ 5 ในสายทางที่คาดว่าจะไม่เพิ่มมาตรฐานชั้นทาง ในระยะเวลาอันสั้น ความกว้างสะพานอาจลดลงได้แต่ต้องไม่น้อยกว่า 9.00 เมตร
 - 5) ความลาดชันของคันทางโดยทั่วไปให้ใช้ความลาดเอียง 4:1 ถึง 6:1 ยกเว้นบางช่วงที่มีความจำเป็น ความลาดเอียงอาจใช้ 2:1 ถึง 3:1 ตามแต่กรณี
 - 6) มาตรฐานทางชั้น 4 และ 5 ไม่แนะนำสำหรับทางหลวงแผ่นดิน
- (www.doh.go.th, Accessed: December 17, 2009)