

衝撃弾性波法による新設コンクリート構造物での圧縮強度推定方法 および現地測定結果について

岩野 聡史*1・森濱 和正*2・極檀 邦夫*3・境 友昭*4

1. はじめに

筆者らは衝撃弾性波法による圧縮強度の推定方法について研究をしてきた^{1), 2)}。本法は、コンクリート中を伝搬する弾性波速度と圧縮強度には相関関係があることを利用して、弾性波速度の測定結果から圧縮強度を推定するものである。コンクリート構造物を非破壊で直接評価できることから、施工管理に利用できるものと期待でき、国土交通省による新設橋梁工事を対象とした「微破壊・非破壊試験を用いた品質管理に関する試行」において強度測定の手法に試行導入された³⁾。本書では、この試行導入での本法による圧縮強度の推定手順、実構造物での測定実施例について紹介し、今後の課題について検討した結果について報告する。

2. 試行導入での本法の強度推定方法について

2. 1 本法での強度測定手順

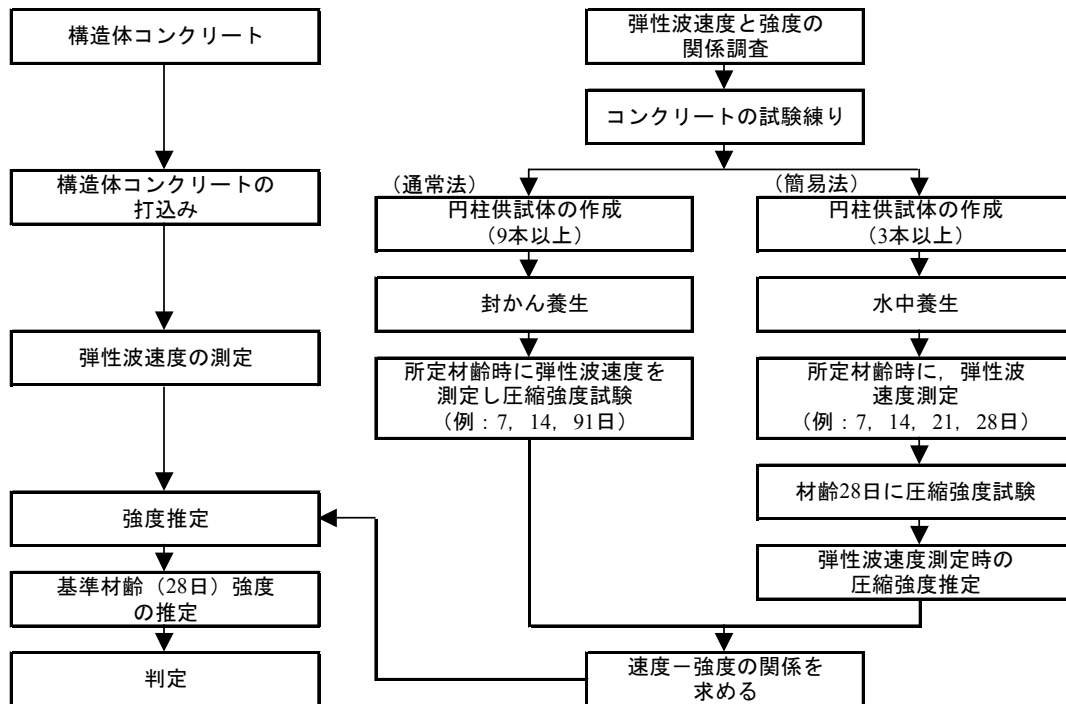


図-1 衝撃弾性波試験 (iTECS 法) による強度推定手順

国土交通省での「微破壊・非破壊試験を用いた品質管理に関する試行」において、本法については「衝撃弾性波試験 (iTECS 法) による新設の構造体コンクリート強度測定要領 (案) (以下、「強度測定要領 (案)」という)」が提案されている⁴⁾。「強度測定要領 (案)」での強度推定手順を図-1 に示す。

*1 リック(株)技術研究所技術開発グループ 所長代理 (正会員)

*2 (独)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)

*3 iTECS 技術協会 理事長 工修 (正会員)

*4 アプライドリサーチ(株) 代表取締役 工博

本法は、①コンクリート中を伝搬する弾性波の速度はポアソン比、密度が一定であれば、弾性係数の平方根に比例すること、②弾性係数とコンクリートの圧縮強度には正の相関関係があること、①、②より、弾性波速度と圧縮強度には相関関係があることを利用するものである。事前に円柱供試体で両者の関係を調査し、この結果を利用して、構造体コンクリートで測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する。

コンクリートの打設、養生、脱型という工程を経た構造体コンクリートを直接評価できることから、新設時の施工管理に利用できるものと期待される。また、非破壊であり同一箇所での繰返しの測定が可能であることから、経年変化の把握等、以後の維持管理に必要な情報を取得できるものと期待される。

2. 2 弾性波速度と強度の関係調査について

本法で利用する弾性波速度と圧縮強度の関係については、測定対象構造物と同一配合コンクリートで円柱供試体を製作し、材齢を変化させた所定時期に両者を測定して、関係を調査することとしている。これは、両者の関係は図-2に示すとおり、コンクリートの配合によって異なる性質があり、圧縮強度の推定精度の向上には、配合毎に関係調査を実施する必要があることによる。

2. 3 弾性波速度の測定方法について

本法での弾性波速度の測定は、圧縮強度との関係調査のための円柱供試体での測定、構造体コンクリートでの圧縮強度の推定のための測定、以上の2種類の測定がある。弾性波速度の測定方法は円柱供試体では図-3に示すとおり、縦弾性波の多重反射による周波数から求めている。これに対し、構造体コンクリートでは縦弾性波が多重反射する厚さが明確でない場合などがあり、図-4、図-5に示すとおり、縦弾性波がコンクリート内部を球面状に伝搬する性質を利用して、入力点から受信点までの弾性波の伝搬時間差と距離差の関係から弾性波速度を求める方法を多く採用している。

両測定方法の相違による圧縮強度の推定精度の低下、補正方法等については、過去に実構造物での実験により検討してきた。本法による強度推定結果と近傍で採取したコアによる圧縮試験結果との関係を図-6に示すと、本法による推定誤差は±15%程度の範囲で均等に分布する結果となった。これから、補正等については、現在のところ実施しないと判断している。

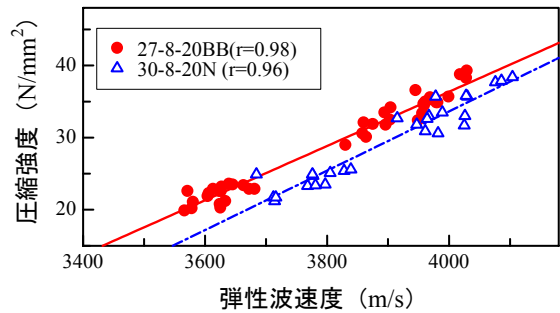
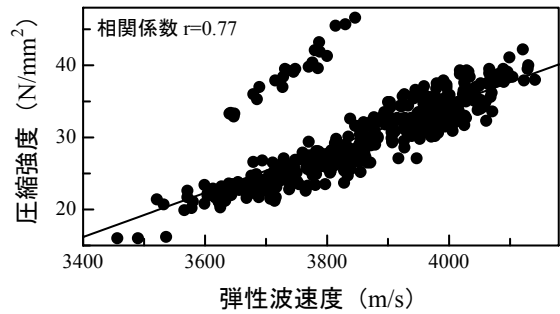


図-2 弾性波速度と圧縮強度の関係比較例
(上図：配合4種類，下図：配合別)

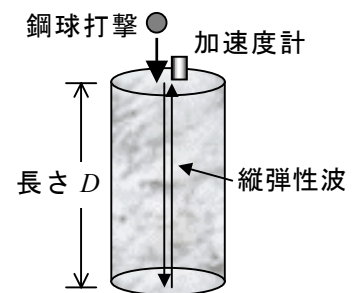


図-3 円柱供試体での速度測定状況

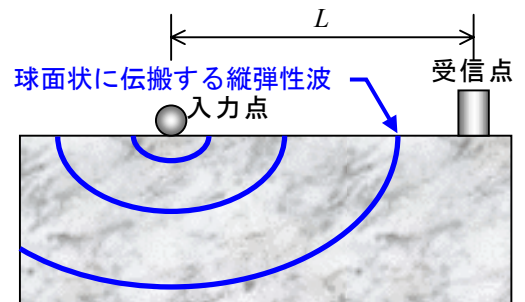


図-4 縦弾性波の伝搬模式図

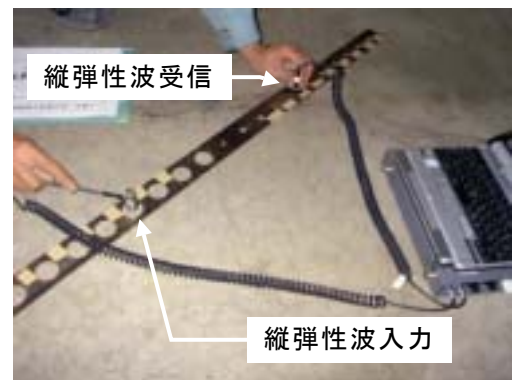


図-5 構造体での速度測定状況

3. 実構造物での測定実施例

3. 1 測定概要

測定実施例として、表-3 に概要を示す 2 現場での測定結果について報告する。構造体コンクリートでの測定箇所（測線）数は、構造物 A では 1 径間に 9 測線の計 18 測線、構造物 B では 1 ロット毎に 9 測線の計 135 測線とした。

3. 2 円柱供試体による弾性波速度と強度の関係調査結果

測定対象のコンクリートと同一配合の円柱供試体を製作し、弾性波速度と圧縮強度の関係を調査した結果を図-7 に示す。関係調査は材齢 1 週、2 週、4 週の 3 回実施し、材齢変化により両者を変化させて測定した。

構造物 A では相関係数 0.95 により式(1)に示す関係式、構造物 B では相関係数 0.99 により式(2)に示す関係式が得られた。

$$f_c = 0.0387 \times V_p - 123.75 \quad (1)$$

$$f_c = 0.0235 \times V_p - 66.03 \quad (2)$$

(f_c : 圧縮強度, V_p : 弾性波速度)

3. 3 構造体コンクリートでの弾性波速度測定, 強度推定

図-8, 図-9 に構造体コンクリートでの測定例を示す。入力波形から縦弾性波の入力時間と、受信波形から縦弾性波の受信点への到達時間を測定し、入力点と受信点の距離差から弾性波速度を測定した。弾性波速度の測定は 1 測線あたり、入力受信点間の距離を 200mm から 100mm 間隔で 1000mm までの 9 回測定し、全測定結果を平均化処理することにより、各測線での弾性波速度を決定した。以上のように決定した弾性波速度と式(1)および式(2)により、構造体コンクリートの圧縮強度を推定した。

3. 4 構造体コンクリートの判定結果

前節で推定した圧縮強度 $f'_{c28}(t)$ から、式(3)に示す材齢補正式により基準材齢 (28 日) 強度 f_{c28} を求め⁵⁾、全測定線での平均値が式(4)に示す XL を満足するかによって、構造物の強度の適否を判定した。

$$f_{c28} = \left(\frac{a+bt}{t \times d} \right) \times f'_c(t) \quad (3)$$

$$XL = 1.11 \times SL - 0.21 \times SL / \sqrt{n} \quad (4)$$

ここに、 t : 測定時の材齢 (日), a, b, d : セメントの種類によって変化する係数, SL : 設計基準強度, n : 試験回数である。

判定結果例として、構造物 A の各測線、構造物 B の橋脚 1 基での基準材齢強度測定結果と XL との比較を図-10 に示す。

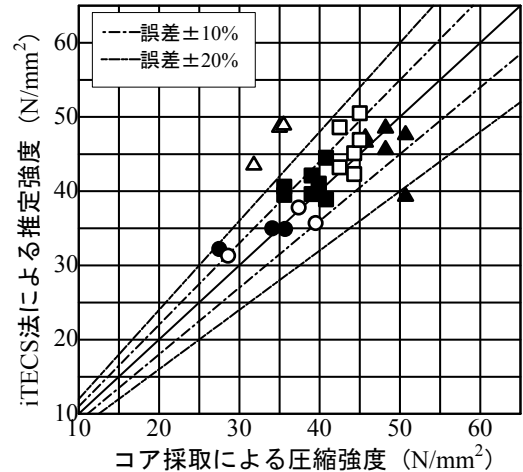


図-6 コア採取による圧縮試験結果との比較

表-1 実構造物での測定概要

名称	測定対象部材			試験箇所数	測定線数	コンクリート種類
A	橋梁上部	桁部	2径間	6	18	27-12-20N
B	橋梁下部	橋脚	5ロット×3基	15	135	24-8-20BB

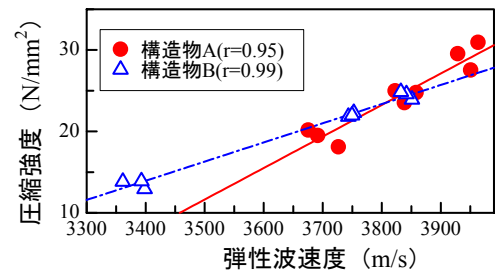


図-7 弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果



図-8 構造物 B での速度測定状況

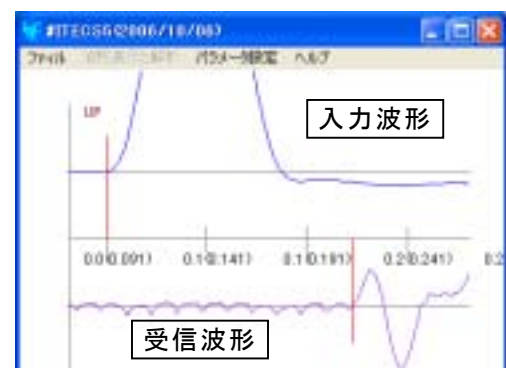


図-9 構造体での速度測定波形例

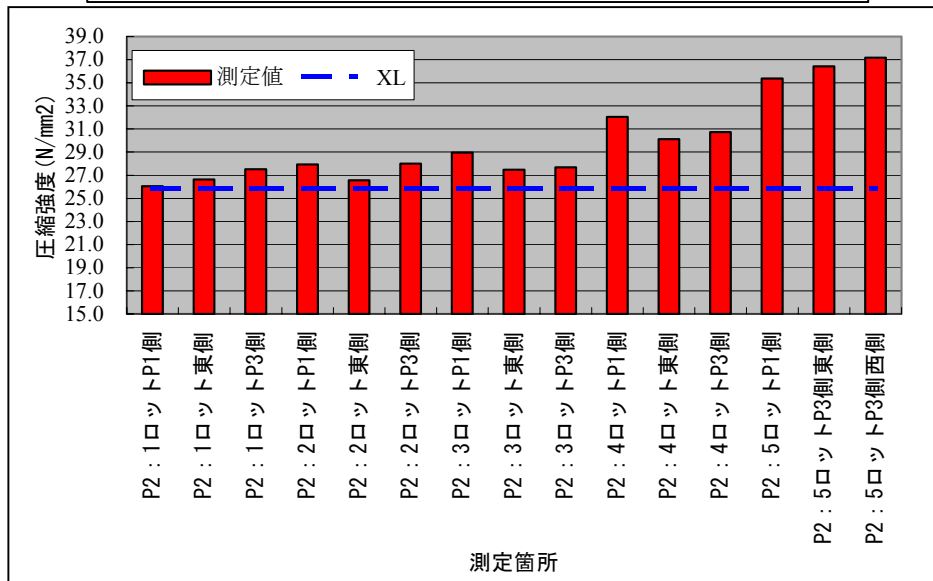
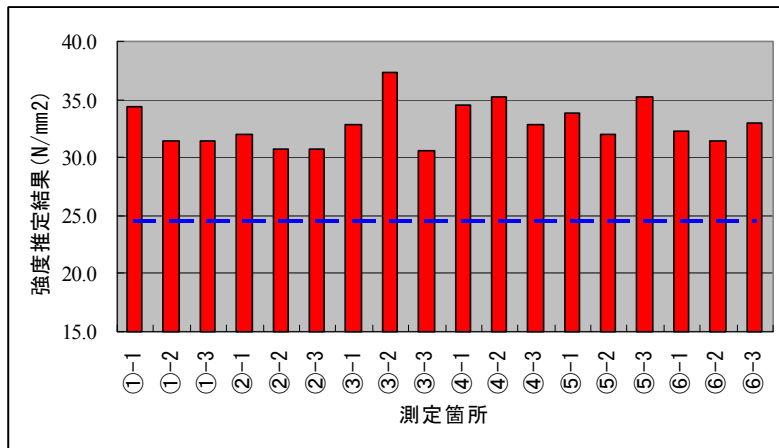


図-10 強度推定結果（上：構造物A，下：構造物B）

構造物 A, B の測定結果とも XL を上回る結果となり、コンクリートの強度は合格であると判定された。

4. 本法での今後の課題について

4. 1 材齢補正式により基準材齢（28日）強度の算出について

「強度測定要領（案）」では、3. 4節に示したとおり、コンクリート構造物の強度の適否は構造体コンクリートでの測定時の材齢と推定した圧縮強度から、式(3)に示す材齢補正式により基準材齢（28日）強度 f_{C28} を求め判定する。これは構造体コンクリートでの測定日を材齢28日に限定することは、足場等の作業環境、調査コストなどの面から困難となることからの対策と考えられる。しかし、式(3)に示す材齢補正式はコンクリートの材齢変化に伴う強度発現はセメント種類によって決定されるとの仮定に基づき、セメント種類によって経験的に係数が設定されたものであり、全てのコンクリートへの適用が可能であるかについては、検証する必要があると考えている。

そこで、3. 2節で材齢28日に圧縮試験を行った円柱供試体により、以下の手順で材齢補正式を検証した。

- ① 材齢1週，2週，3週，4週頃に弾性波速度 V_p を測定。
- ② ①での測定結果，式(1)および式(2)により各測定材齢時の圧縮強度 $f_c(t)$ を推定。
- ③ ②で推定した圧縮強度 $f'_{C28}(t)$ から，式(3)に示す材齢補正式により基準材齢（28日）強度 f_{C28} を推定。
- ④ ③で推定した基準材齢（28日）強度 f_{C28} と圧縮試験結果とを比較。

表-2 材齢補正式による28日強度の推定結果と圧縮試験結果の比較

構造物	測定材齢 t (日)	弾性波速度 V_p (m/s)				測定材齢時 強度推定値 $f'_c(t)$ (N/mm ²)	基準材齢 (28日) 強度推定値 f'_{c28} (N/mm ²)	28日時 圧縮試験結果 (N/mm ²)
		No.1	No.2	No.3	平均値			
A	8	3669	3723	3710	3701	19.4	26.4	29.3
	15	3804	3857	3835	3832	24.5	27.6	
	22	3883	3925	3912	3906	27.4	28.5	
	28	3929	3963	3950	3947	28.9	29.0	
B	6	3401	3401	3373	3392	13.7	23.5	24.5
	18	3763	3754	3744	3754	22.3	24.7	
	21	3792	3785	3774	3784	23.0	24.5	
	28	3851	3842	3832	3842	24.3	24.4	

材齢補正式により基準材齢 (28 日) 強度の推定結果と 28 日に実施した圧縮試験結果との比較を表-2 に示す。なお、円柱供試体 3 本により測定したが、平均値により比較した。材齢補正式の性質では、材齢 28 日から材齢が離れるほど誤差は大きくなるが、比較結果はこの傾向を示し、構造物 A での材齢 8 日では圧縮試験結果が 29.3(N/mm²)であったのに対し、推定値は 26.4(N/mm²)となり、誤差は 10%以上となった。今回の結果では、推定値が実際の強度よりも下回り、コンクリート構造物の適否判定においては、安全側の結果ではあるが、コンクリートの配合によっては逆の結果となる可能性も考えられる。材齢 1 週程度の若材齢時に構造体コンクリートで測定した結果から、基準材齢 (28 日) 強度 f_{c28} を推定、コンクリート構造物の強度の適否を判定する方法として、式(3)に示す材齢補正式を適用することには検討が必要であると考えられる。

一方、図-11 に示すとおり、材齢と弾性波速度には強い相関関係にあることが確認された。以上を考慮すると、材齢 1 週程度の若材齢時に構造体コンクリートで測定した結果から基準材齢 (28 日) 強度 f_{c28} を推定する方法としては、式(3)に示す材齢補正式を適用するのではなく、材齢 28 日に圧縮試験を行なう円柱供試体を用いて、配合毎に材齢と弾性波速度の関係式を確認する方法を適用することを検討する必要があると考えられる。

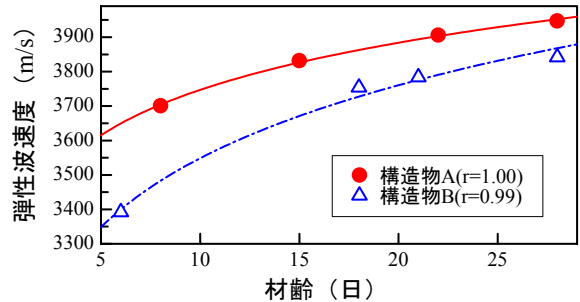


図-11 同一供試体での弾性波速度と材齢の関係

4. 2 弾性波速度の測定方法、取扱について

「強度測定要領 (案)」では、2. 3 節に示したとおり、圧縮強度との関係式を調査する場合の弾性波速度は縦弾性波のコンクリート内部への多重反射による往復時間、構造体コンクリートでの弾性波速度は縦弾性波がコンクリート表面付近を伝搬する時間差から求めている。これまでの実験による経験から、速度測定結果に対する補正の必要はないと判断しているが、例えば、構造体コンクリートでの弾性波速度において入力する弾性波の波長を変化させるなど、これまでの実験での測定方法とは異なる方法を適用すれば、補正が必要になる場合も考えられる。これらの適用条件を明確にする必要があると考えている。

4. 3 弾性波速度と圧縮強度の関係式について

「強度測定要領 (案)」では、弾性波速度と圧縮強度の関

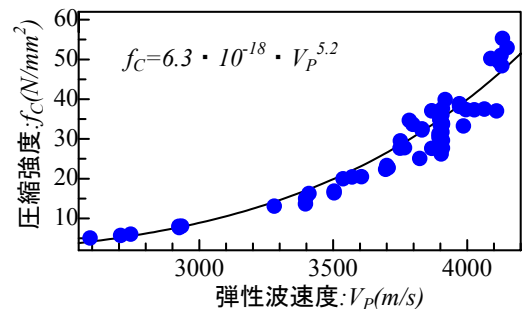


図-12 多数の円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係

係を直線回帰により求めている。これは、両者の関係調査の実施回数が3材齢分、供試体9本であることから直線回帰としているが、実施回数、供試体本数を多数とすれば、両者関係は図-12のとおり指数曲線の関係となる¹⁾。材齢が経過すると、圧縮強度の増加より先に弾性波速度の増加が収束する傾向がある。これから、「強度測定要領(案)」での直線回帰により求めた関係式より、材齢が長く経過した構造体コンクリートで圧縮強度を推定すれば、強度を過小評価する可能性がある。

構造体コンクリートでの測定材齢を十分考慮した上で、弾性波速度と圧縮強度の関係を調査することが必要であると考えられる。

5. まとめ

国土交通省の新設橋梁工事を対象とした「微破壊・非破壊試験を用いた品質管理に関する試行」において強度測定の手法に試行導入された、衝撃弾性波法(iTECS法)について、圧縮強度の推定手順、実構造物での測定実施例について紹介し、今後の課題について検討した。本法はコンクリートの打設、養生、脱型という工程を経た構造体コンクリートを直接評価できること、また、非破壊であり同一箇所での繰返しの測定による経年変化の把握等、以後の維持管理に必要な情報を取得できること、これらが期待される手法であることから、今後の課題について、実構造物を用いた実験等により、改善事項として対処して行きたい。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭: 弾性波速度の測定に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
- 2) 岩野聡史, 森濱和正, 境友昭, 極檀邦夫: 衝撃弾性波法による新設供試体でのコンクリートの圧縮強度の推定, 土木学会第60回年次学術講演概要集第V部, pp.49-50, 2005.9
- 3) 国土交通省大臣官房技術調査課, 微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領(案), 2006.5
- 4) リック, 土木研究所, 衝撃弾性波試験(iTECS法)による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案), 2006.4
- 5) (社)土木学会, 2002年制定 コンクリート標準示方書[施工編], pp.52, 2002.3