

報告 コンクリート構造物の耐久性能を考慮したコンクリートの現場品質管理試験

大岡 督尚^{*1}・今本 啓一^{*2}・下澤 和幸^{*3}・田村 博^{*4}

要旨: 本研究は、コンクリート構造物の耐久性能評価に立脚したコンクリートの品質管理方法を提案することを目的としている。本報では、現場において生コンクリートの単位水量を管理した結果、及びコンクリート躯体表層部の透気性を簡易な試験によって評価した結果について述べる。コンクリート構造体の耐久性能を確保するための、現場品質管理における一つのスタイルを提案するとともに、今後の課題を述べる。

キーワード: 耐久性, 品質管理, 単位水量, 統計理論, 透気性, 簡易試験

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性に及ぼす重要因子として、コンクリートの水セメント比が挙げられることは言を待たない。このため、特に変動が大きいとされるコンクリートの単位水量を現場において推定する方法が提案され^{1), 2), 3), 4)}, 一部実用に供されている^{5), 6)}。しかしながらその試験の多く^{1), 2), 3)}は少量のサンプルを対象とするバッチ式である。また、現場試験において得られたデータの位置付けと管理基準の根拠が不明確な場合が多い。

一方、現場においてコンクリートの単位水量(間接的に、水セメント比)を管理する目的は、上述したように、コンクリート構造体の耐久性の確保にあるが、その耐久性能にはフレッシュコンクリートの打込み・締固め方法、養生期間等多くの要因が関与する。すなわち、コンクリートの単位水量を管理することは、耐久的な構造体を得るための必要条件とはなり得るが十分条件とはなり得ない。単位水量を管理するにあたってはこの点を踏まえ、単位水量を管理した結果としての構造体コンクリートの耐久性を総合的に評価することが、近い将来、必要になってくるものと考え

られる。そしてその評価は極力、現場において簡易に実行できる試験方法に基づくことが望ましい。

筆者らは、以上のような考え方に基づいて、一つの提案をここに行うものである。すなわち、バッチ式という短所を有するが、簡便性及び精度の点において長所を有する高周波加熱乾燥法を現場の生コンクリート単位水量の推定試験に採用した。まず、同試験方法の誤差及びアジテータ車ドラム内における単位水量の変動を事前に調査した。ついで、現場において得られたデータの位置付けと管理基準値に統計学的根拠を与え、バッチ式の欠点を解消することを試みた。さらに、このような品質管理の下に構築されたコンクリート構造体の耐久性を、特に中性化抵抗性の観点から、現場において簡易に評価することを試みた。竣工検査の位置付けとして実施した。このための方法として、笠井らによって提案された方法を採用した⁷⁾。本報告は、これらを現場管理に適用した結果について検討し、コンクリート構造体の耐久性評価に基づく、現場品質管理試験の一つのスタイルを提案するとともに、今後の課題について述べるものである。

*1 東急建設(株) 建築エンジニアリング部 博士(工学) (正会員)
 *2 足利工業大学 工学部 建築学科 講師 博士(工学) (正会員)
 *3 (財)日本建築総合試験所 材料部 研究員 (正会員)
 *4 同上 部長 工博 (正会員)

2. 建物概要

管理対象とした建物は鉄筋コンクリート造打ち放し仕上げ4階建てであり、使用したコンクリートの使用材料及び調合は表1, 2に示す通りである。

表1 使用材料

セメント:C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16kg/l
細骨材:S	吸水率 2.33%, 表乾密度 2.59g/cm ³
粗骨材:G	吸水率 0.83%, 表乾密度 2.69 g/cm ³
混和剤:Ad	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤

表2 ベースコンクリート*の調合

品質基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	C W S G Ad				
		(kg/m ³)				
27	52.9	329	174	824	966	0.658

*ベーススランブ 15cm, 流動化剤により 18cm

3. 単位水量の目標値

水セメント比(間接的に単位水量)の目標値は、

図1に示すフローに従って設定する。

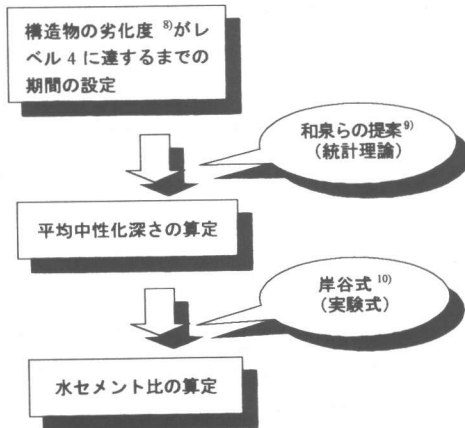


図1 水セメント比(単位水量)の算定フロー

本報においては、構造物の目標とする耐久性能を「供用期間100年において、劣化度4以下」と設定した。「劣化度4」は建築学会高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説において、「一部の部材に日常安全性に影響する放置し得ない劣化が生じ、中程度の補修・交換が必要となるレベル」として紹介されており、この段階の鉄筋腐食率は概ね10~20%であることが示さ

れている。

そこで本研究では、設定した鉄筋腐食率に対応するコンクリートの中性化深さを、以下の仮定に基づいて算定した。

- ① 鉄筋腐食は中性化のみによって生じ、中性化深さが鉄筋かぶり厚さに達した時点で、鉄筋の腐食が発生するものとする。
- ② コンクリート中性化深さ・鉄筋かぶり厚さは平均値を中心に正規分布する。
- ③ コンクリート中性化深さの変動係数は、嵩らの研究¹¹⁾に基づき、0.4%とする。
- ④ 鉄筋の設計かぶり厚は40mmとし、その標準偏差は10mmとする。嵩らの既存建物の調査により、既存建物のかぶり厚さの標準偏差として15mmが示されているが¹¹⁾、本研究では新築建物を対象としている点を踏まえ、上記10mmを採用した。
- ⑤ 鉄筋腐食率は、和泉らによって提案されている図2の考え方に基づいて算定し⁹⁾、その値は10%とする。

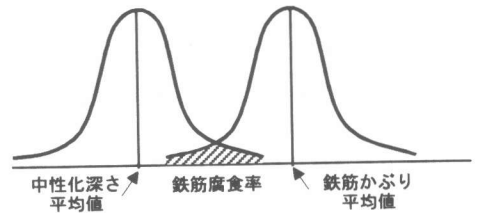


図2 鉄筋腐食率の算定概念

以上の考え方において、設計かぶり厚さ40mmの構造物において鉄筋腐食率が10%以下となるためのコンクリートの中性化深さは、平均で22.7mmとなる。供用100年後、コンクリートの中性化深さがこの値を満足するための水セメント比は、岸谷式¹⁰⁾に基づいて算定した場合、51.5%となる。さらにJASSSにおいて、AEコンクリートとした場合はこの値に4~5%加えることとなっている。本対象構造物のコンクリートはAE減水剤を使用しており、ここでは5%を加え、水セメント比56.5%を目標値とする。この場合の単位水量は、単位セメント量を一定とすると

185.9kg/m³となる。よって、ここでの単位水量の目標値は185 kg/m³とする。なお、岸谷式を用いて水セメント比を算定する過程において、本来ならば式の誤差も考慮すべきであるが、本報告ではこれを考慮せず、誤差がないものとしている。現在一般に使用されているコンクリートに対する精度についての検討が不足しているためであり、この点については今後検討が必要であると考えらる。

水セメント比によってコンクリートの品質基準強度が満足されることは、対象プラントの圧縮強度—セメント水比に関する経験式により確認されている。

4. 単位水量推定値の位置付けと管理基準

3章で述べた単位水量の目標値を現場管理に適用するためには、単位水量推定試験方法の誤差及びアジテータ車内の単位水量のばらつきを事前に把握し、現場における推定値の位置付けを統計的に明確にした上で、推定値が目標値を上回る確率がある一定以下になるように管理基準を設定する方法が合理的と考えられる。

4.1 試験室における単位水量推定精度

本研究では、コンクリートの単位水量推定手段として高周波加熱乾燥法を用いた。表1に示す材料を用い、単位水量を変化させた場合の計画値と推定値の比較を図3に示す。

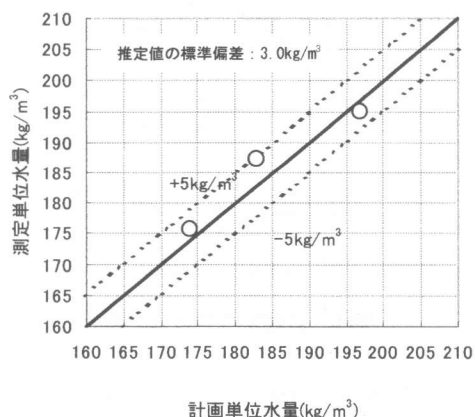


図3 計画値と推定値の比較

コンクリートの計画単位水量は、実機における単位水量の変動が細骨材の表面水率の変動に依存すると仮定し、単位水量と細骨材量の和が一定の状態、図3に示すように3水準に設定した。

図に示すように、本試験方法は概ね計画単位水量を捉えることができている、その推定値の標準偏差は3.0kg/m³である。そこで、ここでは、本試験方法の推定値の標準偏差を3.0 kg/m³と設定することとした。

なお、本試験方法における練り置き時間と推定値の変化を表3に示す。実験は計画単位水量を205kg/m³とした調査で実施した。表に示すように、練り置き時間60分程度までは推定値に影響を及ぼさないことが確認され、以降においては、この影響はないものとして検討を進めることとする。

表3 試験結果

練り置き時間 (分)	単位水量推定値 (kg/m ³)	計画単位水量 (kg/m ³)
0	204.6	205
30	204.9	
60	204.9	

4.2 アジテータ車ドラム内の単位水量の変動

高周波加熱乾燥法は、少量のサンプルを対象とするバッチ式である。現場試験に本方法を適用する場合、本試験におけるアジテータ車ドラム内の単位水量の変動を把握する必要がある。ここでは、統計理論に基づき、複数回のサンプリングとその結果に基づく母集団標準偏差の推定を行い、ドラム内単位水量の変動を把握することを試みた。具体的には、設計単位水量174 kg/m³の生コンクリートを搭載したアジテータ車より、図4に示すように最初・最後とその間の計6回サンプルを採取し、母集団としての単位水量の平均値と標準偏差を危険率5%で推定した。図5は、サンプルの平均値と標準偏差が図中に示す値であると仮定した場合の、サンプル数に伴う母集団平均値と標準偏差の和 (V) の変化を示したものである。サンプリング数6回は、図5に基づき、現実的且つ満足のゆく精度で推定するための必要最小限の回数であると判断した。なお、本検討においては

4.1 節で述べた単位水量の試験誤差（試験方法における推定値の標準誤差）はないものと仮定している。

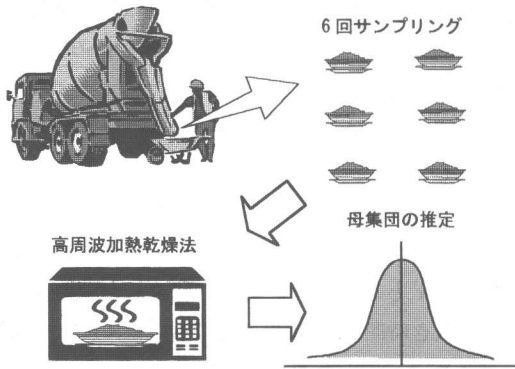


図4 母集団の推定方法

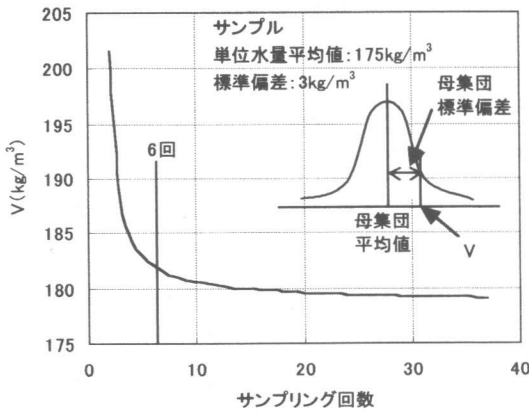


図5 サンプリング回数と推定値

表4 試験結果（実機試験調査）

測定 No.	単位水量推定値 (kg/m ³)	平均値, 母集団標準偏差	計画単位水量 (kg/m ³)
1-1	185.3	平均値 186.1 標準偏差 1.96 (kg/m ³)	174
1-2	187.8		
1-3	183.7		
1-4	185.0		
1-5	187.5		
1-6	187.3		
2-1	180.8	平均値 181.1 標準偏差 1.86 (kg/m ³)	174
2-2	181.5		
2-3	183.3		
2-4	182.2		
2-5	179.4		
2-6	179.1		
3-1	176.0	平均値 179.7 標準偏差 2.30 (kg/m ³)	174
3-2	179.5		
3-3	181.1		
3-4	180.3		
3-5	181.6		
3-6	179.7		

試験結果を表4に示す。以上より、各アジテータ車（母集団）の単位水量の標準偏差推定値は、No.1 で 1.96kg/m³、No.2 で 1.86kg/m³、No.3 で 2.30kg/m³であり、3 台の平均値は 2.04kg/m³となる。本研究では 2.0kg/m³ を用いて管理基準値を算定することとした。

4.3 単位水量管理基準値

4.1 節及び 4.2 節の事前検討を踏まえ、単位水量の管理基準値は図6に示す考え方で設定した。すなわち、試験対象とするコンクリートの単位水量は、推定された値（平均値の不偏推定値）を中心に、高周波加熱乾燥法が本来有する試験誤差とアジテータ車ドラム内の変動を合算した標準偏差を有する正規分布をなすものとし、その分布において、3章で述べた目標値を上回る確率を例えば5%以下とする。従って式(1)を満足することを前提として管理基準値を設定した。

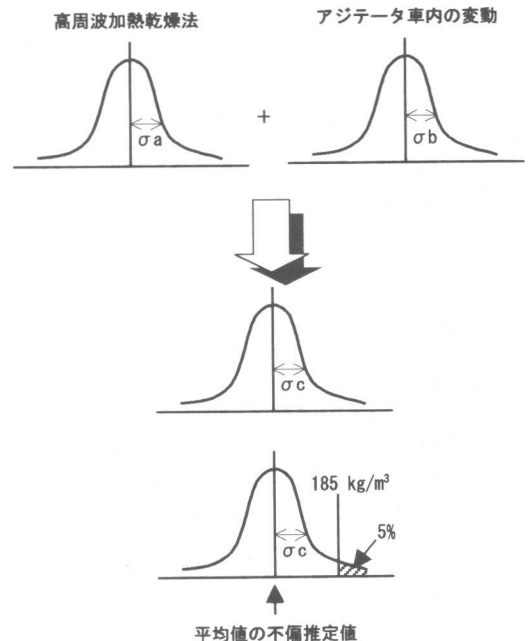


図6 管理基準値の設定概念

$$XL + 1.64 \sigma c \leq 185 \quad (1)$$

ここに、

XL : 管理基準値

$$\sigma c = (\sigma a^2 + \sigma b^2)^{0.5} : \sigma a = 3.0 \text{ kg/m}^3, \sigma b = 2.0 \text{ kg/m}^3$$

5. 管理試験結果

5.1 単位水量

単位水量の推定試験は、1,3 階部分の打設の際に実施した。試験結果を図 7 に示す。

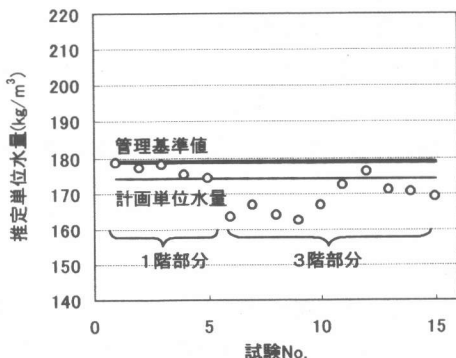


図 7 単位水量推定結果

図 7 に示すように、試験開始初期は単位水量がやや多い傾向にあるが、実測結果をプラントに逐次携帯電話を用いて報告し、細骨材率の表面水の補正によって単位水量を修正するフィードバックを行った。これにより、本試験方法による推定値を計画値に近づけることが可能になったものと考えられる。なお、図中の管理基準値は、4.3 節の検計で導出されたものであり、推定値はそれぞれ 1 回の試験値である。

5.2 圧縮強度

強度試験結果を表 5 に示す。

表 5 に示すように、コンクリートの圧縮強度は、品質基準強度を十分満足する結果となっている。

表 5 圧縮強度（現場水中養生材齢 28 日）

打設部分	強度 (N/mm ²)	品質基準強度 (N/mm ²)	備考 (スランブ(SL), Air)
1 階	37.2	27	SL:18.5cm, Air : 4.1%
3 階	35.1	27	SL:19.0cm, Air : 5.2%

6. 躯体表層部の透気性

6.1 試験の目的と概要

コンクリートの単位水量（間接的に、水セメント比）を管理する目的は、コンクリート構造体の耐久性の確保にあるが、その耐久性にはコンク

リートの打込み・締め方法、養生期間等多くの要因が関与する。従って、単位水量の管理は構造体の耐久性確保のための必要条件であるが、十分条件ではない。何らかの手段で、構造体そのものの耐久性を評価することが必要であると考えられる。本報告は、コンクリートの水セメント比と構造体の耐久性を定量的に結びつけることを目的とするのではなく、一必要条件を満足した上で最終的に耐久性能を評価する一過程を述べるものである。

ここでは、躯体の表層部の透気性を笠井らによって提案された簡易法⁷⁾に基づいて試験し、コンクリート構造体としての耐久性を評価することを試みた。試験の概要を図 8 に示す。また試験結果の評価方法を表 6 に示す。簡易透気速度は、圧力の変化に要する時間 T を基に、式(2)、(3)で定義される。

$$T \geq 10 \text{ (秒)}$$

$$\text{簡易透気速度} = (190 - 160) / T \quad (2)$$

$$T < 10 \text{ (秒)}$$

$$\text{簡易透気速度} = (250 - 100) / T \quad (3)$$

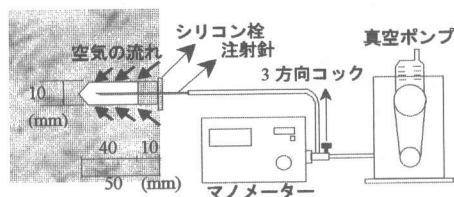


図 8 簡易透気性試験の概要⁷⁾

表 6 試験結果の評価方法⁷⁾

JASS 5 における 耐久性区分	(1)一般	(2)標準	(3)長期
対応する促進期間 26 週 の中性化深さ*1 (mm)	45.6 以下	31.0 以下	25.0 以下
簡易透気速度*2	7.8 以下	3.2 以下	2.3 以下

*1: 温度 20℃, 湿度 60%, CO₂ 濃度 5%で行った。

*2: 材齢 3ヶ月での評価

6.2 試験結果

試験状況を写真 1 に、試験結果を図 9 に示す。本建物は 2000 年 9 月～11 月にかけて施工されて

おり、型枠の存置期間は3日である。試験は打設後材齢1~2ヶ月で、壁高さ方向について実施した。試験の結果、躯体の耐久性区分はいずれも「長期」に相当するものと評価されている。本試験方法の現場適用にあたっては解決すべき課題も残されているが、躯体の耐久性を竣工段階で評価する上で、本簡易透気性試験は有効な手段であると考ええる。

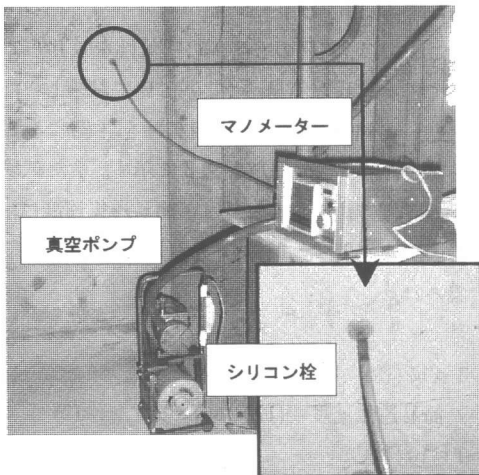


写真1 試験状況

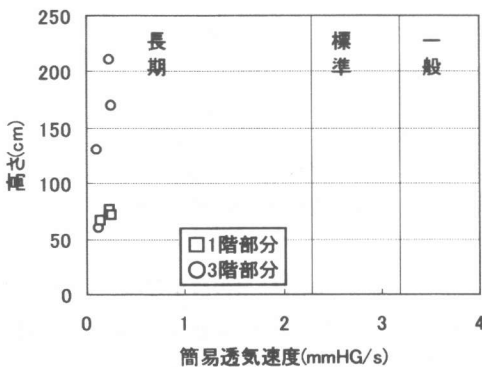


図9 簡易透気性試験結果

7. おわりに

現場においてコンクリートの単位水量を統計理論に基づいて管理した。さらに構造体耐久性の簡易評価方法とその適用結果について述べた。スランプ、空気量試験以外のこのような管理手法は、

信頼性の高い構造物を得る上で有効な手法と考えられる。今後の課題としては、以下のようなものが考えられる。

- ① 透気性試験において、躯体の含水率の影響・じゃんか等欠陥部の影響、打ち込み高さ方向の影響等を如何に評価するか。
- ② 現行の品質管理システムへ如何に導入するか。
- ③ 施工方法の影響を如何に定量的に評価するか。

謝辞

透気性試験を実施するにあたり、日本大学生産工学部 湯浅昇講師にご指導を賜りました。付して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 友澤 史紀ほか: 高周波加熱装置を用いたフレッシュコンクリートの単位水量簡易迅速試験方法の開発, 日本建築学会構造計論文報告集, No.400, pp.1-8, 1989.6.
- 2) 清水 昭之ほか: フレッシュコンクリートの水量推定のための簡易試験方法に関する研究(その1), 日本建築学会学術講演梗概集, 1989.8
- 3) 齋 充ほか: フレッシュコンクリートの単位水量迅速推定法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.385-390, 1997.6
- 4) 田村 博ほか: RI水分計によるコンクリートの単位水量連続モニタリング, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1103~1104, 1998.9
- 5) 黒島 毅ほか: 高強度コンクリートの製造時における単位水量を中心とした品質管理, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.439~440, 1992.8
- 6) 立松 和彦ほか: 実施工時におけるフレッシュコンクリートの単位水量管理結果およびその考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.367-372, 1999.6
- 7) 笠井 芳夫ほか: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法(その1)~(その2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.699~702, 1999.9
- 8) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 1991.7
- 9) 和泉 意登志ほか: 鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計による耐久性向上技術の提案, コンクリート工学年次論文報告集, No.6, pp.185-188, 1984.6
- 10) 岸谷 孝一: 鉄筋コンクリートの耐久性, 鹿島出版会, 1963.2.
- 11) 嵩 英雄ほか: 経年RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食, コンクリート工学年次論文報告集, No.6, pp.181-184, 1984.6
- 12) 高橋 啓郎ほか2名, 統計解析, 培風館.