

報告 構造体コンクリートの非破壊・微破壊試験による強度検査に関する検討

森濱 和正^{*1}・若林 信太郎^{*2}・森脇 渉^{*3}・奥 紀仁^{*4}

要旨：新設鉄筋コンクリート構造物を，非破壊・微破壊試験によって直接検査する方法について検討している。今回は強度の検査について，施工条件，測定精度などに応じた試験方法の選定，検査する位置，数量，判定基準などの検討を行なった。非破壊試験，微破壊試験の選定方法や，JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の強度判定基準を準用していることによる問題に対し，構造体コンクリートを検査することによる改善方法などについて提案した。

キーワード：構造体コンクリート，非破壊試験，微破壊試験，強度検査，判定基準

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）構造物の竣工時の検査は，現状では，出来形および表面状態を除いて，構造物の性能・品質を直接検査していない。そのため，新設構造物の性能を確認するものとはなっていない。筆者らは，新設 RC 構造物を非破壊・微破壊試験（4章参照）によって直接検査し，維持管理にも役立つ方法を提案するために，さまざまな検討を行ってきた¹⁻⁴⁾。

今回，構造物自体のコンクリート（以下、構造体コンクリートと記す）の圧縮強度の検査方法を確立することをめざして検討した結果について報告する。

2. 強度検査の必要性

構造体コンクリートを検査する一般的な目的は，構造体コンクリートの品質を直接把握することである。

最近，設計が性能規定化されつつあり，設計時には要求性能の確認（照査）方法の検討が行われている。しかし，実際に施工された構造物の要求性能の確認（検査）も重要と考えられるが，その方法の検討はあまり行われていない。

現在，納入されたコンクリートの検査は行わ

れているが，施工後に構造体コンクリートの要求性能を直接確認していない。これまでは施工管理によって品質の確保が行われてきており，多くの場合は問題ないと考えられるが，わずかとはいえ施工時には過失による不良構造物は避けられない。さらには，あってはならないことではあるが，加水など故意に不良あるいは欠陥構造物が建設されることもあり，構造体コンクリートを検査する方法を確立しておくことは重要である。

さらに，新設時に構造体コンクリートの品質が把握できれば，それを初期値として経時変化を確認することができるようになり，維持管理も適切に行うことができるようになることが期待できる。

次に，構造体コンクリートの圧縮強度の検査は，直接には，構造物の耐荷力が確保されているのか否かの重要な検査項目である。また，間接的には，圧縮強度以外の強度や耐久性など，直接確認しにくい品質の指標となる重要な品質である。例えば，すりへり抵抗性を確認することは難しいが，圧縮強度と強い相関関係があることから，表層強度を確認することにより，すりへり抵抗性を確認することができる。

*1 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(株)銭高組技術本部技術研究所 工修（正会員）

*3 戸田建設(株)土木工事技術部技術2課（正会員）

*4(株)八洋コンサルタント技術センター（正会員）

3. 現状の検査の問題点と構造体コンクリートの検査による改善方法

3.1 検査の現状

現在、発注側が行なっている強度検査は、JIS A 5308 を準用している⁶⁾。その概要は次のとおりである。

荷渡し地点で円柱供試体を作製し、それを 28 日まで水中養生（標準養生）したあとの強度試験結果で行われている。

試験は 3 回で、判定基準は次の 2 条件である。

- 1) 1 回の試験結果は、購入者が指定した呼び強度の強度値の 85% 以上
- 2) 3 回の試験結果の平均値は、購入者が指定した呼び強度の強度値以上

3.2 現状の検査の問題点と構造体検査による改善方法

発注側が構造体コンクリートの強度を検査する立場から、JIS A 5308 を準用することによる問題点と、構造体コンクリートを検査することによる改善点をまとめると表-1 のようになる。

まず、JIS A 5308 はコンクリートの製造に関する規格であり、その検査も製造されたものに対してである。JIS に基づく検査用の円柱供試体と、施工され環境の影響などを受ける構造体コンクリートでは、品質などは異なっており、同じ検査基準でいいのかが疑問である。

表-1 の() 試料採取について、検査するにあたって、試料の採取はランダムに行うことが原則である。ところが、生コンの納入時の検査は、通常、150m³ ごとの最初の納入時に検査が行われている。1 台目は打設の可否を判断するためにやむを得ないとしても、それ以後はランダムにすべきと考えるが、検査員の配置、それに伴うコストの問題などがある。それに対し、構造体コンクリートを検査することにより、検査位置をランダムに選定することができる。

() 検査ロット、() 判

定基準について、JIS 規格は製造側にとっては一定の合理性はある。ただし、判定基準については、製造側からも下記と同様の問題点が指摘されている⁷⁾。

すなわち、判定の 2 条件は、配合設計を行うために設定された条件であるが、検査にも適用されている。そのため、呼び強度さえ満足すれば必ず合格することはもちろん、3 回に 1 回は呼び強度の 85% であっても、他の 2 回の結果を合わせた平均が呼び強度を満足すれば合格する。さらには、小規模な工事の場合は、他の工事と合わせて検査してよいことになっており、理論的には（実際にはないであろうが）呼び強度の 85% 以上で合格する可能性がある。配合設計では、配合強度（平均値）と標準偏差が設定されているが、そのような分布とはかけ離れた分布のコンクリートが合格する確率は小さくない。

構造体コンクリートを検査するということは、他の工事のコンクリートを合わせて検査する必要はなく、構造体の規模に合わせて検査ロットや判定基準を設定しなければならない。

() 品質保証については、構造体コンクリート強度と標準養生した円柱強度とは異なることから、品質を保証しているものが異なることになる。土木の場合は、長期の強度発現などを期待し、構造体全体で耐荷力などを保証できればよい体系になっており、判定する材齢（通常 28 日）時には必ずしも呼び強度を満足しなければならないわけではない。そのため、構造体コンクリート強度の検査における判定基準は、構造体コンクリートの強度特性を考慮して定める必要がある。

表-1 発注側から見た JIS 検査基準を準用した場合の問題点と、構造体コンクリート検査による改善

項目	JIS検査基準準用の問題点	構造体検査による改善
() 試料採取	ランダムではない	ランダムな採取
() 検査ロット	3ロットで検査	構造体規模でロット数異なる
	3ロットに満たない場合、他の工事と合わせて検査	構造体のみ検査が可能
() 判定基準	品質規格が判定基準 下限値満足すれば合格する	構造体全体について、確率的な判定が可能
() 品質保証	標準養生の円柱供試体強度	構造体コンクリート強度

4. 試験方法の選定

構造体コンクリート強度を推定する各種方法から、施工条件などに適した試験方法の選定方法について検討する。

検討対象とした試験方法は、表-2 の超音波、衝撃弾性波、ボス供試体、小径コアの 4 種類である。比較のために、表中には標準コア（100mm）なども示してある。

表-2 の縦は構造体コンクリートに与える損傷の程度を示している。下ほど損傷程度が大きくなり、ここでは標準コアを破壊試験と分類しており、それより損傷の程度が小さいものを微破壊試験、超音波、衝撃弾性波のように同じ位置で何回も測定できるものを非破壊試験と分類している。この分類に従えば、コンクリート分野では非破壊試験の代表と考えられているリバウンドハンマは、同じ位置で繰返し試験できないため、微破壊試験に分類される。

非破壊試験は部材・部位、測定時期の制限はなく、コストが比較的安いという長所を持っているが、測定精度にやや難点がある。精度を確保するため、対象としている方法^{2,3,5)}は、試験練りの時などに事前に強度と弾性波速度を求めておく方法であり、使用にあたっての煩雑さもある。

ボス供試体⁸⁾、小径コア⁹⁾は、そのほかの試験方法のように煩雑な試験による推定式を必要とすることなく、測定精度が高いという特徴がある。ボス供試体は、事前に構造体型枠にボス型枠を取り付けておき、コンクリート打込み時に構造体と同時にボス型枠にも構造体と同じコンクリートが充填され、所定の材齢時に割り取って強度試験することによって構造体コンクリート強度を推定する方法である。適用できる

のは新設構造物のみであり、事前にボス供試体位置を決めておかなければならない。ここで、事前にボス型枠を取り付けておくのであればランダム原則は損なわれるのではないかと考えられるが、実際には何台目のアジテータ車がここに打ち込まれるのかを確認しながら出荷する余裕はないので、ランダム原則が侵害されることはほとんどない。

試験方法の選定は、上記の特徴や、施工条件などから行うことになる。

一つ目の方法は、簡便に行うことができる非破壊試験により劣悪な品質のコンクリートを見逃さないことである。劣悪な品質のコンクリートが測定された場合、精度の高い微破壊試験を用いるという方法である。

二つ目の方法は、今後重要と考えられる方法として、非破壊試験と微破壊試験を適切に組み合わせる方法を提案したい。検査は精度が要求されることから、微破壊試験が適している。その後の維持管理まで考慮すると、コストや構造体への損傷から微破壊試験を多用することは避けるべきである。このような場合、非破壊試験も併用し、事前に微破壊試験結果と非破壊試験結果の関係を把握しておき、非破壊試験によって維持管理することも検討すべきと考えられる。

そのほかの選定条件として、試験材齢や作業条件などもある。例えば、フーチングのように埋戻しを早く行う必要があり、作業条件がよく

表-2 試験方法の特徴と分類

試験分類	試験方法	損傷程度	補修の必要性	繰返し ^{*1}	強度推定		備考 ^{*3}
					方法	精度 ^{*2}	
非破壊	超音波	なし	不要	可	推定式		表層の耐久性
	衝撃弾性波						
微破壊	リバウンドハンマ	微	必要	不可	推定式		-
	ボス供試体	浅・広			標準コアと ほぼ1:1		耐久性モニタリング 耐久性
	小径コア	深・小			推定式		-
破壊	引抜き	深・広			比較対象	-	現在標準
-	標準コア	極深・広					
-	円柱供試体	-	-	-			構造体コンクリート強度得られない

*1 繰返し：同じ位置で何度も試験できるか

*2 強度推定精度：(標準コア強度と比較して) :非常に良い(±10%以下)、 :良い(±20%以下)、 :やや劣る(±20%以上)

*3 耐久性：中性化、塩化物イオン浸透深さや抵抗性、緻密性などの評価

ない場合は、コア採取などは現場での作業が大変であるが、ボス供試体や、非破壊試験が適している。

5. 判定基準

5.1 構造体コンクリートの検査方法の考え方

コンクリートは JIS 規格で製造されていることから、構造体コンクリート強度を検査するにあたって JIS 規格を満足しつつ、3 章に示す問題を改善できる方法（試験方法、試験回数、判定基準など）を検討する必要がある。

JIS 規格（製造）の制約から、次の項目については JIS 規格に準拠する必要がある。

- (a) 強度分布（配合強度、標準偏差）
- (b) 試験回数

構造体コンクリートを検査することにより、次の項目について改善を図る。

- (c) ランダムなサンプル（試験位置）の採取
- (d) 検査単位
- (e) 構造体コンクリートの強度特性の考慮
- (f) 判定基準

(a)については説明の必要はないだろう。

(b)の試験回数は、JIS 規格に合わせロット数とする。ただし、試験する位置は(c)のようにランダムなサンプルの採取が原則であり、試験位置はロットとは異なる。

(d)の検査単位は、どれだけロット数で検査するのかということであり、JIS では3ロットを検査ロットとしている。構造体コンクリートの検査を行うにあたって、検査単位は構造体単位とすることによって、構造体全体の検査を行うことが合理的である。「構造体単位」とは、1 構造物のうち、同じ種類のコンクリートが使われ、同じ施工業者による施工が行われているなど、条件が一定している全体を指している。

(e)については、(c)のランダムな採取とは矛盾するところもあるが、構造体コンクリート強度は打込み高さによって異なることなどを考慮して、構造体を代表する強度が得られるように試験位置を決めることなどが必要である。

(f)は、(d)のように検査ロットが異なること、構造体コンクリート強度と JIS による標準養生した円柱供試体強度との違いなどを考慮した判定基準を検討する必要がある。

5.2 判定基準の考え方

生コンの判定基準は、3.1 節に示した 2 条件である。この強度分布は図-1 のようになる（平均強度 m 、標準偏差 σ 、設計基準強度 SL ）。

構造体コンクリート強度は、標準養生した円柱強度よりも 10%程度小さくなるので、構造体コンクリート強度の分布は図-2(a)のように 10%程度小さい方に平行移動させる（平均強度 m' 、標準偏差 σ' ）。

構造体コンクリートを検査すると、工事規模が大きければロット数も増える。その場合、強度の平均値の分布は図-2(b)のように平均強度 m' で、標準偏差は本来 σ'/\sqrt{n} となるが、5.1 節の(a)の条件より、3 回の平均の分布を図-2(a)と同じ分布に合わせるには、標準偏差を合わせる必要があり $\sigma'/\sqrt{n/3}$ となる。

このときの合格判定値 XL は、生産者危険率を適切に選定し、 XL に対する正規偏差 T を与えることにより、次式となる（図-2(b)参照）。

$$XL = m' - T \cdot \sigma' / \sqrt{n/3} \quad (1)$$

構造体コンクリートの強度分布は、さまざまな影響を考慮し図-2(a)のように強度低減しており、図-1と同じ $T = \sqrt{3}$ としてよいだろう。

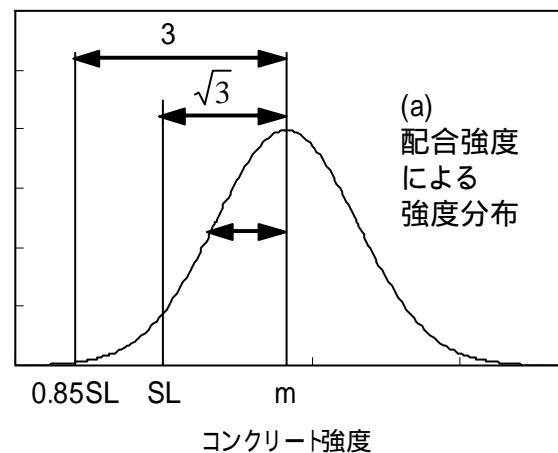


図-1 配合設計による強度分布

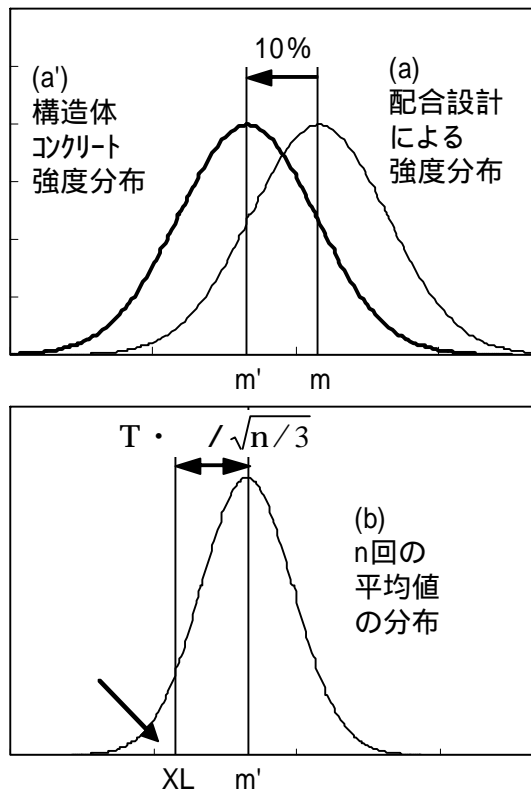


図-2 構造体コンクリートの強度分布，平均値の分布

6. 適用例

6.1 実験概要

橋脚のフーチングで実験した結果に、5章で提案した判定基準の適用を試みる。

実験を行なったフーチングは、縦 12.35m × 横 23.0m × 高さ 2.8m (体積約 800m³) である。生コンのロット数は 6 となる。使用したコンクリートは、呼び強度 27 である。実験位置は、1 側面の上段、中段、下段と、他の 3 面の中段の 6 箇所である。この位置にボス供試体を取付け、また、ボス供試体の近くから小径コア採取や、非破壊試験を行い、6 回分の試験を行なった。

受入検査は、JIS 規格どおり 150m³ ごとに円柱供試体を作製し、標準養生後に強度試験を行なった。受入検査以外の強度も確認するため、ボス供試体の位置を打設しているときにもコンクリートを採取して円柱供試体を作製し、水中養生、封かん養生を行ない、強度試験を行なった。

6.2 実験結果

円柱供試体の材齢 28 日強度試験結果は図-3のとおりである。いずれも 6 回の試験結果である。

ボス供試体位置に打ち込まれたコンクリート強度の平均値は、ほぼ配合強度と一致しているが、受入検査の結果はそれよりも大きな強度であった。

次に、ボス供試体近くで採取した標準コア(鉄筋間隔の関係から 70mm)強度と、封かん養生した円柱供試体、ボス供試体⁸⁾(75 × 75 × 150mm(75)および 100 × 100 × 200mm(100))、小径コア⁹⁾(25mm)、衝撃弾性波 A³⁾、B⁵⁾、超音波²⁾、リバウンドハンマの強度推定結果を比較すると、図-4 のとおりであり、回帰結果も示した。

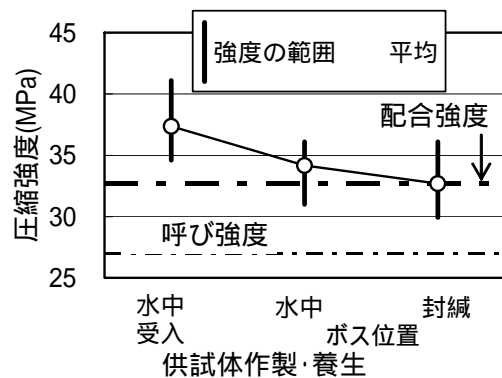


図-3 円柱供試体強度

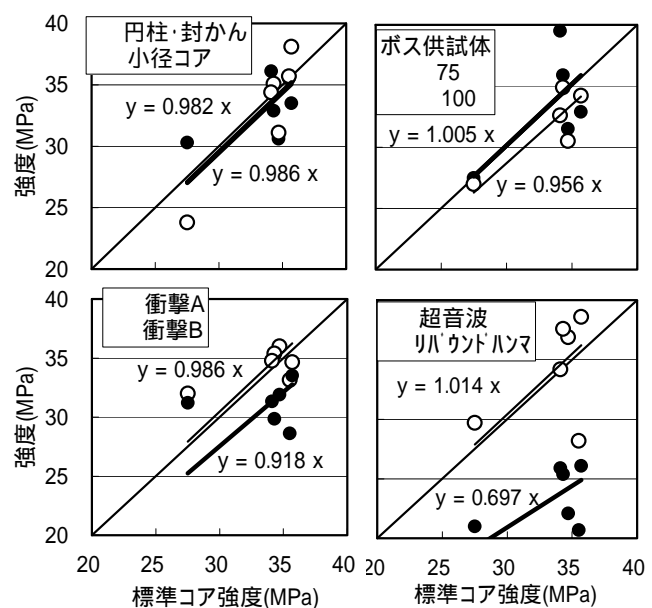


図-4 各種強度推定結果と標準コア強度の比較

標準コア強度と封かん養生した円柱強度，小径コア強度，ボス強度，衝撃弾性波，超音波による強度推定結果も標準コア強度とほぼ一致している。しかし，リバウンドハンマによる強度推定結果は標準コア強度の70%程度であった。

表-3 構造体，配合設計されたコンクリートの強度分布と判定値

	設計基準強度 (呼び強度) SL (MPa)	0.85SL (MPa)	変動係数 V (%)	配合強度 m (MPa)	標準偏差 (MPa)
配合設計 の強度分布	27	23.0	10	32.7	3.27
				10%低減	同じ分布
構造体コンクリートの強度分布	SL'	-	V	m'	
	23.7	-	(11.1)	29.4	3.27
					XL
					25.4

T = 3
のとき

6.3 判定基準の適用

これらの結果に，5章の判定基準を適用すると，次のようになる。

構造体，配合設計されたコンクリートの強度分布と，判定値を表-3に示す。構造体コンクリートの強度の低下は10%と仮定し，強度分布は両者同じになるようにするため，標準偏差は同じとしている。式(1)の $T = \sqrt{3}$ としたときの下限值 $XL = 25.4\text{MPa}$ となる。

これらの値と各種推定結果を図-5に示す。リバウンドハンマの結果以外は，配合強度 m 程度を平均値として分布している。各種推定強度は，今回提案した構造体コンクリートの強度分布の下限值 XL より上回っており，いずれの方法も合格と判定される。

7. まとめ

構造体コンクリート強度を検査する方法について検討した。特に判定基準について，現在行われている生コンの JIS 規格を準用した検査の問題点に対して，構造体コンクリートを検査することにより改善が図られる方法を提案した。

参考文献

- 1) 森濱和正ほか：非破壊試験によるコンクリートの品質、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

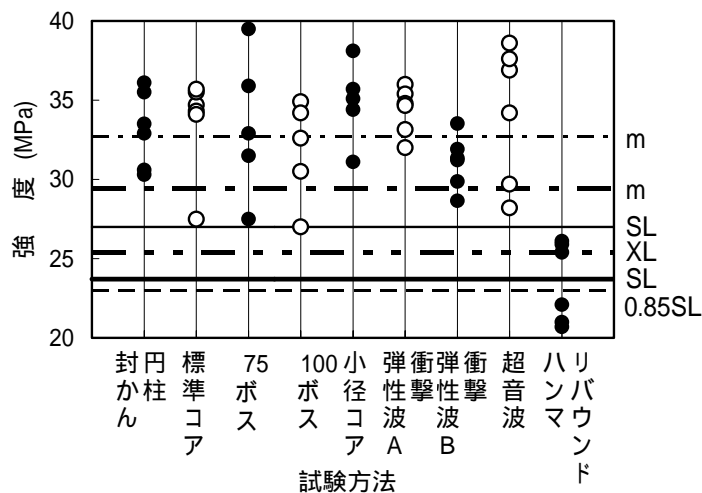


図-5 各種推定強度と判定基準

- 破壊検査，Vol.52, No.9, pp.497-503, 2003.9
- 3) 同上 第2報 レーダ法および衝撃弾性波法，Vol.52, No.12, pp. 691-696, 2003.12
 - 4) 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1 研究概要，日本非破壊検査協会，平成15年春季大会講演概要集，pp.125-126, 2003.5
 - 5) 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報告集，No.587, pp.15-21, 2005.1
 - 6) 例えば，国土交通省：土木工事共通仕様書，平成7年版，pp.250-252, 1995
 - 7) 全国生コンクリート工業組合連合会：生コン工場品質管理ガイドブック（第4次改訂版），pp.505-508, 1999
 - 8) 日本非破壊検査協会：NDIS 3424:2005（ボス供試体の作製方法及び圧縮強度試験方法）
 - 9) 野永健二ほか：小径コアによる新設構造体コンクリート強度の推定方法に関する一考察，土木学会第60回年次学術講演会第 部，pp.519-520, 2005.9