

報告 超音波法（土研法）による構造体コンクリート強度の推定精度

森濱 和正^{*1}

要旨：構造体コンクリートの強度を、超音波法（土研法）を用いて推定した。要因は、構造物・部材、コンクリートの種類、測定材齢などである。これらの要因と強度推定精度の関係について検討した。その結果、土研法は概ねコア強度に対して±15%程度で推定できていることが明らかになった。ただし、構造体を測定する材齢が初期、長期の場合、強度推定精度が低下する場合があります、測定材齢を制限することが望ましい。

キーワード：非破壊試験、構造体コンクリート、超音波法、強度推定、推定精度

1. はじめに

構造体コンクリートにおいて、コンクリート強度は最も基本的な検査項目の一つである。これまで構造体コンクリートの強度を求めるには、コアによる強度試験しかなかった。最近、リバウンドハンマが構造体コンクリート強度の管理に用いられている^{1), 2), 3)}。しかし、前者は構造体に損傷を与える、後者は強度推定精度に問題があるなど、強度検査に取り入れるまでには至っていない。

筆者らは、非破壊・微破壊試験による推定精度の高い試験方法を新設構造物の検査に取り入れること、また、強度推定だけでなく耐久性も評価できる方法であり、継続して測定することにより維持管理にも適用できる方法の研究を行ってきた^{4), 5), 6), 7), 8)}。

そのような試験方法で実用性の可能性が高い方法として、非破壊試験では超音波法（土研法）⁴⁾、衝撃弾性波法によるiTECS法⁵⁾と表面2点法⁶⁾の3種類の方法を、微破壊試験ではボス供試体⁷⁾と小径コア⁸⁾の2種類の方法、合計5種類の方法を用いることを提案している。

これらの方法は、2006年より国土交通省の橋梁構造物の管理・検査に試行的に適用されており^{9), 10)}、現在、試行箇所の一部の構造物で強度推定精度の確認を行っている。5種類の試験方法の内、超音波法（土研法）による強度推定精度の検討結果を報告する。

2. 構造体コンクリート強度

構造体コンクリート強度といっても試験方法、試験位置などによって異なった強度が得られることが知られており、まず、本文で用いている構造体コンクリート強度を定義する。

これまで、構造体コンクリート強度は、JIS A 1107によりφ100mm コアの強度試験結果で代表させていることが多いことから、ここでもφ100mm コアによる強度を構造体コンクリート強度とする。ただしJIS A 1107は、採取したコアを試験のときまで40時間以上水中に漬けておくことになっているが、構造体の置かれている環境

条件を考慮し、採取した状態で強度試験を行なったときの強度を構造体コンクリート強度としている。

3. 超音波法（土研法）の概要

3.1 強度推定原理

構造体コンクリート強度の推定は、コンクリートの強度と音速には高い相関関係があることを利用している。強度推定には、(1)構造体コンクリートの音速測定方法、(2)強度と音速の関係を表す強度推定式が必要である。

(1) 構造体コンクリートの音速測定方法

土研法の特長は、構造体コンクリートの音速測定方法にある。コンクリート表層の品質は、一般には内部より劣っていることが知られている。そのため、コンクリート内部の音速は図-1(a)のように、表層の音速が遅く、内部になるに従って速くなり、ある距離からほぼ一定になっている。このような場合、同一平面に設置した探触子間の超音波の最速伝搬経路は、図-1(b)のようにコンクリート内部を湾曲する。このような伝搬特性からコンクリート内部の音速分布を推定し、強度推定に用いている。

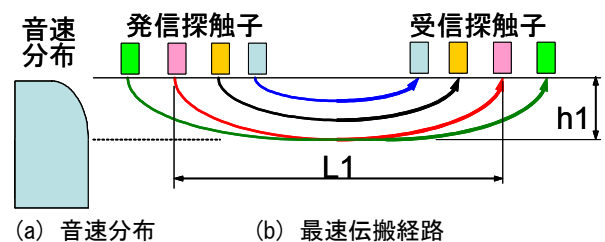


図-1 表面走査法による最速伝搬経路

(2) 強度推定式

強度推定式は、円柱供試体を用いて音速を測定したあと強度試験を行い、両者の関係から求める。ただし、構造体コンクリートの音速は、内部の音速を用いることから、円柱供試体は構造体内部の含水状態を想定し、封かん養生した供試体を用いることにしている。

^{*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 総括主任研究員（正会員）

以下に、構造体コンクリート内部の音速分布の推定方法、強度推定方法と、検査に用いるにあたっては決まった材齢（基準材齢と呼ぶ）の強度を推定する必要があることから、測定材齢時の強度を基準材齢の強度に補正する方法の概要を説明する。

3.2 音速分布推定方法の概要

強度推定に用いる構造体コンクリート内部の音速分布を推定する方法は、次のとおりである。詳細については文献 4)を参照いただきたい。

- 表面走査法（図-1(b)）によって探触子間隔ごとの伝搬時間 t を測定する。表面走査法とは、図-1(b)のように同一平面上に探触子を配置し、間隔を変化させながら伝搬時間を測定する方法である。
- 音速分布を図-2 のように仮定すると、変分法を用いることによってコンクリート内を伝搬する最速伝搬経路を図-3 のように求めることができる。
- b.によって求めた最速伝搬経路を伝搬する時間 t_{cal} を次のように計算する（図-3）。仮定した音速分布（図-2）が与えられており、そのときの伝搬経路は b. で求められているので、伝搬経路の微小な区間を伝搬する時間は $ds/v(x)$ となり、全伝搬経路を伝搬する時間は式 (1) によって求めることができる。

$$\frac{t_{cal}}{2} = \int_{ho}^{ho+h} \frac{ds}{v(x)} \quad (1)$$

- 音速分布を変化させて伝搬時間の計算値 t_{cal} を繰返し求め、 t_{cal} が測定した伝搬時間 t の最尤値となるときが、求ようとしている音速分布である。

音速分布を求めるには a.~d. の手順以外にも、表面走査法を用いるにあたって探触子間隔を補正する必要がある。あるいは、音速分布はコンクリート表面からある程度内部になると図-1 または図-2 のように音速はほぼ一定になる位置 $h1$ があり、そのときの探触子間隔 $L1$ が必要となる。これらの位置を推定する方法なども必要であり、これらについても文献 4)を参照されたい。

3.3 強度推定方法

上記方法により図-4(a)のような音速分布が得られる。表層の音速が変化している部分は、コンクリートの品質（緻密性）の変化を表しているものと考えられ、その評価にも使用できる可能性があるものと考えている¹¹⁾が、そのことについては割愛する。圧縮強度は、図-4(a)の一定となった部分の音速（内部一定音速と呼ぶ）を用い、図-4(b)の圧縮強度と音速の関係（強度推定式）にその音速を代入することによって推定する。

図-4(b)の強度と音速の関係は、次の方法によって求める。コンクリートの試験練り時などに圧縮強度試験用の円柱供試体を作製し、封かん養生を行う。所定の材齢

で強度試験を行うが、その前に円柱供試体の軸方向の音速を透過法によって測定し、強度と音速の関係を求める。

強度を推定するために、なぜ内部一定音速を用いるのか、なぜ強度と音速の関係を封かん養生した円柱供試体で求めるのかについては、次の理由による。コンクリート内部の含水状態は、表層は乾湿の影響を受けるが、数 10mm 内部はほぼ封かんと同じ状態であり、含水率はほぼ一定している¹²⁾。このようなことから内部の音速を用いることにより、表層の含水率の違いによる音速の変化を考える必要がなくなり、一定条件の下で強度を推定することができるものと考えている。

3.4 材齢補正

構造物を超音波で測定する材齢は、施工条件などの制約を受けるため、基準材齢（通常、28 日）のときに測定

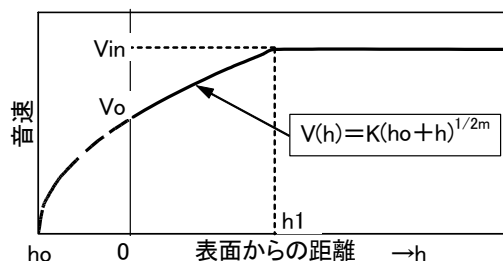
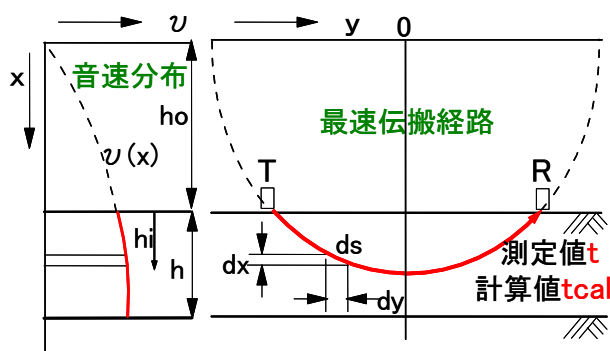
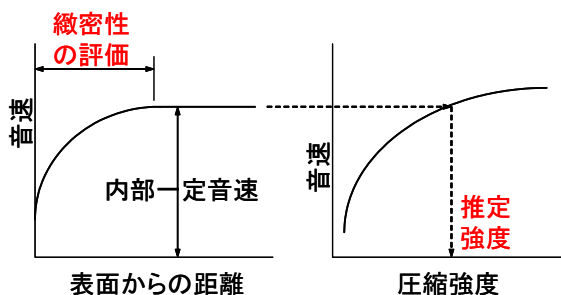


図-2 音速分布の仮定



(a) 音速分布 (b) 最速伝搬経路

図-3 最速伝搬経路の推定方法



(a) 音速分布 (b) 強度と音速の関係

図-4 強度、表層の緻密性の推定方法

を実施することは難しい。測定材齢が異なっても基準材齢強度が得られるように、次のように補正する。

強度発現は、式(2)の双曲線関数と仮定する¹³⁾。

$$f_{ct} = t / (1/a + t/b) \quad (2)$$

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。

測定材齢 t 日の強度 f_{ct} を基準材齢 (t_d 日) 強度 f_{ctd} に補正するために、式(2)の右辺の分子、分母に f_{ctd} を掛けることによって式(3)を得る。

$$f_{ctd} = f_{ct} \cdot (\alpha + \beta \cdot t) / t \quad (3)$$

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

係数 α 、 β を求めることによって、式(3)で材齢 t 日の強度を基準材齢強度 f_{ctd} に補正できる。この方法により、任意材齢の強度を推定することができる。

4. 構造物の概要と実験概要

4.1 構造物の概要

実験に用いた構造物は、表-1 のような橋梁上部工・下部工、ボックスカルバートの 9 構造物である。構成されている部材は、柱、壁、スラブ、フーチングである。部材寸法、コンクリートの種類、打込み時期、養生方法、土研法による測定時期、推定強度の精度を検討するためのコア強度試験材齢も表-1 に示している。

4.2 実験概要

(1) 強度推定式の作成

構造物のコンクリート打込み時にコンクリート試料を採取して円柱供試体を作製し、封かん養生を行なった。

材齢 1 週、2 週、4 週、8 週、13 週時に、円柱の長手方向を透過法によって音速を測定し、そのあとで強度試験を行なった。音速と強度の関係を指数関数によって帰することにより強度推定式を作成する。

表-1 構造物、測定の概要

構造物		部材		部材寸法 (m)		数量	コンクリートの種類*	打設時期	養生方法	超音波	コア強度	
記号	構造物	部材	記号	幅×高さ×奥行・厚さ	脱型材齢				測定材齢	試験材齢		
L	橋梁下部工	柱	C	2.5×約10×2.2	3基	N30	秋	約1月散水	3～20日	28日		
		フーチング	F	23×2.8×12.35		BB27		約1月水中	28日	28日		
M	橋梁上部工	主桁ウエップ	B	9.1×1.9×71.4	3径間	H36	冬	端面1日、側面3日	4日	28日		
	橋梁下部工	垂直材	W	10×8.5×0.5	1基			14日	20日	28日		
		フーチング	F	10×3.25×2.07				54日	62日			
N	橋梁上部工	主桁ウエップ	B	8.7×1.5×35.1	2径間	H36	冬	端面1日、側面9日	10日	7日		
P	橋梁下部工	フーチング	F	6×1.5×5	1基	BB24	冬	7日	14日	28日		
Q	橋梁下部工	パラペット	スラブ	PS	10×0.5×1.2	1基	BB27	冬	14日	25日	28日	
			壁	PW	10×0.7×2.8							
		壁	W	10×1.2×1.8	7日				47日	50日		
			フーチング	F							10×1.5×5	14日
R	橋梁上部工	主桁ウエップ	B	約45×約0.3×約2	3径間	H36	冬	内側1日	35日	36日		
S	橋梁下部工	柱	C	5×5.6×2	2基	BB30	冬	6日	7日	28日		
		フーチング	F	8.5×1.9×6.7		BB27		7日	14日	28日		
V	ボックスカルバート	頂版	S	6.2×0.5×約12	1函体	BB24	秋	14日	20日	28日		
		側壁	W	約12×5.4×0.6				36日	42日	50日		
		底版	S	6.2×0.6×約12								
W	ボックスカルバート	頂版	S	8.1×0.7×約12	1函体	BB24	冬	3日(膜養生剤)	28日	34日		
		側壁	上部	WU				約12×0.8×6.5	秋	16日(膜養生剤)	42日	48日
			下部	WL				8.2×0.9×約12				

* アルファベットはセメントの種類、数字は呼び強度

N：普通ポルトランドセメント、BB：高炉セメント B 種、H：早強ポルトランドセメント

表-2 コンクリートの配合

構造物	部材	セメントの種類	呼び強度	粗骨材の最大寸法	スラブ [°] (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	細骨材	粗骨材	混和剤
L	F	BB	27	20mm	8	4.5	51.5	42.9	153	297	794	1065	3.16
	C	N	30				49.5	42.3	157	318	776	1065	3.39
M	F,V,B	H	36		12		41.6	39.0	163	392	681	1095	4.31
N	B						41.6	39.2	172	414	664	1038	4.14
P	F	BB	24		8		55.0	44.3	156	284	814	1062	3.04
Q	F,W,P	BB	27		8		52.5	44.4	158	301	810	1048	3.01
R	B	H	36		15		41.7	43.8	165	396	766	996	3.76
S	F	BB	27		8		52.0	45.0	161	310	827	1029	3.10
	C		30				48.6	44.2	162	334	801	1032	3.34
V	S,W	BB	24	25mm	8		51.9	41.5	150	289	767	1079	3.47
W	S,W	BB	24		8		55.0	48.4	161	293	889	961	3.81

(2) 土研法による構造体コンクリートの伝搬時間の測定と強度推定

構造体コンクリートを表面走査法によって伝搬時間を測定した位置は、主に高さ、幅の中間付近とした。主桁は、橋軸方向の数箇所を測定した。スラブは側面と打設面を測定した。

表面走査法による測定は、鉄筋に対して 45 度に測線を設定することにより、鉄筋の影響をほとんど受けないようにした⁴⁾。探触子間隔は、300mm までは 50mm ずつ増加させ、1000mm までは 100mm ずつ増加させ、伝搬時間を測定した。

伝搬時間測定結果から 3.2 によって構造体コンクリート内部の音速分布を推定し、3.3 によって強度を推定した。伝搬時間の測定材齢と、強度推定精度を確認するためのコアの強度試験材齢は、表-1 のように異なっているため、強度推定結果を 3.4 の方法によりコアの強度試験材齢時の強度に補正した。

(3) コアによる強度試験

コアによる強度試験は、一部は $\phi 100\text{mm}$ または $\phi 70\text{mm}$ も採取して実施したが、土研法で測定した全箇所については $\phi 25\text{mm}$ の小径コアによる強度試験であり、小径コア強度により土研法の強度推定精度を求めた。

構造体コンクリート強度は 2. で定義したとおり、ここでは $\phi 100\text{mm}$ コア強度である。しかし、強度推定精度の確認は $\phi 25\text{mm}$ の小径コアを用いていることから、小径コア強度は寸法効果を考慮して補正した値を用いている⁸⁾。

5. 土研法による強度推定結果

5.1 構造体コンクリート内部の音速分布の推定結果

土研法による強度推定精度は、コンクリート内部の音速分布の推定精度と強度推定式によって決まる。コンクリート内部の音速分布の推定精度については、構造体コンクリートの音速分布の推定結果と、 $\phi 100\text{mm}$ コアの半径方向を透過法によって測定した音速の関係を比較した。強度推定式は、コンクリートの種類ごとに求める。これらの結果は、構造物 L~Q は文献 15) に、構造物 R および S は文献 17) にすでに報告している。また円柱供試体の強度試験結果も文献 14), 16) に報告している。

ここでは構造物 V および W の音速分布の結果を図-5 に示すとおり、内部の音速分布をほぼ推定できている。

5.2 強度推定式

構造物 V および W の封かん養生した円柱供試体の音速と強度の関係は図-6 のようであった。この関係を指数回帰して強度推定式とした。

5.3 強度推定結果

構造物 V および W のコア強度を図-7 に示す。図-7 は、

$\phi 100\text{mm}$ コア強度と $\phi 25\text{mm}$ 小径コア強度を比較したものである。小径コア強度は、寸法効果の影響を補正した結果である。両者はほぼ一致しており、寸法効果の影響の補正はほぼ妥当と考えられることから、この補正した結果を用いて推定精度の検討を行なった。

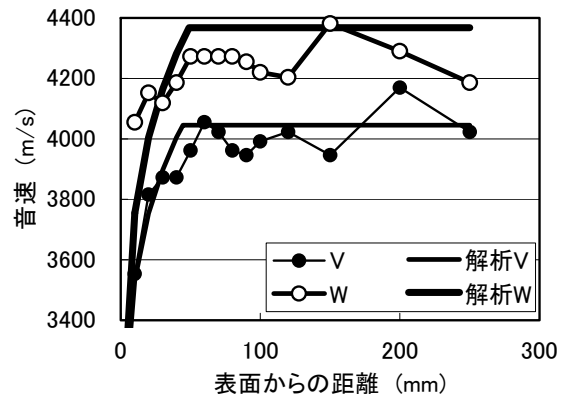


図-5 構造体コンクリート内部の音速分布の推定結果とコアの音速の比較

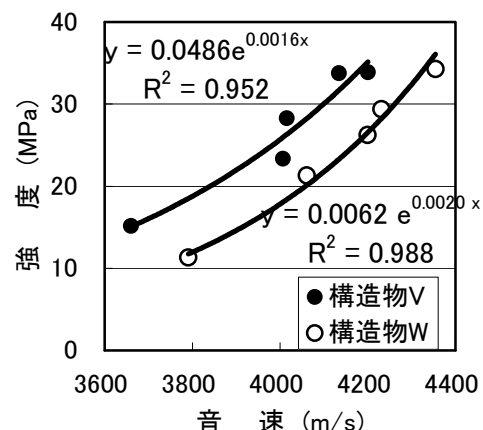


図-6 強度と円柱供試体の音速の関係（強度推定式）

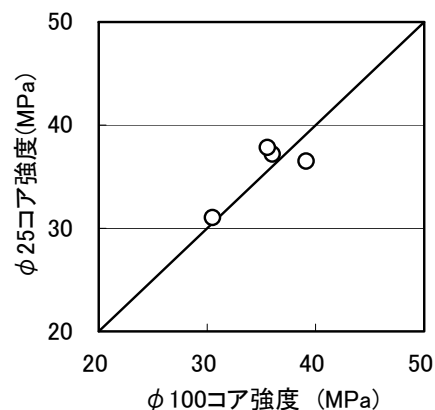


図-7 $\phi 25\text{mm}$ コア強度と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の比較

5.4 強度推定結果

土研法による強度推定結果と小径コア強度の関係は図-8 のとおりとなった。凡例は、表-1 の構造物-部材のアルファベットで示している。プロットした1点は、土研法は2~4回の平均値、小径コアのほとんどは2~4個の平均値である。

図-8 の一点鎖線は、小径コア強度の±15%を示しており、多くの結果は±15%程度で推定できていることがわかる。

ただし、一部の結果はコア強度よりもかなりはずれており、それらの結果について以下で原因を検討した。

5.5 強度推定精度が低い結果の原因

図-8 には、強度推定精度が低いあるいは高い数点について構造物-部材と、構造体の超音波伝搬時間を測定したときのコンクリート打込みからの材齢も示している。

強度を大きく推定しているのは、構造体の測定を初期に行なった場合であり、小さく推定しているのは、長期の材齢で測定した場合であることがわかる。この傾向は、次のように考えることができる。

図-9(a)に円柱供試体の強度発現曲線（太い破線）と構造体コンクリートの強度発現曲線（太い実線）を模式的に示す。円柱供試体に対して構造体コンクリートの体積ははるかに大きいため、水和熱の影響により初期の強度発現は円柱供試体より速くなる。コンクリートの強度発現は、初期が速い場合、長期的に強度の増加は小さくなる傾向があり、図-9(a)のように円柱供試体と構造体の強度発現は逆転する。実際に、以前、大型の供試体から採取したコアの強度発現と、その供試体と同時に作製した円柱供試体の強度発現を測定した結果は、図-10 のように図-9(a)と同じ傾向を示している¹⁸⁾。

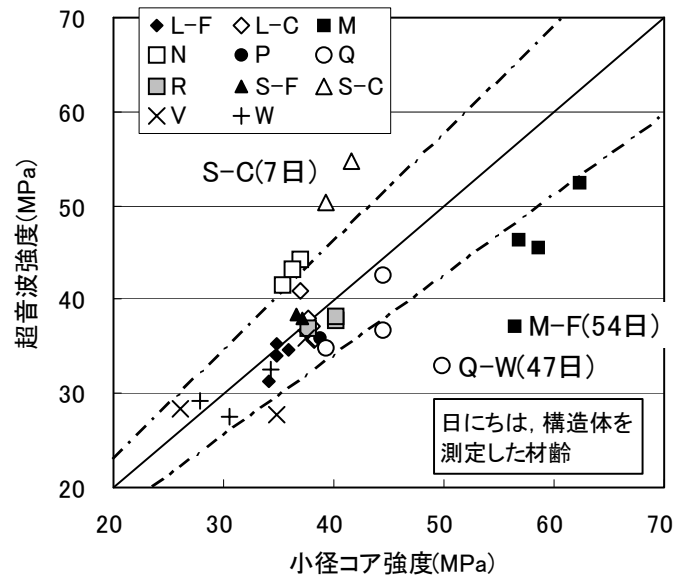


図-8 土研法に強度推定結果と小径コア強度の比較

土研法による強度推定は3.に記述したとおり、構造体コンクリートの内部一定音速を推定し、円柱供試体によって求めた強度推定式にその音速を代入することによって行なう。

そのため、材齢 t_1 のときに構造体コンクリートの伝搬時間を測定し、内部一定音速 V_{t1} を推定する(図-9(b))。このときの強度を f_{ct1} とする。

求めるのは、材齢 t_d のときの構造体の強度 f_{ctd} である。 f_{ct1} から f_{ctd} を推定するには、 f_{ct1} を f_{ctd}/f_{ct1} 倍(図-9の実線の矢印分)すればいいわけだが、構造体の強度がわからないため、土研法では円柱供試体の強度で補正することにしており、そのときの補正は図-9の破線の矢印分になり、補正量が大きくなる。そのため、早期に構造体の超音波伝搬時間を測定すると、基準材齢強度を大きく推定する可能性が高くなる。

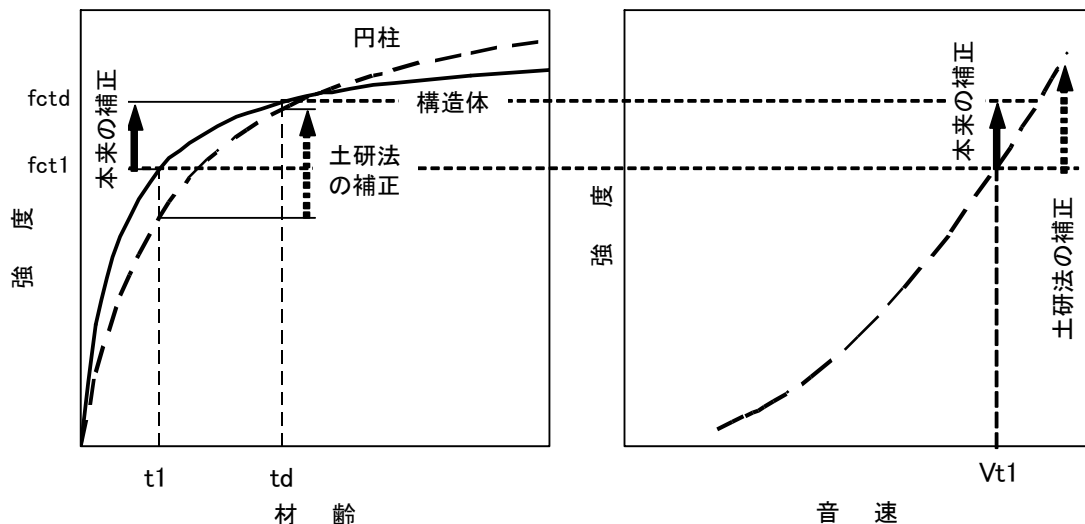


図-9 強度発現の模式図と材齢補正

長期に構造体の超音波伝搬時間を測定する場合、マイナスの補正が大きくなるため、強度を小さく推定する可能性が高くなる。

精度の向上を図るためには、水和熱の影響や構造体の置かれている環境条件などを考慮する必要があると考えられる。しかしながら、構造体についてこれらのことを把握することは事実上不可能である。表-1の構造体の測定材齢とコアの強度試験材齢を見ればわかるとおり、上記のような傾向をすべての位置で示しているわけではないこと、測定材齢が2週～6週程度であれば、推定精度は±15%程度になっていることから、4週強度の推定に限れば、測定はできるだけ2週～6週の範囲で実施することによりある程度の推定精度を確保できるものと考えられる。

6. まとめ

超音波法（土研法）によりさまざまな条件における構造体コンクリート強度の推定を行い、推定精度の検討を行なった。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 多くの推定結果は、コア強度に対して±15%程度以内であった。
- (2) 早期材齢、長期材齢で測定し、強度試験材齢時に補正した推定強度は、精度が低下する場合があった。この対策として、4週強度を推定する場合、測定は2～6週の範囲で行うのがよい。

参考文献

- 1) 国土交通省技術調査課：土木コンクリート構造物の品質確保について、国官技第61号，2001.3.29
- 2) 日本道路公団：コンクリート施工管理要領，pp.47-52，2004.4
- 3) 西日本旅客鉄道：品質管理マニュアル【土木編】，pp. IV 1-1～1-8，2001.6
- 4) 富士岳ほか：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する研究 第1報 実験概要および超音波法、非破壊検査，pp.497-503，2003.9
- 5) 岩野聡史ほか：弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の測定，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.1637-1642，2003.7
- 6) 立見栄司ほか：衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定方法に関する研究—コンクリートの使用材料および調合の違いが弾性波速度に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，No.587，pp.15-21，2005.1
- 7) 袴谷秀幸ほか：ボス供試体による構造体コンクリートの品質管理—圧縮強度、中性化、塩化物イオン量—、非破壊検査、Vol.55，No.1，pp.10-15，2006.1
- 8) 寺田謙一ほか：小径コアによる構造体コンクリート強

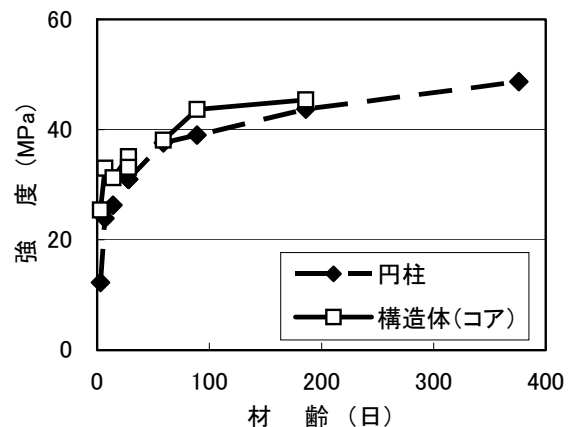


図-10 大型供試体によるコア強度と円柱供試体の強度発現

度に関する研究（その1～5），日本建築学会大会学術講演梗概集 A1，pp.847-856，2000.9

- 9) 国土交通省技術調査課：微破壊・非破壊試験を用いたコンクリートの強度測定の試行について，国官技第166号，2006.9.25
- 10) 具体的な方法は，土木研究所ホームページ、研究関連情報、プログラム・要領等の提供、構造物マネジメント技術チーム、微破壊・非破壊試験による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案）（H19）
- 11) 森濱和正：超音波によるコンクリート品質の推定，コンクリート工学，pp.35-40，2006.5
- 12) 富士岳ほか：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する研究 第2報 電磁波レーダ法および衝撃弾性波法，非破壊検査，pp.691-696，2003.12
- 13) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，pp.52，2002.3
- 14) 森濱和正ほか：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究 共通 その9 05年度に実施した5構造物の物性試験結果，日本非破壊検査協会平成18年春季大会講演概要集，pp.41-44，2006.5
- 15) 前掲書14)，超音波法 その11 05年度に実施した5構造物の強度，緻密性試験結果，pp.37-40，2006.5
- 16) 前掲書14)，共通 その10 06年度に実施した4構造物の物性試験結果，平成19年秋季大会講演概要集，pp.119-122，2007.10
- 17) 前掲書14)，超音波法 その13 06年度に実施した実構造物の音速分布による強度，緻密性の評価，平成19年秋季大会講演概要集，pp.123-126，2007.10
- 18) 前掲書14)，共通 その2 供試体，構造物の物性確認試験，平成15年春季大会講演概要集，pp.127-128，2003.5