

論文 劣悪コンクリートの強度推定に関する基礎的研究

和藤 浩*1・王 曉梅*2、畑中 重光*3

要旨:極めて低強度のコンクリート（ここでは、水セメント比を大きくすることで得るものとした）を現場等で簡易に見極めるための手段を得ることを目的として実験を行った。すなわち、本研究では、強度レベルの異なるコンクリート（強度レベル：5、8、12、24 MPa）を標準養生及び屋外暴露環境下に置き、硬度棒によるコンクリート表面のひっかき硬さ、反発硬度（N型、P型シュミットハンマー）、超音波速度などを測定し、非破壊的に低強度（劣悪）コンクリートを見極める方法について検討する。

キーワード:低強度コンクリート、耐震診断、ひっかき硬さ、反発硬度、超音波速度

1. はじめに

コンクリート構造物の強度は、一般に施工時には設計基準強度を上回っており、かつ材齢が経過しても当初の強度を保持するものと考えられている。しかし、現実には、施工不良、経年劣化などによって構造体コンクリート強度が設計基準強度を下回っている可能性を否定することはできない。常時の荷重下では、コンクリートが低強度であることが大きな問題になることは少ない。しかし、厳しい条件下、とくに、大地震時のコンクリート構造物の耐力や靱性は、コンクリート強度に大きく依存することは自明である。過去には、震災後の調査で、倒壊した建物のコンクリート強度が5 MPa程度であった例も報告されている。一方、コンクリート構造物の非破壊試験は多種多様であり、研究も盛んに行われているが[1、2、3、4]、とくに低強度のコンクリートの発見に注目した報告はほとんど見られない[5]。

そこで本研究では、いわゆるシャブコン等によってできた劣悪なコンクリート（ここでは、水セメント比を大きくすることで得るものとした）を現場でなるべく簡易に見極めるための一つの手段を得ることを目的として2シリーズの実験を行った。すなわち、実験Iでは、低強度コンクリートの力学的性質及び中性化深さを調べ、実験IIでは、非破壊試験による強度推定方法の適用性について検討した。

本研究は、耐震診断のレベルでいえば、建物調査における目視調査に付随する形で行える程度の簡易なレベルを想定している。なお、本研究は材齢30年まで継続する予定であるが、本報では、実験Iについては材齢1年までの結果を、実験IIについては材齢28日までの結果についてそれぞれ報告する。

2. 実験方法

2.1 実験要因

本実験の要因を表-1に示す。ここで、表中の水中養生とは、三重大学建築学科実験室養生室内の水中養生（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）を、屋外暴露とは、伊勢湾に面した4階建て同学科建物の屋上（常時露天（日陰なし）状態）で空中養生を行うことを示す。供試体として、実験Iでは $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱

*1 三重大学技術官 工学部建築学科（正会員）
 *2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻
 *3 三重大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

体を、実験IIでは、圧縮試験用にはφ10×20cmの円柱体を、非破壊試験用には15×15×26cmの角柱体を用いた。

2. 2 コンクリート供試体の製作

本実験で使用したコンクリートの使用材料の性質を表-2に示す。また、コンクリートの調合表を表-3に示す。コンクリートの調合は、実験I及び実験IIとも同一とした。コンクリートの調合は、実験I及び実験IIとも同一とした。目標スランプは20cmとし、すべてワーカブルなコンクリートとした。コンクリートの打込みは、実験Iでは、平成7年9月中旬から下旬にかけて、実験IIでは、平成8年11月下旬から12月上旬にかけて、それぞれ強度レベルの低いものから製作した。

2. 3 各実験方法の概要

それぞれの実験の載荷・各測定方法等の概要を表-4に示す。また、実験IIのひっかき試験に用いた装置を図-1に示す。

3. 実験結果と考察

以下、図中の凡例等の供試体名については、表-1に注記した記号に準ずる。

表-1 実験要因

強度レベル (MPa)	養生方法	材令	測定項目	
5 8 12 24	水中養生 (W) 屋外暴露 (A)	28日 3ヶ月 1年 10年 30年	実験 I	圧縮強度 * 静弾性係数 * 中性化深さ
			実験 II	圧縮強度 ひっかき硬さ 反発硬度 超音波速度

注) *: 実験 I の圧縮強度と静弾性係数は、材令7日も測定した。

供試体名: (例) 24 W — 水中養生

└── 強度レベル (24MPa)

表-2 使用材料の性質

種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント (比重 3.16)
細骨材	川砂 (岩種: 硬質砂岩、最大寸法: 5 mm、表乾比重: 2.62、F.M.: 3.10、吸水率: 1.52%、破砕値: 19.2%)
粗骨材	碎石 (岩種: 硬質砂岩、最大寸法: 13mm、表乾比重: 2.66、F.M.: 6.62、吸水率: 0.60%、破砕値: 17.6%)
混和剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸塩系)

表-3 コンクリートの調合表

F _c (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	重量 (kg/m ³)				SP (C×%)	SL (cm)
			W*	C	S	G		
5	110	52	200	182	956	896	0.05	20
8	90	50	190	211	921	935	0.1	20
12	70	48	180	257	879	967	0.2	20
24	55	46	170	309	834	994	0.5	18

注) F_c: 目標圧縮強度、W/C: 水セメント比、S/a: 細骨材率、W*: 水+高性能AE減水剤、C: セメント、S: 細骨材、G: 粗骨材、SP: 高性能AE減水剤、SL: 実測スランプ

表-4 各実験方法の概要

測定項目		測定方法
実験 I	圧縮強度	JIS A 1108に準拠した (偏心を避けるため球座を使用)。試験体数は各3本。
	静弾性係数	ひずみゲージを貼付し、(最大荷重) / 3 の時点で算出した。
	中性化深さ	屋外暴露を行った円柱体を割裂し、フェノールフタレン1%アルコール溶液を噴霧し、打込み両側面の各5箇所をノギスで測定し、平均値を求めた。
実験 II	圧縮強度	実験 I と同様。
	ひっかき硬さ	コンクリートの表面を骨材のひっかき試験 (JIS A1126) に準拠し、硬度棒 (黄銅棒、直径φ1.6mm、硬度65HRB) を使用した簡易な装置を用いて約1 kgfの力でひっかき、キズの幅 (ノギスを使用)、深さ (ノギスを使用)、棒への粉の付き方 (目視及び電子顕微鏡を使用) を調べた。
	反発硬度	供試体に7kgf/cm ² の応力を加え、N型及びP型シュミットハンマーを用いて、打込み側面をそれぞれ10回ずつ打撃し、平均値を算出した。
	超音波速度	角柱体の打込み側面の相対する3点について、直接伝達法で測定した。

3. 1 静弾性係数と圧縮強度の関係

静弾性係数と圧縮強度の関係を図-2に示す。図中では、材齢7日～1年のデータを同一記号で示してある。また、図中の曲線は、日本建築学会の鉄筋コンクリート（RC）構造計算規準式において、コンクリートの比重を2.3の一定とした場合の計算値を表したものである〔6〕。RC規準式は、コンクリートの圧縮強度が40MPaを超える場合、実験値を過大評価することが指摘されているが、圧縮強度が10MPaを下回るような低強度コンクリートに対する適用性については十分な検討がなされているとはいえない。図によれば、普通強度のみならず低強度においても、計算値は実験値と比較的によく一致している。

3. 2 中性化試験

屋外暴露した供試体について、中性化深さと材齢の関係を図-3に示す。図によれば、材齢28日、材齢3ヶ月、材齢1年とも、中性化深さは強度レベルが低くなるにつれて大きくなった。また、材齢28日から材齢1年の中性化深さの進行も強度レベルが低くなるほど大きくなった（5MPaレベルで4.7倍、8MPaレベルで4.4倍、12MPaレベルで4.0倍、24MPaレベルで2.8倍）。ちなみに、材齢1年の実測値（7.8～20.0mm）と岸谷式〔7〕による計算値（2.9～7.4mm）とを比較したところ、前者は後者のおよそ2.5倍であった。

3. 3 ひっかき試験

実験IIで、ひっかき試験を行った供試体の様子を写真-1に示す。ひっかき試験よ

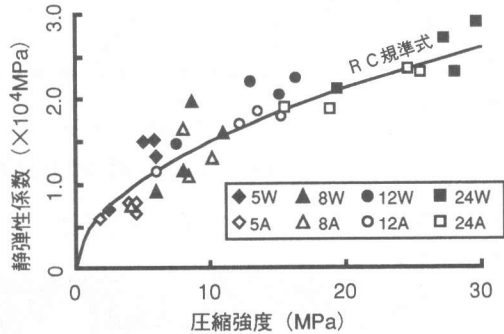


図-2 静弾性係数と圧縮強度の関係

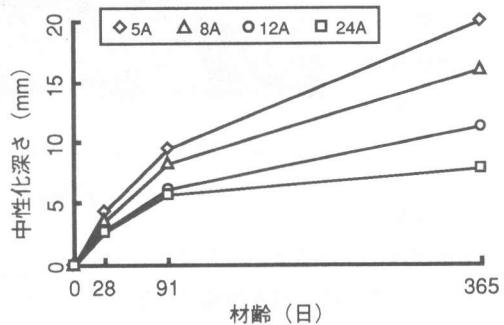


図-3 中性化深さと材齢の関係

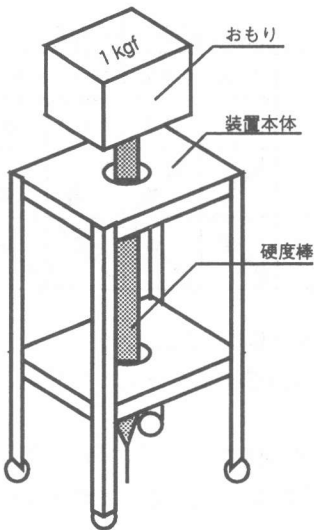


図-1 ひっかき試験に用いた装置

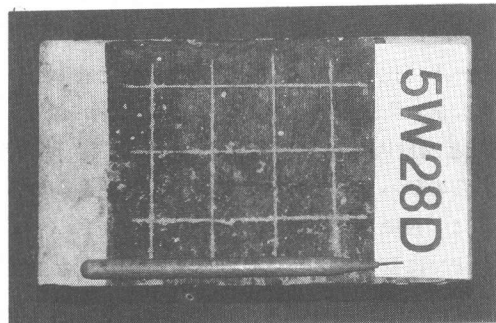


写真-1 ひっかき試験を行った供試体
(5MPaレベル、水中養生、材令28日)

り得られたひっかきキズと硬度棒へ付着した粉に関する情報を分析し、コンクリート強度との関連性を調べた。図-4は、ひっかきキズの幅及び深さと圧縮強度との関係を示したものである。図によれば、ひっかきキズの幅と深さは、コンクリートの強度レベルが低くなるにつれて広く深くなる。また、同じ強度レベルでは、水中養生を行った供試体の方が広く深くなる傾向になった。

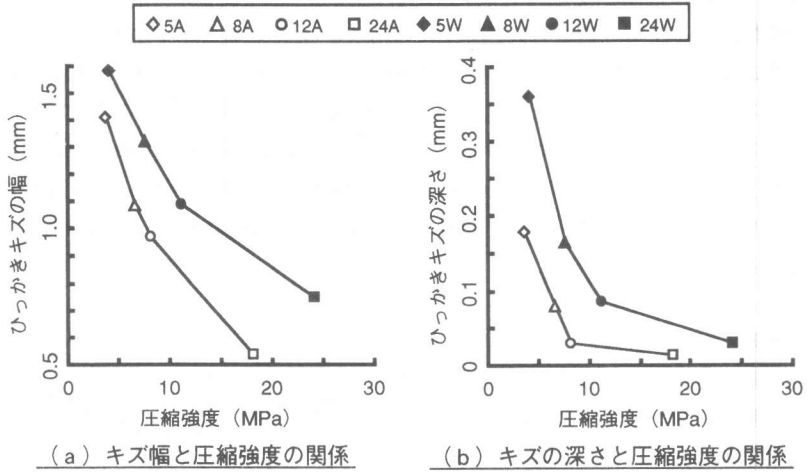


図-4 ひっかきキズ幅及び深さと圧縮強度の関係

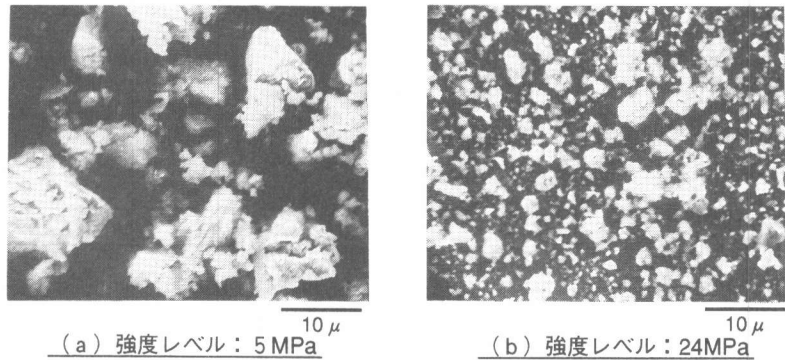


写真-2 付着粉の電顕写真 (屋外暴露、材令28日)

一方、硬度棒に付着する粉体については、同じ強度レベルのコンクリートの場合、目視調査で観察した限りでは、屋外暴露した供試体は水中養生した供試体に比べて粉体量が半減する傾向にあった。また、養生方法に関わらず、5 MPaレベルのコンクリートでは、12 MPaレベルのコンクリートに比べて粒体の寸法は大きめで量も多めであった。参考として、強度レベルが5 MPaと24 MPaの屋外暴露供試体について、付着粉の電顕写真を写真-2に示す。

表-5 ひっかき試験結果の概要

影響要因	ひっかきキズ		棒への付着粉	
	幅	深さ	大きさ	量
強度 (低→高)	↘	↘	↘	↘
養生方法 (屋外→水中)	↗	↗	↗	↗

これらのひっかき試験結果を定性的に把えるため、諸量の傾向を表-5にまとめて示す。

3. 4 反発硬度試験

これまでに提案された反発硬度を用いた主な強度推定式の比較例を図-5 [7]に示す。図からも明らかなように、低強度レベルのコンクリートに着目した研究は、ほとんどなされておらず、データの測定範囲は、およそ15 MPa以上であることが多い [3]。

本実験では、N型及びP型シュミットハンマーの適用性について調べた。材齢28日の圧縮強度と

反発硬度の関係を図-6に示す。なお、図中には、日本材料学会の強度推定式 [3] による計算値 (単位は、 kgf/cm^2 をMPa単位に換算してある) を併示してある。それぞれの推定式を以下に示す。

・ P型シュミットハンマー : $F_c=7.39R-166.7$ (材料学会) ----- (1)

・ N型シュミットハンマー : $F_c=13R-184$ (材料学会) ----- (2)

ここに、 F_c : 推定圧縮強度、 $R=R_0+\Delta R$ 、 R : 補正後の反発硬度、 R_0 : 実験値、 ΔR : 補正值

N型シュミットハンマーによる強度推定値を示した図-6(a)中には、養生方法を考慮した補正値も併示してある。一方、P型シュミットハンマーによる強度推定については、養生方法に対する補正方法が提案されていない。ここでは、N型シュミットハンマーの補正方法を参考にして、(b)図に示すように実験値 R_0 に補正值 ΔR (ここでは、5~10) を割り増した。

図(a)によれば、N型シュミットハンマーを用いた場合、材料学会式をそのまま適用しても低強度コンクリートの強度をほぼ推定できそうである。ただし、屋外暴露供試体については若干誤差が大きい。一方、(b)図によれば、P型シュミットハンマーを用いた場合にも、材料学会式をそのまま用いることにより屋外暴露した供試体の強度は、比較的精度よく推定された。また、水中養生を行った供試体については、図中に示したように補正值 ΔR を加えることにより、かなり精度よく強度が推定できるものと考えられる。

3. 5 超音波速度試験

超音波速度法

は、ひっかけ試験や反発硬度に比べると試験の難易度が若干高く、目視調査に付随した形で行うことは難しい。ここでは、低強度コンクリートの特性を知るための参考値として超音波速度を調べることにした。本実験で得

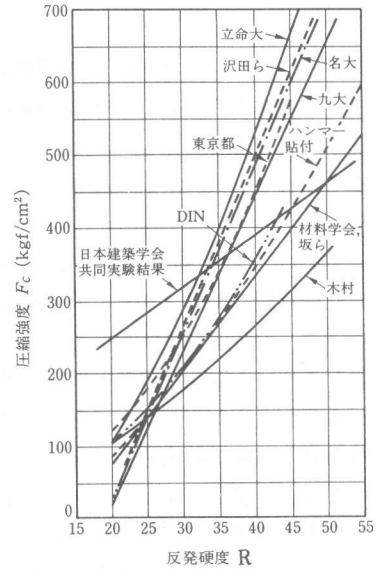


図-5 各研究者による圧縮強度と反発硬度の関係

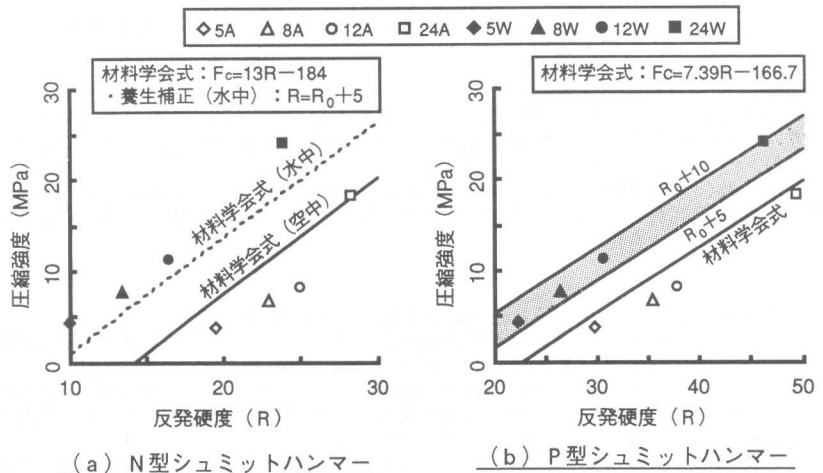


図-6 圧縮強度と反発硬度の関係

られた圧縮強度と超音波速度の関係を図-7に示す。なお、図中には本実験結果に対する回帰式と相関係数(CR)を併示してある。図によれば、水中養生と屋外暴露した供試体の超音波速度には差が見られたが、それぞれの養生方法については、両者の間に強い相関性が見られる。したがって超音波速度法は、低強度コンクリートを見極める手段として十分有用と考えられる。

4. まとめ

低強度(劣悪)コンクリートを現場で見極める手段を得ることを目的として一連の実験を行い、以下のような知見を得た。なお、本研究で取り扱った試験方法を簡易なレベルから順に並べると以下になる。

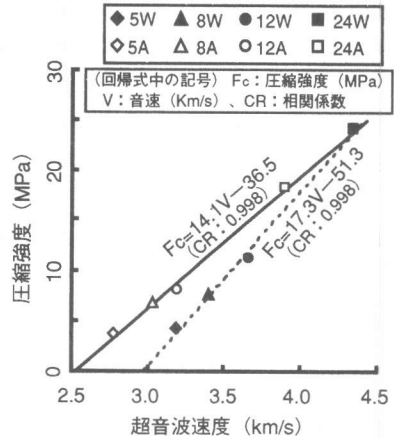


図-7 圧縮強度と超音波速度の関係

目視 → ひっかき試験 → 反発硬度 → 超音波速度 (必要があれば)

- 1) 硬度棒を用いてコンクリート表面をひっかいた場合、ひっかきキズおよび付着粉の様子は、コンクリート強度および養生方法によって異なる(図-4、写真-2、表-5)。
- 2) コンクリートの圧縮強度と反発硬度との間には、低強度レベルにおいてもかなり良い相関性が見られた。また、シュミットハンマーとしてN型及びP型のいずれを用いた場合でも、日本材料学会の強度推定式をそのまま用いることによって、ある程度の推定精度が得られた(図-6)。ただし、P型シュミットハンマーを用いた場合には、水中養生を行ったコンクリートについて、何らかの補正が必要であり、ここでは、N型に準じて反発硬度の補正值(ΔR)を与えることにより、強度推定を行った(図-6(b))。
- 3) 極めて低強度レベルにおいても、コンクリートの圧縮強度と超音波速度の関係は、比例関係にあった(図-7)。

以上より、限られた実験データではあるが、本研究結果によれば、耐震診断の第一段階で行う建物の目視調査のレベルでひっかき試験を導入することも有効ではないかと考えられる。

[謝辞]

本研究を行うにあたり、全般に渡り、ご指導頂いた谷川恭雄先生(名古屋大学・教授)、劣悪コンクリートを発見することの重要性を議論して頂いた岩瀬文夫氏((株)総合コンクリートサービス代表取締役)、電子顕微鏡撮影にご協力下さった中村昇二技術官(三重大学工学部)・中川浩希技術官補(同)、及び実験全般にご協力を得た嶋崎忠志君(三重大学工学部建築学科卒業生)に謝意を表します。なお本研究費の一部は、(財)日本建築センターの平成9年度「岸谷国際建築材料防火技術研究基金」によったことを付記する。

[参考文献]

- [1] 柏忠二編:コンクリートの非破壊試験法、富士物産(株)、1981。
- [2] コンクリートの非破壊試験法研究委員会:コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、1991。
- [3] コンクリートの非破壊試験法研究委員会:コンクリートの非破壊試験法に関する各種規準(試案)、コンクリートの非破壊試験法委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1992。
- [4] 日本コンクリート工学協会:コンクリート便覧-第2版-、1996。
- [5] 和藤浩、畑中重光:劣悪コンクリートに関する基礎的研究、1996年日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、pp.513-514、1996。
- [6] 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1996。
- [7] 谷川恭雄、他:構造材料実験法-第2版-、森北出版、1992。