

論文

[1080] 超音波法による構造物コンクリートの品質評価に関する2、3の考察

正会員○尼崎 省二（立命館大学土木工学科）

正会員 宮川 豊章（京都大学土木工学科）

正会員 小林 茂広（中研コンサルタント）

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理が注目され始めるとともに、各種非破壊検査法に関する研究報告が多くなされている。コンクリートの非破壊検査法に関する研究には、従来から、比較的小規模な供試体が多く用いられているが、供試体と構造物とのコンクリートは、締固め状況、型わく、養生条件などの諸条件が異なるため、品質は必ずしも一致しないことは周知のところである。構造物コンクリートの非破壊評価にあたっては、試験装置の特性を含む検査手法が測定結果に及ぼす影響を十分に把握するとともに、構造物規模での実験により構造物コンクリートの品質分布を把握する必要があると思われる。

本研究は、超音波法について、①装置の特性が超音波パルス伝播速度(以下、伝播速度と略記)に及ぼす影響と探査可能な内部空隙寸法について検討するとともに、②実構造物規模の供試体を用いて、コンクリートの品質分布を調べるとともに、豆板あるいは締固め不良部等の内部欠陥評価における問題点を検討したものである。

2. 実験の概要

2.1 装置特性の影響に関する検討

装置の特性が伝播速度に及ぼす影響は、圧電体のコンデンサーとしての性質を利用して、図-1に示すように、圧電体に直流を印加する方式の2種類の伝播時間測定装置を用いて検討した。すなわち印加電圧と放電時間が可変の装置①およびこれ

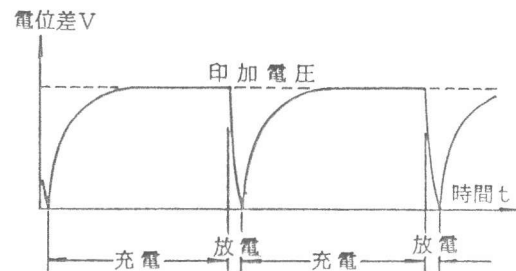


図-1 印加電圧および放電時間の変化

らが固定されている市販の装置②である。装置①は受振波観察方式のもので、P Z Tを振動子素子（厚み共振振動数 $f = 100, 200, 250$ kHz）とした $\phi 60, 60$ および 36 mmの3種類の振動子を使用した。伝播時間は受振波のベースが乱れて立上りが不鮮明ならない程度まで増幅したときの水平時間軸との平行性がなくなる点までとした。装置②は印加電圧 1 kV、放電時間 $2 \mu s$ で、入力感度 ($100 \mu V$) に最初に達した電圧を飽和増幅して伝播時間を計測し、デジタル表示する飽和増幅方式の装置で、振動子は $\phi 50$ mm、 $f = 54$ kHzを使用した。伝播時間の測定は 5 cm間隔の格子点とし、1点での伝播時間は2~3回の測定値の最小値とした。

コンクリートは、水セメント比50%、目標スランプ 12 ± 2 cm、空気量 5 ± 1 %とした。使用材料は、セメントが普通ポルトランドセメント、細骨材が野洲川産川砂（比重2.60、吸水率1.68%、FM2.68）、粗骨材が高槻産硬質砂岩碎石（比重2.69、吸水率0.76%、最大寸法20 mm）である。

供試体は、図-2に示す位置に人工欠陥を埋設した鉄筋コンクリート供試体で、人工欠陥は発泡スチロール（ $100 \times 100 \times 10$ mm、 $150 \times 100 \times 10$ mm）および前記コンクリートをウェットスクリーニングした粗骨材とした。養生は2週の散水養生後、室内保存とし、材令28日で測定した。

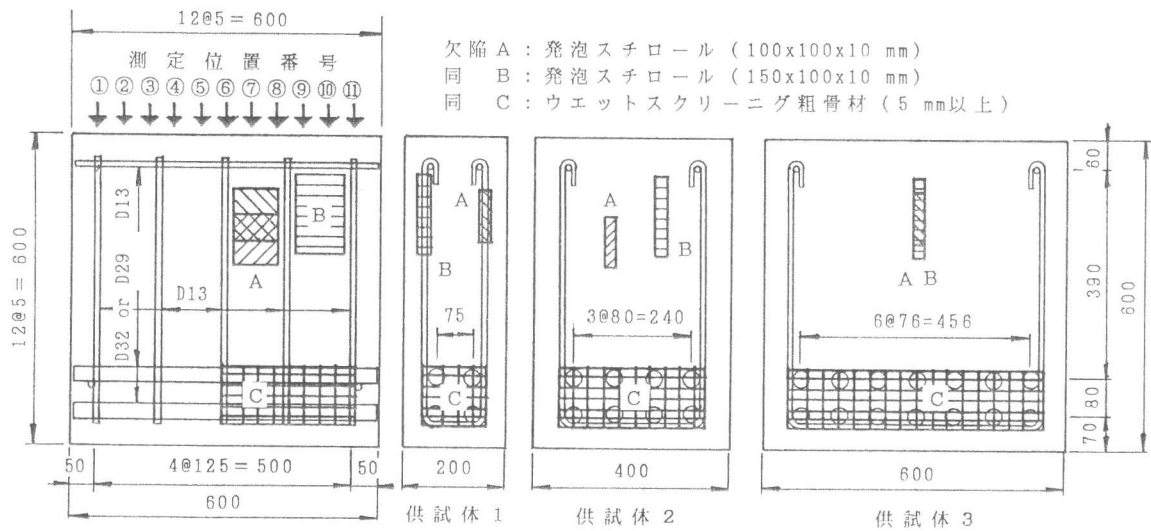


図-2 供試体の形状、配筋状態、人工欠陥位置および伝播時間測定位置

2. 2 実構造物規模供試体による検討

供試体は、図-3に示すように、断面500x1200x1200 mmの実構造物規模の鉄筋および無筋コンクリート供試体で、振動締固め時間2、15秒および締固めなしの場合について、伝播速度分布を検討した。供試体の作製手順は以下の通りである。

図-3に示す位置に振動機を固定して、1リフト60 cm でコンクリートを打込む。締固め順毎に順次所要の振動を与え、振動機を3秒間で底面から50 cm の位置まで引抜き、固定する。2層目は1層と同様の打込み、締固め後、振動機を完全に引抜き、沈下量を追加して、表面をこて仕上げをする。なお締固めなしの供試体は一層打ちとした。振動機は振動数12 000 vpm、直径50 mm、電力500 Wのフレキシブルバイブレータを使用した。型枠は普通合板を使用し、養生は脱型（材令3日）時までのシート養生、以後屋外保存とした。測定は材令4日および28日とした。

コンクリートは表-1の示方配合による呼び強度240 kgf/cm² のレデーミクストコンクリートを用いた。使用材料は、セメントが普通ポルトランドセメント、細骨材が城陽産山砂（比重2.56、吸水率1.97%、FM2.85）、粗骨材が城陽産山砂利（比重2.61）と高槻産硬質砂岩碎石（比重2.68）を7：3で混合したもの（比重2.63、吸水率0.65%、最大寸法25 mm）である。

伝播時間は2台の装置②（P₁、P₂）で、それぞれ異なる人が20 cm間隔の格子点で測定することを原則とし、締固め不良部など内部欠陥の存在が想定される供試体あるいは位置については、10あるいは5 cm間隔で測定した。一部供試体は重複測定も行った。

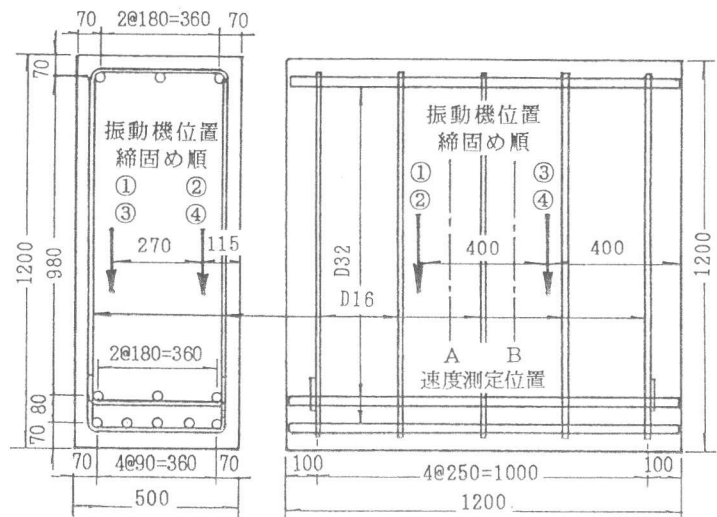


図-3 実構造物規模供試体の配筋状態および振動機位置

表-1 レデーミクストコンクリートの示方配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗 骨 材 G		混和剤
								山砂利	碎石	
25	8 ± 1	5 ± 1	57.0	43.2	158	277	801	757	324	0.693

3. 実験結果および考察

3.1 装置特性が伝播速度に及ぼす影響

表2に円柱供試体(φ10x20 cm)で検討したの印加電圧および放電時間による伝播速度の変化を示す。印加電気信号は振動子接続の有無によって異なるが、表2の印加電圧および放電時間は振動子を接続しない場合の値である。印加電圧が高いほど、また放電時間が短いほど、伝播速度は早くなっている。コンクリート中での減衰が一定の場合、印加電圧が高く、放電時間が短いほど、受振波の立上りが鋭くなり、伝播時間が短く計測される[1]ためと考えられる。

装置①の印加電圧を1200V、放電時間を0.5μsとしたときの伝播速度に及ぼす振動子共振振動数および装置の相違が伝播速度の及ぼす影響の一例(供試体1、厚さ20 cm)を図-4に示す。装置②(f=54 kHz、飽和増幅方式)による伝播速度は、装置①(受振波形観察方式)の場合

よりも、150~250 m/s遅い。また印加電圧および放電時間が一定であっても、振動子共振振動数が大きくなるほど、伝播速度は早くなる傾向にある。装置①に用いた厚み共振振動数100、200および250 kHzのP Z Tの径方向共振振動数は、それぞれ、43.5、54.5および125 kHzであることを考慮すると、共振振動数が小さい受振子ほど受振波頭が丸みを帯び、実際の立上りから入力感度に達するまでの時間遅れが大きくなること、受振子の共振振動数が大きくなるとともに、受振波頭の立上りが鋭くなるのが原因と思われる。超音波法には、本研究に用いた以外に各種伝播時間測定装置が使用され、装置間での伝播速度差が500 m/s以上の場合もあること[2]、また同方式の装置でも、印加電圧、放電時間および振動子共振振動数によって伝播速度は相違するため、異なる装置による伝播速度の直接比較、伝播速度によるコンクリートの品質比較は困難と思われる。

一方、図-4で伝播速度の高さ方向分布は、装置および振動子が異なっても、ほぼ一定である。すなわち伝播速度は供試体下層になるほど早くなり、欠陥がないと思われる位置⑤の最上層と底面近傍では0.6 km/s以上の伝播速度差があり、上面から40 cmまでの伝播速度増加が大きい。また人工欠陥を埋設した位置⑨でも同様の伝播速度分布であるが、高さ45 cmでの速度低下、高さ

表-2 装置による伝播速度の変化

放電 時間 (μs)	伝 播 速 度 (km/s)			
	印 加 電 圧 (kV)			
	0.5	0.8	1.0	1.2
0.5	4.89	4.91	4.93	4.96
1.0	4.87	4.89	4.90	4.93
3.0	4.86	4.87	4.89	4.91
5.0	4.85	4.86	4.88	4.90

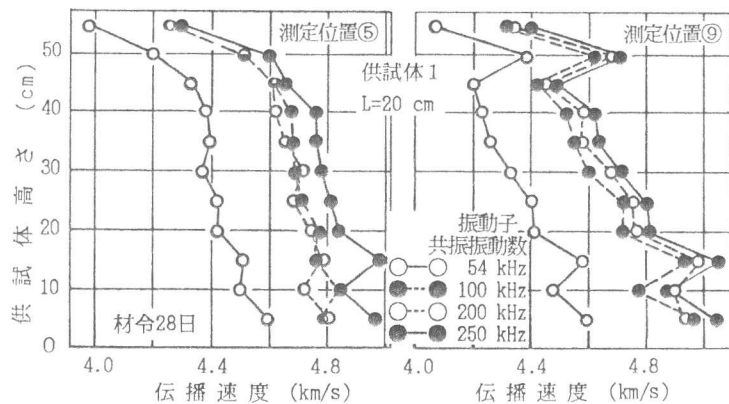


図-4 装置、振動子共振振動数による伝播速度の変化

5および15 cmでの増大が認められる。高さ45 cmの発泡スチロール埋設（空隙）、高さ5および15 cmのスターラップあるいは主鉄筋が影響がしたと思われる。供試体下層ほど伝播速度が早くなるのは、コンクリートの分離・沈降による高さ方向の水セメント比の変化[3]が原因と考えられる。したがって、これらの伝播速度分布を考慮することにより、構造物コンクリートの品質あるいは内部欠陥の評価が可能となる。しかしながら、位置⑨の主鉄筋部分には豆板を想定したウェットスクリーング粗骨材を埋設したにもかかわらず、伝播速度の低下は認められない。波動が伝播速度の早い粗骨材接触部分を伝播したと考えられ、伝播速度による構造物内部の豆板探査は困難と思われる。

図-5に装置①（印加電圧1200 V、放電時間0.5 μ s、振動子 $f=250$ kHz）で測定した空隙部分の伝播速度分布を示す。供試体1（距離 $L=20$ cm）では、空隙が伝播速度低下に及ぼす影響が顕著で、ほぼ空隙の大きさに対応した領域に伝播速度低下が生じているが、伝播距離が長くなるとともに、空隙の影響は少なくなり、供試体3（ $L=60$ cm）ではほとんど影響されていない。

波線理論によると、図-6に示すように、供試体中央に存在する10 cm角の板状空隙中央部に振動子を置いたときの距離 $L=20, 40$ および 60 cm での見かけの伝播速度低下は、それぞれ、11.8、3.1および1.4%となる。すなわち内部空隙による伝播速度低下が10%程度以上であれば、伝播速度分布からその大きさをほぼ推定できると思われる。

一構造部材での伝播速度は正規分布であり、予想される欠陥寸法以下の格子間隔で測定した伝播速度の $\bar{V} - 2\sigma$ （ \bar{V} ：平均値、 σ ：標準偏差）以下の部分に内部欠陥の存在する可能性が指摘されている[4]が、図-5の条件で測定した供試体1では、 $\bar{V}=4.74$ km/s、 $\sigma=0.200$ km/sであり、 $\bar{V} - 2\sigma$ より遅い伝播速度は高さ55 cmの位置だけであり、空隙部分は $\bar{V} - 2\sigma$ より早い速度になっている。ここには示していないが、 $\bar{V} - \sigma$ 以下の伝播速度の分布を調べると、ほぼ空隙寸法に相当する打点が得られている。 $\bar{V} - \sigma$ を基準すれば、内部空隙の評価が可能になるとと思われる。

3.2 実構造物規模供試体による検討結果

図-7に締固め時間による伝播速度変化（無筋供試体、

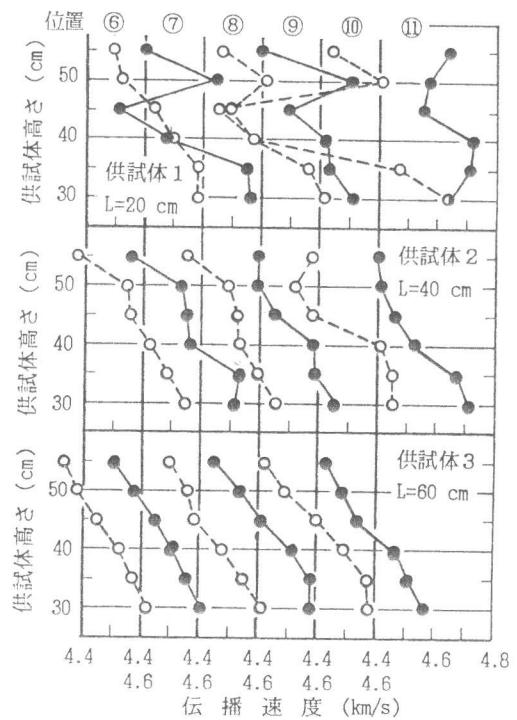


図-5 人工空隙位置での伝播速度変化（装置①、振動子 $f=250$ kHz）

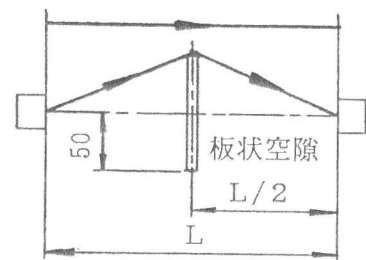


図-6 波線理論による伝播経路

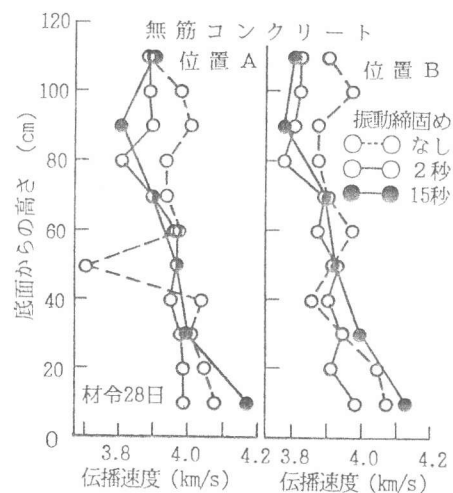


図-7 締固めが伝播速度に及ぼす影響

材令28日)の一例を示す。図-4とは勾配が異なるが、締固め時間の長短にかかわらず、伝播速度は供試体下層ほど早くなっている。その増加傾向は、締固め時間15秒ではほぼ同様であるが、締固め時間が短くなると、上下に大きく変動している。供試体上・下層の伝播速度差は、締固め時間が長くなるほど、大きい。締固め:なしの供試体下層の伝播速度が上層よりも早くなっているのは、スランプ 8 ± 1 cmのコンクリートを気温 30°C 前後の炎天下で打設したため、ブリージング水もほとんど認められなかったことを考慮すると、上層コンクリートによる下層部の圧密効果が生じたものと思われる。締固め:なしの位置A、高さ50 cmの伝播速度は、その上と下より 0.3 km/s以上の低下しているが、コンクリート表面は比較的平坦であったことから、図-4の場合と同様、空隙などの内部欠陥の存在が考えられる。

図-8は、図-3とは異なる供試体で測定した脱型直後(材令4日)と材令28日との伝播速度を比較したもので、伝播速度軸は脱型直後から材令28日までの伝播速度増分(0.2 km/s)だけずらして示している。いずれの測定位置も材令による伝播速度分布の変化は生じていない。コンクリートの伝播速度は、骨材の種類および粒度、配合、養生、材令およびコンクリートの乾湿など多くの要因に影響されることから、伝播速度とコンクリートの品質との大まかな関係が考えられている[5]が、伝播速度のみによる品質評価は困難である。伝播速度分布が材令に影響されないとするれば、任意材令で速度分布を求めれば、構造物コンクリートの内部欠陥評価が可能となる。

図-9に特性の等しい2台の装置(P_1 および P_2)を用いて、一定の測定方法にしたがって異なる人が独立に測定した伝播速度分布を示す。特性の異なる装置で測定した伝播速度が異なる値になることは、前述の通りであるが、同じ特性の装置を用い、一定の測定方法にしたがって測定すれば、測定者が異なっても、再現性のある伝播速度測定が可能となることがわかる。

我国には、超音波法に関する規格類はなく、日本建築学会「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」が制定されているにすぎない。伝播時間測定装置は多種多様であり、すべての装置に適用可能な標準的測定方法の確立は困難と思われるが、少なくとも一般的な装置を用いた場合の標準的測定方法を定める必要がある。

図-8、9での伝播速度は、図-4とは異なる勾配で上層から下層方向に増大しているが、下層部で主鉄筋の影響を受けるとともに、高さ50 cmでは70 cmより遅いか、ほぼ同じ伝播速度になっている。コンクリートを層打ちすると、打ち継ぎ目部が欠陥部になりやすいことを考慮すると、この高さ方向の伝播速度変化は、打ち継ぎ部コンクリートの特性とよく一致していると思われる。伝播速度が供試体下層ほど早くなる傾向は、測定装置および測定者の相違にかかわらず、ほぼ同

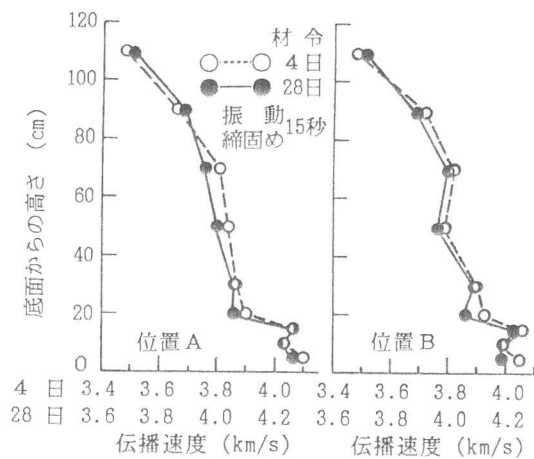


図-8 材令による伝播速度変化

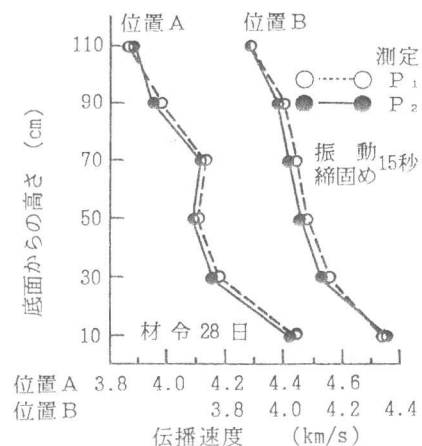


図-9 同一機種による伝播速度再現性

じであるが、伝播速度増加の程度および状況はコンクリートの配合、スランブおよび締固め方法などによって異なることが考えられる。

4. まとめ

圧電体への直流電圧の印加・放電による超音波放射方式の装置を用いた超音波法による構造物コンクリートの品質および内部欠陥評価に関する検討結果をまとめると、以下のようである。

(1) 伝播速度は、測定者が異なっても、一定の装置および方法で測定すれば、再現性のあるものとなるが、印加電圧が高く、放電時間が短い装置ほど、またこれらが一定の装置では、振動子の共振振動数が大きいほど、早く測定される。また飽和増幅方式による伝播時間計測装置を用いた伝播速度は、受振波形観察方式よりも遅くなる。したがって、特性の異なる装置で測定した伝播速度の直接比較およびコンクリートの品質比較は困難と思われる。

(2) 部材の伝播速度は上層から下層方向に増加する。増加程度はコンクリートの配合、スランブおよび締固め方法によって異なり、締固め時間が短いと、上下に大きく変動し、上・下層の速度差も小さくなる。速度分布の形状は、装置特性および測定者が異なっても、ほぼ一定であり、速度分布から内部欠陥の評価が可能である。

(3) 厚さ20 cmの部材中の10 cm角の板状空隙による伝播速度の低下は明瞭であるが、部材厚さが大きくなると、空隙による速度低下は少なくなり、厚さ60 cmではほとんど低下しない。内部空隙による伝播速度低下が10%程度以上であれば、伝播速度分布からその大きさをほぼ推定できるが、骨材が接触していて完全な空隙になっていない内部豆板探査は困難と思われる。

(4) 一構造部材での伝播速度は正規分布となり、伝播速度が $\bar{V} - \sigma$ (\bar{V} : 平均値、 σ : 標準偏差) 以下の部分に内部空隙が存在すると思われる。

最後に、実構造物規模の供試体による検討は、土木学会コンクリート委員会コンクリート調査企画小委員会評価検討WGの一環として実施した広範な実験のうち、超音波法に関する一部を取りまとめたものである。各データの取りまとめができ次第、報告する予定である。

本WG実験での供試体の作製にあたっては、村本建設(株)の各位に全面的な協力を得るとともに、測定には(株)国際建設技術研究所葛目と宏氏の協力を得た。さらに実験の遂行にあたっては、若手コンクリート研究会の諸氏(京都大学井上晋、村本建設(株)久米生泰、明石工業高等専門学校角田忍、大阪市立大学眞嶋光保、大阪府立大学石黒覚、神戸大学森川英典、近畿大学川東龍夫、立命館大学高木宣章、新日本製鐵小門武、(株)JR西日本コンサルタント北後征夫、近畿コンクリート(株)岩瀬勲)の絶大なる御協力を得た。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 明石外世樹: コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集V、No.390/V-8、pp.1-22、1988.2
- 2) 日本非破壊検査協会調査報告書: 非破壊評価の標準化に関する調査研究、pp.292-311、1990.3
- 3) 神田衛、吉田八郎: コンクリート打込み後の柱断面における水セメント比の分布性状、セメント技術年報、29巻、pp.226-231、1975
- 4) Chung, H.W. and K.S. Law: Diagnosing in Site Concrete by Ultrasonic Pulse Technique, Concrete International, pp.42-49, Oct.1983
- 5) 岡田 清、六車 照: コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.520-530、1981