

การเบาบางลงของคลื่นอัลตราโซนิคในลวดเกลียวอัดแรง

Attenuation of Ultrasonic Waves in Prestressing Strands

คมวุธ วิศวาไพศาล*

บทคัดย่อ

เป็นที่เข้าใจกันดีว่าแรงดึงเริ่มต้นในลวดเกลียวอัดแรงจะมีขนาดลดลงไปเรื่อย ๆ ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง และในหลาย ๆ กรณีการสูญเสียแรงดึงดังกล่าวก็เป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายของโครงสร้าง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีการวัดแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงเพื่อเป็นการตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่กำลังใช้งานอยู่เป็นระยะ ๆ งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการพยายามที่จะพัฒนาวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคเพื่อวัดแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงแบบเจ็ทเส้น ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยวิธีนี้ความเร็วในการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคในลวดเกลียวจะถูกวัด เพื่อที่จะนำมาใช้ในการคำนวณค่าแรงดึงที่ยังเหลืออยู่ในลวดเกลียว การพัฒนาวิธีทดสอบดังกล่าวมีอุปสรรคหลายประการรวมถึงการเบาบางลงของคลื่นที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้จากการลดลงของพลังงานหรือขนาดความสูงของคลื่นในขณะที่คลื่นเดินทางไปในระยะทางที่ไกลขึ้น สำหรับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังการเบาบางลงของคลื่นอาจเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเอง ส่วนโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อนอัดราการเบาบางลงของคลื่นจะรุนแรงมาก เนื่องจากลวดเกลียวมีการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุที่มีอัตราการดูดซับพลังงานสูง จากเหตุผลดังกล่าวคลื่นอัลตราโซนิคจึงสามารถเดินทางในลวดเกลียวได้ในระยะทางที่จำกัดเท่านั้น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราการเบาบางลงของคลื่นอัลตราโซนิคโดยจะนำลวดเกลียวอัดแรงที่มีความยาวต่างกันมาทดสอบ และมีการแบ่งลวดเกลียวอัดแรงออกเป็นสองกลุ่มเพื่อจะเปรียบเทียบผลการทดลองจากโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงระหว่างแบบดึงเหล็กก่อนและแบบดึงเหล็กที่หลัง ผลที่ได้รับจากการวิจัยจะมีส่วนช่วยให้การจัดเตรียมเครื่องมือทดสอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับขนาดความยาวและเงื่อนไขของขอบเขตของลวดเกลียวอัดแรง

Abstract

It is well understood that initial prestressing forces applied to prestressing strands undergo a progressive process of reduction over many years of their service lives. In many cases, losses of tensile forces in prestressing strands have caused catastrophic failures of prestressed concrete structures. For this reason, it is essential to periodically measure the prestressing forces in the strands so that structural integrity of the existing concrete members can be evaluated. This

* ดร. อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

research is a p
waves to measu
can measure the
existing tensile
attenuation of th
will be reduce
may occur insid
structures when
above reasons,
not be able to
strands of differ
rate of ultrason
from this resear
lengths and bo

บทนำ

การทดสอบ
ความแข็งแรงที่
เกิดการสูญเสีย
แปลงคุณสมบัติ
ที่นำมาทดสอบ
ประกันคุณภาพ
การใช้งานของ
สภาพการใช้งาน
ภายในเนื้อวัสดุ
การใช้งานชั้น
การตรวจสอบ
ในสภาพที่ใช้งาน
เปลี่ยนใหม่

คลื่นอัล
ความถี่สูงเกิน
นี้จึงมีความถี่
ขึ้นไป ในปัจ

research is a part of an effort to develop a nondestructive testing method using ultrasonic waves to measure tensile forces in the popular seven-wire strands. By using this method, one can measure the ultrasonic wave velocity inside a particular strand and then back-calculate its existing tensile force. Development of such method has to overcome many difficulties including attenuation of the waves propagating inside the strands. Hence, the wave energy (or amplitude) will be reduced as it propagates further. For post-tensioned concrete structures, attenuation may occur inside the strand's material. Severe attenuation can be expected in pre-tensioned concrete structures where the strands are bonded with concrete, a highly attenuative material. From the above reasons, the monitoring range of this method would be limited since the waves may not be able to propagate over a distance in the strands. In order to investigate this effect, the strands of different lengths were tested under two different setups so as to compare the attenuation rate of ultrasonic waves between pretensioning and post-tensioning systems. The results obtained from this research would help us determine an appropriate set of ultrasonic equipment for different lengths and boundary conditions of the prestressing strands.

บทนำ

การทดสอบแบบไม่ทำลายคือการตรวจสอบความแข็งแรงหรือความบกพร่องของวัสดุโดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียประโยชน์ให้สอยหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ ผลิตภัณฑ์ หรือเครื่องมือที่นำมาทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ในการประกันคุณภาพ ความปลอดภัย และความไว้วางใจในการใช้งานของวัสดุนั้น ๆ ทั้งนี้วัสดุอาจมีการสูญเสียสภาพการใช้งานก่อนกำหนด เนื่องจากความบกพร่องภายในเนื้อวัสดุเองส่งผลให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้งานขึ้น การทดสอบแบบไม่ทำลายจะช่วยให้การตรวจสอบวัสดุ เพื่อที่จะตัดสินว่าวัสดุนั้นยังอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ดีหรือจำเป็นต้องซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใหม่

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นการสั่นไหวที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน ดังนั้นคลื่นประเภทนี้จึงมีความถี่ตั้งแต่สองหมื่นรอบต่อวินาที (20 kHz) ขึ้นไป ในปัจจุบันได้มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกอย่าง

แพร่หลายเพื่อวัดความหนา และตรวจสอบความบกพร่องของวัสดุ ตลอดจนใช้วัดคุณสมบัติพื้นฐานหรือจำแนกองค์ประกอบของแข็งและของเหลว การทดสอบชนิดนี้มีหลักการว่า พฤติกรรมการ สั่นไหวของคลื่นจะได้รับผลกระทบโดยตรงจากตัวกลางที่คลื่นนั้น ๆ เดินทางผ่าน พฤติกรรมการสั่นไหวของคลื่นสามารถอธิบายได้ในรูปของความเร็วในการเคลื่อนที่ (traveling speed) การดูดซับพลังงาน (absorption) การกระจัดกระจาย (scattering) และองค์ประกอบของความถี่ (frequency component) ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากคุณสมบัติของตัวกลาง เช่น โมดูลัสยืดหยุ่น ความหนาแน่น และโครงสร้างของเนื้อวัสดุ⁽¹⁾

ดังที่กล่าวไปแล้วในเบื้องต้นว่างานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับ การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อวัดแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงแบบเจ็ดเส้น โดยการทดสอบวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับหน่วยแรงดึงในลวดเกลียว^(2,3) และความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วของคลื่น

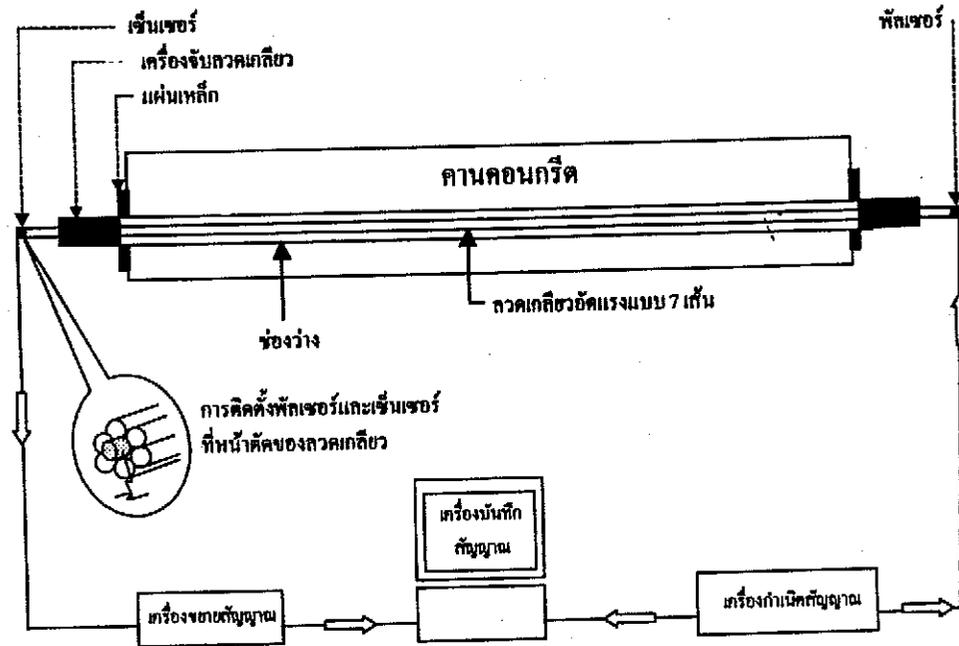
อัลตราโซนิกในลวดเกลียว^(4,5) ซึ่งมีความหมายโดยรวมว่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในลวดเกลียวขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นและหน่วยแรงดึงในลวดเกลียว ถ้าเราทราบความสัมพันธ์ทั้งสอง เราก็จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงได้จากการส่งคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในลวดเกลียวที่ปลายข้างหนึ่ง แล้วทำการตรวจจับคลื่นที่ปลายอีกข้างหนึ่ง การแปลสัญญาณคลื่นที่ได้รับจะทำให้วัดความเร็วของคลื่นที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งได้ค่าแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงก็จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าว

จากการทำการทดสอบลวดเกลียวหลาย ๆ เส้น โดยเฉพาะลวดเกลียวที่มีความยาวมาก และลวดเกลียวที่มีการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน พบว่าการตรวจจับคลื่นอัลตราโซนิกเป็นไปได้ยาก เนื่องจากขนาดความสูงของ

คลื่น (amplitude) ลดลงอย่างรวดเร็วจนในบางครั้งคลื่นที่ส่งเข้าไปไม่สามารถเดินทางจนตลอดความยาวของลวดเกลียวได้ ทำให้การทดสอบล้มเหลวถ้าขาดอุปกรณ์ที่สามารถผลิตคลื่นกำลังสูงด้วยเหตุผลดังกล่าว อัตราการเบี่ยงเบนของคลื่นอัลตราโซนิกในลวดเกลียวอัดแรงจึงเป็นจุดสนใจของงานวิจัยนี้

การทดลอง

ข้อมูลที่น่ามาใช้ในการวัดอัตราการเบี่ยงเบนของคลื่นอัลตราโซนิก ได้รวบรวมมาจากการทดสอบลวดเกลียวอัดแรงหลายเส้นจากโครงสร้างคอนกรีตที่หล่อขึ้นในห้องทดลองและโครงสร้างคอนกรีตในสถานที่ใช้งานจริง โดยในแต่ละเส้นมีขนาดความยาวและเงื่อนไขของขอบเขต (boundary condition) ที่ต่างกัน รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบสำหรับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลัง



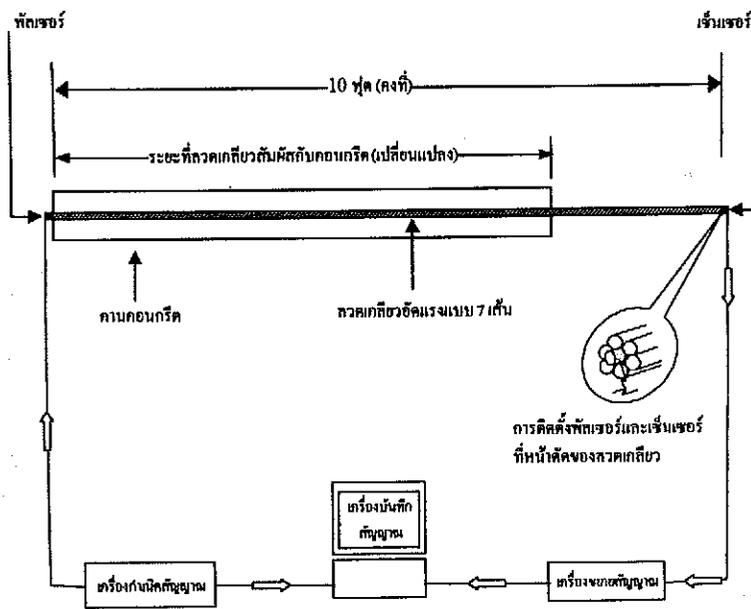
รูปที่ 1 : การทดสอบอัตราการเบี่ยงเบนของคลื่นอัลตราโซนิกในลวดเกลียวที่ไม่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยคอนกรีต

จากรูปที่
คลื่นอัลตราโซ
(pulser) ซึ่งจะ
สั้นไหว เข้าไป
นั้นคลื่นอัลตรา
อีกข้างหนึ่ง ซึ่ง
ตรวจจับสัญญาณ
สัญญาณ และ
ประมวลผล (sensitivity) ต่อ
ถึง 1 MHz

ผลการท
รูป
การทดสอบ
ที่หลัง รูป
จับได้หลัง
เกลียวที่ไม่

จากรูปที่ปลายข้างหนึ่ง เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกจะส่งสัญญาณไฟฟ้ามาที่พัลเซอร์ (pulser) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นคลื่นสั้นไหว เข้าไปในลวดเส้นกลางของลวดเกลียว จากนั้นคลื่นอัลตราโซนิกก็จะเดินทางในลวดไปยังที่ปลายอีกข้างหนึ่ง ซึ่งจะมีเซ็นเซอร์ (sensor) ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณคลื่นแล้วส่งต่อไปยังเครื่องขยายสัญญาณ และเครื่องบันทึกสัญญาณเพื่อทำการประมวลผล ทั้งพัลเซอร์และเซ็นเซอร์มีความไว (sensitivity) ต่อการตอบสนองความถี่ในช่วง 100 kHz ถึง 1 MHz ในการทดลองนี้ ใช้ลวดเกลียวอัดแรง

แบบเจ็ดเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว จำนวน 4 เส้น แต่ละเส้นมีความยาว 10.0 ฟุต 40.5 ฟุต 71.2 ฟุต และ 275.4 ฟุต มีข้อสังเกตที่สำคัญคือ ลวดเกลียวที่นำมาทดสอบไม่สัมผัสกับคอนกรีต ส่วนการติดตั้งเครื่องมือทดสอบสำหรับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งเหล็กก่อนในรูปที่ 2 มีความคล้ายคลึงกับการติดตั้งเครื่องมือในแบบแรก ยกเว้นการที่ลวดเกลียวมีพื้นผิวที่สัมผัสกับคอนกรีต ความยาวของลวดเกลียวมีค่าคงที่เท่ากับ 10.0 ฟุตแต่ ระยะที่ลวดเกลียวสัมผัสกับคอนกรีตจะถูกเปลี่ยนแปลงไป โดยการหล่อคอนกรีตเพิ่มเป็นช่วง ๆ



รูปที่ 2 : การทดสอบอัตราการเบาบางของคลื่นอัลตราโซนิกในลวดเกลียวที่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยคอนกรีต

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

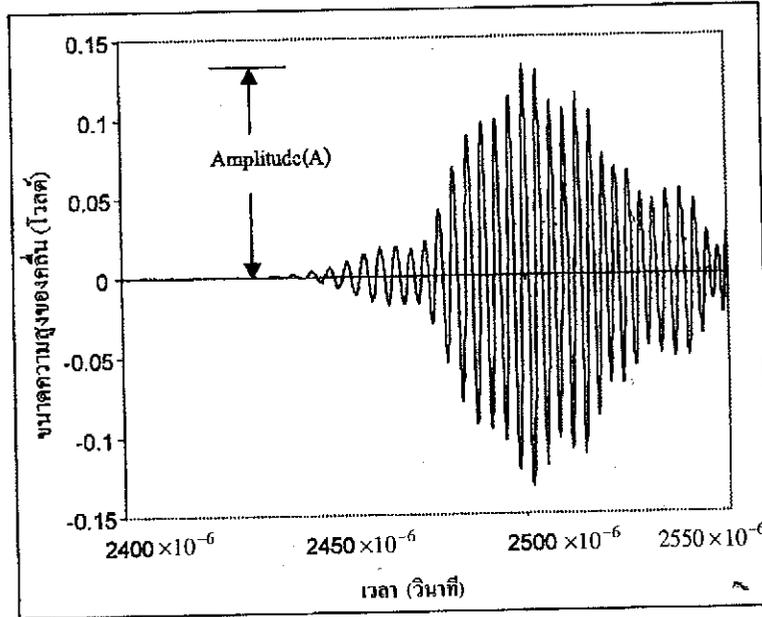
รูปที่ 3 และ 4 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งเหล็กที่หลัง รูปที่ 3 เป็นตัวอย่างคลื่นอัลตราโซนิกที่ตรวจจับได้หลังจากเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 40.5 ฟุตในลวดเกลียวที่ไม่มีการสัมผัสกับคอนกรีต ขนาดความสูงของ

คลื่นที่ตรวจจับได้จะถูกบันทึกไว้เพื่อการเปรียบเทียบ ซึ่งในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าความสูงของคลื่นอัลตราโซนิกที่ตรวจจับได้จะลดลงเมื่อลวดมีความยาวมากขึ้น การเบาบางลงของคลื่นเกิดจากการดูดซับ และการกระจายของพลังงานคลื่นในเนื้อวัสดุ นอกจากนี้ยังเกิดจากการแพร่ของคลื่นจากลวดเส้นกลางไปยัง

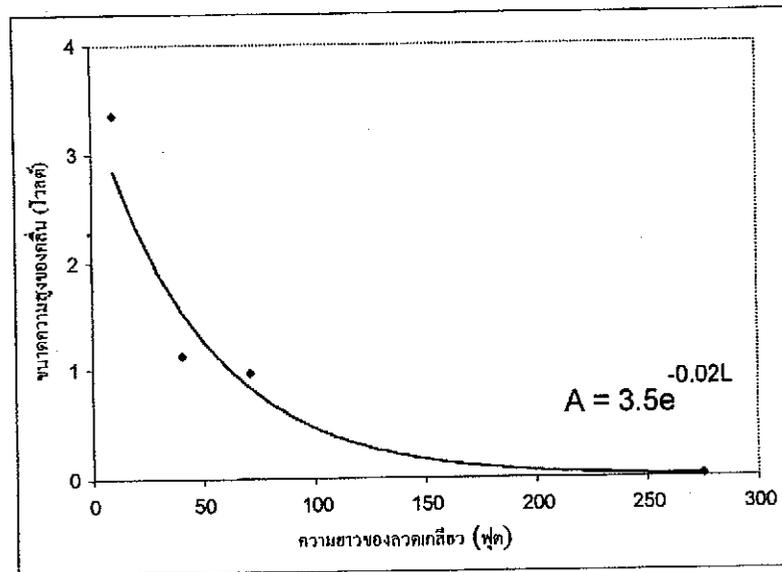
ลวดอีกทงเส้นที่ล้อมรอบอยู่ทำให้สูญเสียพลังงานคลื่นไปบางส่วน จากการวิเคราะห์ทางสถิติความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของลวดเกลียว (L) กับความสูงของคลื่นอัลตราโซนิก(A) สามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$A = 3.5e^{-0.02L} \quad (1)$$

เรียกค่าสัมประสิทธิ์ 0.02 ว่าอัตราการเบี่ยงลงของคลื่น (attenuation rate)



รูปที่ 3 : ตัวอย่างคลื่นอัลตราโซนิกที่ตรวจจับได้

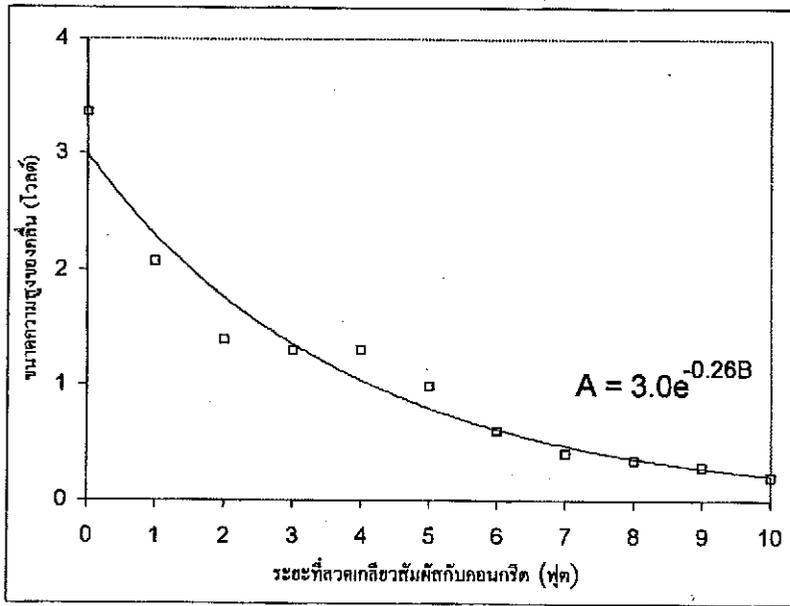


รูปที่ 4 : การเบี่ยงเบนลงของคลื่นอัลตราโซนิกในลวดเกลียวที่ไม่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยคอนกรีต

รูปที่ 5
โครงสร้างคอนกรีตที่มีความสูงอย่างรวดเร็วมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่การวิเคราะห์ที่ของระยะที่ลวดสูงของคลื่นอัดขึ้น

จากสมการพบว่ามีอิทธิพลต่อมากกว่าการคลื่นในเนื้อ

(1)



รูปที่ 5 : การเบี่ยงลงของคลื่นอัลตราโซนิกในลวดเกลียวที่ผูกยึดเหนี่ยวด้วยคอนกรีต

รูปที่ 5 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบ โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน จะเห็น ได้ว่าความสูงของคลื่นอัลตราโซนิกที่ตรวจจับได้ลดลง อย่างรวดเร็วเมื่อมีระยะที่ลวดเกลียวสัมผัสกับคอนกรีต มากขึ้น การเบี่ยงลงของคลื่นเกิดจากการดูดซับ พลังงานคลื่นโดยคอนกรีตผ่านทางผิวสัมผัส และจาก การวิเคราะห์ทางสถิติ ความสัมพันธ์ระหว่างความยาว ของระยะที่ลวดเกลียวสัมผัสกับคอนกรีต (B) กับความ สูงของคลื่นอัลตราโซนิกสามารถเขียนได้เป็นสมการ ดังนี้

$$A = 3.0e^{-0.26B} \quad (2)$$

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างสอง สมการพบว่า การดูดซับพลังงานคลื่นโดยคอนกรีต มีอิทธิพลต่ออัตราเบี่ยงลงของคลื่นอัลตราโซนิก มากกว่าการดูดซับและการกระจายกระจายของพลังงาน คลื่นในเนื้อวัสดุ

ประโยชน์ที่ได้จากการทดลองช่วยในการประมาณขีด ความสามารถของเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นอัลตรา โซนิกว่าจะมีกำลังส่งคลื่นที่ชัดเจนไปได้ไกลเพียงใด ตลอดจนถึงเป็นการบ่งบอกความสามารถในการปล่อย และตรวจจับสัญญาณคลื่นของพัลเซอร์ และเซ็นเซอร์ ตามลำดับด้วย เนื่องจากในทางปฏิบัติจะมีคลื่นรบกวน (noise) จากสภาพแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา การที่จะได้ รับคลื่นที่ชัดเจนนั้นจะต้องมีอัตราส่วนระหว่างความสูง ของคลื่นที่ตรวจจับได้กับความสูงเฉลี่ยของคลื่นรบกวน ที่มีค่ามาก (high signal-to-noise ratio) ตัวอย่างเช่น ในการทดสอบลวดเกลียวในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง แบบดึงเหล็กที่หลัง สมมุติให้ความสูงเฉลี่ยของคลื่น รบกวนที่มีค่าเท่ากับ 10^{-3} โวลต์ และกำหนดให้ค่า signal-to-noise ratio เท่ากับ 10 ดังนั้นความสูงของ คลื่นที่ตรวจจับได้ควรจะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 10^{-2} โวลต์ จากสมการ (1) สามารถคำนวณความยาวสูงสุดของ ลวดเกลียวที่จะทดสอบได้คือ 295 ฟุต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังส่งของเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่น ตลอดจน

ความไวในการตอบสนองต่อช่วงความถี่ต่าง ๆ ของ ทั้งพัลเซอร์และเซ็นเซอร์ด้วย ผลที่ได้รับจากการทดลอง จะมีส่วนช่วยให้การจัดเตรียมเครื่องมือทดสอบเป็น ไปอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับขนาดความยาว และเงื่อนไขของขอบเขตของลวดเกลียวอัดแรง

บทสรุป

การพัฒนาวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้ คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อวัดแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรง มีอุปสรรคที่สำคัญคือการเบี่ยงเบนของคลื่นที่ใช้

ทดสอบ ในขณะที่เดินทางไปในลวดเกลียวอัดแรงการ เบี่ยงเบนของคลื่นจะมีค่าสูงมากถ้าลวดเกลียว มีการ ยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตซึ่งพบได้ในโครงสร้างคอนกรีต อัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน ด้วยเหตุนี้คลื่นอัลตราโซนิก จึงสามารถเดินทางในระยะทางที่จำกัดการนำลวดเกลียว อัดแรงที่มีความยาวและเงื่อนไขของขอบเขตที่ต่างกัน มาทดสอบทำให้ทราบถึงขีดความสามารถในการทดสอบ ของชุดเครื่องมือที่ใช้ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ทำการทดสอบ จัดเตรียมเครื่องมือที่เหมาะสมในแต่ละสถานการณ์ ด้วย □

- (1) Achenbach, R. C. *Acoustic Emission in Structures*. Butterworths, London, 1973.
- (2) Murnaghan, F. P. *Acoustic Emission in Structures*. McGraw-Hill, New York, 1974.
- (3) Wissaway, R. L. *Structural Acoustic Emission*. Butterworths, London, 1975.
- (4) Folk, R. L. *Acoustic Emission in Structures*. Applied Science Publishers, London, 1976.
- (5) Chen, H. *Acoustic Emission in Structures*. The Rods and Tubes, No.8, P. 1-10.

บรรณานุกรม

- (1) Achenbach, J.D. (1980). **"Wave Propagation in Elastic Solids"**, 3rd Edition, North Holland Publishing Co.,USA.
- (2) Murmaghan, F.D. (1951), **"Finite Deformation of an Elastic Solid"**, John Wiley & Sons, USA.
- (3) Wissawapaisal, K. (2001), **"Nondestructive Testing of Reinforced and Prestressed Concrete Structures Using Acoustic Waveguides"**, Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, USA.
- (4) Folk, R., G. Fox, C.A. Shook, and C.W. Curtis. (1958), **"Elastic Strain Produced by Sudden Application of Pressure to One End of a Cylindrical Bar: I. Theory"**, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.30, P.552.
- (5) Chen, H.L., Y. He, and H.V.S. GangaRao. (1998), **"Measurement of Prestress Force in the Rods of Stressed Timber Bridges Using Stress Waves"**, Materials Evaluation, Vol.56, No.8, P.977