



การตรวจสอบการผิดรูปของเหล็กโครงสร้างคอนกรีตด้วยเทคนิคการทดสอบทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
Detection of Misshaped Steel Bars for Reinforced Concrete Structure
using Electromagnetic Testing Technique

ปกรณ์เกียรติ์ เศวตเมธิกุล*, จันทวรรณ ข่านกิติ, พรพิมล ฤกษ์สมพงษ์, วิโรจน์ พูลสวัสดิ์

ห้องปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมคลื่นความถี่สูงและการประยุกต์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เลขที่ 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110
E-mail address: pkkt@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ นำเสนอผลการศึกษาวิธีการตรวจสอบการผิดรูปของเหล็กโครงสร้างคอนกรีตด้วยเทคนิคการทดสอบทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในที่นี้ ได้ใช้สายอากาศไมโครสตริปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าอย่างง่ายเป็นโพรบในการทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ คือ คอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 300 มม x 400 มม x 50 มม โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม เท่ากับ 3 มม ที่ระยะความลึกจากผิวหน้า 10, 15 และ 20 มม ผลจากการทดสอบ พบว่า สามารถตรวจพบการผิดรูปของเหล็กโครงสร้างที่มีการบิดโค้งงอ จากแนวโน้มของการมุมการบิดโค้งงอที่สัมพันธ์กับคลื่นความถี่ทดสอบ กล่าวคือ เมื่อมุมของการบิดโค้งงอมากขึ้น คลื่นความถี่ทดสอบจะเปลี่ยนแปลงไป

โดยผลของงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินโครงสร้างอาคารเชิงเทคนิค เพื่อเป็นการป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากความบกพร่องของโครงสร้างคอนกรีต ตลอดจนการบำรุงรักษาอาคารเชิงป้องกันได้อีกด้วย

คำสำคัญ: การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีต, การทดสอบแบบไม่ทำลาย, เทคนิคการทดสอบทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

This article proposed a study report of detection of misshaped steel bars for reinforced concrete structure using Electromagnetic testing technique. We herein used a simple rectangular patch antenna as a testing probe. In our experiment, the sample has a dimension of 300 mm x 400 mm x 50 mm, where a steel bar diameter is 3 mm at the depths of 10, 15 and 15 mm. The testing results showed that it can be detected misshaped steel bars by trends of resonant frequency variation. The resonant frequency was significantly varied while bending angle was increased.

Our study can be applied for building structure evaluation as technical inspection, in order to prevent unexpected accidents occurred, as well as preventive maintenance.

Keywords: Reinforced concrete inspection, non-destructive testing, electromagnetic testing technique



1. ที่มาและความสำคัญ

เทคโนโลยีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing) เป็นศาสตร์เฉพาะทางด้านวิศวกรรมที่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ต้องการทดสอบ โดยในประเทศแถบอเมริกาเหนือและยุโรปเองต่างให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เอื้อประโยชน์ในการพิสูจน์สิ่งที่ยากต่อการทดสอบด้วยตัวตาเปล่า จากที่ได้ทราบข้างต้นแล้วว่า การทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นศาสตร์ที่เกือบทุกประเทศทั่วโลกต่างให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพิสูจน์และทดสอบได้อย่างหลากหลายงานอาชีพ เช่น การอัลตราซาวด์ทารกในครรภ์ การตรวจภาพเอ็กซเรย์โครงสร้างกระดูก การเอ็กซเรย์ตรวจวัตถุแปลกปลอมในสนามบินพาณิชย์ การตรวจสอบภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลจากรังสีความร้อน การตรวจสอบความบกพร่องของรอยเชื่อม การตรวจสอบคอนกรีตเสริมเหล็กโครงสร้างอาคาร เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างที่กล่าวมา แม้จะเป็นศาสตร์เดียวกัน คือ เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายเช่นเดียวกัน แต่ให้ผลการวัดทดสอบที่แตกต่างกัน เนื่องจากใช้เทคนิคการวัดทดสอบและคลื่นความถี่ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยเทคนิคที่ใช้ในการวัดทดสอบมาตรฐานทั่วไป สามารถจำแนกออกได้ ดังนี้ [1] Acoustic emission (AE), Electromagnetic testing (ET), Leak testing method (LT), Liquid penetrant test (PT), Magnetic particle test (MT), Neutron radiographic testing (NRT), Radiographic testing method (RT), Thermal/Infrared testing (TIR), Ultrasonic testing (UT), Vibration analysis method (VA) และ Visual and optical testing (VT)

ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัย ได้ให้ความสนใจการทดสอบเหล็กเสริมของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการโค้งตัว ซึ่งเป็นรูปแบบการทดสอบแบบหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมากสำหรับงานทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยมีโอกาสเกิดขึ้นได้กับโครงสร้างอาคารทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ทั่วไป และอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น การใช้เหล็กเสริมขนาดเล็กเกินไปหรือผิดไปจากการออกแบบ การทรนรับโหลดที่มากกว่าปกติ การเกิดการสั่นคลอนของฐานรากโครงสร้างจากแผ่นดินไหว การยุบตัวและการเคลื่อนตัวของชั้นดินฐานราก เป็นต้น ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้น ย่อมเกิดผลโดยตรงต่อความเสียหายด้านทรัพย์สินและชีวิตอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อีกทั้งยังไม่สามารถทำนายเหตุการณ์ข้างต้นล่วงหน้าได้อีกด้วย แต่การป้องกันด้วยการทดสอบตามระยะเวลาที่เหมาะสม อาจจะเป็นทางหนึ่งที่จะช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสาเหตุเหล่านั้นลงไปได้

จากการศึกษาของคณะผู้วิจัย [2-3] พบว่า การทดสอบโครงสร้างอาคารทั่วไป นิยมใช้เครื่องมือวัดทดสอบที่ใช้เทคนิค UT และ VA เป็นส่วนใหญ่ แต่ผลลัพธ์ของการทดสอบที่ได้ ค่อนข้างเข้าใจได้ยากสำหรับบุคคลทั่วไป และต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการอ่านและวิเคราะห์ด้วย ดังนั้น เพื่อให้การวัดทดสอบมีความง่ายขึ้น คณะผู้วิจัย จึงได้ศึกษาแนวทางการพัฒนาเครื่องมือวัดทดสอบที่มีกระบวนการวัดทดสอบที่ง่าย และเป็น การทดสอบที่ไม่ทำลาย โดยการใช้โพรมความถี่สูงรูปแบบอย่างง่ายที่ได้ศึกษามาจากงานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง [4-13] ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโพรมที่พัฒนาจากโครงสร้างไมโครสตริป ที่มีจุดเด่นในการออกแบบและสร้างได้ง่าย มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา

2. สมมุติฐานของการวิจัย

เราอนุมานโมเดลเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นโครงข่ายแบบสองพอร์ต (Two-port network) ที่มีองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ความต้านทาน (Impedance) ความเหนี่ยวนำ (Inductance) ความนำไฟฟ้า (Admittance) และการเก็บประจุ (Capacitance) ที่ตอบสนองต่อคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ใดๆ เช่นนี้แล้ว จึงตั้งสมมุติฐาน ได้ว่า

1) เหล็กเส้นที่โค้งตัว จะมีค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้า (ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความนำไฟฟ้า และการเก็บประจุ) ที่แตกต่างไปจากเหล็กเส้นตรงปกติ

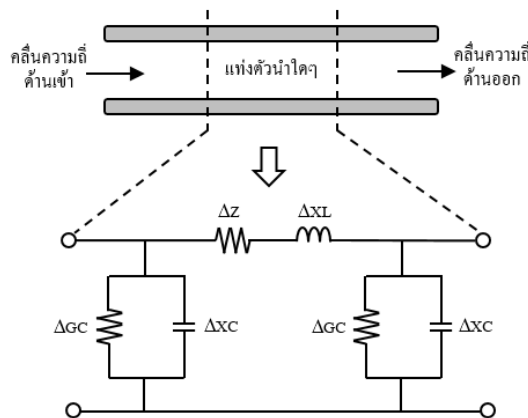
2) องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ต่างกันของเหล็กโค้งตัวและเหล็กเส้นตรง ย่อมจะให้ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของเรโซแนนซ์ที่แตกต่างกัน

จากการตั้งข้อสมมุติฐานข้างต้น จึงได้ว่า หากทำการวัดทดสอบเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์เรโซแนนซ์ของเหล็กเส้นตรงกับเหล็กเส้นโค้งตัว จะทำให้สามารถตรวจสอบเหล็กที่โค้งตัวได้ จากแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในแนวทางเดียวกัน เมื่อมุมการโค้งตัวมากขึ้น

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีสายนำสัญญาณ

ในทางทฤษฎี เมื่อป้อนคลื่นความถี่เข้าไปในแท่งตัวนำใดๆ เราสามารถพิจารณาแท่งตัวนำใดๆ นั้นด้วยสายนำสัญญาณหรือโครงข่ายสองพอร์ตที่มีองค์ประกอบทางไฟฟ้า ประกอบด้วย ความต้านทาน (Impedance) ความเหนี่ยวนำ (Inductance) ความนำ (Admittance) และการเก็บประจุ (Capacitance) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โมเดลสายนำสัญญาณ

โดยที่ ΔZ แทนความต้านทานหนึ่งหน่วยที่เกิดขึ้นของแท่งตัวนำที่แปรผันค่าไปตามความยาว ΔXL แทนความต้านทานหนึ่งหน่วยของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นของแท่งตัวนำที่แปรผันค่าไปตามความยาว ΔGC แทนความนำหนึ่งหน่วยที่เกิดขึ้นของแท่งตัวนำที่แปรผันค่าไปตามความยาว และ ΔXC แทนความต้านทานหนึ่งหน่วยของการเก็บประจุที่แปรผันค่าไปตามความยาว

ทฤษฎีการเกิดค่าสัมประสิทธิ์เรโซแนนซ์

พิจารณาโมเดลสายนำสัญญาณในรูปที่ 1 จะได้ว่า องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะตอบสนองค่าสัมประสิทธิ์เรโซแนนซ์ (f_r) ใดๆ ตามหลักการของวงจรเรโซเนเตอร์ นั่นคือ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

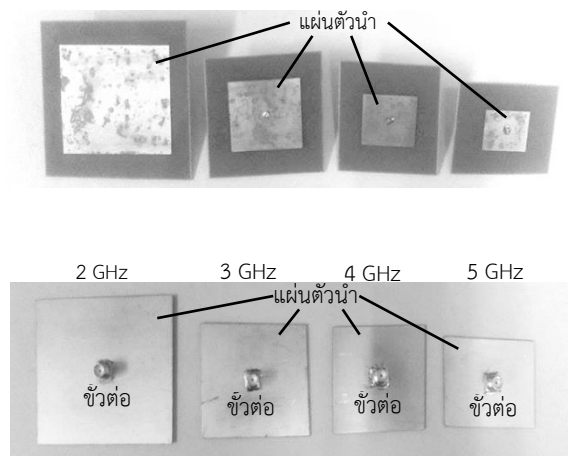
จากสมการที่ (1) พบว่า ค่าค่าสัมประสิทธิ์เรโซแนนซ์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบสองค่า คือ ความเหนี่ยวนำ (L) และการเก็บประจุ (C) ซึ่งเมื่อพิจารณาย้อนกลับไปรูปที่ 1 หากว่า คุณสมบัติทางกายภาพของแท่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปหรือเกิดการโค้งตัวขึ้น ย่อมจะส่งผลให้ค่าองค์ประกอบทุกตัว คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความนำ และการเก็บประจุ เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจะทำได้

ความถี่เรโซแนนท์เปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น อาศัยสมมุติฐานนี้ จึงอาจสามารถตรวจพบเหล็กโค้งตัวได้จากการเปลี่ยนแปลงไปของความถี่เรโซแนนท์เทียบกับเหล็กเส้นตรงปกติได้

4. วิธีดำเนินการวิจัย

โพรบที่ใช้ในการทดสอบ

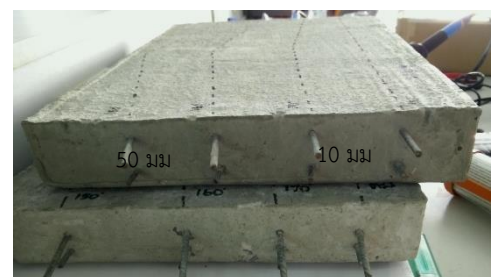
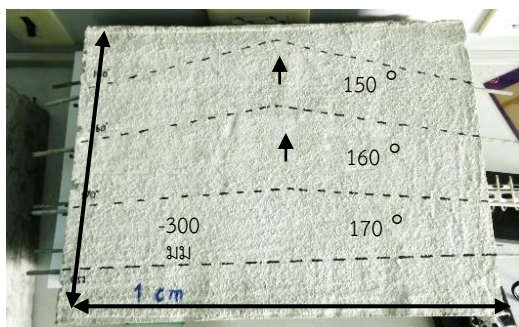
โพรบความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยม และได้ออกแบบที่ความถี่แตกต่างกัน คือ 2, 3, 4 และ 5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยด้านหน้าเป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiator) และด้านหลังเป็นแผ่นตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์ โดยคอนเน็คเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ SMA/F สำหรับงานความถี่สูงที่สามารถใช้ได้กับความถี่สูงสุด 10 GHz



รูปที่ 2 สายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม (บน ด้านหน้า (ล่าง) ด้านหลัง)

ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดกว้าง 300 มม ยาว 400 มม และหนา 50 มม แสดงดังรูปที่ 3 โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมคอนกรีต เท่ากับ 3 มม ที่ระยะหุ้ม (ความลึกของผิวถึงเหล็กเส้น) เท่ากับ 10, 15 และ 20 มม และกำหนดมุมการโค้งตัว (ที่แสดงเป็นเส้นประบนผิวหน้าคอนกรีต ดังในรูปที่ 3) เป็น 150, 160, 170 และ 180 (เส้นตรง) องศา ซึ่งเป็นตัวอย่างในเบื้องต้นที่ใช้ในการทดสอบของงานวิจัยนี้



รูปที่ 3 ตัวอย่างทดสอบ (ซ้าย) ด้านบน และ (ขวา) ด้านข้าง ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก

การวัดและทดสอบ

เมื่อทำการปรับตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงทำการวัดทดสอบโดยในการวัดทดสอบจะมีการวัดทดสอบด้วยสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยม สำหรับผลของการวัดและทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย จะพิจารณาจากวัตถุประสงค์เป็นหลัก ซึ่งจะศึกษาวิธีการตรวจสอบการโค้งงอของเหล็กเสริมคอนกรีต และพัฒนาอุปกรณ์การตรวจสอบการโค้งงอของเหล็กได้ตามที่ได้ตั้งเป้าหมายหรือไม่ โดยลักษณะของเหล็กจะมีทั้งหมด 4 แบบคือ 150, 160, 170 และ 180 องศา และจะกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กอยู่ที่ 10, 15 และ 20 มม. ตามลำดับ โดยในการวัดทดสอบจะพิจารณาจากความถี่เรโซแนนซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่สุด

พิจารณารูปที่ 4 ในการวัดทดสอบ จะให้โพรบความถี่สูงวางทาบบนผิวสัมผัสด้านบนของแผ่นคอนกรีต ที่ตำแหน่งจุดที่ต้องการวัด โดยในที่นี้ เพื่อความง่ายในการทดสอบ ได้กำหนดจุดวัดสำหรับเหล็กเสริมแต่ละมุมมองศาละ 1 จุด คือ จุดที่เกิดการโค้งงอตัว ดังแสดงจุดวัดในรูปที่ 3 (ลูกศรชี้)



รูปที่ 4 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมความถี่ 2 GHz

ความถี่เรโซแนนซ์	ระยะหุ้ม	ขนาดของเหล็ก (องศา)				แนวโน้ม
		150	160	170	180	
ความถี่สะท้อนกลับ (GHz)	10 mm	2.845	2.845	2.845	2.845	-
	15 mm	2.845	2.845	2.845	2.845	-
	20 mm	2.845	2.845	2.845	2.845	-
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} (dB)	10 mm	13.11	13.84	13.94	14.45	เพิ่มขึ้น
	15 mm	11.02	11.32	10.30	11.36	×
	20 mm	18.29	20.26	17.97	19.65	×



ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมความถี่ 3 GHz

ความถี่เรโซแนนท์	ระยะหุ้ม	ขนาดของเหล็ก (องศา)				แนวโน้ม
		150	160	170	180	
ความถี่สะท้อนกลับ (GHz)	10 mm	3.729	3.594	3.445	3.269	ลดลง
	15 mm	5.904	5.733	5.951	5.766	✗
	20 mm	5.447	5.409	5.566	5.764	✗
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} (dB)	10 mm	19.79	17.57	16.38	18.51	✗
	15 mm	14.05	15.60	15.10	14.49	✗
	20 mm	16.69	16.11	11.37	18.24	✗

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมความถี่ 4 GHz

ความถี่เรโซแนนท์	ระยะหุ้ม	ขนาดของเหล็ก (องศา)				แนวโน้ม
		150	160	170	180	
ความถี่สะท้อนกลับ (GHz)	10 mm	4.325	4.508	4.309	4.489	✗
	15 mm	4.459	4.47	4.598	4.632	✗
	20 mm	4.244	4.225	4.34	4.585	✗
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} (dB)	10 mm	14.42	17.68	20.18	18.97	✗
	15 mm	14.87	14.70	14.79	16.81	✗
	20 mm	24.09	26.70	26.57	27.98	✗

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมความถี่ 5 GHz

ความถี่เรโซแนนท์	ระยะหุ้ม	ขนาดของเหล็ก (องศา)				แนวโน้ม
		150	160	170	180	
ความถี่สะท้อนกลับ (GHz)	10 mm	7.281	7.245	7.465	7.642	✗
	15 mm	6.632	6.495	6.678	6.707	✗
	20 mm	6.826	6.912	6.385	6.517	✗
ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} (dB)	10 mm	22.13	20.87	22.65	25.31	✗
	15 mm	23.27	26.14	25.89	25.82	✗
	20 mm	18.83	17.17	14.29	16.34	✗

5. สรุปและวิจารณ์ผล

ผลการวัดและทดสอบด้วยโพรบความถี่สูงกับเหล็กเสริมคอนกรีตที่มีการฝังรูปโค้งตัวที่มุม 150, 160, 170 และ 180 (เส้นตรง) องศา พบว่า โพรบความถี่ 2 GHz สามารถตรวจพบการโค้งตัวของเหล็กเสริมที่ระยะหุ้ม 10 มม จากแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และโพรบความถี่ 3 GHz สามารถตรวจพบการโค้งตัวของเหล็กเสริมที่ระยะหุ้ม 10 มม จากแนวโน้มของความถี่สะท้อนกลับที่ลดลงอย่างไรก็ดี ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ เป็นเพียงการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้โพรบความถี่สูงในการตรวจวัดหาความผิดปกติของเหล็กเสริมที่มีการโค้งตัว ซึ่งอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป ทั้งในด้าน



ความสัมพันธ์ของควมถี่ที่เหมาะสมกับระยะหุ้ม และขนาดของเหล็กเสริม ตลอดจนตำแหน่งการวัดทดสอบ และความถี่ที่ลดการถูกแทรกแซงรบกวนจากปัจจัยภายนอก เพื่อให้ผลการวัดมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ทุนสนับสนุนการวิจัย งบประมาณรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2558 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาวิธีการตรวจสอบโลหะโค้งงอด้วยเทคนิคคลื่นความถี่สูง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. E. Mix, Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide, 2nd ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [2] K. Liu and et. al., "Ultrasonic testing technology of concrete component," ICMTMA 2013, Hong Kong, Jan. 2013, pp. 1284-1287.
- [3] J. Helal, M. Sofi, and P. Mendis, "Non-destructive testing of concrete: A review of methods," Electron. J. Struct. Engrn., vol. 14, pp. 97-105, Jan. 2015.
- [4] ____, Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures: Training Course Series No.17, Vienna: IAEA, 2002.
- [5] B. T. Rosner and D. W. van der Weide, "High frequency near-field microscopy," Rev. Sci. Instru., vol. 73, pp. 2505-2525, Jul. 2002.
- [6] G. Leucci, "Electromagnetic monitoring of concrete structures," GPR 2010, Lecce, Jun. 2010, pp. 1-5.
- [7] G. Vallian, and et. al., "Evaluation of concrete water content and other durability indicators by electromagnetic measurements," GPR 2010, Lecce, Jun. 2010, pp. 1-6.
- [8] G. Xiujun and et. al., "Fast non-destructive testing of concrete thickness using GPR," RSETE 2011, Nanjing, Jun. 2011, pp. 2182-2186.
- [9] A. Foudazi, K.M. Donnell and M.T. Ghasr, "Application of active microwave thermography to delamination detection," I2MTC 2014, Montevideo, May 2014, pp. 1567-1571.
- [10] X. Derobert, G. Vallian and A. Ihamouten, "Recent developments of EM non-destructive testing in the radar frequency-band for the evaluation of cover concretes," EuRAD 2015, Paris, Sept. 2015, pp. 233-236.
- [11] วิบูล วุฒิญาณ, สมชาย สำลีรงค์กุล และสุพจน์ ศรีนิล, "การเปรียบเทียบการประเมินกำลังคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก, ชมิตแอมเมอร์ และการทดสอบแบบทำลาย," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, ชลบุรี, พ.ศ. 2548, หน้า 198-202.
- [12] วรวิทย์ พาราพิชัย, วันชัย ยอดสุขใจ และ จักรพันธ์ เทือกดี, "การประเมินคุณภาพการซ่อมแซมรอยร้าวในคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, ชลบุรี, ก.ค. 2558, หน้า 1-8.
- [13] ____, มาตรฐานงานตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย: มยผ.1501-51 ถึง มยผ. 1507-51, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, พ.ศ. 2551.
- [14] D.M. Pozar, Microwave Engineering, 3rd ed., MA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [15] K.C. Gupta and et. al., Microstrip Lines and Slotlines, 2nd ed., MA: Artech House, 1996.
- [16] C. A. Balanis, Antenna Theory, 3rd ed., NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005.