รายงานภาคสนามของ

การใช้เครื่องมือ Ultrasonic pulse ทดสอบโครงสร้างคอนกรีต*

ผศ.ดร. พิบูลย์ จินาวัฒน์

บทคัดย่อ

วิธีการทดสอบคอนกรีตที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นการทดสอบเพื่อหาหน่วยแรงอัดประลัย (Ultimate Compressive Stress) หรือหน่วยแรงอื่น ๆ ล้วนแต่มีข้อเสียอยู่ 2 ประการ ประการแรกได้แก่ ในการทดสอบเหล่านั้นแท่งตัวอย่างคอนกรีตจะต้องถูกกด ดึงหรือบิดจนแตกเสียหาย หรือถูกทำลายทั้งสิ้น และอีกประการหนึ่ง ได้แก่การที่ผลการทดสอบของแท่งตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวเป็นเพียงเครื่องช่วยชี้แนวโน้มของคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตในโครงสร้างจริงเท่านั้นเพราะสภาพของการหล่อ กระทุ้งแน่น และบ่ม ในโครงสร้างจริงย่อมแตกต่างไปจากของแท่งตัวอย่างคอนกรีต

การทดสอบวิธีไม่ทำลายหรือ Non-destructive นั้น มีผู้ริเริ่มและทดลองนำมาใช้นานแล้วทั้งในประเทศและต่างประเทศ ในบรรดาวิธีทดสอบแบบนี้ วิธีที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงยิ่งน่าจะเป็นที่เชื่อถือได้มากกว่าวิธีอื่น ๆ เพราะมีมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศอังกฤษรับรองการทดสอบวิธีดังกล่าวมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2517

ในบทความนี้จะกล่าวถึงที่มาโดยย่อของวิธีการทดสอบแบบคลื่นเสียงความถี่สูงยิ่งตลอดจนวิวัฒนาการของเครื่องมือทดสอบและข้อดีข้อเสียของการใช้งานในการทดสอบคอนกรีต สำหรับในประเทศไทย วิธีการดังกล่าวยังไม่เป็นที่รู้จักและแพร่หลายมากนัก ส่วนมากมักใช้กันในห้อง

*บทความนี้ได้เคยตีพิมพ์ลงในรายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง "วิวัฒนาการทางวิศวกรรมสมัยกรุงรัตนโกสินทร์" จัดที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 26–28 พ.ค. 2525 ภายใต้ชื่อเรื่องบทความว่า "การทดสอบคอนกรีตแบบ Non–destructive ด้วยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูงยิ่ง "(Ultrasonic pulse)" แต่ในการพิมพ์คราวนี้ได้เพิ่มรายงานภาคสนามของการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตที่ได้ทำเพิ่มเติมมากกว่าในการพิมพ์คราวที่แล้ว อนึ่งเพื่อเป็นการให้ข้อมูลแก่ผู้อ่านหนังสือวิชาการของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งอาจจะไม่เคยได้ยินหรือไม่คุ้นเคยกับเครื่องมือและวิธีการทำงานของเครื่องมาก่อน ผู้เขียนจึงตัดสินใจที่จะรักษารายละเอียดที่จำเป็นในต้นฉบับเดิมไว้ด้วย

ปฏิบัติการในสถาบันการศึกษา อย่างไรก็ตาม ได้เริ่มมีการนำมาใช้งานในภาคสนาม โดยทำการทดสอบโครงสร้างหลายแห่ง ซึ่งผลของการทดสอบดังกล่าวได้แสดงไว้โดยสรุปแล้วในบทความนี้ ผลของการใช้งานในภาคสนามด้วยวิธีนี้นับว่าเป็นที่น่าพอใจ มีคุณภาพมากกว่าวิธีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันและสมควรที่จะนำไปใช้เพื่อให้ได้ข้อมูลสนับสนุนเพิ่มขึ้นต่อไป

1. คำนำ

วิธีการทดสอบที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันสำหรับการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างที่เจ้าของงานเอาใจใส่และให้ความสำคัญในคุณภาพของงานนั้น ได้แก่ การทดสอบหาหน่วยแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่หล่อด้วยคอนกรีตที่ใช้ในงานนั้น ๆ และที่มีขั้นตอนและวิธีการเก็บตัวอย่าง การหล่อ การบ่ม ตลอดจนการทดสอบตามที่ระบุไว้ใน มอก 409 : 2525 "วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต" อย่างไรก็ตามยังเป็นที่ถกเถียงและหาข้อยุติไม่ได้ว่า ผลของการทดสอบแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาดย่อม ๆ ที่ได้มานั้นจะแสดงถึงคุณภาพของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้างจริงไปแล้วได้แม่นยำแน่นอนมากน้อยแค่ไหน เพราะปัจจัยแวดล้อมของการหล่อ บ่ม และทดสอบแท่งคอนกรีต ย่อมแตกต่างไปจากที่เป็นของโครงสร้างคอนกรีตจริงอยู่มาก สิ่งที่เป็นที่ต้องการของวงการก่อสร้างอย่างมาก เห็นจะเป็นวิธีการทดสอบคอนกรีตที่สามารถทำได้รวดเร็ว ง่าย และสามารถประเมินคุณภาพของงานคอนกรีตได้แม่นยำภายในระยะเวลาที่เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ ภายหลังการหล่อชิ้นส่วนคอนกรีต และถ้าวิธีดังกล่าวจะสามารถใช้ได้โดยการไม่ทำลาย หรือไม่ทำให้ชิ้นส่วนคอนกรีตที่จะนำไปใช้งานต่อไปนั้นเสียหาย ก็ยิ่งจะเป็นข้อจูงใจให้วิธีการทดสอบนั้นเป็นที่นิยมแพร่หลายยิ่งขึ้น

วิธีการทดสอบที่พอจะมีคุณสมบัติตามที่ต้องการนั้น เห็นจะเป็นวิธีการทดสอบคอนกรีตแบบไม่ทำลาย (Non–destructive method of testing) ซึ่งมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีที่ใช้หลักการของแรงสะท้อนถอยหลัง (Rebounce test method) หรือที่รู้จักกันในนามของเครื่องมือทดสอบแบบ Schmidt hammer อีกวิธีหนึ่งที่แม่นยำกว่า ได้แก่ วิธีที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงยิ่ง (Ultrasonic Pulse Technique) ซึ่งสามารถจำแนกออกมาได้หลายชื่อ ขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการวัด เริ่มในปี พ.ศ. 2483 ในสหรัฐอเมริกา ได้มีผู้เสนอวิธีการทดสอบด้วยการปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงให้วิ่งผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหา Natural frequency ของคอนกรีต (1) และต่อมาก็มีรายงานการทดสอบคอนกรีตด้วยวิธีใหม่นี้เพิ่มเติมอีก (2,3) วิธีการทดสอบวิธีนี้เป็นที่รู้จักกัน

แพร่หลายในนามของ Dynamic method of testing และมีหลักการทั่วไปของการทดสอบว่าความแข็งแรงของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า Dynamic (Elastic) Modulus, E ของคอนกรีต และค่า E นี้ เราสามารถหาได้จากการวัด Natural frequency of transverse vibration ของคานคอนกรีตตัวอย่างได้ในห้องทดลอง โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\text{Dynamic (Elastic) modulus, } E = 4 n^2 l^2 \rho$$

เมื่อ n = Fundamental resonant frequency

l = ความยาวของคอนกรีตตัวอย่าง และ

ρ = ความหนาแน่นของคอนกรีต

วิธีการทดสอบแบบนี้ได้รับการยอมรับจาก British Standard ในปี พ.ศ. 2495 (B.S. 1881 ; 1952) (4) และมีข้อดีตรงที่สามารถติดตามความแข็งแรงของคานคอนกรีตตัวอย่าง ที่แปรขึ้นตามอายุของตัวอย่าง หรือการเสื่อมตัวของคานตัวอย่างภายใต้ภาวะที่กำหนดได้ตลอดช่วงอายุของคานคอนกรีตตัวอย่างนั้นๆ ซึ่งนับว่าเป็นข้อได้เปรียบเหนือวิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive method) ที่มีอยู่เดิม แต่วิธีใหม่นี้ก็ยังมีข้อเสียตรงที่ว่า วิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้กับคานตัวอย่างขนาดย่อมและทดสอบได้ในห้องทดลองเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้กับงานก่อสร้างที่ Site หรือ In Situ ได้

เนื่องจากเทคนิคอย่างเดียวกันนี้ไม่สามารถนำไปใช้หาค่า E ของโครงสร้างจริงที่เทคอนกรีตไปแล้ว จึงมีผู้พยายามหันมาใช้วิธีการวัดความเร็วของคลื่นเสียง ความถี่สูงยิ่งที่วิ่งผ่านโครงสร้างคอนกรีตแทน โดยการจับเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านโครงสร้างที่ทราบสัดส่วนแน่นอนแล้ว Long, Kurtz และ Sandenaw (3) เป็นกลุ่มบุคคลกลุ่มแรกที่ลองใช้วิธีนี้กับโครงสร้างจริง โดยใช้ฆ้อนเคาะผิวถนนคอนกรีต แล้ววัดความเร็วของ Longitudinal wave velocity (v) ที่วิ่งไปตามผิวถนน และเมื่ออนุโลมให้ค่า Poisson's (σ) มีค่าเท่ากับ 0.15 แล้วค่า Dynamic modulus (E) ของคอนกรีตในโครงสร้างย่อมคำนวณหาได้จากสูตร

$$E = \frac{V^2 \rho \ (1 + \sigma) \ (1 - 2\sigma)}{(1 - \sigma)}$$

เมื่อ ρ คือ ค่า density หรือความหนาแน่นของคอนกรีต

วิธีดังกล่าวจะเพิ่มความแม่นยำขึ้นอีกมากถ้ามีการหาค่า σ ที่แน่นอนในห้องปฏิบัติการ และการปล่อยคลื่นเสียงที่ผ่านลึกเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตแทนการใช้ฆ้อนเคาะเพราะในลักษณะ

หลังนี้คลื่นที่เกิดจากการเคาะจะไม่แน่นอนและวิ่งไปตามผิวของคอนกรีตไม่ใช้ลึกผ่านเข้าไปในโครงสร้าง

ต่อมา JONES, R แห่ง Road Research Laboratory ประเทศอังกฤษ (5,6,7) และ Leslie และ Chessman ในประเทศคานาดา (8) ได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบที่สามารถหาความเร็วของคลื่นเสียงความถี่สูงที่วิ่งผ่านในโครงสร้างชนิดที่สามารถนำไปใช้ทดสอบในสถานที่ก่อสร้างได้ ทั้งนี้ต่างฝ่ายต่างก็พัฒนากันไปโดยไม่รู้ถึงผลงานของอีกฝ่ายหนึ่ง แต่โดยทั่วไป JONES จะได้รับเครดิตมากกว่าว่าเป็นผู้บุกเบิกงานที่มีผลมาถึงในปัจจุบัน รูปของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมานั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 1

ในปัจจุบันสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศอังกฤษก็ได้ปรับปรุงและกำหนด B.S. 4408 : Part 5 : 1974 (9) ขึ้นมาเพื่อรับรองการทดสอบด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity measurement นี้ว่าเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ทดสอบคุณภาพของคอนกรีตได้วิธีหนึ่งเพื่อให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าของเครื่องมือทดสอบซึ่งใช้วงจรอีเลคโทรนิคส์รุ่นใหม่ แทนวงจรเก่าซึ่งใช้ระบบหลอดสูญญากาศ ใน B.S. 1881 : 1952 ที่กล่าวมาแล้ว

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นมาจากวัสดุหลายประเภท เช่น หิน, ทราย, น้ำ และปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ๆ เช่น 200 kHz ซึ่งอาจจะเหมาะในงานหารอยร้าวในโลหะหรือ Ceramic นั้นย่อมไม่ได้เพราะว่ามี Echoes สะท้อนจากหินและทรายที่กระจายอยู่ทั่วไป ดังนั้นการใช้ Ultrasonic testing กับงานคอนกรีตจึงมีข้อจำกัดอยู่ที่การหาความเร็วของคลื่นเสียงที่อยู่ในช่วงประมาณ 50 kHz เท่านั้น (54 kHz เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่เหมาะที่สุดสำหรับงานคอนกรีตและต่ำลงมาเช่น 30, 24 kHz เป็นช่วงที่เหมาะกับงานไม้) โดยทั่วไป ความเร็วของคลื่นเสียงในช่วงนี้จะแปรตามคุณภาพและส่วนผสมของคอนกรีตและคอนกรีตที่คลื่นเสียงผ่านไปด้วยความเร็วที่สูง จะมีคุณภาพที่ดีกว่า (แน่นกว่า) คอนกรีตที่คลื่นเสียงผ่านไปได้ด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า

2. เครื่องมือและวิธีที่ใช้ทดสอบ

เครื่องมือที่มีใช้งานในปัจจุบันเป็นเครื่องชื่อ PUNDIT (mark 4) (PUNDIT ; Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Testor) ผลิตโดยบริษัท C.N.S. Electronics Ltd, ประเทศอังกฤษ มีวิธีการทำงานโดยมีหัว Transducers 2 หัว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

ประมาณ 50 ม.ม. สูงประมาณ 35 ม.ม. มีสายรับ–ส่งสัญญาณต่อจากหัวมายังเครื่องหัวละ 1 เส้น ยาวเส้นละ 4 ม. ทั้งสองหัวนี้สามารถใช้สลับกันได้โดยใช้ได้ทั้งเป็นหัวส่งและหัวรับคลื่นเสียง เมื่อเริ่มทำงานหัวส่งจะส่งคลื่นเสียงความถี่ 54 กิโลเฮิร์ทซ์ ผ่านโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกทดสอบที่เราทราบขนาดและระยะห่างระหว่างหัวส่งและหัวรับคลื่นเสียงไว้ล่วงหน้าแล้ว คลื่นเสียงดังกล่าวจะใช้เวลาเดินทางผ่าน ค.ส.ล. และเมื่อคลื่นแรกเดินทางไปถึงหัวรับตัวเครื่องมือจะแสดงเวลาเดินทางออกมาด้วยตัวเลขละเอียดถึง 3 ตำแหน่ง ตั้งแต่ 0.1 ถึง 999 วินาที X 10^{-6} โดยมีหน่วยเล็กสุดที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 วินาที X 10^{-6} (Microseconds หรือ μS) และเมื่อทราบเวลาตลอดจนระยะทางแล้ว เราก็สามารถคำนวณหาความเร็วของคลื่นเสียงที่เดินทางผ่านโครงสร้างดังกล่าวออกมาได้ว่าเป็นกี่พันเมตรต่อวินาที ตามปรกติความเร็วคลื่นเสียงประมาณ 4300–4400 ม./วินาที จะแสดงว่าคอนกรีตนั้นมีความแข็งแรง (Strength) ประมาณ 280–300 กก/ซม^2 และความเร็วเสียงประมาณ 3,800 ม/วินาที หรือต่ำกว่า แสดงว่าคอนกรีตนั้นมีความแข็งแรงต่ำมาก โดยมากอยู่ในช่วง 100–150 กก/ซม^2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นเสียงกับ Strength ของคอนกรีตได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งผู้เขียนขอเน้นว่าเป็นกราฟที่ใช้เป็นเครื่องแสดงอย่างกรณีทั่วไปเท่านั้น ถ้าจะให้ได้ผลที่เชื่อได้มากกว่าแล้วควรทดสอบแท่งทดลองในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะแวดล้อมและปัจจัยใกล้เคียงกับสถานที่ก่อสร้างโดยการวัดความเร็วของคลื่นเสียงและทดสอบหาค่า Strength แล้วพล็อตเป็นกราฟไว้ใช้งานในกรณีนั้น ๆ (รูปที่ 3)

มีวิธีการที่จะวางหัว Transducers กับตัวโครงสร้างที่จะทดสอบได้ 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีตรง (Direct Method) วิธีกึ่งตรง (Semi–direct Method) และวิธีไม่ตรง (Indirect Method) และรูปแสดงวิธีการดังกล่าวแสดงไว้แล้วในรูปที่ 4

วิธี Direct จะเป็นวิธีที่ดีที่สุดถ้าทำได้เพราะคลื่นเสียงจะเดินทางทะลุผ่านตัวโครงสร้างที่ถูกทดสอบโดยตลอด ถ้ามีโพรง รอยร้าว ฯลฯ โดยวิธีนี้ความผิดปรกติในเนื้อคอนกรีตใด ๆ จะถูกแสดงโดยเด่นชัดโดยที่คลื่นเสียงจะใช้เวลาเดินทางนานกว่าส่วนอื่น ๆ (ที่ดี) ส่วนวิธี Indirect นั้นใช้เมื่อทำการวัดแบบ Direct ไม่ได้ และมักจะเป็นวิธีเดียวที่ใช้ทดสอบแผ่นพื้น ค.ส.ล. ชนิดที่หล่อบนดิน เช่น งานถนน ค.ส.ล. ห้องใต้ดิน อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสียตรงที่เราไม่ทราบว่าคลื่นเสียงเดินทางผ่านเนื้อคอนกรีตลงไปลึกแค่ไหน ก่อนที่จะเดินทางมาถึงหัวรับ และพลังงานของ

คลื่นเสียงจะลดน้อยลงมากทำให้การวัดเป็นไปค่อนข้างลำบากเมื่อเทียบกับวิธี Direct แต่ถ้าผู้ทดสอบใช้ความระมัดระวังและใช้พิจารณญาณประกอบสามัญสำนึก วิธี Indirect นี้ได้ถูกใช้อย่างได้ผลดีมาแล้ว (10)

3. การใช้เครื่อง PUNDIT ในการทดสอบคอนกรีต

เครื่อง PUNDIT นี้สามารถนำไปใช้ทดสอบหาข้อมูลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(ก) หาความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตที่หล่อและแข็งตัวแล้วว่ามีส่วนใดเนื้อแน่นหรือแข็งแรง ส่วนใดเนื้อไม่แน่น เป็นโพรงหรือมีรอยร้าว หรือมีวัตถุแปลกปลอมแทรกตัวเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เช่น ฟางข้าว กิ่งไม้ เป็นต้น

(ข) หารอยแตกร้าว รอยร้าวหรือรอยต่อในระหว่างการหล่อตลอดจนจำแนกบริเวณของโครงสร้างที่หล่อด้วยคอนกรีตที่มีความแข็งแรงต่างกัน เช่น ส่วนใดที่หล่อในขณะฝนตก เป็นต้น

(ค) หาความแตกต่างในคุณภาพของคอนกรีตที่เป็นผลเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากคอนกรีตมีอายุมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของ Cement hydration ในระยะ 1-28 วัน หรือเนื่องจากโครงสร้างโดนไฟไหม้โดนสารเคมีกัดทำลาย เป็นต้น

(ง) ทดสอบหาคุณภาพของคอนกรีตในด้านต่าง ๆ ที่เป็นตัวแปรร่วมกับความแข็งแรงของคอนกรีต

4. ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อผลของการทดสอบ

ความเร็วของคลื่นเสียงในคอนกรีตอาจถูกรบกวนหรือทำให้แปรปรวนไปได้บ้างจากปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก) ระยะห่างสั้นสุดของการวัด (Path length)

ข) ระยะแคบสุดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่จะใช้ PUNDIT ทดสอบ

ค) ตำแหน่งและจำนวนของเหล็กเสริมคอนกรีตในโครงสร้าง

ง) เปอร์เซนต์ความชื้นในคอนกรีต

ระยะห่างสั้นสุดของการวัดไม่ควรน้อยกว่า 100 มม. เมื่อมวลรวมหยาบมีขนาดโตสุดไม่เกิน 20 มม. และไม่ควรน้อยกว่า 150 มม. เมื่อมวลรวมหยาบมีขนาดโตสุดไม่เกิน 40 มม. ทั้งนี้เพื่อลดอิทธิพลของมวลรวมหยาบ

ความเร็วของคลื่นเสียงจะไม่แปรไปตามรูปร่างของแท่งตัวอย่างคอนกรีตแต่ทั้งนี้ผิวของแท่งตัวอย่างต้องเรียบและเหมาะต่อการวางหัววัด (Transducers) ในการทดสอบ และระยะสั้นสุดของแท่งทดสอบในทิศตั้งฉากกับการวัด (Pulse path) ต้องไม่น้อยกว่าความยาวของคลื่น (Wavelength) ของคลื่นเสียงในกรณีของหัว Transducers ที่ใช้ในงานทดสอบคอนกรีตซึ่งมีความถี่ในช่วง 50–54 kHz ระยะที่ว่านี้ไม่ควรน้อยกว่า 80 มม. มิฉะนั้นแล้วความเร็วของคลื่นเสียงที่วัดได้อาจน้อยลงและข้อมูลที่ได้จากการทดสอบอาจไม่แม่นยำแน่นอนเท่าที่ควร

ตามปรกติความเร็วของคลื่นเสียงที่วิ่งผ่านแท่งเหล็กเสริมคอนกรีตย่อมสูงกว่าที่วิ่งผ่านคอนกรีต ดังนั้นการวัดหา Pulse Velocity ในโครงสร้าง ค.ส.ล. ที่มีเหล็กเสริมหนาแน่นจึงอาจมีค่าสูงกว่าที่วัดจากโครงสร้างที่หล่อด้วยคอนกรีตล้วน ดังนั้นในการแปลผลที่อ่านได้จึงควรต้องคำนึงถึงปัจจัยอันนี้ด้วย โดยทั่วไปเหล็กเสริมที่วิ่งตัดตั้งฉากกับทิศทางของการวิ่งของคลื่นจะมีอิทธิพลต่อผลของการวัดน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าจำนวนของเหล็กเสริมในทิศทางดังกล่าวมีอยู่น้อยเมื่อเทียบกับระยะห่างของการวัด (Path length) และในคู่มือการใช้เครื่อง PUNDIT จะมี Correction factor) เผื่อไว้ให้ในกรณีที่ต้องการ อย่างไรก็ตามผู้เขียนขอแนะนำว่าในการเลือกตำแหน่งที่จะวัด Pulse velocity ผู้ทำการทดสอบควรหลีกเลี่ยงตำแหน่งของการวางหัว Transducers ที่อาจจะขนานไปกับตำแหน่งของหน้าตัดของเหล็กเสริมของโครงสร้างเท่าที่จะทำได้ การตีเส้นกริดที่สมมาตรกับจุดกึ่งกลางของโครงสร้างก็เป็นการช่วยเฉลี่ยอิทธิพลของเหล็กเสริมได้

เปอร์เซ็นต์ของความชื้นในโครงสร้างก็มีอิทธิพลต่อความเร็วของคลื่นเสียงอยู่บ้าง โดยทั่วไปคลื่นเสียงจะวิ่งผ่านคอนกรีตที่มีความชื้นสูง (Saturated) ด้วยความเร็วมากกว่าวิ่งผ่านคอนกรีตที่แห้ง (Dry) ประมาณ 2% โดยที่คอนกรีตดังกล่าวมีส่วนผสมและคุณภาพอย่างเดียวกัน ความเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้จะมากขึ้นในกรณีของคอนกรีตที่มีความแข็งแรงต่ำ ๆ และลดน้อยลงในกรณีของคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูง ๆ ดังนั้นผู้ทำการทดสอบจึงควรรักษาปัจจัยด้านนี้ให้คงที่ในการทดสอบเท่าที่จะทำได้ และถ้าเป็นไปได้ควรทำการทดสอบในสภาพที่ชื้นมากกว่าแห้ง เพราะอย่างน้อยก็เป็นการช่วยให้ผู้ทำการก่อสร้างเอาใจใส่ต่อการบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิของคอนกรีตระหว่าง 5 ถึง 30 เซลเซียสจะไม่มีผลต่อ Pulse velocity การให้ร่มเงาที่ตำแหน่งของการทดสอบและการปรับเครื่องทดสอบด้วย Standard Bar ที่มากับเครื่องอยู่บ่อย ๆ จะช่วยขจัดปัญหาของการใช้เครื่อง PUNDIT ในวันที่ร้อนจัดของบ้านเราได้เป็นอย่างดี

5. ผลของการใช้งานในภาคสนามของเครื่อง PUNDIT ในประเทศไทย

ได้มีการทดลองใช้เครื่อง PUNDIT ทดสอบโครงสร้างคอนกรีตทั้งที่เป็น ค.ส.ล. แบบหล่อในที่และชิ้นส่วนที่หล่อสำเร็จรูปที่เป็นคอนกรีตอัดแรงในสถานที่ก่อสร้างมาตั้งแต่ปี 2524 และผลของการใช้งานที่ผ่านมานับว่าเป็นที่น่าพอใจ ในกรณีหนึ่งได้มีการใช้เครื่อง PUNDIT หาความสมบูรณ์ของการซ่อมรอยพรุนของโครงสร้างสะพาน ค.ศ.ล. ด้วยน้ำยา EPOXY ว่าเรียบร้อยเพียงใด สาเหตุมีอยู่ว่าเมื่อถอดแบบหล่อโครงสร้างสะพานแห่งนั้นแล้ว พบว่ามีรอยพรุนแบบ Honey-comb ที่ใต้สะพานและผู้เกี่ยวข้องต้องการให้มีการซ่อมด้วยการฉีด EPOXY มากกว่าวิธีการแบบตบแต่งด้วย Mortar และเมื่อซ่อมแล้วก็อยากทราบว่าการฉีด EPOXY นั้นทั่วถึงแค่ไหน ถ้ายังไม่ทั่วก็จะได้สั่งการที่เหมาะสมต่อไป ในการหาความสมบูรณ์ของการซ่อมดังกล่าวนั้น มีเครื่องมือทดสอบประเภท PUNDIT เท่านั้นที่ทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัด เพราะถ้าไม่มีเครื่องแบบนี้การที่จะทราบได้ว่าซ่อมแล้วให้งานได้ดีหรือไม่ก็มีอยู่ทางเดียวได้แก่ การทดสอบแบบใช้งานจริง (Load Test) ซึ่งเป็นการเสียเวลาและเสียค่าใช้จ่ายสูงมากในงานนี้เครื่อง PUNDIT ได้ถูกนำมาใช้วัดหา Pulse Velocity ทั่วบริเวณที่สงสัยแล้วเทียบกับส่วนที่จัดว่า คอนกรีตมีคุณภาพดี ผลของการทดสอบในครั้งนี้มีข้อมูลจำกัดเพราะในระยะนั้นเครื่องมือมีข้อจำกัดตรงสายวัด (Transducer leads) มีความยาวจำกัดแค่เส้นละ 4 เมตร ผลของ Pulse Velocity measurements ที่อ่านได้ถึงแม้จะแสดงว่าคุณภาพของคอนกรีตในบริเวณที่สงสัย ไม่แตกต่างไปจากบริเวณที่ดีแต่ก็ไม่อาจจะสรุปได้เด็ดขาด เพราะข้อมูลจำเป็นบางประการขาดหายไป จึงจำเป็นต้องมีการทำ Load Test ในภายหลัง และผลของการทำ Load Test ก็ปรากฏว่าการซ่อมที่ทำไปนั้นใช้ได้เพราะค่า deflection ของโครงสร้างที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (Allowable deflection) เสียอีกและภายหลังการทำ Load Test ก็ไม่ปรากฏว่ามีรอยร้าวเกิดขึ้นในโครงสร้างแต่ประการใด

ในกรณีที่สอง ได้เกิดมีความขัดข้องในระหว่างการอัดน้ำปูนในท่อเหล็ก (Wire duct) ของงานสะพานแห่งหนึ่งที่ออกแบบด้วยระบบ Post-tensioned จึงทำให้มีข้อสงสัยว่าน้ำปูนอัดเข้าไปในท่อเพื่อกันสนิมให้กับ High-strength wire tendons ที่ดึงแล้วนั้นไปถึงบริเวณไหนของท่อ เพื่อ

ที่จะได้หามาตรการแก้ไขได้แก่ การอัดน้ำยาพิเศษหรือน้ำปูนผสม Super plasticizer เข้าไปให้เต็มท่อส่วนที่เหลือให้ได้ต่อไป ในกรณีนี้เพื่อที่จะหาตำแหน่งที่แน่นอนจึงมีการกำหนดจุดที่ต้องทำการวัดหาค่า Pulse Velocity ไปตามแนว duct ที่สงสัย กับ duct ที่อัดน้ำปูนได้เรียบร้อยไว้แล้วทุก ๆ 50 ซม. เพื่อใช้เป็นข้อเปรียบเทียบกันและกัน จากผลของการอ่านและจากประวัติของการทำงานทำให้สามารถกำหนดได้แน่นอนว่า น้ำปูนที่อัดไปแล้วนั้นได้ไหลไปถึงระยะทางแค่ไหนจากจุดอัดน้ำปูนและยังเหลืออีกแค่ไหนที่น้ำปูนยังไม่ไหลไปถึง และเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถสรุปได้แน่นอนจึงได้ทำการวัดหาค่า Pulse velocity ตามแนวท่อท่อที่รู้ว่ายังไม่มีน้ำปูนไว้ให้เปรียบเทียบกับผลที่จะอ่านในภายหลังเมื่อจะอัดน้ำปูน ส่วนที่เหลือนี้ในเวลาต่อมา ทั้งนี้ก็มีผลของท่อข้างเคียงไว้ประกอบการพิจารณาอยู่แล้วและเมื่อตกลงกันว่าจะใช้น้ำยาพิเศษอัดด้วยความดันสูง เข้าไปในท่อที่มีปัญหาในส่วนที่ยังไม่มีน้ำปูนเสร็จเรียบร้อยแล้วก็ทำการทดสอบหาค่า Pulse velocity ด้วยเครื่อง PUNDIT ในแนวท่อช่วงดังกล่าวและผลที่อ่านได้ก็แสดงว่าน้ำยาที่อัดไปภายหลังนั้นเข้าไปอยู่ในท่อในช่วงที่ต้องการแล้ว เพราะ Pulse velocity ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับตอนที่ยังมี Void เพราะยังไม่ได้อัดน้ำปูน

ในกรณีที่สาม ได้เกิดมีอุบัติเหตุในงานก่อสร้างสะพานแห่งหนึ่ง โดยในขณะที่มีการขนย้าย Box Girder ขนาดใหญ่ (หนักถึง 40 ตันต่อคาน) ข้ามสะพานส่วนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วเพื่อไปติดตั้งในช่วงกลางของสะพาน สายลวดสลิงที่ยึดตัว Box Girder ได้ขาดหลุดออกจากกัน ทำให้คานตกลงใส่พื้นและ Cross Girder ของสะพานส่วนที่สร้างเสร็จแล้วชำรุดเสียหายหลายแห่ง วิศวกรทั้งฝ่ายผู้รับเหมาก่อสร้างและฝ่ายเจ้าของงานได้หาทางแก้ไขโดยใช้ EPOXY มาฉีดซ่อมรอยร้าว และก็เช่นเดียวกันกับในกรณีที่หนึ่งผู้เขียนถูกตามให้ไปเป็นที่ปรึกษาในการใช้เครื่อง PUNDIT ทดสอบการซ่อมแซมดังกล่าว โดยเปรียบเทียบผลของการทำ Pulse velocity ทั้งส่วนที่ซ่อมไปแล้วกับส่วนที่ดี เพื่อคำนวณว่าการซ่อมนั้นได้ผลมากน้อยเพียงไร เมื่อเทียบกับส่วนที่ดี ผลของการทดสอบเมื่อนำมาคำนวณแล้ว สามารถให้ข้อมูลแก่วิศวกรฝ่ายเจ้าของงานว่า คานที่ซ่อมแล้วนั้นประมาณได้ว่ามีความแข็งแรงใกล้เคียงกับของเดิม ทำให้เกิดความมั่นใจและประหยัดเวลาตลอดจนค่าใช้จ่ายกว่าวิธีที่ทุบทิ้งแล้วสร้างใหม่มากมายนัก

ในกรณีที่สี่ ได้มีรอยร้าวเกิดขึ้นในบริเวณ Column Strip และ Middle Strip ในพื้นระบบ Flat Slab ของงานก่อสร้างอาคารสูงแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นเนื่องมาจากหลายสาเหตุ ในกรณีนี้เครื่อง PUNDIT ได้ถูกนำมาใช้ในการหา Depth of Cracks และ Inclination ของ cracks ตลอดจนประมาณระยะ Horizontal Cracks ว่าห่างจากผิวบนของพื้นเท่าใดอย่างได้ผล เพราะสอดคล้อง

กันกับการประมาณโดยทางคำนวณและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทำให้วิศวกรที่ปรึกษาแน่ใจถึงสาเหตุและปริมาณของความเสียหาย ทำให้หาวิธีการซ่อมและแก้ไขสถานการณ์ให้เกิดความปลอดภัยแก่ตัวอาคารและผู้ใช้อาคารต่อไปได้อย่างมั่นใจและประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายกว่าวิธีทดสอบอย่างอื่น

ในสี่กรณีดังกล่าวมาแล้วทำให้พบว่าการใช้เครื่องทดสอบแบบ Non-destructive โดยเฉพาะในประเภท Ultrasonic pulse velocity tester แบบ PUNDIT นี้ ทำให้ผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งหลายไม่ว่าจะเป็นเจ้าของงาน ผู้รับเหมา ผู้ควบคุมงาน วิศวกรที่ปรึกษา มีทางออกในการแก้ปัญหาซึ่งเดิมนั้นไม่มีทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นหรือที่ข้องใจอยู่ได้เลย หรือถ้าจะแก้ได้ก็ต้องเสียเวลา เสียค่าใช้จ่ายจนอาจจะเป็นปัญหาในการทำงานร่วมกันของบุคคลหลายฝ่ายได้ ในขณะที่เตรียมบทความนี้อยู่ผู้เขียนก็ได้รับการติดต่อให้ไปทำการทดสอบโครงสร้างที่เสียหายเพราะอุบัติเหตุและกำลังอยู่ในระหว่างการตัดสินใจของผู้ที่เกี่ยวข้องว่าที่ซ่อมไปแล้วนั้นใช้งานได้มากน้อยแค่ไหน บริเวณใดบ้างที่จะต้องซ่อมอีก ซึ่งถ้ามีโอกาสผู้เขียนก็จะเสนอความก้าวหน้าในด้านนี้ในโอกาสต่อไป เพื่อจะได้เป็นการเผยแพร่วิชาการและแลกเปลี่ยนความรู้กันในวงการก่อสร้างของเราต่อไป

6. บทสรุป

เนื่องจากวงการก่อสร้างของเรายังต้องการข้อมูลสนับสนุนและความมั่นใจในการใช้เครื่องมือทดสอบประเภทนี้อยู่มาก อีกทั้งยังต้องรอให้เป็นที่ยอมรับของหน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องจึงเป็นการสมควรที่ผู้ที่จะให้เครื่องมือประเภทนี้ใช้ความระมัดระวังในการทำการทดสอบให้มาก เช่น ควรอ่านค่าความเร็วของคลื่นเสียงและระยะทางที่ทำการวัด (Path length) ให้ละเอียดที่สุดเท่าที่จะทำได้ การอ่านซ้ำแล้วซ้ำอีกจนได้ค่าคงที่หรือผิดกันไม่เกิน ๑ % ตลอดจนการทำการทดสอบ เพื่อให้ได้ผลที่อ่านได้มากพอจนสามารถนับได้ว่ามั่นใจได้ในทางสถิติ (Statistical Significance) นั้นเป็นการทำให้เกิดความมั่นใจและสามารถนำเอาผลของการทดสอบไปใช้ในงานได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามจะเป็นการประมาทอย่างมากถ้าจะนำเครื่องมือประเภทนี้ไปวัดผลความเร็วของคลื่นเสียงที่วิ่งผ่านแท่งทดสอบคอนกรีตตัวอย่าง และที่วิ่งผ่านโครงสร้างจริงแล้วสรุป (Correlation) โดยไม่คำนึงถึงปัจจัยตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องให้ถ่องแท้เสียก่อน ผู้เขียนขอเสนอว่าควรที่จะใช้งานเครื่องมือประเภทนี้ในลักษณะเครื่องให้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจ (ที่เดิมเราไม่มี) แล้วใช้พิจารณญาณและสามัญสำนึกของหลักการทางวิศวกรรมที่เราได้เรียนและได้สะสมประสบการณ์ในการทำงานที่ผ่านมาเป็นเครื่องตัดสินใจอีกทีหนึ่งจะเป็นการถูกต้องกว่า

ในระยะที่มีการใช้งานเครื่องมือทดสอบประเภท PUNDIT ในช่วงแรก ๆ นี้ ผู้เขียนเห็นว่าเป็นการสมควรอย่างยิ่งที่ต้องมีการแลกเปลี่ยนประสบการณ์ระหว่างผู้ที่สนใจและผู้ที่อยู่ในวงการวิศวกรรมทั้งหลาย ทั้งนี้เพื่อเป็นการเผยแพร่และยกระดับความก้าวหน้าของวงการก่อสร้างในประเทศเราให้สูงขึ้นทันประเทศเพื่อนบ้านซึ่งมีการใช้งานเครื่องมือประเภทนี้นานกว่าเรา เช่น มาเลเซีย สิงคโปร์ ฮ่องกง ญี่ปุ่น เป็นต้น และเพื่อเสนอทางแก้ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการทำงานก่อสร้างให้กับผู้ที่สนใจอีกวิธีหนึ่ง เพราะผู้เขียนเห็นว่าวิธีการทดสอบแบบ Ultrasonic pulse velocity testing นี้อาจช่วยประหยัดเวลา ค่าใช้จ่าย ลดข้อขัดแย้งให้กับทีมทำงานก่อสร้างทั้งฝ่ายรัฐและเอกชน เพราะอาจใช้เป็นเครื่องเตือนถึงปัญหาที่อาจจะตามมาได้ตั้งแต่เนิ่นๆ และยังใช้เป็นเครื่องมือสำหรับกำหนดขอบเขตของงานที่ต้องแก้ไขให้น้อยลงตามความจำเป็น เช่น การสั่งแก้ไขเนื้องานเฉพาะบริเวณที่พบว่าบกพร่อง แทนการสั่งทุบทิ้งทั้งหมดแล้วสร้างใหม่ เป็นต้น

บรรณานุกรม

1. Thomson, W.T., "*Measuring changes in physical properties of concrete by the dynamic method.*" Proc. Amer. Soc. Test. Mater., 1940 Vol. 40, pp. 1113–21

2. Obert, L., and W.I. Duvall, "*Discussion of dynamic methods of testing concrete with suggestions for standardisation*". Proc, Amer. Soc. test. Mater., 1941 Vol. 41 pp. 1053–70

3. Long, B.G , H.J.Kurtz and T.A. Sandenaw., "*An instrument and a technique for field determination of the modulus of elasticity and flexural strength of concrete (pavements).*" J. Amer. Concr. inst., 1945, Vol. 16 (Proceedings, 41) (3), pp.217–31

4. British Standards Institution. British Standard 1881 : 1952 "*Method of testing concrete*" London. 1952

5. Jones, R. "*The non–destructive testing of concrete.*" Magazine of Concrete Research, No.2 June 1949, pp, 67–78

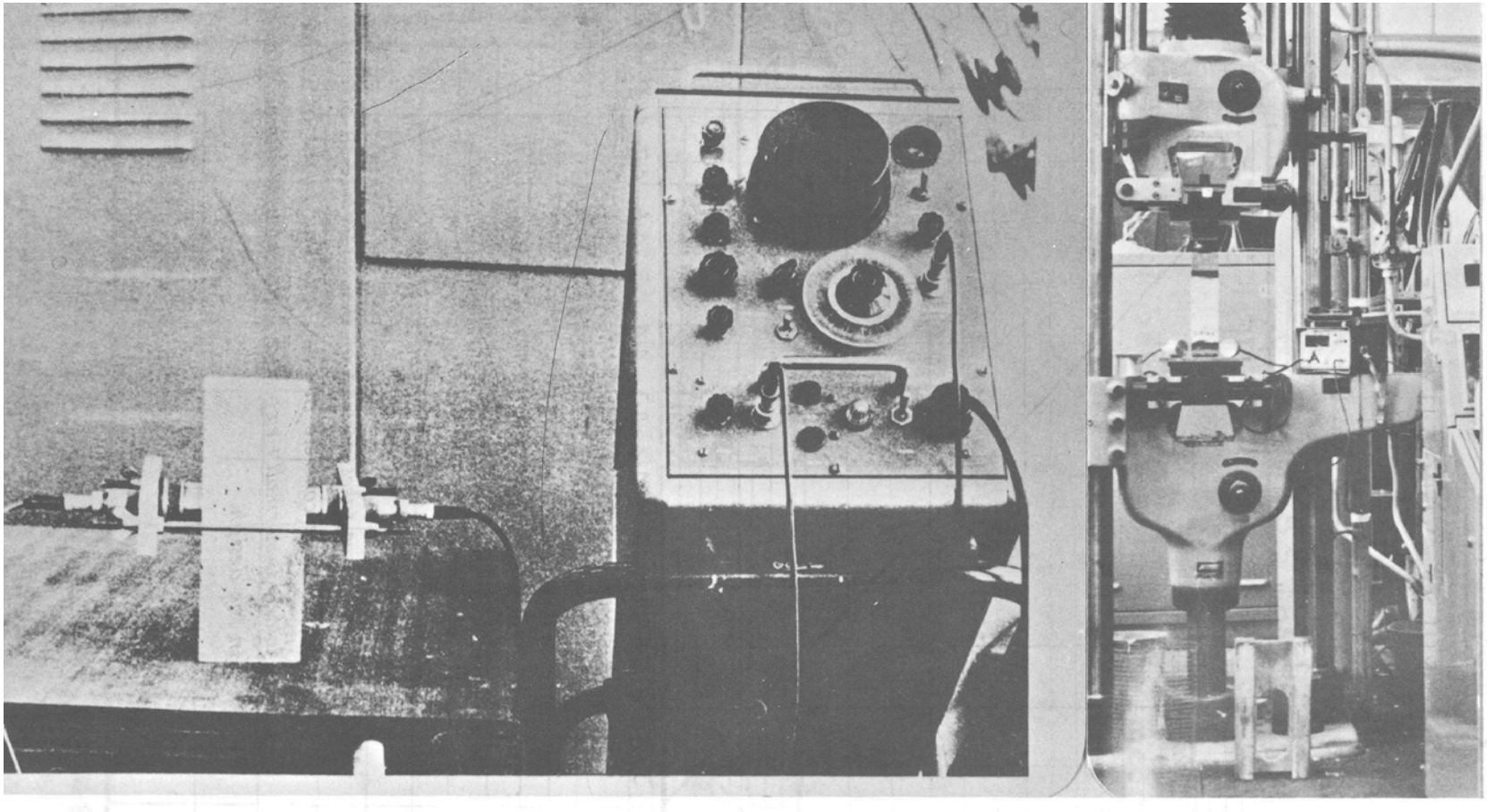
6. Jones, R. "*Non–destructive testing of Concrete.*" Cambridge University Press, 1962.

7. Jones, R. and Gatfield, E.N., "*Testing concrete by an ultrasonic pulse technique.*" Road Research Laboratory, Technical Paper No. 34, HMSO, London 1955.

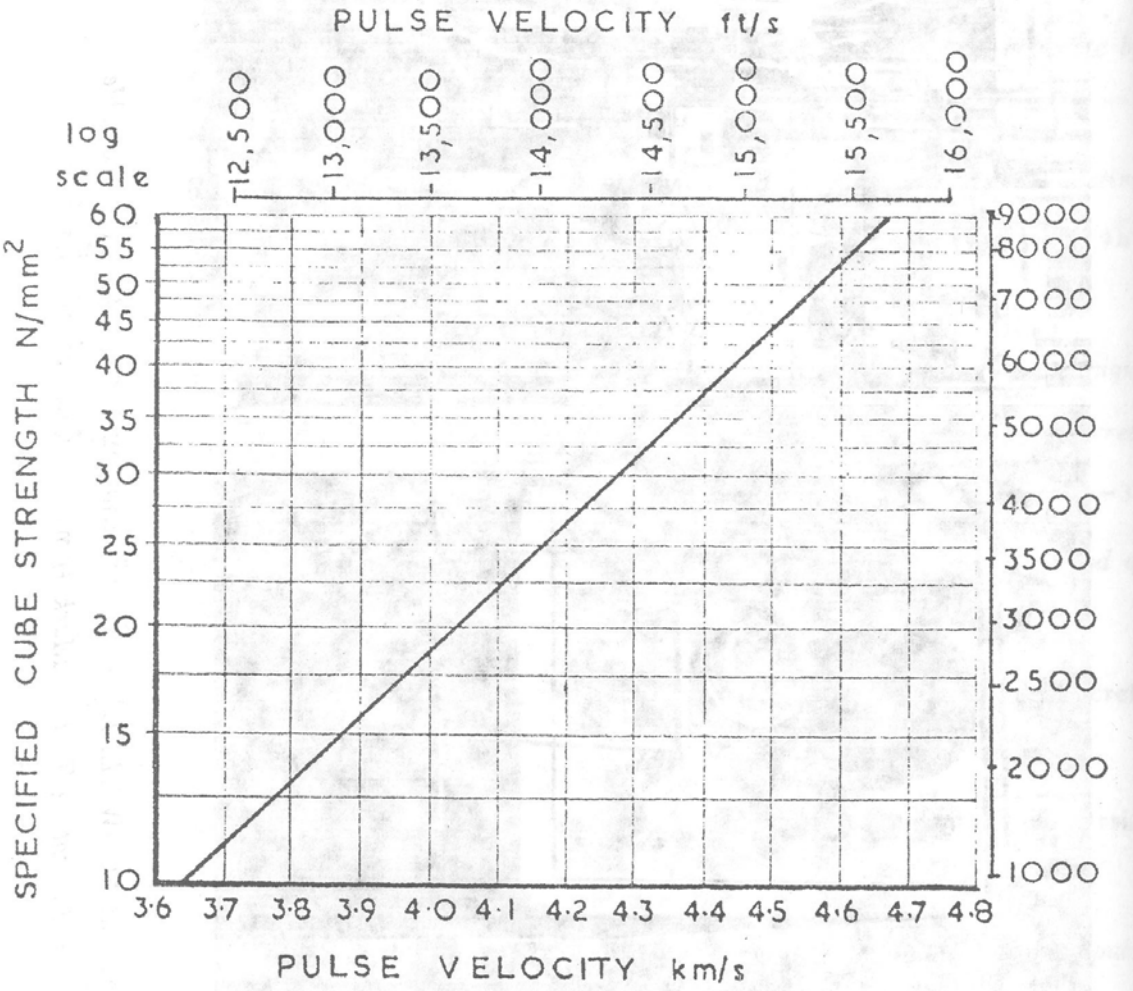
8. Leslie, J.R. and Chessman, W,J., "*An ultrasonic method of studying determination and cracking in concrete stuctures.*" Proc. American Concrete Institute, Vol. 46 pp. 17–36, 1949.

9. British Standard Instition. British Standard 4408 : Part 5 : 1974 "*Recommendations for Non–destructive Methods of Testing for Concrete. Part 5 : Measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete.*"

10. Tomsett, H.N., "*Non-destructive testing of floor slabs*", Concrete, March 1974.

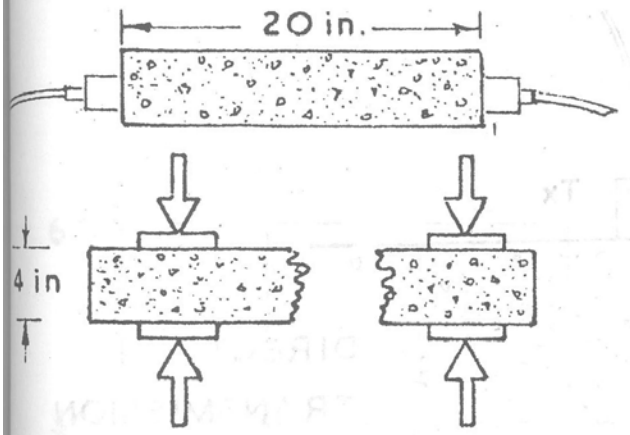


รูปที่ 1 *Ultrasonic Material Tester* รุ่นเก่า ยี่ห้อ *"CAWKELL"* ทางซ้ายเปรียบเทียบกับ *"PUNDIT"* หรือ *Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester (Mark 4)* ทางขวา ซึ่งเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ แสดงพร้อมหัว *Transducer "A"*



รูปที่ 2 : *Suggested curve relating SPECIFIED Cube Strength to minimum allowable Pulse Velocity in the structure.*

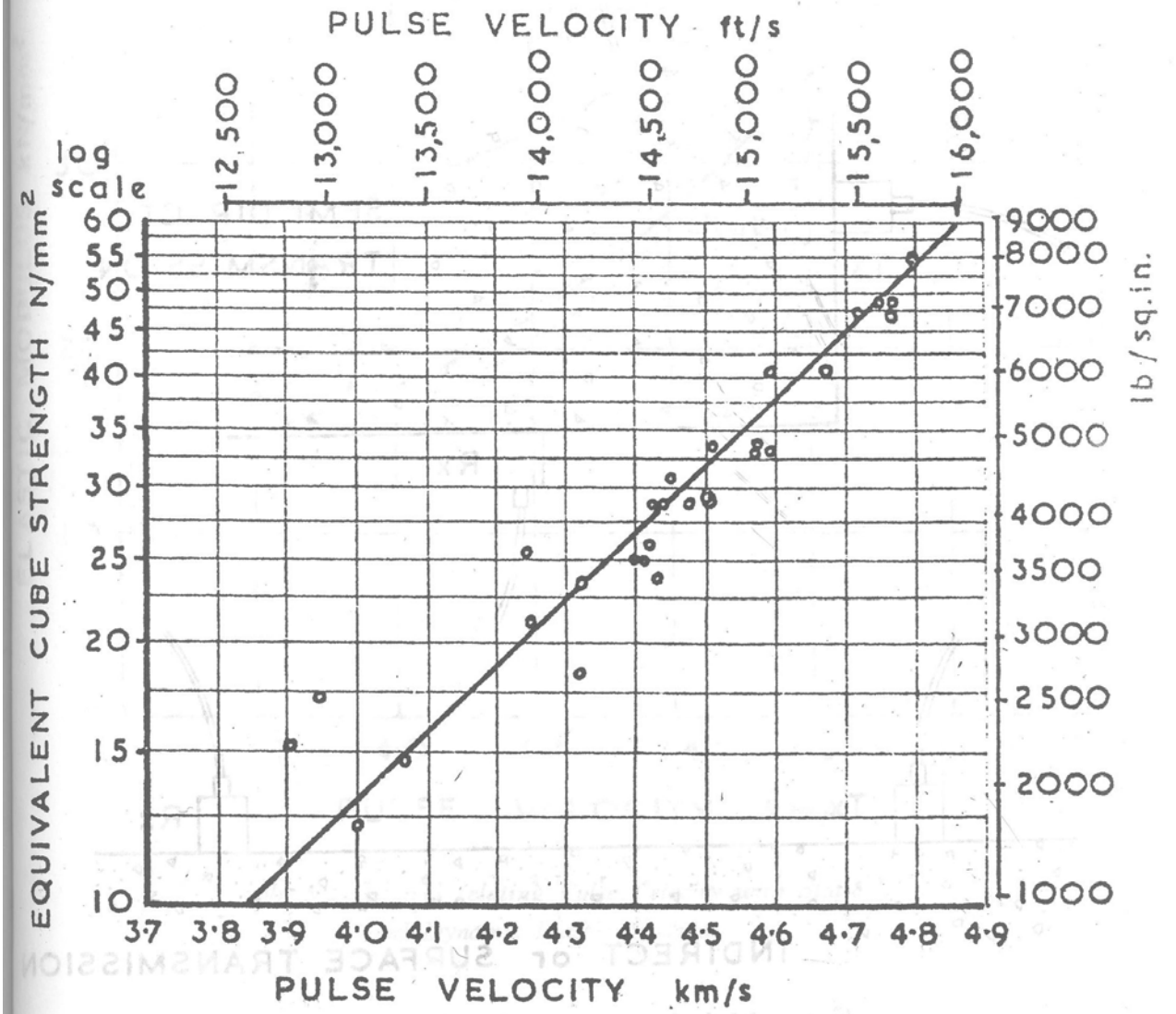
NOTE : This curve takes account of the difference in Strength between the concrete in cubes and that in the Structure which is normally expected and which is allowed for in the design.



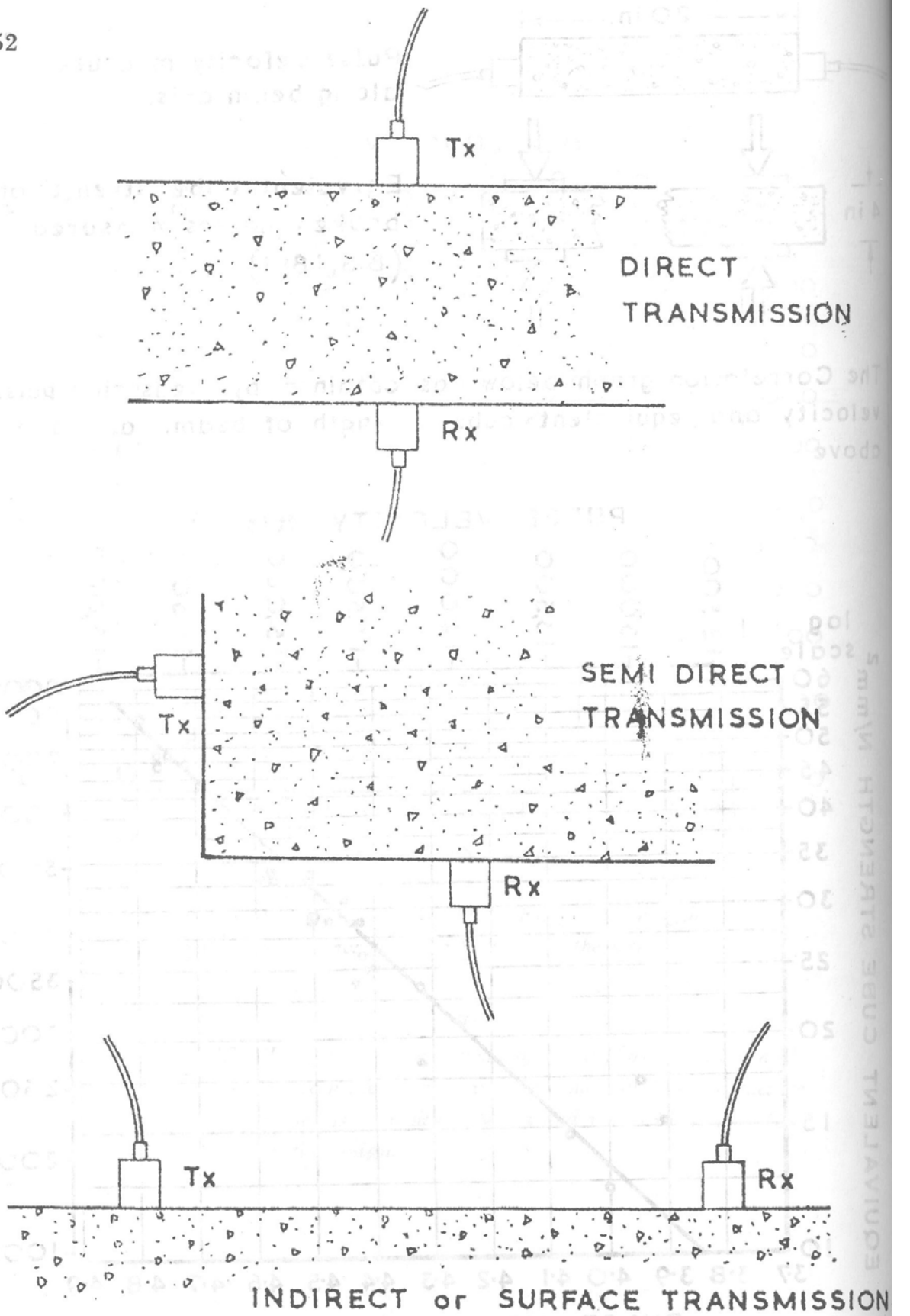
Pulse Velocity measured along beam axis.

Eqivalent cube strength of broken halves measured (B.S. 1881)

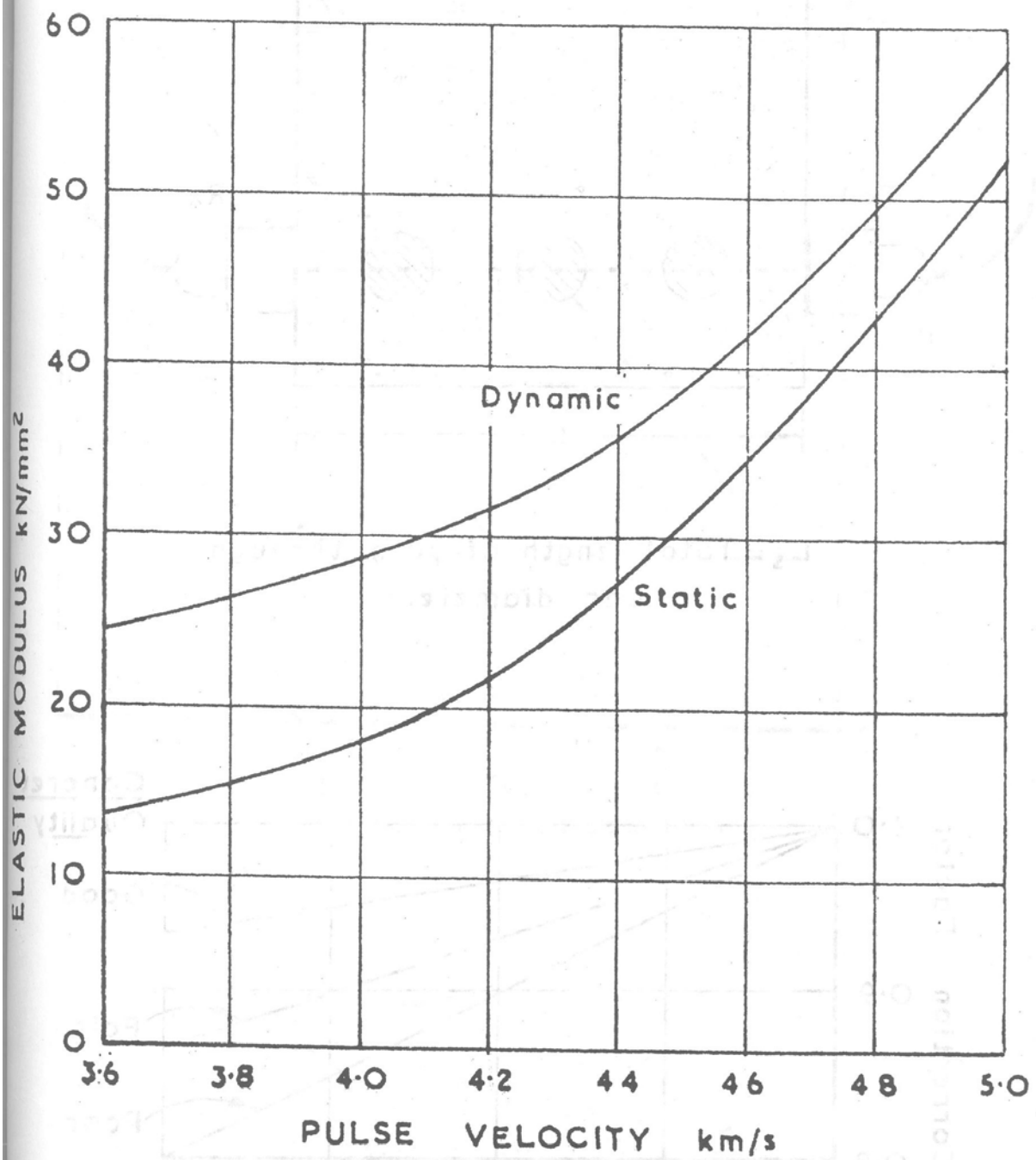
The Correlation graph below was obtained by measuring pulse velocity and equivalent cube strength of beams as shown above



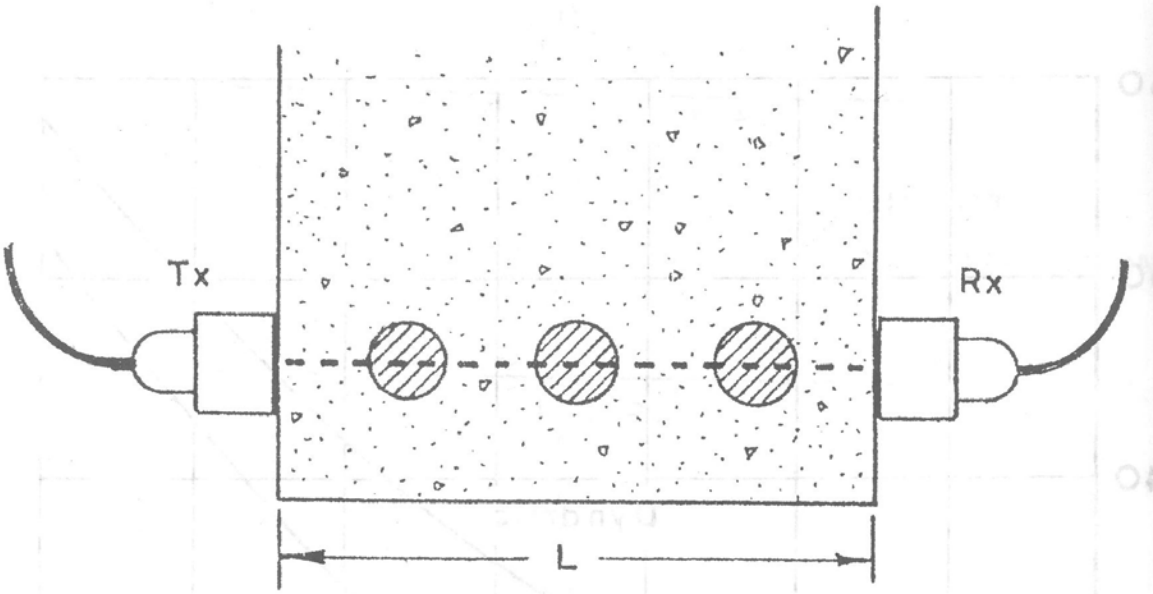
รูปที่ 3 : *TYPICAL Strength–Velocity Correlation for Concrete*



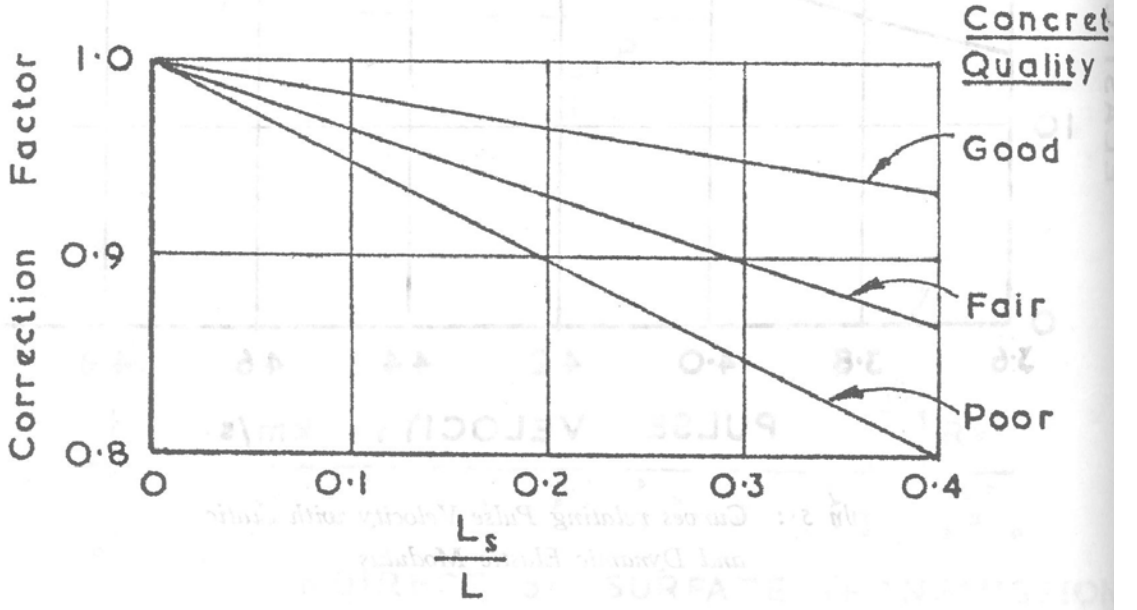
รูปที่ 4 : *Methods of propagating ultrasonic pulses*



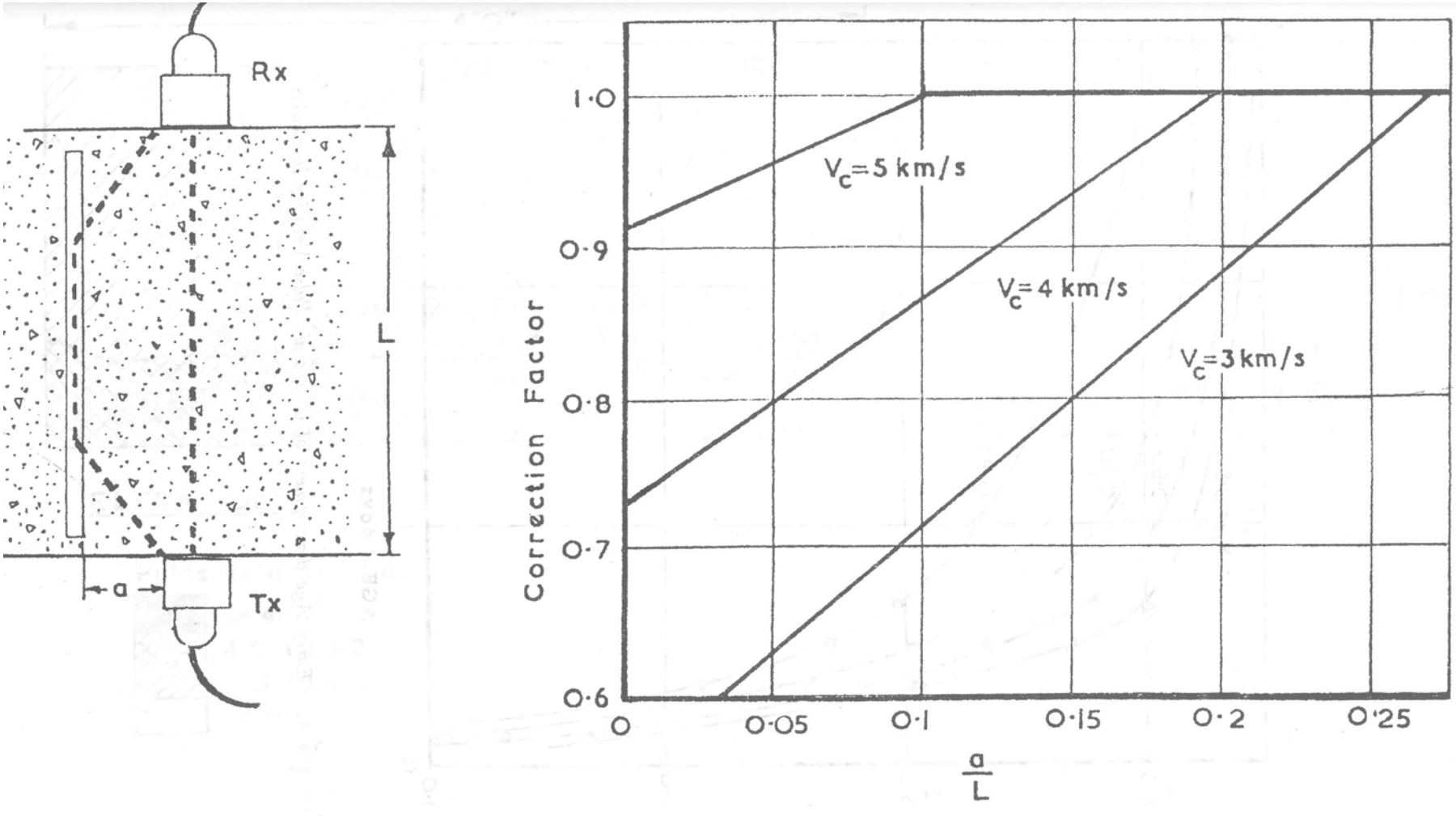
รูปที่ 5 : *Curves relating Pulse Velocity with Static and Dynamic Elastic Modulus*



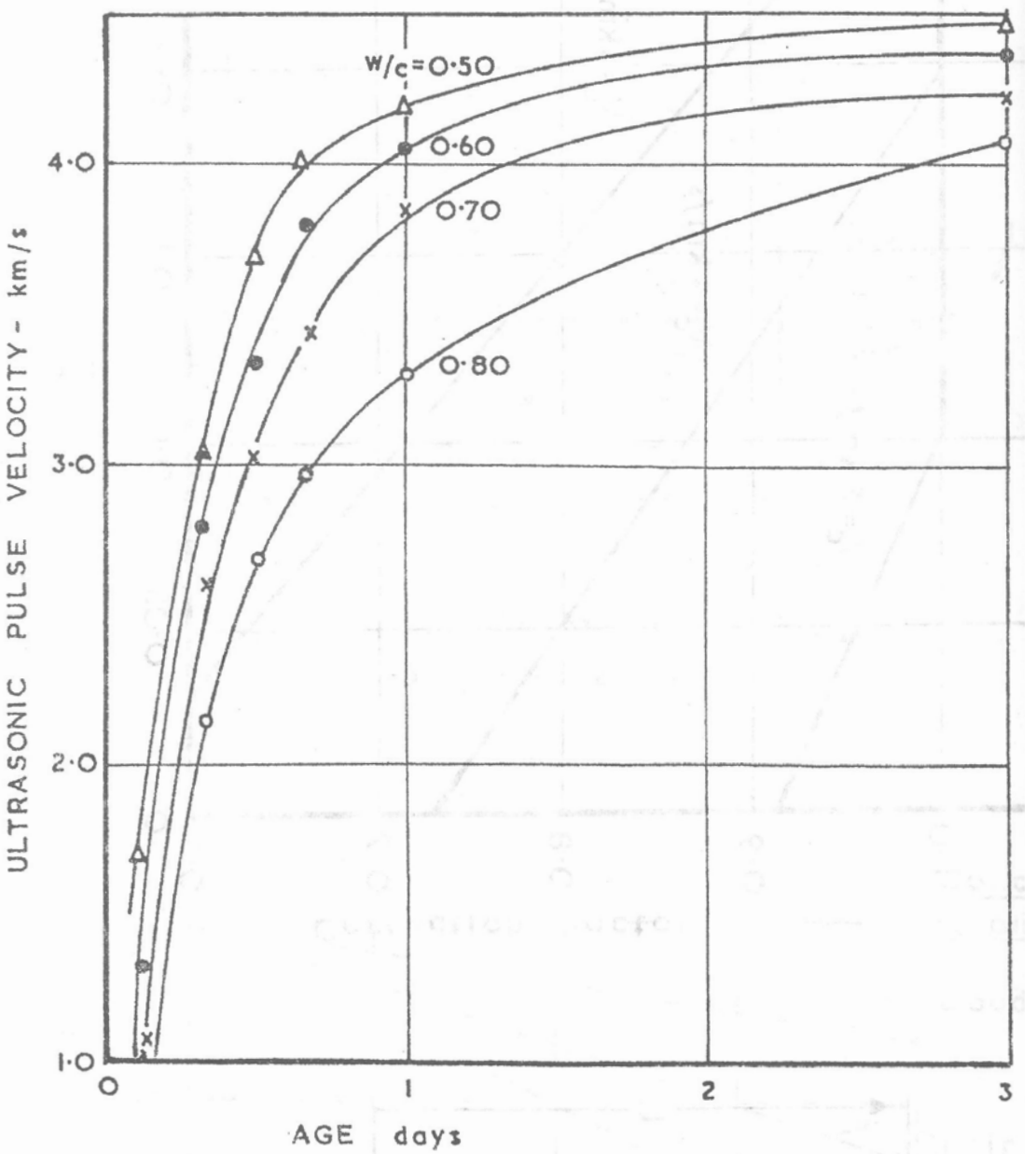
L_s = Total length of path through bar diameters.



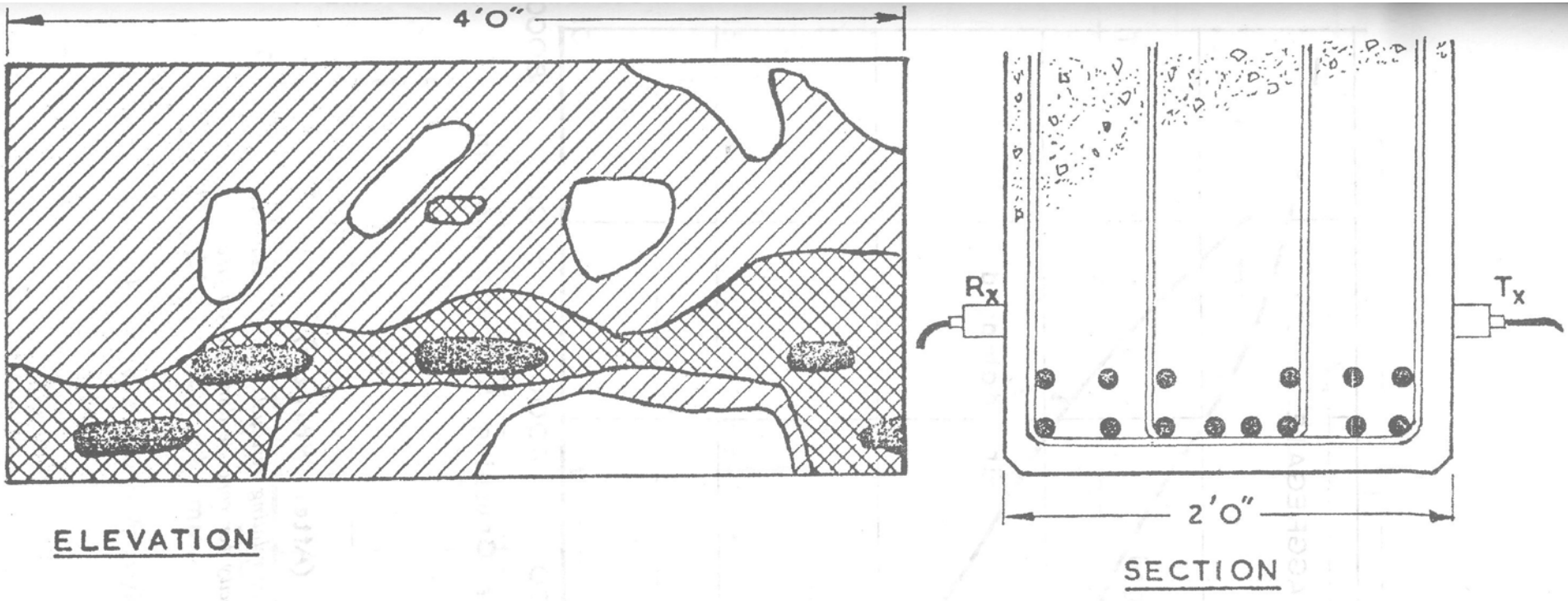
รูปที่ 6 : *Influence of steel reinforcement on pulse velocity. Bars af right angles to path.*



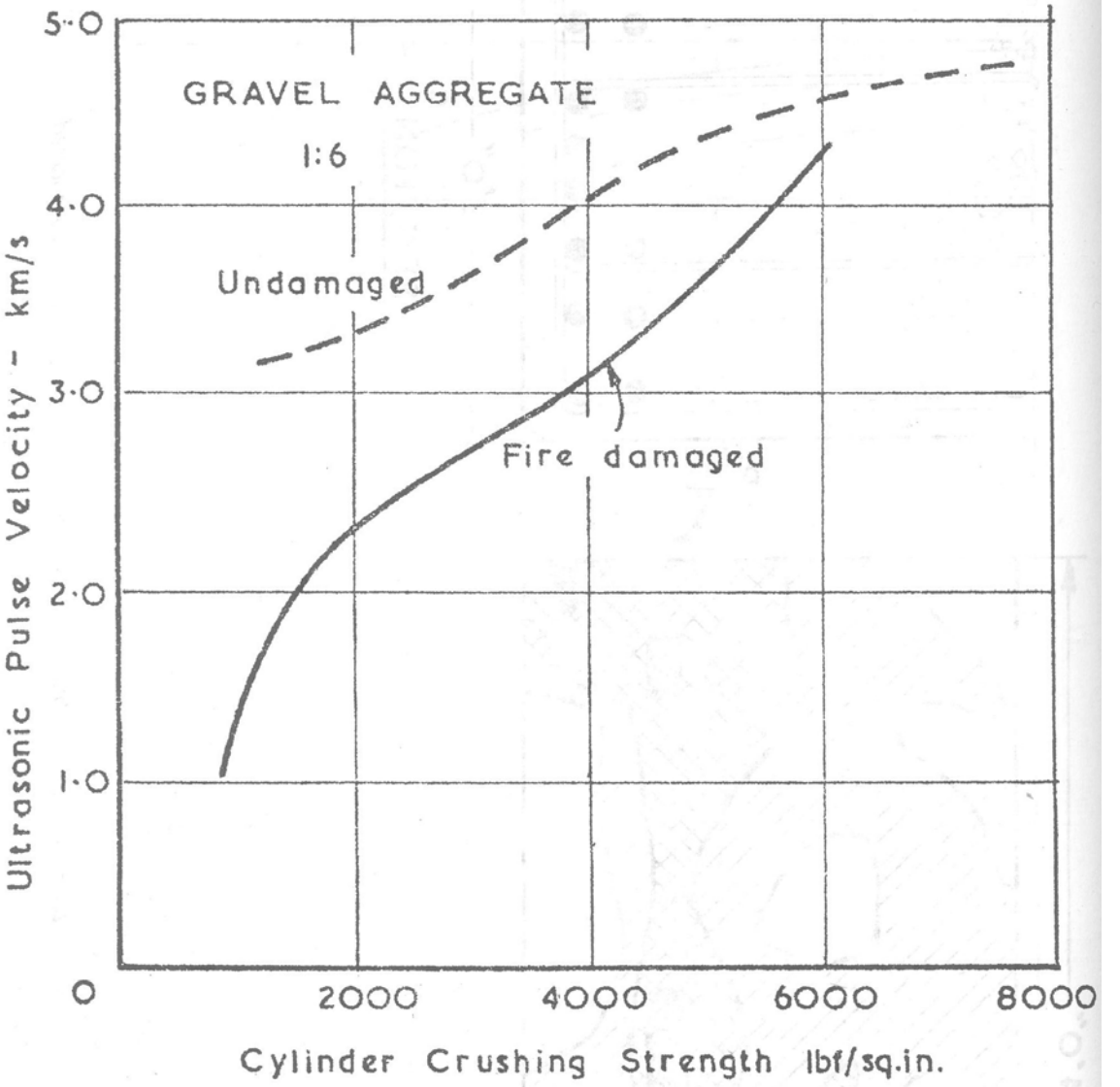
รูปที่ 7 : *Influence of steel reinforcement on pulse velocity. Bar parallel to pulse path.*



รูปที่ 8 : *Early Age development of Ultrasonic Pulse Velocity in concre*

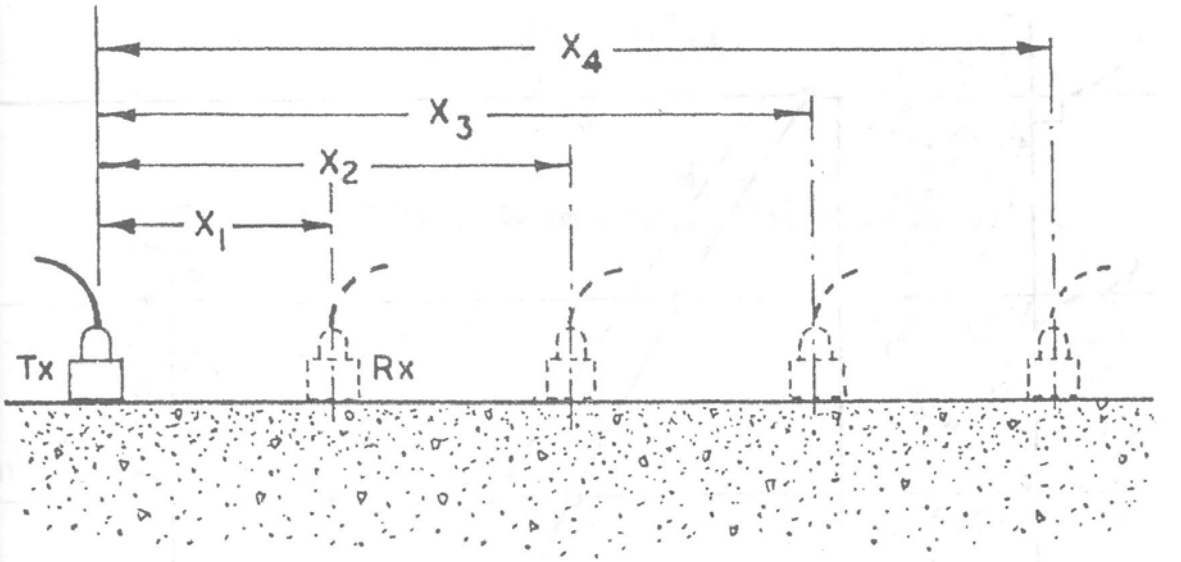


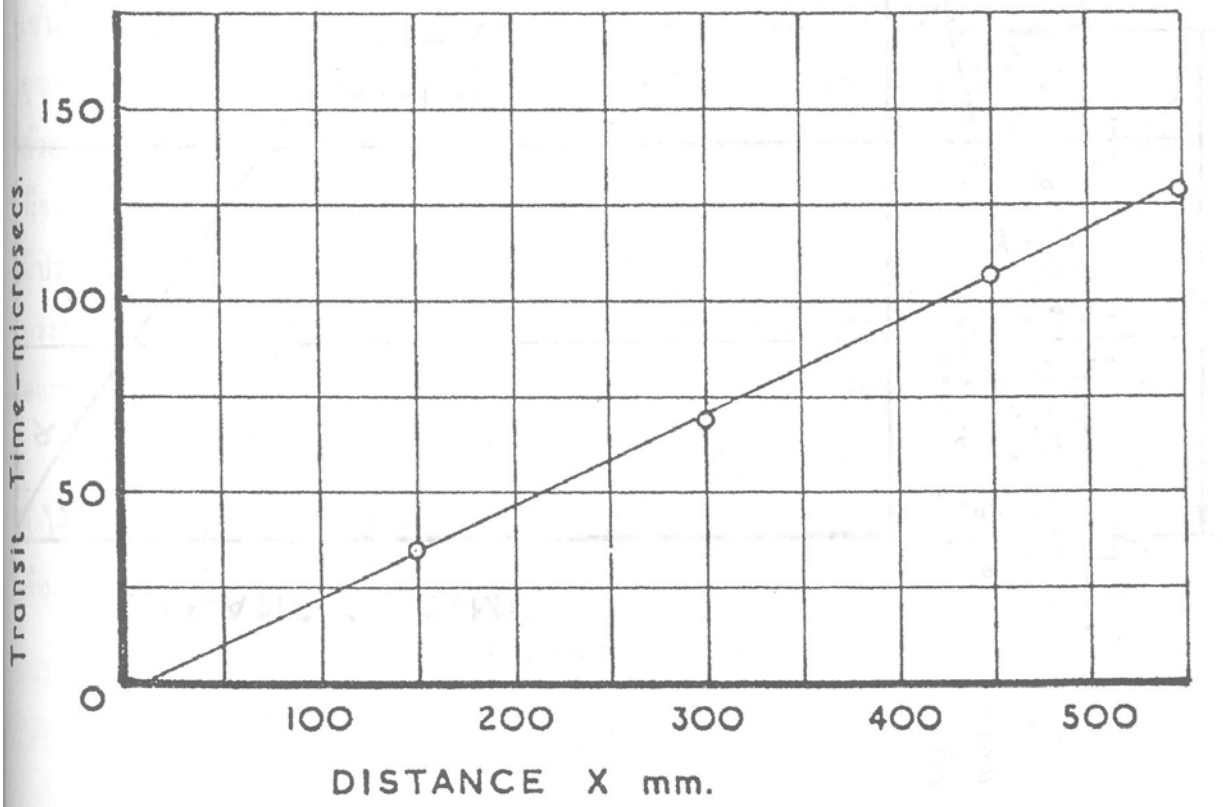
รูปที่ 9 : *Typical example of distribution of Ultrasonic pulse velocity across a badly cotnpacted reinforced concrete beam.*



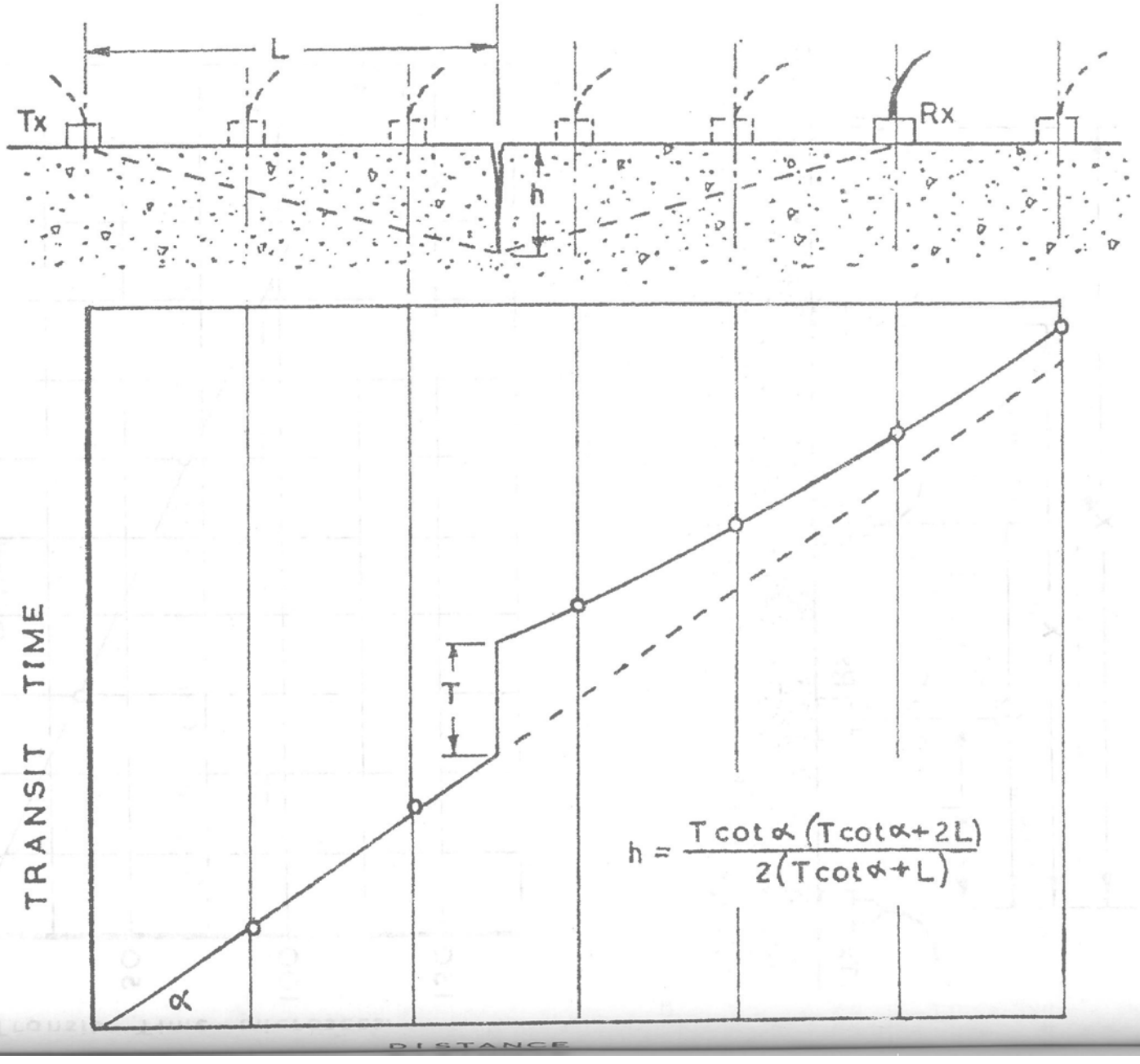
(After Watkeys)

รูปที่ 10 : *Curve relating residual strength with pulse velocity for concrete damaged by fire.*





รูปที่ 11 : *Pulse Velocity determination by surface (indirect) Method.*



รูปที่ 12 :
Determination of Crack Depth