

まだ固まらないコンクリートの品質判定法に関する研究 (その1)

——塩酸を利用した水セメント比測定法(塩酸溶解熱法)の検討——

喜 田 大 三
齋 藤 裕 司

Judgment of Acceptability in Quality Control of Fresh Concrete (Part 1)

—Application of Hydrochloric Acid Method for Determination of Water-Cement Ratio—

Daizo Kita
Hiroshi Saito

Abstract

This report describes application of the hydrochloric acid method to determine the water-cement ratio of fresh concrete. The following results were obtained in laboratory and field tests:

- (1) Water-cement ratios can be determined in the laboratory within measurement errors of 2%.
- (2) About 25 minutes are required to measure one sample and it will be necessary to shorten the time for practical use in the field.
- (3) Water-cement ratios of fresh concretes vary continuously even on the same job and this is accompanied by variations in concrete strength.

概 要

現場で早期に生コンクリートの水セメント(W/C)比を測定する方法を確立するために、塩酸溶解熱法に着目し、室内実験および現場実験を通してその適用の可否を調べた結果、以下のことが判明した。

- (1) 室内実験によれば、本測定法は測定誤差として2%以内と精度よくかつ正確にW/C比を測定できる。
- (2) 本測定法は測定に約25分を必要とし、現場で実用化するには更に短縮する必要がある。
- (3) 同一現場においても生コンクリートのW/C比はレミコン車ごとに変動し、それに伴ってコンクリート強度も変動している。

1. まえがき

通常の現場におけるコンクリートの品質管理は、打設直前に採取したサンプルからスランプおよび空気量を測定するとともに、圧縮強度用供試体を作成して標準水中または現場水中養生を行なって、所要材令経過後の強度発現を確認するという方法がとられている。しかしながら、このような管理法では結果が判明するまでに相当長い期間を要するという欠点があり、このため早期に所要強度の発現を推定する試験法の開発が切望されてきた。従来から各種の方法が提案されているが、大別すると促進養生による強度試験法¹⁾と強度との密接な関係が確かめられている水セメント(W/C)比を測定する方法とがある。品質管理の本来の観点か

らすれば、コンクリートを打設する前に強度推定ができる方法がより一層好ましいわけで本研究は生コンクリートのW/C比を現場で迅速・簡単に測定する方法の開発を意図してはじめられた。

生コンクリートのW/C比の測定方法についてはこれまでに数多くの方法が紹介されているが、その主なものは洗い分析法^{2,3)}、比重計による方法^{4,5)}、コンクリートの比重を測定する方法⁶⁾、塩酸を利用した方法⁷⁾、化学分析による方法⁸⁾、および放射線を利用する方法⁹⁾などがある。そこで、これら各種の方法について測定時間、現場での操作性、必要とする装置、および測定精度の点に特に注目し比較検討したところ、現在の骨材事情をも考慮すると、骨材中の泥分の影響を受けない神田氏の開発した塩酸を利用した方法(塩酸溶

解熱法) が最も実用性が高いと判断された。本報告は塩酸溶解熱法による W/C 比の推定実験を室内ならびに現場において実施し、推定の精度、扱いやすさなどについて調査した結果を述べたものである。

2. 測定原理と測定手順

本測定法の原理と測定手順の詳細は神田氏の報告⁷⁾を参照してもらうことにしてここではごく簡単に説明する。

均一に練りまぜられたコンクリートの水セメント(W/C)比は分離を生じないかぎり、一様に分布していると考えられるので、コンクリートからふるい分けしたモルタル試料の W/C 比でコンクリートの W/C 比を表わすことができる。そこで、本測定法ではコンクリートから抽出したモルタル中のセメント量(C)ならびに水量(W)をそれぞれ求め W/C 比を算出する。

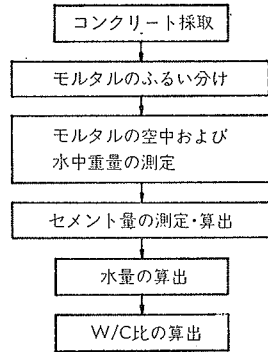


図-1 測定手順

C はモルタルに一定量の水を加えたモルタル希釈液に塩酸を加えてセメントを溶解し、その際の反応熱が C と直線関係にあることに基づいて次式から算出する。

$$C = A \cdot \Delta T - B \quad \dots\dots(1)$$

ここで ΔT は反応後の最高温度(T)と反応前の塩酸とモルタル希釈液の温度から求まる基準温度(T_0)との差($T - T_0$)であり、AおよびBは規定のモルタル試料を使用し、実験で求める定数である。

一方、Wは上記のCと採取したモルタルの空中重量(M)および水中重量(M_w)をもとに、セメントの比重(ρ_c)ならびに細骨材の比重(ρ_s)をそれぞれ既知として次式から算出する。

$$W = M - \left\{ (M_w - C \times \frac{\rho_c - 1}{\rho_c}) \times \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} + C \right\} \quad (2)$$

このようにして、(1)と(2)式から W/C 比を算出することができる。

上述の原理に基づいて、本測定法では図-1に示す測定手順に従って W/C 比の測定を行なう。

3. 室内実験

3.1. 実験の概要

本測定法を現場で実用化させるための装置の改良ばかりでなく、測定法自身についても室内実験的に検討を行なった。その結果、セメントの銘柄による差、練

り置き時間と混和剤の影響に関しては神田氏の報告⁷⁾と類似の結論が得られ比較的短時間(約25分)で、簡単にしかも精度よく W/C 比の測定ができることが確認できた。

ここでは紙面の都合上、本測定法の精度を調査するため行なった配合の明らかな試料についての検討(実験I)ならびに測定者の経験の有無による影響(実験II)の結果のみについて説明する。

3.2. 実験方法

実験Iでは、骨材を表乾状態に調整した後、表-1に示す配合表にもとづいて、各材料を正確に計量し、W/C比を異にするコンクリート試料をそれぞれ5l作成した。そして、各試料の W/C 比を本測定法の経験者3名でそれぞれ3回測定した。実験IIでは、業者から取りよせた同一バッチのコンクリート試料の W/C 比を経験者6名と未経験者6名で同時に測定した。

なお、当然のことながら、各実験では複数の測定装置を使用した。いずれも同一仕様のものである。

試料 No.	水セメント比(%)	スランプ [cm]	水 [g]	セメント [kg]	細骨材 [kg]	粗骨材 [kg]
1	45.0	12	891	1.98	3.04	5.86
2	45.0	18	995	2.21	3.03	5.43
3	55.0	18	953	1.73	3.52	5.43
4	65.0	12	860	1.32	3.76	5.79
5	65.0	18	942	1.45	3.87	5.36
備考				チチブポルトランド	富士川産 > 2.5mm	富士川産 > 25mm

表-1 供試コンクリートの配合

3.3. 実験結果と検討

〔実験I〕: 配合の明らかな試料についての検討

W/C 比を異にする各試料について測定した結果を表-2に示す。

各試料の測定値ごとに $\bar{x} - R$ 管理図によってそれぞれの信頼性を検定、確認した後、以下の検討を行なった。

(1) 測定結果に及ぼす個人差とスランプの差

表-2の結果に基づいて、個人差を検討するため、スランプが18cmでW/C比を異にする試料に対する3名の測定値の平均値を、また、スランプの差を検討するため、W/C比が45および65%で、それぞれのスランプが12および18cmと異なる試料に対する測定者Aの平均値をそれぞれ算出し、それらの有意差を一元配置法によって検定した。そのための分散分析表を表-3に示す。その結果、個人差については、各試料について算出した F_0 はいずれも $F(2, 6, 0.05)$ 以下となり、3名の測定値間に有意差は認められなかった。したがって、測定結果に及ぼす経験者間の個人差はないと判定したが、このことは実験IIでもふれる。

つぎに、スランプの差についてはスランプを異にす

試料 No.	配合水セメント比[%]	スランブ [cm]	測定した水セメント比[%]									測定値の平均 [%]	標準偏差 [%]	95%の信頼区間 [%]	変動係数 [%]
			測定者 A			測定者 B			測定者 C						
1	45.0	12	43.7	45.4	45.1	—	—	—	—	—	—	44.7	0.90	—	2.0
2	45.0	18	45.3	44.5	44.7	44.6	45.5	44.8	45.9	45.5	45.8	45.2	0.51	44.8~45.6	1.1
3	55.0	18	55.9	56.0	54.3	55.9	57.2	56.0	53.9	55.7	55.2	55.6	0.96	54.6~56.4	1.7
4	65.0	12	65.4	66.0	65.7	65.8	66.7	65.6	65.1	64.7	66.5	65.7	0.66	—	1.0
5	65.0	18	64.4	65.4	66.6	65.1	66.1	66.6	65.9	64.8	66.8	65.7	0.90	65.0~66.4	1.4

表一 2 配合の明らかなコンクリート試料のW/C比の測定結果

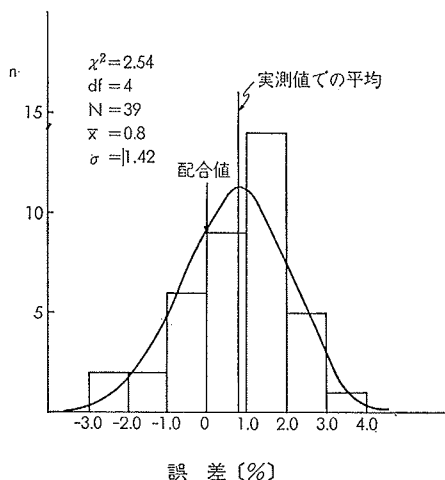
試料No.	要因	S	φ	V	Fo	備考
2	個人差	1.42	2	0.71	4.73	W/C;0.45 s ℓ;18cm F(2,6,005); 5.41
	誤差	0.88	6	0.15		
3	個人差	3.76	2	1.88	2.65	W/C;0.55 s ℓ;18cm
	誤差	4.26	6	0.71		
5	個人差	0.016	2	0.008	0.007	W/C;0.65 s ℓ;18cm
	誤差	6.40	6	1.07		
1,2	スランブ差	0.163	1	0.163	0.352	W/C;0.45 s ℓ;12,18cm F(1,4,0.05); 7.71
	誤差	1.85	4	0.463		
4,5	スランブ差	1.14	1	1.14	3.68	W/C;0.65 s ℓ;12,18cm
	誤差	1.55	4	0.31		

表一 3 個人差ならびにスランブの差を検定するための分散分析表

る試料の平均値間の有意差は認められず、スランブの差異が測定結果に影響しないと判定した。このことは単にコンクリートからモルタルを抽出する際の作業性の差異が測定結果に影響しないことを示しているばかりでなく、モルタル中のセメントと細骨材の比率が多少異なっても測定値は影響されないことを示している。この理由は細骨材の比熱が約 0.2cal/g と小さいためと考えられる。

(2) 測定の正確さと精度

本測定法の測定精度を明らかにするため、(1)で述べた結果に基づいて、すべての測定値についてその誤差〔(実測値-配合値)/配合値×100(%)〕を算出し、その分布と配合値の関係を検討した。その結果を図一2



図一 2 実測値の誤差の分布

に示す。

同図に示すように、誤差の分布は配合値を中心とはせず、+0.8% の位置に中心を持つ正規分布である。そこで、この分布中に配合値が入る確率密度を算出したところ、誤差の範囲が±2%では0.7799とかなり高いことが判明した。±2%の誤差をW/C比のずれとして表現すると、配合値からのずれが一番大きくなる65%(W/C)でも±1.3%(W/C)となり、本測定法によってかなり高い精度で正確にW/C比の測定ができることが明らかとなった。

〔実験Ⅱ〕：測定者の経験の有無による影響

同一試料のW/C比を本測定法の経験者6名と未経験者6名とで同時に測定した結果を表一4に示す。これから明らかなように、経験者の測定値は63.9~65.0%の間に分布し、その標準偏差は0.44%と小さく非常に良好な結果を示した。一方、未経験者の測定値は64.0~67.0%の間に分布し、標準偏差は1.03%とやや大きくなったが、この理由は未経験者の6ヶの測定値の内1ヶだけ67.0%とやや大きな値を示したためである。したがって、それぞれの平均値は経験者で64.5%、未経験者で65.1%と経験者に比べてやや大きな値を示したが、検定の結果、両平均値間の有意差は認められなかった。

以上の説明から明らかなように、同一試料のW/C比を多人数で同時に測定したときの精度は標準偏差として0.5%以内と非常に高く、しかも経験の有無にあまり左右されないことが判明した。

	測定水セメント比[%]						平均値[%]	標準偏差[%]
経験者	63.9	64.0	64.4	65.0	64.0	65.0	64.5	0.44
未経験者	64.0	64.4	67.0	65.0	64.0	65.0	65.1	1.03

表一 4 同一試料の経験者と未経験者による測定結果

4. 現場適用例

4.1. 実験の概要

前述したように、室内実験によって本測定法の精度が高くかつ正確であることが確認できたので、本測定法を現場で実施した際の問題点を明らかにし、今後の

改良に役立つこと、および現場で実施したときの測定精度を明らかにすることを意図し、開発途中の不完全な装置であるが、都内およびその近郊の5現場で生コンクリートのW/C比の測定を延55回実施した。その結果、本測定法の現場への適用性や測定精度が明らかになったばかりでなく、W/C比を測定することの意義が明らかになったので以下に説明する。

4.2. 実施方法

各現場の荷卸し地点で、レミコン車から採取した同一試料のW/C比を3名で同時に測定した。3名の測定者の内2名はすでに本測定法を数多く実施した経験者であり、他の1名ははじめて実施する未経験者である。また、同時に同一試料のスランプと空気量を測定するとともに、圧縮強度用供試体(φ10×20cm)を各2本ずつ作成した。この供試体は翌日から20℃の標準水中養生を行なった後、圧縮強度を測定した。

なお、測定対象とした試料はセメントに普通ポルトランドセメント、または早強セメントを、骨材に川砂利・川砂を使用した普通のAEコンクリートである。

4.3. 適用結果と検討

(1) 現場への適用性

試作器は操作が簡単で特に熟練を必要としないため、現場の未経験者が容易に測定でき、また、測定に必要な給排水と電気設備は特殊なものでなく、現場の設備で十分であるので、本測定法を現場で特に問題なく実施できた。

ところで、本測定法を現場で実用化する際の唯一の欠点はその測定時間である。すなわち、試料採取から結果が判明するまでに約25分を要し、繰返し実施する場合は次の測定準備を考慮して1サイクルに約40分が必要となる。

打設前にコンクリートの品質を判定し、所定の強度発現が危ぶまれるものは打設しないようにする立場では、測定は5～10分程度で完了するのが望ましい。したがって、現場に到着したコンクリートに現在の方法をそのまま適用するのでは時間の面ではまだ不十分である。しかし、本項の(3)で後述するように、品質管理の補助手段としての利用は可能で、そのための省力化と測定時間の短縮をさらに計る必要がある。

(2) W/C比の測定値の変動幅

5現場で、合計165ヶの試料を得たが、それぞれは配合、測定者、測定場所および測定日などを異にするため、すべての測定値を同一次元で比較することはできない。したがって、現場における測定精度を検討する際、各現場で同一試料を3名で測定したときの変動幅(R; 最大値と最小値の差)の分布を検討すること

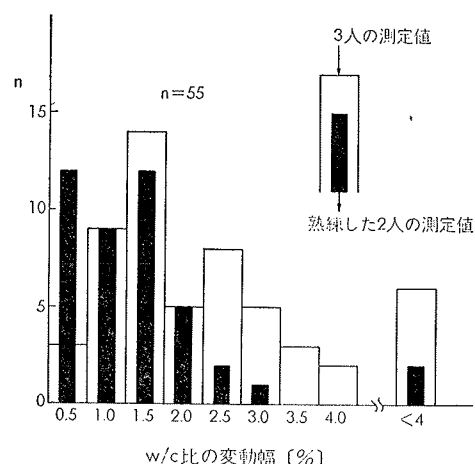


図-3 W/C比の変動幅の分布

とし、図-3にそのヒストグラムを示す。

同図に示すように、3名の測定値間のRは1.0～1.5%の範囲にピークを示し、それ以下およびそれ以上の範囲では徐々に減少する分布を示した。一方、同図に併記したように、経験者間のRはそれが小さい範囲で数多く、大きくなるに伴って減少する分布を示した。このように、3.3に前述した結果とは異なって、経験者のみと、未経験者も含めた場合とのRの分布に差異が認められた。それぞれの分布状態ならびにその差異の解析は非常に興味ある問題であるが、本調査の主旨ではないので、ここでは詳述することはさけた。

上述のように、測定者の経験の有無によって測定値のRの分布状態は異なるが、未経験者を含めた場合のRの70%以上はW/C比として2.5%以下で、経験者のそれは1.5以下と良好な結果を示した。この程度のバラツキは十分実用に値いすると考えられる。

なお、Rが4%以上示した場合が全体の10%存在するが、この主要原因を究明したところ温度測定の誤りであることが判明している。

(3) C/W比と強度(F₇, F₂₈)との関係および同一現場内でのW/C比の変動

各現場ともほぼ類似の結果が得られたので、ここではその代表例としてA現場(普通ポルトランドセメント)とB現場(早強セメント)の結果を説明する。

図-4, 5にA, B両現場におけるC/W比とF₂₈(F₇)の関係をそれぞれ示す。両図に示したように、両現場ともC/WとF₂₈(F₇)とはよい相関関係を示し、C/W比が小さく、いかにすればW/C比が大きくなるにしたがってF₂₈(F₇)は小さくなっている。そこで、両現場について両者の回帰式を算出したところ、A現場でF₂₈=337C/W-318(相関係数0.83)、B現場でF₇=237C/W-142(相関係数0.88)となった。

また、注目すべきことは、現場に搬入される生コンクリートの W/C 比が大きく変動し、しかも配合値を中心として分布するのでなく配合値より大きめな分布を示すことである。この分布に関する詳細な解析はデータ数が少ないため今回できなかったが、この点も興味ある問題なので、今後検討を要する。

上述の説明から明らかなように、本実験結果から現場に搬入される生コンクリートの C/W 比はレミコン車ごとに変動し、しかもそれに付随して強度も変動していることが判明した。そして、従来の品質管理法では説明できなかった強度の変動が W/C 比の変動と強く関連していることがわかる。さらに、 F_c に満たない試料の W/C 比は配合値よりかなり大きいことから、打設前に W/C 比を測定し、異常に大きな値を示すものは F_c を下回る可能性があるとして打設しない手段がとれる。このように、品質管理上 W/C 比を早期に測定する意義が確認できた。なお、實際上、打設不可と判定する基準を設定するには、今回の実験結果のみでは不十分であり、さらに同様の実験を数多く行なって検討する必要がある。

5. まとめ

現場で早期に生コンクリートの W/C 比を測定する方法を確立するために、塩酸溶解熱法に着目し室内実験および現場実験を通してその適用の可否を調べた結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 配合の明らかな試料の W/C 比を測定したところ、本測定法は個人差およびスランプ差に影響されず、測定精度は配合値からのずれとして $\pm 1.3\%$ (W/C) とかなり高く、かつ正確である。
- (2) 同一試料の W/C 比を経験者 6 名と未経験者 6 名で同時に測定した際の測定精度は標準偏差として $\pm 0.5\%$ と非常に高く、しかも経験の有無に左右されない。
- (3) 現場で実用化するには現行の測定時間の 25 分を装置の改良などによって更に短縮する必要がある。
- (4) 各現場で、同一試料の W/C 比を経験者 2 名と未経験者 1 名で同時に測定したところ、経験の有無によって測定値の変動幅 (R; 最大値と最小値の差) の分布状態は異なり、未経験者を含めた R の 70% 以上は W/C 比として 2.5% 以内で、経験者のそれは 1.5% 以内と良好な結果が得られた。
- (5) 同一現場内の W/C 比はレミコン車ごとに変動し、しかも配合値より大きめに分布していたが、各現場の

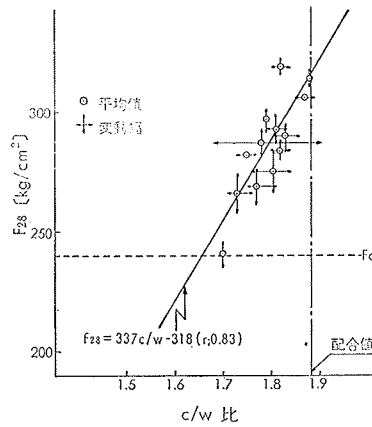


図-4 C/W と F_{28} の関係 (A現場)

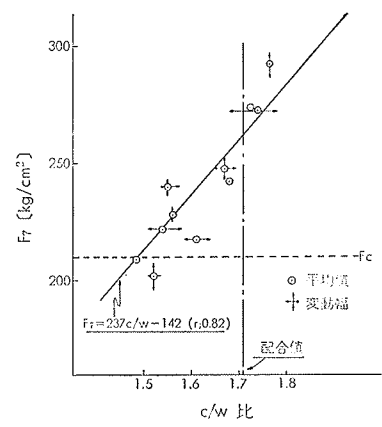


図-5 C/W と F_7 の関係 (B現場)

W/C 比と強度の間にはよい相関関係が認められ、同一現場における強度変動の主原因の 1 つは W/C 比の変動によるためである。

おわりに、材料研究室の久保田、中根両職員と、現場測定に協力して下さった本社のコンクリート品質管理班、建築本部工務部、ならびに現場の各職員に対し、ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 十代田ほか：早期品質判定のためのコンクリートの強度促進試験，セメント・コンクリート，No. 280，(1970)
- 2) W. M. DUNAGAN: A method of determining the constituents of fresh concrete, Proc. Jour. of A. C. I. Vol. 26, (1930)
- 3) R. A. KENNY: Analyzing fresh concrete, concrete, (1972)
- 4) 水野：まだ固まらないコンクリートの水セメント比の一試験法，コンクリートライブラリー，No. 38，(1974)
- 5) 常山ほか：比重計によるセメントの定量，鉄道技研報告，No. 134，(1960)，No. 221，(1961)
- 6) R. LACKNER: Die Bestimmung des Wasserzementwerts an Frischbeton mit dem Luftpiknometre, Betonstein Zeitung, Vol. 31, No. 4, (1971)
- 7) 神田：まだ固まらないコンクリートの水セメント比の測定法，セメントコンクリート，No. 300，(1972)
- 8) R. T. KELLY: Rapid analysis of fresh concrete, Part 1, Concrete, (1968)
- 9) P. A. HOWDYSHELL: Rapid testing of fresh concrete, Army Construction Engineering Research Laboratory, (1975)