

ผลกระทบจากรถไฟความเร็วสูงต่อการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางรถไฟ

Effect of High-speed train on railway track vibration

ธนพล ศิริทวีสุข¹ ธีรพล ขจรเกียรติคุณ² และ ชยุตม์ งามโขนง³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

รถไฟความเร็วสูงสายแรกในประเทศไทย เส้นกรุงเทพฯ-โคราชกำลังอยู่ในช่วงดำเนินการก่อสร้าง โดยโครงสร้างทางที่ใช้ในสายนี้คือโครงสร้างทาง Ballastless system ที่ถูกออกแบบจากระบบ Chinese Railway Track System (CRTS) III โดยจากการสืบค้นงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา พบว่างานวิจัยที่ศึกษาเรื่อง coupled train-track interaction และพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างทางแบบ CRTS III ยังมีอยู่อย่างจำกัด

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการจำลองโมเดล 3D coupled train-track-soil interaction ของ CRTS II และ CRTS III ด้วยโปรแกรม LS-DYNA บนพื้นฐานของ multi-body simulation principle, finite element method และ perfectly matched layer โดยแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างและดิน ที่เกิดจากรถไฟความเร็วสูงโดยพิจารณาจากระบบโครงสร้างและส่วนประกอบของทางที่แตกต่างกัน ด้วยการวิเคราะห์แบบประวัติเวลาไม่เชิงเส้น (Nonlinear time history) ภายใต้อิทธิพลของความเร็วของรถไฟ และโครงสร้างทางที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังได้มีการประยุกต์ใช้แผ่นยาง Under Ballast Mat (UBM) เพื่อแทนที่แผ่น Under Slab Mat (USM) ซึ่งถูกใช้ใน Isolation layer เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แผ่นยางนี้ใน CRTS III

จากผลการวิจัยพบว่า ความเร็วของรถไฟมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับการตอบสนองแบบพลศาสตร์ของโครงสร้างทางและชั้นดินรอบข้าง โดยทั่วไปแล้ว CRTS III ที่ใช้แผ่นยาง USM มีการตอบสนอง ที่สูงกว่าแบบ CRTS II โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรถไฟวิ่งด้วยความเร็วสูง แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แผ่นยาง UBM แทน USM ในชั้น isolation layer ใน CRTS III สามารถช่วยในการลดการตอบสนองแบบพลศาสตร์ของโครงสร้างและชั้นดินรอบข้างได้ เมื่อเทียบกับการใช้ USM แบบทั่วไป ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้จะช่วยปรับปรุงการออกแบบของ CRTS III และช่วยให้เข้าใจการทำงาน และพฤติกรรมของโครงสร้างทางรถไฟความเร็วสูงที่จะถูกใช้ในประเทศไทยในอนาคต

คำสำคัญ: รถไฟความเร็วสูง; โครงสร้างทาง CRTS III; train-track interaction

Abstract

The first Thailand's high speed railway line from Bangkok to Nakhon Ratchasima is currently being constructed. The railway track system of this line is designed based on the well-known Chinese Railway Track System (CRTS) III. Based on a critical literature review regarding the track vibration response on CRTS III, most previous studies have rarely been focused on train-track-soil interaction and the improvement of track slab system. In this study, the 3D coupled train-track-soil interaction models of CRTS II and CRTS III have been developed in the commercial software called "LS-DYNA" based on the multi-body simulation principle, finite element method and perfectly matched layer. This study highlights the influences of different railway track structures and components on the track dynamic and ground responses excited by a high-speed train. The nonlinear time history analyses have been performed focusing on the different train speeds and track systems. This study also adopts the rubber Under Ballast Mat (UBM) to replace the typical Under Slab Mat (USM) as an isolation layer to study the feasibility to use this rubber in CRTS III. The results show that, in general, CRTS III with a typical under slab mat property has higher dynamic responses that those of the traditional CRTS II especially when the train speed is high. However, the use of proper UBM as an USM isolation layer in CRTS III can help reduce the dynamic responses of the track and surrounding ground comparison to CRTS III with typical USM. The outcome of this study will help improve the design of the CRTS III and provide a better understanding on the performance of the high-speed track slab system that will be used in Thailand.

Keywords: High-speed train; CRTS III slab track system; train-track interaction

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศจีนมีการพัฒนาระบบรถไฟความเร็วสูงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีการพัฒนาทางรถไฟความเร็วสูงแบบ Ballastless Track ในชื่อ Chinese Railway Track System หรือ CRTS ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ หนึ่งในรูปแบบของทางรถไฟ CRTS คือ CRTS III ซึ่งโครงการรถไฟความเร็วสูง กรุงเทพ-นครราชสีมา ในประเทศไทย ได้มีการใช้เทคโนโลยีทางรถไฟความเร็วสูงแบบ CRTS III จึงถือว่า CRTS III

อย่างไรก็ตาม การวิ่งของรถไฟความเร็วสูง ทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนต่อโครงสร้างทางรถไฟ และโครงสร้างโดยรอบได้ (Connolly et al. (2016), Kouroussis et al. (2014), Connelly et al. (2015)) เนื่องจากความเร็วที่ของรถไฟที่สูงมาก อาจทำให้โครงสร้างทางเกิดการสั่นพ้องขึ้นได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างโดยรอบ จึงมีการศึกษาแนวทางในการลดผลกระทบของการสั่นสะเทือนของทางรถไฟความเร็วสูงต่าง ๆ เช่น การใช้เสาเข็มเพื่อลดการสั่นสะเทือนของดิน (Li et al. (2020)), การสร้างกำแพง barrier ในดินขนานทางรถไฟเพื่อลดการขยายตัวของคลื่นการสั่นผ่านชั้นดิน (Thompson et al. (2016)), การใช้ Seismic metamaterial barriers ในการลดการสั่นสะเทือนของดิน (Li et al. (2020)) เป็นต้น

ทางรถไฟความเร็วสูงแบบ CRTS III พบว่า มีการใช้ Isolation Layer ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Under Ballast Mat ซึ่งเคยมีการศึกษสมบัติของ Isolation Layer ในห้องปฏิบัติการ (Sheng et al. (2020)) แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาผลของ Isolation Layer ต่อโครงสร้างของทางรถไฟความเร็วสูง

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของทางรถไฟความเร็วสูงระดับดิน (At-Grade) แบบ Ballastless Track โดยการจำลองโครงสร้างทางรถไฟ ชั้นดิน และรถไฟความเร็วสูง ด้วย Finite Element Model ผ่านโปรแกรม LS-DYNA โดยจำลองการวิ่งของรถไฟความเร็วสูงผ่านโครงสร้างทางที่จำลองไว้ เพื่อศึกษาผลกระทบด้านการสั่นสะเทือนต่อโครงสร้างทางรถไฟ

ความเร็วของรถไฟความเร็วสูงที่พิจารณา จะพิจารณาตั้งแต่ความเร็ว 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จนถึงความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการจำลองการวิ่งของรถไฟ บนโครงสร้างทางรถไฟที่ต่างกัน ที่รูปแบบโครงสร้างต่าง ๆ ได้แก่

1. แบบจำลองทางรถไฟ CRTS II
2. แบบจำลองทางรถไฟ CRTS III แบบไม่มี Isolation Layer
3. แบบจำลองทางรถไฟ CRTS III แบบที่มี Isolation Layer เป็น Soft Stiffness Under Slab Mat (Soft USM)
4. แบบจำลองทางรถไฟ CRTS III แบบที่มี Isolation Layer เป็น Stiff Stiffness Under Slab Mat (Stiff USM)
5. แบบจำลองทางรถไฟ CRTS III แบบที่มี Isolation Layer เป็น Typical Stiffness Under Slab Mat (Typical USM)

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการจำลองการวิ่งของรถไฟความเร็วสูงผ่านโครงสร้างทางที่ทำการวิเคราะห์ จะศึกษา การเคลื่อนตัว (Displacement) และความเร่ง (Acceleration) บนราง และพื้นดินโดยรอบ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความเค้น (Stress) บนชั้น Concrete Base โดยทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการสั่นสะเทือนในกรณีต่าง ๆ ทั้ง 5 กรณีข้างต้น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Related Theory)

ในปัจจุบัน ballastless track หรือ slab track ถูกใช้ในโครงสร้างรถไฟความเร็วสูงเพราะมีเสถียรภาพที่สูง, ความมั่นคงที่สูง, ความสามารถการบำรุงที่ดี และ ความสามารถในการให้บริการที่ดี เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ ballasted track. ในประเทศจีนได้มีการพัฒนา ballastless slab track ทั้งหมด 4 ประเภทคือ double block , CRTS I , CRTS II , CRTS III (รูปที่ 1) ซึ่งรางรถไฟ 3 ประเภทแรกได้รับการพัฒนาจากการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากประเทศเยอรมันและญี่ปุ่น และ CRTS III ได้รับการวิจัยและพัฒนาภายในประเทศจีนเท่านั้น ซึ่งเป็นการพัฒนาข้อดีของรางรถไฟทั้งสามประเภทที่ผ่านมา รวมไปถึงในแง่ของความสะดวกในการก่อสร้าง

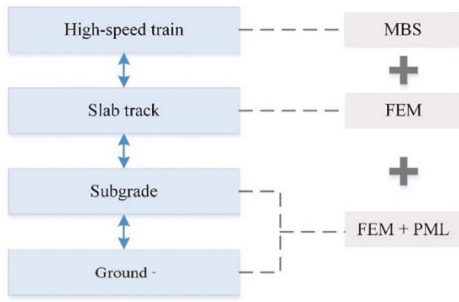


รูปที่ 1 โครงสร้างทางรถไฟรูปแบบต่าง ๆ (a) CRTS I , (b) CRTS II , (c) CRTS III , (d) CRTS Double-Block (DB) (Wang et al. (2020))

- โครงสร้างทางรถไฟ CRTS II ประกอบด้วยชั้น reinforced concrete slab , cement asphalt mortar layer with lower A/C , Supporting layer with plain concrete
- โครงสร้างทางรถไฟ CRTS III ประกอบด้วย reinforced concrete slab , Filling layer with self-compacting concrete , Supporting layer with plain concrete

2.2 FEM Modeling

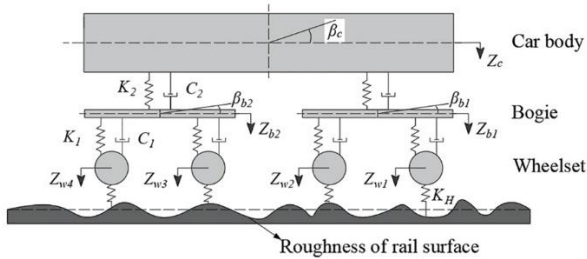
ในงานวิจัยนี้จะใช้โมเดล 3D coupled train-track-soil model บนโปรแกรม LS-DYNA ซึ่งเป็นโมเดลของโครงสร้างราง CRTS II โดยกำหนดค่าคุณสมบัติขององค์ประกอบต่างๆ ให้สอดคล้องกับทางรถไฟที่ผ่านการตรวจวัดในภาคสนาม เพื่อทำการยืนยันความถูกต้องของโมเดลด้วยการทำ model validation (Cai (2006), Li et al (2020)). โมเดลสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วนคือโมเดลรถไฟความเร็วสูง (Modeling of High-speed train) จากหลักการ multi-body simulation (MBS) , โมเดลของโครงสร้างราง (Modeling of Slab track) จากหลักการ FEM และโมเดลของดิน subgrade (Modeling of soil) จากหลักการ FEM พร้อมกับวิธี Perfectly Matched Layers (PML) (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 Coupling of the train-track-soil system
(Adapted from Li et al. (2020))

2.2.1 โมเดลรถไฟความเร็วสูง (Modeling of High-speed train) และระบบราง slab track

ระบบ coupled train-track-soil ถูกพัฒนาจากหน้าตัดทั่วไปของรถไฟความเร็วสูงปักกิ่ง-เซี่ยงไฮ้ ในประเทศจีน ที่วิ่งด้วยรถไฟประเภท China Railway High-speed (CSH) 380 Electric Multiple Unit (EMU). ในโมเดล , รถไฟประกอบด้วยตัวรถ 1 ขบวน, 2 โบกี้, 4 ชุดล้อ และ 2 ระบบกันสะเทือน (Stage-suspension system) (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แบบจำลองของยานพาหนะรถไฟ (Li et al. (2020))

ผู้วิจัยได้ออกแบบตัวรถ, โบกี้ และชุดล้อเป็น rigid-bodies กับ shell และ beam element ที่เชื่อมกับด้วยสปริงและลูกสูบ (Dashpot). Degree of Freedom (DOF) ที่จะพิจารณาในการโมเดลนี้เป็น DOF ในแนวตั้ง เนื่องจากการสั่นในแนวตั้งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นหลักๆต่อโครงสร้าง โดยยานพาหนะมี DOF ทั้งหมด 10 DOF ได้แก่ การเคลื่อนที่แนวตั้งและการหมุนแนวตั้งของตัวรถ (Z_c, β_c), การเคลื่อนที่แนวตั้งและการหมุนแนวตั้งของโบกี้ ($Z_{bi}, \beta_{bi} \ i = 1, 2$), และการเคลื่อนที่แนวตั้งของชุดล้อ ($Z_{wi} \ i = 1, \dots, 4$).

ระบบรางแบบ CRTS II ถูกนำมาใช้ในโมเดลนี้ ประกอบด้วย ราง (rail), แผ่นรองราง (rail pads), concrete slab, cement asphalt (CA) mortar layer และ concrete base. ตัวราง (rail) ถูกจำลองให้เป็น Euler beam ซึ่งซัพพอร์ตด้วย discrete springs และ dashpots เพื่อแทนการใช้แผ่นรองราง (rail pads). Concrete slab, CA mortar และ Concrete base ถูกจำลองให้เป็น solid elements.

Contact ระหว่างล้อและรางถูกจำลองบนพื้นฐานของทฤษฎี Hertz contact theory. แรง contact ระหว่างล้อและราง สามารถคำนวณอัตโนมัติด้วยโปรแกรม LS-DYNA ด้วยสมการต่อไปนี้

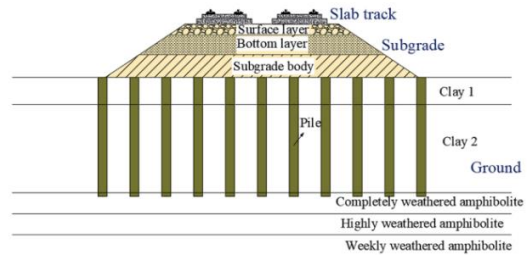
$$F = K_H \times (Z_w - Z_r - \delta) \quad (1)$$

โดย K_H คือค่า stiffness แนวตั้งของ contact spring ระหว่างล้อและราง, $K_H = 1.325 \times 10^9$ N/m

Z_w คือค่าการเคลื่อนที่แนวตั้งของล้อ, Z_r คือค่าการเคลื่อนที่แนวตั้งของราง และ δ คือค่าความขรุขระของผิวราง

2.2.2 โมเดลของดิน subgrade (Modeling of soil)

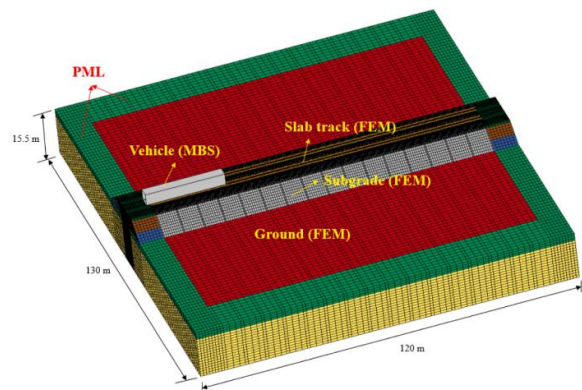
ดิน subgrade ประกอบด้วยดิน 3 ชั้นในรถไฟความเร็วสูงปักกิ่ง-เซี่ยงไฮ้ ได้แก่ surface layer, bottom layer และ subgrade body. ดินประกอบด้วย 5 ชั้น ได้แก่ clay1, clay2, completely weathered amphibolite, highly weathered amphibolite และ weekly weathered amphibolite (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 หน้าตัดของรถไฟความเร็วสูง (Li et al. (2020))

ดินถูกจำลองให้เป็นวัสดุหนืด (viscoelastic material) ใช้เป็น solid elements และใช้วิธี Perfectly Matched Layer (PML) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจำลองขอบเขตที่ไม่จำกัด (infinite boundary) นำมาใช้ในโมเดลโดยตั้งให้ขนานกับโดเมนของ FEM เพื่อป้องกันการสะท้อนของคลื่นที่ไม่ถูกต้องจากการที่ทำการย่อขนาดของขอบเขต. PML สามารถลดคลื่นที่เคลื่อนออกได้พร้อมทั้งสะท้อนคลื่นขนาดเล็ก

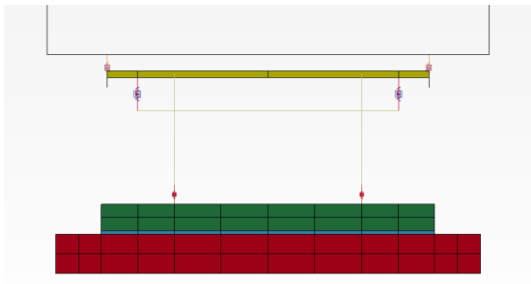
จากรูปที่ 6-8 แสดงหน้าตัดโครงสร้างรถไฟ CRTS II, CRTS III no USM และ CRTS III with USM โดยแผ่น Under Slab Mat (USM) ที่ทำการใส่ใน CRTS III มีความหนา 30 มิลลิเมตร ซึ่งถูกใส่ระหว่างพื้น Concrete slab และ Self-compacting concrete



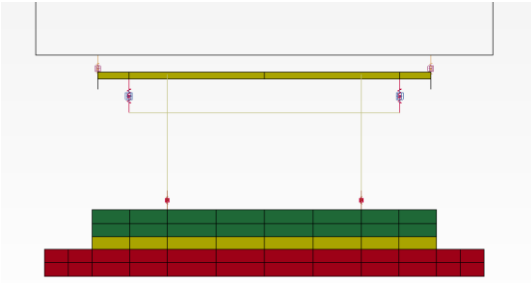
รูปที่ 5 แบบจำลอง 3D coupled train-track-soil model LS-DYNA

2.3 คุณสมบัติวัสดุ (Material properties)

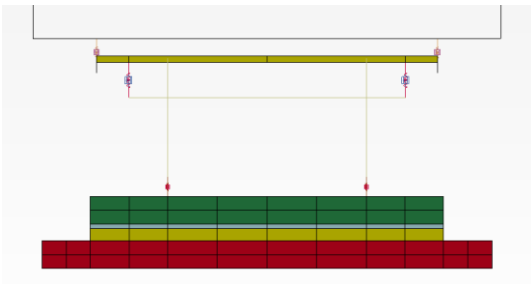
คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ 1.ยานพาหนะ (ตารางที่ 1) 2. แผ่นยาง USM (Under Slab Mat) (ตารางที่ 2) 3. ดิน (ตารางที่ 3) และ 4. slab track (ตารางที่ 4)



รูปที่ 6 หน้าตัดโครงสร้างทางรถไฟ CRTS II จาก LS-DYNA



รูปที่ 7 หน้าตัดโครงสร้างทางรถไฟ CRTS III no USM จาก LS-DYNA



รูปที่ 8 หน้าตัดโครงสร้างทางรถไฟ CRTS III with USM จาก LS-DYNA

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของยานพาหนะ (Properties of the vehicle)

Properties	Values
CSH380 EMU Train	
น้ำหนักของตัวรถ (kg)	40,000
น้ำหนักโบกี้ (kg)	3,200
น้ำหนักชุดล้อ (kg)	2,400
โมเมนต์เฉื่อยของ pitch motion ตัวรถ (kg)	5.47×10^5
โมเมนต์เฉื่อยของ pitch motion โบกี้ (kg)	6,800
Primary suspension stiffness (N/m)	1.04×10^6
Primary suspension damping (N.s/m)	5×10^3
Secondary suspension stiffness (N/m)	4×10^5
Secondary suspension damping (N.s/m)	6×10^3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติวัสดุของ USM (Under Slab Mat)

Properties	Values
ความหนา USM (m)	0.3
ความหนาแน่นของ USM (kg/m^3)	700
Poisson's ratio USM	0.35
โมดูลัสความยืดหยุ่นของ Soft USM (Pa)	2.10×10^6
โมดูลัสความยืดหยุ่นของ Typical USM (Pa)	3.32×10^6
โมดูลัสความยืดหยุ่นของ Stiff USM (Pa)	6.90×10^6
Primary suspension stiffness (N/m)	1.04×10^6

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของดิน (Properties of the soil)

Properties	surface layer of subgrade	bottom layer of subgrade	subgrade	first layer of ground	second layer of ground
ความหนา (m)	0.4	2.3	2	2.4	13.1
ความหนาแน่น (kg/m^3)	2,300	1,950	2100	1900	2010
โมดูลัสยืดหยุ่น (Pa)	2.00×10^8	1.50×10^8	1.10×10^8	4.20×10^7	8.3×10^7
Poisson's ratio	0.25	0.35	0.3	0.3	0.36

ตารางที่ 4 คุณสมบัติวัสดุของ CRTS II/CRTS III slab track (Properties of CRTS II/CRTS III slab track)

	Properties	rail	concrete slab	CA mortar	Self-compacting concrete	concrete base	
CRTS II	ความหนา (m)		0.2	0.03	-	0.3	
	ความหนาแน่น (kg/m^3)		7,830	2,500	1,900	-	2,400
	โมดูลัสยืดหยุ่น (Pa)		2.059×10^8	3.6×10^{10}	7×10^9	-	2.55×10^{10}
	Poisson's ratio		0.3	0.2	0.2	-	0.2
CRTS III	ความหนา (m)		0.2	-	0.09	0.2	
	ความหนาแน่น (kg/m^3)		7,800	2,500	-	2,500	2,500
	โมดูลัสยืดหยุ่น (Pa)		2.1×10^8	3.6×10^{10}	-	3.4×10^{10}	3.2×10^{10}
	Poisson's ratio		0.3	0.2	-	0.2	0.2
	Rail Pad Stiffness (N/m)		5.0×10^7				
Rail Pad Damping (N.s/m)		7.5×10^4					

3. ผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 Model Validation

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนี้ มีการใช้ผลการศึกษาจากการศึกษาที่ผ่านมา ได้แก่ Cai et. al. (2006) ซึ่งนำมาเทียบกับแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟของการศึกษานี้ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่า Wheel-rail contact force, Rail displacement และ Rail pad force โดยผลของการตรวจสอบถูกต้อง ของโครงสร้างทางรถไฟแบบ CRTS II เป็นไปตามตารางที่ 5 ซึ่งพบว่าแบบจำลองทางรถไฟ CRTS II ให้ผลอยู่ในช่วงของ Field Test และให้ผลต่างจากค่าของ Simulation Results ไม่เกิน 10% แบบจำลอง CRTS II จึงสามารถนำมาใช้ในการจำลองในการศึกษานี้ได้ ในขณะที่แบบจำลองโครงสร้างทางแบบ CRTS III ยังไม่ได้มีผลการศึกษาในภาคสนามที่ถูกเผยแพร่มากนัก จึงอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมหรือค้นคว้าในภายหลังเพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้

ตารางที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CRTS II

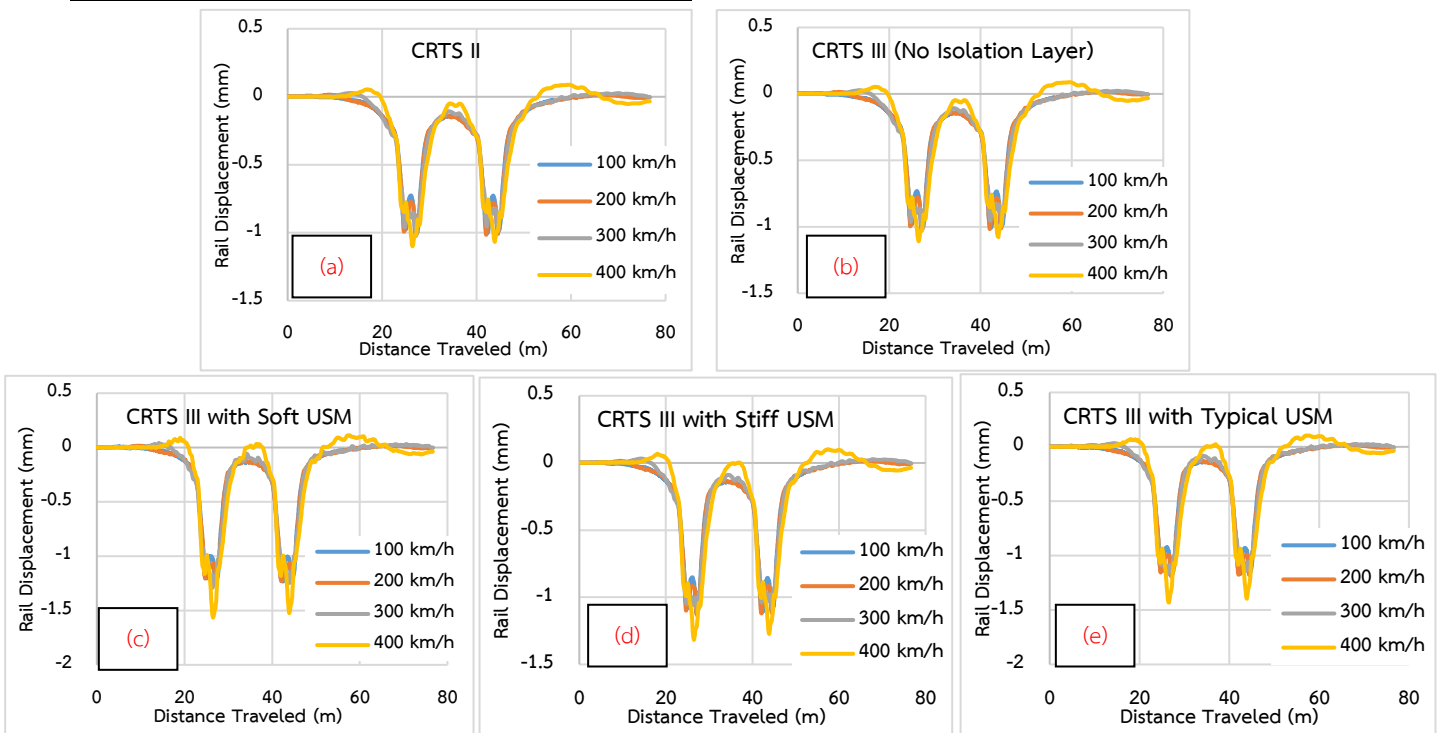
ผล	Cai et. al. (2006)		แบบจำลอง CRTS II การศึกษานี้	ผลต่าง (%) (Cai et. al. (2006))
	Field Test	Simulation Results		
Wheel-rail contact force (kN)	81-116	98.7	96.3	2.43%
Rail displacement (mm)	0.3-0.88	0.827	0.863	4.35%
Rail pad force (kN)	14.4-65.8	37.648	35.1	6.77%

3.2 Rail Displacement and Rail Acceleration

3.2.1. Time-history Plot

เมื่อรถไฟวิ่งผ่านจุดที่พิจารณาบนรางรถไฟ รางรถไฟจะเกิดการเคลื่อนตัว ได้ลักษณะเป็นกราฟดังรูปที่ 9 กราฟการเคลื่อนตัวของรางกับเวลา (Displacement-Time) แสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของราง ซึ่งส่วนใหญ่เคลื่อนที่ลงในแนวดิ่ง จึงมีค่าติดลบในแกน z ซึ่งพบว่ากราฟมี 2 ลูก นั่นคือเวลาที่โบกี้หน้าและโบกี้หลังของตู้รถไฟที่วิ่งผ่าน ในกราฟแต่ละลูก พบว่ามีจุดยอด 2 จุด นั่นคือเวลาที่ล้อคู่หน้าและล้อคู่หลังของโบกี้วิ่งผ่านจุดที่พิจารณา ลักษณะของกราฟในกรณีโครงสร้างที่ไม่มี Isolation Layer (CRTS II และ CRTS III No Isolation Layer) รูปที่ (a) และ (b) พบว่า ในแต่ละความเร็ว ตั้งแต่ 100 ถึง 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งสูงสุดของรางรถไฟ ใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟในกรณีที่มีโครงสร้างมี Isolation Layer รูปที่ (c), (d) และ (e) ในแต่ละความเร็ว พบว่า การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งสูงสุดของรางรถไฟ เมื่อรถไฟวิ่งด้วยความเร็ว 100, 200 และ 300 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ที่กรณีความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งสูงสุดที่ -1.57 mm ซึ่งสูงกว่าในกรณีความเร็วอื่น

นอกจากนี้ในโครงสร้างทุกประเภท ที่ความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ยังพบการยกตัวของรางอย่างชัดเจน ในช่วงก่อนล้อคู่หน้าสุด และช่วงหลังล้อคู่หลังสุดของตู้รถไฟวิ่งผ่านจุดที่พิจารณา ต่างจากในกรณีความเร็ว 100 และ 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่ไม่พบการยกตัวของราง และกรณี 300 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่พบการยกตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

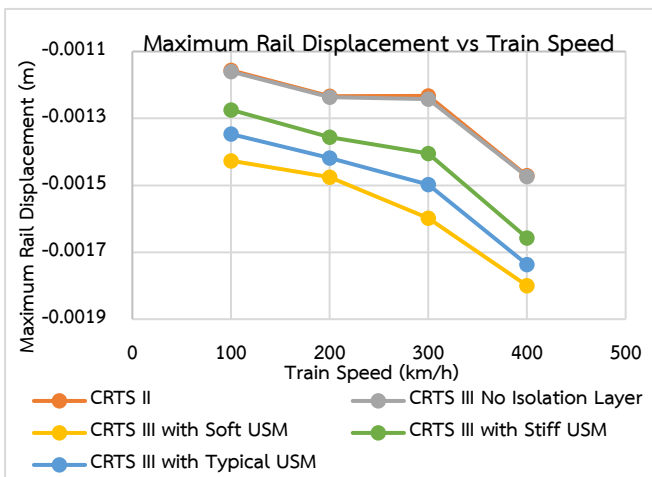


รูปที่ 9 กราฟ Rail Displacement ของจุดบนรางรถไฟ ที่ความเร็วต่าง ๆ บนโครงสร้างทางแบบ (a) CRTS II (b) CRTS III (No Isolation Layer) (c) CRTS III with Soft USM (d) CRTS III with Stiff USM (e) CRTS III with Typical USM

3.2.2. Maximum Rail Responses

พิจารณาารูปที่ 10 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบในโครงสร้างเดียวกัน พบว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ค่า Maximum Rail Displacement จะสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า ในกรณีโครงสร้างทางรถไฟแบบ CRTS II และ CRTS III (No Isolation Layer) พบว่ามีลักษณะของกราฟที่ใกล้เคียงกันมาก

ที่ความเร็วหนึ่ง ๆ เมื่อเปรียบเทียบ Maximum Rail Displacement ระหว่างชนิดโครงสร้างทางรถไฟ จะพบว่า ในทุกความเร็ว Maximum Rail Displacement ในโครงสร้างแบบ CRTS III with Soft USM จะมีค่ามากที่สุด ถัดลงมาเป็น CRTS III with Typical USM และ CRTS III with Stiff USM ตามลำดับ และในโครงสร้างแบบ CRTS II และ CRTS III (No Isolation Layer) มีค่า Maximum Rail Displacement ต่ำที่สุด และใกล้เคียงกัน จึงอาจสรุปได้ว่า โครงสร้างของทางรถไฟแบบ CRTS III ที่มี Isolation Layer ไม่ว่าจะ Stiffness ใดก็ตาม ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของรางรถไฟ (Rail Displacement) ที่มากกว่า โครงสร้างของทางรถไฟแบบ CRTS II โดย Isolation Layer แบบ Soft Stiffness จะให้ Rail Displacement ที่สูงสุด

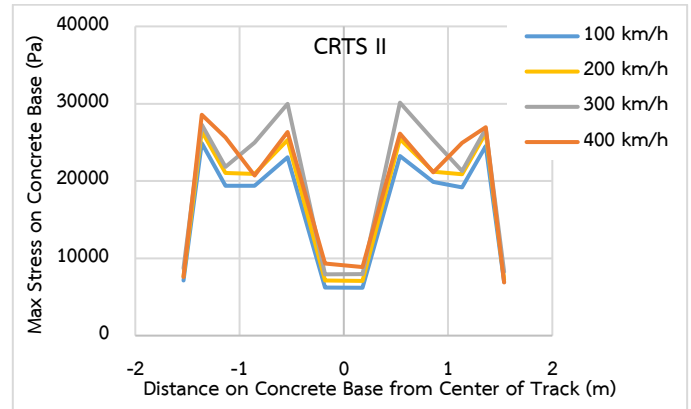


รูปที่ 10 กราฟ Maximum Rail Displacement – Train Speed ที่โครงสร้างทางรูปแบบต่าง ๆ

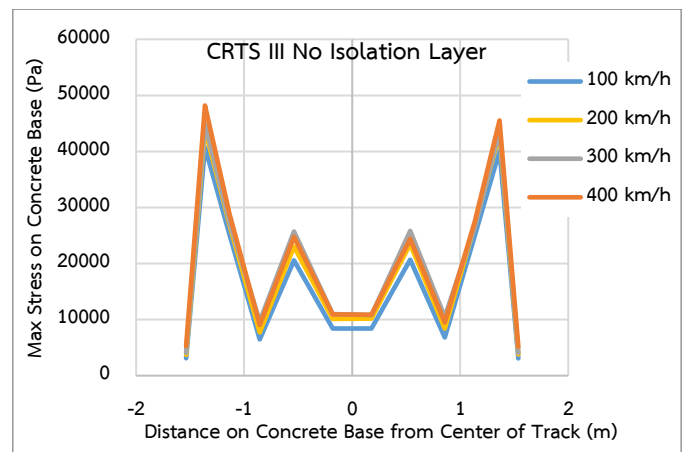
3.3 Stress on Concrete Base

Stress บนแต่ละจุดของทางรถไฟ จะมีค่าต่างกัน นำ Time-history Plot ของ Stress บน Concrete Base มาหาค่าสูงสุด ละ Plot เทียบกับ ตำแหน่งของ Element จะได้รูปที่ 11 จะพบว่า ในโครงสร้างทางแบบ CRTS III with Isolation Layer (รูปที่ 11 (c)-(e)) ได้กราฟในลักษณะเดียวกัน คือ Concrete Base จะเกิด Stress สูงสุด ที่ระยะ 0.76 เมตร ห่างจากแนวศูนย์กลางทางรถไฟ ซึ่งนั่นคือจุดที่อยู่ใต้รางรถไฟ ซึ่งระยะห่างบน Concrete Base ระหว่างจุดที่มีค่าสูงสุด 2 จุด มีค่าประมาณ 1.5 เมตร นั่นคือใกล้เคียงกับค่า Rail Gauge ของทางรถไฟที่ 1.435 เมตร แต่อาจคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเนื่องจากขนาดของ Element นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่า ที่ความเร็วเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิด Stress บน Concrete Base สูงขึ้นในทุกตำแหน่งบน Concrete Base

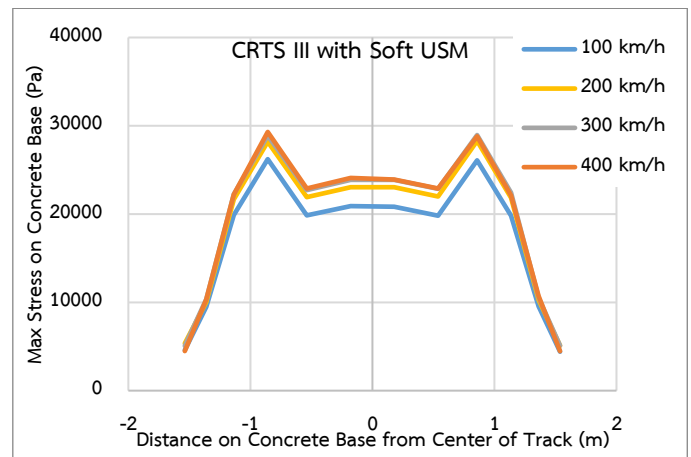
ในขณะที่เมื่อวิเคราะห์บนทางรถไฟแบบ CRTS II และ CRTS III (No Isolation Layer) (รูปที่ 11 (a),(b)) พบว่า ไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนของตำแหน่งบนทางรถไฟ กับค่า Stress on Concrete Base จึงอาจสรุปได้ว่า Isolation Layer (Under Slab Mat) ช่วยในการกระจายแรง ให้แรงกระจายลงจุดที่อยู่ในแนวของรางรถไฟสูงที่สุด



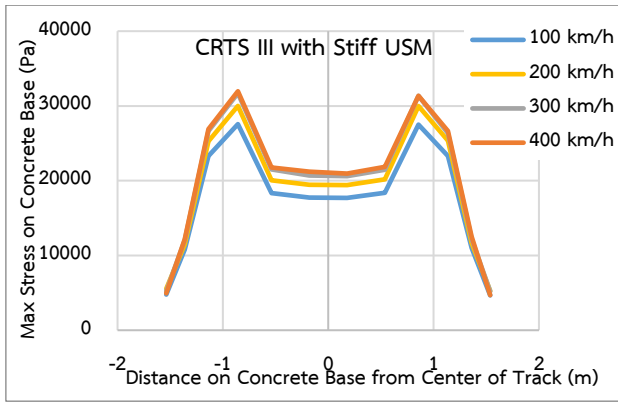
(a)



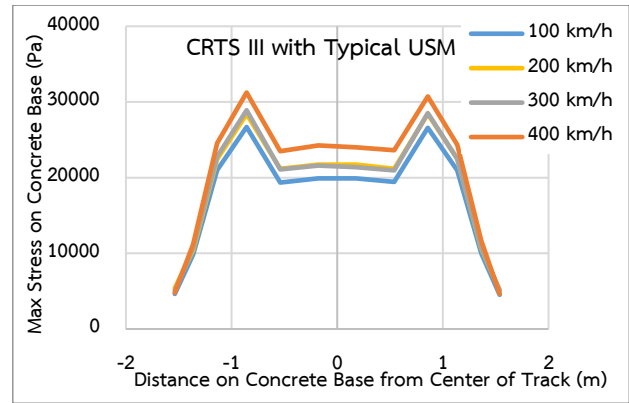
(b)



(c)



(d)

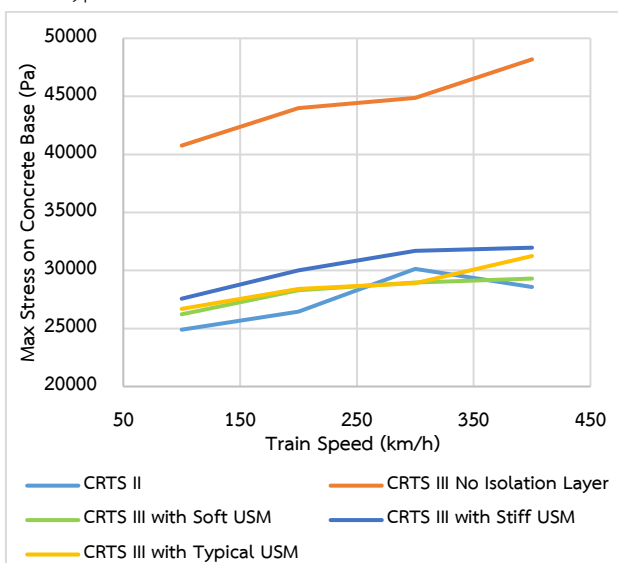


(e)

รูปที่ 11 กราฟ Maximum Stress on Concrete Base ที่จุดต่าง ๆ บน Concrete Base วัดระยะจากจุดศูนย์กลางของทางรถไฟ ที่ความเร็วต่าง ๆ บนโครงสร้างทางแบบ (a) CRTS II (b) CRTS III (No Isolation Layer) (c) CRTS III with Soft USM (d) CRTS III with Stiff USM (e) CRTS III with Typical USM

เมื่อเปรียบเทียบ Stress on Concrete Base ระหว่างกรณีโครงสร้างทางรถไฟรูปแบบต่าง ๆ (รูปที่ 12) พบว่า Stress on Concrete Base จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของรถไฟเพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีทางรถไฟแบบ CRTS II ที่ Stress ที่พบว่า รถไฟที่ความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทำให้เกิด Stress on Concrete Base ต่ำกว่าในกรณีความเร็ว 300 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงความเร็วที่ละเอียดขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่า โครงสร้างทางรถไฟความเร็วสูงแบบ CRTS III (No Isolation Layer) ทำให้เกิด Stress on Concrete Base ที่สูงกว่าโครงสร้างแบบ CRTS II อย่างชัดเจน แต่ในการก่อสร้างจริง ที่มีการใช้ Isolation Layer เป็น Under Slab Mat จะทำให้โครงสร้างทางรถไฟความเร็วสูงแบบ CRTS III with Isolation Layer มีค่า Stress on Concrete Base ใกล้เคียงกับโครงสร้างแบบ CRTS II โดย Isolation Layer ที่เป็น Stiff USM จะให้ Stress on Concrete Base สูงกว่าในกรณีที่เป็น Typical USM และ Soft USM ตามลำดับ



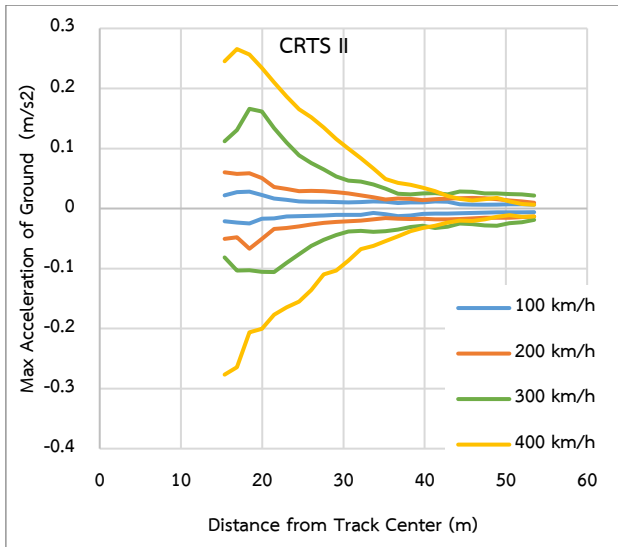
รูปที่ 12 กราฟ Maximum Stress on Concrete Base – Train Speed ที่โครงสร้างทางรูปแบบต่าง ๆ

3.4 Ground Vibration

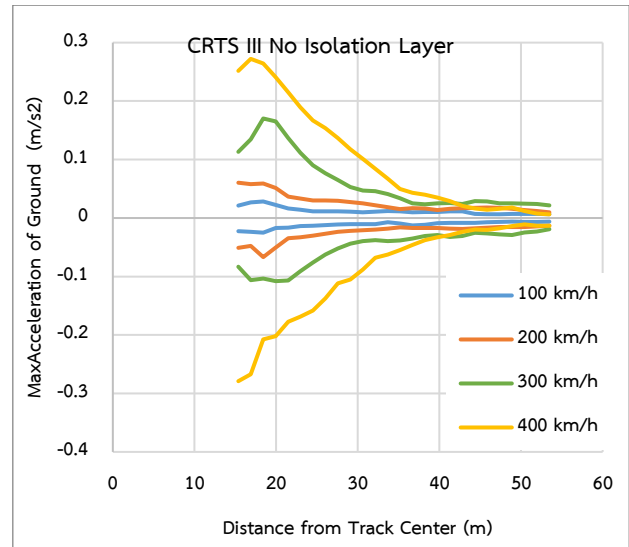
นำค่าสูงสุดและต่ำสุด มาเป็นตัวแทนเพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของพื้นดิน เนื่องจากเป็นค่าที่โครงสร้างจะได้รับ จึงนำค่าสูงสุด มาเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ ซึ่งค่า Maximum Acceleration ของพื้นดิน โดยเทียบกับตำแหน่งของพื้นดิน ตามระยะห่างจากศูนย์กลางของโครงสร้างทางรถไฟ เป็นไปตามรูปที่ 13 พบว่า เมื่อความเร็วมากขึ้น จะส่งผลให้เกิด Ground Acceleration มากขึ้น ในความเร็ว 100 และ 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่า Ground Acceleration สูงสุด ในพื้นดินที่ใกล้ทางรถไฟมากที่สุด และลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่ห่างออกไป

เมื่อพิจารณาในดินที่ระยะห่างออกไป ในกรณีความเร็ว 300 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่า Ground Acceleration สูงสุด เกิดขึ้นที่พื้นดินที่ระยะห่างจากทางรถไฟ 18 เมตร แล้วจากนั้นจึงลดลงตามระยะทางที่ห่างออกไป ในขณะที่ในกรณีความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่า ในช่วงระยะห่างจากศูนย์กลางโครงสร้างทางรถไฟ ไม่เกิน 30 เมตร พบว่า ค่า Maximum Ground Acceleration สูง แตกต่างจากความเร็วอื่น อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาดินที่ระยะห่าง 40 เมตรขึ้นไป พบว่า ค่า Maximum Ground Acceleration ของกรณีความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ต่ำกว่าในกรณี 300 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

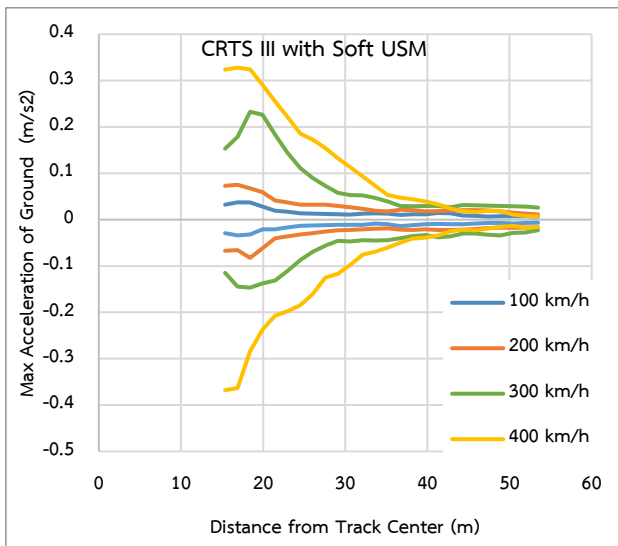
กราฟดังรูปที่ 14 แสดงถึงการพิจารณา Maximum Acceleration ของจุดบนพื้นดิน โดยพิจารณาบนระยะที่ห่างออกจากทางรถไฟ โดยพิจารณาที่ความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทางรถไฟรูปแบบต่าง ๆ พบว่า ลักษณะของกราฟของโครงสร้างทางรถไฟแบบ CRTS II และ CRTS III (No Isolation Layer) มีค่าที่ใกล้เคียงกันอย่างมาก ในขณะที่โครงสร้างทางรถไฟแบบ CRTS III ที่มี Isolation Layer ทั้ง 3 ประเภท มีค่าที่แตกต่างออกมา พบว่า ในช่วงพื้นดินที่ระยะห่างจากทางรถไฟไม่มาก ค่าของ Acceleration ของโครงสร้างทางรถไฟแบบ CRTS III with Soft USM มีค่าสูงสุด และโครงสร้างทางรถไฟแบบ CRTS III with Typical USM และ Stiff USM ลดลงตามลำดับ แต่ยังคงสูงกว่ากรณีที่ไม่มี Isolation Layer ทั้งคู่ แต่เมื่อพิจารณาที่ช่วงระยะห่างจากศูนย์กลางทางรถไฟ เกิน 30 เมตร พบว่า ความเร่งของพื้นดิน มีค่าใกล้เคียงกันในทุก 5 รูปแบบของโครงสร้างทางรถไฟ



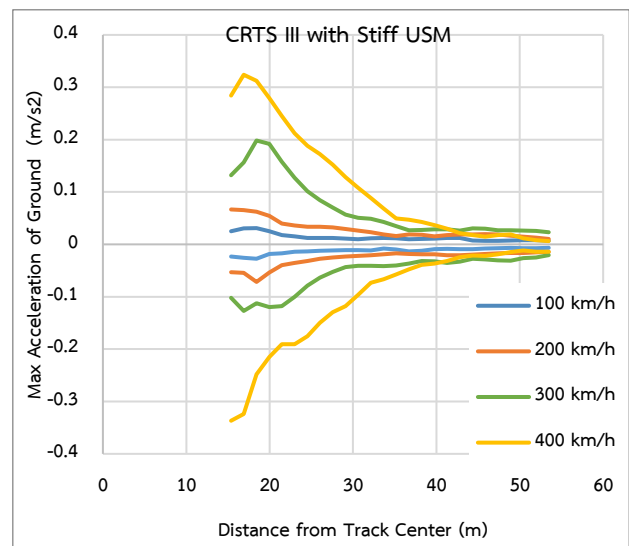
(a)



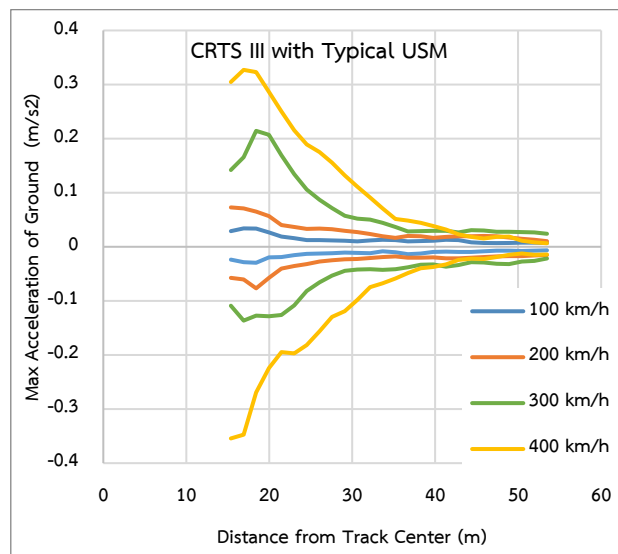
(b)



(c)

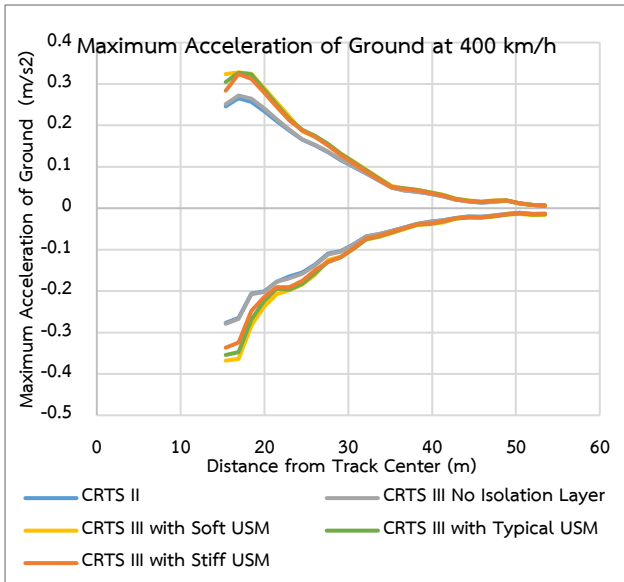


(d)



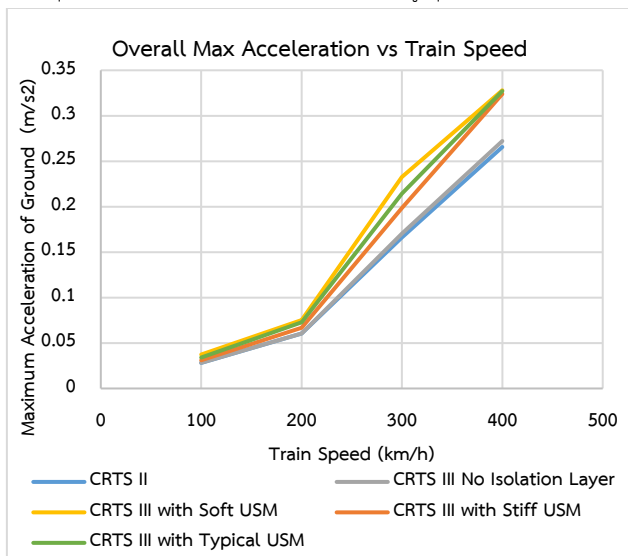
(e)

รูปที่ 13 กราฟ Maximum Acceleration ของพื้นที่จุดต่าง ๆ วัดระยะจากจุดศูนย์กลางทางรถไฟ ที่ความเร็วต่าง ๆ บนโครงสร้างทางแบบ (a) CRTS II (b) CRTS III (No Isolation Layer) (c) CRTS III with Soft USM (d) CRTS III with Stiff USM (e) CRTS III with Typical USM



รูปที่ 14 กราฟ Maximum Acceleration ของพื้นดินที่จุดต่าง ๆ วัตรระยะจากจุดศูนย์กลางทางรถไฟ ที่ความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เปรียบเทียบผลระหว่างประเภทของโครงสร้างทางรถไฟ

กราฟรูปที่ 15 วิเคราะห์ถึงค่า Maximum Acceleration โดยรวมของพื้นดิน ซึ่งค่าสูงสุดนั้นจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ห่างจากศูนย์กลางทางรถไฟไม่เกิน 18 เมตร ซึ่งพบความสัมพันธ์ว่า เมื่อความเร็วสูงขึ้น จะเกิด Acceleration สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดโครงสร้างของทางรถไฟพบว่า ทางรถไฟแบบ CRTS II และ CRTS III (No Isolation Layer) ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ทางรถไฟแบบ CRTS III with Isolation Layer จะมีความเร่งในดินที่สูงกว่า ซึ่งพบว่า ความเร่งของกรณี Soft Isolation Layer (USM) ให้ค่า Maximum Acceleration สูงที่สุด โดยเฉพาะที่ความเร็ว 300 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงสาเหตุ และความเร็วที่แน่ชัดที่เกิดความเร่งในดินสูงสุด



รูปที่ 15 กราฟ Maximum Acceleration of Ground – Train Speed ที่โครงสร้างทางรูปแบบต่าง ๆ

4. บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์การวิ่งของรถไฟความเร็วสูง ใน LS-DYNA พบว่า

- ที่ความเร็วต่าง ๆ จะทำให้เกิด Rail Displacement ในลักษณะและค่าที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นในกรณีความเร็วสูงถึง 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะทำให้เกิดการยกตัวของรางอย่างชัดเจน ในช่วงก่อนและหลังล้อรถไฟวิ่งผ่าน และที่ความเร็ว 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะเกิด Rail Displacement สูงกว่าความเร็วอื่น เฉพาะในโครงสร้างทางแบบ CRTS III with Isolation Layer
- เมื่อความเร็วรถไฟสูงขึ้น Maximum Rail Displacement จะสูงขึ้น โดยโครงสร้างทางแบบ CRTS III with Soft USM ให้ Maximum Rail Displacement สูงสุด ถัดลงมาเป็น CRTS III with Typical USM, CRTS III with Stiff USM, CRTS III (No Isolation Layer) และ CRTS II ตามลำดับ โดยพบว่า ผลของ CRTS III (No Isolation Layer) และ CRTS II มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือ โครงสร้างทางแบบ CRTS III ให้ค่า Rail Displacement สูงกว่าโครงสร้างทางแบบ CRTS II

- ความเค้นที่เกิดบนชั้น Concrete Base พบว่าเกิดสูงสุดที่ตำแหน่งใต้รางรถไฟ ในกรณี CRTS III with Isolation Layer และจะเพิ่มขึ้นเมื่อรถไฟมีความเร็วเพิ่มขึ้น และพบว่า โครงสร้างทางแบบ CRTS III (No Isolation Layer) ให้ค่า Stress on Concrete Base สูงที่สุด ในขณะที่โครงสร้างทางแบบ CRTS III with Isolation Layer และ CRTS II ให้ค่าต่ำกว่า และเมื่อพบว่า Stiff USM ให้ค่ามากกว่า Typical USM และ Soft USM ตามลำดับ

- Ground Acceleration ลดลงในดินที่ห่างออกจากทางรถไฟไป และพบว่า ทางรถไฟแบบ CRTS III with Soft USM ให้ความเร่งสูงสุดรองลงมาเป็น Typical USM และ Stiff USM ตามลำดับ และโครงสร้างทางรถไฟแบบ CRTS II และ CRTS III (No Isolation Layer) ให้ค่าความเร่งในพื้นดินต่ำที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน

4.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- ควรมีการค้นคว้า และทดสอบตรวจวัดการตอบสนองของโครงสร้างทางภาคสนาม เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ของโครงสร้างทางแบบ CRTS III เพิ่มเติม อาจดำเนินการตรวจสอบในโครงการรถไฟความเร็วสูงกรุงเทพ-นครราชสีมาเพิ่มเติมเมื่อโครงการแล้วเสร็จ

- อาจดำเนินการสำรวจคุณสมบัติของดินในประเทศไทย ในบริเวณที่มีการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง เพื่อปรับค่าคุณสมบัติของแบบจำลองเพื่อให้ผลการศึกษามีความสอดคล้องกับโครงสร้างในประเทศไทยได้

- ควรจะทำการจำลองโดยใช้จำนวน Case ของความเร็วให้มากขึ้น และละเอียดขึ้น เพื่อให้เห็นผลของความเร็วต่อการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางรถไฟที่ชัดเจน

- จำลองการวิ่งของรถไฟ ด้วยตู้รถไฟที่มี Axle Load ที่สูงขึ้น เพื่อให้ครอบคลุมถึงตู้รถไฟประเภทต่าง ๆ มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อ.ดร.ชยุตม์ งามโชนง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทที่คอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำปริญญาโทนี้อยู่เสมอ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการสืบค้นข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

Connolly, D. P., Kouroussis, G., Laghrouche, O., Ho, C. L., & Forde, M. C. (2015). Benchmarking railway vibrations—Track, vehicle, ground and building effects. *Construction and Building Materials*, 92, 64-81.

Connolly, D. P., Marecki, G. P., Kouroussis, G., Thalassinakis, I., & Woodward, P. K. (2016). The growth of railway ground vibration problems—a review. *Science of the Total Environment*, 568, 1276-1282.

Costa, P. A., Colaço, A., Calçada, R., & Cardoso, A. S. (2015). Critical speed of railway tracks. Detailed and simplified approaches. *Transportation Geotechnics*, 2, 30-46.

Feng, S. J., Zhang, X. L., Wang, L., Zheng, Q. T., Du, F. L., & Wang, Z. L. (2017). In situ experimental study on high-speed train induced ground vibrations with the ballast-less track. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, 195-214.

Gao, G. Y., Chen, Q. S., He, J. F., & Liu, F. (2012). Investigation of ground vibration due to trains moving on saturated multi-layered ground by 2.5 D finite element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 40, 87-98.

Kaewunruen, S., & Martin, V. (2018). Life cycle assessment of railway ground-borne noise and vibration mitigation methods using geosynthetics, metamaterials and ground improvement. *Sustainability*, 10(10), 3753.

Kouroussis, G., Connolly, D. P., & Verlinden, O. (2014). Railway-induced ground vibrations—a review of vehicle effects. *International Journal of Rail Transportation*, 2(2), 69-110.

Lei, X., & Wang, J. (2014). Dynamic analysis of the train and slab track coupling system with finite elements in a moving frame of reference. *Journal of Vibration and Control*, 20(9), 1301-1317.

Li, T., Su, Q., & Kaewunruen, S. (2019). Saturated ground vibration analysis based on a three-dimensional coupled train-track-soil interaction model. *Applied Sciences*, 9(23), 4991.

Li, T., Su, Q., & Kaewunruen, S. (2020). Influences of piles on the ground vibration considering the train-track-soil dynamic interactions. *Computers and Geotechnics*, 120, 103455.

Li, T., Su, Q., Shao, K., & Liu, J. (2019). Numerical analysis of vibration responses in high-speed railways considering mud pumping defect. *Shock and Vibration*, 2019.

Ngamkhanong, C., Ming, Q. Y., Li, T., & Kaewunruen, S. (2020). Dynamic train-track interactions over railway track stiffness transition zones using baseplate fastening systems. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104866.

Sheng, X. W., Zheng, W. Q., Zhu, Z. H., Luo, T. J., & Zheng, Y. H. (2020). Properties of rubber under-ballast mat used as ballastless track isolation layer in high-speed railway. *Construction and Building Materials*, 240, 117822.

Thompson, D. J., Jiang, J., Toward, M. G. R., Hussein, M. F. M., Ntotsios, E., Dijckmans, A., ... & Degrande, G. (2016). Reducing railway-induced ground-borne vibration by using open trenches and soft-filled barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 45-59.

Thompson, D. J., Kouroussis, G., & Ntotsios, E. (2019). Modelling, simulation, and evaluation of ground vibration caused by rail vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 57(7), 936-983.

Wang, M., Cai, C., Zhu, S., & Zhai, W. (2017). Experimental study on dynamic performance of typical nonballasted track systems using a full-scale test rig. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(4), 470-481.

Xu, Q., Sun, H., Wang, L., Xu, L., Chen, W., & Lou, P. (2021). Influence of vehicle number on the dynamic characteristics of high-speed train-CRTS III slab track-subgrade coupled system. *Materials*, 14(13), 3662.

Zhi-ping, Z., Jun-dong, W., Shi-wen, S., Ping, L., Shuaibu, A. A., & Wei-dong, W. (2019). Experimental study on evolution of mechanical properties of CRTS III ballastless slab track under fatigue load. *Construction and Building Materials*, 210, 639-649.