บทที่ 2

แนวคิด และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบทางเรขาคณิตของแนวทาง (Geometric Design of Alignments)

การเกิดอุบัติเหตุเกิดจากหลายปัจจัย มีน้อยครั้งที่จะเกิดจากปัจจัยเดียว ปัจจัยที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุมี 3 ปัจจัย คือ ความผิดพลาดของคน ความบกพร่องของยานพาหนะ ถนนกับสภาพแวดล้อม เนื่องจากรูปแบบถนนมีบทบาทต่อจิตวิทยาของผู้ขับขี่ที่จะแสดงถึงการรับรู้ การตัดสินใจ ที่สามารถนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายยิ่งขึ้น (AASHTO, 2001)

ดังนั้นทางหลวงควรออกแบบให้ผู้ขับขี่มีการตัดสินใจเรื่องต่าง ๆ น้อยที่สุดและไม่ควรให้มีสภาพที่น่าจะเกิดอุบัติเหตุได้ จำนวนการเกิดอุบัติเหตุนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อผู้ขับขี่ต้องตัดสินใจเพิ่มขึ้น ถนนที่มีลักษณะสอดคล้องกันทั้งด้านรูปแบบและเครื่องควบคุมการจราจรมีส่วนสำคัญในการลดการตัดสินใจของผู้ขับขี่ หรือมีสภาพที่ผู้ขับขี่คาดได้ว่าน่าจะเกิดอะไรขึ้นข้างหน้า

การออกแบบทางเรขาคณิตของทางหมายถึง การออกแบบหรือกำหนดมิติ (Dimension) ของส่วนที่มองเห็นได้ของทางหลวง อันได้แก่ รูปตัดทาง แนวทางราบ แนวทางดิ่ง ทางร่วม ทางแยก และรายละเอียดต่าง ๆ เป็นต้น การออกแบบทางเรขาคณิตนับเป็นกระบวนการออกแบบที่นำเอาลักษณะความต้องการและความคาดหวังของทั้งคน รถ และภูมิประเทศมาพิจารณาออกแบบให้ได้มาซึ่งทางหลวงที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัยและประหยัด ในการออกแบบอาศัยข้อมูลต่าง ๆ มาประกอบ (ณรงค์ กุหลาบ, 2543) คือ

1. ปริมาณการจราจร (Traffic volume) เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้แบ่งประเภทและมาตรฐานทางหลวง ปริมาณจราจรจะใช้ทั้งปริมาณการจราจรในปัจจุบันและปริมาณในปีอนาคตที่ออกแบบใช้งาน (Design life) ซึ่งโดยมากจะใช้ปริมาณการจราจรในปีที่ 7 หรือปีที่ 15 มาเป็นข้อมูลในการออกแบบ

2. ลักษณะของยานพาหนะ (Vehicle characteristics) ลักษณะของยานพาหนะที่ใช้ออกแบบทางจะได้แก่รูปร่างของรถ เช่น ความกว้าง ความยาว ประเภท น้ำหนัก สมรรถนะ และพื้นที่ต้องการในการสัญจร ยานพาหนะที่นำมาพิจารณาในการออกแบบได้แก่ รถยนต์นั่ง (Passenger car) รถโดยสาร (Bus) และรถบรรทุก (Truck)

3. ความเร็วออกแบบ (Design speed) ความเร็วสูงสุดที่ใช้ออกแบบให้วิ่งได้อย่างปลอดภัยจะเป็นตัวกำหนดงานออกแบบส่วนย่อยต่าง ๆ (Elements) ของทางหลวงตามสภาพการใช้งานและลักษณะภูมิประเทศ

จะเห็นว่าผลลัพธ์ของการออกแบบคือได้ทางที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย ประหยัดและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นต้องมีการกำหนดเกณฑ์ (Criteria) ต่าง ๆ ในการออกแบบเพื่อให้แน่ใจว่าทางที่ได้จะมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัย (ลำดวน ศรีศักดา, 2544)

2.2 ระยะมองเห็น (Sight Distance)

2.2.1 การพิจารณาโดยทั่วไป (General Considerations)

ระยะมองเห็นคือ ความยาวของถนนที่ผู้ขับขี่สามารถมองเห็นไปข้างหน้า ค่าความยาวของถนนควรมีความยาวเพียงพอสำหรับให้รถหยุดได้ก่อนถึงสิ่งกีดขวางบนถนน ซึ่งการออกแบบที่ดีควรออกแบบให้มีระยะมองเห็นมาก ๆ (AASHTO, 2001)

เกณฑ์ที่ใช้ในการหาระยะมองเห็น (Criteria for Measuring Sight Distance) คือ ความสูงสายตาผู้ขับวัดจากระดับผิวถนน, ความสูงของสิ่งกีดขวางวัดจากระดับผิวถนน และระยะทางด้านข้างของสิ่งกีดขวางการมองเห็นที่อยู่ในแนวการมองเห็นของสายตาผู้ขับขี่ (AASHTO, 2001)

1) ความสูงของสายตาผู้ขับขี่ (Height of Driver's Eye)

สำหรับการหาระยะมองเห็นสำหรับการหยุดและแซงของรถยนต์นั่ง (Passenger car) ระดับความสูงของสายตาผู้ขับขี่คือ 1,080 mm เหนือระดับผิวถนน

2) ความสูงของสิ่งกีดขวาง (Height of Object)

สำหรับการหาระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถนั้นระดับความสูงของสิ่งกีดขวางคือ 600 mm เหนือระดับผิวถนน และการหาระยะมองเห็นสำหรับการแซงคือ 1,080 mm เหนือระดับผิวถนน

3) การมองเห็นสิ่งกีดขวาง (Sight Obstructions)

บนถนนในช่วงทางตรงนั้นสิ่งกีดขวางที่บดบังการมองเห็นคือ ผิวถนนที่เป็นลักษณะเนิน ส่วนบนถนนในช่วงโค้งแนวราบ สิ่งกีดขวางที่บดบังการมองเห็นอาจเป็นผิวถนนที่เป็นเนินหรือลักษณะทางกายภาพที่อยู่นอกช่องทางเดินรถ เช่น สิ่งก่อสร้าง หรือต้นไม้ เป็นต้น ในการวางแผนก่อสร้างถนนควรตรวจสอบถึงสิ่งกีดขวางการมองเห็นทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ

2.2.2 ระยะมองเห็นสำหรับการหยุด (Stopping Sight Distance)

2.2.2.1 ระยะการหยุดรถ (Braking Distance)

ระยะการหยุดรถโดยประมาณบนถนนในแนวระดับ ที่ความเร็วออกแบบหาได้จากสมการ 1

$$d = 0.039\frac{V^2}{a} \qquad (1)$$

เมื่อ d = ระยะการหยุดรถ, m

V = ความเร็วออกแบบ, km/h

a = อัตราความหน่วง (Deceleration rate), m/s^2

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ประมาณ 90 % ของผู้ขับขี่หยุดรถด้วยความหน่วง (a) 3.4 m/s^2 ดังนั้น AASHTO จึงแนะนำให้ใช้ค่า a เท่ากับ 3.4 m/s^2 ในการหาค่าระยะการหยุดรถ

2.2.2.2 ค่าออกแบบ (Design Values)

ระยะมองเห็นสำหรับหยุดรถมี 2 ส่วน คือ ระยะที่รถวิ่งในช่วง Reaction Time และระยะการหยุดรถ โดยหาระยะหยุดได้จากสมการที่ 2

$$d = 0.278Vt + 0.039\frac{V^2}{a} \quad (2)$$

เมื่อ t = Brake reaction time, 2.5 s

V = ความเร็วออกแบบ, km/h

a = อัตราความหน่วง (Deceleration rate), m/s^2

AASHTO ได้แนะนำค่าออกแบบไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระยะมองเห็นสำหรับการหยุด (Stopping Sight Distance)

Design speed (km/h)	**Brake reaction distance (m)**	**Braking distance on level (m)**	**Stopping sight distance**	
			Calculated (m)	**Design (m)**
20	13.9	4.6	18.5	20
30	20.9	10.3	31.2	35
40	27.8	18.4	46.2	50
50	34.8	28.7	63.5	65
60	41.7	41.3	83.0	85
70	48.7	56.2	104.9	105
80	55.6	73.4	129.0	130
90	62.6	92.9	155.5	160

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Design speed (km/h)	Brake reaction distance (m)	Braking distance on level (m)	Stopping sight distance	
			Calculated (m)	Design (m)
100	69.5	114.7	184.2	185
110	76.5	138.8	215.3	220
120	83.4	165.2	248.6	250
130	90.4	193.8	284.2	285
Note : Brake reaction distance predicated on a limit of 2.5 s ; deceleration rate of 3.4 m/s^2 used to determine calculated sight distance.				

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 1

ค่าระยะมองเห็นสำหรับการหยุดในตารางที่ 3 ในการออกแบบควรใช้ให้มากกว่าที่แนะนำในตารางเพื่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่ โดยมีเงื่อนไขว่าผู้ขับขี่ต้องขับด้วยความเร็วออกแบบ

2.2.2.3 ผลกระทบเนื่องจากความลาดเอียงต่อการหยุดรถ (Effect of Grade on Stopping)

เมื่อถนนอยู่ในแนวลาดเอียง สมการหาระยะหยุดเขียนใหม่ได้เป็น

$$d = \frac{V^2}{254\left(\left(\frac{a}{9.81}\right) \pm G\right)} \qquad (3)$$

ในสมการค่า G เป็นเปอร์เซ็นต์ของความลาดเอียง ระยะหยุดขึ้นบนทางลาดจะน้อยกว่าระยะหยุดลงจากทางลาด ค่าออกแบบที่ AASHTO แนะนำแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระยะมองเห็นสำหรับการหยุดบนทางลาดเอียง (Stopping Sight Distance on Grades)

Design speed (km/h)	Stopping sight distance (m)					
	Downgrades			Upgrades		
	3%	6%	9%	3%	6%	9%
20	20	20	20	19	18	18
30	32	35	35	31	30	29
40	50	50	53	45	44	43

50	66	70	74	61	59	58

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Design speed (km/h)	**Stopping sight distance (m)**					
	Downgrades			**Upgrades**		
	3%	**6%**	**9%**	**3%**	**6%**	**9%**
60	87	92	97	80	77	75
70	110	116	124	100	97	93
80	136	144	154	123	118	114
90	164	174	187	148	141	136
100	194	207	223	174	167	160
110	227	243	262	203	194	186
120	263	281	304	234	223	214
130	302	323	350	267	254	243

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 2

2.2.3 ระยะสำหรับการแซงสำหรับถนนสองช่องจราจร (Passing Sight Distance for Two - Lane Highways)

เป็นระยะทางที่สั้นที่สุดในถนนที่มี 2 ช่องจราจรซึ่งผู้ขับขี่รถเห็นรถสวนมาแต่สามารถเร่งความเร็วแซงรถข้างหน้า และเบี่ยงกลับเข้าช่องทางเดิมโดยปลอดภัย โดยมีข้อกำหนดดังนี้

1) รถคันที่ถูกแซงจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

2) รถคันที่แซงจะต้องลดความเร็วลงและแล่นตามรถคันที่จะแซงเพื่อรอจังหวะแซงโดยปลอดภัย

3) เมื่อผู้ขับรถคันที่จะแซงเห็นทางข้างหน้ามีระยะห่างจากรถคันที่แล่นสวนมาพอที่จะแซงได้โดยปลอดภัย จึงเริ่มแซง

4) ขณะที่ทำการเร่งความเร็วแซง รถคันที่ถูกแซงต้องไม่เร่งความเร็วหนี และความเร็วของรถทั้ง 2 คัน จะต้องมีความเร็วต่างกันอย่างน้อย 15 km/h

5) เมื่อแซงพ้นแล้วและเบี่ยงกลับเข้าช่องทางเดิมแล้วจะต้องมีระยะห่างจากรถคันที่แล่นสวนมาพอเพียงและปลอดภัย

AASHTO ได้แนะนำค่าระยะสำหรับการแซงให้ปลอดภัยสำหรับถนนสองช่องจราจรไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนต่าง ๆ ของระยะสำหรับการแซงโดยปลอดภัยบนถนนสองช่องจราจร

(Elements of Safe Passing Sight Distance for Design of Two - Lane Highways)

Component of passing maneuver	Speed range (km/h)			
	50 - 65	66 - 80	81 - 95	96 - 110
	Average passing speed (km/h)			
	56.2	70.0	84.5	99.8
Initial maneuver :				
a = average acceleration[a] $(km/h/s)$	2.25	2.30	2.37	2.41
t_1 = time (s)	3.6	4.0	4.3	4.5
d_1 = distance traveled (m)	45	66	89	113
Occupation of left lane :				
t_2 = time [a] (s)	9.3	10.0	10.7	11.3
d_2 = distance traveled (m)	145	195	251	314
Clearance length :				
d_3 = distance traveled[a] (m)	30	55	75	90
Opposing vehicle :				
d_4 = distance traveled (m)	97	130	168	209
Total distance, $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ (m)	317	446	583	726
[a] For consistent speed relation, observed values adjusted slightly.				
Note : In the metric portion of the table, speed values are in km/h, acceleration rates in $(km/h/s)$, and distances are in metres.				

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 5

2.2.3.1 ค่าออกแบบ (Design Values)

AASHTO ได้แนะนำค่าออกแบบระยะสำหรับการแซงถนนสองช่องจราจร ไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ระยะออกแบบสำหรับการแซงถนนสองช่องจราจร (Passing Sight Distance for Design of Two - Lane Highways)

Design speed (km/h)	Assumed speeds (km/h)		Passing sight distance (m)	
	Passed vehicle	Passing vehicle	From Exhibit 3-6	Rounded for design
30	29	44	200	200
40	36	51	266	270
50	44	59	341	345
60	51	66	407	410

ตารางที่ 6 (ต่อ)

Design speed (km/h)	Assumed speeds (km/h)		Passing sight distance (m)	
	Passed vehicle	Passing vehicle	From Exhibit 3-6	Rounded for design
70	59	74	482	485
80	65	80	538	540
90	73	88	613	615
100	79	94	670	670
110	85	100	727	775
120	90	105	774	775
130	94	109	812	815

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 7

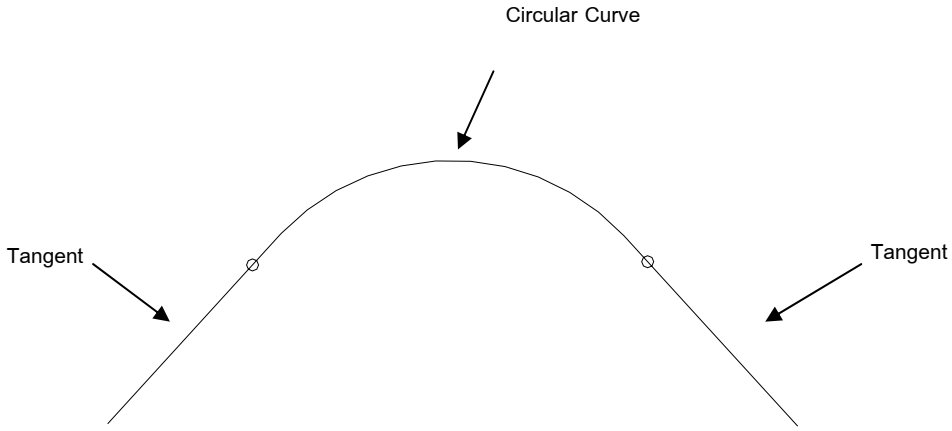
2.2.3.2 ผลกระทบเนื่องจากความลาดชันต่อระยะสำหรับการแซง (Effect of Grade on Passing Sight Distance)

การแซงกรณีบนทางลาดนั้นเมื่อรถคันที่จะแซงวิ่งลงทางลาดจะแซงได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีความเร่งเพิ่มขึ้น ทำให้ลดเวลาในการแซงลง แต่รถที่ต้องการจะแซงในขณะขึ้นทางลาดให้ปลอดภัยต้องการระยะทางที่มากกว่า เนื่องจากความลาดทำให้ความเร่งลดลง ซึ่งทำให้เพิ่มเวลาในการแซง

การออกแบบในกรณีบริเวณทางลาดนั้น AASHTO ไม่มีค่าปรับแก้ที่แน่นอน ผู้ออกแบบต้องอาศัยวิจารณญาณปรับแก้จากตารางที่ 6 เอง

2.3 การออกแบบแนวทางราบ (Design of Horizontal Alignment)

การออกแบบแนวเส้นทางหลวงที่สมดุลย์ องค์ประกอบต่าง ๆ ของทางหลวงจะต้องมีคุณสมบัติทางเรขาคณิตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แนวเส้นทางที่สามารถให้การบริการได้อย่างปลอดภัย มีความสะดวกสบายในการขับขี่ ผู้ขับขี่สามารถขับขี่ยวดยานได้อย่างต่อเนื่องและราบรื่นในทุกสภาวะ และมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุน



รูปที่ 1 ส่วนประกอบทั่วไปของแนวทางราบทางหลวง

แนวทางราบของทางหลวง ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแนวเส้นตรง (Tangent) และส่วนโค้ง (Curve) ดังแสดงในรูปที่ 1 การออกแบบแนวทางราบของทางหลวงก็คือการออกแบบการเปลี่ยนทิศทางของทางหลวงในแนวระนาบ องค์ประกอบสำคัญในการพิจารณาออกแบบด้านเรขาคณิตของแนวทางราบ คือ โค้งราบ (Horizontal curve) เนื่องจากเป็นตัวเชื่อมการเปลี่ยนทิศทางของแนวเส้นตรงของทางหลวง และช่วยให้ยวดยานที่วิ่งบนทางหลวงสามารถค่อย ๆ เปลี่ยนทิศทางไปตามแนวทางหลวงได้อย่างปลอดภัย โค้งราบที่ใช้กันมาก ได้แก่ โค้งวงกลม (Circular curve) และโค้งเปลี่ยน (Transition curve) โค้งเหล่านี้อาจอยู่ในสภาพของโค้งเดี่ยวหรือมีหลายโค้งต่อชนกันเป็นโค้งวงกลมรวม (Compound circular curve) ก็ได้ ทั้งนี้เพื่อให้การเปลี่ยนทิศทางของรถเป็นไปได้อย่างเหมาะสมกับสภาพของรถ สามารถวิ่งได้อย่างสะดวกสบายและปลอดภัย (สมเกียรติ สิริพิทักษ์เดช, 2537)

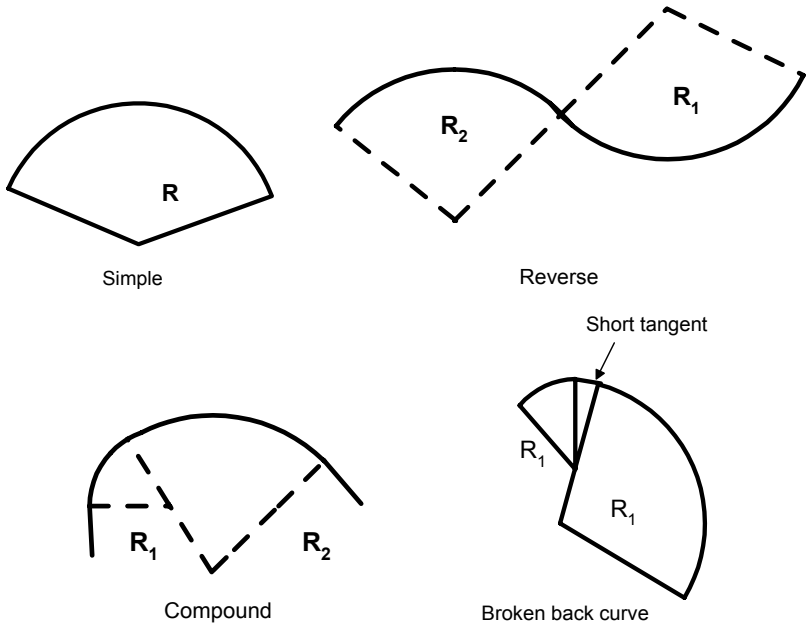
2.3.1 โค้งราบ (Horizontal Curve)

โค้งราบทำหน้าที่เชื่อมแนวเส้นตรง 2 แนว (2 ทิศทาง) ของทางหลวงเข้าด้วยกัน ในการออกแบบโค้งราบ จะต้องพิจารณาให้มีความสอดคล้องกับแนวทางหลวงช่วงที่เป็นแนวเส้นตรงและความเร็วออกแบบ หรือควรออกแบบให้แนวทางมีลักษณะสอดคล้อง (Consistency) ไม่เปลี่ยนแปลงมาก เช่น ควรหลีกเลี่ยงการเชื่อมโค้งราบที่มีรัศมีสั้นกับแนวทางตรงที่มีความยาวมาก ๆ เนื่องจากจะทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย การออกแบบโค้งราบที่ดีควรออกแบบให้โค้งราบมีรัศมี และความยาวโค้งมาก ๆ เพื่อทำให้ผู้ขับขี่มีความรู้สึกสะดวกสบายและมีความปลอดภัยในการขับขี่ที่บริเวณโค้ง

เมื่อรถวิ่งเข้าสู่ทางโค้ง การเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ซึ่งจะถูกต้านทานโดยแรงเสียดทานระหว่างยางล้อรถกับผิวถนน และ แรงเนื่องจากการยกขอบถนน ดังนั้นในการออกแบบโค้งราบจะต้องพิจารณาคุณสมบัติทางเรขาคณิตของโค้ง ให้มีความสอดคล้องกับองค์ประกอบอื่น ๆ ของทางหลวงด้วย โค้งราบที่นิยมใช้มี 2 แบบคือ โค้งกลมและโค้งเปลี่ยน

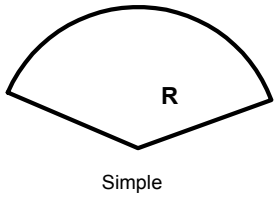
2.3.1.1 โค้งวงกลม (Circular Curve)

โค้งวงกลมที่นิยมใช้ในการออกแบบแนวทางราบอาจจำแนกตามลักษณะของโค้งได้ 4 ประเภท คือ โค้งวงกลมเดี่ยว (Simple circular curve) โค้งวงกลมรวม (Compound circular curve) โค้งวงกลมผกผัน (Reverse circular curve) และโค้งหลังหัก (Broken back curve)



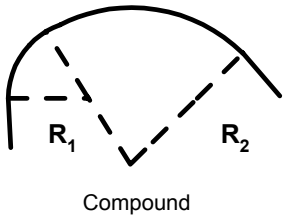
รูปที่ 2 ประเภทของโค้งต่าง ๆ

1) โค้งวงกลมเดี่ยว (Simple circular curve) คือ โค้งที่ได้จากการนำเอาส่วนหนึ่งของโค้งวงกลมหนึ่งวงหนึ่งมาใช้เป็นแนวสำหรับเปลี่ยนทิศทางระหว่างแนวเส้นตรง 2 แนว โค้งวงกลมเป็นโค้งที่นิยมใช้มากที่สุด เพราะง่ายต่อการคำนวณออกแบบหาค่าองค์ประกอบ ทางเรขาคณิต และง่ายต่อการปฏิบัติงานวางโค้งในสนาม



รูปที่ 3 โค้งวงกลมเดี่ยว

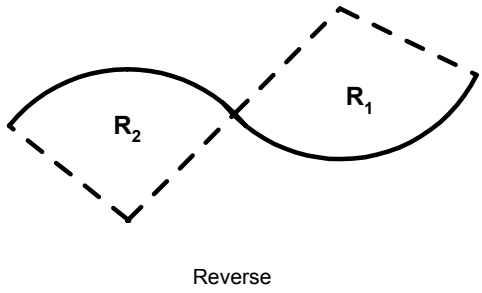
2) โค้งวงกลมรวม (Compound circular curve) คือ โค้งที่ได้จากการนำเอาส่วนของเส้นรอบวงของวงกลมที่มีรัศมีต่างกันแต่มีทิศทางของโค้งไปในทิศทางเดียวกัน ตั้งแต่สองวงขึ้นไปมาเชื่อมประกอบกัน และใช้เป็นแนวสำหรับเปลี่ยนทิศทางของแนวเส้นตรงสองแนว ในการออกแบบ ควรหลีกเลี่ยงการนำเอาโค้งวงกลมตั้งแต่สองโค้งขึ้นไปที่มีรัศมีต่างกันมากมาเชื่อมต่อกัน โดยควรจะแก้ไขเป็นโค้งวงกลมเดี่ยวโค้งเดียวแทน ในกรณีที่ไม่สามารถแก้ไขได้ ความยาวของรัศมีของสองโค้งไม่ควรแตกต่างกันมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4 โค้งวงกลมรวม

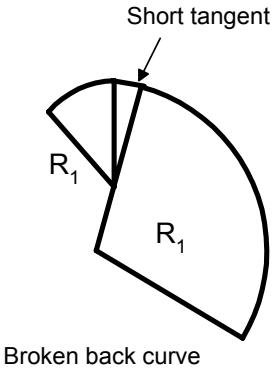
3) โค้งวงกลมผกผัน (Reverse circular curve) คือ โค้งที่ได้จากการนำส่วนของเส้นรอบวงของวงกลมสองวงที่มีทิศทางของโค้งตรงกันข้ามกันมาเชื่อมต่อกัน ใช้เป็นแนวสำหรับเปลี่ยนทิศทางระหว่างแนวเส้นตรงสองแนว ในกรณีที่จำเป็นต้องใส่โค้งวงกลมผกผัน ควรจะใช้

- โค้งเปลี่ยนสไปรอล (Transition Spirals)
- รัศมีของความโค้งมาก ๆ
- ในกรณีที่รัศมีของความโค้งน้อย ๆ ควรจะแก้ไขให้มีแนวเส้นตรง (Tangent) เชื่อมระหว่างโค้ง โดยให้ความยาวของแนวเส้นตรงมีค่าไม่น้อยกว่า 0.6 เท่าของความเร็วออกแบบ ทั้งนี้เพื่อให้รถสามารถวิ่งได้ภายในช่องทางจราจร ช่วงเปลี่ยนจากโค้งหนึ่งสู่อีกโค้งหนึ่ง และเพื่อให้มีระยะทางเพียงพอที่จะจัดระยะทางของการยกขอบถนนได้



รูปที่ 5 โค้งวงกลมผกผัน

4) โค้งหลังหัก (Broken back curve) คือ โค้งที่ได้จากการนำเอาเส้นรอบวงของวงกลมสองวงที่มีทิศทางของโค้งไปในทิศทางเดียวกัน มาเชื่อมต่อกันด้วยแนวเส้นตรงที่มีความยาวสั้นกว่า 0.75 เท่าของความเร็วออกแบบ ใช้เป็นแนวทางสำหรับเปลี่ยนทิศทางแนวเส้นตรงสองแนว โค้งหลังหักนี้ควรจะหลีกเลี่ยงเป็นอย่างยิ่ง โดยควรแก้ไขเป็นโค้งวงกลมเดี่ยวโค้งเดียวแทน ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ให้ใช้การยกขอบถนนในช่วงแนวเส้นตรงช่วย โดยรักษาอัตราการยกขอบถนนของช่วงนี้เช่นเดียวกับช่วงตอนออกจากโค้ง



รูปที่ 6 โค้งหลังหัก

2.3.1.2. โค้งเปลี่ยน (Transtion curve)

เมื่อความเร็วออกแบบมีค่าสูง การใส่เฉพาะโค้งวงกลมเชื่อมระหว่างแนวเส้นตรงในการออกแบบแนวทางราบอาจไม่เพียงพอและไม่ปลอดภัย เนื่องจากรถที่วิ่งเข้าสู่ทางโค้งด้วยความเร็วสูงอาจหลุดเข้าไปอยู่ในช่องทางจราจรที่อยู่ติดกันได้ ซึ่งจะทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย เพื่อความปลอดภัยและสะดวกสบายในการขับขี่ เรามักจะใส่โค้งเปลี่ยน

(Transition curve) แทรกระหว่างโค้งวงกลมกับแนวเส้นตรง วัตถุประสงค์หลักของการใส่โค้งเปลี่ยนประกอบเข้ากับโค้งวงกลม พอจะสรุปได้ 4 ประการ คือ

1) เพื่อให้รถที่วิ่งด้วยความเร็วสูงผ่านจากแนวเส้นตรงเข้าสู่หรือออกจากโค้งเข้าสู่แนวเส้นตรงได้อย่างสะดวกสบาย โค้งเปลี่ยนที่ใส่ได้อย่างเหมาะสมจะเป็นทางที่รถสามารถวิ่งได้สะดวกสำหรับผู้ขับขี่ แรงหนีศูนย์กลางจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อย และลดลง ๆ ทีละน้อย เมื่อรถวิ่งเข้าและออกจากโค้งวงกลมตามลำดับ นอกจากนี้ยังช่วยลดการล้ำช่องการจราจรระหว่างอยู่ในโค้ง ซึ่งจะทำให้รถทั้งหมดวิ่งด้วยความเร็วสม่ำเสมอ เป็นการเพิ่มความปลอดภัย

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

3) ทำหน้าที่เป็นส่วนต่อระหว่างถนนที่กว้างธรรมดากับช่วงที่มีการขยายขอบทางโค้ง (Widening section)

4) เพื่อช่วยให้ผู้ขับขี่เห็นภาพปรากฏของทางหลวงได้อย่างชัดเจนซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการเหยียบเบรคที่บริเวณเริ่มต้นเข้าสู่และออกจากโค้งวงกลมโดยไม่จำเป็น

2.3.2 การพิจารณาโดยทั่วไปเกี่ยวกับการวางแนวทางราบ

ในการกำหนดแนวทางราบของถนน จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายทางนั้นควรจะยึดหลักการที่ว่า แนวถนนที่ดีนั้นจะต้องสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกปลอดภัย และประหยัดทั้งในแง่การก่อสร้าง การบำรุงรักษาและการใช้ทาง เมื่อได้กำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลายทางของทางหลวงแล้ว แนวทางที่เหมาะสมควรมีลักษณะดังนี้

1) ณ จุดเริ่มต้น หรือจุดปลายทาง หากทางที่จะออกแบบแยกจากทางหลวงที่มีอยู่เดิมแล้ว ควรจะ

- แยกออกจากทางหลวงเดิม ณ จุดที่หลังทาง (Grade) มีลักษณะเป็นที่ราบหรือค่อนข้างราบไม่เป็นที่ต่ำสุดหรือที่ลุ่ม
- เป็นจุดที่ผู้ขับขี่รถสามารถมองเห็นได้รอบด้าน
- แนวแยกออกเป็นมุมฉาก ถ้าถูกบังคับด้วยลักษณะของพื้นที่แนวทางจะต้องทำมุมเฉียงไม่น้อยกว่า 60 องศา
- แนวถนนที่แยกออกจากทางหลวงเดิม ควรเป็นทางตรงประมาณ 250 m แล้วจึงเลี้ยวเข้าสู่ทิศทางที่ต้องการ

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

3) เป็นแนวที่ตรงที่สุดและสั้นที่สุด เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

4) พยายามหลีกเลี่ยงบริเวณดินอ่อน แนวทางควรจะผ่านที่ดอน ที่สูง หลีกเลี่ยงที่ลุ่ม ที่นา และที่ทำประโยชน์อื่น ๆ

5) แนวทางผ่านใกล้แหล่งวัสดุ เพื่อประหยัดค่าก่อสร้าง

6) ควรเป็นแนวที่สามารถจัดหาเขตทางได้ง่าย และขยายเขตทางได้สะดวกในอนาคต

7) การออกแบบทางเรขาคณิตของแนวทางราบ ควร

- หลีกเลี่ยงโค้งหลักหัก (Broken back curve)
- หลีกเลี่ยงโค้งวงกลมรวม (Compound curve) ที่มีรัศมีแตกต่างกันมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และหากเป็นไปได้ควรแก้ไขให้เป็นโค้งวงกลมเดี่ยว
- ช่วงที่มีความเร็วออกแบบสูงโค้งเปลี่ยนของโค้งราบควรออกแบบเป็นโค้งสไปรอล
- หลีกเลี่ยงแนวทางตรงยาว ๆ ที่ตามด้วยโค้งที่มีรัศมีสั้น ๆ
- ไม่ควรให้มีแนวทางโค้งหรือช่วงโค้งเปลี่ยนล้ำเข้าไปในช่วงของสะพาน ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ควรให้ทุกส่วนของสะพานอยู่ในโค้งวงกลมเดี่ยว
- ทุกจุดวิกฤตบนทางหลวง เช่น ทางแยก ทางเชื่อม โค้งดิ่ง สะพาน ฯลฯ จะต้องออกแบบให้มีระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถอย่างเพียงพอ

2.3.3 การพิจารณาการออกแบบแนวทางราบ

การออกแบบโค้งราบใช้ช่วงจำกัดของค่าอัตราการยกโค้งสูงสุด $e_{\max}$ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างสูงสุด $f_{\max}$ โดยนำค่าทั้งคู่มาใช้คำนวณหารัศมีโค้งต่ำสุด ในแต่ละความเร็วออกแบบ การใช้งานจะเลือกค่ารัศมีที่มากกว่าค่ารัศมีต่ำสุด (AASHTO, 2001)

2.3.3.1 ค่าอัตราการยกโค้งสูงสุด (Maximum Superelevation Rates) อัตราการยกโค้งสูงสุดเกี่ยวข้องกับปัจจัย 4 ประการ คือ

1) เงื่อนไขภูมิอากาศ (Climate conditions) เช่น ความถี่และปริมาณน้ำฝน

2) เงื่อนไขภูมิศาสตร์ (Terrain conditions) เช่น พื้นที่ราบ ทางลาด หรือภูเขา

3) ชนิดของพื้นที่ (Type of area) เช่น พื้นที่นอกเมืองหรือพื้นที่ในเมือง

4) ความถี่ของรถที่เคลื่อนตัวช้า (Frequency of very slow - moving vehicles) ที่จะได้รับผลกระทบทางการใช้งานจากอัตราการยกโค้งที่สูงมาก

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยทั้ง 4 ประการแล้วพบว่า ไม่มีค่าอัตราการยกโค้งสูงสุด ($e_{\max}$) เพียงค่าใดค่าหนึ่งที่ใช้งานได้ครอบคลุมตลอดถนนทั้งสาย ซึ่งการใช้ค่าอัตราการยกโค้งสูงสุด ($e_{\max}$) เพียงค่าเดียวภายใต้สภาวะภูมิอากาศและความต้องการการใช้พื้นที่ที่คล้ายคลึงกันจะมีผลต่อความสอดคล้องของการออกแบบ (Design consistency)

ค่าอัตราการยกโค้งสูงสุดที่ใช้คือ 10 % อาจจะมากถึง 12 % ในบางกรณี โดยส่วนมากจะใช้ค่าการอัตราการยกโค้งประมาณ 8 % การใช้ค่าอัตราการยกโค้งสูง ๆ เหมาะสำหรับให้ ผู้ขับขี่ขี่ด้วยความเร็วสูง

ความสอดคล้องของการออกแบบ (Design consistency) เกี่ยวข้องกับความเป็นเอกภาพ (Uniformity) ของแนวถนนซึ่งเกี่ยวกับขนาดมิติของถนน ความเป็นเอกภาพของถนนนั้นทำให้ผู้ขับขี่สามารถปรับตัวเพื่อรับรู้และตอบสนอง คาดการณ์ถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นภายหน้าได้ ถนนที่ออกแบบให้แนวถนนไม่มีความเป็นเอกภาพเดียวกัน ย่อมเพิ่มภาระงาน (Workload) ให้แก่ผู้ขับขี่ ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้ขับขี่ ดังนั้นการออกแบบถนนให้มีความสอดคล้องเป็นเอกภาพอันหนึ่งอันเดียวกันย่อมมีส่วนช่วยลดภาระงานของผู้ขับขี่และเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนนด้วย

2.3.3.2 ค่ารัศมีต่ำสุด (Minimum Radius)

ค่ารัศมีต่ำสุดคือค่าจำกัดของความโค้งในจุดที่ออกแบบ โดยถูกหามาจากค่าอัตราการยกโค้งสูงสุดและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้าง ค่ารัศมีต่ำสุดคือค่าสำคัญของการวางแนวถนน และใช้ในการหาค่าอัตราการยกโค้งเพื่อทำให้ถนนมีแนวที่เหมาะสม ค่ารัศมีต่ำสุดหาของความโค้ง ($R_{\min}$) หาได้จากสูตรดังนี้

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127\left(0.01e_{\max} + f_{\max}\right)} \qquad (5)$$

เมื่อ

$R_{\min}$ = รัศมีต่ำสุด, m
V = ความเร็ว, km/h
$e_{\max}$ = อัตราการยกโค้งสูงสุด, %
$f_{\max}$ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้าง

2.3.4 การออกแบบของทางหลวงนอกเมือง (Design for Rural Highways)

ทางหลวงนอกเมืองมีความสัมพันธ์กับความเร็วที่สูงและความเป็นเอกภาพของทาง โดยโค้งในแนวราบจะถูกใส่ค่าอัตราการยกโค้ง โค้งที่ต่อเนื่องกันจะถูกออกแบบให้ขับขี่จากโค้งหนึ่งสู่โค้งหนึ่งได้อย่างสบาย การออกแบบจะอาศัยการเลือกค่า e และ f ที่เหมาะสมจากตารางที่ 7 ที่ให้ค่ารัศมีต่ำสุดจากทั้ง 5 ช่วงของค่าอัตราการยกโค้งสูงสุด สำหรับความเร็วออกแบบ 20 - 130 km/h

ตารางที่ 7 ค่ารัศมีต่ำสุดเพื่อการออกแบบของทางหลวงนอกเมือง, ทางหลวงในเมืองและถนนในเมืองที่ใช้ความเร็วสูง (Minimum Radius for Design of Rural Highways, Urban Freeways, and High - Speed Urban Streets Using Limiting Values of e and f)

Design speed (km/h)	Maximum e (%)	Limiting Values of f	Total (e /100+ f)	Calculated Radius (m)	Rounded Radius (m)
20	4.0	0.18	0.22	14.3	15
30	4.0	0.17	0.21	33.7	35
40	4.0	0.17	0.21	60.0	60
50	4.0	0.16	0.20	98.4	100
60	4.0	0.15	0.19	149.1	150
70	4.0	0.14	0.18	214.2	215
80	4.0	0.14	0.18	279.8	280
90	4.0	0.13	0.17	375.0	375
100	4.0	0.12	0.16	491.9	490
20	6.0	0.18	0.24	13.1	15
30	6.0	0.17	0.23	30.8	30
40	6.0	0.17	0.23	54.7	55
50	6.0	0.16	0.22	89.4	90
60	6.0	0.15	0.21	134.9	135
70	6.0	0.14	0.20	192.8	195
80	6.0	0.14	0.20	251.8	250
90	6.0	0.13	0.19	335.5	335
100	6.0	0.12	0.18	437.2	435
110	6.0	0.11	0.17	560.2	560
120	6.0	0.09	0.15	755.5	755
130	6.0	0.08	0.14	950.0	950
20	8.0	0.18	0.26	12.1	10
30	8.0	0.17	0.25	28.3	30
40	8.0	0.17	0.25	50.4	50
50	8.0	0.16	0.24	82.0	80
60	8.0	0.15	0.23	123.2	125
70	8.0	0.14	0.22	175.3	175
80	8.0	0.14	0.22	228.9	230
90	8.0	0.13	0.21	303.6	305
100	8.0	0.12	0.20	393.5	395
110	8.0	0.11	0.19	501.2	500
120	8.0	0.09	0.17	666.6	665
130	8.0	0.08	0.16	831.3	830
20	10.0	0.18	0.28	11.2	10
30	10.0	0.17	0.27	26.2	25

ตารางที่ 7 (ต่อ)

Design speed (km/h)	Maximum e (%)	Limiting Values of f	Total (e /100+ f)	Calculated Radius (m)	Rounded Radius (m)
40	10.0	0.17	0.27	46.6	45
50	10.0	0.16	0.26	75.7	75
60	10.0	0.15	0.25	113.3	115
70	10.0	0.14	0.24	160.7	160
80	10.0	0.14	0.24	209.9	210
90	10.0	0.13	0.23	277.2	275
100	10.0	0.12	0.22	357.7	360
110	10.0	0.11	0.21	453.5	455
120	10.0	0.09	0.19	596.5	595
130	10.0	0.08	0.18	738.9	740
20	12.0	0.18	0.30	10.5	10
30	12.0	0.17	0.29	24.4	25
40	12.0	0.17	0.29	43.4	45
50	12.0	0.16	0.28	70.3	70
60	12.0	0.15	0.27	104.9	105
70	12.0	0.14	0.26	148.3	150
80	12.0	0.14	0.26	193.7	195
90	12.0	0.13	0.25	255.0	255
100	12.0	0.12	0.24	327.9	330
110	12.0	0.11	0.23	414.0	415
120	12.0	0.09	0.21	539.7	540
130	12.0	0.08	0.20	665.0	665
Note : In recognition of safety considerations, use of e_{max} = 4.0% should be limited to urban conditions					

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 14

2.3.4.1 ตารางการออกแบบค่าอัตราการยกโค้ง (Design Superelevation Tables)

โดยส่วนมากแล้วการออกแบบโค้งจะกำหนดจากความเร็วออกแบบ ค่าความโค้งและความสัมพันธ์ของค่าอัตราการยกโค้งและแรงเสียดทานทางด้านข้าง

ความสัมพันธ์ของค่าอัตราการยกโค้งและแรงเสียดทานทางด้านข้าง มีที่มาจากกฎของกลศาสตร์ เมื่อรถวิ่งอยู่ในโค้ง แรงหนีศูนย์กลางจะพยายามบังคับให้รถเคลื่อนที่ออกในแนวรัศมีโค้งซึ่งจะถูกต้านด้วยแรงเสียดทานระหว่างล้อกับผิวจราจรและการยกโค้ง

$$\frac{0.01e+f}{1-0.01ef} = \frac{v^2}{gR} = \frac{0.0079V^2}{R} = \frac{V^2}{127R} \qquad (4)$$

เมื่อ e = อัตราการยกโค้งของทาง, %

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้าง

v = ความเร็วรถ, m/s

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, 9.81 m/s^2

V = ความเร็วรถ, km/h

R = รัศมีโค้ง, m

จากตารางที่ 8 ถึง 12 แสดงค่ารัศมี (R) เมื่อได้กำหนดความเร็วออกแบบต่าง ๆ ของค่าอัตราการยกโค้งสูงสุดทั้ง 5 ค่า ซึ่งการออกแบบควรกำหนดให้มีความสอดคล้องกัน เช่น เมื่อกำหนดค่าอัตราการยกโค้งสูงสุดของถนนคือ 8 % ก็ควรใช้ค่าจากตารางออกแบบที่ค่าอัตราการยกโค้งสูงสุด 8 % ตลอดการออกแบบ

ตารางที่ 8 ค่าออกแบบของโค้งแนวราบและความเร็วออกแบบ (Values for Design Elements Related to Design Speed and Horizontal Curvature)

	$V_d = 20\,km/h$			$V_d = 30\,km/h$			$V_d = 40\,km/h$			$V_d = 50\,km/h$			$V_d = 60\,km/h$			$V_d = 70\,km/h$			$V_d = 80\,km/h$			$V_d = 90\,km/h$			$V_d = 100\,km/h$		
		$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$	
R	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4
(m)	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns
7000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
5000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
3000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	16	25
2500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	15	23	RC	16	25
2000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	14	22	RC	15	23	2.2	18	27
1500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	13	20	RC	14	22	2.3	18	26	2.6	21	32
1400	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	13	20	2.1	15	23	2.4	18	28	2.7	22	33
1300	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	13	20	2.2	16	24	2.5	19	29	2.8	23	34
1200	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	RC	13	20	2.3	17	25	2.6	20	30	2.9	24	36
1000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.2	14	22	2.5	18	27	2.8	21	32	3.2	26	39
900	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	RC	12	18	2.4	16	24	2.7	19	29	3.0	23	34	3.4	28	42
800	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.1	13	19	2.5	18	25	2.8	20	30	3.2	25	37	3.5	29	43
700	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.3	14	21	2.7	18	27	3.0	22	32	3.4	26	39	3.7	30	45
600	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.1	12	17	2.5	15	23	2.9	19	28	3.2	23	35	3.6	28	41	3.9	32	48
500	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.3	13	19	2.7	16	24	3.1	20	30	3.5	25	38	3.8	29	44	4.0	33	49
400	NC	0	0	NC	0	0	2.1	11	16	2.5	14	21	3.0	18	27	3.4	22	33	3.7	27	40	4.0	31	46	$R_{min} = 490$		
300	NC	0	0	RC	10	14	2.4	12	19	2.8	16	23	3.3	20	30	3.8	25	37	4.0	29	43	$R_{min} = 15$					
250	NC	0	0	RC	10	14	2.6	13	20	3.0	17	25	3.6	22	32	3.9	26	38	$R_{min} = 15$								
200	NC	0	0	2.3	11	17	2.8	14	22	3.3	18	27	3.8	23	34	$R_{min} = 215$											
175	NC	0	0	2.4	12	17	2.9	15	22	3.5	19	29	3.9	23	35												
150	RC	9	14	2.5	12	18	3.1	16	24	3.7	20	31	4.0	24	36												
140	RC	9	14	2.6	12	19	3.2	16	25	3.8	21	32	$R_{min} = 15$														
130	RC	9	14	2.6	12	19	3.3	17	25	3.8	21	32															
120	RC	9	14	2.7	13	19	3.4	17	26	3.9	22	32															
110	RC	9	14	2.8	13	20	3.5	18	27	4.0	22	33															
100	2.1	9	14	2.9	14	21	3.6	19	28	4.0	22	33															
90	2.2	10	15	3.0	14	22	3.7	19	29	$R_{min} = 15$																	
80	2.4	11	16	3.2	15	23	3.8	20	29																		
70	2.5	11	17	3.3	16	24	3.9	20	30																		
60	2.6	12	18	3.5	17	25	4.0	21	31																		
50	2.8	13	19	3.7	18	27	$R_{min} = 50$																				
40	3.0	14	20	3.9	19	28																					
30	3.3	15	22	$R_{min} = 35$																							
20	3.8	17	26																								
	$R_{min} = 15$																										

e_{max} = 4 %

R = radius of curve

V_d = assumed design speed

e = rate of superelevation

L = minimum length of runoff (does not include tangent runout) as discussed in “Tangent - to - Curve Transition” section

NC = normal crown section

RC = remove adverse crown, superelevation at normal crown slope

Use of e_{max} = 4% should be limited to urban conditions

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 21

ตารางที่ 9 ค่าออกแบบของโค้งแนวราบและความเร็วออกแบบ (Values for Design Elements Related to Design Speed and Horizontal Curvature)

	$V_d = 20\,km/h$			$V_d = 30\,km/h$			$V_d = 40\,km/h$			$V_d = 50\,km/h$			$V_d = 60\,km/h$			$V_d = 70\,km/h$			$V_d = 80\,km/h$			$V_d = 90\,km/h$			$V_d = 100\,km/h$			$V_d = 110\,km/h$			$V_d = 120\,km/h$			$V_d = 130\,km/h$		
		$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$	
R	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4
(m)	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns
7000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
5000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
3000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	16	25	RC	18	26	2.3	22	33	2.5	26	39
2500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	15	23	RC	16	25	2.3	20	30	2.7	26	38	3.0	31	45
2000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	14	22	2.1	16	24	2.5	20	31	2.8	25	37	3.3	31	47	3.7	38	57
1500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	13	20	2.2	16	24	2.7	21	31	3.1	25	38	3.6	32	47	4.2	40	60	4.7	48	73
1400	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	13	20	2.4	17	26	2.8	21	32	3.3	27	41	3.8	33	50	4.4	42	63	5.0	51	77
1300	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.1	14	21	2.5	18	27	3.0	23	34	3.5	29	43	4.0	35	53	4.7	45	67	5.3	55	82
1200	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.2	14	22	2.7	19	29	3.2	25	37	3.7	30	45	4.2	37	55	5.0	47	71	5.6	58	85
1000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.1	13	19	2.6	17	26	3.1	22	33	3.6	28	41	4.2	34	52	4.8	42	63	5.6	53	80	6.0	72	93
900	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.3	14	21	2.8	18	27	3.4	24	37	3.9	30	45	4.5	37	55	5.1	45	67	5.8	55	82	$R_{min} = 950$		
800	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.5	15	23	3.1	20	30	3.6	26	39	4.2	32	48	4.9	40	60	5.4	47	71	6.0	57	85			
700	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.1	12	17	2.8	17	25	3.4	22	33	4.0	29	43	4.6	35	53	5.2	43	64	5.8	51	76	$R_{min} = 15$					
600	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.4	13	20	3.1	19	28	3.8	25	37	4.3	31	45	5.0	38	57	5.5	46	69	6.0	53	79						
500	NC	0	0	NC	0	0	2.1	11	16	2.8	16	23	3.5	21	32	4.2	27	41	4.8	35	52	5.4	41	62	5.9	48	72	$R_{min} = 560$								
400	NC	0	0	RC	10	14	2.5	13	19	3.3	18	27	4.0	24	36	4.7	31	46	5.3	38	57	5.9	45	68	$R_{min} = 435$											
300	NC	0	0	RC	10	14	3.1	16	24	3.9	22	32	4.6	28	41	5.4	35	53	5.9	42	64	$R_{min} = 15$														
250	NC	0	0	2.3	11	17	3.5	18	27	4.2	23	35	5.0	30	45	5.8	38	57	6.0	43	65															
200	NC	0	0	2.8	13	20	3.9	20	30	4.7	26	39	5.5	33	50	6.0	39	59	$R_{min} = 250$																	
175	RC	9	14	3.0	14	22	4.1	21	32	5.0	28	42	5.8	35	52	$R_{min} = 195$																				
150	RC	9	14	3.3	16	24	4.4	23	34	5.3	29	44	6.0	36	54																					
140	RC	9	14	3.5	17	25	4.5	23	35	5.4	30	45	6.0	36	54																					
130	2.1	9	14	3.6	17	26	4.6	24	35	5.6	31	47	$R_{min} = 15$																							
120	2.2	10	15	3.8	18	27	4.8	25	37	5.7	32	47																								
110	2.4	11	16	3.9	19	28	5.0	26	39	5.8	32	48																								
100	2.5	11	17	4.1	20	30	5.2	27	40	6.0	33	50																								
90	2.7	12	18	4.2	20	30	5.4	28	42	6.0	33	50																								
80	3.0	14	20	4.5	22	32	5.5	29	43	$R_{min} = 90$																										
70	3.2	14	22	4.7	23	34	5.8	30	45																											
60	3.5	15	24	5.0	24	36	6.0	31	46																											
50	3.8	17	26	5.4	26	39	$R_{min} = 55$																													
40	4.2	19	28	5.8	28	42																														
30	4.7	21	32	6.0	29	43																														
20	5.5	25	37	$R_{min} = 30$																																
	$R_{min} = 15$																																			

e_{max} = 6 %

R = radius of curve

V_d = assumed design speed

e = rate of superelevation

L = minimum length of runoff (does not include tangent runout) as discussed in “Tangent - to - Curve Transition” section

NC = normal crown section

RC = remove adverse crown, superelevation at normal crown slope

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 22

ตารางที่ 10 ค่าออกแบบของโค้งแนวราบและความเร็วออกแบบ (Values for Design Elements Related to Design Speed and Horizontal Curvature)

	$V_d = 20\,km/h$			$V_d = 30\,km/h$			$V_d = 40\,km/h$			$V_d = 50\,km/h$			$V_d = 60\,km/h$			$V_d = 70\,km/h$			$V_d = 80\,km/h$			$V_d = 90\,km/h$			$V_d = 100\,km/h$			$V_d = 110\,km/h$			$V_d = 120\,km/$			$V_d = 130\,km/h$		
		$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$	
R	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4
(m)	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns
7000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
5000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	21	31
3000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	16	25	2.1	18	28	2.4	23	34	2.6	27	40
2500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	15	23	2.1	17	26	2.4	21	32	2.9	27	41	3.1	32	48
2000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	14	22	2.2	17	25	2.6	21	32	3.0	26	40	3.5	33	50	3.9	40	60
1500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	13	20	2.4	17	25	2.8	21	32	3.4	28	42	3.9	34	51	4.6	44	55	5.1	52	79
1400	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.1	14	21	2.5	18	27	3.0	23	34	3.6	29	44	4.1	36	54	4.9	46	70	5.4	55	83
1300	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.2	14	22	2.7	19	29	3.2	25	37	3.8	31	47	4.4	39	58	5.2	49	74	5.8	60	89
1200	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.4	15	24	2.9	21	31	3.4	26	39	4.1	34	50	4.7	41	62	5.6	53	80	6.3	65	97
1000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.2	13	20	2.8	18	27	3.4	24	37	4.0	31	46	4.8	39	59	5.5	48	72	6.5	62	92	7.4	76	114
900	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.4	14	22	3.1	20	30	3.7	27	40	4.4	34	51	5.2	43	64	6.0	53	79	7.1	67	101	7.9	81	122
800	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.7	15	24	3.4	22	33	4.1	30	44	4.8	37	55	5.7	47	70	6.6	58	87	7.6	72	108	$R_{min} = 15$		
700	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.2	12	18	3.0	18	27	3.8	25	37	4.5	32	49	5.3	41	61	6.3	52	77	7.2	63	95	8.0	76	114			
600	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.5	14	22	3.4	20	31	4.3	28	42	5.1	37	55	6.0	46	69	6.9	55	85	7.7	68	101	$R_{min} = 665$					
500	NC	0	0	NC	0	0	2.2	11	17	3.0	17	25	3.9	23	35	4.9	32	48	5.8	42	63	6.7	51	77	7.6	62	93	8.0	70	105						
400	NC	0	0	RC	10	14	2.7	14	21	3.5	20	30	4.7	28	42	5.7	37	56	6.6	48	71	7.5	57	86	8.0	65	98	$R_{min} = 15$								
300	NC	0	0	2.1	10	15	3.4	17	26	4.5	25	37	5.6	34	50	6.7	44	56	7.6	55	82	$R_{min} = 305$			$R_{min} = 15$											
250	NC	0	0	2.5	12	18	4.0	21	31	5.1	28	42	6.2	37	55	7.4	48	73	7.9	57	85															
200	NC	0	0	3.0	14	22	4.6	24	35	5.8	32	48	7.0	42	63	7.9	52	78	$R_{min} = 15$																	
175	RC	9	14	3.4	16	24	5.0	26	39	6.2	34	52	7.4	44	67	8.0	52	79																		
150	RC	9	14	3.8	18	27	5.4	28	42	6.7	37	56	7.8	47	70	$R_{min} = 175$																				
140	RC	9	14	4.0	19	29	5.6	29	43	6.9	38	57	7.9	47	71																					
130	2.2	10	15	4.2	20	30	5.8	30	45	7.1	39	59	8.0	48	72																					
120	2.3	10	16	4.4	21	32	6.0	31	48	7.4	41	61	$R_{min} = 125$																							
110	2.5	11	17	4.7	23	34	6.3	32	49	7.6	42	63																								
100	2.7	12	18	5.0	24	36	6.6	34	51	7.8	43	65																								
90	3.0	14	20	5.2	25	37	6.9	35	53	7.9	44	66																								
80	3.3	15	22	5.5	26	40	7.2	37	56	8.0	44	66																								
70	3.6	16	24	5.9	28	42	7.5	39	58	$R_{min} = 80$																										
60	4.1	18	28	6.4	31	46	7.8	40	60																											
50	4.6	21	31	6.9	33	50	8.0	41	62																											
40	5.2	23	35	7.5	36	54	$R_{min} = 15$																													
30	5.9	27	40	8.0	38	58																														
20	7.1	32	48	$R_{min} = 30$																																
	$R_{min} = 10$																																			

e_{max} = 8 %

R = radius of curve

V_d = assumed design speed

e = rate of superelevation

L = minimum length of runoff (does not include tangent runout) as discussed in “Tangent - to - Curve Transition” section

NC = normal crown section

RC = remove adverse crown, superelevation at normal crown slope

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 23

ตารางที่ 11 ค่าออกแบบของโค้งแนวราบและความเร็วออกแบบ (Values for Design Elements Related to Design Speed and Horizontal Curvature)

	$V_d = 20\,km/h$			$V_d = 30\,km/h$			$V_d = 40\,km/h$			$V_d = 50\,km/h$			$V_d = 40\,km/h$			$V_d = 70\,km/h$			$V_d = 80\,km/h$			$V_d = 90\,km/h$			$V_d = 100\,km/h$			$V_d = 110\,km/h$			$V_d = 120\,km/h$			$V_d = 130\,km/h$		
		$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$	
R	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4
(m)	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns
7000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
5000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	21	31
3000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	16	25	2.1	18	28	2.5	24	36	2.7	28	42
2500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	15	23	2.2	18	27	2.5	22	33	2.9	27	41	3.2	33	49
2000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	14	22	2.2	17	25	2.7	22	33	3.1	27	41	3.5	34	51	4.0	41	62
1500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	13	20	2.4	17	26	2.9	22	33	3.5	29	43	4.1	36	54	4.8	45	58	5.3	55	82
1400	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.1	14	21	2.6	19	28	3.1	24	36	3.8	31	47	4.3	38	57	5.1	48	72	5.7	59	88
1300	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.3	15	23	2.8	20	30	3.3	25	38	4.0	33	49	4.6	40	61	5.5	52	78	6.1	63	94
1200	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.4	16	24	3.0	22	32	3.6	28	41	4.3	35	53	5.0	44	66	5.9	58	84	6.6	68	102
1000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.2	13	20	2.9	19	28	3.5	25	38	4.2	32	48	5.1	42	63	5.9	52	78	7.0	66	99	7.9	81	122
900	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.5	15	23	3.2	21	31	3.9	28	42	4.6	35	53	5.5	46	69	6.4	58	84	7.7	73	109	8.7	89	134
800	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.7	16	24	3.5	23	34	4.3	31	46	5.1	39	59	6.2	51	76	7.1	62	94	8.5	81	121	9.7	100	150
700	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.3	13	19	3.1	19	28	4.0	26	39	4.8	35	52	5.8	44	67	6.9	56	85	8.0	70	105	9.5	90	135	$R_{min} = 740$		
600	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.7	15	22	3.6	22	32	4.5	29	44	5.5	40	59	6.5	50	75	7.8	64	95	9.0	79	119	10.0	95	142			
500	NC	0	0	NC	0	0	2.3	12	18	3.1	17	26	4.2	25	38	5.3	35	52	6.4	46	69	7.6	58	87	8.9	73	109	9.9	87	130	$R_{min} = 595$					
400	NC	0	0	RC	10	14	2.8	14	22	3.8	21	32	5.0	30	45	6.3	41	62	7.5	54	81	8.8	67	101	9.8	80	120	$R_{min} = 455$								
300	NC	0	0	2.2	11	15	3.6	19	28	4.8	27	40	6.3	38	57	7.8	51	77	9.0	65	97	9.9	76	114	$R_{min} = 360$											
250	NC	0	0	2.6	12	19	4.2	22	32	5.6	31	47	7.1	43	64	8.7	57	85	9.7	70	105	$R_{min} = 275$														
200	NC	0	0	3.1	15	22	5.0	26	39	6.6	37	55	8.2	49	74	9.6	63	94	$R_{min} = 210$																	
175	RC	9	14	3.5	17	25	5.6	29	43	7.1	39	59	8.8	53	79	9.9	65	97																		
150	RC	9	14	4.0	19	29	6.2	32	46	7.8	43	65	9.4	56	85	$R_{min} = 160$																				
140	2.1	9	14	4.3	21	31	6.4	33	49	8.1	45	67	9.7	58	87																				
130	2.2	10	15	4.5	22	32	6.7	34	52	8.5	47	71	9.8	59	88																				
120	2.4	11	16	4.8	23	35	7.0	36	54	8.8	49	73	10.0	60	90																				
110	2.6	12	18	5.1	24	37	7.4	38	57	9.1	50	76	$R_{min} = 115$																						
100	2.8	13	19	5.5	26	40	7.7	40	59	9.5	53	79																								
90	3.1	14	21	5.9	28	42	8.2	42	63	9.8	54	81																								
80	3.4	15	23	6.4	31	46	8.6	44	66	10.0	55	83																								
70	3.8	17	26	6.9	33	50	9.1	47	70	$R_{min} = 75$																										
60	4.4	20	30	7.5	36	54	9.6	49	74																											
50	5.0	23	34	8.2	39	59	10.0	51	77																											
40	5.9	27	40	9.1	44	66	$R_{min} = 15$																													
30	7.0	31	47	9.9	48	71																														
20	8.5	38	57	$R_{min} = 25$																																
	$R_{min} = 10$																																			

e_{max} = 10 %

R = radius of curve

V_d = assumed design speed

e = rate of superelevation

L = minimum length of runoff (does not include tangent runout) as discussed in “Tangent - to - Curve Transition” section

NC = normal crown section

RC = remove adverse crown, superelevation at normal crown slope

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 24

ตารางที่ 12 ค่าออกแบบของโค้งแนวราบและความเร็วออกแบบ (Values for Design Elements Related to Design Speed and Horizontal Curvature)

	$V_d = 20\,km/h$			$V_d = 40\,km/h$			$V_d = 40\,km/h$			$V_d = 50\,km/h$			$V_d = 60\,km/h$			$V_d = 70\,km/h$			$V_d = 80\,km/h$			$V_d = 90\,km/h$			$V_d = 100\,km/h$			$V_d = 110\,km/h$			$V_d = 120\,km/h$			$V_d = 130\,km/h$		
		$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$			$L(m)$		
R	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4	e	2	4
(m)	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns	(%)	Lns	Lns
7000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0
5000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	21	31
3000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	16	25	2.1	18	28	2.5	24	36	2.7	28	42
2500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	15	23	2.2	18	27	2.5	22	33	3.0	28	43	3.3	34	51
2000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	14	22	2.3	18	26	2.7	22	33	3.2	28	42	3.7	35	53	4.1	42	63
1500	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	13	20	2.5	18	27	3.0	23	34	3.6	29	44	4.2	37	55	4.9	46	70	5.4	56	83
1400	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.1	14	21	2.6	19	28	3.2	25	37	3.9	32	48	4.4	39	58	5.2	49	74	5.8	60	89
1300	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.3	15	23	2.8	20	30	3.4	26	39	4.1	34	50	4.8	42	63	5.6	53	80	6.3	65	97
1200	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	12	18	2.5	16	26	3.0	22	32	3.7	28	43	4.5	37	55	5.1	45	67	6.1	58	87	6.6	70	105
1000	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.3	14	21	2.9	19	28	3.6	26	39	4.4	34	51	5.3	43	65	6.1	54	80	7.2	68	102	8.1	83	125
900	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	RC	11	17	2.5	15	23	3.3	22	32	4.0	29	43	4.8	37	55	5.8	47	71	6.7	59	88	8.0	76	114	9.0	93	139
800	NC	0	0	NC	0	0	NC	0	0	2.1	12	17	2.8	17	25	3.6	24	35	4.4	32	48	5.3	41	61	6.5	53	80	7.5	66	99	8.9	84	126	10.1	104	158
700	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.4	13	20	3.2	19	29	4.1	27	40	5.0	36	54	6.0	45	69	7.3	60	90	8.5	75	112	10.1	96	144	11.6	119	179
600	NC	0	0	NC	0	0	RC	10	15	2.7	15	22	3.7	22	33	4.7	31	46	5.7	41	62	6.9	53	79	8.3	68	102	9.7	85	128	11.6	110	185	$R_{min} = 15$		
500	NC	0	0	NC	0	0	2.4	12	19	3.2	18	27	4.3	26	39	5.5	36	54	6.7	48	72	8.1	62	93	9.7	79	119	11.3	99	149	$R_{min} = 15$					
400	NC	0	0	RC	10	14	2.9	15	22	3.9	22	32	5.3	32	48	6.7	44	66	8.1	58	87	9.7	74	111	11.4	93	140	$R_{min} = 15$								
300	NC	0	0	2.2	11	16	3.8	20	29	5.1	28	42	6.7	40	50	8.5	56	83	10.1	73	109	11.6	89	133	$R_{min} = 330$											
250	NC	0	0	2.6	12	19	4.4	23	34	5.9	33	49	7.7	46	69	9.7	63	95	11.2	81	121	$R_{min} = 15$														
200	NC	0	0	3.2	15	23	5.3	27	41	7.1	39	59	9.1	55	82	11.1	73	109	12.0	85	130																
175	RC	9	14	3.6	17	26	5.9	30	46	7.8	43	65	10.0	60	90	11.7	77	115	$R_{min} = 15$																	
150	RC	9	14	4.2	20	30	6.7	34	52	8.7	48	72	10.9	65	98	12.0	79	118																		
140	2.1	9	14	4.4	21	32	7.0	36	54	9.1	50	76	11.2	67	101	$R_{min} = 150$																				
130	2.3	10	16	4.7	23	34	7.4	38	57	9.5	53	79	11.5	69	104																					
120	2.5	11	17	5.1	24	37	7.8	40	60	10.0	55	83	11.8	71	106																					
110	2.7	12	18	5.4	26	39	8.2	42	63	10.5	58	87	12.0	72	108																					
100	2.9	13	20	5.9	28	42	8.7	45	67	11.0	61	91	$R_{min} = 105$																							
90	3.2	14	22	6.4	31	46	9.3	48	72	11.4	63	95																									
80	3.5	16	24	6.9	33	50	9.9	51	76	11.8	65	98																									
70	4.0	18	27	7.6	36	55	10.5	54	81	12.0	66	100																									
60	4.6	21	31	8.4	40	60	11.2	58	86	$R_{min} = 15$																											
50	5.3	24	36	9.3	45	67	11.8	61	91																											
40	6.3	28	43	10.4	50	75	$R_{min} = 45$																													
30	7.7	35	52	11.5	55	84																															
20	9.7	44	65	$R_{min} = 25$																																	
	$R_{min} = 10$																																			

e_{max} = 12 %

R = radius of curve

V_d = assumed design speed

e = rate of superelevation

L = minimum length of runoff (does not include tangent runout) as discussed in “Tangent - to - Curve Transition” section

NC = normal crown section

RC = remove adverse crown, superelevation at normal crown slope

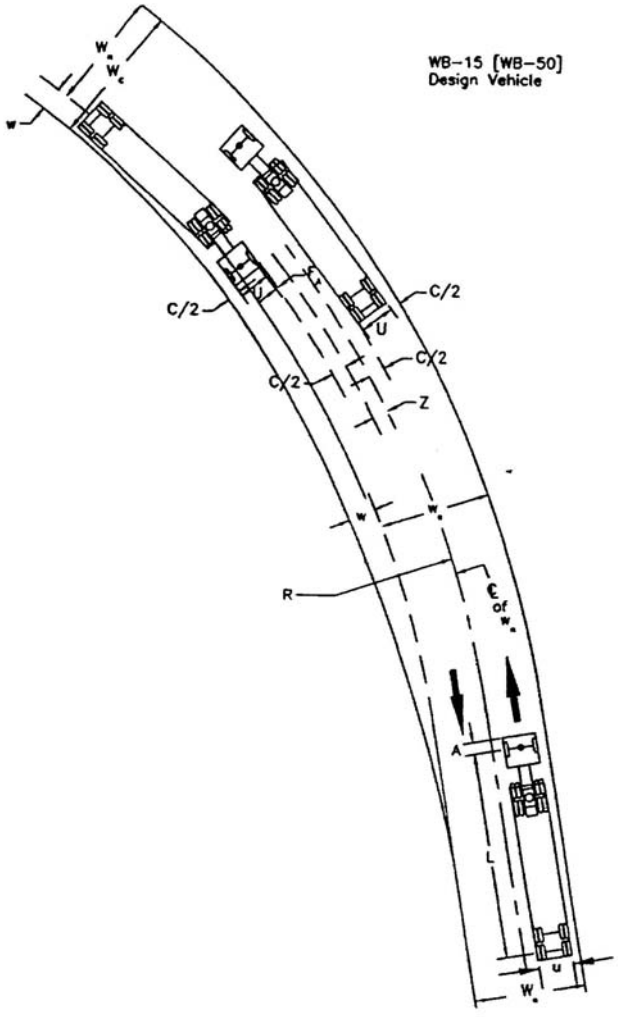
ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 25

2.3.5 การขยายขอบทางโค้ง (Traveled Way Widening on Horizontal Curves)

วัตถุประสงค์ในการขยายช่องทางจราจรในบริเวณทางโค้ง มี 2 ประการ

1) เนื่องจากเวลารถวิ่งเข้าสู่ทางโค้งนั้นล้อหลังของรถจะต้องใช้รัศมีน้อยกว่าล้อหน้า เพราะฉะนั้นจึงต้องขยายช่องทางจราจรให้มากกว่าทางตรง เพื่อให้ความห่างของรถที่วิ่งสวนกันห่างเท่ากับมาตรฐานที่รถวิ่งในทางตรง และเพื่อให้ความเร็วคงที่เหมือนกับที่วิ่งในทางตรง ดังแสดงในรูปที่

2) เพื่อผลทางจิตวิทยาของคนขับขี่ที่รู้สึกเกิดความปลอดภัยไม่เคร่งเครียดในขณะขับรถเข้าโค้ง



รูปที่ 7 การขยายขอบทางโค้ง

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 50

2.3.5.1 ค่าออกแบบสำหรับการขยายขอบทางโค้ง (Design Values for Traveled Way Widening)

AASHTO ได้แนะนำถึงค่าที่ใช้ออกแบบขอบทางของโค้งแนวราบคือ ให้ใช้ค่าขั้นต่ำ 0.6 m ดังแสดงในตารางที่ 13 ซึ่งค่าในตารางที่ต่ำกว่า 0.6 m ให้ตัดทิ้งได้ ค่าในตารางที่ 13 เป็นค่าที่ใช้จากรถออกแบบประเภทรถพ่วงชนิด WB - 15 แสดงดังรูปที่ 7 ส่วนรถออกแบบประเภทอื่นให้นำค่าจากตาราง 14 มาปรับแก้จากตาราง 13

ตารางที่ 13 ค่าคำนวณและค่าออกแบบของการขยายขอบทางโค้ง (Calculated and Design Values for Traveled Way Widening on Open Highway Curves (Two - Lane Highways, One - Way or Two - Way))

Radius of curve (m)	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	0.9	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, use adjustments in Exhibit 3 - 52

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.

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 51

ตารางที่ 14 ค่าปรับแก้การขยายขอบทางโค้ง (Adjustments for Traveled Way Widening Values on Open Highway Curves (Two - Lane Highways, One - Way or Two - Way))

Radius of curve (m)	**Design vehicle**						
	SU	**WB - 12**	**WB - 19**	**WB - 20**	**WB - 20D**	**WB - 30T**	**WB - 33D**
3000	-0.3	-0.3	0	0	0	0	0.1
2500	-0.3	-0.3	0	0	0	0	0.1
2000	-0.3	-0.3	0	0	0	0	0.1
1500	-0.4	-0.3	0	0.1	0	0	0.1
1000	-0.4	-0.4	0.1	0.1	0	0	0.2
900	-0.4	-0.4	0.1	0.1	0	0	0.2
800	-0.4	-0.4	0.1	0.1	0	0	0.2
700	-0.4	-0.4	0.1	0.1	0	0	0.3
600	-0.5	-0.4	0.1	0.1	0	0.1	0.3
500	-0.5	-0.4	0.1	0.2	0	0.1	0.4
400	-0.5	-0.4	0.2	0.2	0	0.1	0.5
300	-0.6	-0.5	0.2	0.3	-0.1	0.1	0.6
250	-0.7	-0.5	0.2	0.3	-0.1	0.1	0.8
200	-0.8	-0.6	0.3	0.4	-0.1	0.2	1
150	-0.9	-0.7	0.4	0.6	-0.1	0.2	1.3
140	-0.9	-0.7	0.4	0.6	-0.1	0.2	1.4
130	-1	-0.7	0.5	0.6	-0.2	0.2	1.5
120	-1.1	-0.8	0.5	0.7	-0.2	0.3	1.6
110	-1.1	-0.9	0.6	0.8	-0.2	0.3	1.7
100	-1.2	-0.9	0.6	0.8	-0.2	0.3	1.9
90	-1.3	-0.9	0.7	0.9	-0.2	0.3	2.1
80	-1.4	-1	0.8	1.1	-0.2	0.4	2.4
70	-1.6	-1.1	0.9	1.2	-0.3	0.5	2.8

Notes : Adjustments are applied by adding to or subtracting from the values in Exhibit 3 - 51

Adjustments depent only on radius and design vehicle; they are independent of roadway width and design speed.

For 3 - lane roadways, multiply above values by 1.5.

For 4 - lane roadways, multiply above values by 2.0.

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 52

2.3.6 ระยะมองเห็นของโค้งในแนวราบ (Sight Distance on Horizontal Curves)

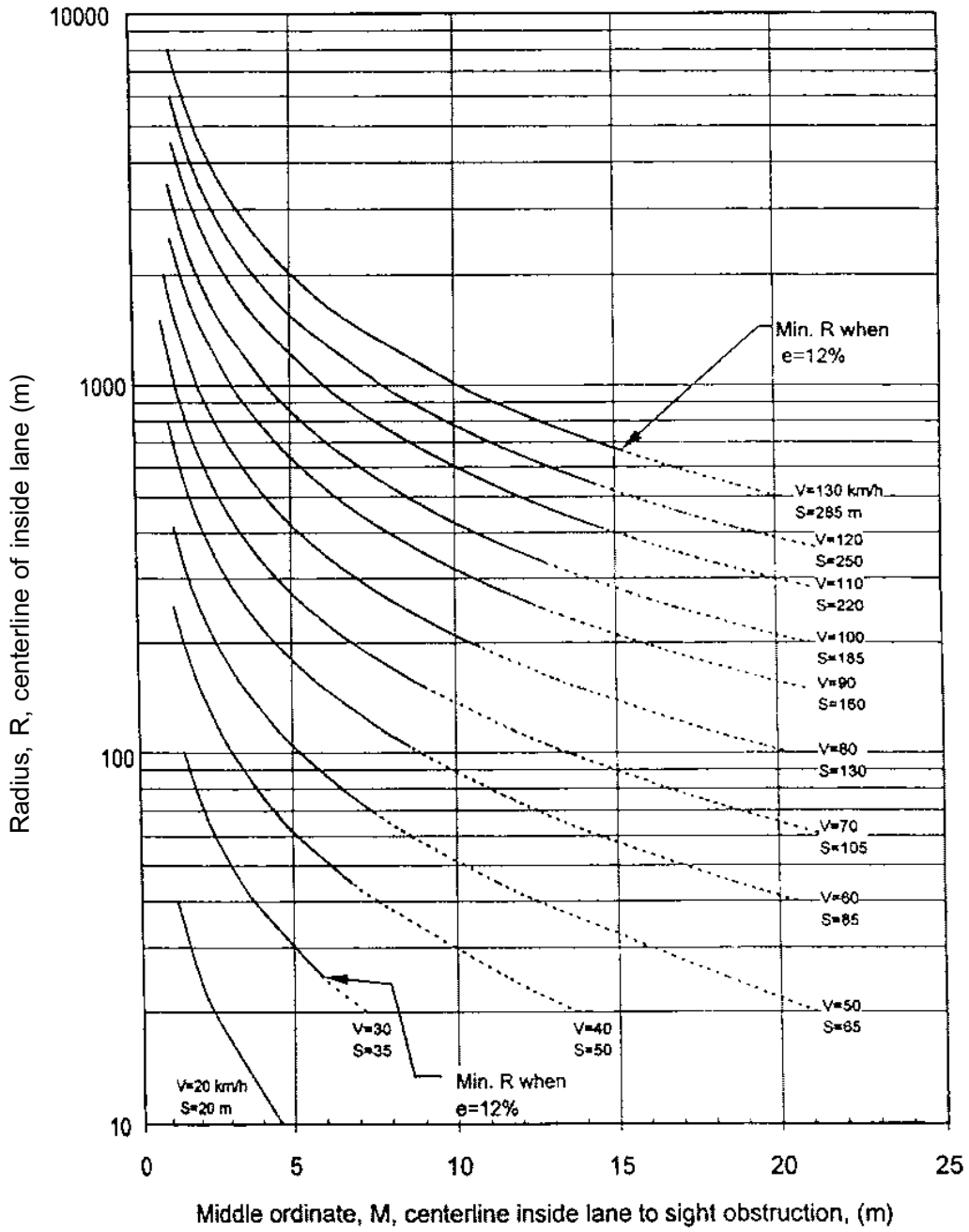
การออกแบบแนวทางราบควรพิจารณาถึงระยะมองเห็นภายในโค้งที่สามารถมองเห็นข้ามไปอีกด้านได้ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางมาบดบังการมองเห็นตรงส่วนโค้งด้านใน

เมื่อเจอสิ่งกีดขวางการมองเห็นควรปรับแก้ส่วนของหน้าตัดถนนหรืออาจจะปรับแก้แนวเส้นทาง ถ้าไม่สามารถย้ายสิ่งที่บดบังการมองเห็นได้ โดยระยะการมองเห็นขึ้นอยู่กับความเร็วที่ใช้ออกแบบที่เป็นตัวควบคุม ผู้ออกแบบควรตรวจสอบถึงเงื่อนไขต่างๆ ของแต่ละโค้งและปรับแก้แนวเส้นทางให้มองเห็นได้อย่างเหมาะสม

2.3.6.1 ระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถ

สำหรับการออกแบบโค้งราบโดยทั่วไป แนวสายตาของผู้ขับขี่ในบริเวณโค้งก็คือ Chord ของโค้งนั่นเอง ระยะมองเห็นในโค้งราบจะถูกวัดไปตามแนวศูนย์กลางของช่องทางจราจรด้านในของโค้งราบ

METRIC


10000
1000
100
10
Radius, R, centerline of inside lane (m)
0
5
10
15
20
25
Middle ordinate, M, centerline inside lane to sight obstruction, (m)
Min. R when e=12%
V=130 km/h S=285 m
V=120 S=250
V=110 S=220
V=100 S=185
V=90 S=160
V=80 S=130
V=70 S=105
V=60 S=85
V=50 S=65
V=40 S=50
V=30 S=35
Min. R when e=12%
V=20 km/h S=20 m

2.3.6.2 ระยะมองเห็นสำหรับการแซง

ค่าต่ำสุดของระยะมองเห็นสำหรับการแซง สำหรับทางหลวง 2 ช่องจราจร จะมีค่ามากกว่าค่าระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถมากถึงประมาณ 4 เท่า ที่ความเร็วออกแบบเดียวกัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะรักษาระยะมองเห็นสำหรับการแซงในบริเวณโค้งราบได้ เนื่องจากต้องการพื้นที่ว่างสำหรับการมองอย่างมาก

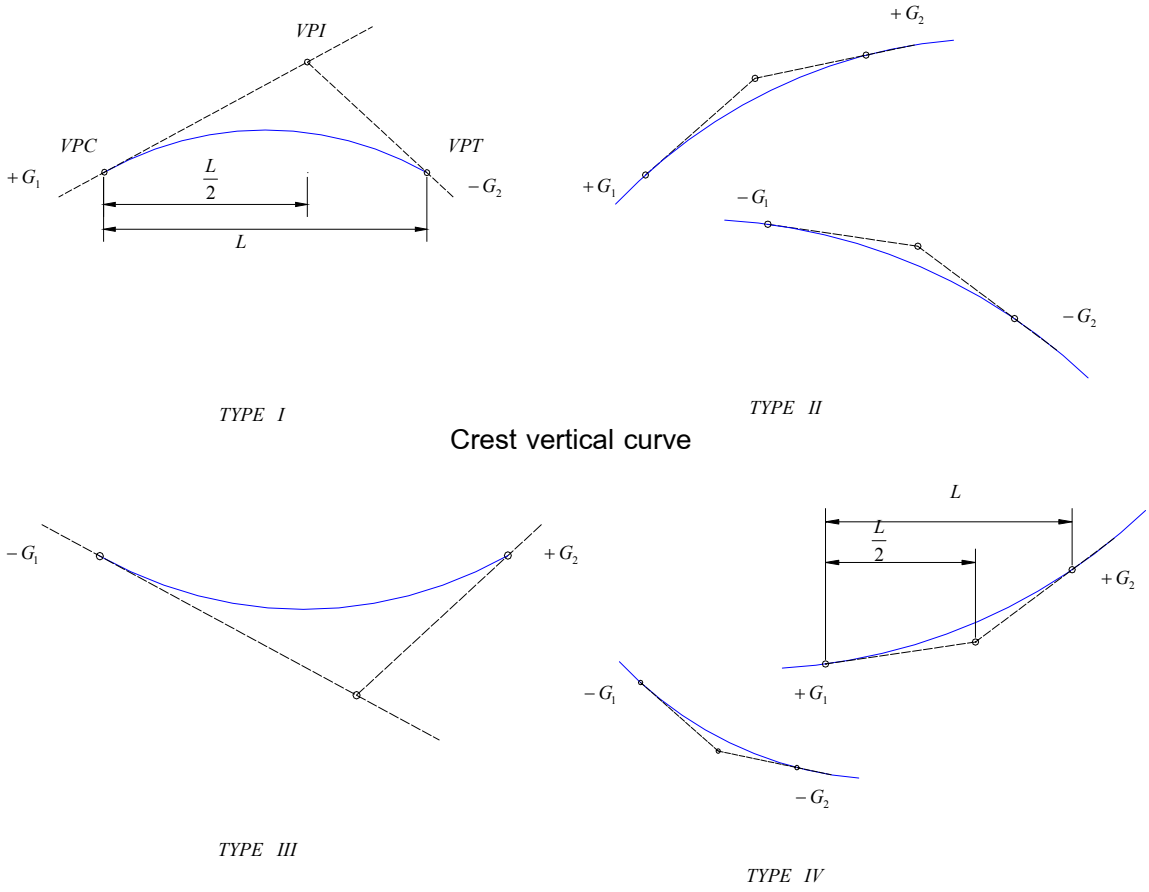
2.4 การออกแบบแนวทางดิ่ง (Design of Vertical Alignment)

2.4.1 การพิจารณาโดยทั่วไป

ในงานก่อสร้างทางหลวงใหม่ หรือปรับปรุงทางหลวงเดิม แนวทางราบของทางหลวงจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งแนวทางของโครงการก่อสร้างที่จะเกิดขึ้น แนวทางดิ่งจะเป็นตัวกำหนดระดับของทางหลวง การออกแบบแนวทางดิ่งจึงเป็นการออกแบบระดับหลังทางของทางหลวง ผลลัพธ์จากการออกแบบจะเกี่ยวกับงานดิน เช่น งานขุดดิน งานถมดิน (สมเกียรติ สิริพิทักษ์เดช, 2537)

แนวทางดิ่งของทางหลวงจะประกอบไปด้วย ส่วนที่เป็นแนวเส้นตรง (Grade lines) เชื่อมกับโค้งดิ่ง (Vertical curve) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้โค้งพาราโบลา (Parabolic curve) ดังแสดงในรูปที่ 9 หลักการออกแบบแนวทางดิ่งก็เป็นเช่นเดียวกับแนวทางราบ ซึ่งเป็นเป้าหมายในการออกแบบคือ การออกแบบให้เหมาะสมมีความปลอดภัยสะดวกสบายในการขับขี่ และประหยัดในการก่อสร้าง

โดยปกติแล้วงานออกแบบแนวทางดิ่งจะเริ่มต้นเมื่อได้มีการเลือกตำแหน่งหรือออกแบบแนวทางราบแล้ว แต่ในการออกแบบแนวทางราบ จำเป็นจะต้องพิจารณาข้อจำกัดที่มีส่วนเกี่ยวข้อง และมีผลกระทบต่อแนวทางดิ่งด้วย โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีผลกระทบต่อการออกแบบ แนวทางดิ่งคือ สภาพภูมิประเทศ (Terrain) คุณลักษณะและความสามารถของยวดยาน และองค์ประกอบเกี่ยวกับความปลอดภัยต่าง ๆ เช่น ระยะมองเห็น ความลาดชันสูงสุด เป็นต้น



รูปที่ 9 ประเภทของโค้งดิ่ง
ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 73

2.4.1.1 สภาพภูมิประเทศ (Terrain)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบแนวทางดิ่งมากที่สุด คือ สภาพภูมิประเทศ เนื่องจากจะเป็นตัวควบคุมระดับของทางหลวง ทางหลวงที่มีแนวผ่านพื้นที่ที่มีสภาพภูมิประเทศแตกต่างกันจะมีข้อจำกัดในการออกแบบแตกต่างกัน บางครั้งผู้ออกแบบไม่สามารถออกแบบแนวทางดิ่งให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำของการออกแบบได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านสภาพภูมิประเทศ หากจะออกแบบให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแล้ว อาจต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก ไม่คุ้มกับการลงทุน จึงจำเป็นต้องอนุโลมให้จุดที่มีข้อจำกัดดังกล่าวมีสภาพต่ำกว่ามาตรฐาน หรืออาจกล่าวได้ว่า ข้อกำหนดมาตรฐานออกแบบจำเป็นต้องมีความยืดหยุ่นให้เข้ากับสภาพภูมิประเทศ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ออกแบบว่าจะเลือกออกแบบอย่างไร

AASHTO ได้แบ่งสภาพภูมิประเทศออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) พื้นที่ราบ (Level Terrain) คือ สภาพที่ระยะมองเห็นของแนวทางราบและดิ่งมีระยะยาว ๆ หรือสามารถทำให้ระยะมองเห็นยาวได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายมากและก่อสร้างได้ง่าย

2) พื้นที่เนิน (Rolling terrain) คือ สภาพที่ความลาดชันขึ้นและลงตามธรรมชาติมีค่าสูงและต่ำกว่าความลาดชันของทางหลวง ซึ่งบางโอกาสความลาดชันสูง ๆ จะเป็นข้อจำกัดในการออกแบบทั้งแนวทางราบและแนวทางดิ่ง

3) พื้นที่ภูเขา (Mountaineous terrain) คือ สภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับอย่างรวดเร็วทั้งในแนวยาวและขวางตามแนวทางถนน ทำให้บ่อยครั้งต้องมีการถม และตัดไหล่เขาเพื่อทำให้ได้แนวทางที่เหมาะสม

การแบ่งประเภทของภูมิประเทศนั้น พิจารณาจากพื้นที่ที่อยู่ในเขตของทางหลวง ทางหลวงที่อยู่ในหุบเขา หรือพื้นที่ภูเขาและมีแนวทางผ่านพื้นที่ราบหรือพื้นที่เนินอาจจัดอยู่ในประเภทพื้นที่ราบ หรือพื้นที่เนิน โดยทั่วไปแล้วพื้นที่เนินจะทำให้แนวทางดิ่งของทางหลวงมีความลาดชัน ทำให้ความเร็วของรถบรรทุกลดลงต่ำมากกว่ารถยนต์โดยสารและพื้นที่เป็นภูเขาอาจทำให้รถบรรทุกขับเคลื่อนได้ช้ามาก

2.4.1.2 ระดับหลังทาง

เส้นแสดงค่าระดับหลังทาง คือ อนุกรมของเส้นตรงเชื่อมกับโค้งดิ่งพาราโบลา ซึ่งใช้แสดงค่าระดับหลังทางที่ศูนย์กลางของถนน ในการกำหนดระดับหลังทางผู้ออกแบบต้องกำหนดให้มีความประหยัดมากที่สุด โดยออกแบบให้มีปริมาณงานดินน้อยที่สุด แต่ต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบขั้นต่ำด้วย หลักเกณฑ์ในการพิจารณากำหนดระดับหลังทางสรุปได้ดังนี้

1) ในบริเวณพื้นที่ภูเขา และพื้นที่เนิน ผู้ออกแบบควรกำหนดระดับหลังทางให้ปริมาณงานดินตัด และดินถมสมดุลย์กัน ทั้งนี้เพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างน้อยที่สุด

2) ในพื้นที่ราบอาจกำหนดระดับหลังทางให้มีแนวขนานหรือเกือบขนานกับระดับดินตามธรรมชาติ แต่ต้องให้มีระดับสูงเพียงพอสำหรับการระบายน้ำที่ผิวทางด้วย

3) ในพื้นที่ที่แนวถนนขนานหรืออยู่ใกล้ทางน้ำธรรมชาติ ความสูงของระดับหลังทางของถนนจะต้องมีระดับสูงกว่าระดับน้ำท่วม

4) สำหรับทางหลวงชนิดแยกทิศทาง (Devided highways) ควรกำหนดระดับทางแยกจากกันในแต่ละทิศทาง แต่แนวเส้นทางของทางหลวง และระดับหลังทางของทั้ง

สองทิศทางจะต้องพิจารณาร่วมกัน เพื่อป้องกันแสงไฟจากยวดยานที่วิ่งในทิศทางตรงกันข้ามเข้าตาผู้ขับขี่

2.4.1.3 ความลาดชัน (Grades)

ในการออกแบบแนวเส้นทางทางหลวง จะต้องออกแบบให้ยวดยานสามารถขับขี่ได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอตลอดแนวเส้นทาง ความเร็วออกแบบที่เลือกใช้จะทำให้สามารถหาความสัมพันธ์และองค์ประกอบทางเรขาคณิตของทางหลวงได้ ในบริเวณที่แนวทางทางหลวงอยู่ในแนวระดับไม่มีความลาดชัน ยวดยานต่าง ๆ สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วออกแบบหรือมากกว่า เมื่อทางหลวงมีความลาดชัน ยวดยานที่มีน้ำหนักมากจะมีความเร็วลดลง ทำให้การขับขี่บนทางหลวงไม่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ตามเป้าหมายของการออกแบบ ดังนั้นในการกำหนดความลาดชันของทางหลวงต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความลาดชัน ความยาววิกฤติของทาง และคุณลักษณะของยวดยานด้วย

2.4.1.4 คุณลักษณะของยวดยานบนทางลาดชัน (Vehicle Operating Characteristics on Grades)

1) รถยนต์ส่วนบุคคล (Passenger cars) ผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลมีความชำนาญในการขับขี่รถบนทางลาดชัน แตกต่างกัน เป็นที่ยอมรับกันว่า ผู้ขับขี่ส่วนใหญ่สามารถขับขี่รถบนทางลาดชันที่มีความลาดชัน 4 - 5 % ได้โดยไม่มีการลดความเร็วต่ำกว่าที่ขับขี่บนทางหลวงที่อยู่ในแนวราบ ยกเว้นที่มีอัตราส่วนของน้ำหนักรถต่อแรงม้าของเครื่องยนต์สูง

การขับขี่ในสภาพการจราจรไม่ติดขัดบนทางลาดชันขึ้นหรือลง 3 % มีสภาพแตกต่างจากการขับขี่บนทางหลวงที่ไม่มีความลาดชันเล็กน้อยเท่านั้น บนทางหลวงที่มีความลาดชันมากกว่า 3 % ความเร็วในการขับขี่จะลดลงแปรผันกับความลาดชันที่เพิ่มขึ้น บนทางลาดชันลงนั้นความเร็วของรถจะมากกว่าบนทางหลวงที่อยู่ในแนวราบ

2) รถบรรทุก (Trucks) ทางลาดชันส่งผลกระทบต่อความเร็วของรถบรรทุกมากกว่ารถยนต์ส่วนบุคคลบนทางลาดชันขึ้น ความเร็วสูงสุดในการวิ่งขึ้นกับระยะทางที่เป็นทางลาดชัน ความลาดชันและอัตราส่วนของน้ำหนักรถต่อแรงม้าของเครื่องยนต์ ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อความเร็วของรถบรรทุกทางลาดชันตลอดระยะทางที่วิ่งบนทางลาดชัน ได้แก่ ความเร็วเริ่มต้นเมื่อเข้าสู่ทางลาดชัน แรงต้านทานของลม และความชำนาญของผู้ขับขี่ อย่างไรก็ตามปัจจัยเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อความเร็วเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.4.1.5 การควบคุมความลาดชันในการออกแบบ (Control Grades for Design)

1) ความลาดชันสูงสุดสำหรับการออกแบบ (Maximum Grades for Design

จากคุณลักษณะของยวดยานบนทางลาดชันที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการควบคุมความลาดชันของทางหลวง เพื่อให้ยวดยานทุกชนิดสามารถวิ่งได้อย่างสะดวก ความลาดชันสูงสุด 5 % จะเหมาะสมกับความเร็วออกแบบ 110 km/h และสำหรับความเร็วออกแบบ 50 km/h ความลาดชันสูงสุดควรจะอยู่ช่วงประมาณ 7 - 12 % ทั้งนี้ ค่าความลาดชันสูงสุดที่กำหนดนี้ขึ้นกับ สภาพภูมิประเทศ มาตรฐานและประเภทของทางหลวง

ปกติควรออกแบบให้ความลาดชันมีค่าน้อยกว่าความลาดชันสูงสุดสำหรับทางลาดชัน ที่มีระยะทางสั้นกว่า 150 m หรือถนนเดินรถทางเดียวอาจเพิ่มความลาดชันสูงสุดได้อีก 1 % สำหรับทางหลวงที่มีการจราจรน้อยอาจเพิ่มได้ถึง 2 %

2) ความลาดชันต่ำสุด (Minimum grades)

ทางหลวงที่อยู่ในแนวราบและไม่ได้ทำขอบถนน (Uncurbed pavement) ไม่จำเป็นต้องกำหนดความลาดชันต่ำสุด ถ้าผิวทางมีความลาดเพียงพอที่จะระบายน้ำออกด้านข้างได้เพียงพอ สำหรับถนนที่ทำขอบถนน จะต้องมีความลาดชันเล็กน้อยเพื่อช่วยให้ระบายน้ำได้สะดวกยิ่งขึ้น ค่าความลาดชันต่ำสุดที่ใช้กันทั่วไป คือ 0.50 % แต่อาจใช้ 0.30 % ในกรณีที่ผิวทางมีมาตรฐานสูงทำลาดหลังทางอย่างดี และอยู่บนดินเดิมที่มีความมั่นคงแข็งแรง

3) ความยาววิกฤติของทางลาดชัน (Critical Lengths of Grades for Design)

ความยาววิกฤติของทางลาดชัน คือ ความยาวสูงสุดของทางลาดชันที่มีความลาดชันค่าหนึ่ง ซึ่งรถบรรทุกสามารถวิ่งได้ โดยไม่สูญเสียความเร็วมากกว่าค่าที่กำหนด เมื่อถนนมีความยาวของทางลาดชันน้อยกว่าค่าวิกฤติ จะทำให้ลักษณะการสัญจรอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ภายในช่วงความเร็วที่ต้องการ ถ้าต้องการออกแบบทางลาดชันให้มีความยาวมากกว่าค่าวิกฤติจะต้องจัดเตรียมช่องทางพิเศษสำหรับรถที่มีความเร็วต่ำ

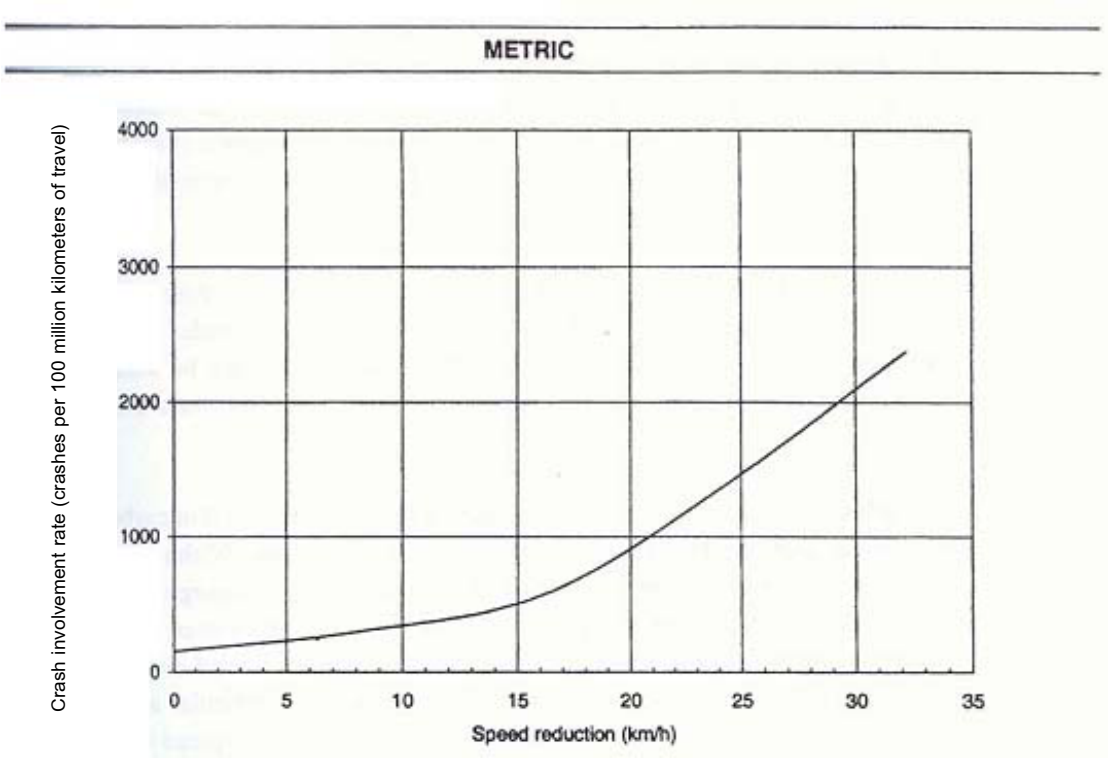
ในการหาค่าความยาววิกฤติสำหรับการออกแบบซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการไต่ทางลาดชันของรถบรรทุก จะต้องทราบข้อมูลหรือสมมติฐานดังต่อไปนี้

- ขนาดและกำลังของรถบรรทุกที่ใช้เป็นตัวแทนในการออกแบบ โดยกำลังของรถบรรทุกที่ใช้เป็นตัวแทนในการออกแบบทั่วไปใช้ค่าอัตราส่วนน้ำหนักรถต่อแรงม้าของเครื่องยนต์เท่ากับ 120 kg/kW (200 lb/hp)

- ความเร็วของรถขณะเข้าสู่ช่วงความยาววิกฤติ อาจใช้ความเร็วเฉลี่ย (Average running speed) ของรถ ในการประมาณค่าความเร็วของรถขณะเริ่มไต่ทางลาดชันขึ้น แต่ถ้ามีความลาดชันน้อย อาจใช้ความเร็วของรถ (running speed) โดยตรงเลยก็ได้

- ความเร็วต่ำสุดของรถบนทางลาดชันที่ไม่ส่งผลกระทบต่อรถที่วิ่งตามมาจนอยู่ในเกณฑ์ไม่เหมาะสม ข้อมูลเกี่ยวกับความเร็วต่ำสุดดังกล่าวนี้ไม่สามารถหามาได้ แต่อย่างไรก็ตามอาจสมมุติให้ความเร็วต่ำสุดนี้มีความสัมพันธ์กับความเร็วออกแบบและความไม่พึงพอใจของผู้ขับขี่ เนื่องจากการเสียเวลาในช่วงที่ไม่สามารถแซงรถบรรทุกได้ โดยระยะเวลา

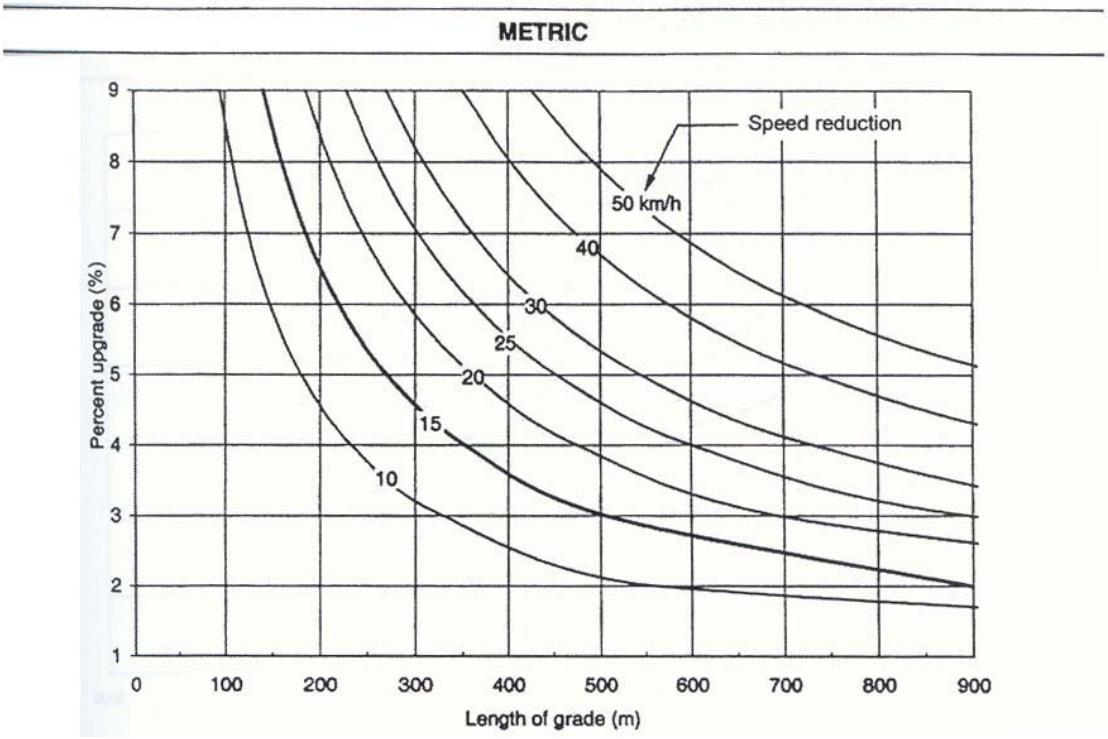
ดังกล่าวนี้อาจไม่เท่ากันบนถนนสายเดียวกันขึ้นกับสภาพของถนนและปริมาณการจราจร ในการออกแบบทางหลวง จะต้องออกแบบให้รถบรรทุกไม่สูญเสียความเร็วมาก จนส่งผลกระทบต่อผู้ขับขี่รถคันที่ตามมา จากการศึกษาพบว่า ผลของการลดหรือสูญเสียความเร็วของรถบรรทุกมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุด้วย ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดอุบัติเหตุต่อความเร็วของรถบรรทุกที่ลดลงต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยในการวิ่งของยวดยานทุกชนิด (Crash Involvement Rate of Trucks for Which Running Speeds Are Reduced Below Average Running Speed for All Traffic)
ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 62

หลักการพื้นฐานในการหาความยาววิกฤติคือ ความเร็วของรถบรรทุกที่ลดลงต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยในการวิ่งของยวดยานทุกชนิด ในอดีตใช้ค่าความเร็วที่ลดลงของรถบรรทุกที่ต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 25 km/h แต่จากการศึกษาพบว่า ความเร็วที่ลดลงมากกว่า 15 km/h จะมีส่วนเกี่ยวข้องและเกิดอุบัติเหตุมากกว่า 2.4 เท่าของความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 25 km/h จึงกำหนดให้ใช้ค่าความเร็วที่ลดลงของรถบรรทุกเท่ากับ 15 km/h สำหรับการหาความยาววิกฤติของทางลาดชัน

ความยาววิกฤติของทางลาดชันต่าง ๆ สำหรับรถบรรทุกที่ใช้เป็นตัวแทน (120 kg/kW) ซึ่งวิ่งเข้าสู่ทางลาดชันด้วยความเร็ว 110 km/h และมีความเร็วลดลงต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ย ค่าต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความยาววิกฤติของทางลาดชันสำหรับการออกแบบ สมมติรถบรรทุกขนาด 120 kg/kW วิ่งเข้าสู่ทางลาดชันด้วยความเร็ว 110 km/h (Critical Lengths of Grade for Design, Assumed Typical Heavy Truck of 120 kg/kW , Entering Speed = 110 km/h)
ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 63

ความยาววิกฤติของทางลาดชันที่แสดงในรูปที่ 11 ได้จากการวิเคราะห์บนทางลาดชันที่เป็นทางตรง หากความยาววิกฤติประกอบไปด้วยโค้งดิ่งชนิดที่ 2 และ 4 ของรูปที่ 9 และความแตกต่างของความลาดชันไม่มาก อาจหาความยาววิกฤติได้โดยใช้ความยาวของเส้นตรง (Tangent) ของโค้งดิ่งระหว่างจุดตัดแนวดิ่ง (PVI) มาร่วมคำนวณก็ได้ แต่ถ้าเป็นโค้งดิ่งชนิดที่ 1 และ 3 ในรูปที่ 9 อาจใช้ความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวโค้งดิ่งมาร่วมคำนวณ

สำหรับกรณีของทางลาดชันลง ความลาดชันจะมีผลต่อความจุและความปลอดภัยของถนน โดยเฉพาะเมื่อมีปริมาณการจราจร และปริมาณรถบรรทุกสูง จากการศึกษาพบว่าการใช้เกียร์ต่ำของรถบรรทุกขณะวิ่งลงทางลาดชัน มีผลเช่นเดียวกับบนทางลาดชันขึ้น ดังนั้นจึงควรจัดหาช่องทางสำหรับรถบรรทุกในทางลาดชันลง

ข้อกำหนดสำหรับคำนวณหาความยาววิกฤติของทางลาดชันนี้ เป็นเพียงข้อแนะนำเท่านั้น ในบางสภาพภูมิประเทศอาจสามารถปรับปรุงแนวทางให้เข้ากับกำหนดดังกล่าวนี้ได้ แต่ในบางสภาพภูมิประเทศอาจไม่สามารถทำได้ซึ่งจะทำให้มีผลกระทบต่อการขับขี่บนทางหลวงที่มีปริมาณรถบรรทุกสูง โดยเฉพาะบนทางหลวง 2 ช่องจราจร ที่มีปริมาณการจราจรสูงใกล้ความจุของถนน หากความยาวของทางลาดชันมีค่ามากกว่าค่าความยาววิกฤติ ควรพิจารณาจัดช่องทางจราจรเพิ่มสำหรับยวดยานที่มีความเร็ว โดยใช้รูปที่ 11 ประกอบกับข้อพิจารณาอื่น ๆ

2.4.2 โค้งดิ่ง (Vertical Curve)

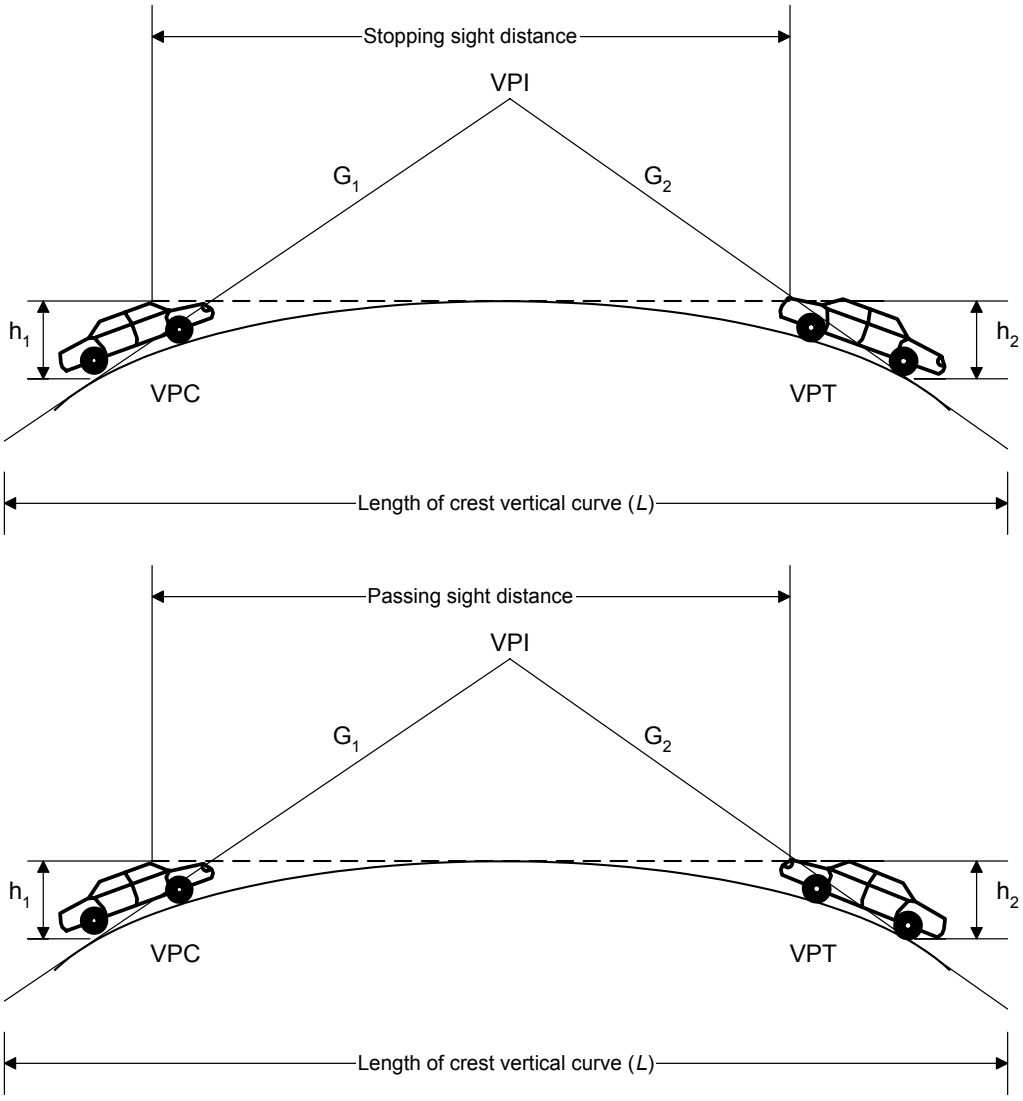
โค้งดิ่งที่เป็นโค้งที่ใช้เชื่อมเส้นลาด (grade) สองเส้น เพื่อให้การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในแนวดิ่งเป็นไปอย่างราบรื่น โค้งดิ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โค้งดิ่งคว่ำ (Crest vertical curve) และโค้งดิ่งหงาย (Sag vertical curve) ดังแสดงในรูปที่ 9

การออกแบบโค้งดิ่งนอกจากจะมีวัตถุประสงค์ให้การขับขี่รถที่บริเวณโค้งเป็นไปอย่างราบเรียบแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยด้วย ข้อกำหนดเพื่อความปลอดภัยของโค้งดิ่งคว่ำ (Crest vertical curve) คือ ต้องมีระยะมองเห็น (Sight distance) เพียงพอในการขับขี่ภายใต้ความเร็วออกแบบ ระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบโค้ง โดยความยาวโค้งต่ำสุดต้องเหมาะสมกับระยะมองเห็นดังกล่าว การออกแบบโค้งดิ่งหงาย (Sag vertical curve) ระยะมองเห็นไม่มีผลกระทบในช่วงเวลาวัน เนื่องจากลักษณะของโค้งมีส่วนทำให้ผู้ขับขี่สามารถมองเห็นได้ในระยะไกล แต่ในเวลากลางคืนจะประสบปัญหาเนื่องจากมีปัจจัยเกี่ยวกับแสงไฟส่องสว่างมาเกี่ยวข้องด้วย

2.4.2.1 การหาความยาวโค้งดิ่งให้สอดคล้องกับระยะมองเห็น

1) โค้งดิ่งคว่ำ (Crest Vertical Curve

ปัจจัยสำคัญที่ใช้กำหนดระยะมองเห็นในโค้ง ได้แก่ ระดับสายตาของผู้ขับขี่ ความสูงของวัตถุ หรือสิ่งกีดขวาง และความแตกต่างสมบูรณ์ของความลาดชันของเส้นลาดชันทั้งสอง ในการหาความยาวโค้งให้สอดคล้องกับระยะมองเห็นจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ระยะมองเห็นเส้นกว่าความยาวโค้งดิ่ง และระยะมองเห็นยาวกว่าความยาวโค้งดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ค่าที่ใช้ในการพิจารณาหาค่าความยาวโค้งคว่ำให้มีการมองเห็น (Parameters Considered in Determining the Length of a Crest Vertical Curve to Provide Sight Distance)

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 74

สูตรที่ใช้ในการหาความยาวโค้งดิ่งคว่ำ คือ

เมื่อ $S < L$ ระยะมองเห็นสั้นกว่าความยาวโค้ง

$$L = \frac{AS^2}{100\left(\sqrt{2h_1} + \sqrt{2h_2}\right)^2} \quad (6)$$

เมื่อ $S > L$ ระยะมองเห็นมากกว่าความยาวโค้ง

$$L = 2S - \frac{200\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right)^2}{A} \quad (7)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของโค้งในแนวดิ่ง, m

S คือ ระยะมองเห็น, m

A คือ ผลต่างทางพีชคณิตของอัตราความลาดชัน, %

h_1 คือ ความสูงของระดับสายตาผู้ขับขี่ขณะนั่งขับรถ วัดจากพื้นทาง, m

h_2 คือ ความสูงของวัตถุกีดขวางทาง วัดจากพื้นทาง, m

เมื่อความสูงระดับสายตาและความสูงของวัตถุกีดขวางทางคือ 1,080 mm และ 600 mm จะได้ว่า

เมื่อ $S < L$ ระยะมองเห็นสั้นกว่าความยาวโค้ง

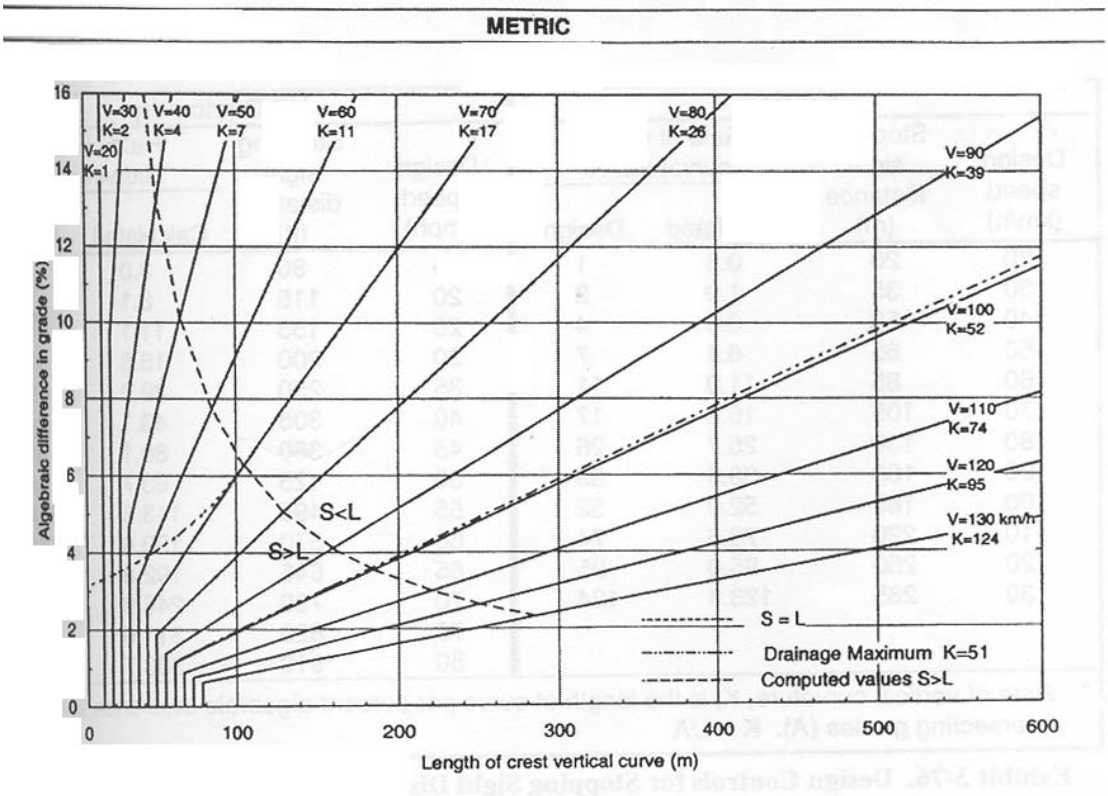
$$L = \frac{AS^2}{658} \quad (8)$$

เมื่อ $S > L$ ระยะมองเห็นมากกว่าความยาวโค้ง

$$L = 2S - \frac{658}{A} \quad (9)$$

ข้อกำหนดการออกแบบสำหรับระยะมองเห็นเพื่อการหยุดรถ (Design controls - stopping sight distance)

ความยาวโค้งดิ่งที่หาได้จากสมการ 8 และ 9 ที่ผลต่างทางพีชคณิตของความลาดชันต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ค่าควบคุมการออกแบบของโค้งดิ่งคว่ำ (Design Controls for Crest Vertical Curves - Open Road Conditions)

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 75

ค่า K คือ ความยาวของโค้งดิ่งต่ออัตราการเปลี่ยนทางพีชคณิตของความลาดชัน ($K=\frac{L}{A}$) ค่า K คือควบคุมการออกแบบซึ่งขึ้นกับค่า L และ A ดังนั้นการออกแบบจึงไม่อาจแยกการพิจารณาระหว่าง A และ L ได้ แต่ต้องพิจารณาร่วมกัน

ตารางที่ 15 แสดงค่า K สำหรับความยาวโค้งต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับระยะมองเห็นสำหรับการหยุด

ตารางที่ 15 ค่าควบคุมการออกแบบสำหรับระยะมองเห็นสำหรับการหยุดของโค้งดิ่งหงาย

Design Speed (km/h)	Stopping sight distance (m)	Rate of vertical curvature, K^a	
		Calculated	Design
20	20	0.6	1
30	35	1.9	2
40	50	3.8	4
50	65	6.4	7
60	85	11.0	11
70	105	16.8	17
80	130	25.7	26
90	160	38.9	39
100	185	52.0	52
110	220	73.6	74
120	250	95.0	95
130	285	123.4	124
[a] Rate of vertical curvature, K, is the length of curve per percent algebraic difference in intersecting grades (K^a). $K = L/A$			

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 76

ในรูปที่ 13 เมื่อ S มากกว่า L ค่าความยาวโค้งที่คำนวณได้จะเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงด้วยเส้นประ สำหรับความเร็ว 70 km/h เมื่อค่า A น้อย ๆ ความยาวโค้งดิ่ง จากการคำนวณจะเท่าหรือใกล้เคียงกับศูนย์ เนื่องจากแนวสายตาของผู้ขับขี่อยู่เหนือจุดยอดของโค้งดิ่ง ค่าที่ได้นี้ไม่เหมาะสม ดังนั้น จึงกำหนดให้ค่าความยาวต่ำสุดของโค้งดิ่งมีค่าเท่ากับ 0.6 เท่าของความเร็วออกแบบ $\left(L_{\min} = 0.6V\right)$ เมื่อ V มีหน่วยเป็น km/h และ $L_{\min}$ มีหน่วยเป็น m

ในการขับขี่ยวดยานเวลากลางคืนบนถนนที่ไม่มีไฟฟ้าส่องสว่าง ระยะมองเห็นจะขึ้นกับแสงไฟจากยวดยานซึ่งมีระยะสั้นกว่าระยะมองเห็นสำหรับการหยุดรถ ทั้งนี้เพราะแสงไฟจากยวดยานสามารถส่องสว่างให้มีความเข้มที่ต้องการภายในระยะทางที่จำกัดไม่ว่าจะเป็นช่วงแนวทางตรงหรือช่วงโค้ง ในกรณีเช่นนี้ให้ใช้ความสูงของดวงไฟแทนความสูงของระดับสายตาของผู้ขับขี่ โดยทั่วไปใช้ความสูงของแสงไฟเท่ากับ 450 ถึง 600 mm

ข้อกำหนดการออกแบบสำหรับระยะมองเห็นเพื่อการแซง (Design controls - passing sight distance)

ความยาวต่ำสุดของโค้งดิ่ง เมื่อกำหนดให้ใช้ระยะมองเห็นเพื่อการแซงสามารถหาได้จากสมการที่ 6 และ 7 เช่นเดียวกันแต่ใช้ค่าความสูงของวัตถุเท่ากับ 1.080 m ดังแสดงในสมการที่ 10 และ 11

เมื่อ $S < L$ ระยะมองเห็นสั้นกว่าความยาวโค้ง

$$L = \frac{AS^2}{864} \quad (10)$$

เมื่อ $S > L$ ระยะมองเห็นมากกว่าความยาวโค้ง

$$L = 2S - \frac{864}{A} \quad (11)$$

ระยะมองเห็นสั้นที่สุดที่ AASHTO แนะนำเพื่อการแซงแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าควบคุมการออกแบบของโค้งดิ่งสำหรับการแซง (Design Controls for Crest Vertical)

Design speed (km/h)	Passing sight distance (m)	Rate of vertical curvature, K* design
30	200	46
40	270	84
50	345	138
60	410	195
70	485	272
80	540	338
90	615	438
100	670	520
110	730	617
120	775	695
130	815	769
Note : *Rate of vertical curvature, K , is the length of curve per percent algebraic difference in intersecting grades (K^a). $K = L / A$		

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 77

โดยทั่วไปแล้ว จะไม่ใช้ระยะมองเห็นเพื่อการแซงเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ เนื่องจากมีระยะยาวกว่าระยะมองเห็นเพื่อการหยุดรถมาก และจะทำให้เสียค่าก่อสร้างสูง และปฏิบัติงานก่อสร้างลำบากขึ้น ระยะมองเห็นเพื่อการแซงอาจใช้ออกแบบถนนเมื่อความเร็วออกแบบต่ำ และมีความลาดชันต่ำ

2) โค้งดิ่งหงาย (Sag Vertical Curve)

ในโค้งดิ่งหงาย ระยะมองเห็นในเวลากลางวันไม่เป็นปัญหาแต่ประการใด แต่ในเวลากลางคืน ระยะทางที่ผู้ขับขี่มองเห็นจะจำกัด โดยเฉพาะช่วงที่แสงไฟหน้ารถส่องถึงผิวจราจร ในการออกแบบใช้ค่าความสูงของระดับไฟหน้ารถ 0.60 m และมุมที่แสงไฟทำกับแนวขนานของตัวรถเท่ากับ 1 องศา

เมื่อ $S < L$

$$L = \frac{AS^2}{200\left(0.6 + S\tan 1^0\right)} \quad \text{หรือ} \quad (12)$$

$$L = \frac{AS^2}{120 + 3.5S}$$

เมื่อ $S > L$

$$L = 2S - \frac{200\left(0.6 + S\tan 1^0\right)}{A} \quad \text{หรือ} \quad (13)$$

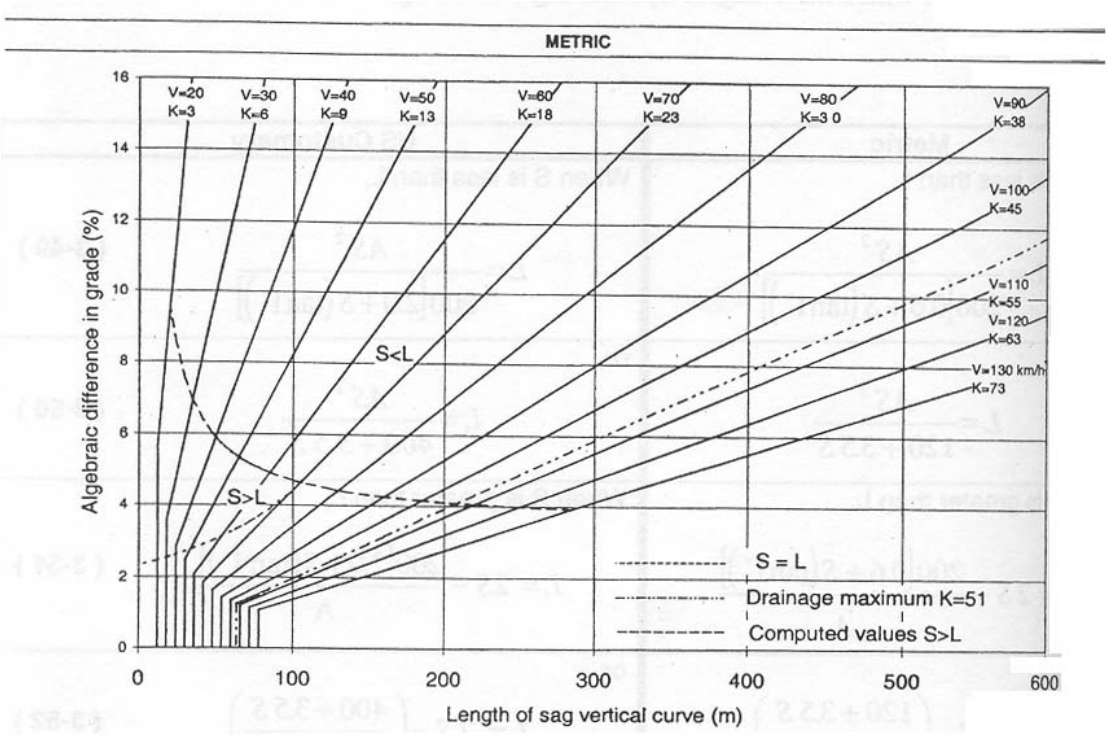
$$L = 2S - \left(\frac{120 + 3.5S}{A}\right)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของโค้งดิ่งหงาย, m

S คือ ระยะไฟหน้าส่อง, m

A คือ ผลต่างทางพีชคณิตของความลาดชัน, %

เพื่อความปลอดภัยแล้วความยาวของโค้งดิ่งหงายควรมีเพียงพอให้แสงไฟหน้ารถส่องถึงได้ระยะใกล้เคียงกับระยะหยุดโดยปลอดภัย โดย AASHTO ได้แนะนำค่าความยาวโค้งหงายไว้ในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ค่าควบคุมการออกแบบของโค้งดิ่งหงาย (Design Controls for Sag Vertical Curves - Open Road Conditions)

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 78

ในกรณีที่พิจารณาให้ผู้ขับขี่มีความสะดวกสบายในการขับขี่ การเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของรถในโค้งหงาย จะมีผลกระทบมากกว่าโค้งคว่ำ เนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงและแรงหนีศูนย์กลางอยู่ในแนวเดียวกัน สมรรถนะของรถ เช่น ระบบกันสะเทือน ความยืดหยุ่นของยางและน้ำหนักบรรทุก ก็มีผลต่อความสะดวกสบายในการขับขี่เช่นเดียวกัน จึงเป็นการยากที่จะวัดความสะดวกสบายได้ AASHTO แนะนำให้จำกัดความเร็วสู่ศูนย์กลางไม่เกิน 0.30 m/s^2 ในกรณีนี้ความยาวโค้งดิ่งหงายหาได้จากสมการที่ 14

$$L = \frac{AV^2}{395} \qquad (14)$$

เมื่อ L คือ ความยาวโค้งดิ่งหงาย, m

A คือ ผลต่างทางพีชคณิตของความลาดชัน

V คือ ความเร็วออกแบบ, km/h

ความยาวโค้งดิ่งที่คำนวณได้จากสมการที่ 14 จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าที่ได้จากการกำหนดระยะมองเห็นในแสงไฟ

เมื่อต้องการควบคุมการระบายน้ำ ซึ่งจะมีผลต่อโค้งดิ่งหงายแบบที่ 2 ของรูปที่ 9 สำหรับถนนที่มีขอบถนน ข้อกำหนดการออกแบบจะเป็นเช่นเดียวกับโค้งคว่ำคือ ต้องการความแตกต่างของเส้นลาดชันน้อยที่สุดเท่ากับ 0.30 % ในระยะทางส่วนโค้งยาว 15 m ดังแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 14 (ค่า K เท่ากับ 51 m) ข้อกำหนดนี้จะกำหนดความยาวโค้งมากที่สุดแทนการกำหนดความยาวโค้งต่ำสุด

ในกรณีที่พิจารณาถึงทัศนวิสัย ผู้ออกแบบจะต้องใช้วิจารณญาณในการตัดสินใจเลือกความยาวโค้งหงาย บางหน่วยงานกำหนดให้ใช้ความโค้งหงายต่ำสุดเท่ากับ $30A$ หรือ $K=30$ เปรียบเทียบกับการออกแบบที่ใช้ระยะมองเห็นในแสงไฟเป็นตัวกำหนด ซึ่งจะอยู่ในช่วงความเร็วประมาณ 80 km/h บนถนนที่มีมาตรฐานการออกแบบสูง อาจเพิ่มความยาวโค้งหงายเพื่อปรับปรุงทัศนวิสัยให้ดีขึ้น

AASHTO แนะนำให้ใช้ระยะมองเห็นในแสงไฟเป็นตัวกำหนดในการหาความยาวโค้งดิ่งหงาย เนื่องจากมีความสมเหตุสมผล ตารางที่ 17 แสดงค่าควบคุมการออกแบบของโค้งดิ่งหงาย

ตารางที่ 17 ค่าควบคุมการออกแบบของโค้งดิ่งหงาย (Design Controls for Sag Vertical Curves)

Design speed (km/h)	**Stopping sight distance (m)**	**Rate of vertical curvature, K^a**	
		Calculated	**Design**
20	20	2.1	3
30	35	5.1	6
40	50	8.5	9
50	65	12.2	13
60	85	17.3	18
70	105	22.6	23
80	130	29.4	30
90	160	37.6	38
100	185	44.6	45
110	220	54.4	55
120	250	62.8	63
130	285	72.7	73

[a] Rate of vertical curvature, K , is the length of curve per percent algebraic difference in intersecting grades (K^a). $K = L / A$

ที่มา : AASHTO, 2001 : Exhibit 3 - 79

2.4.3 ข้อพิจารณาทั่วไปในการออกแบบแนวทางดิ่ง

การออกแบบแนวทางดิ่งเป็นการกำหนดระดับของหลังทางของทางหลวง ในการออกแบบให้รถวิ่งได้สะดวกสบาย ปลอดภัย ประหยัด และแนวทางสอดคล้องกับภูมิประเทศ ควรจะได้พิจารณาในสิ่งต่อไปนี้

1) แนวเส้นทางที่ผ่านที่ราบควรกำหนดระดับหลังทางให้สูงกว่าระดับน้ำท่วมข้างทางไม่น้อยกว่า 0.45 m

2) พิจารณากำหนดระดับหลังทาง ให้มีความลาดชันน้อยที่สุด เพื่อให้ความเร็วของรถไม่ลดลงมาก ถ้าระยะที่ต้องไต่ทางลาดชันยาว ควรกำหนดให้ช่วงที่ชันที่สุดอยู่ระดับล่างและช่วงลาดชันน้อย ๆ อยู่ช่วงบน แทนที่จะใช้ทางลาดชันคงที่ตลอด

3) พยายามกำหนดระดับหลังทาง ให้ปริมาณดินตัดใกล้เคียงกับปริมาณดินถมทั้งนี้เพื่อลดปัญหานำดินส่วนเกินไปทิ้ง หรือนำดินจากที่อื่นมาถม เป็นการช่วยลดค่าก่อสร้างทาง

4) ให้พยายามหลีกเลี่ยงการกำหนดระดับทางแบบลูกคลื่น ซึ่งเกิดจากทางลาดชันสั้น ๆ จำนวนมากเชื่อมต่อด้วยโค้งดิ่ง แนวเส้นทางลักษณะนี้นอกจากจะไม่สวยงามแล้วยังไม่เป็นการปลอดภัยอีกด้วย

5) ควรพยายามหลีกเลี่ยงการใช้โค้งดิ่งหงายที่สั้นมาก ๆ เชื่อมระหว่างทางลาดชันที่ยาวมาก ๆ เพราะ นอกจากจะทำให้ผู้ใช้ถนนไม่สะดวกสบายแล้วยังอันตรายในระหว่างการแซงของรถด้วย

6) หลีกเลี่ยงการออกแบบที่ไม่สอดคล้องกับภูมิประเทศ เช่น ใช้โค้งคว่ำ ในช่วงดินถมหรือใช้โค้งดิ่งหงายในช่วงดินตัด

7) เมื่อมีทางแยกระดับเดียวกัน (At grade intersection) ในช่วงที่มีความลาดชันปานกลางหรือลาดชันสูง ควรจะลดความลาดชันลงในช่วงทางแยก พยายามกำหนดให้เป็นทางราบ จะช่วยให้การเลี้ยวรถสะดวกยิ่งขึ้นและช่วยลดอุบัติเหตุ

8) จะต้องสอดคล้องกับแนวทางราบ

2.5 การผสมผสานระหว่างการออกแบบแนวทางราบและทางดิ่ง (Combination of Horizontal and Vertical Alignment)

แนวทางราบและแนวทางดิ่งไม่ควรจะแยกกันออกแบบ เนื่องจากเป็นส่วนประกอบของกันและกัน เมื่อใดก็ตามที่การผสมผสานของแนวทางทั้งสองไม่ดีแล้ว ก็อาจจะทำลายจุดดีและเสริมจุดด้อยของกันและกัน แนวทางราบและระดับทางเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของทางหลวงซึ่งควรได้ศึกษาให้ถ่องแท้ การออกแบบและการผสมผสานที่ดีจะทำให้ได้ทางหลวงที่ใช้

งานได้ดี ปลอดภัยและสะดวกสบาย โดยที่ไม่ได้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นมากมายนัก (ลำดวน ศรีศักดา, 2544) ดังนั้นในการออกแบบแนวทางจึงควรพิจารณาในหัวข้อต่อไปนี้

1) ความโค้งและความลาดชันของทางควรจัดให้สมดุลย์ การออกแบบให้ถนนตรงและโค้งน้อย แต่มีความลาดชันมาก หรือแนวถนนมีความโค้งมาก แต่มีระดับราบ ๆ เป็นการออกแบบที่ไม่ดีทั้งคู่ การออกแบบที่ดีที่สุดก็คือการประนีประนอมเข้าหากันจะทำให้ได้ทางที่ปลอดภัย ประหยัดและสวยงาม

2) โค้งราบและโค้งดิ่งไม่จำเป็นต้องแยกกัน (อาจจะซ้อนอยู่ในสถานีเดียวกันได้) ปกติแล้วลักษณะของแนวทางจะดูเป็นธรรมชาติและดูดีถ้าได้คำนึงถึงข้อจำกัดบางอย่าง

3) การเปลี่ยนแปลงแนวทางราบควรจะทำในช่วงของโค้งดิ่งหงาย ผู้ขับขี่จะมองเห็นการเปลี่ยนทิศทางได้ง่าย อย่างไรก็ตามโค้งราบที่ออกแบบควรเป็นโค้งที่มีรัศมียาว เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยว ของภาพเส้นทางที่ปรากฏแก่คนขับ

4) ไม่ควรใส่โค้งราบที่มีความยาวรัศมีน้อย ๆ ให้อยู่ที่เดียว หรือใกล้กับยอดของโค้งดิ่งคว่ำที่มีความลาดชันสูง สภาพเช่นนี้เป็นอันตรายมากเพราะคนขับจะไม่เห็นว่ามีการเปลี่ยนแนวทางราบ (โดยเฉพาะกลางคืนเพราะแสงไฟหน้ารถส่องขึ้นสูง) อันตรายอย่างนี้อาจหลีกเลี่ยงได้ ถ้าให้โค้งราบยาวกว่าโค้งดิ่ง หรือออกแบบให้ดีกว่ามาตรฐานต่ำสุดสำหรับความเร็วออกแบบหนึ่ง ๆ

5) ไม่ควรใส่โค้งราบที่มีความยาวรัศมีน้อย ๆ ให้อยู่ที่เดียวหรือใกล้กับจุดต่ำของโค้งดิ่งหงายที่มีความลาดชันสูง เพราะนอกจากจะมีความบิดเบี้ยวของภาพแล้ว ที่บริเวณนั้นความเร็วรถมักจะสูงเกินไป (โดยเฉพาะรถบรรทุก) ที่จะวิ่งในโค้งที่แคบ

2.6 ความสัมพันธ์ของความสอดคล้องของการออกแบบและความปลอดภัย (Relationships of Design Consistency Measures to Safety)

เป้าหมายของการขนส่งโดยทั่วไปคือ ขนส่งคนและสินค้าด้วยความปลอดภัยอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งผู้ออกแบบถนนสามารถเพิ่มความปลอดภัยทางถนนได้โดยการตรวจสอบความความสอดคล้องของการออกแบบความสอดคล้องของการออกแบบจะเกี่ยวข้องกับลักษณะทางเรขาคณิตของถนนที่ผู้ขับขี่คาดหวัง โดยส่วนมากแล้วผู้ขับขี่สามารถปรับตัวให้เข้ากับลักษณะของถนนที่มีความผิกปกติเล็กน้อยได้ แต่ถ้าถนนที่ขาดความสอดคล้องมาก ๆ จะเป็นการเพิ่มภาระงาน (Workload) ให้กับผู้ขับขี่ จนอาจทำให้ผู้ใช้ถนนขับด้วยความไม่ปลอดภัย (Federal Highway Administrator, 1999)

ความเร็วของการจราจรบนถนนมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ความเร็วในการออกแบบจึงมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการออกแบบถนนในส่วนขององค์ประกอบหลักทางด้านกายภาพของถนน อาทิเช่น การออกแบบแนวทางราบและแนวทางดิ่ง การยกโค้งใน

โค้งราบ ระยะหยุดปลอดภัยและระยะการมองเห็นปลอดภัย เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่ (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2547)

ความเร็วที่เกี่ยวข้องในการออกแบบแนวเส้นทางมีหลายชนิด (ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544) ดังนี้

ความเร็วออกแบบ (Design Speed)

ความเร็วออกแบบเป็นค่าความเร็วสูงสุด ที่ยังคงปลอดภัยบนช่วงถนนที่มีสภาพตามลักษณะที่ใช้ออกแบบครอบคลุมอยู่ ค่าความเร็วออกแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของภูมิประเทศ ปริมาณการจราจร และการใช้ที่ดิน รวมทั้งงบประมาณในการก่อสร้าง ความเร็วออกแบบเป็นค่าพื้นฐานที่กำหนดโดยผู้ออกแบบเพื่อใช้กำหนดมาตรฐานขั้นต่ำสำหรับการออกแบบแนวเส้นทาง เช่น รัศมีโค้ง ความยาวโค้ง เปอร์เซ็นต์ความลาดชัน ฯลฯ เป็นต้น และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบองค์ประกอบต่าง ๆ ให้มีความสอดคล้อง และสมดุลกัน (AASHTO, 1994)

ความเร็วในการวิ่ง (Running speed)

ความเร็วในการวิ่งเป็นค่าความเร็วที่ได้จากการนำระยะทางหารด้วยเวลาที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ (Running time) ไม่รวมเวลาที่รถหยุด เป็นตัววัดพื้นฐานซึ่งใช้อธิบายการไหลของการจราจรเชิงปริมาณ และคุณภาพของแนวเส้นทาง ใช้ร่วมกับตัววัด ปริมาณจราจรและความหนาแน่น เพื่อแสดงความจุของทางหลวง ใช้ในการวางแผน กำหนดเกณฑ์ในการออกแบบทางเรขาคณิต และประเมินประสิทธิภาพของแนวเส้นทาง (AASHTO, 1994)

ความเร็วที่เป็นไปได้ (Potential speed)

ความเร็วที่เป็นไปได้เป็นความเร็วที่มาจากการคาดการณ์อุปนิสัยในการขับขี่ โดยคำนึงถึงผลกระทบทางเรขาคณิตของถนนที่มีต่อความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ กล่าวคือ คำนึงถึงรัศมีโค้ง ทางราบ ความลาดชัน ที่มีผลกระทบต่อความเร็วในการขับขี่ ในขณะที่ถนนมีปริมาณจราจรน้อย หรือไม่มีผลกระทบระหว่างรถด้วยกัน (Free - flow condition) ความเร็วที่เป็นไปได้นี้ใช้ในการคาดการณ์ความเร็วที่จะเกิดขึ้นบนช่วงถนนที่ออกแบบ และใช้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วในแต่ละส่วนขององค์ประกอบถนนในการตรวจสอบความสอดคล้องของความเร็ว (Consistency) ของแนวเส้นทาง (Leisch, 1977)

ความเร็วในทางปฏิบัติ (Operating speed)

ความเร็วในทางปฏิบัติเป็นความเร็วสูงสุดซึ่งผู้ขับขี่สามารถขับขี่ได้ภายในช่วงหนึ่งบนถนน ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ และภายใต้เงื่อนไขของสภาพการจราจรขณะนั้น ใช้ร่วมกับตัววัดปริมาณจราจร และความหนาแน่น เพื่อแสดงระดับการให้บริการ ความเร็วในทางปฏิบัติจึงมาจากการสำรวจข้อมูลจราจร จากถนนที่ได้เปิดใช้บริการแล้ว โดยใช้เป็นตัวแทนค่า

ความเร็วการจราจร เช่น ความเร็วที่ 50 หรือ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ ในการอธิบายความเร็วที่เกิดขึ้น (AASHTO, 1994)

ความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ (85th - percentile speed, V85)

ความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์คือ ความเร็วของรถยนต์ที่วิ่งในช่วงทางตรง หาได้จากการสำรวจข้อมูลจราจรลำดับที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ ซึ่งตามวิธีการหาความเร็วของประเทศสหพันธรัฐเยอรมัน ได้พัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความโค้งกับความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ เพื่อคาดการณ์ความเร็วของรถยนต์นั่งจากแนวเส้นทางของถนน (Ruediger, Basil และ Theodor, 1999)

2.6.1 การศึกษาและวิจัยในต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความสอดคล้องของการออกแบบ

Leisch (Leisch, 1977 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวข้องกับการประเมินความสอดคล้องในสหรัฐอเมริกา ทำการคำนวณหาความเร็วที่เป็นไปได้จากองค์ประกอบของแนวเส้นทาง โดยใช้เทคนิคการเขียนผังเส้นความเร็ว (Speed profile) มาประเมินความปลอดภัยที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของถนน จากกฎซึ่งเรียกว่า "The 10 mph Rule" เนื่องจาก Leisch มีแนวคิดว่าการใช้เพียงแต่ค่าความเร็วออกแบบเป็นค่าที่ควบคุมการออกแบบ อาจนำไปสู่การออกแบบที่ไม่ปลอดภัย ถึงแม้ว่าค่าความเร็วออกแบบใช้กันมาหลายสิบปีนั้นจะเป็นค่าที่ใช้กำหนดขนาดองค์ประกอบแนวทางราบของถนน แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องในการคำนึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติคือไม่ได้คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วเมื่อเกิดการเปลี่ยนลักษณะแนวเส้นทาง เช่น ในเวลาที่รถวิ่งเข้าสู่ทางโค้งอาจจะต้องมีการลดความเร็วลง เป็นต้น นอกจากนี้พบว่าในบางครั้งค่าความเร็วออกแบบก็อาจจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วในทางปฏิบัติทำให้แนวเส้นทางที่ออกแบบไม่ปลอดภัย จากที่กล่าวมา Leisch จึงให้ข้อคิดเห็นในการจำกัดความและการประยุกต์ใช้ค่าความเร็วที่เป็นไปได้ เพื่อให้มีความปลอดภัยมากขึ้น วัตถุประสงค์เพื่อหาความเร็วที่สอดคล้องกับการคาดการณ์และพฤติกรรมของผู้ขับขี่ โดยได้ตั้งข้อสมมติฐานในการคำนวณหาความเร็วว่า

1) มีปริมาณจราจรน้อย หรือไม่มีผลกระทบระหว่างรถด้วยกัน (Free - flow condition)

2) ถนนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ดี เช่น อากาศแจ่มใส เป็นเวลากลางวัน เป็นต้น

3) ความสัมพันธ์ระหว่าง Design speed และ Average running speed ให้เป็นไปตามตารางที่ 18 ดังนี้

ตารางที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Design speed กับ Average running speed

Design speed (mi/h : km/h)	30 : 50	40 : 65	50 : 80	60 : 95	70 : 110	80 : 125
Average running speed (mi/h : km/h)	28 : 46	36 : 58	44 : 70	52 : 82	58 : 92	64 : 100

ที่มา : AASHTO Geometric Design Policy, 1965 : 169, อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544 : 9

4) ความเร็วเฉลี่ยสูงสุด (Top average speed) ของรถยนต์นั่ง ให้เป็นไปตามตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของรถยนต์นั่ง ตามชนิดของชั้นทาง

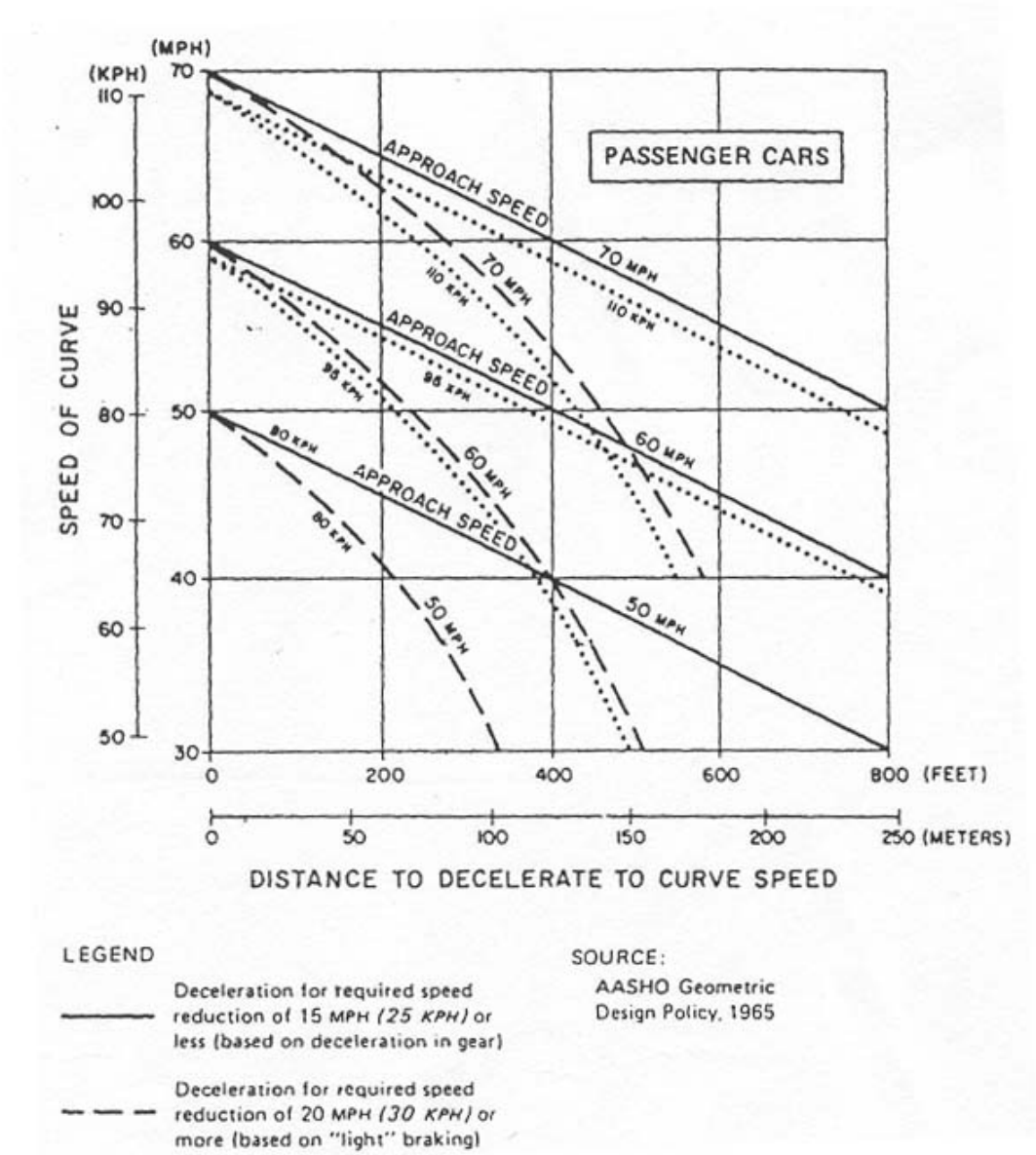
Type of facility	Highway Quality and Condition	
	Favorable (mi/h : km/h)	Moderate (mi/h : km/h)
Rural Highways		
Interstate	65 : 100	60 : 95
Primary - main	60 : 95	55 : 90
Primary - Intermediate	55 : 90	50 : 80
Secondary	50 : 80	45 : 70
Urban Highways		
Interstate	60 : 95	55 : 90
Arterial - main	50 : 80	45 : 70
Arterial - Intermediate	45 : 70	40 : 65
Secondary - Feeder	40 : 65	35 : 65

ที่มา : Leisch, 1977 : 18 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544 : 9

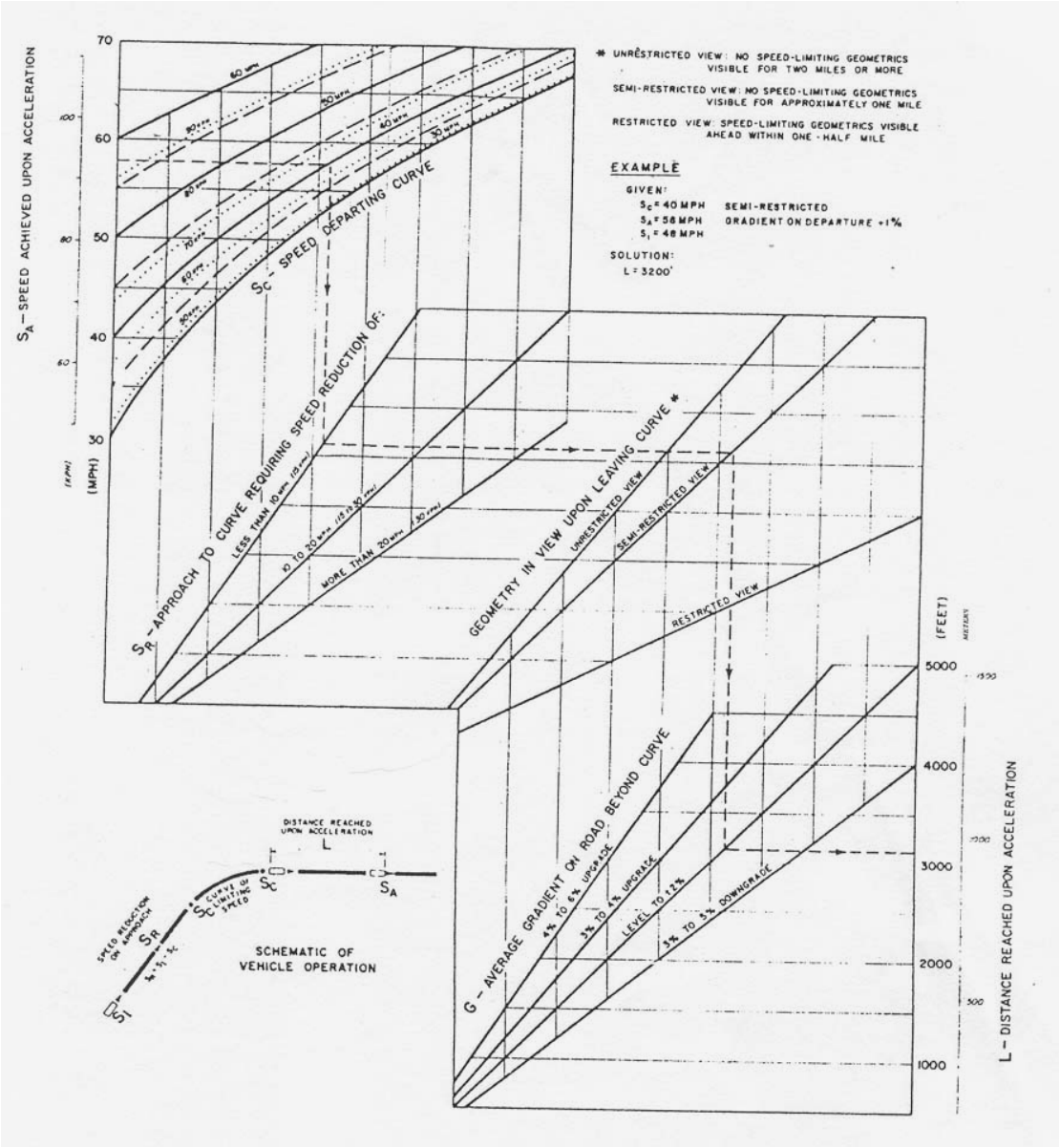
และกำหนดให้ Average running speed และ Top average speed ของรถบรรทุกนั้นต่ำกว่ารถยนต์นั่ง 5 mi/h (8 km/h)

5) กรณีรถบรรทุก จะใช้ค่า Weight - Power ratio เฉลี่ยเท่ากับ 200 lb/hp

6) ค่าความเร่งและความหน่วงของรถยนต์นั่งเป็นไปตามมาตรฐานของ AASHTO 1965 ซึ่งทำให้ได้ระยะทางซึ่งต้องใช้ลดความเร็วและเร่งความเร็วในบริเวณทางโค้งของรถยนต์นั่ง เป็นตามรูปที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ

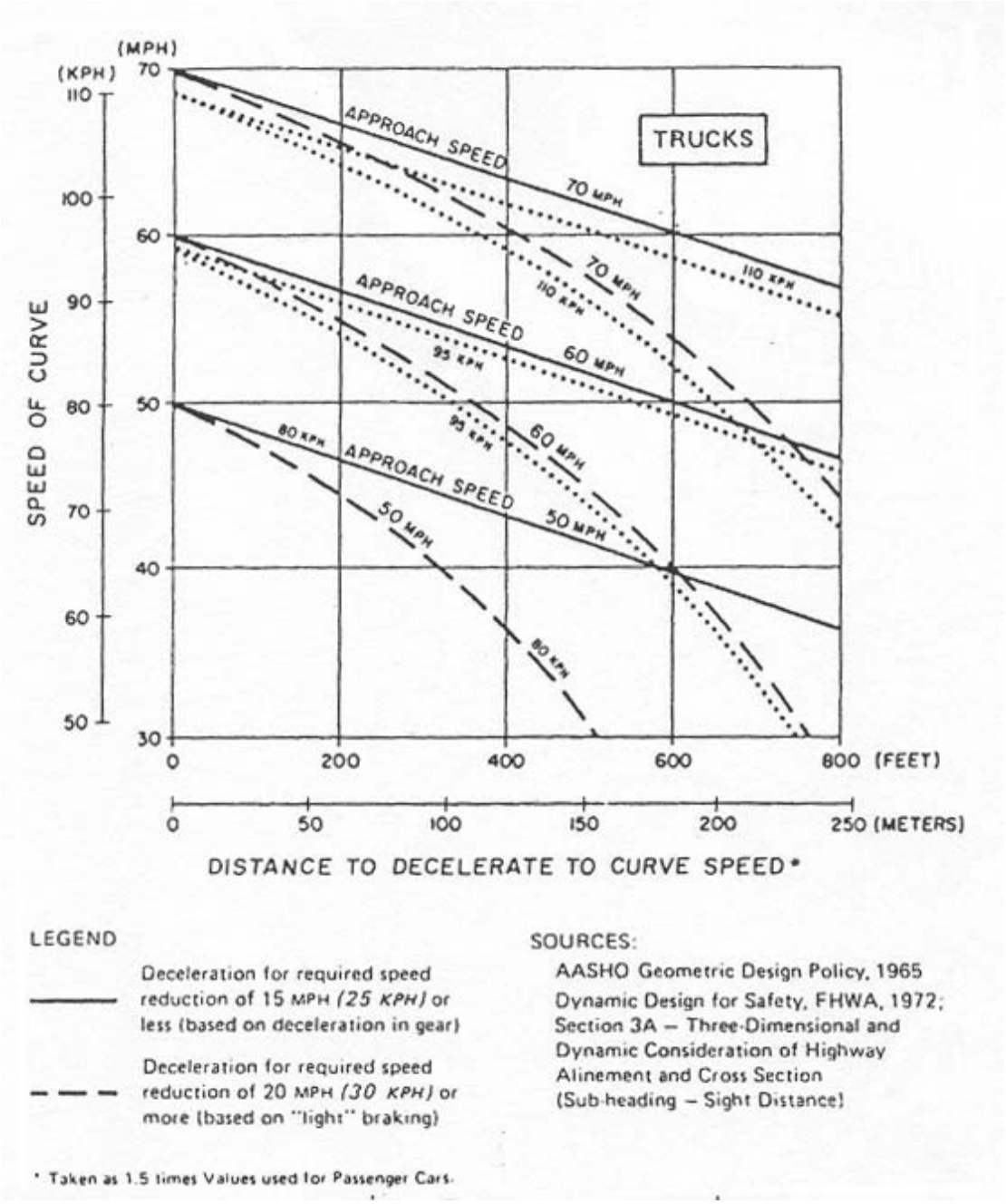


รูปที่ 15 แผนภูมิแสดงระยะทางที่ต้องใช้ลดความเร็วเพื่อเข้าทางโค้งของรถยนต์นั่ง
ที่มา : Leisch, 1977 : 22 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544 : 10

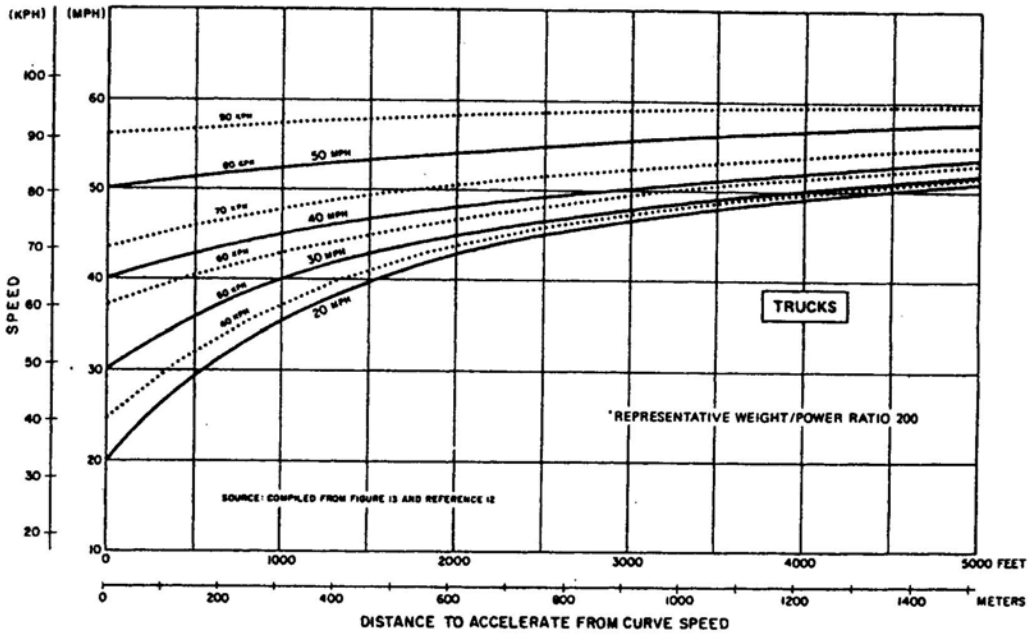


รูปที่ 16 แผนภูมิคำนวณหาระยะทางที่ต้องใช้เร่งความเร่งเมื่อออกจากทางโค้งของรถยนต์นั่ง
ที่มา : Leisch, 1977 : 23 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544 : 11

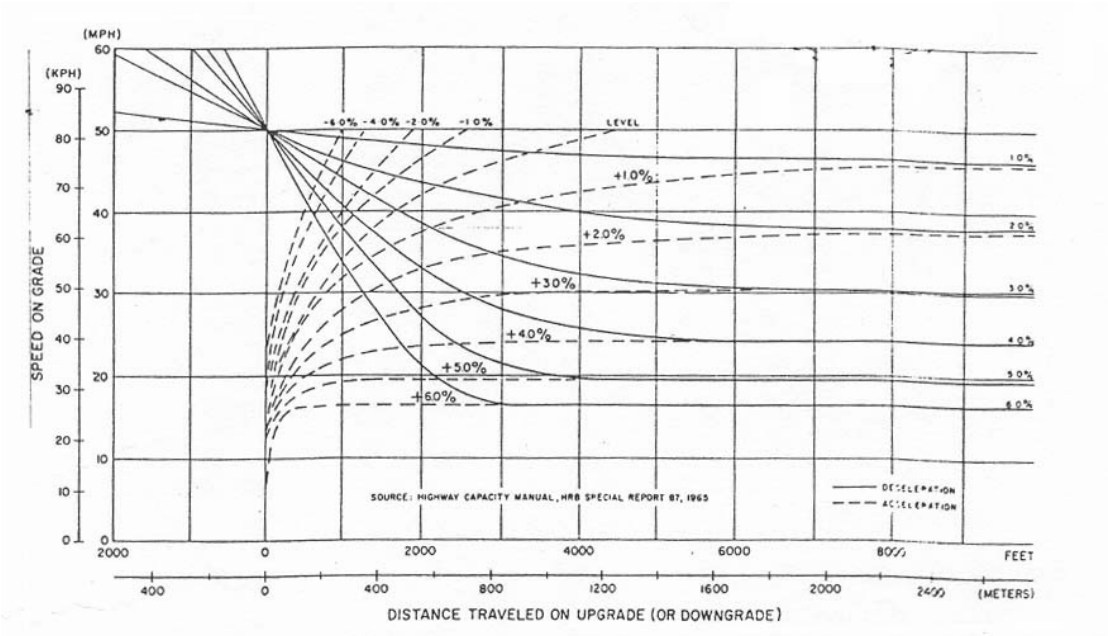
7) ค่าความเร่งและความหน่วงของรถบรรทุกให้เป็นไปตาม Highway Capacity Manual, 1965 และ AASHTO Geometric Design Policy, 1965 และ FHWA Dynamic Design for Safety, 1972 สำหรับระยะทางซึ่งต้องใช้เร่งและลดความเร็วของรถบรรทุกในช่วงที่เป็นพื้นที่ราบ แสดงดังรูปที่ 17 และ 18 ตามลำดับ ส่วนในช่วงที่เป็นพื้นที่ลาดชันแสดงดังรูปที่ 19



รูปที่ 17 แผนภูมิคำนวณระยะทางที่ต้องใช้ลดความเร็วเพื่อเข้าสู่ทางโค้งของรถบรรทุก
ที่มา : Leisch, 1977 : 25 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544 : 12



รูปที่ 18 แผนภูมิแสดงระยะทางที่ต้องใช้เร่งความเร็วเมื่อออกจากทางโค้งของรถบรรทุก
ที่มา : Leisch, 1977 : 26 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544 : 12



รูปที่ 19 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและความเร็วสำหรับรถบรรทุกที่วิ่งบน
ทางลาดชัน ที่มีค่า Weight - Power ratio เฉลี่ยเท่ากับ 200 lb/hp
ที่มา : Leisch, 1977 : 27 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544 : 13

8) ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Design speed และ Average running speed กับรัศมีโค้งเป็นตามตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรัศมีโค้งของถนน

V - Design speed , km/h	50			65			80			95			110		125
Corresponding Average running speed, km/h													92	96	100
										82	86	90	92	92	92
							70	74	78	82	86	90	92		
				58	62	66	70	74	78	82	86				
	46	50	54	58	62	66	70	74	78						
Dc-max. Degree of curve	21.0	17.8	14.4	11.9	10.4	8.9	7.5	6.8	5.9	5.1	4.6	4.0	3.7	3.2	2.7
Rc-min Radius, meter	80	95	120	145	165	195	230	255	290	340	375	425	465	540	650

ที่มา : AASHTO Geometric Design Policy, 1965 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์ 2544 : 13

สำหรับความลาดชันของถนน ที่ต่ำกว่า 6% จะไม่มีผลต่อความเร็วของรถยนต์นั่ง ซึ่งวิธีการคำนวณหาความเร็วของ Leisch จะทำการคำนวณหาความเร็วที่เป็นไปได้ (Potential Speed) โดยมีขั้นตอนในการคำนวณสรุปได้ดังนี้

1) คำนวณหาความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของรถยนต์นั่ง ตามชนิดของชั้นทาง จากตารางที่ 19 ซึ่งจะเป็นความเร็วของรถยนต์ที่วิ่งในช่วงทางตรง

2) ค่าความเร็วเฉลี่ยที่วิ่งในทางโค้งของรถยนต์นั่ง หาได้จากตารางที่ 20

3) ค่าความเร็วสูงสุดและความเร็วเฉลี่ยที่วิ่งในทางโค้งสำหรับรถบรรทุกจะน้อยกว่ารถยนต์นั่ง อยู่ 5 mi/h (8 km/h)

4) หาระยะทางที่ต้องทำการลดความเร็วเพื่อเข้าสู่ทางโค้งและระยะที่ใช้เร่งความเร็วเมื่อออกจากทางโค้ง จากรูปที่ 15 - 18 ตามกรณีและประเภทของรถ ซึ่งเป็นผลกระทบเนื่องจากโค้งในแนวทางราบ

5) เนื่องจากความลาดชันของถนนจะมีผลอย่างมากต่อความเร็วของรถบรรทุก จึงต้องคำนวณหาความเร็วที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเนื่องจากรถบรรทุกวิ่งบนทางลาดชันโดยไม่คำนึงถึงผลของรัศมีความโค้งในแนวทางราบ โดยใช้รูปที่ 19 ทำให้ในส่วนของรถบรรทุกนั้นจะมีเส้นผังความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ อยู่ 2 ค่า คือค่าที่คำนวณจากแนวทางราบและค่าที่คำนวณจากแนวทางดิ่ง โดยจะเลือกค่าความเร็วต่ำสุดเป็นค่าความเร็วที่เป็นไปได้ที่ตำแหน่งนั้น

โดยที่ Leisch ได้ใช้เกณฑ์ประเมินความปลอดภัยที่เรียกว่า "The 10 mph Rule" เป็นเกณฑ์ในการประเมินความเหมาะสมของแนวเส้นทางที่ทำการออกแบบ ดังนี้

1) ความเร็วที่เป็นไปได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ไม่ควรมีค่าแตกต่างจากค่าความเร็วออกแบบเกินกว่า $\pm$ 10 mi/h

2) ความเร็วออกแบบในช่วงถนนที่ต่อเนื่องกัน ไม่ควรแตกต่างกันเกินกว่า $\pm$ 10 mi/h

3) ความเร็วที่เป็นไปได้ของรถบรรทุกที่ตำแหน่งเดียวกันไม่ควรต่ำกว่ารถยนต์นั่งเกินกว่า $\pm$ 10 mi/h

ในช่วงที่ไม่เป็นไปตาม “The 10 mph Rule” จำเป็นต้องมีการออกแบบเสริมความปลอดภัย เช่น การออกแบบให้มีระยะมองเห็นที่ดี การยกโค้ง การใช้ Climbing Lane เป็นต้น

Ruediger,Basil และ Theodor (Ruediger, Basil and Theoder, 1999 อ้างถึงใน ธำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544) เป็นชาวเยอรมันที่ได้ทำการศึกษารวบรวมแนวคิดและวิธีการออกแบบถนนในประเทศเยอรมัน ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าความเร็วที่เป็นไปได้ที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ หรือความเร็ว V85

ในประเทศเยอรมันจะใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความโค้ง (Curvature Change Rate, CCR) เป็นพารามิเตอร์ในการคำนวณหาความเร็ว V85 ข้อดีของการใช้พารามิเตอร์ CCR นี้คือ การสามารถแปลงองค์ประกอบในแนวทางราบทุกประเภทไม่ว่าจะเป็น ทางตรง โค้งกลม โค้งสไปรอล โค้งกลับ และโค้งประกอบ ให้เป็นค่า CCR เพื่อนำไปคำนวณหาความเร็ว V85 ได้จากแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่า CCR กับความเร็ว V85 ของประเทศต่าง ๆ โดยที่

CCR คือ ค่าสัมบูรณ์รวมของมุมที่เปลี่ยนแปลงในแนวราบหารด้วยระยะทางในแนวราบภายในช่วงนั้น

$$CCR_S = \frac{\left(\frac{L_{C11}}{2R} + \frac{L_{Cr}}{R} + \frac{L_{C12}}{2R}\right)63{,}700}{L} \qquad (15)$$

เมื่อ CCR_S = อัตราการเปลี่ยนแปลงความโค้งของโค้งกลมกับโค้งสไปรอล (Full Spiral Curve), gon/km

R = รัศมีของโค้งกลม, m

L = ความยาวทั้งหมดของโค้ง $\left(L_{C11} + L_{Cr} + L_{C12}\right)$, m

L_{Cr} = ความยาวของโค้งกลม, m

L_{C11}, L_{C12} = ความยาวของโค้งสไปรอล, m

$63{,}700 = \frac{200}{\pi} \times 10^3$ เป็นค่าที่ใช้แปลงหน่วยจาก Rad/m เป็น gon/km

หมายเหตุ ในช่วงที่เป็นทางตรงนั้นจะกำหนดค่า CCR เท่ากับ 0

โดยแบบจำลองถดถอยพหุคูณระหว่าง CCR กับความเร็ว V85 ของทางหลวงนอกเมือง 2 ช่องจราจรของประเทศต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว V85 กับ CCR ของประเทศต่าง ๆ

Countries	Regression Models	Remark
Germany	$V85 = \frac{10^6}{8{,}270 + 8.01 CCR_S}$	R^2 = 0.73 where speed limit = 100 km/h
United States	$V85 = 103.04 - 0.53 CCR_S$	R^2 = 0.80 where speed limit = 90 km/h
Australia	$V85 = 101.2 - 0.043 CCR_S$	R^2 = 0.87 where speed limit = 90 km/h
Greece	$V85 = \frac{10^6}{10150.1 + 8.529 CCR_S}$	R^2 = 0.81 where speed limit = 90 km/h
Lebanon	$V85 = 91.03 - 0.056 CCR_S$	R^2 = 0.81 where speed limit = 80 km/h
Canada	$V85 = e^{(4.561 - 5.27 \times 10^{-4} CCR_S)}$	R^2 = 0.63 where speed limit = 90 km/h

ที่มา : Ruediger, Basil and Theodor, 1999 : 8.31 อ้างถึงใน ชำรงลักษณ์ จงกมลวิวัฒน์, 2544 : 15

ในส่วนของระยะทางที่ต้องใช้ในการลดความเร็วเมื่อรถทำการเข้าโค้งและเพิ่มความเร็วเมื่อรถวิ่งออกจากโค้งนั้นจะใช้สมการที่ 16

$$TL = \frac{V85_1^2 - V85_2^2}{2 \times 3.6^2 a} \qquad (16)$$

เมื่อ

$TL =$ ระยะทางที่ใช้ในการเร่ง/ลดความเร็วระหว่างองค์ประกอบที่ 1 ไปยัง 2, m

$V85_1 =$ ความเร็ว V85 ขององค์ประกอบที่ 1 , m

$V85_2 =$ ความเร็ว V85 ขององค์ประกอบที่ 2 , m

$a =$ อัตราเร่งหรือความหน่วง โดยทั่วไปใช้ค่าเท่ากับ 0.8 m/s^2

ส่วนเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินความปลอดภัยได้แบ่งเกณฑ์ออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

Criteria I ความสอดคล้องในการออกแบบ (Design Consistency)

Criteria II ความสอดคล้องของความเร็ว (Speed Consistency)

Criteria III ความสอดคล้องของจลศาสตร์ในการขับขี่ (Driving Dynamic Consistency)

ตารางที่ 22 พารามิเตอร์และเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมิน (Quantitative Ranges for Safety Criteria I to III for Good, Fair, and Poor Design Levels.)

Safety criterion/ CCR_S class	Good $(\leq 180\ gon/km)$	Fair $(>180\ gon/km \leq 360\ gon/km)$	Poor $(>360\ gon/km)$
I^{α}	$\lvert V85_i - V_d \rvert \leq 10\ km/h$	$10\ km/h < \lvert V85_i - V_d \rvert \leq 20\ km/h$	$\lvert V85_i - V_d \rvert > 20\ km/h$
II^{β}	$\lvert V85_i - V85_{i+1} \rvert \leq 10 km/h$	$10\ km/h < \lvert V85_i - V85_{i+1} \rvert \leq 20\ km/h$	$\lvert V85_i - V85_{i+1} \rvert > 20\ km/h$
III^{γ}	$f_{RA} - f_{RD} \geq +0.01$	$-0.04 \leq f_{RA} - f_{RD} < +0.01$	$f_{RA} - f_{RD} < -0.04$

α = Related to the individual design elements, i (independent tangent or curve), in the course of the observed roadway section.

β = Related to two successive design elements, i and $i+1$ (independent tangent to curve or curve to curve).

γ = Related to one individual curved roadway section.

Note :

CCR_S = curvature change rate of the single curve, gon/km [Eq. (8.6)]

V_d = design speed, km/h, from network functions for road categories A I to A IV for new designs (Table 6.2) ; for redesigns or existing alignments, see Sec. 9.2.2.1

$V85_i$ = expected 85th-percentile speed of design element i , km/h

$V85_{i+1}$ = expected 85th-percentile speed of design element $i+1$, km/h (according to Fig. 8.12 or Table 8.5) with respect to the design parameter curvature change rate of the single curve.

f_T = tangential friction factor for modern highway geometric design:

f_T = $0.59 - 4.85 \times 10^{-3} V_d + 1.5i \times 10^{-5} V_d^2$

f_{RA}