

論文 超音波法による構造物コンクリートの強度、緻密性の推定

森濱 和正^{*1}・野田 一弘^{*2}・田中 秀治^{*3}・河野 広隆^{*4}

要旨：構造物のコンクリート品質を直接評価する方法の確立を目的に、コンクリート表層の緻密性、内部の強度を超音波法によって評価することを試みた。3種類の実構造物を用いて表面からコンクリート内部の音速分布を推定し、その音速分布を用いることにより表層の緻密性、内部の強度を推定できる可能性があることを示した。

キーワード：非破壊試験、コンクリート、超音波、音速分布、強度推定、緻密性

1. まえがき

コンクリート構造物の耐久性が問題になっている。コンクリート構造物の寿命を確保するには、新設時にその構造物が所要の品質を有しているかどうかを確認しておくことが重要である。そのため、筆者らは新設構造物の品質を非破壊試験により直接検査することを検討している¹⁾。今回、実際の構造物を使って超音波法による圧縮強度、表層の緻密性の評価を行なったので、その評価方法および結果を報告する。

2. 超音波法による評価方法の概要¹⁾

新設コンクリート構造物の表層は炭酸ガスや塩化物イオンが浸透・拡散するなど耐久性の確保にとって重要である。ところが、表層の品質は、早くから乾燥にさらされるために通常は内部より品質が劣る傾向がある。そのため、構造物の耐久性が確保されているかどうかを確認する方法として表層の緻密性が評価できるとよい。また、表層は乾燥の程度により品質が変化しやすい。そのため、シュミットハンマなどにより表層で強度を評価することは、安全側の評価になるかもしれないが、構造物を適切に評価することにはならないと考えられる。このようなことから、表層と内部に分け、耐久性に重要

な役割を果たす表層では緻密性を、内部の安定した品質の部分では強度を評価することが肝要であると考えている。

評価方法は、以下に示すとおりコンクリート内部の音速分布を推定することによって行なおうとするものである。

2.1 コンクリート内部の音速分布推定方法

緻密性、強度の評価に用いるコンクリート内部の音速分布は、表面走査法によって伝搬時間を測定し、変分法によって伝搬経路を求めることによって推定する。表面走査法とは、同一平面上で探触子間隔を変化させながら伝搬時間を測定する方法である。一般にコンクリート表面は内部より品質が劣っているため、音速は表面が遅く内部が速い。そのため、表面に設置した探触子間の超音波の最速経路はコンクリート内部を湾曲しながら伝搬するものと仮定して音速分布を求める。詳細は文献2), 3) をご覧いただきたい。なお、表面走査法による探触子間隔は、文献4) によって間隔に応じて補正している。

2.2 表層の緻密性の評価方法

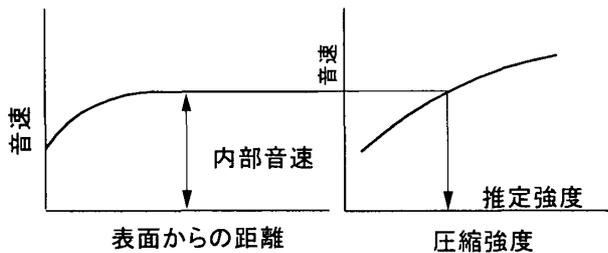
内部の音速分布を推定すると、通常は表面は遅く内部ほど速くなり、しだいにほぼ一定音速になる(図-1(a))。表層の音速が変化している部分は、表層の品質を現しているものと考えら

*1 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 (正会員)

*2 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 工修 (正会員)

*3 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 工修 (正会員)

*4 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修 (正会員)



(a) 内部の推定音速分布 (b) 音速と強度の関係
図-1 コンクリート内部の音速分布と強度推定

れることから、今回はコアを採取し、コアを薄く輪切りにして個々の吸水率を求め、音速分布と比較することによって表層の緻密性が評価できるかどうかを検討した。

2.3 強度の評価方法

圧縮強度は図-1 (a) の一定となった部分の音速 (以下、推定した「内部一定音速」と呼ぶ) を用いて推定する。図-1 (b) の圧縮強度と音速の関係は次のように求める。コンクリート打設時に圧縮強度試験用の円柱供試体を作製し、構造物のコンクリート内部の状態に近づけるために封かん養生する。円柱供試体の、長手方向を透過法によって音速を測定の後、圧縮強度試験を行ない、両者の関係を求める。

構造物を調査する材齢は、施工条件などの制約を受けるため、28日基準材齢のときに調査を

実施することは難しい。調査材齢が異なっても28日強度が得られるように、次のように補正することを考えた。

強度発現は、式(1)の双曲線関数と仮定する。

$$f_{ct} = t / (1/a + t/b) \tag{1}$$

ここに、 f_{ct} : 材齢 t 日の圧縮強度、 a : $t = 0$ の時の接線勾配、 b : 最終($t = \infty$)到達強度を表わす係数。

材齢 t 日の強度を28日強度 f_{c28} に補正するために、式(1)の右辺の分子、分母に f_{c28} を掛けることによって式(2)を得る。

$$f_{c28} = f_{ct}(\alpha + \beta \cdot t) / t \tag{2}$$

ただし、 $\alpha = f_{c28}/a$, $\beta = f_{c28}/b$ 。

係数 α , β を求めることによって、式(2)で材齢 t 日の強度を28日強度に補正できる。

3. 調査した構造物と調査方法の概要

調査した構造物は表-1の3構造物である。調査位置、調査箇所数も表中に示す。用いられたコンクリートの配合は表-2のとおりである。

調査は、コンクリート打設時には、調査位置付近のコンクリートを採取してスランプ、空気量の測定と、圧縮強度用の円柱供試体を作製した。円柱供試体は、主に封かん養生を行ない、一部は水中養生や簡易断熱養生も行なった。圧

表-1 調査した構造物の概要と調査位置

| 名称 | 構造物 | | 幅*高さ*奥行 | 調査面 | 調査位置・箇所数 |
|----|-----|----|---------------------------------|-----|---|
| HK | 擁壁 | 底版 | 15.0*(1.2~1.0) *前趾(3.0~2.0)m | 打設面 | 15mの擁壁13体の内4,6,7,11,13番の5体 前趾(擁壁前面の底版の出っ張り)の打設面中央1箇所ずつ |
| | | | | 側面 | 高さ1.6mを40cmずつ4層を左右に分けて打設 2層目(下),3層目(中),4層目(上)の左右6箇所 |
| TH | 橋台 | 底版 | 15.4*1.6*8.0m | 打設面 | 右・上1箇所 |
| | | | | 背面 | 高さ1.9mを約60cmずつ3層に分けて打設 |
| CM | 橋台 | 底版 | 9.5*1.9*7.0m | 前面 | 背面(FA),前面の左右(FB,FC)の上,中,下9箇所 |
| | | | | 打設面 | FAの上(FD)1箇所 |
| | | 壁 | 9.5*4.7*1.0m | 背面 | 左,中央,右(WA,WB,WC)の上,下6箇所 |

表-2 コンクリートの配合

| 名称 | セメントの種類 | 呼び強度 | 粗骨材最大寸法(mm) | スランプ(cm) | 空気量(%) | 水セメント比(%) | 細骨材率(%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|----|---------|------|-------------|----------|--------|-----------|---------|--------------------------|------|------|-----|-------|------|
| | | | | | | | | 水 | セメント | 粗骨材 | 細骨材 | 混和剤 | |
| | | | | | | | | AE減水 | AE | | | | |
| HK | 高炉B種 | 24 | 40 | 8 | 4.5 | 47.4 | 39.2 | 144 | 304 | 1138 | 723 | 0.121 | — |
| TH | 普通ポルト | 24 | 25 | 8 | 4.5 | 53.1 | 44.9 | 159 | 300 | 1031 | 813 | 4.2 | — |
| CM | 高炉B種 | 24 | 20 | 8 | 4.5 | 52.6 | 46.7 | 162 | 308 | 1033 | 827 | 4.03 | 2.37 |

縮強度試験前には円柱供試体の長手方向を透過法により音速を測定した。

構造物の超音波測定、コア採取する材齢は、主としてコンクリート打設後4週程度とした。ただし、HKは材齢の影響についても検討するために、5週とその前後2材齢ずつについても調査した。CMの壁は、調査の都合上、材齢10日での調査となった。

超音波の表面走査法による測定は、探触子間隔を300mmまでは50mmずつ、1000mmまでは100mmずつ増加させていった。

そのあとコアを採取した。コアは、直径が約100mmの「標準コア」と、25mmの「小径コア」である。コアはラップで包んで封かんし、数日後に圧縮強度試験を行なった。1箇所当りの超音波測定回数およびコア採取本数、測定材齢は表-3のとおりである。

表-3 調査材齢，1箇所当りの調査回数

| 名称 | 測定位置 | 超音波 | | 試験材齢，コア本数 | | |
|----|-------|-------|----|-----------|------|------|
| | | 材齢(日) | 回数 | 材齢(日) | 標準コア | 小径コア |
| HK | 打設面 | 4番 | 3 | 50 | 1 | 3 |
| | | 6番 | 3 | 43 | 1 | 3 |
| | | 7番 | 3 | 83 | 1 | 3 |
| | | 11番 | 3 | 27 | 1 | 3 |
| | | 13番 | 3 | 20 | 1 | 3 |
| TH | 側面 | 25 | 1 | 30 | 1 | 3 |
| | 打設面 | | 1 | | — | 3 |
| CM | 背面・前面 | 29 | 2 | 33 | 1 | 2 |
| | 打設面 | | 2 | | — | 3 |
| | 壁・背面 | 9 | 1 | 12 | — | 1 |

標準コアは長さ300mm程度採取し、コアの側面から透過法により直径方向の音速(以下、コアの「側面透過音速」と呼ぶ)を、表面から100mmまでは10mmピッチ、それより内部では50mmピッチで測定した。そのあと表面から100mmで切断し、表層部分は10mm程度ずつ輪切りにして吸水率を求めた。吸水、乾燥はそれぞれ48時間以上である。表面から100～300mmの部分は圧縮強度試験を行なった。

4. 調査結果

4.1 コンクリート打設時に作製した円柱供

試体の圧縮強度

コンクリート打設時に作製した円柱供試体の圧縮強度と材齢、圧縮強度(封かん養生)と音速の関係は図-2および3のとおりであった。強度の平均値、標準偏差、変動係数を表-4に示す。水中養生強度は3構造物とも約30N/mm²である。封かん養生強度は、THとCMは水中養生強度とほぼ同じであるが、HKの封かん養生強度はかなり小さい。その原因は、封かん養生が完全ではなかったと考えられ、強度試験時に開いてみるとかなり乾燥していた。

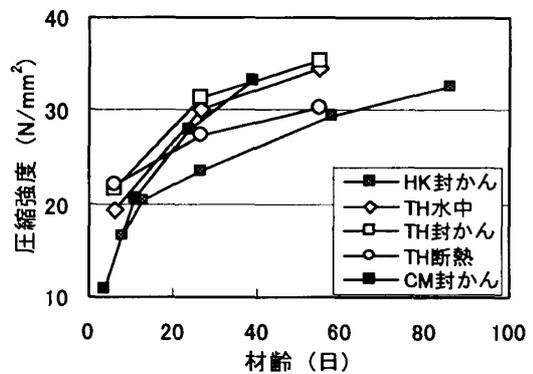


図-2 円柱供試体の圧縮強度と材齢の関係

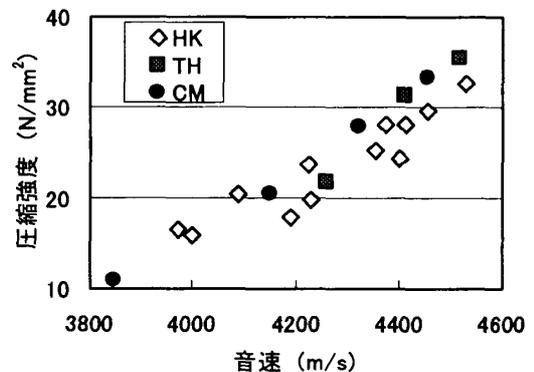


図-3 円柱供試体の圧縮強度と音速の関係

材齢と圧縮強度の関係から式(2)の係数 α 、 β を求めると表-5のようになった。封かん養生は3構造物とも α は7台、 β は0.7台であり、平均すると $\alpha=7.3$ 、 $\beta=0.74$ となった。

図-3の圧縮強度 f_c と音速 V の関係を指数関数によって回帰すると次のようになった。

$$HK \quad f_c = 0.119e^{0.00123V} \quad (r=0.941) \quad (3)$$

$$TH \quad f_c = 0.00571e^{0.00194V} \quad (r=0.981) \quad (4)$$

表-4 円柱供試体の圧縮強度試験結果

| 名称 | 養生方法 | 材齢 (日) | 試験回数 | 圧縮強度(N/mm ²) | | |
|----|------|--------|------|--------------------------|------|----------|
| | | | | 平均 | 標準偏差 | 変動係数 (%) |
| HK | 封かん | 28 | 3 | 22.9 | 2.34 | 10.3 |
| | | 7 | 5 | 17.5 | 1.04 | 6.0 |
| | 水中 | 28 | 5 | 28.6 | 1.10 | 3.8 |
| TH | 封かん | 28 | 6 | 30.5 | 1.84 | 6.0 |
| | 水中 | | 1 | 30.0 | — | — |
| CM | 封かん | 24 | 8 | 29.7 | 1.82 | 6.2 |
| | 水中 | | 1 | 30.8 | — | — |

表-5 係数 α , β

| 名称 | 採取位置 | 養生方法 | α | β | |
|-------|------|------|----------|---------|-------|
| HK | 6番 | 封かん | 8.95 | 0.680 | |
| | 10番 | | 6.64 | 0.763 | |
| | 11番 | | 5.67 | 0.798 | |
| | 3回合せ | | 7.02 | 0.749 | |
| TH | 中 右 | 封かん | 7.65 | 0.727 | |
| | | 水中 | 4.85 | 0.827 | |
| | | 簡易断熱 | 2.28 | 0.919 | |
| CM | FA | 中 | 封かん | 7.20 | 0.743 |
| 3構造平均 | | | 封かん | 7.29 | 0.740 |

CM $f_c = 0.00857e^{0.00186V} (r=0.996)(5)$

4.2 音速分布の解析結果

表面走査法による探触子間隔と「見かけの音速」の関係の一例(構造物 CM の底版と壁)を図-4に示す。「見かけの音速」とは、単に探触子間隔を伝搬時間で除した値である。探触子間隔が広がるに従い見かけの音速は速くなり、間隔200~400mm 程度からはほぼ一定値になっている。同じ配合のコンクリートでも調査材齢や位置が異なるとほぼ一定となる部分の音速も異なり、FA・上は3900m/s、FD(打設面)は4050m/s、WA・上は3760m/s、下は3940m/sである。

内部の音速分布を推定した結果は図-5のようになった。比較のために図中にコアの側面透過

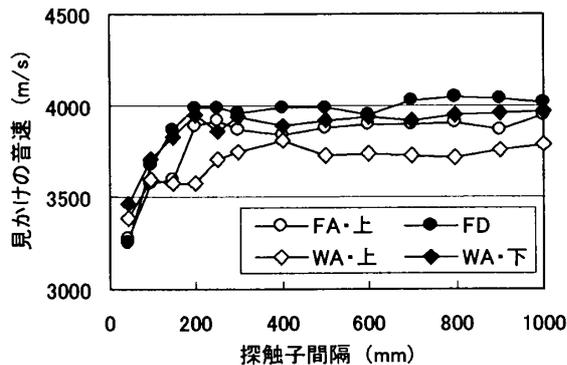


図-4 見かけの音速の一例 (CM)

音速も示している。推定した音速分布とコアの側面透過音速を比較すると、表層の音速が変化している部分は両者がほぼ一致している。また、推定した内部一定音速はコアの側面透過音速の最大値はほぼ一致しており、音速推定方法はほぼ妥当と考えられる。

図-4の見かけの音速の一定音速部分に対し、推定した内部一定音速は FA・上は 4314m/s、FD(打設面)は 4433m/s、WA・上は 4099m/s、下は 4261m/s である。推定結果と比較して見かけの音速は 300 ~ 400m/s 程度遅くなっている。見かけの音速は、コアの表面付近の側面透過音速よりも遅く、実際の構造物の場合も音速分布推定の仮定のとおりコンクリートの正確な音速を現しているとはいえず、コンクリート品質の絶

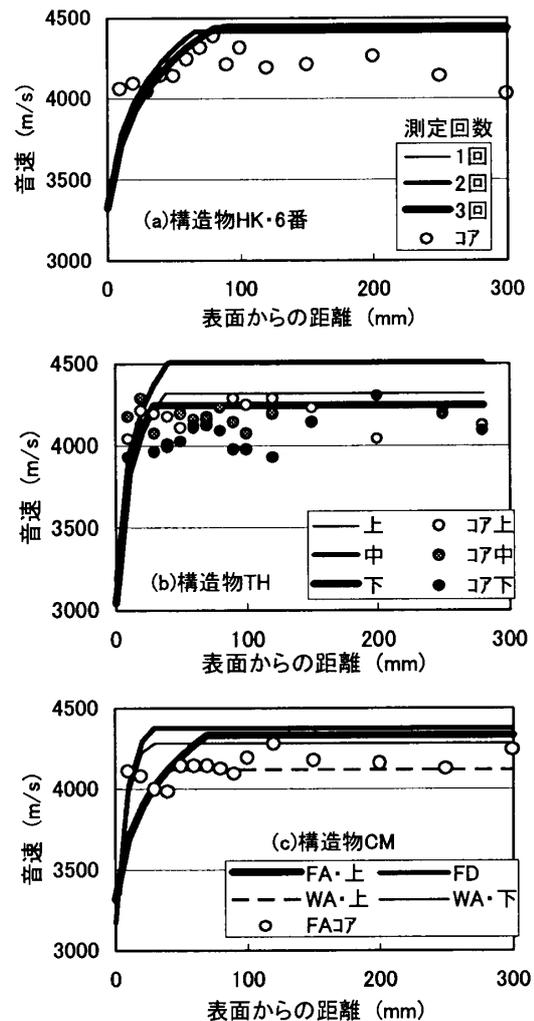


図-5 推定した音速分布 (コアの側面透過音速との比較)

対値の評価には使えないことがわかる。

4.3 コアの圧縮強度，吸水率試験結果

標準コアの圧縮強度を式(2)によって係数 $\alpha = 7.3$, $\beta = 0.74$ (表-5 の平均値)で補正した結果を表-6に示す。標準コア強度は、表-4の水中あるいは封かん養生強度と比較して HK, TH はほぼ同じ, CM は多少大きくなっている。通常, コア強度は水中強度より小さくなる場合が多い。しかし, 今回は強度試験を行なった位置が表面から 100 ~ 300mm であり, 表層の品質の劣っていると考えられる部分を含んでいなかったことがその理由の一つと考えられる。

表-6 コア強度(材齢補正)

| 名称 | 回数 | 平均 N/mm ² | 標準偏差 N/mm ² | 変動係数 % |
|----|----|-------------------------|---------------------------|-----------|
| HK | 5 | 29.7 | 2.00 | 6.7 |
| YH | 6 | 30.4 | 3.01 | 9.9 |
| CM | 9 | 34.0 | 2.39 | 7.0 |
| 合計 | 20 | 31.8 | 3.17 | 10.0 |

コアを薄く輪切りして求めた吸水率は、図-6のように HK と TH は内部ほど小さくなる傾向がある。CM も表面から 20 ~ 40mm は小さくなる傾向があるが、それより内部は大きくなる傾向がある。いずれにしても、傾向が異なる 3 箇所(TH の黒四角, CM の白丸, 灰色丸)を除くと、表面から 20 ~ 40mm の部分は、表面に近いほど吸水率は大きくなっている。

同じ表面からの距離のときの吸水率の範囲は、傾向が異なる上記の3箇所を除くと、HK は1%程度, TH は約0.7%に対し CM は2%程度もある。

5. コンクリートの品質評価結果

5.1 強度評価

推定した内部一定音速から式(3)~(5)を用いて強度を推定し、式(2)によって28日強度に補正した結果は表-7のとおりであった。音速による推定強度とコア強度の関係を図-7に示す。コア強度に対して推定強度のバラツキは大きくなっているが、平均値はコア強度とはほぼ一致し

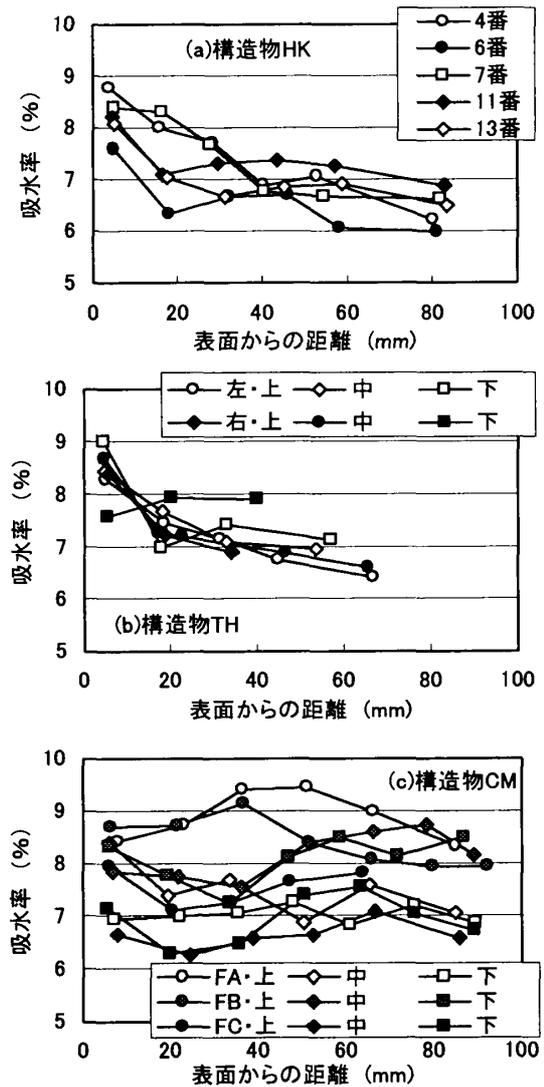


図-6 吸水率分布

表-7 超音波による強度推定結果(材齢補正)

| 名称 | 回数 | 平均 N/mm ² | 標準偏差 N/mm ² | 変動係数 % |
|-------|----|-------------------------|---------------------------|-----------|
| HK | 5 | 25.0 | 2.73 | 10.9 |
| TH | 7 | 34.1 | 6.82 | 20.0 |
| CM | 12 | 34.7 | 5.85 | 16.8 |
| TH・CM | 19 | 34.5 | 6.24 | 18.1 |

ている。この結果より、超音波を用いた今回の方法によって強度を推定できる可能性がある。

5.2 表層の緻密性評価

図-6の吸水率分布と図-5の音速分布から、吸水率を測定した位置の音速を求め、両者の関係を示したのが図-8である。ここでも、傾向の異なる3箇所(THの黒四角, CMの白丸, 灰色丸)を除くと、HKとTHは吸水率が小さく

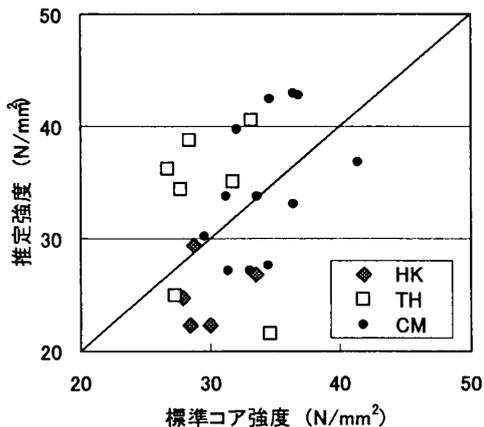


図-7 推定強度とコア強度の比較

なると音速は速くなる傾向を示している。CMも音速 4200m/s 以下は、図-5より表面から 20～40mm 程度に相当する部分であり、この範囲では吸水率が小さくなると音速は速くなる傾向を示している。

また、同じ音速のときの吸水率の範囲は、上記の傾向が異なる3箇所の結果を除くと、いずれも1%程度であり、図-7の吸水率の範囲と比較すると、THはわずかに広がっているが、HKはほぼ同じ、CMは約1/2になっている。

これらの結果より、提案している方法で音速分布を求めることにより表層の緻密性も評価できる可能性がある。

6. まとめ

超音波を用いて表面走査法により伝搬時間を測定して内部の音速分布を求め、強度と表層の緻密性を評価できる可能性を示した。今後もデータを蓄積し、信頼性を高めていく予定である。特に緻密性については、耐久性との関係を明らかにしていきたいと考えている。

本研究は、土木研究所と(社)日本非破壊検査協会、ソフトコアリング研究会の共同研究で実施したものである。

最後に、国土交通省北海道開発局釧路道路事務所、東北地方整備局福島工事事務所、中国地方整備局松江国道工事事務所にご協力いただいたことに感謝いたします。

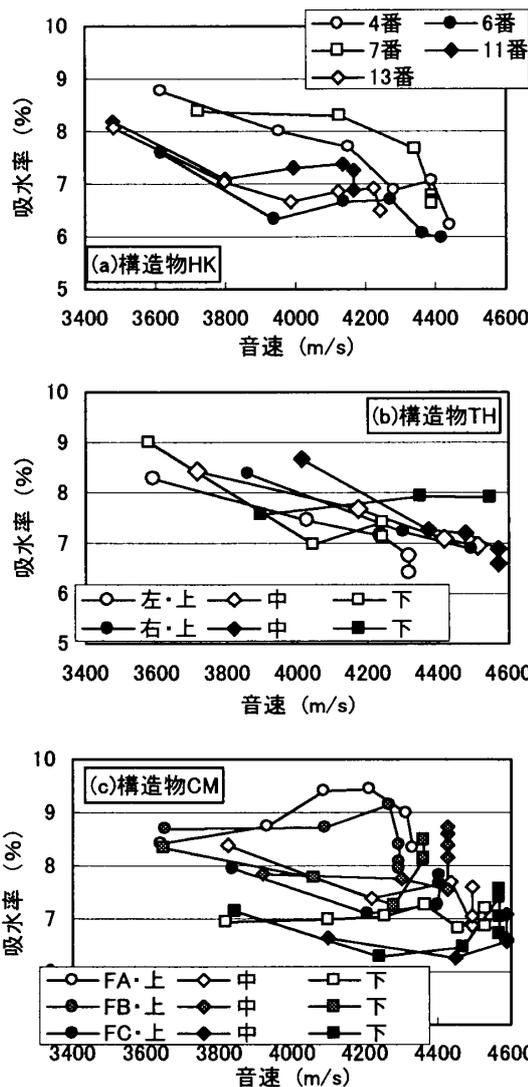


図-8 推定音速分布と吸水率の関係

参考文献

- 1) 森濱和正, 富士岳, 小林幸一, 西山直洋: 非破壊試験によるコンクリート品質, 部材厚さ, かぶり厚さの検査方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.511-516, 2001.7
- 2) 森濱和正, 笠井芳夫, 山口哲夫: 超音波によるコンクリート版内の最速経路の予測と版厚測定に関する研究, 非破壊検査, Vol. 48, No. 5, pp. 294-302, 1999. 5
- 3) 森濱和正: 超音波法によるコンクリート構造物検査方法の提案—コンクリートの品質, 部材厚さ, 鉄筋かぶり・径の推定—, 土木技術資料, Vol.43, No.7, pp.64-69, 2001.7
- 4) 森濱和正ほか: 非破壊試験によるコンクリート品質, 厚さ, 鉄筋の計測に関する研究 その8 超音波による表面伝播時間の測定における探触子の影響, 日本非破壊検査協会平成12年秋季大会講演概要集, pp. 259-260, 2000. 11