



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พฤติกรรมของทาง

พฤติกรรมของทาง หมายถึง การตอบสนองของทางที่มีต่อการใช้งานภายในช่วงเวลาที่น่าสนใจ (Haas, 1978) เป็นคำนิยามทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสภาพทาง หรือโครงสร้างของทางว่าสามารถรองรับการใช้งานได้ตามเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นเพื่อที่จะติดตามพฤติกรรมของทาง จึงต้องมีวิธีการประเมินโดยใช้ดัชนีชี้วัดสภาพทางและสร้างวิธีการพยากรณ์สภาพทางในอนาคตขึ้นมา ซึ่งสามารถทำได้ในหลายรูปแบบ เช่น ให้ความขรุขระของผิวทางเป็นดัชนีชี้วัดในรูปแบบของค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) ความสามารถในการบริการ (Present Serviceability Index, PSI) ค่าดัชนีสภาพทาง (Pavement Condition Index, PCI) หรือ ค่าระดับสภาพของทาง (Pavement Condition Rating, PCR) เป็นต้น

ทางมีพฤติกรรมในการเสื่อมสภาพตามอายุของการใช้งานไม่ว่าสายทางนั้นจะมีการใช้งานหรือไม่ก็ตาม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอกที่มีปฏิสัมพันธ์กับสายทาง โดยปัจจัยต่างๆทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพของทางด้วยอัตราที่แตกต่างกันไป สามารถจำแนกออกเป็น 5 กลุ่ม (Hass et. al., 2001) ได้แก่ 1) ปัจจัยที่เป็นผลกระทบจากการจราจร เช่น น้ำหนักของล้อและแรงดันลมในล้อ จำนวนครั้งของการบดทับซ้ำของน้ำหนักล้อ รัศมีของพื้นที่สัมผัสของล้อ ความเร็วของการขยับยานพาหนะ ฯลฯ 2) ปัจจัยที่เป็นผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม เช่น ปริมาณน้ำฝน อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ระดับน้ำใต้ดิน และการเคลื่อนตัวของชั้นดิน ฯลฯ 3) ปัจจัยที่เป็นผลกระทบจากโครงสร้างทาง เช่น ความหนาชั้นทาง สภาพดินเดิม จำนวนช่องทางจราจร และลักษณะการยกโค้ง ฯลฯ 4) ปัจจัยที่เป็นผลกระทบจากการก่อสร้าง เช่น คุณภาพการก่อสร้าง ความสะอาดของวัสดุผสม ความแข็งแกร่งของวัสดุ ฯลฯ 5) ปัจจัยทางด้านความเสียหายผิวทาง เช่น รอยแตก หลุมบ่อ

ความขรุขระของทางเป็นหนึ่งในดัชนีชี้วัดพฤติกรรมของทางที่สำคัญที่สุด เพราะพฤติกรรมความขรุขระของทางสามารถสะท้อนสภาพผิวทางในอนาคต เพื่อใช้ในการตัดสินใจวางแผนการซ่อมบำรุงและการบูรณะ อีกทั้งยังเป็นตัวชี้วัดค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางที่สำคัญที่สุด ดังนั้นในหลายหน่วยงานที่มีหน้าที่บริหารทางจึงเลือกใช้ความขรุขระของทางเป็นตัวแปรหลักในการวางแผนซ่อมบำรุงทาง (Shiyab, 2007)

2.2 ดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI)

ค่าดัชนีความขรุขระสากล (Paterson, 1987) ถูกเริ่มนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1982 เมื่อธนาคารโลก (World Bank) ได้รับความร่วมมือจากประเทศอังกฤษ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา และบราซิล เพื่อทำการทดลองวัดค่าความขรุขระของทางโดยใช้เครื่องมือหลากหลายชนิด บนทางหลวงทั่วประเทศบราซิล ภายใต้โครงการ International Road Roughness Experiment (IRRE) เพื่อที่จะรวบรวมแนวทางในการวัดค่าความขรุขระของทาง ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ แล้วหาความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระของทางที่วัดได้จากเครื่องมือแต่ละชนิด โดยได้ตั้งค่ามาตรฐานความขรุขระเป็นสากลขึ้นเรียกว่า ค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) มีหน่วยเป็น ม./กม. หรือ มม./ม.

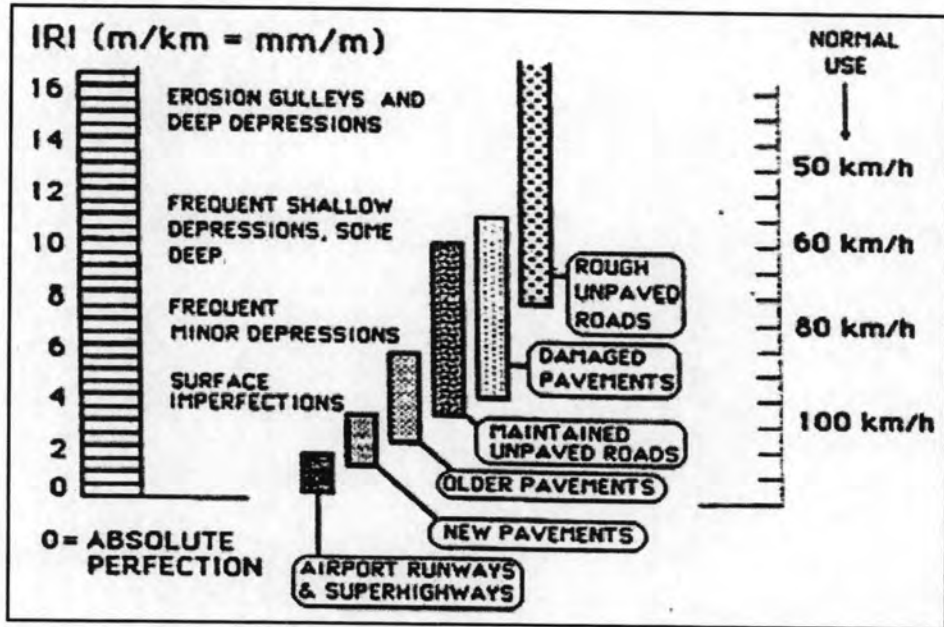
ความขรุขระของทางมีความสำคัญโดยตรงที่ส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายและความปลอดภัยของผู้ใช้ทาง จากการศึกษาของ AASHTO Road Test พบว่าร้อยละ 95 ของการให้บริการทางขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิวทาง ค่าความขรุขระของผิวทางจะเป็นตัวที่บ่งบอกว่าทางมีการบิดเบี้ยวของผิวทาง ความไม่สบายของผู้ใช้ทาง และคุณภาพการขับขี่ ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าดัชนีความขรุขระสากลกับสภาพทาง แสดงดังรูปที่ 2.1

การใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากล เพื่อสะท้อนสภาพความเสียหายของทางนั้นมีข้อดีคือสามารถเก็บข้อมูลสภาพของทางได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการวัดค่าดัชนีความขรุขระสากลในอดีตจะอาศัยเครื่องมือ Bump Integrator ที่ติดตั้งอยู่ในรถยนต์ที่เรียกว่า Quarter – car แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยค่าดัชนีความขรุขระของผิวทางสามารถคำนวณได้จากการสั่นสะเทือนขึ้น-ลงทั้งหมดของเพลาล้อรถต่อระยะทางที่เคลื่อนที่ไป ความเร็วที่ใช้ในการวัดอยู่ที่ประมาณ 80 กม./ชม. และแปลงมาเป็นค่าดัชนีความขรุขระสากล ซึ่งในปัจจุบันมีการนำเครื่องมือ Laser Profilometer มาใช้ในการเก็บค่า IRI ที่มีความละเอียดแม่นยำขึ้น แต่ข้อจำกัดของค่าดัชนีความขรุขระสากลคือ จะไม่แสดงชนิดหรือประเภทของความเสียหายทั้งหมด ซึ่งการตัดสินใจเลือกวิธีการซ่อมบำรุงนั้นจำเป็นต้องรู้ชนิดหรือประเภทความเสียหายว่าเป็นแบบใดด้วย

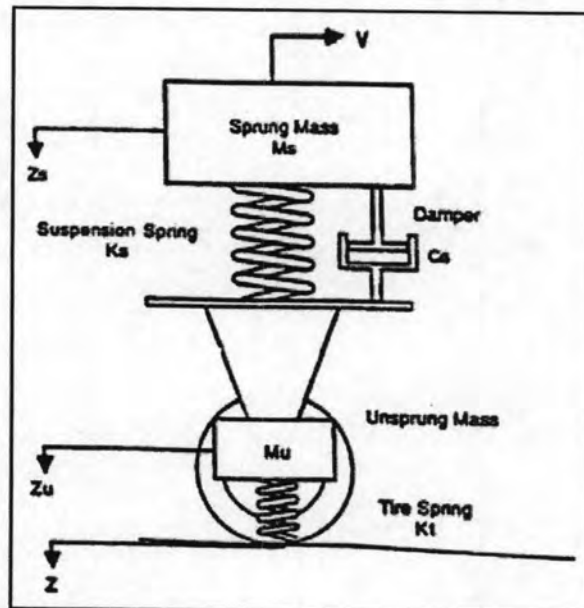
2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออาการเสื่อมสภาพผิวทาง

การเสื่อมสภาพผิวทางสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงก่อนและหลังการเกิดรอยแตก ในช่วงก่อนเกิดรอยแตก อัตราการเสื่อมสภาพทางจะเป็นไปอย่างช้าๆ โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างทางและสภาพแวดล้อม ใน 2 กรณีคือ ภายใต้การจราจรปริมาณต่ำ การเสื่อมสภาพทางจะเกิดจากปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและอายุสายทาง ปริมาณการจราจรจะไม่ส่งผลกระทบต่อ

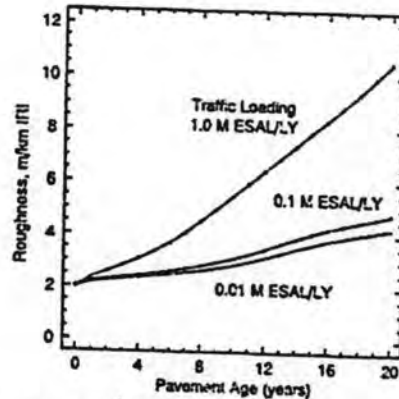
ต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง ในส่วนภายใต้ปริมาณการจราจรสูง การเสื่อมสภาพผิวทางจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างทาง และเมื่อถึงช่วงหลังเกิดรอยแตก อัตราการเสื่อมสภาพผิวทางจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และจะมากขึ้นอีกเมื่อสายทางเกิดความเสียหายหลุมบ่อ (Paterson and Attoh, 1992) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับสภาพทาง (Paterson, 1987)



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์วัดค่าดัชนีความขรุขระสากล (Paterson, 1987)

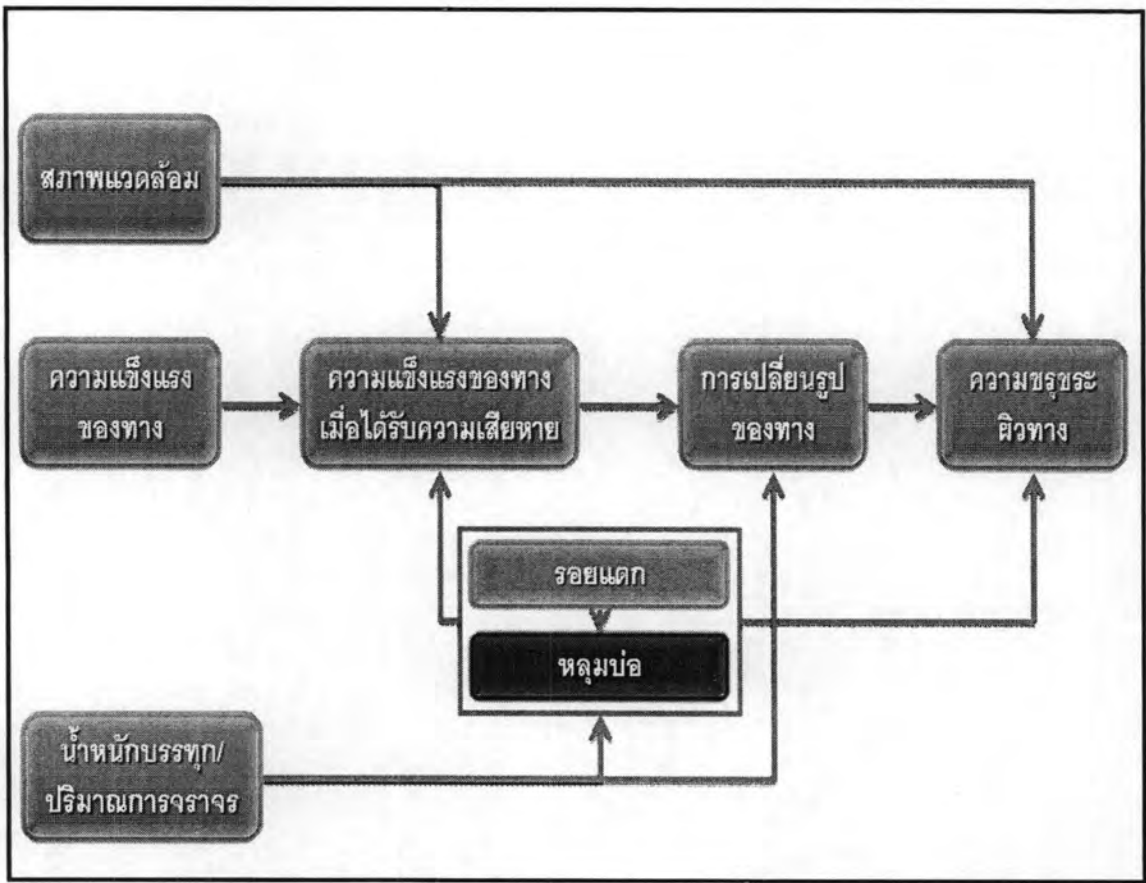


รูปที่ 2.3 พฤติกรรมของการเสื่อมสภาพทาง (Paterson and Attoh, 1992)

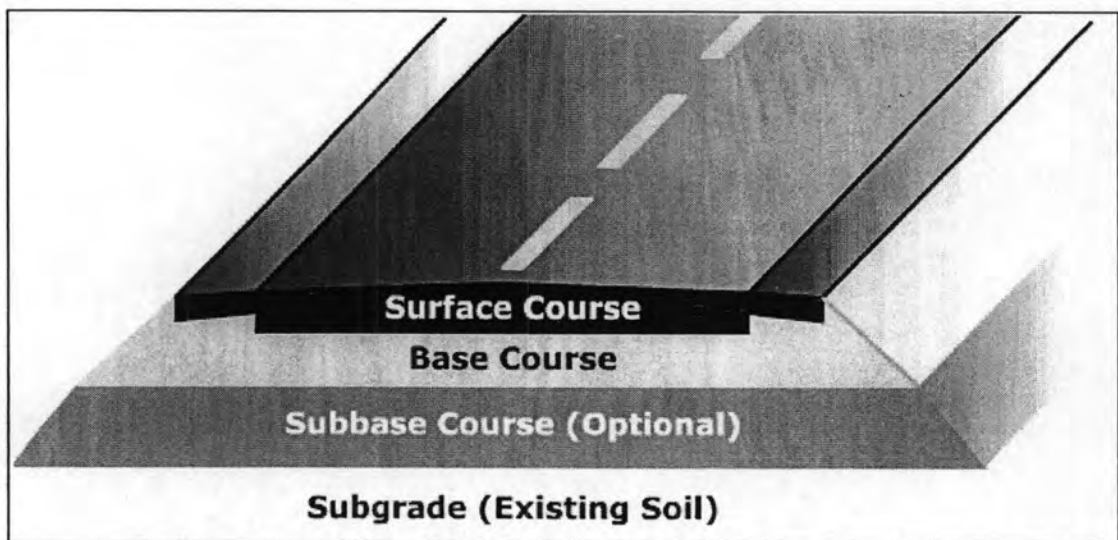
ความขรุขระของทางเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัยและสามารถจำแนกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้เป็น 5 ประเภท (Attoh-Okine, 2005) คือ ปัจจัยทางด้านโครงสร้างทาง ปัจจัยทางด้านปริมาณการจราจร ปัจจัยทางด้านสภาพผิวทาง ปัจจัยทางด้านการก่อสร้าง และปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีทั้งปัจจัยที่ไม่ขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ (Morosiuk, 2004) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระของผิวทางดังรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักบรรทุก ความแข็งแรงโครงสร้างทาง และสภาพแวดล้อมเป็นปัจจัยที่ไม่ขึ้นกับปัจจัยใดๆ แต่ในส่วนของรอยแตกรั้นขึ้นอยู่กับการใช้งาน ความแข็งแรงของโครงสร้างทาง และปริมาณการจราจร ในขณะที่ความเสียหายหลุมบ่อเป็นปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับการใช้งาน รอยแตก ซึ่งปัจจัยทั้งหมดส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของความขรุขระของทาง

2.3.1 ปัจจัยทางด้านโครงสร้างที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของทาง

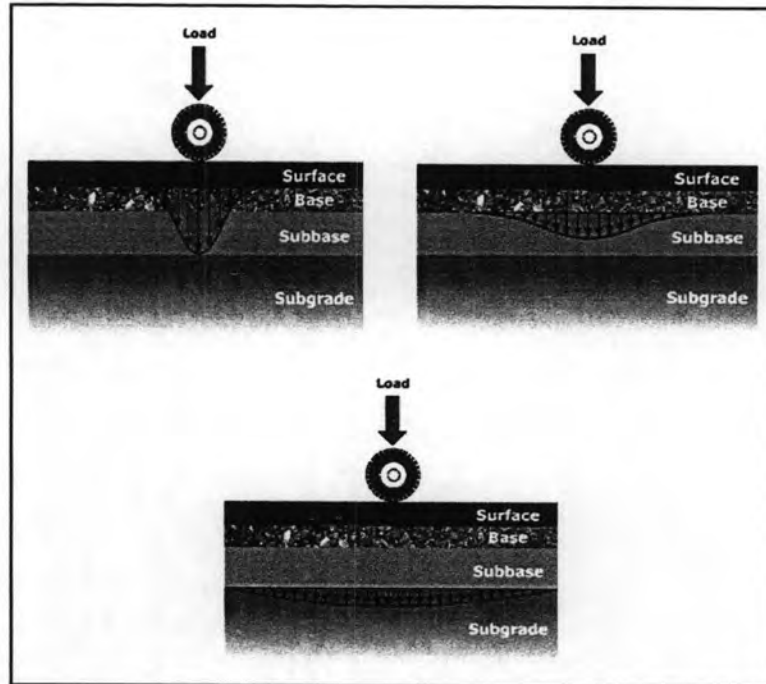
โครงสร้างหลักของทางประกอบไปด้วย ผิวทาง พื้นทาง รองพื้นทาง และดินคั่นทาง ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.5 ผิวทางมีหน้าที่รับน้ำหนักจากล้อยานพาหนะและถ่ายแรงลงสู่พื้นทาง รองพื้นทาง จนถึงชั้นดินเดิม ซึ่งความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นทางต่างๆ ขึ้นอยู่กับ ความแข็งแรงของวัสดุ การก่อสร้าง และการออกแบบ ชั้นทางแต่ละชั้นทำหน้าที่รับแรงจากชั้นทางที่อยู่ข้างบน แล้วส่งกระจายแรงไปสู่ชั้นทางที่อยู่ด้านล่าง ดังรูปที่ 2.6 ยิ่งเป็นชั้นทางที่อยู่ต่ำลงไปยิ่งมีการกระจายแรงมากและรับแรงน้อยลงตามลำดับ โดยทางจะสามารถรักษาความแข็งแรงไว้ได้เมื่อทางสามารถป้องกันการสึกกร่อนของผิวทาง (Abrasion) ป้องกันการชำรุดเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Failure) ในชั้นใต้ผิวทาง และสามารถป้องกันความชื้นหรือน้ำฝนที่จะซึมลงไปทำลายโครงสร้างของทางได้ (จิรพัฒน์ ไซติกไกร, 2529)



รูปที่ 2.4 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อความขรุขระของทาง (HDM-4, 2000)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของสายทางประเภทผิวทางยึดหยุ่น (WAPA, 2002)



รูปที่ 2.6 การกระจายน้ำหนักชั้นทางของทางประเภทผิวทางยืดหยุ่น (WAPA, 2002)

การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างสามารถใช้ดัชนีชี้วัดความแข็งแรงโครงสร้างทาง Structural Number (SN) ที่กำหนดขึ้นโดย Highway Research Board (1962) โดยพิจารณาโครงสร้างทางแต่ละชั้นว่ามีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปตาม ชนิดของวัสดุ ความหนาของชั้นทาง และค่าสัมประสิทธิ์แต่ละชั้นทาง (Layer Coefficient) ซึ่งจากลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถนำมาหาค่าความแข็งแรงของทางได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Structural Number ดังนี้

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i h_i \quad (2.1)$$

$$SN = \text{Structural Number}$$

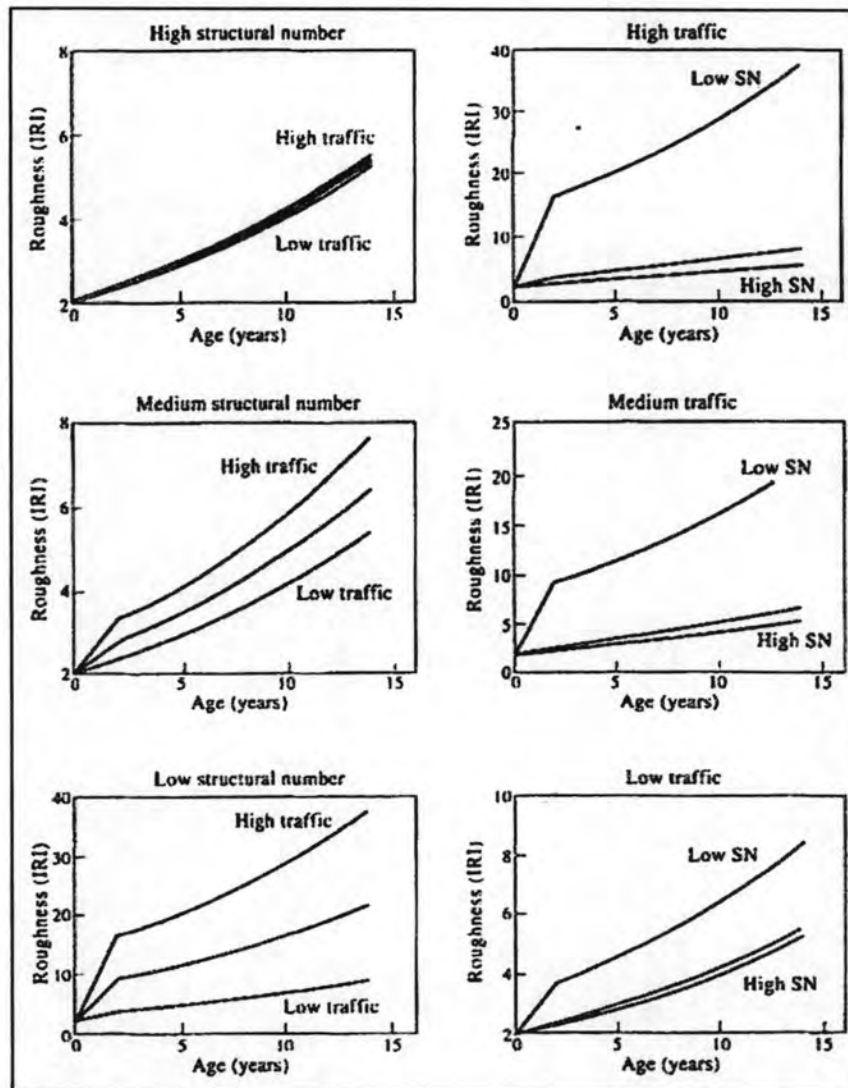
โดยที่

$$a_i = \text{สัมประสิทธิ์ของวัสดุแต่ละชั้นทาง}$$

$$h_i = \text{ความหนาของชั้นวัสดุ (นิ้ว)}$$

Attoh-Okine (1994) ทำการวิจัยผลกระทบของความแข็งแรงในชั้นโครงสร้างทางและปริมาณการจราจรที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง โดยนำแบบจำลองการเสื่อมสภาพทางที่พัฒนา ร่วมกับ Paterson (1992) จากแบบจำลองการเสื่อมสภาพต้นแบบของ World Bank มาเปรียบเทียบการเสื่อมสภาพผิวทางระหว่างสายทางที่มีความแข็งแรงโครงสร้าง สูง ($SN > 3.5$)

ปานกลาง ($1.5 \leq SN \leq 3.5$) และต่ำ ($SN < 1.5$) ร่วมกับปริมาณการจราจรที่แบ่งออกเป็น 3 ระดับ เช่นกัน คือระดับ สูง ($ESAL > 0.10 \text{ msa}$) กลาง ($0.05 \leq ESAL \leq 0.10 \text{ msa}$) และต่ำ ($ESAL < 0.05 \text{ msa}$) พบว่า ความแข็งแรงโครงสร้างและปริมาณการจราจรมีผลกระทบต่อ การเสื่อมสภาพผิวทางด้วยกันทั้งคู่ แต่อิทธิพลทางด้านความแข็งแรงของโครงสร้างมีผลกระทบต่อ การเสื่อมสภาพผิวทางมากกว่าอิทธิพลจากปริมาณการจราจร ดังรูปที่ 2.7 พบว่าในสายทางที่มี ปริมาณการจราจรเท่ากัน สายทางที่มีความแข็งแรงโครงสร้างต่ำจะมีการเสื่อมสภาพผิวทางที่เร็ว กว่าสายทางที่มีความแข็งแรงปานกลาง และสูง ประมาณ 10 เท่า



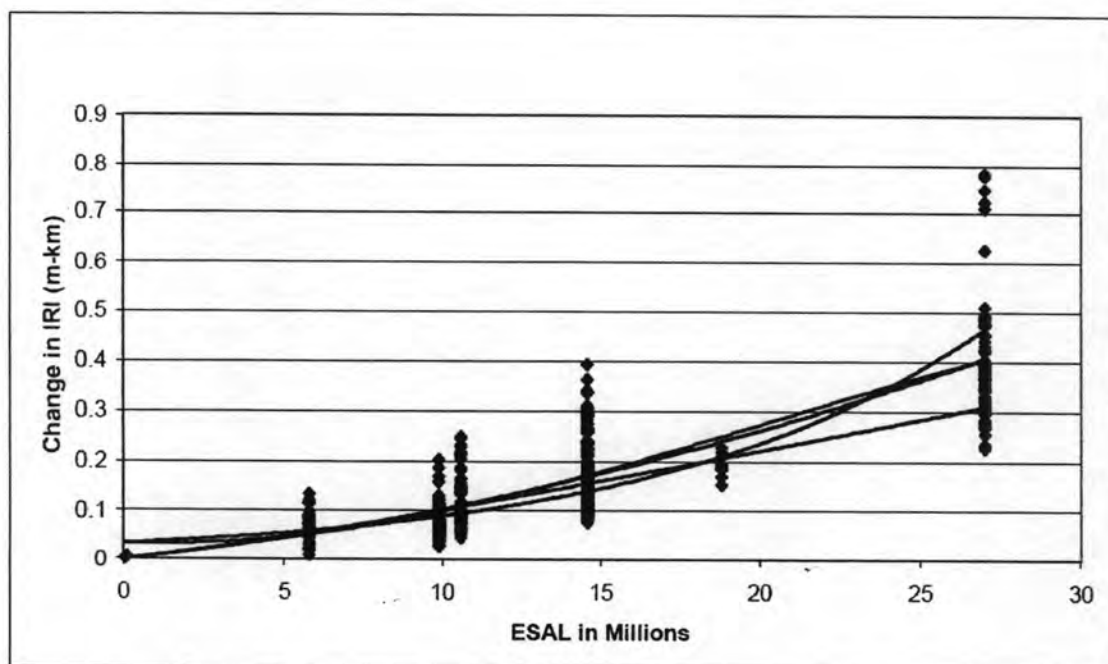
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของความแข็งแรง และปริมาณการจราจรที่มีต่อการเสื่อมสภาพทาง

(Attoh-Okine, 1994)

2.3.2 ปัจจัยด้านปริมาณการจราจรที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง

ปริมาณการจราจรมีหน่วยในการวัดหลากหลายประเภท แตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น 1) ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (Annual Average Daily Traffic, AADT) 2) Equivalent Standard Axle Load (ESAL) เป็นการวัดปริมาณการจราจรในรูปแบบน้ำหนักเพลลาของยานพาหนะแต่ละประเภท โดยเทียบกับน้ำหนักเพลลามาตรฐาน 3) Cumulative Equivalent Standard Axle Load (CESAL) เป็นการพิจารณาค่า ESAL สะสมทั้งหมดตั้งแต่เริ่มเปิดใช้งาน

(Shiyab, 2007) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความขรุขระสากลกับปริมาณการจราจรในรูปแบบ ESAL โดยใช้ข้อมูลของสายทางในเมืองคูไบ สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ ด้วยแบบจำลองวิเคราะห์ความถดถอย พบว่าปริมาณการจราจรมีผลต่อค่าความขรุขระสากลแต่การเปลี่ยนแปลงค่าความขรุขระสากลอยู่ในช่วงที่แคบมากดังรูปที่ 2.8 ซึ่งให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับการศึกษาของ (Dougan, 2003) สาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความขรุขระสากลเป็นผลต่อเนื่องจากปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัย เช่น ความแข็งแรงของทาง หรือสภาพแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์หากวิเคราะห์ปัจจัยด้านปริมาณการจราจรอย่างเดียวจะไม่เพียงพอในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความขรุขระสากลกับปริมาณการจราจร

(Shiyab, 2007)

2.3.3 ปัจจัยด้านความเสียหายที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง

ทางเมื่อเปิดใช้งานแล้วจำเป็นต้องดูแลรักษาให้มีสภาพดีอยู่เสมอ ถ้ามีร่องรอยการชำรุดเสียหายก็ควรดำเนินการซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพเดิมเพื่อไม่ให้ความเสียหายลุกลามต่อไป ความเสียหายสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ความเสียหายในด้านการใช้งาน (Functional Failure) เช่นผิวทางเป็นคลื่นขรุขระ ทำให้การขับเคลื่อนพาหนะผ่านไม่สะดวก และความเสียหายด้านโครงสร้าง (Structural Failure) ผิวทางเป็นหลุมบ่อ พื้นทาง ดินคันทางทรุด เนื่องจากเกิดแรงเฉือนเกินกว่าที่ชั้นโครงสร้างทางจะรับได้ การชำรุดเสียหายของทางเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีที่เพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของชั้นดิน ปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก การก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน เป็นต้น สาเหตุต่างๆ ที่กล่าวมาทำให้ผิวทางแตกร้าว (Cracking) เกิดการทรุดตัวของโครงสร้างทาง เกิดการชำรุดเป็นหลุมเป็นบ่อ เกิดการแยกตัวของผิวทาง การชำรุดที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยถ้ามีการซ่อมบำรุงตั้งแต่นั้นๆ และถูกวิธีก็จะสามารถยับยั้งการลุกลามของความเสียหายและรักษาอายุการใช้งานไว้คงเดิม (Shahin, 1998)

งานวิจัยนี้จะศึกษาความเสียหายของทางซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพผิวทาง ของสายทางชนิดผิวทางชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งประกอบไปด้วย ความเสียหายประเภทรอยแตก (Cracking) และความเสียหายหลุมบ่อ (Pothole)

(1) รอยแตก (Cracking)

สามารถจำแนกลักษณะชนิดความเสียหายบนผิวทางโดยแบ่งแยกตามกลไกที่ทำให้เกิดความเสียหายออกได้เป็น 2 ลักษณะ (จิรพัฒน์ โชติกไกร, 2529)

1) ความเสียหายบนผิวทางที่เกิดขึ้นอันเป็นผลจากการรับน้ำหนักบรรทุก (Load-Associated Distresses) ซึ่งความเสียหายลักษณะนี้มีผลจากการรับน้ำหนักบรรทุกซ้ำแล้วซ้ำอีกซึ่งรอยแตกมีลักษณะดังนี้

- รอยแตกเนื่องจากการล้า (Fatigue Cracking) มีลักษณะคล้ายหนังจระเข้ ซึ่งการแตกร้าวลักษณะนี้มีสาเหตุมาจากการรับน้ำหนักซ้ำแล้วซ้ำอีกของโครงสร้างทางและเกิดการแอ่นตัวขึ้นทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวตามแนวยาว (Longitudinal Cracking) ก่อนพัฒนาเชื่อมกันระหว่างรอยแตกเกิดเป็นรอยแตกแบบหนังจระเข้ (Fatigue Cracking)

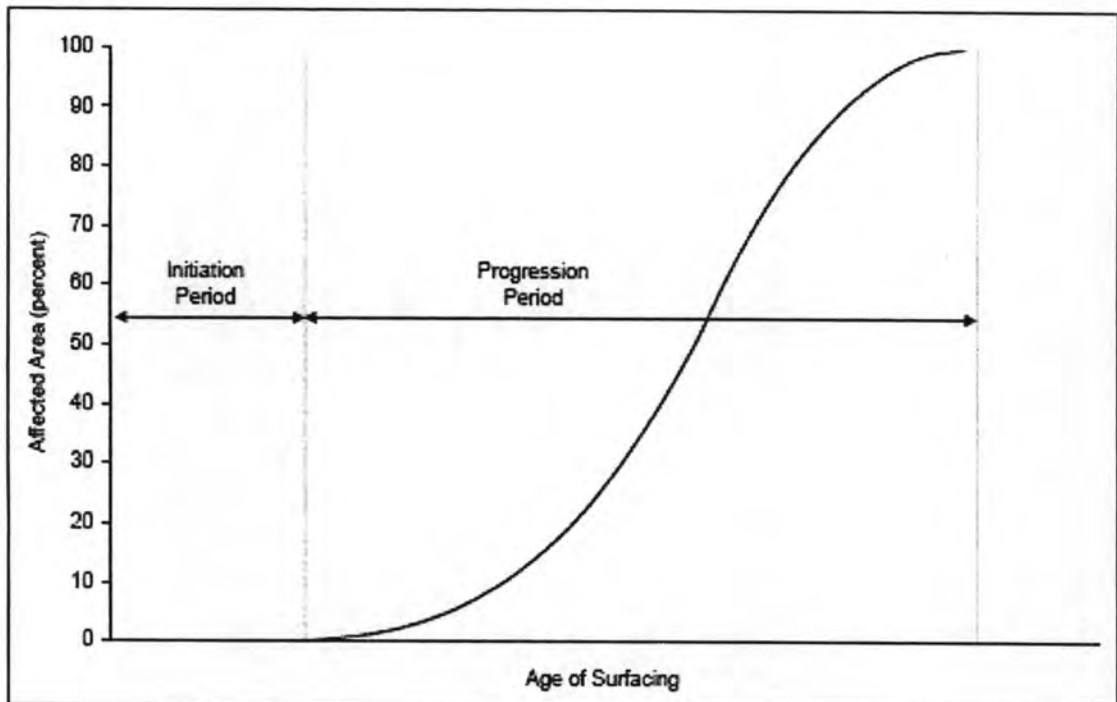
- รอยแตกตามแนวยาว (Longitudinal Cracking) เป็นรอยแตกกว้างในแนวเดียวๆ ทอดไปตามทิศทางเดียวกับการจราจร มีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานในชั้นดินคันทางหรือพื้นทางมีน้อยเกินไป เช่น ทางที่คันดินทางเป็นทรายละเอียด บริเวณที่เป็นดินถมความมั่นคงของความลาดมีไม่พอ อาจเกิดการลื่นไหลของดินข้างทางยังผลให้เกิดการแตกร้าวได้เช่นกัน

2) ความเสียหายบนผิวทางที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้รับผลกระทบจากการรับน้ำหนักบรรทุก (Non-Load Associated Distresses) ซึ่งความเสียหายที่จัดอยู่ในลักษณะนี้มักเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและอุณหภูมิหรือเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุสร้างทางเป็นสำคัญ นั้นหมายความว่าหากทางดังกล่าวภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จแม้ไม่มีจราจรของยานพาหนะแต่ด้วยการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในแต่ละฤดูกาล ความเสียหายเหล่านี้ก็สามารถเกิดขึ้นได้ โดยลักษณะของการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะเกิดในลักษณะรอยแตกตามแนวขวาง (Transverse Cracking) ซึ่งจะเป็นลักษณะรอยแตกกว้างเป็นแนวเดียวๆ ทอดขวางทิศทางจราจร มักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันมากของอุณหภูมิภายในวันเดียว

(2) หลุมบ่อบนผิวทาง (Pothole)

ผิวทางมีความเสียหายในลักษณะหลุมกร่อนเป็นหลุม ในหน้าฝนมีน้ำขังและแตกออกเป็นหลุมกว้างเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำบ่อยครั้ง สาเหตุเนื่องมาจากส่วนผสมของแอสฟัลท์ไม่สม่ำเสมอ มีมากเกินไปหรือน้อยเกินไป การระบายน้ำบนผิวทางไม่ดี ทำให้มีน้ำขังจนเกิดหลุมบ่อลุกลามกว้างขึ้น นอกจากนี้ถ้ามีการทรุดตัวของโครงสร้างทางชั้นล่าง อันเป็นสาเหตุให้เกิดรอยแตกแบบลายหนึ่งจะเข้รอบๆ ความเสียหายหลุมบ่อ

ความเสียหายรอยแตก และ หลุมบ่อ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วง (Watanatada, 1987) ดังนี้ 1) ช่วงเริ่มต้นการเกิดความเสียหาย (Initiation Period) และ 2) ช่วงการเกิดความเสียหาย (Progression Period) โดยในช่วงเริ่มต้นการเกิดความเสียหายเป็นช่วงที่ยังไม่สามารถวัดความเสียหายได้และไม่มีพื้นที่ที่เกิดความเสียหาย ซึ่งเมื่อถึงช่วงระยะเวลาหนึ่งจะเข้าสู่ช่วงการเกิดความเสียหาย ซึ่งมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2.9

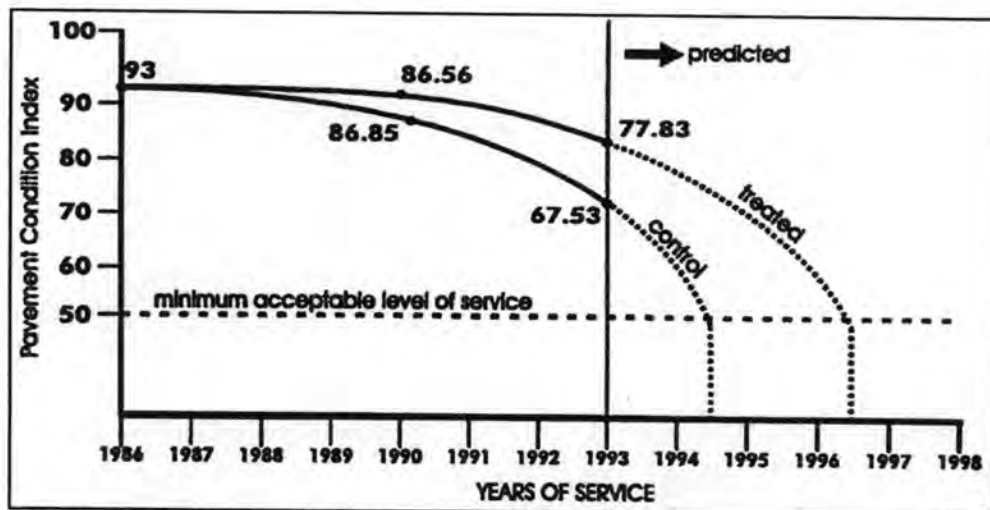


รูปที่ 2.9 ช่วงเริ่มและช่วงเกิดความเสียหาย (HDM-4, 2004)

จากการวิจัยของ Belangie et. al. (1985) พบว่าการบำรุงรักษาทางที่มีรอยแตก เช่น Crack Sealing จะเป็นการลดการเกิดหลุมบ่อและลดการเกิดรอยแตกอย่างเห็นได้ชัด ในกรณีที่ไม่มี การซ่อมบำรุงทางที่มีรอยแตกสามารถวัดพื้นที่หลุมบ่อและรอยแตกที่เพิ่มขึ้นได้อยู่ที่ประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ของพื้นที่ทั้งหมด ในขณะที่บริเวณที่มีการซ่อมบำรุงรอยแตกจะวัดพื้นที่ได้ประมาณ ร้อยละ 1 ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งในการวิจัยสรุปว่าการ Crack Sealing เป็นการลดการเสื่อมสภาพ ของทางอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ (Ponniiah, 1995) ได้ทำการศึกษาทางของประเทศ สหรัฐอเมริกาพบว่าการซ่อมบำรุงทางที่มีรอยแตกอย่างมีประสิทธิภาพสามารถยืดอายุสายทางได้ 2 ถึง 5 ปี ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสภาพทาง (Pavement Condition Index, PCI) กับอายุสายทางโดยเปรียบเทียบระหว่างสายทางช่วงที่ซ่อมรอยแตกกับสายทาง เดียวกันในช่วงที่ไม่ได้ซ่อมรอยแตก ดังที่เห็นว่าสายทางช่วงที่มีการซ่อมรอยแตกมีอายุการใช้งาน ยาวนานกว่าสายทางช่วงที่ไม่มีการซ่อมบำรุง

2.3.4 ปัจจัยทางด้านการก่อสร้างที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง

ปัจจัยหลักทางด้านการก่อสร้างที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง คือปัจจัยทางด้าน ความชันของทาง และความสามารถในการระบายน้ำของทาง



รูปที่ 2.10 พฤติกรรมของทางที่ซ่อมรอยแตก และไม่ซ่อมรอยแตก (Ponniiah, 1995)

ทางมีความลาดชันในสองทิศทางคือ ความลาดชันตามขวางและตามยาว ความลาดชันตามขวางเกี่ยวข้องกับกรอกแบบเพื่อให้ทางสามารถระบายน้ำออกข้างทางได้ เพื่อป้องกันอันตรายต่อผู้ใช้ทางและกันน้ำท่วมซึ่งทำให้ผิวแอสฟัลท์หลุดออก น้ำจึงซึมผ่านลงไปถึงวัสดุชั้นทาง ส่วนความลาดชันตามยาวเกี่ยวข้องกับสภาพทางภูมิประเทศและน้ำหนักบรรทุกที่ล้นรถทำกับผิวทาง

ความสามารถในการระบายน้ำเป็นส่วนสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งในการออกแบบทาง (Huang, 1993) เพราะน้ำสามารถซึมผ่านลงไปยังชั้นโครงสร้างทางผ่านรอยแตก รอยต่อและไหล่ทางได้ อันเป็นสาเหตุให้เกิด (Shiyab, 2007)

- (1) ลดความแข็งแรงของวัสดุในชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง และดินในชั้นดินเดิม
- (2) เป็นสาเหตุของการเกิดรอยแตก และผิวหลุดร่อนของผิวทางแอสฟัลท์ เป็นสาเหตุให้ความแข็งแรงของโครงสร้างทางทั้งหมดลดลง
- (3) ทางเสียหายเนื่องจากดินบวมตัวจากการอมน้ำ

2.3.5 ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง

ปัจจัยสำคัญทางด้านสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพผิวทาง คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และปริมาณน้ำฝน โดยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อค่า Stiffness ในชั้นผิวทาง ในขณะที่ปริมาณน้ำฝนส่งผลกระทบต่อค่า Stiffness ในชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความแข็งแรงของทาง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพผิวทางโดยตรง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และปริมาณน้ำฝนเป็นการเปลี่ยนแปลงภายในรอบปี หากพิจารณาในเชิงอายุสายทาง ความแข็งแรงเฉลี่ยในแต่ละปีแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงยกเว้นสาย

ทางนั้นมีความเสียหายเกิดขึ้น เช่น รอยแตก หลุมบ่อ นอกจากนี้ปัจจัยทั้งสองไม่สามารถพิจารณาผลกระทบแยกกันได้ เพราะผลกระทบจากปัจจัยทางด้านการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งผลกระทบที่มีต่อความแข็งแรงของทางอาจเป็นไปได้ในลักษณะเสริมกัน หรือหักล้างกันก็ได้ (Zuo et. al., 2007)

2.4 แบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพผิวทาง

การบริหารงานซ่อมบำรุงทาง เป็นการบริหารจัดการงานทางไม่ว่าจะเป็นการสำรวจ เก็บรวบรวมข้อมูลสภาพทาง การวางแผนการจัดการงานซ่อมบำรุง และการวางแผนจัดการด้านการเงิน เป็นต้น ดังนั้นการบริหารงานซ่อมบำรุงทางที่มีประสิทธิภาพจะส่งผลให้ทางมีสภาพที่ดี และยืดอายุการใช้งาน ซึ่งการบริหารงานซ่อมบำรุงทางประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก (Shahin, 1998) ดังนี้ 1) การนิยามสภาพความเสียหายของทาง 2) การตรวจสอบและวัดสภาพความเสียหายของทาง 3) การพยากรณ์สภาพความเสียหายของทาง 4) การบริหารจัดการงานทางระดับโครงข่าย และ 5) การบริหารจัดการงานทางระดับโครงการ

แบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทาง เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญในการพยากรณ์สภาพความเสียหายของทาง โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในระดับโครงการ (Project Level) และระดับโครงข่าย (Network Level) โดยในระดับโครงการแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางสามารถใช้เลือกชนิดและวิธีซ่อมบำรุงทาง ส่วนในระดับโครงข่ายแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางสามารถใช้การวางแผนงบประมาณการซ่อมบำรุง การกำหนดตารางเวลาการตรวจสอบ และการวางแผนการปฏิบัติ

ในการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางจำเป็นต้องประกอบด้วยหลายปัจจัยเข้าด้วยกัน เช่น ข้อมูลที่เพียงพอ ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของทาง การเลือกรูปแบบของสมการทางสถิติและความน่าจะเป็นที่เหมาะสม วิธีการตรวจความถูกต้องของแบบจำลอง และผลการพยากรณ์ โดยสามารถแบ่งชนิดของแบบจำลองการเสื่อมสภาพของทางได้ 3 ประเภท (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2545) ดังนี้

1. Empirical Model เป็นวิธีการสร้างแบบจำลองที่พัฒนาจากประสบการณ์และผลของการทดสอบของทางรวมทั้งผลการวิเคราะห์ในห้องทดลอง โดยวิธีนี้จะมีผลดีถ้าข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ เช่น วัสดุ สภาพแวดล้อม น้ำหนักรถ ตลอดจนปริมาณจราจร ใกล้เคียงกับองค์ประกอบต่างๆ ของผลของการทดสอบของทางที่นำมาสร้างแบบจำลอง เช่น แบบจำลองวิเคราะห์ถดถอย (Regression Model)

2. Mechanistic Model เป็นวิธีการสร้างแบบจำลองที่เน้นไปที่การวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาของผิวทางภายใต้น้ำหนักที่กระทำและสนใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของวัสดุกับพฤติกรรมของทางว่าเมื่อนำไปทำเป็นผิวทางจะทำให้ผิวทางมีลักษณะอย่างไรและพฤติกรรมอย่างไรภายใต้น้ำหนักที่กระทำ เช่น ความเค้น ความเครียด การแอ่นตัวของโครงสร้าง เป็นต้น
3. Probabilistic Model เป็นวิธีการสร้างแบบจำลองโดยอาศัยทฤษฎีสถิติและความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของตัวแปรที่การศึกษา เหมาะกับการสร้างแบบจำลองที่มีข้อมูลน้อยกว่า 2 วิธีแรก เช่น แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟ และ Survivor Curve

2.4.1 กระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain)

กระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟพัฒนาขึ้นโดยนักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซียชื่อ Andrei A. Markov เพื่ออธิบายและทำนายพฤติกรรมของก๊าซในถังปิด ต่อมาได้มีผู้นำแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟมาประยุกต์ใช้การอธิบายปัญหาต่างๆ เช่น เศรษฐศาสตร์ ประชากรศาสตร์ สาธารณสุขศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ เป็นต้น สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้กับงานทาง เริ่มใช้เพื่อการทำนายการเปลี่ยนแปลงของสภาพผิวทางให้ The Arizona PMS เป็นแห่งแรก เพื่อใช้ในการประเมินและเลือกวิธีการซ่อมบำรุงทางที่เหมาะสมที่สุด โดยการนำไปใช้สำหรับด้านวิศวกรรมการทาง มีการประยุกต์เพื่อใช้ในระบบบริหารการซ่อมบำรุงทาง (Haas, 1978) ระบบบริหารการซ่อมบำรุงสะพาน (Hawk, 1995) การวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมของทางต่างๆ เป็นต้น การนำกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟไปใช้มีสมมุติฐานที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

- (1) กระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะ จากสถานะหนึ่งเป็นอีกสถานะหนึ่ง ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง
- (2) แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟ สามารถแจกแจงสถานะ (State) ที่กำลังศึกษาได้
- (3) ความน่าจะเป็นของสถานะ (State Probability) อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามช่วงเวลา ตั้งแต่ $1, 2, \dots, n$
- (4) ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ จะมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลา ยกเว้นจะมีปัจจัยอื่นมากระทบทำให้ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะเปลี่ยนแปลง

2.4.2 ลักษณะสำคัญของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ

เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทาง โดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟนั้นต้องเข้าใจถึงความหมายของเมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ เมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ เวกเตอร์สถานะสภาพ และเวกเตอร์สถานะเริ่มต้น ดังนี้

- สถานะ (State) คือ เงื่อนไขทั้งหมดของตัวแปรที่ทำการศึกษา ซึ่งในกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ สถานะทั้งหมดของตัวแปรจะต้องหาได้และตัวแปรที่ทำการศึกษาจะต้องอยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่ง ซึ่งในการศึกษานี้ตัวแปรคือค่าความขรุขระสากลของทาง (Road Roughness Index: IRI)
- เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ (Transition Matrix) เป็นจำนวนข้อมูลที่เปลี่ยนสถานะสภาพจากสถานะหนึ่งเป็นอีกสถานะหนึ่งในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยแสดงเป็นตารางเมทริกซ์ ดังรูปที่ 2.11 ตัวอย่างเช่น $n_{23} = 35$ หมายถึงข้อมูลสายทางที่ค่าดัชนีความขรุขระสากลเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่ 2 ไปเป็นสถานะที่ 3 ในช่วงระยะเวลาที่สนใจอยู่ 35 ข้อมูล

$$\begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & \cdot & n_{1j} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & \cdot & n_{2j} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ n_{i1} & n_{i2} & n_{i3} & \cdot & n_{ij} \end{bmatrix}$$

รูปที่ 2.11 เมทริกซ์การเปลี่ยนสถานะ

โดยที่ n_{ij} เป็นจำนวนของข้อมูลที่เปลี่ยนสถานะสภาพจาก i ไป j ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

- ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (Transition Probability) เป็นความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะหนึ่งเป็นอีกสถานะหนึ่ง โดยวิธีคำนวณความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะสภาพ ใช้สมการของ Maximum Likelihood Estimator (Hawk, 1995)

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_i n_{ij}} \quad \dots (2.1)$$

โดยที่ P_{ij} = ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะจาก i ไป j

n_{ij} = จำนวนของข้อมูลที่เปลี่ยนสถานะจาก i ไป j

$\sum_i n_{ij}$ = ผลรวมข้อมูลทั้งหมดที่เปลี่ยนจากสถานะ i

- แมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (Transition Probability Matrix, P) เป็นแมทริกซ์ที่แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะสภาพจากปัจจุบันไปสู่สถานะในอนาคต อย่างมีเงื่อนไข (Conditional Probability) ของสถานะในอนาคตเมื่อทราบสถานะปัจจุบัน ตัวอย่างแมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ แสดงดังรูปที่ 2.12 แมทริกซ์ P เป็นแมทริกซ์ขนาด $[n \times n]$ โดย P_{ij} มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เนื่องจากเป็นค่าซึ่งแทนความน่าจะเป็นของสถานะ

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdot & P_{1j} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdot & P_{2j} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{i1} & P_{i2} & P_{i3} & \cdot & P_{ij} \end{bmatrix}$$

รูปที่ 2.12 แมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ

โดยที่ P_{ij} เป็นความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะจาก i ไป j ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

- เวกเตอร์สถานะสภาพ (Condition State Vector) เป็นเวกเตอร์ที่แสดงสถานะสภาพของผิวทางต่างๆ มีขนาดเท่ากับ $1 \times n$ แมทริกซ์ โดยการศึกษาให้ค่าความขรุขระสากลในการบอกสถานะของผิวทาง ดังนั้นจึงอยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์สถานะสภาพของผิวทาง (Pavement Condition State Vector at Time t , v_t) เป็นเวกเตอร์ที่แสดงความน่าจะเป็นของสถานะสภาพของผิวทางที่เวลาใดๆ โดยผลรวมของแถวในเวกเตอร์จะเท่ากับ 1 เสมอ

- เวกเตอร์สถานะสภาพเริ่มต้น (Initial Probability Distribution) เป็นเวกเตอร์บ่งบอกสถานะเริ่มต้นของสถานะ เมื่อสถานะทั้งหมด k สถานะ เวกเตอร์สถานะเริ่มต้น (v_0) จะมีขนาด $[1 \times k]$
- ในการทำนายสถานะในอนาคตของกระบวนการมาร์คอฟ จะเป็นการพยากรณ์ด้วยความน่าจะเป็นจากข้อมูลในสถานะแรกคงที่ไปทุกๆ ช่วงเวลาที่สนใจ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$v^{(k)} = v^{(k-1)}P$$

เมื่อ P คือ เมทริกซ์ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ

จากสมการดังกล่าวสามารถแจกแจงผลลัพธ์ได้ในลักษณะดังนี้

$$v^{(1)} = v^{(0)}P$$

$$v^{(2)} = v^{(1)}P = [v^{(0)}P]P = v^{(0)}P^2$$

$$v^{(3)} = v^{(2)}P = [v^{(0)}P^2]P = v^{(0)}P^3$$

$$v^{(4)} = v^{(3)}P = [v^{(0)}P^3]P = v^{(0)}P^4$$

ดังนั้น เวกเตอร์สถานะสภาพ ณ ช่วงเวลา k หาได้จาก

$$v^{(k)} = v^{(0)}P^k \quad \dots(2.2)$$

- เวกเตอร์สถานะสภาพผกผัน (Condition State Vector: CSV) เป็นเวกเตอร์ที่แสดงสถานะสภาพของคิวทาง มีขนาดเท่ากับ $1 \times n$ เมทริกซ์ โดยที่ n คือ จำนวนสถานะสภาพของคิวทาง เช่น $[1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6]$ เมื่อ n เท่ากับ 6

สถานะสภาพของคิวทางที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณดังสมการ

$$PCS(t) = v^t \times CSV \quad \dots(2.3)$$

โดย $PCS(t)$ = สถานะสภาพโดยเฉลี่ยของคิวทาง ณ เวลา t

v^t = เวกเตอร์ความน่าจะเป็นแสดงสถานะสภาพของคิวทาง ณ เวลา t

CSV = เวกเตอร์สถานะสภาพผกผัน

2.5 การพัฒนาแบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพผิวทางในอดีต

Shahin et. al. (1983) ทำการศึกษาลักษณะพฤติกรรมของทาง ที่รัฐเวอร์จิเนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ค่าดัชนีสภาพทาง (PCI) เป็นตัวแทนสภาพความเสียหายและใช้โปรแกรม Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) วิเคราะห์วิธีการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) หาสมการที่เหมาะสม ผลการศึกษาสามารถจัดกลุ่มตัวแปรที่มีผลกระทบต่อทาง แบ่งได้ 6 กลุ่ม ได้แก่ ชนิดของทาง ข้อมูลสภาพความเสียหาย ข้อมูลผลการทดสอบทางแบบไม่ทำลาย โดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) อายุของทาง ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี และความหนาของชั้นทาง

Morosiuk et. al. (2004) พัฒนาแบบจำลอง (Mechanistic - Empirical) เพื่อทำนายการเสื่อมสภาพทางเพื่อใช้ในการออกแบบและบริหารจัดการสายทาง (HDM-III) ซึ่งพัฒนามาจากข้อมูลสายทางของประเทศบราซิล โดยแบบจำลองทำนายค่าความขรุขระสากลเป็นหนึ่งในแบบจำลองที่มีความสำคัญที่สุด โดยพิจารณาว่าความผันแปรของความขรุขระผิวทางเป็นผลมาจากปัจจัยค่าความขรุขระสากลเริ่มต้น ความเสียหายทาง ความแข็งแรงโครงสร้างทาง สภาพแวดล้อม และปริมาณการจราจร ดังสมการที่ 2.4 ดังนี้

$$\Delta IRI = \Delta IRI_s + \Delta IRI_c + \Delta IRI_r + \Delta IRI_p + \Delta IRI_e \quad \dots(2.4)$$

โดย ΔIRI ประกอบไปด้วย

$$\Delta IRI_s = K_{gs} a_0 e^{(K_{gm} (m) (t))} (1 + SNPKb)^{-5} NET$$

$$\Delta IRI_c = K_{gc} a_0 \Delta ACRA$$

$$\Delta IRI_r = K_{gr} a_0 (\Delta RDS)$$

$$\Delta IRI_p = K_{gp} a_0 (a_1 - FM)[(NPTbu)^{a2} - (NPTa)^{a2}]$$

$$\Delta IRI_e = K_{gm} m RI_a$$

เมื่อ ΔIRI_s = อัตราการเปลี่ยนแปลงความขรุขระเนื่องมาจากความแข็งแรงโครงสร้าง

ΔIRI_c = อัตราการเปลี่ยนแปลงความขรุขระเนื่องมาจากการรอยแตก

ΔIRI_r = อัตราการเปลี่ยนแปลงความขรุขระเนื่องมาจากการรยร่องล้อ

ΔIRI_p = อัตราการเปลี่ยนแปลงความขรุขระเนื่องมาจากการหลุมบ่อ

ΔIRI_e = อัตราการเปลี่ยนแปลงความขรุขระเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม

m = ค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม (#)

K_{gm} = calibration factor (#)

t = อายุสายทางตั้งแต่มีการ Overlay หรือ Reconstruction (ปี)

$SNPK_b$ = ค่าความแข็งแรงปรับแก้เนื่องจากรอยแตกในท้ายปีที่สนใจ (#)

NET = annual number of equivalent standard axles (million ESA/lane/year)

IRI_a = IRI เริ่มต้น (m/km)

โดย HDM จำแนกระดับของความอ่อนไหวของปัจจัยเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (HDM-4) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของ Impact Elasticity ยกตัวอย่างเช่น ถ้าภายในระยะเวลา 10 ปี ปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ซึ่งเป็นผลให้ค่าความขรุขระของทางเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.9 ดังนั้น Impact Elasticity ของปริมาณการจราจรมีค่าเท่ากับ 0.29

ตารางที่ 2.1 ความหมายของระดับความอ่อนไหวใน HDM

ผลกระทบ	ระดับความอ่อนไหว	Impact Elasticity
สูง	S-I	>0.50
กลาง	S-II	0.20-0.05
ต่ำ	S-III	0.05-0.20
ไม่นำมาพิจารณาได้	S-IV	<0.05

(ที่มา HDM-4 Volume 5)

จากแบบจำลองทำนายค่าความขรุขระสากลในสมการที่ 2.2 HDM-4 แบ่งปัจจัยในการตัดสินใจของการเสื่อมสภาพออกเป็น 6 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งแสดงถึงระดับความอ่อนไหว ของตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อแบบจำลองทำนายค่าความขรุขระสากลของ HDM-4

Paterson และ Attoh-Okine (1992) ทำการศึกษาแบบจำลอง HDM-III เพื่อพัฒนาแบบจำลองทำนายสภาพผิวทางอย่างง่าย เนื่องจากแบบจำลองของ HDM-III มีความลำบากในการนำไปใช้งานจริงเนื่องจาก มีความซับซ้อนมากเกินไป และต้องใช้ทรัพยากรสูงต่อการเก็บข้อมูลที่เพียงพอเพื่อการใช้แบบจำลอง การพัฒนาแบบจำลองแบ่งปัจจัยที่วิเคราะห์ตาม ชนิดผิวทาง ความแข็งแรงโครงสร้างทาง ปริมาณการจราจร และสภาพแวดล้อม ดังสมการที่ 2.5

ตารางที่ 2.2 แสดงการจัดลำดับของผลกระทบที่มีต่อปัจจัยการเสื่อมสภาพ

ปัจจัยการเสื่อมสภาพ	ระดับของผลกระทบจากเกณฑ์ต่างๆ						Impact Elasticity	ค่าโดยทั่วไปของปัจจัย	ระดับความอ่อนไหว
	1	2	3	4	5	6			
Roughness - Age - Environment	D	D	B	C	B	B	0.20	0.2-5.0	High
Roughness Progression General	D	D	B	D	C	B	0.09	0.8-1.2	

เกณฑ์ 1 = Amount of Cracking

Impact Sensitivity

A = S-I

2 = Rut Depth

B = S-II

3 = Roughness

C = S-III

4 = EIRR for Patching

D = S-IV

5 = EIRR for Reseal

6 = EIRR for Overlay

$$\Delta IRI_s = K_{gs} a_0 e^{(K_{gm} (m) (t))} (1 + SNC)^{-5} NEt + K_{gm} m IRI_a \quad \dots(2.5)$$

โดยที่ m = ค่าสัมประสิทธิ์ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม (#)

t = อายุสายทางตั้งแต่มีการ Overlay หรือ Reconstruction (ปี)

SNC = ค่าความแข็งแรง (Modified Structural Number)

NEt = annual number of equivalent standard axles (million ESA/lane/year)

IRI_a = IRI เริ่มต้น (m/km)

Australian Road Research Board (ARRB, 1994) พัฒนาแบบจำลองทำนายค่าความขรุขระสากลที่ประเทศ ออสเตรเลีย และ นิวซีแลนด์ โดยเก็บข้อมูล IRI ด้วยวิธีการนับจำนวนของ National Association of Government Archives and Records Administrators (NAASRA) เมื่อรถเก็บข้อมูลอ่านค่าการเคลื่อนตัวของเพลาลังได้ 15.2 มิลลิเมตร ก็เป็นการนับหนึ่งครั้ง แล้วจึงแปลงจำนวนครั้งที่นับเป็นหน่วย IRI (m/km) ปัจจุบันด้านความแข็งแรงโครงสร้าง ปริมาณการจราจร และประวัติการซ่อมบำรุงเป็นตัวแปรอิสระ ตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 ดังนี้

สำหรับทางหลวงแห่งชาติ

$$IRI_{(t)} = IRI_0 + [IRI_0 a_1 (1+100/SNC) a_2 t^{a_3} (1+a_4 L^{a_5}) / ME + 4000]^{a_6} \quad \dots(2.6)$$

สำหรับทางหลวงจังหวัด

$$IRI_{(t)} = IRI_0 + [IRI_0 a_1 (1+100/SNC) a_2 t^{a_3} (1+a_4 L^{a_5}) / ME + 200]^{a_6} \quad \dots(2.7)$$

Sadek et. al. (1996) ทำการศึกษาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของทาง ที่รัฐเวอร์จิเนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ในทาง 4 ประเภท ได้แก่ ทางลาดยางที่ไม่มีการเสริมผิวทางใหม่ ทางลาดยางที่มีการเสริมผิวทางใหม่ ทางผสม (ผิวทางลาดยางทับพื้นคอนกรีต) ที่มีการเสริมผิวทางใหม่ 1 ครั้ง และทางผสมที่มีการเสริมผิวทางใหม่มากกว่า 1 ครั้ง ผลศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทางแต่ละประเภทจะมีปัจจัยแตกต่างกันออกไป เช่น ในทางแบบทางลาดยางที่มีการเสริมผิวทางใหม่มีปัจจัย ได้แก่ อายุของผิวทางตั้งแต่เสริมผิวทาง ความหนาของทาง ค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง และปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี แต่ในทางแบบทางลาดยางที่ไม่มีการเสริมผิวทางใหม่จะไม่มีปัจจัยของความหนาผิวทางมาเกี่ยวข้อง การพัฒนาแบบจำลองมีการสร้างทั้ง Sigmoidal Model และ Power Curve นำมาเปรียบเทียบกัน โดยแบบจำลอง Sigmoidal Model จะใช้ได้ดีกับทางลาดยางที่ไม่มีการเสริมผิวทางใหม่และแบบจำลอง Power Curve จะใช้ได้ดีกับทางลาดยางที่มีการเสริมผิวทางใหม่ ทางที่มีการเสริมผิวทางใหม่ 1 ครั้ง และทางผสมที่มีการเสริมผิวทางใหม่มากกว่า 1 ครั้ง

สืบพงษ์ ไพศาลวัฒนา และคณะ (2543) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทาง เพื่อพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของทางในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูล HDM-III ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทาง ได้แก่ การพังทลายแบบหนัก การพังทลายแบบเบา และปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี เป็นต้น แบบจำลองที่พัฒนามีด้วยกัน 2 กลุ่ม คือ Post-Maintenance และ Pre-maintenance โดยจะขึ้นอยู่กับการรวบรวมข้อมูลและแต่ละกลุ่มจะมี 2

แบบจำลองการเสื่อมสภาพคือ แบบจำลองการพังทลายแบบหนักและแบบจำลองการพังทลายแบบเบา ตัวอย่างแบบจำลองการเสื่อมสภาพแบบหนักของภาคตะวันออก ตามสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$Y = 0.00165 (A^{0.39766}) (B^{0.39601}) \quad \dots(2.8)$$

โดยที่

$$Y = \text{พื้นที่ความเสียหาย (\%)}$$

$$A = \text{Changes of time Service}$$

$$B = \text{Changes of Cumulative Equivalent Single Axle Load}$$

วิศณุ ทรัพย์สมพล และคณะ (2543) ศึกษาพฤติกรรมของทางลาดยางในประเทศไทยเพื่อพัฒนาแบบจำลองสภาพความเสียหายของผิวทางลาดยาง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบได้แก่ อายุผิวทางหลังการเสริมหรือบูรณะผิวแอสฟัลท์ ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี สัดส่วนรถหนัก ปริมาณน้ำฝนต่อปี และความลาดชันของภูมิประเทศ โดยลักษณะภูมิประเทศที่นำวิเคราะห์เป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ กำหนดจากลักษณะความลาดชันของพื้นที่ (%Gradient) ไว้ 3 กลุ่มดังนี้ ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบ (Gradient 0 - 3%) ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบสลับเนิน (Gradient 3 - 5%) และลักษณะภูมิประเทศเป็นที่เนินสลับภูเขาจนถึงภูเขาสูง (Gradient >5%) ผลการศึกษาสรุปว่า ลักษณะความสัมพันธ์ของแบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดเป็นฟังก์ชัน Exponential โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ อยู่ระหว่าง 0.6 - 0.8 ตามสมการที่ 2.9 ดังนี้

$$IRI = a \times e^{((b_1 \times \text{Age}) + (b_2 \times \text{AVG.AADT}) + (b_3 \times \%HV))} \quad \dots(2.8)$$

โดยที่

$$IRI = \text{ค่าดัชนีความขรุขระสากล (ม./กม.)}$$

$$\text{Age} = \text{อายุผิวทางหลังการเสริมหรือบูรณะผิวแอสฟัลท์ (ปี)}$$

$$\text{AVG.AADT} = \text{ปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวัน (คัน/วัน-2 ช่องจราจร)}$$

$$\%HV = \text{สัดส่วนรถหนัก (\%)}$$

$$a, b_1, b_2, b_3 = \text{ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองสัมพันธ์กับลักษณะภูมิประเทศ}$$

พิจาน พาศัยยุทธ และคณะ (2544) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความขรุขระสากลกับค่าระดับความเสียหาย (DRV) ในทางลาดยางจำนวน 422 สายทาง พื้นที่สำนักงานหลวงที่ 12 ชลบุรี การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ทำการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI กับค่า DRV ค่า IRI กับค่าระดับความเสียหายหนัก ค่า IRI กับค่าระดับความเสียหายเบา และค่า IRI กับค่าระดับความเสียหายที่รวมทั้งความเสียหายหลุมบ่อและความเสียหายเบา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.345, 0.502, 0.057 และ 0.393 ตามลำดับ
2. ทำการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีความขรุขระสากลแต่และปีกับค่าการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความเสียหายแต่ละปี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.844 แสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ
3. สร้างแบบจำลองทำนายค่าดัชนีความขรุขระสากล โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย และทำการทดสอบแบบจำลอง ปรากฏว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ตามสมการที่ 2.9 ดังนี้

$$IRI_{i+1} = IRI_i + 0.06201 \Delta DRV \quad \dots (2.9)$$

โดยที่

$$IRI_{i+1} = \text{ค่าดัชนีความขรุขระสากลของปีถัดไป (ปีที่ } i + 1)$$

$$IRI_i = \text{ค่าดัชนีความขรุขระสากลของปีที่ } i$$

$$\Delta DRV = \text{ค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับความเสียหาย รอบปีที่ } i$$

Butt et. al. (1987) ทำการพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมของทาง โดยวิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในแบบจำลองใช้ค่าดัชนีสภาพทาง (PCI) เป็นตัวแทนสภาพความเสียหายที่กำหนดให้เป็นตัวแปรตามและอายุทางเป็นตัวแปรอิสระ โดยได้มีการแบ่งค่าดัชนีสภาพทางออกเป็น 10 ส่วน แต่ละส่วนมีค่าเท่ากับ 10 เช่น 1 - 10 11 - 20 21 - 30 เป็นต้น ผลการพัฒนาได้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้วิธีลูกโซ่มาร์คอฟและแบบจำลองที่ใช้วิธี Constrained Least - Squares โดยแบบจำลองที่ใช้วิธีลูกโซ่มาร์คอฟ สามารถอธิบายพฤติกรรมของทางได้ดีกว่าแบบจำลองที่ใช้วิธี Constrained Least - Squares

Hawk (1995) ใช้วิธีลูกโซ่มาร์คอฟ ในการพัฒนาโปรแกรมระบบบำรุงรักษาสะพานชื่อว่า BRIDGIT BMS ในแบบจำลองเป็นการพยากรณ์ค่าช่วงเวลาที่ต้องทำการซ่อมแซมและปรับปรุงโดยพิจารณาผลกระทบของสิ่งแวดล้อม ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี และการซ่อมแซมครั้งอดีต

Attoh - Okine (1994) ศึกษาการพยากรณ์ความชุกของผิวทาง โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) ในผิวทางลาดยาง วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการจำลองกระบวนการคิดแก้ไขปัญหาตามแบบอย่างของสมองมนุษย์ โดยการสร้างระบบของหน่วยประมวลผล (Artificial Neurons) จำลองระบบของเซลล์ประสาทของสมองมนุษย์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการเรียนรู้รูปแบบความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีความซับซ้อน โดยใช้ข้อมูล HDM-3 จำนวน 1,274 ข้อมูล ประกอบด้วย ค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง ปริมาณจราจร อายุ ทาง พื้นที่สภาพความเสียหายต่างๆ ดังนั้นความชุกของผิวทาง เป็นต้น ใช้รูปแบบ Back Propagation Neural Networks: BNN แสดงความสัมพันธ์ โดยผลการศึกษายังพยากรณ์ได้ไม่ค่อนหม่นยำเท่าที่ควรแต่ก็เป็นการเสนอแนวความคิดในการสร้างแบบจำลองสภาพทางวิธีหนึ่ง

วีระชัย วงษ์วีระนิมิตร (2547) พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางลาดยางในถนนที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีน้อยกว่า 2,000 คัน/วัน ด้วยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ โดยใช้ข้อมูลจากสายทางในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง ซึ่งพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผิวทางด้วยกัน 5 ปัจจัย ดังนี้ สถานที่ตั้งของสายทาง ชนิดผิวทาง ปริมาณการจราจร ปริมาณน้ำฝน และความชื้นของภูมิภาค จากการวิจัยพบว่าในสายทางที่มีปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปีสูง มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปีสูง หรือมีความชื้นของภูมิภาคสูง ส่งผลให้ค่าการเสื่อมสภาพของผิวทางนั้นสูงขึ้นตามไปด้วย และในสายทางที่เป็นผิวทางลาดยางชนิดเซอร์เฟสทรีตเมนต์ค่าการเสื่อมสภาพของผิวทางจะสูงกว่าในสายทางที่เป็นผิวทางชนิดพีเน็ตเรชั่นแมคคาดีม และผิวทางชนิดแอสฟัลท์คอนกรีต ตามลำดับ โดยสายทางที่ตั้งอยู่ทางภาคเหนือมีค่าการเสื่อมสภาพของผิวทางสูงกว่าสายทางที่ตั้งอยู่ทางภาคอื่นๆ เนื่องจากสายทางที่ตั้งอยู่ทางภาคเหนือส่วนใหญ่เป็นผิวทางชนิดเซอร์เฟสทรีตเมนต์และมีความชื้นของภูมิภาคสูง จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การเสื่อมสภาพของผิวทางสูงกว่าในภาคอื่นๆ

2.6 บทสรุป

การเสื่อมสภาพของทางเป็นเรื่องที่ทุกองค์กรให้ความสนใจเนื่องจากการวางแผนซ่อมบำรุงจะต้องรู้จักพฤติกรรมของทาง เพราะพฤติกรรมของทางสะท้อนคุณสมบัติของทางรวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีปฏิสัมพันธ์กับทาง ดังนั้นการวางแผนและจัดการการบำรุงรักษาทางได้อย่างมีประสิทธิภาพความสำคัญส่วนหนึ่งอยู่ที่ตรงที่ความสามารถวิเคราะห์และคาดการณ์หรือทำนายสภาพความเสียหายของทางในอนาคตและสามารถรู้พฤติกรรมความเสียหายของทางได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจากงานศึกษาวิจัยต่างๆ พบว่าแบบจำลองการเสื่อมสภาพของทางมีความสำคัญอย่างมากในระบบบริหารบำรุงรักษาทาง โดยในระดับโครงข่ายแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางสามารถใช้การวางแผนงบประมาณการซ่อมบำรุง การกำหนดตารางเวลาการตรวจสอบและการวางแผนการปฏิบัติ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อทางก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ทางเสื่อมสภาพ เช่น อายุของทาง ปริมาณการจราจร สิ่งแวดล้อม การบำรุงรักษา และโครงสร้าง เป็นต้น โดยในแต่ละหน่วยงานที่อยู่ในพื้นที่ต่างๆ มีการพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพต่างกันออกไป ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสภาพผิวทางในอดีต

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสภาพผิวทาง	ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาแบบจำลองสภาพผิวทาง							
	Shahin M.Y.	Morosiuk, G. et al.	Paterson et al.	ARRB	Sadek et al.	วิศณุ ทรัพย์สมพล และคณะ	พิธาน พาชัยยุทธ และคณะ	วีระชัย วงษ์วีระนิมิตร
ความแข็งแรงโครงสร้างทาง	○	○	○	○	○			
ปริมาณการจราจร	○	○	○	○	○	○	○	○
ความเสียหายผิวทาง	○	○	○				○	
สภาพแวดล้อม		○	○					○
การก่อสร้าง								○

○ ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง