

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้ทำการศึกษาทบทวนทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาแบบจำลองความเร็ว จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีรายงานการวิจัยใดในประเทศที่ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองความเร็วขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทาง มีเพียงแต่งานศึกษาที่พยายามนำแบบจำลองในต่างประเทศมาใช้ ซึ่งการนำแบบจำลองต่างประเทศมาใช้ยังคงมีความเสี่ยงต่อความปลอดภัย ในต่างประเทศได้มีการศึกษาพัฒนาแบบจำลองความเร็วขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 (Lamm, 1999) นับเป็นเวลาร่วม 30 ปีแล้ว และยังคงมีการพัฒนาต่อไปเพื่อทำนายความเร็วขึ้นให้ได้เสมือนจริงมากที่สุด โดยแบบจำลองของแต่ละประเทศก็แตกต่างกันออกไป ในบทนี้จึงได้รวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีเนื้อหาประกอบไปด้วย นิยามความสอดคล้องของทางหลวง ความสำคัญของความสอดคล้องของแนวเส้นทาง การตรวจสอบความสอดคล้องของแนวเส้นทาง การตรวจสอบความสอดคล้องโดยใช้ความเร็ว เณฑ์การประเมินความสอดคล้องของถนนตามแนวคิดในประเทศเยอรมัน ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับความเร็วขึ้นแบบจำลองความเร็ว-ทฤษฎี ทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา และตัวอย่างมาตรการในการลดความเร็ว

2.1 นิยามความสอดคล้อง (Consistency) ของทางหลวง

การออกแบบที่สอดคล้องหมายถึง การออกแบบที่ทำให้ได้ลักษณะทางเรขาคณิตของทางที่สอดคล้องกับความคาดหวังของคนขับรถ (FHWA, 2000) โดยทั่วไปแล้วคนขับจะทำผิดพลาดน้อยเมื่อลักษณะเรขาคณิตของทางสอดคล้องกับความคาดหวังของผู้ขับ แต่เมื่อใดก็ตามที่ผู้ขับไม่สามารถคาดหวังถึงความเป็นไปได้ของเส้นทาง เส้นทางก็จะเกิดความไม่สอดคล้องกัน



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการออกแบบที่ไม่สอดคล้องกับความคาดหวัง

ที่มา: Alternative Design Consistency Rating Methods for Two-Lane Rural Highways, FHWA (2000)

เช่น ในรูปที่ 2.1 ผู้ขับขี่ ขับรถด้วยความเร็วขับซี่ที่สม่ำเสมอ โดยที่ผู้ขับขี่อาจทราบหรือไม่ทราบว่าทางข้างหน้ามีการลดช่องจราจรลงจาก 4 ช่องจราจร เป็น 2 ช่องจราจร (Lane Drop) แต่เมื่อถึงจุด Lane Drop ผู้ขับขี่ต้องลดความเร็วลงเพื่อให้รถสามารถขับผ่านช่องทางดังกล่าวไปได้ และเมื่อผู้ขับขี่เข้าสู่ช่องจราจร 2 ช่องจราจรไปได้ไม่ไกล ผู้ขับขี่ก็พบเนินที่ทำให้ความเร็วขับซี่ไม่สามารถเร่งให้มีความเร็วตามที่คาดหวังได้ อีกทั้งเส้นทางข้างหน้าถัดออกไปยังเป็นทางร่วมทางแยกที่ผู้ขับขี่อาจต้องชะลอความเร็ว หรือหยุดรถ ซึ่งทั้งที่เส้นทางก่อนเข้าสู่ Lane Drop นั้นถูกสนับสนุนให้ใช้ความเร็วสูงมาก่อน ลักษณะเส้นทางดังกล่าวจึงแสดงให้เห็นถึงความไม่เหมาะสมถึงการคาดหวังต่อการขับซี่ ซึ่งนำไปสู่ความไม่สอดคล้องกันของทางหลวง จากคำอธิบายดังกล่าวเกี่ยวข้องกับโดยตรงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบทางหลวง ที่มีผลกับการลดความเร็วขับซี่

การออกแบบส่วนประกอบของทางหลวง (Design of Highway Elements) เป็นการออกแบบทางหลวงให้มีรายละเอียดเป็นไปตามประเภทหน้าที่ของทางหลวงโดยยึดหลักความปลอดภัยและประสิทธิภาพต่อการใช้งาน ซึ่งทั่วไปแล้วทางหลวงหรือถนนมีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ ระยะการมองเห็น การยกขอบทางบริเวณทางโค้ง ความกว้างของช่องจราจร ความลาดชัน แนวโค้งราบ แนวโค้งดิ่ง รวมไปถึงอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับส่วนประกอบทางเรขาคณิต (AASHTO, 2004) ในส่วนประกอบเรขาคณิตเมื่อพิจารณาแนวเส้นทาง พบว่าแนวเส้นทางที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วนั้นมีอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนประกอบเดี่ยว (Single Element) และส่วนประกอบต่อเนื่องกัน (Successive Elements)

ส่วนประกอบเดี่ยว (Single Element) คือ ส่วนหนึ่งส่วนใดของส่วนประกอบทางหลวงเช่น ส่วนประกอบทางหลวงช่วงทางตรง (Tangent) หรือช่วงทางโค้ง (Curves) ของถนน

ส่วนประกอบต่อเนื่องกัน (Successive Elements) คือส่วนประกอบทางหลวงที่มีความต่อเนื่องกัน เช่นช่วงทางตรงเปลี่ยนสู่ทางโค้ง หรือช่วงทางโค้งเปลี่ยนสู่ทางโค้ง

2.2 ความสำคัญของความสอดคล้อง (Consistency) ทางเรขาคณิตของทางหลวง

ความสำคัญของความสอดคล้องทางเรขาคณิตของทางหลวง เส้นทางต้องมีลักษณะเรขาคณิตเป็นไปตามความคาดหวังของผู้ขับขี่ หรือให้ผู้ขับขี่สามารถควบคุมยานพาหนะไปตามแนวเส้นทางได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นในการออกแบบเส้นทางให้สอดคล้องกัน ผู้ออกแบบต้องอาศัยความเข้าใจถึงพฤติกรรมหรืออุปนิสัยการขับขี่ ประกอบกับลักษณะทางภูมิประเทศ เพื่อให้พฤติกรรมการขับขี่สามารถใช้ความเร็วได้อย่างสอดคล้องกับเส้นทาง “พฤติกรรม” มีคำจำกัดความ หมายถึง กิจกรรมหรือการกระทำต่างๆ ทุกประเภทที่มนุษย์กระทำ ไม่ว่าสิ่งนั้นจะสังเกตได้ หรือไม่ได้ (วัชรศักดิ์, 2549) ถ้าเส้นทางมีความสอดคล้องกันดีแล้ว ก็ส่งผลให้การขับขี่บนทางหลวงเกิดความปลอดภัย มีประสิทธิภาพในการจราจร ลดค่าใช้จ่ายทางด้านเศรษฐกิจ และลดการทำลายสิ่งแวดล้อม

ความปลอดภัย ความสอดคล้องของเส้นทางที่เหมาะสมกับพฤติกรรมการขับขี่ หรืออุปนิสัยของผู้ใช้ทาง ทำให้ผู้ขับขี่คาดการณ์ และใช้ความเร็วที่ถูกต้องได้

มีประสิทธิภาพการจราจร ความสอดคล้องของเส้นทางก่อให้เกิด การขับขี่ที่มีความคล่องตัว ผู้ขับขี่รู้สึกถึงความสะดวกสบายต่อการใช้เส้นทาง และประหยัดเวลาในการเดินทาง

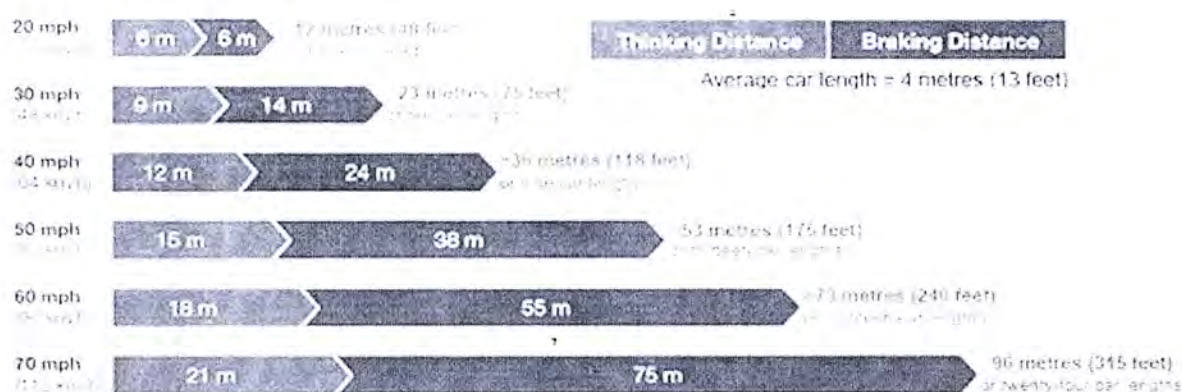
ลดค่าใช้จ่ายทางด้านเศรษฐกิจ ความสอดคล้องของเส้นทางทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการเดินทาง อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย ในการพิจารณาโครงการ มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจอันเกิดเนื่องมาจากอุบัติเหตุ

ลดการทำลายสิ่งแวดล้อม ของเส้นทางที่มีความสอดคล้อง ลดการทำลายระบบนิเวศน์ และสิ่งแวดล้อม เช่น การก่อสร้างหรือปรับปรุงทางหลวง อาจไม่จำเป็นต้องปรับแก้ไขแนวเส้นทาง หรือขยายช่องจราจรเพื่อรองรับความเร็วขับขี่ แต่ใช้มาตรการด้านความปลอดภัยทำให้ความเร็วขับขี่สม่ำเสมอตลอดช่วงการเดินทาง ด้วยความเร็วที่เหมาะสม

เส้นทางที่ไม่สอดคล้องเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางทางเรขาคณิตอย่างทันทีทันใด หรือกะทันหัน ผลเสียดังกล่าวเป็นเหตุให้ผู้ขับขี่ไม่สามารถคาดหวังถึงการเปลี่ยนแปลง หรือชะลอความเร็วได้อย่างเหมาะสมกับเส้นทาง การใช้ความเร็วที่ลักษณะทางเรขาคณิตไม่รองรับความเร็วจะเป็นผลให้ระยะในการชะลอหรือเบรกไม่เพียงพอ (รูปที่

2.2) ความเร็วที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้นั้น ส่งผลต่อระดับความรุนแรงในการเข้าปะทะเมื่อเกิดอุบัติเหตุ ทำให้เกิดความเสียหายมาก เช่น ลักษณะเส้นทางที่มีบางช่วงส่งเสริมให้ใช้ความเร็ว และบางช่วงไม่ส่งเสริมให้ใช้ความเร็ว ลักษณะเช่นนี้ส่งผลต่อพฤติกรรมของผู้ขับขี่ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วผู้ขับขี่จะเร่งความเร็วตามลักษณะเส้นทางที่ทำให้รู้สึกถึงความสะดวกต่อการใช้ความเร็ว และเมื่อลักษณะเส้นทางเปลี่ยนทิศทาง ผู้ขับขี่จะคาดหวังต่อเส้นทางในเบื้องหน้าว่าสามารถรักษาระดับความเร็วให้ใกล้เคียงกับความเร็วที่มีอยู่ได้ แต่ถ้าลักษณะเส้นทางไม่ได้รองรับถึงความเร็วที่ผู้ขับขี่ใช้ก็จะทำให้ไม่สามารถลดความเร็วลงได้ส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุ ความไม่สอดคล้องของส่วนประกอบทางหลวงไม่ว่าจะเป็น ความกว้างของช่องจราจร รัศมีโค้ง ความยาวโค้ง ความชัน ระยะการมองเห็น ความเร็วออกแบบ เป็นส่วนประกอบมีผลต่ออัตราการเกิดอุบัติเหตุ และค่าใช้จ่ายในการเกิดอุบัติเหตุ (Lamm, 1999)

Typical Stopping Distances



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและระยะทางหยุดรถอย่างปลอดภัย (Directgov, 2008)

หมายเหตุ (ทุกๆ ความเร็วที่ลดลง 1 กม./ชม. จะลดอุบัติเหตุได้ 2-3%)

- 1) ระยะทางในการหยุดรถขึ้นอยู่กับสภาพเบรค ยาง และพื้นผิวถนนด้วย
- 2) ที่ความเร็ว 64 กม./ชม.

- บนผิวทางแห้ง ใช้ระยะทางในการหยุดรถ 36 เมตร
- บนผิวทางเปียก ใช้ระยะทางในการหยุดรถ 46 เมตร

- 3) ระยะทางในการหยุดรถ

- ความเร็ว 70 กม./ชม. บนผิวทางแห้ง = ความเร็ว 60 กม./ชม. บนผิวทางเปียก

ที่มา: <http://www.tarc.ait.ac.th/th/speed2.php>

2.3 การตรวจสอบความสอดคล้องของแนวเส้นทาง

การตรวจสอบความสอดคล้องของแนวเส้นทางหลวง 2 ช่องจราจรมีทั้งการตรวจสอบจากการใช้ความเร็ว (Speed-based) และไม่ใช่ความเร็ว (Non-Speed based) โดยแยกวิธีการสำหรับตรวจสอบความสอดคล้องแยกเป็น 3 วิธีการหลักด้วยกัน (G.M. Gibreel et al., 1999) คือ การตรวจสอบจากความเร็ว การตรวจสอบจากความปลอดภัย และการตรวจสอบจากพฤติกรรมการขับขี่

การตรวจสอบจากความเร็ว เป็นการตรวจสอบที่ได้จากผลต่างของความเร็วขับขี่ (Operating Speed) เทียบกับความเร็วออกแบบ (Design Speed) ในส่วนประกอบของทางหลวง ซึ่งส่วนประกอบของทางหลวงถูกประเมินความสอดคล้องกันด้วยผลต่างความเร็ว ตามส่วนประกอบทางหลวงที่แตกต่างกันออกไป

การตรวจสอบจากความปลอดภัย โดยปกติแล้วอุบัติเหตุการจราจรเป็นตัวชี้วัดความปลอดภัยของทางหลวง ซึ่งถ้าทางหลวงได้รับการควบคุมการจราจร และควบคุมพฤติกรรมการขับขี่ให้มีประสิทธิภาพก็ก่อให้เกิดความปลอดภัยบนท้องถนน จากรายงานการศึกษาที่ผ่านมา การตรวจสอบความปลอดภัยที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระบบทางเรขาคณิตของทางหลวง และส่วนประกอบของการจราจร รวมไปถึงสมรรถนะของยานพาหนะ ตรวจสอบได้จากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างกับการออกแบบการยกขอบทางโค้ง (G.M. Gibreel et al., 1999) การปรับปรุงทางหลวงโดยใช้ต้นทุนต่ำโดยไม่คำนึงถึงการขยายตัวของปริมาณการจราจรบนทางหลวงในอนาคต มีผลก่อให้เกิดอุบัติเหตุ

การตรวจสอบจากพฤติกรรมการขับขี่ ตรวจสอบได้จากภาระงาน (Workload) ของการขับขี่ ความคาดหวังของการขับขี่ (Driver Anticipation) และด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องส่งผลต่ออุปนิสัยการขับขี่ เช่นภูมิทัศน์ของทางหลวง และการออกแบบช่องทางเปลี่ยนทิศทางการเดินทางที่ไม่เหมาะสมทำให้ผู้ขับขี่ไม่สามารถรับรู้ได้ทันต่อการตัดสินใจในการควบคุมพวงมาลัย เป็นต้น

ข้อเสนอแนะทั้ง 3 วิธี เป็นการตรวจสอบความสอดคล้องในการออกแบบทางหลวง หรือในการปรับปรุงแนวเส้นทางใหม่ สามารถใช้วิธีการตรวจสอบร่วมกันได้ เพื่อเพิ่มระดับความมั่นใจถึงความปลอดภัย (FHWA, 2000:NO.99-172)

2.4 การตรวจสอบความสอดคล้องของทางหลวงโดยใช้ความเร็ว

ความเร็วเป็นแฟกเตอร์ที่มีความสำคัญ โดยปกติแล้วใช้ในการพิจารณาทางเลือกรูปแบบของการขนส่ง ทางหลวงที่มีประสิทธิภาพและสามารถให้การขนส่งเดินทางเป็นไปอย่างรวดเร็วจะมีความสำคัญกับเวลา ความสะดวก และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ความเร็วในการเดินทางกับเวลาอาจวัดเป็นความเร็วเฉลี่ย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ความเร็วเฉลี่ยเชิงเวลา (Time Mean Speed, TMS, $\bar{U}$) เป็นความเร็วที่ได้จากผลรวมความเร็วของยานพาหนะต่อจำนวนยานพาหนะทั้งหมดที่ทำการสำรวจ และความเร็วเฉลี่ยเชิงช่วง (Space Mean Speed, SMS, $\bar{U}_s$) ได้จากระยะทางในช่วงของการศึกษาต่อระยะเวลาเฉลี่ยของยานพาหนะทั้งหมด

พื้นฐานการตรวจสอบความสอดคล้องของความเร็วเริ่มขึ้นในแทบยูโรป (G.M. Gibreel et al., 1999) โดยการวัดจากผลต่างของความเร็วจับคู่กับความเร็วออกแบบ สำหรับส่วนประกอบเดี่ยว (Single Element) และผลต่างความเร็วจับคู่ระหว่างส่วนประกอบสำหรับส่วนประกอบต่อเนื่อง (Successive Element)

วิธีการใช้ความเร็วออกแบบใน AASHTO โดยปกติวิธีการออกแบบให้สอดคล้องใน U.S. ใช้ความเร็วออกแบบ สำหรับออกแบบทางหลวง วิธีการนี้ถูกใช้มาตั้งแต่ปี 1930 โดย Barnett ใช้ความเร็วคงที่สูงสุดจากกลุ่มผู้ใช้นาพาหนะในพื้นที่เมือง จากวิธีการนี้ AASHTO (1940) จึงได้รวบรวมข้อมูลความเร็วดังกล่าว และนำมาใช้ออกแบบถนนใน U.S. ถึงปัจจุบัน ซึ่งหลักการเลือกใช้ความเร็วออกแบบ เลือกใช้ตามลักษณะภูมิประเทศ ความกว้างของช่องจราจรที่ต้องการใช้ และประเภทหน้าที่ของทางหลวง ความเร็วออกแบบที่เลือกต้องสอดคล้องกับเร็วที่คาดว่าผู้ขับขี่ใช้จริง นอกเหนือจากนี้การเลือกความเร็วออกแบบอาจเลือกจากค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของความเร็วที่มีค่าสูงตามชนิดของทางหลวง การเลือกใช้ความเร็วออกแบบ ในแนวเส้นทางโค้งอาจใช้ความเร็วที่มากกว่าหรือเท่ากับความเร็วออกแบบในช่วงถนนได้ แต่ต้องมีหลักในการเลือกเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ความเร็วดังกล่าวยังมีปัญหาในการนำความเร็วออกแบบมาใช้ไม่ตรงตามความต้องการของผู้ขับขี่ หรือความเร็วออกแบบที่เลือกมีค่าต่ำกว่าความเร็วที่ต้องการ มาใช้ในการออกแบบโค้ง และระยะการมองเห็น ถึงอย่างไร AASHTO ยังมีข้อเสนอแนะให้เลือกใช้ความเร็วออกแบบที่มีค่าสูงไว้ เพื่อรองรับการเติบโตทางเศรษฐกิจ (FHWA, 2000:NO.99-171)

ในสวีเดนและแลนด์ มีการตรวจสอบความสอดคล้องในการออกแบบ จากผลต่างของความเร็วที่เกิดขึ้นในเรขาคณิตของทางหลวงที่ต่อเนื่องกัน จาก Speed profile เพื่อใช้ประมาณ

ความเร็วขั้วขึ้น ในทางโค้งราบ ความเร็วสูงสุดในทางตรง และอัตราการเร่งเข้าโค้ง หรืออยู่ในโค้ง การใช้ความเร็วขั้วขึ้นเป็นความเร็วที่ได้จาก Speed profile แสดงเป็นความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นไทล์ และ Speed profile ก็พิจารณาที่โค้งราบเท่านั้น เนื่องจากรายงานการศึกษาของ สวิตเซอร์แลนด์ ความชันที่มากกว่า 7 % ไม่มีผลกับความเร็วขั้วขึ้นของรถนั่งส่วนบุคคล เงื่อนไขการใช้ Speed profile ตามการพิจารณาในโค้งราบมี 3 เงื่อนไขดังนี้ 1) ผลต่างของความเร็วที่ได้จากการทำนาย เกิดขึ้นระหว่างทางโค้ง และทางตรง หรือ ในโค้งที่มีรัศมีกว้างมากๆ คือ 5 km/h. 2) ผลต่างของความเร็วในส่วนประกอบทางหลวงที่ต่อเนื่องกัน คือ 10 km/h และไม่ควรเกิน 20 km/h และ 3) ระยะการมองเห็นที่มีไม่น้อยกว่า ความยาวของเส้นทางที่ต้องการเปลี่ยนความเร็ว ที่อัตราเร่ง 0.80 m/s^2 ของโค้งที่ต่อเนื่องกัน (FHWA, 2000:NO. 99-171)

ในเยอรมัน ใช้ความเร็วออกแบบหา รัศมีต่ำสุดของโค้งราบ หาอัตราการยกโค้งสูงสุด และหาแนวโค้งคัง จากนั้นทำนายความเร็วขั้วขึ้นด้วยค่า Curvature Chang Rate (CCR) เพื่อหาความสอดคล้องของส่วนประกอบทางหลวงที่ได้จากความเร็วออกแบบ ซึ่งผลต่างของความเร็วออกแบบกับความเร็วขั้วขึ้นไม่ควรมีค่าเกินกว่า 20 km/h ซึ่งถ้าเกินก็ควรลดความเร็วออกแบบของแนวเส้นทางที่อยู่บริเวณรอบๆ ให้ลดลงด้วย (G.M. Gibreel et al., 1999)

ในฝรั่งเศส วิธีการวัดความสอดคล้องมีลักษณะคล้ายกับในเยอรมัน ยกเว้น ความเร็วขั้วขึ้นหาได้จากแต่ละจุดของแนวเส้นทาง นอกจากนั้นแล้วจะใช้ความเร็วขั้วขึ้นในการตรวจสอบระยะการมองเห็นด้วย (G.M. Gibreel et al., 1999)

ในออสเตรเลีย มีหลักการในการออกแบบความสอดคล้อง ที่ได้จากงานวิจัยของ McLean. เขาได้ศึกษาลักษณะทางโค้งราบ 120 โค้งที่ออกแบบโดยใช้ความเร็วออกแบบต่ำกว่า 100 km/h และลักษณะโค้งที่ศึกษานั้นต้องมีแนวโน้มต่อการใช้ความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นไทล์ สูงกว่าความเร็วออกแบบ แต่ผลการศึกษานี้ก็กลับได้ผลการศึกษาที่ตรงกันข้ามกับสมมุติฐานในเบื้องต้นคือความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นไทล์ ต่ำกว่าความเร็วออกแบบ เมื่อการออกแบบใช้ความเร็วออกแบบที่สูงกว่า 100 km/h จากรายงานการศึกษานี้ ออสเตรเลียจึงเปลี่ยนมาใช้ความเร็วออกแบบที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 km/h และให้ความสำคัญกับความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นไทล์ ซึ่งถูกนำมาใช้ในการประมาณรัศมีของโค้ง และเป็นความเร็วที่ต้องการ ความเร็วที่ต้องการ (Desired Speed) คือความเร็วซึ่งผู้ขับขี่เลือกใช้ในการเดินทางภายใต้เงื่อนไข Free-Flow และลักษณะของแนวเส้นทางไม่ได้มีข้อจำกัดกับความเร็ว ดังนั้นในมาตรฐานการออกแบบของออสเตรเลียจึงเลือกใช้ ความเร็วที่ต้องการเพื่อหารัศมีโค้ง (FHWA, 2000:NO.99-171)



การออกแบบแนวเส้นทางโดยใช้ความเร็วออกแบบ ไม่ใช่เป็นการยืนยันได้ว่าแนวเส้นทางมีความสอดคล้องกัน (Leisch and Leisch, 1970) จากงานวิจัยพบว่าปัญหาหลักของการออกแบบแนวเส้นทางนั้นมีอยู่ 2 ปัญหาด้วยกันคือ 1) ปัญหาของตัวแปรพื้นฐานในความเร็วขับขี่เมื่อได้ใช้ความเร็วออกแบบต่ำกว่า 90 km/h 2) ปัญหาผลต่างของความเร็วระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลกับรถบรรทุก การแก้ไขปัญหาดังกล่าว Leisch and Leisch ได้ปรับปรุงการให้ความหมายของความเร็วออกแบบ โดยให้ความเร็วขับขี่เป็นตัวแทนในการออกแบบลักษณะทางเรขาคณิตของทางหลวง และใช้กฎเกณฑ์การออกแบบที่เรียกว่า “15-km/h rule” มีกฎเกณฑ์การปฏิบัติ 3 กฎเกณฑ์ดังนี้ 1) ควรหลีกเลี่ยงการลดความเร็วออกแบบ ถ้ามีความจำเป็นก็ไม่ควรเกิน 15 km/h 2) ความเร็วของรถยนต์ส่วนบุคคลที่เกิดขึ้นในแนวเส้นทาง ไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากกว่า 15 km/h 3) ความเร็วของรถบรรทุกที่เกิดขึ้นไม่ควรมีค่าต่างกับความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ส่วนบุคคลเกินกว่า 15 km/h วิธีการปรับปรุงความเร็วออกแบบเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของทางหลวง (FHWA, 2000:NO.99-171)

ในสหรัฐอเมริกา (U.S.) หลังจากที่ได้มีงานศึกษาความปลอดภัยจากการเลือกใช้ความเร็วออกแบบกับความเร็วขับขี่ จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองความเร็วขับขี่และนำมาใช้ในการออกแบบแนวเส้นทาง ซึ่งขั้นตอนแรกความเร็วออกแบบของเส้นทางหาได้จากความเร็วออกแบบอนุมาน (Infer Design Speed) และความเร็วขับขี่หาจากแบบจำลองทางสถิติ จากนั้นทำการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วออกแบบกับความเร็วขับขี่ และทำการปรับแก้ไขแนวเส้นทางส่วนประกอบต่างๆของทางหลวงตามความจำเป็น หรือเปลี่ยนความเร็วออกแบบให้มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วขับขี่ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าแนวเส้นทางที่ออกแบบมีความสอดคล้องกับความเร็วขับขี่ สำหรับทางหลวงพิเศษผลต่างของความเร็วขับขี่และความเร็วออกแบบไม่ควรเกิน 15 km/h ในการออกแบบเส้นทางให้สอดคล้องกันยังพบอีกว่าเมื่อได้มีการควบคุมเส้นทางให้มีการขับขี่ที่เป็นไปตามความคาดหวังทำให้เกิดความสอดคล้องที่ดีของทางหลวง ยิ่งไปกว่านั้นผลต่างของความเร็วขับขี่ระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคล กับรถบรรทุกไม่ควรเกิน 15 km/h ด้วยเช่นกัน (G.M. Gibreel et al., 1999)

Lamm et al. จากงานศึกษาดังแต่ปี 1980-1999 ได้พยายามสร้างแบบจำลองความเร็วในประเทศต่างๆแถบยุโรป ในรูปของสมการถดถอยพหุคูณระหว่างตัวแปร CCR (Curvature Change Rate) กับความเร็วขับขี่ (V_{85}) ของทางหลวงนอกเมือง 2 ช่องจราจรของประเทศต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
วิจัยสมทบงานวิจัย	
วันที่.....	0 5 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน.....	249126
เลขเรียกหนังสือ.....	

ตารางที่ 2.1 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว V_{85} กับตัวแปร CCR ของประเทศต่าง ๆ

Countries	Regression Models	Remark
Germany	$V_{85} = \frac{10^6}{8,270 + 8.01CCR_S}$	$R^2 = 0.73$ Where speed limit = 100 km/h
United States	$V_{85} = 103.04 - 0.053CCR_S$	$R^2 = 0.80$ Where speed limit = 90 km/h
Australia	$V_{85} = 101.2 - 0.043CCR_S$	$R^2 = 0.87$ Where speed limit = 90 km/h
Greece	$V_{85} = \frac{10^6}{10150.1 + 8.529CCR_S}$	$R^2 = 0.81$ Where speed limit = 90 km/h
Lebanon	$V_{85} = 91.03 - 0.056CCR_S$	$R^2 = 0.81$ Where speed limit = 90 km/h
Canada	$V_{85} = e^{(4.561 - 5.27 \times 10^{-4} CCR_S)}$	$R^2 = 0.63$ Where speed limit = 90 km/h

ที่มา: Lamm et al. (1999)

ในประเทศไทย กรมทางหลวงพิจารณากำหนดแนวเส้นทาง และการออกแบบแนวเส้นทางจาก “ความแตกต่างของค่าความเร็วออกแบบระหว่างช่วงต่างๆของถนนไม่ควรเกิน 10 mi/h (หรือประมาณ 15 km/h) และควรจะเปลี่ยนเป็นขั้น ขึ้นละ 5 mi/h (ประมาณ 8 km/h)” (เอกวิทย์ และคณะ, กองฝึกอบรมกรมทางหลวง, 2539) ซึ่งการพิจารณายังคงเป็นเพียงการกำหนดค่าความแตกต่างของความเร็วออกแบบ ไม่ได้ใช้ค่าความเร็วขั้นชี้ และใช้ความเร็วออกแบบตามคำแนะนำของ AASHTO

การตรวจสอบความสอดคล้องของทางหลวงโดยใช้ความเร็ว สามารถกระทำได้แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การตรวจสอบความสอดคล้องในการออกแบบ (Design Consistency) และการตรวจสอบความสอดคล้องในความเร็วขั้นชี้ (Operating Speed Consistency)

2.4.1 การตรวจสอบความสอดคล้องในการออกแบบ (Design Consistency) พิจารณาจากผลต่างของความเร็วออกแบบ (V_d) และความเร็วขั้นชี้ (V_{85}) ที่เกิดขึ้นในเส้นทางอันเป็น

ส่วนประกอบเดียว เช่น ในทางโค้ง หรือ ทางตรง ซึ่งความเร็วออกแบบ และความเร็วขับสนักนิยามได้ดังนี้

ความเร็วออกแบบ (Design Speed) เป็นความเร็วที่เลือกใช้เพื่อออกแบบทางเรขาคณิตของทางหลวง โดยการสมมติความเร็วควรให้ถูกต้องตามหลักตรรกวิทยาที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางภูมิประเทศ, ความเร็วขับสนักที่ผู้ใช้คาดหวัง, เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน และประเภทการใช้งานของทางหลวง (AASHTO, 2004:p67) ซึ่งหาได้จากการสมมติ หรือการอนุมานความเร็ว (Infer Design Speed) จากสมการทั่วไปของการวิ่งของรถในโค้งวงกลม ดังนี้

$$r = \frac{V_d^2}{127(e + f)} \quad \dots(2.1)$$

$$V_d = \sqrt{127r(e + f)} \quad \dots(2.2)$$

เมื่อ V_d = ความเร็วออกแบบ, km/h
 r = รัศมีของโค้ง, m
 e = อัตราการยกโค้ง
 f = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างตามการคำนวณวิธีที่ 5 ใน AASHTO (2004:p153)

ความเร็วขับสนัก (Operating Speed) เป็นความเร็วที่ผู้ขับสนักยานพาหนะขับสนักในช่วงเวลาที่ความเร็วไม่ได้ถูกรบกวนจากผู้ใช้ทางในยานพาหนะคันอื่น (Free-flow condition) เป็นความเร็วเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 ในสภาพการจราจรตามลักษณะของสถานที่หรือลักษณะทางเรขาคณิตของเส้นทางนั้น (AASHTO, 2004:p66) การหาความเร็วขับสนักหาได้จากการศึกษาความเร็ว (Speed Studies) ของยานพาหนะในช่วงระยะทางหรือจุดที่ให้ความสนใจ (จัดอยู่ในชนิดของความเร็วเฉลี่ยเชิงเวลา (TMS) แต่ใช้ความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นความเร็วขับสนัก)

2.4.2 การตรวจสอบความสอดคล้องในความเร็วขับสนัก (Operating Speed Consistency) คือการให้ความสนใจในผลต่างของความเร็วขับสนักที่เกิดขึ้นของส่วนประกอบที่ต่อเนื่องกัน การพิจารณาความสอดคล้องดูจากผลต่างของความเร็วขับสนัก (Difference of Operating Speed)

การหาค่าความเร็วขับสนัก (V_{85}) ของทางหลวง 2 ช่องจราจรสายชนบท เป็นการหาความเร็วที่ได้จากการขับสนักจริง ผู้ใช้ทางเป็นผู้เลือกใช้ความเร็วซึ่งมีผลจากอุปนิสัยของผู้ขับสนัก

ลักษณะภูมิประเทศ และส่วนประกอบของทางหลวงได้มีงานศึกษาเพื่อทำนายความเร็วขับเคลื่อนอยู่หลายงานวิจัยด้วยกันในแถบยุโรป และงานวิจัยที่น่าสนใจสำหรับการทำนายความเร็วขับเคลื่อน คืองานวิจัยที่ศึกษาโดย Lamm. Lamm. ได้นำค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความโค้ง (Curvature Change Rate, CCR) มาเป็นตัวแปรเพื่อหาความเร็วขับเคลื่อน

CCR เป็นค่าสัมบูรณ์รวมของมุมที่เปลี่ยนแปลงในแนวราบหารด้วยระยะทางในแนวราบภายในช่วงนั้น หรือ

$$CCR = \frac{\sum_{i=1}^n |\gamma_i|}{L}, \text{ (gon/km)} \quad \dots(2.3)$$

เมื่อ $\sum_{i=1}^n |\gamma_i|$ = ผลรวมของมุมที่เปลี่ยนแปลงในโค้ง = $\sum |\tau_i + \alpha_i|$, gon
 τ_i = ผลรวมของมุมที่เปลี่ยนแปลงใน โค้งเปลี่ยน, gon
 α_i = ผลรวมของมุมที่เปลี่ยนแปลงใน โค้งกลม, gon
 L = ความยาวของช่วงถนนที่สนใจ, km.

gon คือหน่วยวัดมุมใช้ในยุโรป มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{400}$ circle หรือ 1 gon เท่ากับ 0.9 องศา หรือ 54 ลิปดา

2.5 เกณฑ์การประเมินความสอดคล้องของถนนตามแนวคิดในประเทศเยอรมัน

ในประเทศเยอรมันใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความโค้ง (Curvature Change Rate, CCR) เป็นตัวแปรในการคำนวณหาความเร็วขับเคลื่อน (V_{85}) ข้อดีของการใช้ตัวแปร CCR คือสามารถแปลงส่วนประกอบในแนวทางราบทุกประเภทไม่ว่าจะเป็น โค้งกลม โค้งสไปรอล โค้งกลับ โค้งประกอบ และทางตรง ให้เป็นค่า CCR เพื่อนำไปคำนวณหาความเร็วขับเคลื่อน (V_{85}) ซึ่ง V_{85} ได้จากแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่า CCR กับความเร็วขับเคลื่อน (V_{85}) ของประเทศต่าง ๆ รูปที่ 2.3 แสดงแนวเส้นทางในช่วงโค้งที่มีทั้งโค้งสไปรอล และโค้งกลม ค่า CCR สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของลักษณะเรขาคณิตของช่วงถนนดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$CCR = \frac{\left| \frac{L_{CS1}}{2r} + \frac{L_{Cr}}{r} + \frac{L_{CS2}}{2r} \right|}{L} 63,700 \quad \dots(2.4)$$

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

r = รัศมีของโค้งกลม, m .

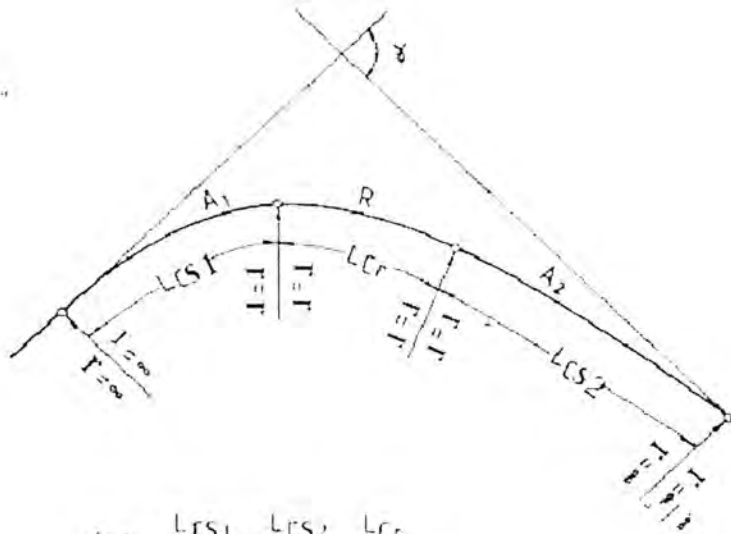
L = ความยาวทั้งหมดของโค้ง ($L_{CS1} + L_{Cr} + L_{CS2}$), m .

L_{Cr} = ความยาวของโค้งกลม, m .

L_{CS1}, L_{CS2} = ความยาวของโค้งสไปรอล, m .

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

หมายเหตุ ในช่วงที่เป็นทางตรงค่า CCR เท่ากับ 0



$$|\gamma| = \frac{L_{CS1}}{2r} + \frac{L_{CS2}}{2r} + \frac{L_{Cr}}{r}$$

$$L_{CS1} = \frac{A_1^2}{r}, L_{CS2} = \frac{A_2^2}{r}$$

$$CCR = \frac{\left(\frac{L_{CS1}}{2r} + \frac{L_{CS2}}{2r} + \frac{L_{Cr}}{r} \right) \cdot 63,700}{L} \text{ [gon/km]}$$

$$L = L_{CS1} + L_{CS2} + L_{Cr}$$

รูปที่ 2.3 แสดงการคำนวณหาค่า CCR

เมื่อได้ค่า CCR ซึ่งแทนลักษณะเรขาคณิตของช่วงถนนแล้ว จากนั้นนำมาใช้เป็นตัวแปรเพื่อหาความเร็วขับซี่ จากแบบจำลองความเร็วขับซี่ และประเมินความปลอดภัยโดยมีวิธีการดังนี้ คือ

- 1) ประเมินความสอดคล้องในการออกแบบ (Design Consistency)
- 2) ประเมินความสอดคล้องของความเร็วขับซี่ (Speed Consistency)
- 3) ประเมินความสอดคล้องของจลศาสตร์การขับซี่ (Driving Dynamic Consistency)
- 4) ประเมินความสอดคล้องของแนวทางตรงใน Successive Element

2.5.1 ประเมินความสอดคล้องในการออกแบบ(Design Consistency) พิจารณาความเร็วในเส้นทางที่เป็นส่วนประกอบเดียว เช่น ในทางโค้ง หรือ ทางตรง จากค่าแตกต่างของความเร็วออกแบบ (V_d) และความเร็วจับจี้ (V_{85}) มีค่าตามเกณฑ์ความปลอดภัย I ตามตารางที่ 2.2 ตารางที่ 2.2 เกณฑ์การวัดความปลอดภัย I, II และ III สำหรับการออกแบบที่ดี, พอใช้ และไม่ดี

เกณฑ์ความปลอดภัย	เกณฑ์ดี	เกณฑ์พอใช้	เกณฑ์ไม่ดี
	ระดับการออกแบบ		
$I^{1)}$	$ V_{85} - V_d \leq 10 \text{ km/h}$	$10 \text{ km/h} < V_{85} - V_d \leq 20 \text{ km/h}$	$20 \text{ km/h} < V_{85} - V_d $
$II^{2)}$	$ V_{85} - V_{85i+1} \leq 10 \text{ km/h}$	$10 \text{ km/h} < V_{85} - V_{85i+1} \leq 20 \text{ km/h}$	$20 \text{ km/h} < V_{85} - V_{85i+1} $
$III^{3)}$	$+0.01 \leq f_R - f_{RA}$	$-0.04 \leq f_R - f_{RA} < +0.01$	$f_R - f_{RA} < -0.04$

ที่มา: Lamm et al. (1999)

เมื่อ

- 1) เป็นความสัมพันธ์ที่ใช้กับการออกแบบส่วนประกอบเดียว (Single Design Element) เช่น ทางตรง หรือทางโค้ง
- 2) เป็นความสัมพันธ์ที่ใช้กับการออกแบบส่วนประกอบที่ต่อเนื่องกัน (Successive Design Element) เช่นทางตรงเปลี่ยนสู่ทางโค้ง หรือทางโค้งเปลี่ยนสู่ทางโค้ง
- 3) เป็นความสัมพันธ์ที่ใช้ตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างในโค้ง

V_d = ความเร็วออกแบบ, km/h

V_{85} = ความเร็วจับจี้ ที่ 85 เปอร์เซนต์ไทล์ในช่วงของส่วนประกอบทางหลวง “i” , km/h

V_{85i+1} = ความเร็วจับจี้ ที่ 85 เปอร์เซนต์ไทล์ในช่วงของส่วนประกอบทางหลวง “i+1”, km/h

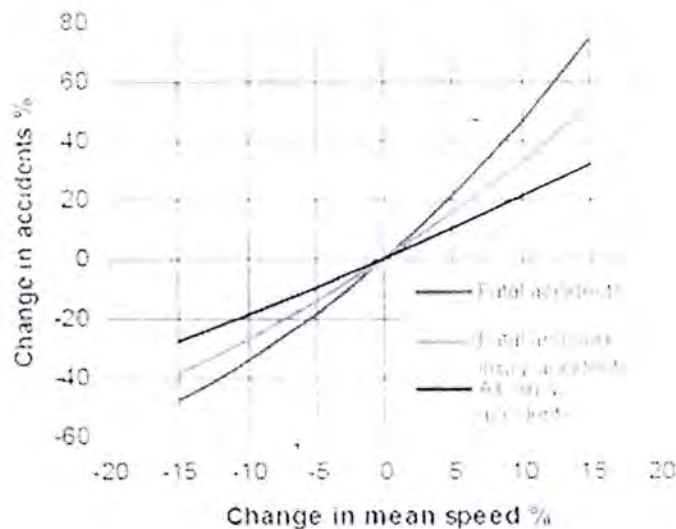
f_R = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างที่สมมุติ (ได้จากความเร็วออกแบบ)

f_{RA} = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างที่ต้องการ (ได้จากความเร็วจับจี้)

เกณฑ์การวัดความปลอดภัย I, II และ III ได้มาจากการสืบสวนอุบัติเหตุเชิงลึก (In-depth Accident Investigation) ของอัตราอุบัติเหตุ (Accident Rate) และอัตราค่าใช้จ่ายอุบัติเหตุ (Accident Cost Rate) พิจารณาจากผลการวิเคราะห์คือ อัตราอุบัติเหตุ และอัตราค่าใช้จ่ายอุบัติเหตุเพิ่มขึ้นเมื่อค่า CCR เพิ่มขึ้น, ค่า CCR ที่ 180 gon/km. ให้ความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุต่ำ (Low Accident Rate) และให้ระดับความรุนแรงของการเกิดอุบัติเหตุต่ำ (Low Accident Cost Rate) , ความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าที่ค่า CCR อยู่ในช่วง

ระหว่าง 180-360 gon/km. และความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อ CCR มากกว่า 360 gon/km. จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าอุบัติเหตุเปลี่ยนแปลงตามค่า CCR ที่ 180-360 gon/km. เมื่อนำค่า CCR ไปแทนค่าในแบบจำลองความเร็วขับเคลื่อนที่ได้จากหลายประเทศในแถบยุโรป พบว่าผลต่างของความเร็วขับเคลื่อนที่ CCR 180 gon/km. และ CCR 360 gon/km. มีค่าประมาณ 10 km/h และจากผลการเกิดอุบัติเหตุจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าที่ค่า CCR อยู่ในช่วงระหว่าง 180-360 gon/km. การพิจารณาความปลอดภัยในช่วงนี้ผลต่างของความเร็วจึงมีค่า 10-20 km/h ดังนั้น CCR ที่ทำให้เชื่อมั่นได้ว่าผลต่างของความเร็วปลอดภัยคือ CCR เท่ากับ 180 gon/km. ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10 km/h (Lamm, 1999: p18.17)

เมื่อพิจารณาถึงพลังงานในการปะทะที่ถูกถ่ายทอดมาสู่ผู้โดยสาร เกิดจากความเร็วในการปะทะ



รูปที่ 2.4 แสดงความเร็วในการเข้าปะทะสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์การเกิดอุบัติเหตุ

- ทุกๆ ความเร็วที่เพิ่มขึ้น 10% ทำให้เกิดอุบัติเหตุอย่างน้อยต้องมีผู้บาดเจ็บ 21%
- ทุกๆ ความเร็วที่เพิ่มขึ้น 10% ทำให้เกิดอุบัติเหตุที่มีผู้เสียชีวิต 33%
- หากรถยนต์ชนคนเดินเท้าที่ความเร็ว 48 กม./ชม. คนเดินเท้าอาจจะเสียชีวิต 20% แต่หากชนที่ความเร็ว 64 กม./ชม. คนเดินเท้าอาจจะเสียชีวิตถึง 90% (Directgov, 2008)
- ความเร็วที่เพิ่มขึ้น 10% จะเพิ่มแรงในการปะทะ 21% และเพิ่มความรุนแรงของอุบัติเหตุถึงขั้นเสียชีวิตสูงถึง 46% (Vagverket, 2008)

ที่มา: <http://www.tarc.ait.ac.th/th/speed3.php>

2.5.2 ความสอดคล้องของความเร็วขับขี่ (Speed Consistency) แนวเส้นทางที่มีลักษณะส่วนประกอบต่อเนื่องกัน (Successive element) ความเร็วในทางตรงเปลี่ยนสู่ทางโค้งหรือทางโค้งเปลี่ยนสู่ทางโค้ง พิจารณาความสอดคล้องที่ผลต่างของความเร็วขับขี่ (Difference of Operating Speed) ตามเกณฑ์ความปลอดภัย II ในตารางที่ 2.2

นอกจากนี้ Lamm et al.(1989) ยังได้นำเสนอถึงผลของรัศมีของโค้งกับการเกิดอุบัติเหตุในสหรัฐอเมริกา และในเยอรมนี พบว่าโค้งรัศมี 400 ถึง 500 เมตร เกิดอุบัติเหตุต่ำสุด และเป็นค่ารัศมีซึ่งเพียงพอ ไม่มีความจำเป็นต้องใช้รัศมีโค้งที่ยาวมากๆ

2.5.3 ความสอดคล้องของพลศาสตร์การขับขี่ (Driving Dynamic Consistency) เป็นการตรวจสอบ การออกแบบเส้นทางว่าอยู่ในเกณฑ์ ดี พอใช้ หรือไม่ดี ในลักษณะการประเมินความอันตรายของเส้นทาง จากความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid-resistance) และตรวจสอบความปลอดภัย ตามเกณฑ์ความปลอดภัยที่ III ตารางที่ 2.2

2.5.4 ประเมินความสอดคล้องของแนวทางตรงในส่วนประกอบต่อเนื่องกัน (Successive Element) Lamm ได้เสนอวิธีการคำนวณตรวจสอบความยาวของแนวเส้นทางตรงระหว่างโค้ง แสดงในลักษณะเส้นผ้งความเร็ว (Speed Profile) โดยใช้ความเร็วขับขี่ในทางโค้งและความเร็วขับขี่ในทางตรงที่ได้จากแบบจำลองของแต่ละประเทศตรวจสอบ Successive Element ที่มีลักษณะเช่น ทางตรงต่อด้วยทางโค้ง หรือทางโค้งต่อด้วยทางตรงต่อด้วยทางโค้งโดยใช้สมมติฐานดังนี้

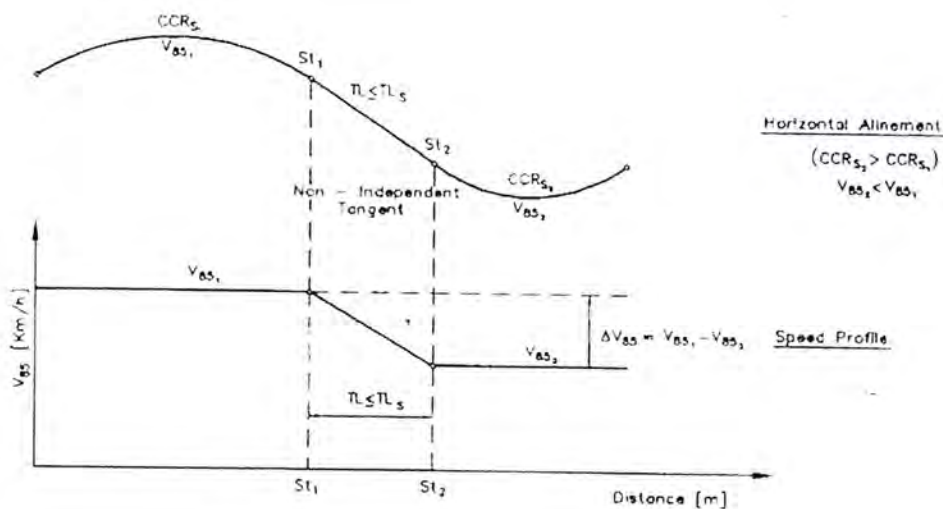
- 1) ความเร็วขับขี่ (V_{85}) ในช่วงทางโค้งคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง
- 2) ความเร็วขับขี่ (V_{85}) ในช่วงทางตรงมีการเปลี่ยนแปลงในบริเวณเข้าสู่ทางโค้งและออกจากทางโค้ง
- 3) ความเร่งที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องของ Short Tangent Length (TLs) ถ้าระยะทางตรงระหว่างโค้งมีความยาวมากกว่า TLs ความเร่งในการออกจากโค้ง และเข้าสู่โค้งใช้ค่าความเร่งเท่ากับ 0.85 m/s^2

แนวคิดเกี่ยวกับ Short Tangent Length นั้นมีดังนี้

จากเกณฑ์ความปลอดภัยที่ใช้กำหนดค่าความแตกต่างระหว่างความเร็ว V_{85} ของส่วนประกอบต่อเนื่องกัน ตามตารางที่ 2.2 ในเกณฑ์ความปลอดภัยที่ II นำมาเป็นเกณฑ์ในการกำหนดค่า Short Tangent Length (TLs) เพื่อจำแนกทางตรง แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ Non-Independent Tangent (NIT) และ Independent Tangent (IT)

Non-Independent Tangent

คือ แนวทางตรงที่มีความยาวน้อยกว่า Short Tangent Length กรณีนี้การขับขึ้นจะมีการเร่งและการชะลอที่สม่ำเสมอ เนื่องจากความยาวทางตรงมีความยาวน้อยกว่า Short Tangent Length ทำให้เมื่อใช้ความเร็วขับขึ้นออกจากโค้งที่ 1 ต้องลดความเร็วขับขึ้นเพื่อเข้าสู่โค้งที่ 2 จึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลต่างของความเร็วขับขึ้นในทางตรงกับทางโค้ง แต่เป็นการตรวจสอบความแตกต่างของความเร็วขับขึ้นในทางโค้งที่ 1 และในทางโค้งที่ 2 ดังรูปที่ 2.5 ตามเกณฑ์ความปลอดภัยที่ II ตารางที่ 2.2 ว่าอยู่ในเกณฑ์ดี พอใช้ หรือไม่ดี โดยมีเงื่อนไขว่าความเร็วขับขึ้นในโค้งที่ 1 ($V_{85(1)}$) ต้องมากกว่าความเร็วขับขึ้นในโค้งที่ 2 ($V_{85(2)}$) หลังจากนั้นตรวจสอบ “ความยาวของทางตรง” ตามสมการที่ 2.6 ว่าความยาวทางตรงที่อยู่ในเกณฑ์ดี พอใช้ หรือไม่ดี มีความยาวเท่าใด เพื่อจะได้นำความยาวของทางตรงไปปรับแก้ไขระยะทางให้สอดคล้องกับความเร็วขับขึ้น



Legend:

St	=	Station
TL	=	Existing Tangent Length (m.)
TL _s	=	Short Tangent Length, Acceleration or Deceleration Distance between Curve 1 and Curve 2 (m.)
CCR _{St,2}	=	Curvature Change Rate of the Single Curve (gon/km)
V _{85,1,2}	=	Operating Speed in Curve (km/h)

รูปที่ 2.5 แนวทางราบสำหรับกรณี Non-Independent Tangent

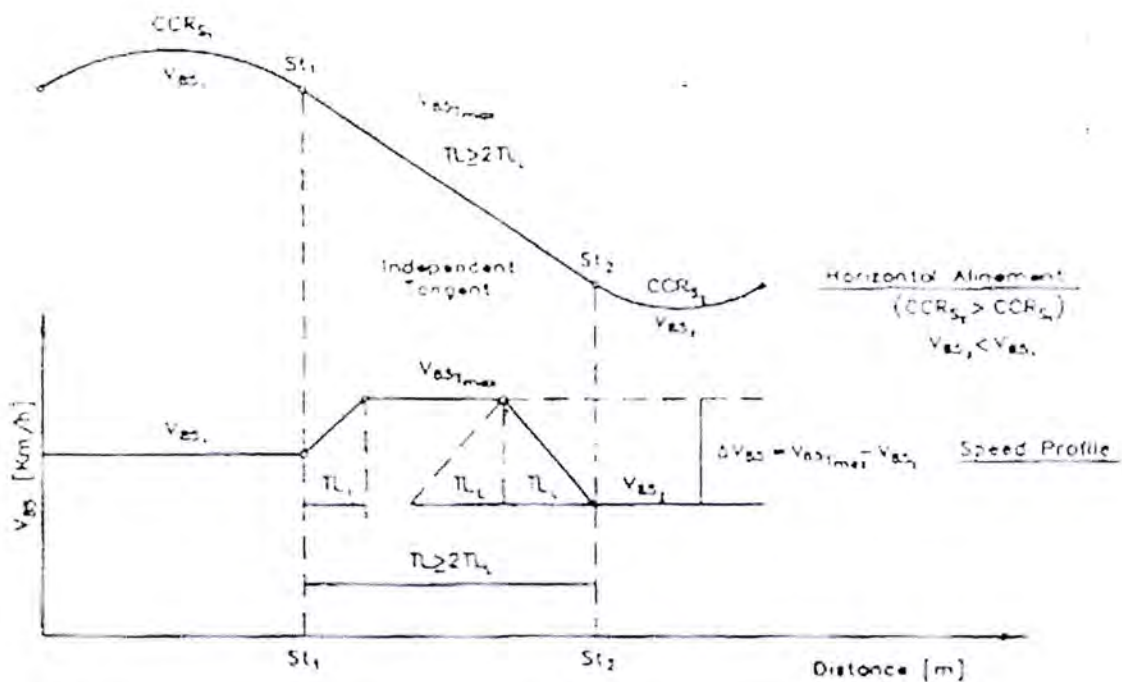
ที่มา : Lamm et al. (1999:p12.4)



Independent Tangent

คือ แนวทางตรงที่มีความยาวมากกว่า Short Tangent Length มีผลทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นในช่วงทางตรงระหว่างโค้งที่ 1 และโค้งที่ 2 มากกว่าความเร็วในทางโค้ง กล่าวคือมีการเร่งความเร็วเมื่อออกจากโค้งหนึ่งและลดความเร็วลงเมื่อเข้าสู่อีกโค้งหนึ่ง จำแนกออกได้อีก 2 ประเภท

ประเภทที่ 1: Tangent มีความยาวมากกว่า 2 เท่าของ Long Tangent Length (TL_L) เมื่อ ระยะในช่วงทางตรงระหว่างโค้งที่ 1 และโค้งที่ 2 มีความยาวมากพอที่ทำให้ผู้ขับขี่เร่งความเร็วขึ้นไปถึงความเร็วขั้นสูงสุดที่ผู้ขับขี่นั้นต้องการ ด้วยความเร่งปกติ (0.85 m/s^2) มีผลทำให้ได้ความเร็วขั้นสูงสุดและคงที่ในระยะช่วงหนึ่งหลังจากนั้นเมื่อเข้าใกล้โค้งที่ 2 ผู้ขับขี่ก็จะลดความเร็วขั้นลงให้ได้ความเร็วขั้นที่เหมาะสมเมื่อเข้าสู่อีกทางโค้งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.6



Legend:

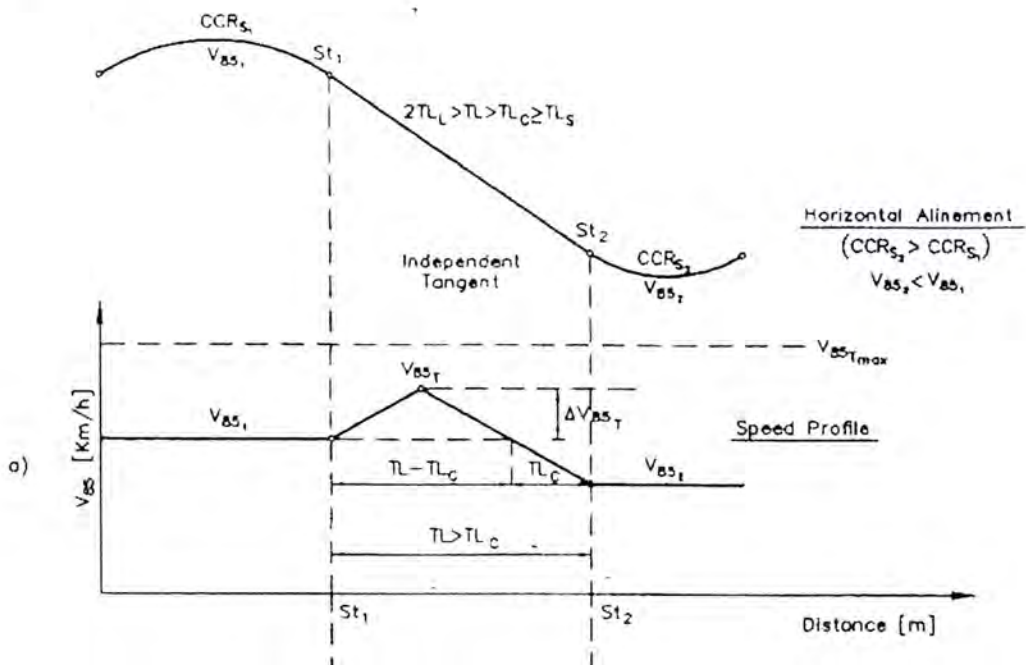
- TL_L = Long Tangent Length, Critical Acceleration or Deceleration Distance between Independent Tangent and Curve 2 (m)
- TL_i = Distance Travelled for Section "i" during Acceleration or Deceleration (m)
- V_{85Tmax} = Maximum Operating Speed in Tangents (km/h) (depending on the country under study)

รูปที่ 2.6 แนวทางราบสำหรับกรณี Independent Tangent ที่ $TL \geq 2TL_L$

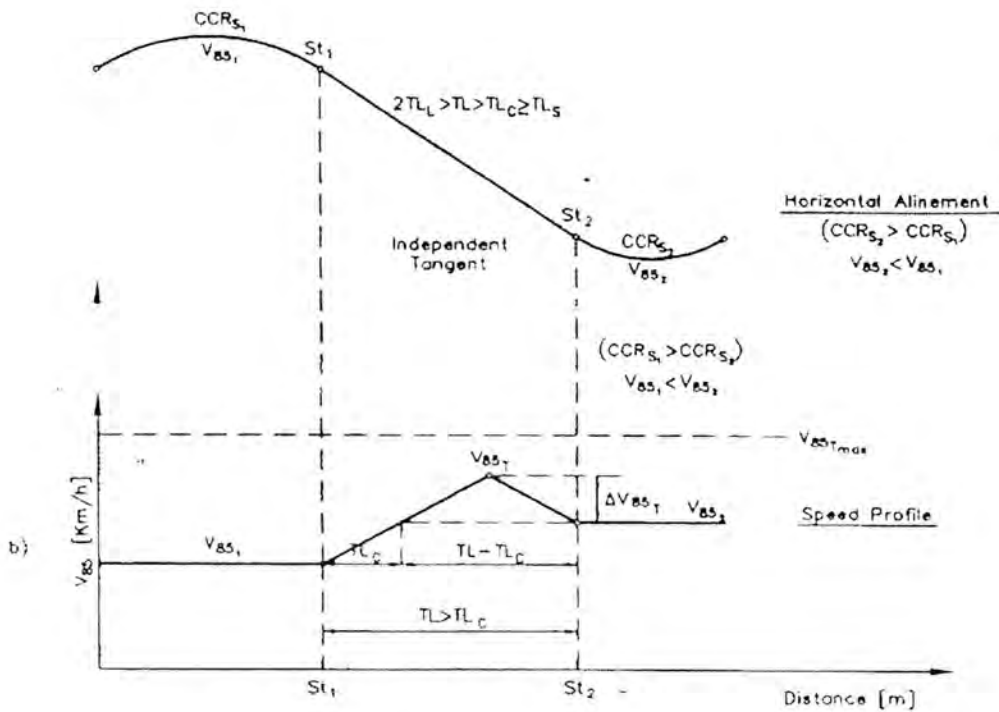
ที่มา : Lamm et al. (1999: p12.5)

การตรวจสอบความสอดคล้องใน Successive Element ลักษณะ Independent Tangent ประเภทที่ 1 มีการตรวจสอบโดยใช้ผลต่างของความเร็วขั้วระหว่างทางตรงกับในโค้ง โดยทางตรงใช้ความเร็วขั้วสูงสุดจากแบบจำลองความเร็วขั้วในทางตรง ส่วนในทางโค้งหาความเร็วขั้วจากแบบจำลองความเร็วขั้วภายในโค้ง ซึ่งทั้งสองแบบจำลองต้องมาจากแบบจำลองความเร็วขั้วของแต่ละประเทศ ผลต่างของความเร็วทั้งสองต้องอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย II ตารางที่ 2.2 ว่าเป็นเกณฑ์ดี พอใช้ หรือไม่ดี หลังจากนั้นก็หาความยาวของทางตรงตามเกณฑ์ความปลอดภัยดังกล่าวเพื่อหาความยาวของระยะทางตรงที่สอดคล้องกับโค้งตามสมการที่ 2.7 และ 2.8

ประเภทที่ 2: Tangent มีความยาวมากกว่า Short Tangent Length แต่น้อยกว่า 2 เท่าของ Long Tangent Length มีผลทำให้ผู้ขับขี่สามารถเร่งความเร็วขั้วออกจากโค้งหนึ่งได้แต่ยังไม่ถึงความเร็วสูงสุดก็ต้องลดความเร็วลงเพื่อเข้าสู่อีกทางโค้งหนึ่งด้วยความเร่งปกติ (0.85 m/s^2) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 การตรวจสอบความสอดคล้องใน Successive Element ลักษณะ Independent Tangent ประเภทที่ 2 นี้ใช้ผลต่างของความเร็วขั้วในทางตรง กับความเร็วขั้วในทางโค้ง ที่ได้จากแบบจำลองความเร็วขั้วตามลักษณะเส้นทางของแต่ละประเทศ โดยผลต่างของความเร็วขั้วต้องเป็นไปตามเกณฑ์ความปลอดภัยที่ II ตารางที่ 2.2 จากนั้นก็ตรวจสอบความยาวทางตรงโดยใช้เกณฑ์ดังกล่าวตรวจสอบความสอดคล้องของทางตรงกับโค้งที่ 1 และโค้งที่ 2 ตามสมการที่ 2.9 ถึง 2.11



รูปที่ 2.7 a) แนวทางราบสำหรับกรณี Independent Tangent ที่ $2TL_L > TL \geq TL_L$



รูปที่ 2.7 b) แนวทางราบสำหรับกรณี Independent Tangent ที่ $2TL_L > TL \geq TL_s$

Legend

TL_C = Acceleration or Deceleration Distance between Curve 1 and Curve 2 (m.)

(TL_C = can reach in the extreme case the value of TL_L)

V_{85T} = Operating Speed in Tangent (km/h)

(V_{85T} can reach in the extreme case the value of V_{85Tmax})

ΔV_{85T} = Difference between the Operating Speed in the curve with the Lower CCR_s value and the Operating Speed in the Tangent.

ที่มา : Lamm et al. (1999:p12.6)

ระยะทางที่ต้องใช้ในการลดความเร็วเมื่อรถทำการเข้าโค้งและเพิ่มความเร็วเมื่อรถวิ่งออกจากโค้งนั้นหาได้จากสมการที่ 2.5

$$\text{จาก} \quad TL = \frac{\bar{V}_{85}}{3.6^2 a} \Delta V_{85}$$

$$\text{เมื่อ} \quad \Delta V_{85} = V_{85(1)} - V_{85(2)}$$

$$\text{และ} \quad \bar{V}_{85} = (V_{85(1)} + V_{85(2)}) / 2$$

$$TL = \frac{V_{85(1)}^2 - V_{85(2)}^2}{2 \times 3.6^2 a} \quad \dots(2.5)$$

TL = ระยะทางที่ใช้ในการเร่ง / ลดความเร็วระหว่างองค์ประกอบที่ 1 ไปยัง 2, m .

$\bar{V}_{85}$ = ค่าเฉลี่ยความเร็วขั้นของ $V_{85(1)}$ และ $V_{85(2)}$

ΔV_{85} = ผลต่างของความเร็วขั้นระหว่าง $V_{85(1)}$ และ $V_{85(2)}$

$V_{85(1)}$ = ความเร็ว V_{85} ขององค์ประกอบที่ 1, km/h .

$V_{85(2)}$ = ความเร็ว V_{85} ขององค์ประกอบที่ 2, km/h .

a = อัตราเร่งหรือความหน่วง โดยทั่วไปใช้ค่าเท่ากับ 0.8 m/s^2

ตารางที่ 2.3 สมการที่ใช้คำนวณหาระยะทางตรงที่ใช้ในการลดหรือเร่งความเร็วเพื่อเข้าสู่ทางโค้ง

Case	Condition	Equation	Result on V_{85Tmax}
1 (NIT)	$TL \leq TL_s$ (Fig.2.5)	$TL_s = \frac{V_{85(1)}^2 - V_{85(2)}^2}{25.92a} \dots(2.6)$ $V_{85(1)} > V_{85(2)}$	V_{85Tmax} not met
2 (IT)	$TL \geq 2TL_L$ (Fig.2.6)	$TL_L = \frac{V_{85(Tmax)}^2 - V_{85(2)}^2}{25.92a} \dots(2.7)$ $TL_L = \frac{V_{85(Tmax)}^2 - V_{85(1)}^2}{25.92a} \dots(2.8)$ $V_{85(1)} > V_{85(2)}$	V_{85Tmax} met and held, respectively, met and not held
3 (IT)	$2TL_L > TL > TL_C \geq TL_s$ (Fig.2.7)	$TL_C = \frac{V_{85(1)}^2 - V_{85(2)}^2}{25.92a} \dots(2.9)$ $V_{85T} = V_{85(1)} + \Delta V_{85T} \dots(2.10)$ $\Delta V_{85T} = \frac{-2V_{85(1)} + [4V_{85(1)}^2 + 44.06(TL - TL_C)]^{1/2}}{2}$ $\dots(2.11)*$ Note that when calculating V_{85T} the curve with the lower CCR_s value must be selected.	V_{85Tmax} not met

*If $TL_C > TL \rightarrow \Delta V_{85T} = 0, km/h$.

Note: See Figs. 2.5 to 2.7 NIT = non-independent tangent, IT = independent tangent, and a = acceleration/deceleration rate = 0.85 m/s^2

2.6 ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับความเร็วขับขี่

จากงานวิจัยในแถบยุโรปตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการขับขี่ยานพาหนะ ได้แก่ อัตราการเปลี่ยนแปลงโค้ง (CCR) และ Degree of curve ระยะการมองเห็น (Sight Distance) ความชันตามยาว (Longitudinal Grade) และรูปตัดตามขวาง (Cross Section) (Lamm, 1999) มีอิทธิพลกับความเร็วขับขี่ดังนี้

อัตราการเปลี่ยนแปลงโค้ง (CCR) และ Degree of curve เป็นตัวแปรที่พบว่ามีผลอย่างมากต่อการหาความสัมพันธ์ที่เป็นลักษณะพิเศษของถนน ซึ่งค่า CCR มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมหรืออุปนิสัยการขับขี่ที่เกิดขึ้น (แต่จะแสดงออกมาเป็นค่าเฉลี่ยของลักษณะทางเรขาคณิต) ตัวแปร CCR เป็นค่าที่มีนัยสำคัญทางสถิติแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเลือกใช้ความเร็ว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเบื้องหน้า ผลกระทบต่อการมองเห็น และความสามารถในการแซง ในสหรัฐอเมริกา ได้ให้ความสำคัญไปที่ตัวแปร Degree of curve (DC) ซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้ออกแบบ แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องจำกัดต่อการนำไปใช้เพราะตัวแปร DC ใช้ได้ผลดีกับโค้งวงกลมเท่านั้นสำหรับโค้งเปลี่ยนค่า DC ไม่สามารถทำนายความเร็วขับขี่ที่แม่นยำได้ ต้องแปลงค่าความเร็วขับขี่เป็นอัตราเร่งแล้วตรวจสอบอัตราเร่งที่เกิดขึ้นในแนวเส้นทางที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งต่างกับการใช้ตัวแปร CCR ที่หาความเร็วขับขี่ได้ทั้งทางตรง ทางโค้งวงกลมเดี่ยว โค้งวงกลมต่อเนื่อง และโค้งเปลี่ยน แต่มีข้อเสียเพียงการคำนวณที่ทำได้เพียงที่ละหนึ่งช่วงถนน ตามรูปที่ 2.3

ระยะการมองเห็น (Sight distance) สำหรับทางโค้งเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า CCR และ CCR ครอบคลุมระยะการมองเห็นตามการเปลี่ยนแปลงของรัศมีโค้งอยู่แล้ว ดังนั้นระยะการมองเห็นจึงไม่ใช่แฟกเตอร์ที่นำมาใช้หาความเร็วขับขี่

ความชันตามแนวยาว (Longitudinal Grade) Lamm. พบว่าความชันไม่มีนัยสำคัญต่อความเร็วขับขี่ เนื่องจากลักษณะของโค้งดังทำให้ความเร็วขับขี่ของรถยนต์ส่วนบุคคลลดลง ที่ความชัน ± 5 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ซึ่งส่วนใหญ่แล้วโค้งดังที่มีความชันมากจะสัมพันธ์กับโค้งราบ ทำให้รัศมีโค้งราบสั้นลงตามไปด้วย ความชันจะส่งผลกระทบต่อความเร็วขับขี่ของรถบรรทุกเท่านั้น ประกอบกับพฤติกรรมการขับขี่ ผู้ขับขี่จะเร่งความเร็วขับขี่ในตอนขาขึ้นเท่านั้นและตอนขาลงผู้ขับขี่โดยมากจะชะลอความเร็วจากการเบรกเพื่อให้ได้ความเร็วที่เหมาะสมสามารถที่จะหยุดรถได้อย่างปลอดภัย

รูปตัดตามขวาง (Cross Section) Lamm. พบว่า CCR กับความกว้างของช่องจราจร และไหล่ทาง ไม่มีนัยสำคัญต่อกัน ซึ่งจากการพัฒนาสมการการถดถอยพบว่ารูปตัดตามขวางมีความสัมพันธ์กับความเร็วขยับขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.7 แบบจำลองความเร็วขยับขึ้น – ทฤษฎี

สมมติฐานในการพัฒนาแบบจำลองความเร็วขยับขึ้น ใช้ความเร็วเฉลี่ยเชิงเวลา นำความเร็วที่ได้จากผลรวมความเร็วของยานพาหนะต่อจำนวนยานพาหนะทั้งหมดที่ทำการสำรวจ ในแต่ละช่วงถนนมาพิจารณาหาตัวแปรทางสถิติที่มีนัยสำคัญตามแนวคิดของงานศึกษาโดย Lamm. และ FHWA ซึ่งแนวคิดทั้งสองได้วิเคราะห์ความถดถอยโดยใช้ทฤษฎีทางสถิติดังนี้

2.7.1 แบบจำลองการถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Model)

การใช้แบบจำลองกำหนดให้ค่า X เป็นค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้าหรือทราบค่า และต้องมีค่าแน่นอนเพียงค่าเดียว ค่าความคลาดเคลื่อน (Error, e_i) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 ความแปรปรวนของ e_i มีค่าเท่ากันทุกค่าของ i และมีค่าเท่ากับค่าความแปรปรวนของ Y

$$\text{นั่นคือ} \quad E(e_i) = 0$$

$$\text{และ} \quad V(e_i) = V(Y) = \sigma^2$$

e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน นั่นคือ

$$\text{Cov}(e_i, e_j) = E(e_i, e_j) = 0 \quad ; i \neq j$$

e_i มีการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 นั่นคือ

$$e_i \sim \text{Normal}(0, \sigma^2)$$

สมการโดยทั่วไป $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i$... (2.12)

y_i = ตัวแปรตาม

x_i = ตัวแปรอิสระ

β_0 = ค่าคงที่ (Constant) จุดตัดแกน y เมื่อ x มีค่าเป็น 0

β_1 = ค่าคงที่ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการถดถอย (Regression Coefficient)

e_i = ค่าความคลาดเคลื่อนที่ไม่ทราบสาเหตุ (random error)

เมื่อแบบจำลองอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ข้อมูลความเร็วขึ้น การประมาณค่า β_0 และ β_i ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า y_i มีค่าต่ำสุด หาได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method)

2.7.2 แบบจำลองการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple Linear Regression Model, MLR Model)

การใช้แบบจำลอง MLR Model ในการวิเคราะห์ข้อมูลกรณีที่มีตัวแปรตาม Y_i เท่ากับ 1 ตัวแปร และมีตัวแปรต้น x หลายตัวแปร โดยตัวแปรตาม Y_i มีการแจกแจงแบบปกติมีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ μ_i และความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ $V_i^2 \sigma^2$ ค่าคลาดเคลื่อน (Error or Residual, ε_i) มีการแจกแจงปกติ มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวน เท่ากับ σ^2 สมมติฐานนี้สามารถแทนได้ด้วยสัญลักษณ์:

$$Y_i \sim \text{Normal}(\mu_i, V_i^2 \sigma^2)$$

$$Y_i = V_i \left[\sum_{j=1}^k x_{ij} \beta_j \right] + V_i \varepsilon_i \quad \dots(2.13)$$

$$\varepsilon_i \sim \text{Normal}(0, \sigma^2)$$

$$\text{เมื่อ } \mu_i = E(Y_i) = V_i \left[\sum_{j=1}^k x_{ij} \beta_j \right] \quad \dots(2.14)$$

$$\text{ค่าความแปรปรวน (Variance), } \text{Var}(Y_i) = V_i^2 \sigma^2$$

สมการโดยทั่วไปของความถดถอยพหุคูณเชิงเส้น

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad \dots(2.15)$$

β_0 = ค่าคงที่ (Constant) จุดตัดแกน y เมื่อ x มีค่าเป็น 0

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ = ค่าสัมประสิทธิ์บางส่วน (partial regression coefficient) หรืออิทธิพลของ $x_1, x_2, \dots, x_k$ ที่มีต่อ y_i โดย β_k แต่ละตัวมีความหมายเฉพาะ เช่น β_1 หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y_i ต่อหน่วยของ x_1 เมื่อให้ $x_2, \dots, x_k$ มีค่าคงที่

เมื่อ MLR Model อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ข้อมูลความเร็วขึ้น Y_i มีการแจกแจงแบบปกติการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหาได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด

2.8 ทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา

2.8.1 การศึกษาเพื่อหาตัวแปรที่สำคัญต่อการสร้างแบบจำลองความเร็วขับขี่

Lamm et al. (1986) ได้นำวิธีการของชาวเยอรมัน ที่ได้ศึกษาวิธีการออกแบบถนน โดยใช้ความเร็วขับขี่ที่ 85 เปอร์เซ็นต์จากตัวแปรอัตราการเปลี่ยนแปลงโค้ง (Curvature Change Rate, CCR) เพื่อทำนายความเร็วขับขี่ (Operating Speed, V_{85}) ในโค้งราบ โดยค่า CCR คือค่าสัมบูรณ์ของมุมที่เปลี่ยนแปลงต่อหน่วยความยาวรวมของโค้งทางหลวงแต่ละช่วง ที่แสดงอยู่ในสมการที่ 2.4 จากนั้นใช้สมการถดถอยเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขับขี่ที่ 85 เปอร์เซ็นต์กับตัวแปร CCR โดยศึกษาโค้งจำนวน 84 โค้งในรัฐนิวยอร์กประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แบบจำลองที่ใช้สำหรับประมาณ V_{85} ในตัวแปรของ CCR หรือรัศมีของโค้งราบ r ดังนี้

$$V_{85} = 95.780 - 0.076 \text{ CCR} , R^2 = 0.84 \quad \dots(2.16)$$

$$V_{85} = 96.152 - \frac{2,803.769}{r} , R^2 = 0.82 \quad \dots(2.17)$$

เมื่อ

$$V_{85} = \text{ความเร็วขับขี่ 85 เปอร์เซ็นต์ในโค้ง, km/h}$$

$$r = \text{รัศมีของโค้งราบ, m}$$

$$\text{CCR} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงโค้ง, degrees/km}$$

$$R^2 = \text{R-Squared, เป็นค่าสถิติ ที่แสดงถึงสัดส่วน Variation ของความเร็วขับขี่ (V_{85}) ที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการ}$$

Lamm et al. (1990) ศึกษาเพิ่มเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{85} และลักษณะของโค้งราบ ตัวแปร ที่มีนัยสำคัญ ด้วยการเก็บตัวอย่างความเร็วขับขี่ภายใต้การไหลอิสระ 322 โค้ง ในสหรัฐอเมริกา โดยพิจารณาตัวแปรในการสร้างแบบจำลองคือ Degree of curve ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ารัศมีโค้ง, ความยาวของโค้ง, อัตราการยกโค้ง, ความชัน, ระยะการมองเห็น, ความกว้างของช่องจราจร, ความกว้างของไหล่ทาง, Posted speed และปริมาณการจราจรเฉลี่ยรายวันในหนึ่งปี (AADT) พบว่าตัวแปรมีความสำคัญ ต่อความเร็วขับขี่คือ “รัศมีโค้ง” ดังสมการที่ 2.18

$$V_{85} = 94.398 - \frac{3,188.656}{r} , R^2 = 0.84 \quad \dots(2.18)$$

เมื่อ $r = \text{รัศมีโค้ง, m.}$

Kanellaidis et al. (1990) ศึกษาความเร็วขับขี่ในโค้งราบของทางหลวง 2 ช่องจราจร สายชนบทในประเทศกรีซ ได้ทำการเก็บตัวอย่างความเร็วขับขี่ 58 โค้ง โดยในแต่ละโค้งเก็บข้อมูล ไม่น้อยกว่า 200 ตัวอย่างเพื่อนำไปหาความเร็วที่ 85 เปอร์เซนต์ไทล์สัมพันธ์กับ รัศมีโค้ง องศาของ โค้งราบ อัตราการยกโค้ง ความกว้างของช่องจราจร ความกว้างของไหล่ทาง และความลาดชัน ผล จากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อความเร็วขับขี่ (V_{85}) คือ “รัศมีโค้ง” ดังสมการที่ 2.19

$$V_{85} = 129.88 - \frac{623.1}{\sqrt{r}}, \quad R^2 = 0.78 \quad \dots(2.19)$$

เมื่อ r = รัศมีโค้ง, m.

Islam and Seneviratne (1994) ศึกษาหาความเร็วขับขี่จากตัวแปรที่สำคัญ คือ รัศมี ของโค้ง หรือ Degree of curve เพื่อทำนายความเร็วขับขี่ในโค้งราบที่จุดต่าง ๆ ของโค้งอันได้แก่ จุดเริ่มโค้ง (Point of curve, PC), จุดกึ่งกลางโค้ง (MC) และจุดปลายโค้ง (Point of tangent, PT) จากการเก็บตัวอย่าง 8 โค้งในรัฐยูทาห์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ขีดขี่ที่ PC, MC และ PT ตามตัวแปร Degree of curve ดังนี้

$$\text{ที่จุด PC; } V_{85} = 95.41 - 1.48D - 0.012D^2, \quad R^2 = 0.99 \quad \dots(2.20)$$

$$\text{ที่จุด MC; } V_{85} = 103.03 - 2.41D - 0.029D^2, \quad R^2 = 0.98 \quad \dots(2.21)$$

$$\text{ที่จุด PT; } V_{85} = 96.11 - 1.07D, \quad R^2 = 0.98 \quad \dots(2.22)$$

เมื่อ D = Degree of curve แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่าง V_{85} ที่จุด PC, MC และ PT

Krammes et al.(1994, 1995) พัฒนาแบบจำลอง Speed-profile model เพื่อประเมิน ความสอดคล้องกันของแนวเส้นทางโค้งราบของทางหลวง 2 ช่องจราจรสายชนบท โดยแบบจำลอง จะประมาณค่า V_{85} ตามจุดต่างๆของแนวเส้นทางโค้งราบ ได้แก่ 1) V_{85} ในโค้งราบ 2) V_{85} ในทาง ตรงก่อนเข้าสู่โค้ง รวมถึง 3) อัตราการเร่งและการชะลอ สำหรับยานพาหนะที่เข้าสู่โค้งและอยู่ใน โค้ง โดยแบบจำลองสมมุติให้ความเร็วในโค้งราบคงที่ อัตราการเร่งและการชะลอจะสมมุติให้ เกิดขึ้นในระยะทางตรง ที่อัตรา 0.85 m/s^2 จากการเก็บตัวอย่าง 138 โค้ง ในวอชิงตัน ดี.ซี. ประเทศ สหรัฐอเมริกา ได้สมการถดถอยที่ประมาณค่าความเร็วขับขี่ V_{85} บนโค้งคือ

$$V_{85} = 102.40 - 1.57D + 0.012L_C - 0.10\Delta, \quad R^2 = 0.82 \quad \dots(2.21)$$

เมื่อ

D = Degree of curve , degree

L_c = ความยาวของโค้ง (Length of curve , m)

Δ = มุมที่แนวตรงหักเหไป (Deflection Angle, degree)

McFadden and Elefteriadou (1997) ศึกษาหาแบบจำลองความเร็วขับขี่เพื่อหาความสอดคล้องในการออกแบบทางหลวง 2 ช่องจราจรสายชนบท จากการเก็บตัวอย่างความเร็วในโค้ง 78 โค้ง ในวอชิงตัน ดี.ซี. ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แบบจำลองความเร็วขับขี่ 2 แบบจำลองดังนี้

$$V_{85} = 103.66 - 1.95D, \quad R^2 = 0.80 \quad \dots(2.22)$$

$$V_{85} = 41.62 - 1.29D + 0.0049L_c - 0.12\Delta + 0.95V_{85i}, \quad R^2 = 0.90 \dots(2.23)$$

เมื่อ V_{85i} = ความเร็วขับขี่ที่ 85 เปอร์เซนต์ไทล์ของทางตรง (km/h)

Cardoso et al. (1998) ศึกษาหาแบบจำลองความเร็วขับขี่ของทางตรง และทางโค้งโดยใช้ข้อมูลทางหลวง 2 ช่องจราจรสายชนบทใน 4 ประเทศ ได้แก่ ฝรั่งเศส, โปรตุเกส, กรีซ และฟินแลนด์ ในช่วงทางตรงได้เก็บตัวอย่างทางตรง 80 ช่วง แต่ละทางตรงมีความยาว 500 ม. ผลการศึกษาทั้ง 4 ประเทศพบว่า ค่าเฉลี่ยความโค้ง (Bendiness), ค่าเฉลี่ยความกว้างช่องจราจร, ค่าเฉลี่ยความกว้างไหล่ทาง, ผลรวมเปอร์เซ็นต์ขาขึ้น (Total upgrade), ผลรวมเปอร์เซ็นต์ขาลง (Total Downgrade), ค่าเฉลี่ยความลาดชัน และผลรวมลักษณะเนิน เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญของแต่ละประเทศแตกต่างกันออกไป ต่อแบบจำลองความเร็วขับขี่ในแนวทางตรงตามตารางที่ 2.4 ในส่วนของทางโค้งได้เก็บตัวอย่างความเร็วขับขี่ 50 โค้ง โดยใช้ตัวแปร รัศมีโค้ง, ความยาวโค้ง, ความกว้างของช่องจราจร, ความกว้างไหล่ทาง และความลาดชัน ผลที่ได้สำหรับทางโค้ง พบตัวแปรที่มีนัยสำคัญคือ รัศมีโค้ง และ ความเร็วขับขี่ V_{85i} ในโปรตุเกส, กรีซ และฟินแลนด์ จะใช้ค่า $r^{1/2}$ ส่วนประเทศฝรั่งเศสเลือกใช้ค่า r^2 โดยแบบจำลองความเร็วขับขี่ในทางโค้งแสดงอยู่ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 แบบจำลองความเร็วขั้นพื้นฐานของทางตรง ใน 4 ประเทศแถบยุโรป (Cardoso, 1998)

Country	Regression Equation	Num. bser.	R ²	MSE
France	$V_{85t} = 97.737 + 0.007436TL + 45.707Bend$	28	0.65	5.4
Finland	$V_{85t} = 17.17 + 0.02657TL + 33.711LW - 21.936SW$	5	0.768	5.6
Greece	$V_{85t} = 134.069 - 3.799Hill - 126.59Bend$	9	0.92	6.12
Portugal	$V_{85t} = -29.95 - 34.835LW - 0.0347PRad - 43.124Bend$	34	0.82	7.58

Where:

V_{85t} = 85th percentile of the unimpeded speed distribution (km/h).
 TL = Tangent length (m).
 Bend = Bendiness (degree/km).
 LW = Lane width (m).
 SW = shoulder width (m).
 Hill = Hilliness (percent).
 PRad = Radius of the curve preceding the tangent section (m).

ตารางที่ 2.5 แบบจำลองความเร็วขั้นพื้นฐานในโค้ง ใน 4 ประเทศแถบยุโรป (Cardoso, 1998)

Country	Regression Equation	Num. bser.	R ²	MSE
France	$V_{85} = 49.220 \frac{29236}{r^2} + 0.454 \times V_{85T}$	28	0.80	4.02
Finland	$V_{85} = 51.765 \frac{337.780}{\sqrt{r}} + 0.6049 \times V_{85T}$	5	0.71	5.92
Greece	$V_{85} = 41.363 \frac{294.000}{\sqrt{r}} + 0.699 \times V_{85T}$	9	0.92	5.91
Portugal	$V_{85} = 25.010 \frac{271.500}{\sqrt{r}} + 0.877 \times V_{85T}$	35	0.90	6.1
Complete database	$V_{85} = 35.086 \frac{289.999}{\sqrt{r}} + 0.759 \times V_{85T} + c$	77	0.87	5.8

Where:

V_{85} = 85th percentile of the unimpeded speed distribution (km/h).
 r = curve radius.
 V_{85T} = 85th percentile of the unimpeded speed on the tangent immediately preceding the curve section (km/h).
 c = constant used to adjust the Y intercept for each country, with
 c = 0.000 Finland c = -3.665 France
 c = -0.033 Greece c = 2.107 Portugal and 1 km/h = 0.62 mph.

FHWA (1999) หลังจากปี 1990 เป็นต้นมา FHWA ได้หาความเร็วขั้วของทางหลวง 2 ช่องจราจรสายชนบท ภายใต้เงื่อนไขความแตกต่างกันของโค้งราบ และ โค้งโค้ง ทั้งช่วงทางตรง และทางโค้งโดยใช้ข้อมูลความเร็วที่มีมากกว่า 200 โค้ง ในวอชิงตัน ดี.ซี. ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แบบจำลองความเร็วขั้ว ในทางโค้งดังตารางที่ 2.7 การหาความเร็วขั้วมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1) ความชันบนโค้งราบ พิจารณาความชันบนโค้งราบช่วงขาขึ้น (Upgrades) 0% ถึง 4% และช่วงขาลง (Downgrades) -4% ถึง 0% (Hedman ในประเทศสวีเดนเสนอว่าความลาดชัน ไม่ว่าจะเท่าไรก็มีโอกาสสร้างปัญหาได้โดยเฉพาะความลาดชันที่ 2.5% ถึง 4% มีอุบัติเหตุสูงกว่าทางราบประมาณ 10-20%) รัศมีโค้ง r มีค่า 0 ถึง 400 m. ซึ่งจะเห็นความต่างของความเร็วขั้ว 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ได้อย่างชัดเจน FHWA แนะนำว่ารัศมีที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 800 เมตร จะทำให้ความเร็วขั้วในทางโค้งใกล้เคียงกับทางตรง การวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับค่ารัศมีจะใช้แบบจำลอง โดยการ fit ข้อมูลของโค้งราบตามความลาดชันต่างๆด้วย $1/r$

2) ทางตรงร่วมกับโค้งโค้ง FHWA ได้ศึกษาลักษณะโค้งโค้งโดยให้ K , $1/K$ เป็นตัวแปรอิสระทาง เมื่อ K = ความยาวของโค้งโค้งต่อการเปลี่ยนแปลงของเกรด (A) 1% จำนวนไซต์ที่ศึกษาทั้งหมด 21 ไซต์ แบ่งตามลักษณะการมองเห็นออกเป็น 3 ลักษณะคือ ระยะมองเห็นแบบไม่มีขีดจำกัด (Non-limited sight distance, NLSD) ของโค้งกว่า 2 ไซต์, ระยะมองเห็นแบบมีขีดจำกัด (limited sight distance, LSD) ของโค้งกว่า 10 ไซต์ และลักษณะ LSD ของโค้งหงาย 9 ไซต์ พบว่าตัวแปร $1/K$ มีความสัมพันธ์กับความเร็วขั้ว (V_{85}) ให้ระดับนัยสำคัญที่สูงต่อ LSD ค่า K ที่ต่ำกว่า 15 จะทำให้ความเร็วขั้วลดลง และลักษณะ NLSD ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเลยกับตัวแปร K

3) โค้งโค้งร่วมกับโค้งราบ โดยวิเคราะห์ถึงตัวแปร r , $1/r$, K และ $1/K$ กับความเร็วขั้วที่เปรียบเทียบกันทีละคู่ และผลที่ได้พบว่าการ Test แบบจำลองโดยใช้ตัวแปร r และ K ทั้งคู่เป็นตัวแปรที่มีค่า R^2 “ต่ำ” ดังนั้นที่วิจัยจึงได้หาความสัมพันธ์เพื่อทำนายความเร็วขั้ว ระหว่างโค้งราบกับระยะการมองเห็นทั้ง NLSD ของโค้งกว่า, LSD ของโค้งกว่า 22 ไซต์ และ LSD ของโค้งหงาย 25 ไซต์ ในเทอมของ $1/r$ และ $1/K$ ผลจากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญกับความเร็วขั้ว V_{85} มีเพียง $1/r$ เท่านั้น

4) ทางตรง การประมาณค่าความเร็วในโค้งจะง่ายกว่าการทำนายความเร็วในแนวตรง เนื่องจากในโค้งยังมีนัยสำคัญของตัวแปรให้พิจารณา แต่สำหรับทางตรงตัวแปรที่มีจะเป็นความกว้างของช่องจราจรกับลักษณะความราบเรียบของภูมิประเทศ (ราบเรียบ, เนิน และเนินเขา) จากการศึกษาพบว่าค่าตัวแปรดังกล่าวยังให้ค่า R^2 ที่ต่ำ ดังนั้น FHWA จึงได้วิเคราะห์โดยใช้ความยาว

ในทางตรงของถนนเป็นตัวแทนเพื่อหาความเร็วขับขี่ (V_{85}) ของช่วงทางตรง โดยวัดที่กึ่งกลางของช่วงทางตรงก่อนเปลี่ยนเข้าสู่ทางโค้ง FHWA ได้ศึกษาจากการเก็บตัวอย่างทางตรง 162 ช่วง และแบ่งการทำนายความเร็วขับขี่ออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้ 1) ความยาวทางตรง < 150 ม. และรัศมีโค้ง ≤ 250 ม. 2) ความยาวทางตรงอยู่ระหว่าง 150 ถึง 1000 ม. และรัศมีโค้ง ≤ 250 ม. 3) ความยาวทางตรงอยู่ระหว่าง 150 ถึง 1000 ม. และรัศมีโค้ง > 250 ม. และ 4) ความยาวทางตรง > 1000 ม. ซึ่งแต่ละกลุ่มอยู่ในรูปแบบจำลองตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แบบจำลองทำนายความเร็วของยานพาหนะส่วนบุคคลในทางตรงระหว่างโค้งราบ (FHWA-IP-87-2, 1987)

Group	Description	Model	R^2
1.	Small radii (≤ 250 m [819.7 ft]) Small tangent lengths (< 150 m [491.8 ft])	$V_{85} = 101.11 - \frac{3420}{GM_s}$ $GM_s = (r_1 + r_2) / 2$	0.553
2.	Small radii (≤ 250 m [819.7 ft]) Intermediate tangent length (150 to 1000 m [491.8 to 3278.7 ft])	$V_{85} = 105.00 - 28.107 / e^{(0.00108 \times GM_L)}$ $GM_L = [TL + (r_1 + r_2)^2] / 100$	0.742
3.	Intermediate radii (> 250 m [819.7 ft]) Intermediate tangent length (150 to 1000 m [491.8 to 3278.7 ft]) GML (1500 to 7500)	$V_{85} = 97.73 + 0.00067 GM_L$ $GM_L = [TL + (r_1 + r_2)^2] / 100$	0.200
4.	Large tangent length (> 1000 m [3278.7 ft]) "reasonable" radii (i.e., does not violate the minimum-radius criterion for assumed design speed of road)	$V_{85} = 105.00 - 22.953 / e^{(0.00012 \times GM_L)}$ $GM_L = [TL + (r_1 + r_2)^2] / 100$ (Note: only based on 6 points; considered a preliminary model)	0.838

Where:

V_{85} = 85th Percentile Speed (km/h)

GM_s = geometric measure of tangent section and attached curves for short tangent lengths (m)

r_1 = Upstream radius (m)

r_2 = Downstream radius (m)

GM_L = geometric measure of tangent section and attached curves for long tangent lengths (m)

TL = Tangent length (m)

1 km/h = 0.62 mph

ที่มา: NCHRP Report 502, 2003

ตารางที่ 2.7 แบบจำลองทำนายความเร็วของยานพาหนะส่วนบุคคลในทางโค้ง (FHWA, 2000)

ACEQ (See note 1)	Alignment Condition	Equation (See note 2)	Num. Obsr.	R ²	MSE
1.	Horizontal Curve on Grade: $-9\% \leq G < -4\%$	$V_{85} = 102.10 - \frac{3077.13}{r}$	21	0.58	51.95
2.	Horizontal Curve on Grade: $-4\% \leq G < 0\%$	$V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{r}$	25	0.76	28.46
3.	Horizontal Curve on Grade: $0\% \leq G < 4\%$	$V_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{r}$	25	0.76	24.34
4.	Horizontal Curve on Grade: $4\% \leq G < 9\%$	$V_{85} = 96.61 - \frac{2752.19}{r}$	23	0.53	52.54
5.	Horizontal Curve Combined with Sag Vertical Curve	$V_{85} = 105.32 - \frac{3438.19}{r}$	25	0.92	10.47
6.	Horizontal Curve Combined with Non-Limited Sight Distance Crest Vertical Curve	(see note 3)	13	n/a	n/a
7.	Horizontal Curve Combined with Limited Sight Distance Crest Vertical Curve (i.e., $K \leq 43 \text{ m}/\%$)	$V_{85} = 103.24 - \frac{3576.51}{r}$ (see note 4)	22	0.74	20.06
8.	Sag Vertical Curve on Horizontal Tangent	V_{85} = assumed desired speed	7	n/a	n/a
9.	Vertical Crest Curve with Non-Limited Sight Distance (i.e., $K > 43 \text{ m}/\%$) on Horizontal Tangent	V_{85} = assumed desired speed	6	n/a	n/a
10.	Vertical Crest Curve with Limited Sight Distance (i.e., $K > 43 \text{ m}/\%$) on Horizontal Tangent	$V_{85} = 105.08 - \frac{149.69}{r}$	9	0.60	31.10

NOTES:

1. **AC EQ** = Alignment Condition Equation Number

2. **Where:** V_{85} = 85th percentile speed of passenger cars (km/h) K = rate of vertical curvature
 r = radius of curvature (m) G = grade (%)

3. Use **lowest speed** of the speeds predicted from AC EQ 1 or 2 (for the downgrade) and AC EQ 3 or 4 (for the upgrade).

4. **In addition**, check the speeds predicted from AC EQ 1 or 2 (for the downgrade) and AC EQ 3 or 4 (for the upgrade) and use the lowest speed. This will ensure that the speed predicted along the combined curve will not be better than if just the horizontal curve was present (i.e., that the inclusion of a limited sight distance crest vertical curve results in a higher speed).

5. **n/a** = not applicable

6. **MSE** = mean square error

7. **1 km/h** = 0.62 mph

Schurr et al. (2002) ได้พัฒนาแบบจำลองสมการถดถอยสำหรับโค้งราบของทางหลวง 2 ช่องจราจรสายชนบท ใน Nebraska เพื่อหาความเร็วระดับที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ ที่จุดกลางโค้งและที่บริเวณจะเข้าสู่โค้งตามตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ความลาดชันช่วงขาเข้า, มุมที่แนวตรงหักเหไป (Deflection Angle) และความยาวโค้ง โดยเก็บตัวอย่างความเร็วระดับที่ตำแหน่งกึ่งกลางโค้งราบ 40 โค้ง ได้ผลตามแบบจำลองในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แบบจำลองความเร็วระดับที่ในโค้งราบ ใน Nebraska; Schurr (1998)

Location	Regression Equation	Num. bser.	R ²	MSE
85 th Percentile Speed Midpoint of Horizontal Curve	$V_{85, mid} = 103.3 - 0.1253\Delta + 0.0238L - 1.038G_1$	50	0.46	14.13
85 th Percentile Speed Approach	$V_{85, app} = 70.2 + 0.434V_p - 0.001307T_{ADT}$	50	0.19	23.04

where:

$V_{85, mid}$ = 85th percentile speed at free-flow passenger cars at the curve midpoint (km/h)

Δ = deflection angle (decimal degrees)

L = arc length of curve (m.)

G_1 = approach grade (percent)

$V_{85, app}$ = 85th percentile speed of free-flow passenger cars at the approach location (km/h)

V_p = posted speed (km/h)

T_{ADT} = average daily traffic (vehicles per day).

1 km/h = 0.62 mph

A.Mawjoud (2008) ได้ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองทำนายความเร็วระดับที่รถยนต์ส่วนบุคคลในโค้งราบ ของทางหลวง 2 ช่องจราจรสายชนบท โดยเก็บตัวอย่าง ใน Mosul, Erbil และ Dohuk ประเทศอิรัก ตัวอย่างทั้งหมด 48 โค้ง ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง 28 โค้ง และใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองอีก 20 โค้ง ซึ่งพิจารณาถึงตัวแปรดังนี้ รัศมีของโค้ง, Degree of curve, มุมที่จุดหักเหโค้ง, ความยาวโค้ง, ความยาวทางตรง, ความกว้างพื้นทาง, ความกว้างไหล่ทาง, ความชัน และอัตราการใช้โค้ง การวัดความเร็วจะวัดจากเส้นกึ่งกลางของถนนโดยใช้เครื่องมือในช่วง

ระหว่าง 50-150 เมตร, ความกว้างพื้นทางอยู่ระหว่าง 3.0 – 3.7 เมตร, ความกว้างไหล่ทางอยู่ระหว่าง 1.5 – 3.0 เมตร, อัตราการยกโค้งอยู่ระหว่าง 2-6 เปอร์เซ็นต์, ความชันของทางตรงขาเข้าอยู่ระหว่าง - 9.3 ถึง +9.3 เปอร์เซ็นต์ เงื่อนไขทางลักษณะผิวทางต้องอยู่ในสภาพดี, มีปริมาณการจราจรต่ำ และมีทางร่วมทางแยกไม่มาก โค้งในการจัดเก็บข้อมูลไม่ควรอยู่ใกล้เมืองหรือพื้นที่เขตชุมชน ซึ่งอาจได้รับผลกระทบต่อความเร็วขับเคลื่อนข้างทาง การรวบรวมความเร็วขับเคลื่อนในช่วงเวลากลางวัน ช่วงเวลาที่มีการจราจรไม่ใช่ช่วงเวลาเร่งด่วน สภาพอากาศอยู่ในสภาวะแห้ง และเพื่อให้ข้อมูลมีประสิทธิภาพลดความคลาดเคลื่อนทางสถิติจะจัดเก็บข้อมูลของแต่ละสถานที่อย่างน้อย 150 ตัวอย่างความเร็ว โดยกำหนดให้มีระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ ของตัวอย่างในการจัดเก็บ 95 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้เงื่อนไขของการจราจรที่มีการไหลอิสระ จำนวนตัวอย่างของความเร็วจะหาได้จากการประยุกต์ใช้ตามสมการนี้

$$N = \frac{\sigma^2 K^2 (2 + u^2)}{2E^2}$$

เมื่อ N = minimum number of measured speeds;

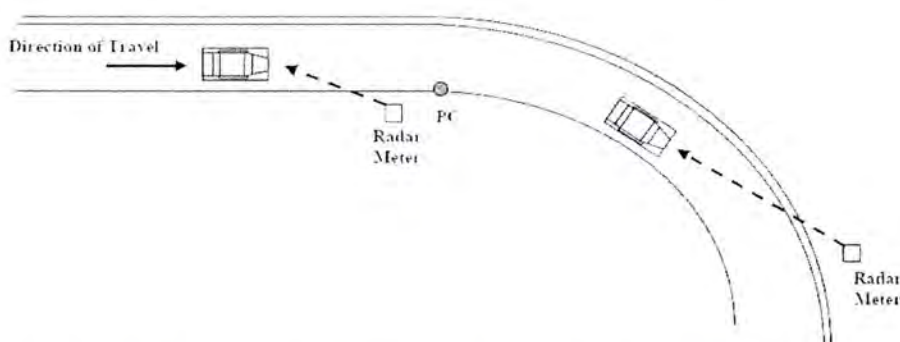
σ = estimated sample standard deviation (± 8.5 km/h);

K = constant corresponding to the desired confidence level (1.96)

E = permitted error in the average speed estimation (± 1.6 km/h)

u = constant corresponding to the 85th desired percentile speed (1.04)

ข้อมูลความเร็วจะได้จากการใช้เครื่องมือวัดความเร็ว Hand-held Radar Meter (Speed Gun type Bushnell) ซึ่งจะวัดที่กึ่งกลางโค้งราบ และทางตรง ที่แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงถึงตำแหน่งในการวัดความเร็ว โดยใช้ Hand-held Radar Meter

ผลจากการศึกษาได้แบบจำลองสำหรับการหาความเร็วขับเคลื่อนของโค้งราบแต่ละกลุ่มความชันดังตารางที่ 2.9



ตารางที่ 2.9 แสดงแบบจำลองความเร็วขับเคลื่อนในโค้ง (A. Mawjoud, 2008)

Grade (%)	Equation	R ²
Upgrade < 3	Curve $V_{85} = 0.790 \text{ app. } V_{85} + 0.0259r$	0.998
Upgrade ≥ 3 to 9.3	Curve $V_{85} = 17.519 + 0.432 \text{ app. } V_{85} + 0.06802r$	0.928
Downgrade < 3	Curve $V_{85} = 0.917 \text{ app. } V_{85} + 0.02431r - 0.300\Delta$	0.998
Downgrade ≥ 3 to 9.3	Curve $V_{85} = 0.636 \text{ app. } V_{85} + 0.09481r$	0.994

เมื่อ $\text{curve } V_{85} = 85^{\text{th}}$ percentile curve speed, $r = \text{radius of curve (m)}$

$\text{app. } V_{85} = 85^{\text{th}}$ percentile approach speed, $\Delta = \text{deflection angle}$

จิระพงศ์ เทพพิทักษ์ (2545) ได้พัฒนาแบบจำลองความเร็วเฉลี่ยของแนวเส้นทางของทางหลวงโดยพัฒนาจากข้อมูลเรขาคณิต และลักษณะการจราจรของทางหลวงหมายเลข 105 ตอน ตาก – แม่สอด ระยะทางประมาณ 78 กม. ใช้ข้อมูล 502 พื้นที่ และแบ่งเส้นทางการศึกษาออกเป็น 4 รูปแบบ ทางตรงพื้นที่ราบ จำนวน 124 พื้นที่ พื้นที่ละ 70 ตัวอย่าง, ทางตรงพื้นที่เนินเขา จำนวน 124 พื้นที่ พื้นที่ละ 70 ตัวอย่าง, ทางโค้งพื้นที่ราบ จำนวน 126 พื้นที่ พื้นที่ละ 70 ตัวอย่าง และทางโค้งพื้นที่เนินเขา จำนวน 128 พื้นที่ พื้นที่ละ 70 ตัวอย่าง การเก็บข้อมูลความเร็วของทางตรง จะเก็บข้อมูลในเส้นทางตรงที่มีลักษณะความยาวไม่น้อยกว่า 400 เมตร อยู่ห่างจากจุดเริ่มหรือจุดสิ้นสุดโค้งไม่น้อยกว่า 150 เมตร ในส่วนของทางโค้งจะเก็บข้อมูลความเร็วที่กึ่งกลางโค้ง ซึ่งแต่ละโค้งต้องมีระยะทางตรงก่อนถึงโค้งหรือห่างจากโค้งอย่างน้อย 150 เมตรเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนความเร็ว ลักษณะของยานพาหนะที่วิ่งผ่านต้อง ผ่านด้วยความเร็วอิสระ(เก็บข้อมูลแบบรถวิ่งคันเดียว) ความกว้างของช่องจราจรอยู่ระหว่าง 3.00-3.50 เมตร ไหล่ทางกว้างอยู่ระหว่าง 1.00 – 2.50 เมตร ไม่มีร่องน้ำหรือสะพานอยู่ใกล้ และเก็บข้อมูลความเร็วโดยใช้ Radar Gun ตัวแปรในการสร้างแบบจำลองคือ องศาของโค้งราบ ความลาดชันความกว้างของช่องจราจร ความกว้างไหล่ทาง ปริมาณการจราจร และปริมาณรถบรรทุกในกระแสดำเนินการ

จากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่สำคัญในการประเมิน ทางตรงพื้นที่ราบกับทางตรงพื้นที่เนินเขา “ไม่มีตัวแปรใดเกี่ยวข้องกับเลข” ส่วนทางโค้งพื้นที่ราบ ตัวแปรที่มีนัยสำคัญ คือ “องศาโค้งราบและความลาดชัน” และในทางโค้งพื้นที่เนินเขา คือ “องศาโค้งราบ และความกว้างของไหล่

ทาง” ผลจากการศึกษาได้แบบจำลองความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ แยกตามลักษณะแนวเส้นทาง และสภาพภูมิประเทศได้ดังนี้

แนวทางตรงพื้นที่ราบ;	$V = 107.262$
แนวทางตรงพื้นที่เนินเขา;	$V = 103.753$
แนวทางโค้งพื้นที่ราบ;	$V = 109.217 - 0.324D, R^2 = 0.627$
แนวทางโค้งพื้นที่เนินเขา;	$V = 105.603 - 0.402D, R^2 = 0.674$
เมื่อ	$V =$ ความเร็วเฉลี่ย, km/h

$D =$ องศาโค้งราบ, องศา

วัชรพงศ์ ย่องบุตร (2549) ได้ศึกษาพฤติกรรมของผู้ขับขี่บริเวณทางโค้ง ลักษณะการเกิดอุบัติเหตุบริเวณทางโค้ง และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดอุบัติเหตุกับรัศมีทางโค้งในจังหวัดสงขลา และปัตตานี ใช้การจัดเก็บข้อมูลความเร็วโดยเครื่องวัดเรดาร์ (Radar Gun) ซึ่งการศึกษาได้แสดงผลจากพฤติกรรมการใช้ความเร็ว พบว่าความเร็วรถก่อนเข้าโค้งจะมากกว่าความเร็วภายในโค้ง ทำให้ผลต่างของความเร็วมีมากเมื่อรัศมีโค้งน้อย ในทางตรงกันข้ามเมื่อรัศมีโค้งมีมากผลต่างของความเร็วก็จะน้อย นั่นหมายถึงรถมักไม่ชะลอความเร็ว เมื่อรัศมีโค้งมีมาก ความเร็วขั้วที่ 85 เปอร์เซ็นไทล์ ก่อนเข้าโค้งมีค่าอยู่ระหว่าง 68-78 km/h และภายในโค้งมีค่าอยู่ระหว่าง 53-71 km/h

สรุปตัวแปรที่มีอิทธิพลกับแบบจำลองความเร็ว

จากงานศึกษาหาแบบจำลองความเร็วขับเคลื่อนของงานวิจัยทั้งหลายในแถบยุโรป ได้พยายามหาค่าตัวแปรที่สำคัญต่อการสร้างแบบจำลองความเร็วขับเคลื่อน และงานวิจัยทั้งหลายพบว่าตัวแปรที่สำคัญต่อการประมาณความเร็วขับเคลื่อน, V_{85} คือค่ารัศมีโค้งที่มีความสัมพันธ์ต่อ อัตราการเปลี่ยนแปลงโค้ง (Curvature Chang Rate, CCR) หรือ Degree of Curve, $(1/r)$ ในส่วนของทางตรงตัวแปรที่สำคัญจะเป็นความยาวของถนน โดยได้สรุปตัวแปรตามงานวิจัยต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเร็วขับเคลื่อน 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ของถนน 2 ช่องจราจร สายนอกเมือง ในทางโค้ง

ผู้วิจัย (ปี ค.ศ.)	Degree of curve	Deflection angle	รัศมีโค้ง	ความยาวโค้ง	ความลาดชัน	อัตราการยกโค้ง	ความกว้างช่องจราจร	ความกว้างไหล่ทาง	ความยาวทางตรง	ระการมองเห็น	จำนวนผู้ใช้รถจักรยาน	R ²
Lamm et al. (1986-1999)	X						X				84	0.82 - 0.84
Kanellaidis et al.(1990)		X	X	X	X	X	X	X			58	0.78
Islam et al. (1994)	X										8	0.98 - 0.99
Krammes et al.(1994-1995)	X	X		X							138	0.82
McFadden et al.(1997)	X										78	0.80
Cardoso et al. (1998)			X	X	X		X	X			50	0.80 - 0.92
FHWA (1999)			X		X					X	200	0.53 - 0.92
Schurr et al. (2002)		X		X	X						40	0.96
Mawjound A. (2008)	X	X	X	X	X	X	X	X	X		48	0.994-0.998
**จระพงค์ (2002)		X			X		X	X			254	0.627-0.674

X คือ ตัวแปรที่พิจารณา , *X คือตัวแปรที่มีนัยสำคัญ และ ** ได้แบบจำลองความเร็วเฉลี่ย

ตารางที่ 2.11 แสดงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเร็วขับขี่ 85 เปอร์เซ็นไทล์ของถนน 2 ช่องจราจร
สาขนอกเมือง ในทางตรง

ผู้วิจัย (ปี ค.ศ.)	Degree of curve	Deflection angle	รัศมีโค้ง	ความยาวโค้ง	ความยาวทางตรง	ความลาดชัน	รูปตัดทางขวาง	ความกว้างช่องจราจร	ความกว้างไหล่ทาง	ระการมองเห็น	ความเร็วขับขี่	ลักษณะภูมิประเทศ	โค้งดิ่ง	ความหนาแน่นของทางเชื่อม	จำนวนผู้ใช้จัดเก็บ	R ²
Cardoso et al. (1998)	* X		* X	X	* X	X		* X	* X			* X			80	0.65- 0.92
FHWA (1999)			* X		* X		X	X	X	X		X	X		162	0.20- 0.84
จิระพงศ์ (2002)		X				X		X	X						248	*

X คือ ตัวแปรที่พิจารณา, – คือ ไม่ได้แสดงให้ทราบ, **ได้แบบจำลองความเร็วเฉลี่ย, ***ไม่พบตัวแปรใดเลยที่เกี่ยวข้อง และ *X คือตัวแปรที่มีนัยสำคัญ

2.8.2 เกณฑ์ในการประเมินความสอดคล้องของทางหลวง 2 ช่องจราจรสาขนอกเมือง

Lamm et al.(1999) ศึกษาถึงเกณฑ์การประเมินการออกแบบเส้นทางและแนวคิดในประเทศเยอรมันโดยใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความโค้ง (Curvature Change Rate, CCR) เป็นตัวแปรในการหาความเร็วขับขี่ที่ 85 เปอร์เซ็นไทล์ ที่นำไปใช้ได้กับทางโค้งกลม โค้งสไปรอล โค้งกลับ และโค้งประกอบ สามารถประเมินการออกแบบทั้งเส้นทางออกแบบใหม่ และเส้นทางที่ต้องการปรับปรุงความปลอดภัยให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถควบคุมเส้นทางให้สอดคล้องกัน การศึกษาของ Lamm. ครอบคลุมในแถบยุโรป ตะวันออกกลาง และทางตอนเหนือของอเมริกา จากค่า CCR และแบบจำลองความเร็วขับขี่ประเมินความปลอดภัยโดยการประเมิน 1) ความสอดคล้องในการออกแบบ (Design Consistency) 2) ความสอดคล้องของความเร็วขับขี่ (Speed Consistency) 3) ความสอดคล้องของจลศาสตร์การขับขี่ (Driving Dynamic Consistency)

1) ความสอดคล้องในการออกแบบ (Design Consistency) จะพิจารณาความเร็วในเส้นทางที่เป็นส่วนประกอบโค้งเดียว เช่น ในทางโค้ง หรือ ทางตรง จากค่าแตกต่างของความเร็วออกแบบและความเร็วขับขี่ V_{85} มีค่าตามเกณฑ์ความปลอดภัย I ตามตารางที่ 2.2

2) ความสอดคล้องของความเร็วขับขี่ (Speed Consistency) เป็นการพิจารณาถึงความสอดคล้อง 2 ส่วนด้วยกัน คือ ค่าแตกต่างของความเร็วขับขี่ (Difference of Operating Speed) และ ความสัมพันธ์ของรัศมีโค้งในเบื้องหน้ากับ โค้งเบื้องหลัง (Relation Design) ตามเกณฑ์ความปลอดภัย II ในตารางที่ 2.2

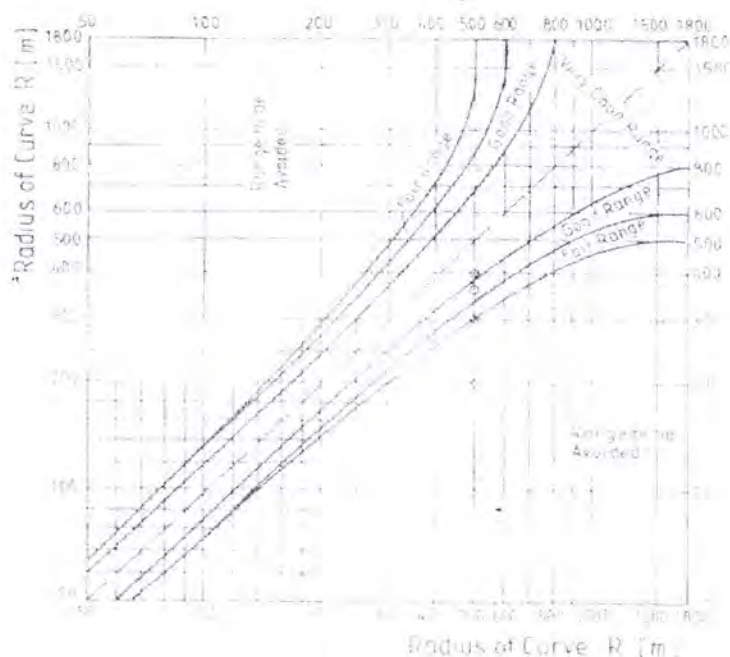
3) ความสอดคล้องของจลศาสตร์การขับขี่ (Driving Dynamic Consistency) เป็นการตรวจสอบ การออกแบบเส้นทางว่าอยู่ในเกณฑ์ ดี พอใช้ หรือไม่ดี ในลักษณะการประเมินความอันตรายของเส้นทาง จากความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid-resistance) และตรวจสอบความปลอดภัยโดยจลศาสตร์การขับขี่ (Driving Dynamic) ตามเกณฑ์ความปลอดภัยที่ III ตามตารางที่ 2.2

หลังจากที่ได้ประเมินทั้ง 3 เกณฑ์ความปลอดภัยแล้วจะทำการการกระจายน้ำหนักการให้ความสำคัญต่อระดับการออกแบบว่าอยู่ในเกณฑ์การออกแบบที่ดี พอใช้ และไม่ดีต่อไป

2.8.3 การพัฒนาและการประยุกต์แบบจำลองเพื่อวัดความสอดคล้อง (Consistency) ทางเรขาคณิตของทางหลวง

Lamm(1999) อ้างถึง Lippold(1995) กล่าวถึงคู่มือการออกแบบลักษณะเรขาคณิตของทางหลวงในประเทศเยอรมัน (The German guidelines for The design of roads) ให้มีความสอดคล้องกันเริ่มขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1973 โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการออกแบบแนวเส้นทาง (alignment) ที่ดี มีการเพิ่มรายละเอียดของส่วนประกอบโค้งราบ เพื่อให้เส้นทางมีความปลอดภัยมากขึ้น โดยเฉพาะการออกแบบ แบบแปลน, Profile และรูปตัดตามขวางของถนน ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดได้มาจากการศึกษาตรวจสอบการเกิดอุบัติเหตุ (Accident investigations) ในปี ค.ศ. 1953 และระหว่างปี ค.ศ. 1963-1966 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1968 คณะวิจัยได้ตั้งข้อสมมติฐานจากพฤติกรรมการขับขี่ ถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามงานศึกษาอุบัติเหตุ ให้พิจารณาที่ผลต่างของความเร็วเท่านั้น การตั้งข้อสมมติฐานดังกล่าวจึงนำมาซึ่งกราฟความสัมพันธ์ของรัศมีโค้ง ดังรูปที่ 2.9 โดยกราฟแสดงถึงการออกแบบความสัมพันธ์ (Relation Design) ให้กำหนดขนาดของรัศมีทางโค้งระหว่างโค้ง 2 โค้งที่ต่อเนื่องกันควรมีการลด/เพิ่ม รัศมีโค้งในลักษณะการพิจารณาในทางตรงกันข้ามกัน กล่าวคือการออกแบบให้รัศมีโค้งเกิดความสมดุลกันดี (well-balanced) ตามหลัก

ของความปลอดภัยดังตัวอย่างการคำนวณรัศมีโค้ง นับเป็นผลสำเร็จต่อการออกแบบถนน จากนั้นเป็นต้นมาการออกแบบทางหลวงในเยอรมนีจึงใช้กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวออกแบบถนนสายนอกเมือง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงการออกแบบลักษณะเรขาคณิตของแนวเส้นทางใหม่ในขณะนั้น

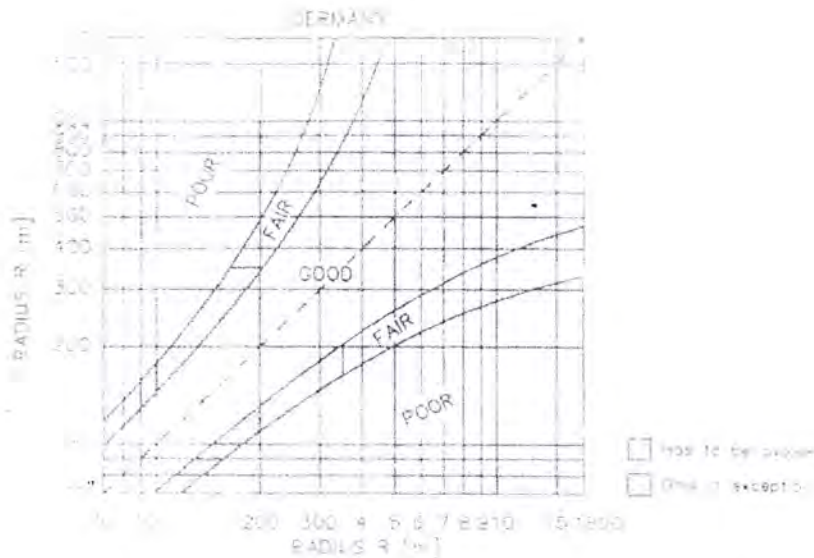


รูปที่ 2.9 กราฟแสดงการออกแบบความสัมพันธ์ของรัศมีโค้งสำหรับทางหลวงนอกเมืองในประเทศเยอรมนี ปี ค.ศ.1973

ที่มา: Lamm (1999: P9.70)

จากพื้นฐาน Relation Design ได้มีการปรับปรุงกราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบทางหลวงให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของผู้ใช้ทางในปัจจุบัน หลังจากที่ได้ใช้กราฟที่ 2.9 มานานเกือบ 2 ทศวรรษ ตามรูปที่ 2.10 การประยุกต์ใช้กราฟที่ 2.9 เพื่อออกแบบแนวเส้นทาง ค่าของรัศมีโค้งจะดีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเป็น Curvileneur alignment

Curvileneur alignment คือการพิจารณารูปแบบของแนวเส้นทางของ โค้งยาว-ทางตรงสั้น-โค้งยาว ซึ่งตรงกันข้ามกับที่พบเห็นโดยมากในถนนสายนอกเมือง ที่มีรูปแบบ ทางตรงยาว-โค้ง ลักษณะเช่นนี้จะก่อให้เกิดผลต่างของความเร็วมาก



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการออกแบบความสัมพันธ์ของรัศมีโค้งสำหรับทางหลวงนอกเมืองในประเทศเยอรมนี ปี ค.ศ.1993

ที่มา: Lamm (1999: P9.74)

ดังนั้นลำดับต่อไปเป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ต่อการประเมินการออกแบบใหม่ และแก้ไขแนวเส้นทางที่มีอยู่เดิมให้เป็นลักษณะ Curvilinear ลักษณะแนวเส้นทางรูปแบบ Curvilinear ใช้ได้ดีมากเมื่อลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขา และทำให้การจราจรนั้นมีความปลอดภัย Curvilinear alignment ที่มีอยู่ในลักษณะเรขาคณิตระหว่างโค้งราบและโค้งดิ่งจะทำให้ผู้ขับขี่รับรู้ และเกิดความสุนทรียภาพ ในแนวเส้นทางหลวงลักษณะเสมือนจริง (three-dimensional highway alignment) Curvilinear จึงเปรียบเสมือนเป็นเครื่องมือในการออกแบบแนวเส้นทางให้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม กรณีศึกษาในลักษณะเรขาคณิตทางราบ หรือเนินเขา การแก้ไขการออกแบบโดยลักษณะ Curvilinear ไม่ใช่ทางออกที่ดีที่สุด เพราะในรูปของ Relation Design เป็นการขยายเขตทางรอบข้าง ซึ่งมีข้อดีทำให้เกิดรูปแบบ Curvilinear alignment รูปแบบดังกล่าวจะทำให้เกิดการสมดุลกันดีระหว่างทางตรง(ยาว)และโค้ง ส่วนข้อเสียใช้เขตทางในการก่อสร้างทางหลวงมากขึ้น และสิ่งที่สำคัญมากไปกว่านั้น คือการประยุกต์ตัวแปรลักษณะภูมิประเทศ ให้สัมพันธ์กับพื้นที่ของทางหลวง และความต้องการทางด้านเศรษฐกิจ การออกแบบทางหลวงจึงจะต้องพิจารณารูปแบบที่เหมาะสม เช่นการพิจารณารูปแบบ โค้งยาว-ทางตรงสั้น-โค้งยาว หรือ ทางตรงยาว-โค้ง-ทางตรงยาว อย่างหนึ่งอย่างใดหรือรวมหลายรูปแบบเข้าด้วยกัน

ตัวอย่างแสดงการออกแบบความสัมพันธ์ (Relation Design) จากกราฟความสัมพันธ์ของรัศมีตามรูปที่ 2.10

จากแบบจำลองความเร็วขับขี่ในประเทศเยอรมนี (Germany, ISE)

$$V_{85} = \frac{10^6}{8270 + 8.01CCR}$$

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดรัศมีของโค้งให้, $r = 1000$ m.

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่า CCR จากแบบจำลองความเร็วขับขี่ Germany (ISE)

$$CCR = \frac{63,700}{r}$$

$$CCR = \frac{63,700}{1000} = 63.7 \text{ gon/km.}$$

ขั้นตอนที่ 3 นำค่า CCR ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 แทนค่ากลับเข้าไปในแบบจำลอง Germany (ISE)

$$V_{85} = 114 \text{ km/h}$$

ขั้นตอนที่ 4 หากพิจารณาผลต่างของความเร็ว Good design คือ 10 km/h และ Fair design คือ 15 km/h ดังนั้นความเร็วขับขี่จึงได้

$$V_{85} = 104 \text{ km/h, Good design}$$

$$V_{85} = 99 \text{ km/h, Fair design}$$

ขั้นตอนที่ 5 นำค่าความเร็วขับขี่ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 หาค่ารัศมีของโค้งโดยแทนค่ากลับเข้าไปแบบจำลอง Germany (ISE) เพื่อหา CCR และหารัศมีของโค้งตามสมการของขั้นตอนที่ 2

สำหรับ Good design $CCR=169 \text{ gon/km.}$

และ $r = 377 \text{ m.}$

สำหรับ Fair design $CCR = 230 \text{ gon/km.}$

และ $r = 277 \text{ m.}$

ขั้นตอนที่ 6 หากพิจารณาจากกราฟตามรูปที่ 2.10 จะพบว่าเมื่อกำหนดค่ารัศมีโค้งที่ 1000 ม. อ่านจากกราฟผ่านในทางแนวราบตัดกับเส้นกราฟลากผ่านลงในแนวดิ่งทำให้ได้ค่ารัศมีของโค้งต่ำสุด 377 m. และ 277 m. เป็น Good design และ Fair design ตามลำดับ

จากขั้นตอนการคำนวณและการใช้กราฟแสดงให้เห็นว่าการหาค่ารัศมีโค้งสามารถออกแบบรัศมีโค้งให้มีขนาดที่เหมาะสมกับความเร็วขับขี่ที่ได้จากแบบจำลอง โดยการประยุกต์ใช้ผลต่างของความเร็วจากเกณฑ์ความปลอดภัย เพื่อให้รัศมีของโค้งใช้พื้นที่เขตทางน้อยที่สุดอีกทั้งยังคงให้ความปลอดภัยกันของแนวเส้นทางอยู่ในระดับความปลอดภัยที่ต้องการ

NCHRP REPORT 500, 502 และ 504 เป็นรายงานที่รวบรวมโดย AASHTO และ FHWA เพื่อใช้ในการตรวจสอบความปลอดภัยของถนน มีวัตถุประสงค์อยู่ 2 ประการคือ 1) รวบรวมลักษณะทางหลวงในแนวโค้งราบ และแนวโค้งดิ่งที่ส่งผลต่อความไม่สอดคล้อง รวมไปถึงลักษณะทางเรขาคณิตอื่นๆ เช่น ทางร่วมทางแยก, (โดยเฉพาะในโค้งราบ และโค้งดิ่ง) Driveways, Lane drops, การลดความกว้างของช่องจราจร, การลดความกว้างของไหล่ทาง, และการเปลี่ยนชนิดของไหล่ทาง เป็นต้น 2) เพื่อนำความไม่สอดคล้องที่ได้รวบรวมไว้ใน NCHRP ไปประยุกต์ใช้เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการตรวจสอบความปลอดภัยที่พัฒนาขึ้นจากแบบจำลองความเร็วขับขี่ของ FHWA พัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IHSDM ใช้ในการตรวจสอบปรับปรุงการออกแบบทางเรขาคณิตให้มีความสอดคล้องกัน อีกทั้งคู่มือ NCHRP ยังจัดเตรียมไว้เพื่อปรับปรุงการออกแบบทางเรขาคณิตให้สอดคล้องกับมาตรฐานของ AASHTO

IHSDM เป็นโปรแกรม Interactive Highway Safety Design Model ที่ใช้ในการประเมินความปลอดภัยและใช้แสดงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในถนน 2 ช่องจราจรสายขนบพ ของประเทศสหรัฐอเมริกา หลังจากช่วงปลายทศวรรษ 1980 สหรัฐอเมริกาได้เริ่มตระหนักถึงความบกพร่องด้านการออกแบบทางเรขาคณิตของถนน ต่อมาในปี 1988 Transportation Research Board (TRB) ได้เริ่มทำการวิจัยถึงการออกแบบทางเรขาคณิตที่อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัย ซึ่งในปีเดียวกัน Federal Highway Administration (FHWA) ได้วิจัยและพัฒนาการออกแบบถนนในรูปแบบบูรณาการ ที่สามารถช่วยผู้ออกแบบถนนประเมินความเหมาะสมของการออกแบบถนน โดยคำนึงถึง “ความปลอดภัย” เป็นหลัก ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการพัฒนาโปรแกรม Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM) ตรวจสอบ Consistency ของถนน โดยใช้คอมพิวเตอร์ Computer-Aided Design (CAD) IHSDM ประกอบด้วยโมดูลที่ใช้เป็น

เครื่องมือประเมินถนนทั้งถนนเดิมและถนนใหม่ ตามหลักความปลอดภัย และประสิทธิภาพการดำเนินงานตามการออกแบบ

โมดูลการตรวจสอบที่น่าสนใจคือ การศึกษาถึงวิธีการตรวจสอบ Consistency ของถนนโดยใช้ความเร็ว หรือ Design Consistency Module (DCM) ซึ่งมีวิธีการตรวจสอบดังนี้

1) การคาดการณ์ระดับความแตกต่างของความเร็วขับขี่ V_{85} ต่อความเร็วออกแบบ (Design vs. Operating Speed) โปรแกรมจะประมาณค่าความเร็วขับขี่ V_{85} ตามแบบจำลองของ FHWA แล้วนำมาเปรียบเทียบกับความเร็วออกแบบดังนี้ การออกแบบที่ดี $(V_{85} - V_d) \leq 10 \text{ km/h}$ การออกแบบพอใช้ $10 \text{ km/h} < (V_{85} - V_d) \leq 20 \text{ km/h}$ และการออกแบบที่ไม่ดี $(V_{85} - V_d) > 20 \text{ km/h}$

2) การคาดการณ์ระดับความเร็วขับขี่ที่ลดลงในส่วนรอยต่อของทางตรงและทางโค้ง โปรแกรมจะประมาณค่าความเร็วขับขี่ V_{85} ตามแบบจำลองของ FHWA แล้วนำมาประมาณค่าความเร็วขับขี่ที่ลดลงขณะที่ผู้ขับขี่เปลี่ยนทิศทางจากทางตรงเข้าสู่โค้งตามเงื่อนไขดังนี้ การออกแบบที่ดี $(V_{85} - V_{85r}) \leq 10 \text{ km/h}$ การออกแบบพอใช้ $10 \text{ km/h} < (V_{85} - V_{85r}) \leq 20 \text{ km/h}$ และการออกแบบที่ไม่ดี $(V_{85} - V_{85r}) > 20 \text{ km/h}$

หลังจากที่ได้พิจารณาจากเงื่อนไขของ Alignment ทั้งหมด ในแบบจำลอง IHSDM จะปรับแก้ความเร็วขับขี่ตามแบบจำลองของ FHWA เป็นอัตราการเร่งและการชะลอที่เหมาะสมตามเงื่อนไขดังนี้

Deceleration Rate, d (m/s ²)	Acceleration Rate, a (m/s ²)	Design Consistency (All Alignment Conditions)
1.00 to 1.48	0.54 to 0.89	Good Design
1.48 to 2.00	0.89 to 1.25	Fair Design
>2.00	>1.25	Poor Design

ที่มา : FHWA, PUBLICATION NO. 99-171, 2000

การปรับแก้ความเร็วขั้วซึ่งเป็นอัตราเร่งและการชะลอ มีเหตุผลเนื่องมาจากแบบจำลองของ FHWA ได้สร้างขึ้นจากตัวแปร Degree of curve หรือ Inverse radius ($1/r$) ซึ่งได้มาจากโค้งเดียวจึงทำให้มีข้อจำกัดกับโค้งที่มีลักษณะเป็นโค้งเปลี่ยน โค้งกลับ โค้งผสม และโค้งลักษณะที่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าว FHWA จึงได้ปรับแก้วิธีการตรวจสอบความสอดคล้องของถนนในขั้นตอนสุดท้าย ด้วยการตรวจสอบอัตราเร่งและการชะลอ

ข้าราชการ จงกมลวิวัฒน์ (2544) นำเอาหลักการออกแบบแนวเส้นทางให้มีความสอดคล้องของประเทศเยอรมันมาพัฒนาโปรแกรม เพื่อช่วยประเมินความปลอดภัยในการออกแบบความเร็ว และระยะมองเห็น กำหนดแนวเส้นทางสำหรับทางหลวงนอกเมือง 2 ช่องทางเกณฑ์ประเมินความปลอดภัยพิจารณาจากความสอดคล้องในการออกแบบ ความสอดคล้องของความเร็ว ระยะมองเห็นที่เพียงพอต่อการหยุดรถ และแซงอย่างปลอดภัย โปรแกรมที่พัฒนานั้นเขียนโดยใช้ภาษา AutoLISP ซึ่งเป็นโปรแกรมคำสั่งที่ทำงานภายใต้โปรแกรม AutoCAD และใช้โปรแกรม Softdesk เตรียมข้อมูลป้อนเข้าสู่โปรแกรม

โปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนามี 2 ส่วน คือ 1) โปรแกรมประเมินความเร็วขั้ว: หาความเร็วขั้วของยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนแนวเส้นทางของรถยนต์นั่งและรถบรรทุกโดยใช้วิธีการหาความเร็วจากเกณฑ์การประเมินความปลอดภัยของประเทศสหพันธรัฐเยอรมัน และ Leisch ตามลำดับ 2) โปรแกรมประเมินระยะมองเห็น : คำนวณระยะมองเห็นโดยใช้วิธี Graphic แบ่งเป็นระยะมองเห็นแนวทางตั้งและแนวทางราบ ตามวิธีการของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) และทำการประเมินประสิทธิภาพการมองเห็นตาม Highway Capacity Manual (HCM) วิธีการออกแบบแนวเส้นทางให้มีความปลอดภัยโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาแสดงโดยใช้ข้อมูลโครงการสะพานข้ามลำน้ำแควน้อย พบว่าวิธีการออกแบบข้างต้นและโปรแกรมที่พัฒนาสามารถช่วยวิศวกรให้ทราบจุดบกพร่องของแนวเส้นทาง ลดระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบทำให้ออกแบบแนวเส้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพและแนวเส้นทางมีความปลอดภัย

ชลัท ทินาการเกียรติ (2548) ได้ศึกษาถึงการใช้โปรแกรม U.S. Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM) โดยเลือกเส้นทางตัวอย่างหมายเลข ทล.410 สายปัดตานี – ยะลา เป็นระยะทางประมาณ 35 กม. ผลจากการศึกษาพบว่า IHSDM สามารถช่วยให้ผู้ออกแบบพิจารณาปรับปรุงลักษณะทางเรขาคณิตของเส้นทางเพื่อให้เกิดความปลอดภัยโดยนำแบบแปลนมาประเมินหาบริเวณที่มีความเสี่ยงเกิดอุบัติเหตุอันจะนำมาสู่การปรับปรุงลักษณะทางเรขาคณิตที่มีความเสี่ยงที่สามารถทำได้ตั้งแต่ขั้นการออกแบบเบื้องต้น, ออกแบบรายละเอียดและการบูรณะ

ก่อสร้างวางแผนเส้นทางใหม่ ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาถึงผลการประเมินตรวจสอบสายทางตัวอย่าง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสถิติอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจริง

2.8.4 สิ่งที่ได้รับจากการศึกษารายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวทางการพัฒนาแบบจำลอง

1) แบบจำลองความเร็วขับขี่ในประเทศต่างๆแถบยุโรป เกิดขึ้นอยู่หลายแบบจำลอง แต่ละแบบจำลองมีการพยายามหาตัวแปรที่สำคัญ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับอุปนิสัยการขับขี่ในแต่ละประเทศ หรือเหมาะสมกับลักษณะภูมิประเทศนั้นๆ และส่วนใหญ่ตัวแปรที่สำคัญต่อความเร็วขับขี่ในโค้งจะเป็น CCR, Degree of Curve, Deflection angle และรัศมีโค้ง ในส่วนของทางตรงตัวแปรที่สำคัญจะเป็น ความยาวของช่วงถนน ความกว้างของช่องจราจร และรัศมีโค้งในเบื้องต้นกับเบื้องหลังทางตรง

2) การออกแบบความเร็วในโค้งหรือทางตรงก่อนเข้าโค้งตาม AASHTO มีข้อบกพร่องที่ไม่ได้คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วขับขี่เมื่อลักษณะเส้นทางเกิดการเปลี่ยนแปลงแนวเส้นทาง ซึ่งไม่สอดคล้องกับอุปนิสัยการขับขี่ที่ทำให้ความเร็วออกแบบบางช่วงอาจมีค่าต่ำกว่าความเร็วขับขี่ เป็นเหตุให้แนวเส้นทางที่ออกแบบไม่ปลอดภัย

3) วิธีการใช้ค่า CCR ของ Lamm เป็นตัวแปรในแบบจำลอง Regression สามารถใช้ได้กับโค้งราบทุกประเภท และมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เนื่องจากมีเงื่อนไขที่ไม่ซับซ้อนง่ายต่อการแก้ไขและตรวจสอบ

4) การกำหนดให้รถยนต์วิ่งด้วยความเร็วคงที่ในโค้งราบ ยังมีข้อจำกัดที่ไม่เหมาะสมสำหรับแนวทางราบที่มีความลาดชันเกินกว่า 4% หรือ 5% ขึ้นไป เนื่องด้วยความลาดชันจะส่งผลกระทบต่อความเร็วขับขี่

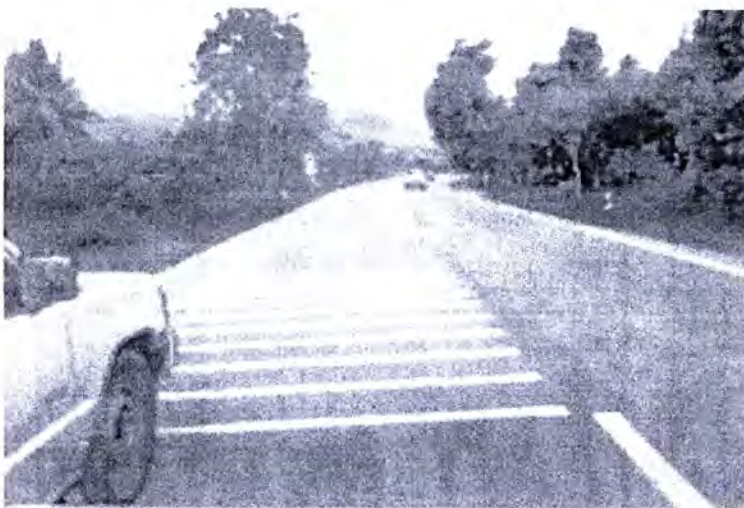
5) เกณฑ์การประเมินและวิธีการพัฒนาแบบจำลองความเร็วควรยึดวิธีการของ Lamm และ FHWA เป็นหลัก เนื่องจากสะดวกต่อการพัฒนา มีเกณฑ์การประเมินความปลอดภัยที่ชัดเจน

6) FHWA ได้สร้างโปรแกรมเพื่อประเมินความสอดคล้องของถนน 2 ช่องจราจรสายชนบท มีชื่อว่าโปรแกรม IHSDM ซึ่งมีอยู่ 5 โมดูลส์ด้วยกัน งานศึกษาที่พบในประเทศไทยของชลัท (2548) ได้นำโปรแกรม IHSDM มาทดลองศึกษาใช้กับถนนในจังหวัดสงขลา และปัตตานี โดยใช้แบบจำลองความเร็วที่มีอยู่ในโปรแกรม

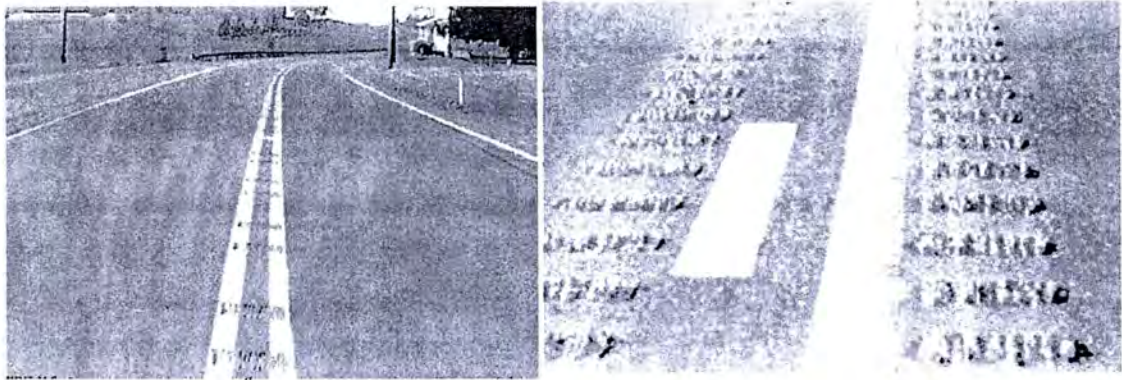
7) งานศึกษาของ ชำรงลักษณ์ (2544) นำโปรแกรม AutoCad มาใช้พัฒนาโปรแกรมในประเทศไทยเพื่อประเมินความปลอดภัยในการออกแบบ ความเร็วขับขี่ และระยะการมองเห็น ซึ่งใช้ภาษา AutoLisp ใน AutoCad แต่ยังคงใช้แบบจำลองความเร็วขับขี่ของประเทศเยอรมันในการสร้างโปรแกรม จากแนวทางการพัฒนาโปรแกรมในครั้งนี้ผู้ศึกษาจึงต้องการพัฒนาให้โปรแกรมสามารถประมวลผลโดยใช้แบบจำลองความเร็วขับขี่ในประเทศไทย และยึดถือการใช้คำสั่ง Visual Basic for Applications (VBA) ร่วมกับ AutoLisp เป็นโปรแกรมในการพัฒนาต่อไป เนื่องด้วยการออกแบบถนนในปัจจุบันส่วนใหญ่ได้ใช้ AutoCad ในการทำงาน

2.9 ตัวอย่างมาตรการในการลดความเร็วบริเวณช่วงทางตรงและช่วงทางโค้ง

หลังจากที่ได้ทำการประเมินการออกแบบ หรือตรวจสอบความสอดคล้องของแนวเส้นทางแล้ว ต่อไปเป็นการแก้ไขปัญหามติบริเวณจุดที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ คือในช่วงที่เป็น Fair Design หรือ Poor Design ซึ่งเกิดจากผลต่างของความเร็วขับขี่ที่มีค่าเกินกว่าเกณฑ์ความปลอดภัย การแก้ไขปัญหามติบริเวณจุดดังกล่าวจึงเป็นการลดความเร็วให้ผู้ใช้ทางหลวงชะลอความเร็วให้เหมาะสมกับแนวเส้นทางที่มีอยู่ และต้องสอดคล้องกับส่วนประกอบทางหลวงในช่วงถัดออกไป มาตรการลดความเร็วมีหลายรูปแบบ ได้ยกตัวอย่างของกรมทางหลวงและจากรายงานการศึกษการสยบการจราจรบนทางหลวงสายหลักนอกเมือง (Traffic Calming on Main Roads Through Rural Communities) (FHWA, 2009) แสดงอยู่ในรูปดังต่อไปนี้

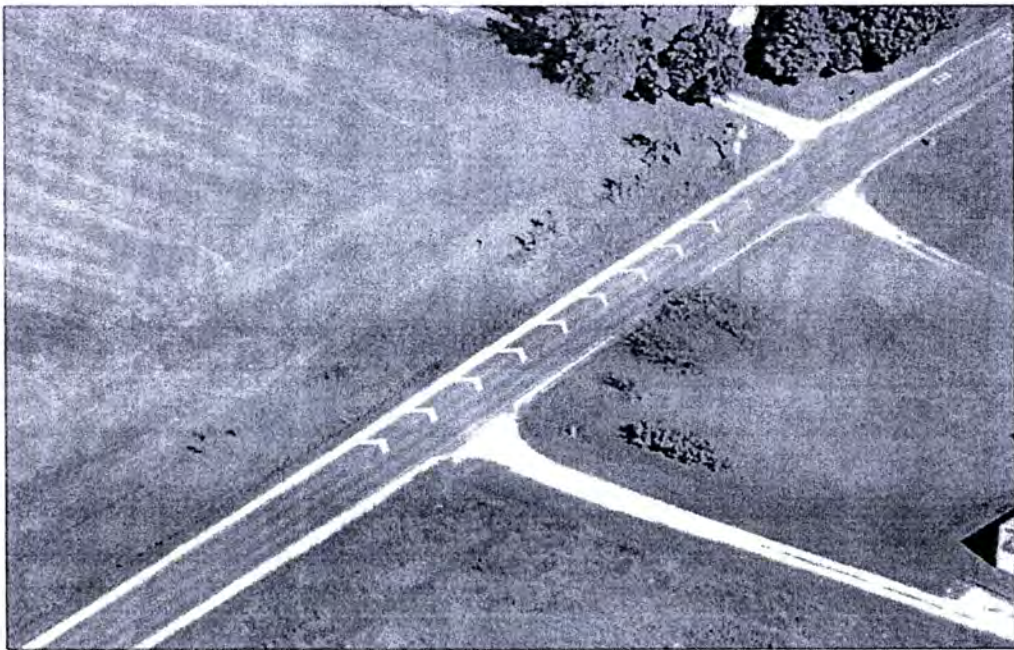


รูปที่ 2.11 แสดง Rumble Strip เพื่อให้ผู้ขับขี่ได้ยินเสียงรบกวนจากการใช้ความเร็วที่มาก: <http://www.doh.go.th>, กรมทางหลวง



รูปที่ 2.12 แสดง Centerline Rumble Strips เพื่อให้ผู้ขับขี่ได้ยินเสียงรบกวนจากการใช้ความเร็ว และช่วยรบกวนการวิ่งลัดทางโค้ง

ที่มา: NCHRP REPORT 500: V18-V19



รูปที่ 2.13 แสดง chevron markings เพื่อให้ผู้ขับขี่รู้สึกได้ถึงความเร็วที่เพิ่มขึ้น ทั้งที่ผู้ขับขี่ไม่ได้เพิ่มความเร็ว ซึ่งให้ความรู้สึกต่อผู้ขับขี่ที่ต้องการลดความเร็ว

ที่มา: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08067/index.cfm>



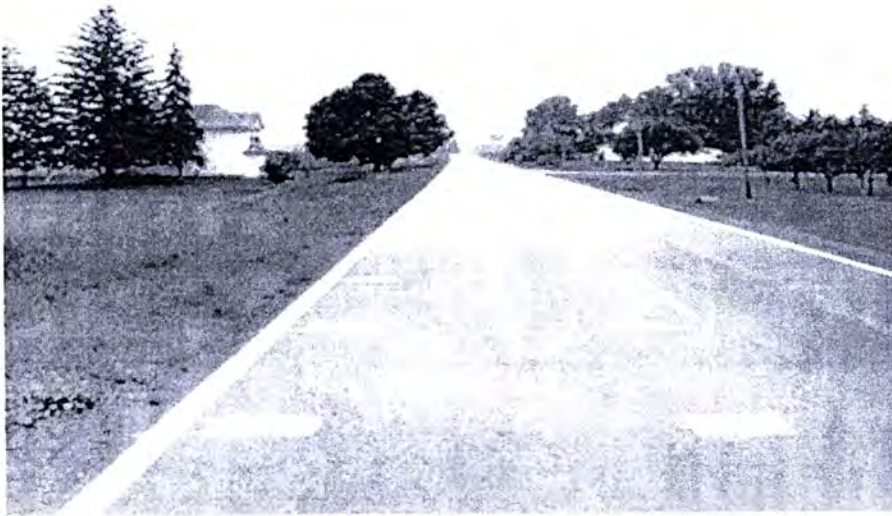
รูปที่ 2.14 แสดงเครื่องหมายที่ผิวทางข้างทาง เพื่อให้ผู้ขับขี่รู้สึกถึงความแคบของช่องจราจร แต่ไม่เป็นการลดขนาดความกว้างของช่องจราจร

ที่มา: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08067/index.cfm>



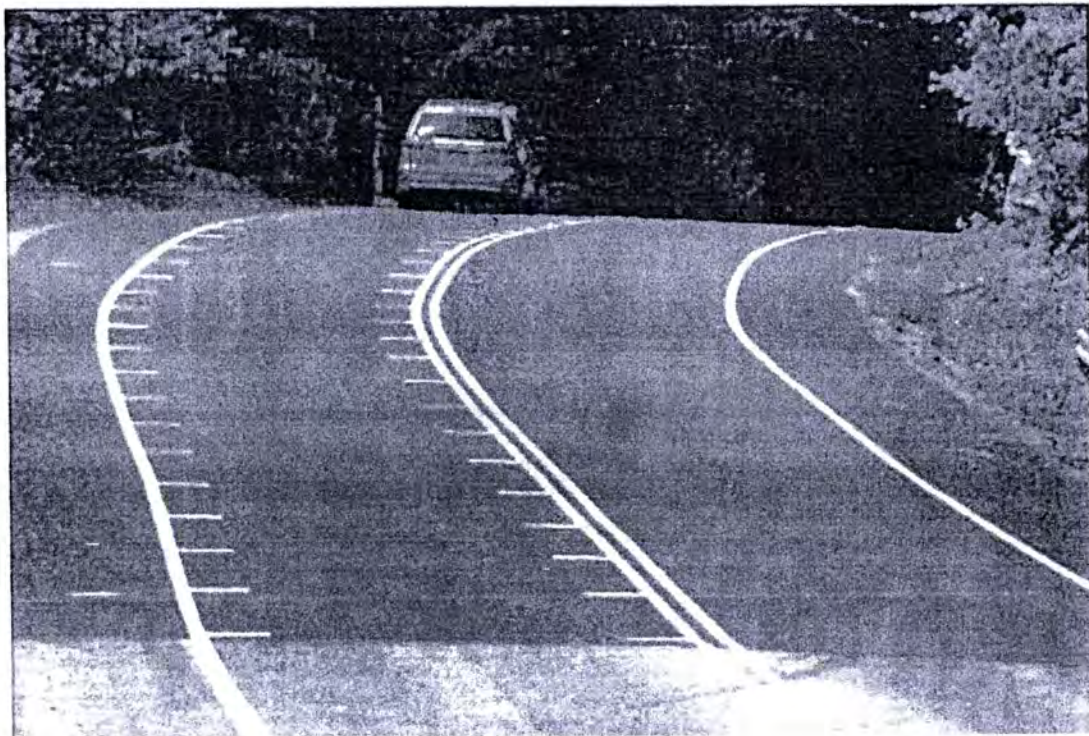
รูปที่ 2.15 แสดง Tubular channelizing markers เพื่อให้ผู้ขับขี่รู้สึกถึงความแคบของช่องจราจร

ที่มา: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08067/index.cfm>



รูปที่ 2.16 เครื่องหมายบนผิวทางเป็นเส้นในแนวขวางเพื่อช่วยลดความเร็ว

ที่มา: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08067/index.cfm>



รูปที่ 2.17 เครื่องหมายบนผิวทางเป็นเส้นในแนวขวางเพื่อช่วยลดความเร็ว

ที่มา: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08067/index.cfm>



รูปที่ 2.18 แสดง Shoulder markings เครื่องหมายบนผิวไหล่ทางทำให้ผู้ขับขี่รู้สึกถึงความแคบของช่องจราจร เพื่อช่วยให้ผู้ขับขี่ลดความเร็ว

ที่มา: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08067/index.cfm>



รูปที่ 2.19 แสดง Speed limit markings เครื่องหมายบนผิวทางเป็นโทนสีแดง

ที่มา: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08067/index.cfm>