

論文

[1112] 硬化コンクリートの配合推定方法

正会員○横山 滋 (秩父セメント 中央研究所)  
 藤本 泉 (秩父セメント 中央研究所)  
 高野 豊 (秩父セメント 中央研究所)

1. まえがき

硬化コンクリートの配合を推定することは、打設されたコンクリートの品質確認や構造物の耐久性診断等の観点から重要なことであり、特に単位水量は単位セメント量とともに打設されたコンクリートの品質を左右する最も重要な要因であるが、現在提案されているセメント協会方法[1]あるいはグルコン酸ナトリウム処理方法[2]などにおいても単位水量の推定誤差は大きいとされている。筆者らは、既に石灰石や海砂などのカルシウム分を多く含む骨材が使用された場合にも、酸可溶性シリカを指標として、コンクリート試料をぎ酸で溶解し、その溶液を誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (ICP) で分析することにより、容易に硬化コンクリートの単位セメント量および単位骨材量をよい精度で推定できることを示した。しかし、単位水量の推定ではセメント協会法に従いコンクリート供試体を2日間20℃水中に浸漬して吸水させた後、2日間105℃にて乾燥して、その吸水率と強熱減量から単位水量を求めたが、供試体の吸水が不十分であり、その影響が大きくよい結果が得られなかった[3]。

本報告では、簡易で精度のよい単位水量の推定方法を検討した結果、精度や所要時間などに関して満足できる一つの方法を見だし、前述のぎ酸で溶解してICP分析による単位セメント量推定方法[3]と組み合わせることによるコンクリートの配合推定方法を提案するとともに、本法に影響を与える要因と適用性について検討を行った。

2. 単位水量の推定方法

硬化コンクリートの単位水量の推定方法として、セメントの水和物に大きな影響を与えない常温で処理することとし、供試体試料に十分に吸水させるために、真空ポンプ (能力 $10^{-1}$ Pa程度)により脱気した後、水中に浸漬し吸水率を安定させる方法について検討した。

(1) 試験条件と方法

本試験においては、表-1に示す硬質砂岩、礫岩および普通ポルトランドセメントを用いてコンクリート供試体を作製した。またコンクリートの配合は表-2に示す。

コンクリート供試体は、コンクリートが1.5ℓとなるようにあらかじめ計量したセメント、骨材および水を入れて練り混ぜ、全量を10φx20cmのスチール製モールド缶に入れて密封し、材

表-1 使用材料の物理的性質および分析結果

	ig. loss		化学成分 (%)						最大寸法 (mm)	比重	吸水率 (%)	SiO <sub>2</sub> * (%)	備考
	500℃	1000℃	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO						
普通セメント	-	0.6	64.6	21.8	5.2	3.1	1.5	-	3.16	-	21.8	弊社普通セメント	
硬質砂岩	1.6	9.0	10.7	55.4	13.4	4.6	2.0	20	2.70	0.59	0.1	埼玉県、両神産	
礫岩	1.1	2.6	4.3	63.5	17.0	3.8	1.6	5	2.62	1.12	0.1	埼玉県、金沢産	
石灰碎石	0.1	42.3	54.8	0.8	0.3	0.1	0.7	20	2.70	0.32	0.0	埼玉県、叶山産	
石灰砕砂	0.2	42.3	54.7	0.9	0.3	0.1	0.7	5	2.62	1.05	0.0	埼玉県、叶山産	

\*ぎ酸0.5%-40分処理による溶解度

令3日で脱型して材令28日まで20℃室内養生した。なお一部、脱型時期を変えたものも作製した。養生後の供試体を図-1に示すように真空ポンプであらかじめ所定時間真空脱気し、真空状態を保ちながら注水した後大気圧に解放して所定時間水中に浸漬し吸水させた。吸水後の供試体については水中重量、表乾重量を測定し、その後105℃にて乾燥して絶乾重量を測定し、また結合水については500℃のig. lossから求め[4]、これらの関係より単位水量を算出した。

(2) 供試体の吸水条件の検討

コンクリート供試体の吸水条件は、真空ポンプでの真空脱気時間、注水後の脱気時間および水中浸漬時間の影響が大きいものと考えられる。

図-2はW/C=65%(W=163kg/m<sup>3</sup>)、45%(W=180kg/m<sup>3</sup>)の2配合、寸法10φx20cm、材令28日のコンクリート供試体を用い、注水後の脱気時間を1時間、水中浸漬時間を2時間とした場合の真空脱気時間の影響を示したものである。真空脱気時間が1時間以下と短い場合には吸水が不十分であり、またばらつきも大きい。しかし、1時間以上では真空脱気時間の影響を受けずほぼ一定となる。

図-3は真空ポンプでの真空脱気1時間の後、注水後の脱気時間に関するもので、この影響は比較的小さく、1時間で十分であることが分かる。

図-4は水中浸漬時間の影響を調べたもので、浸漬時間が1時間以下の場合には吸水は不十分であり、ばらつきも大きい。1時間以上6時間まではほぼ一定で安定し、それより長くなると大きくなって行く傾向にある。これは、真空状態を保ちながら注水し、水中浸漬したことから実質的に1気圧の圧力吸水となっており、微細な空隙や独立気泡にも徐々に浸水するものと考えられる。なお、浸漬時間が1時間以上6時間までの場合でも、推定水量は理論水量に対し

表-2 コンクリートの配合

単位水量(kg/m <sup>3</sup> )	W/C(%)	s/a(%)
163	65	48
	60	47
	55	46
170	65	47.5
	60	46.5
	55	45.5
180	55	45
	50	44
	45	43
185	50	44
	45	43
	40	42

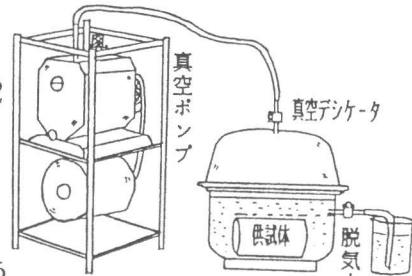


図-1 真空吸水装置

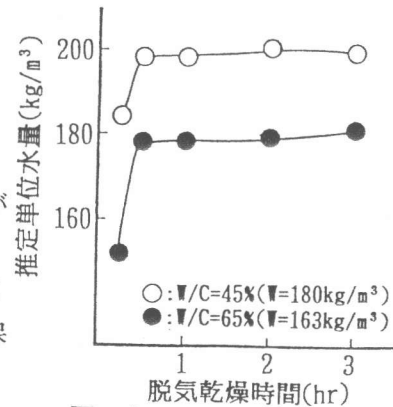


図-2 真空脱気時間の影響

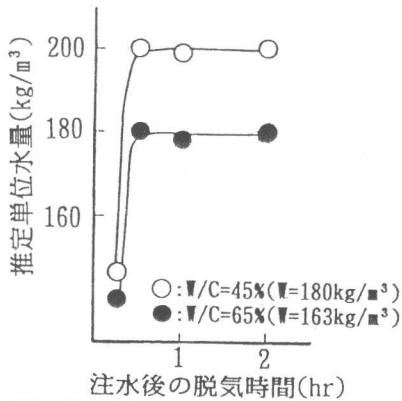


図-3 注水後の脱気時間の影響

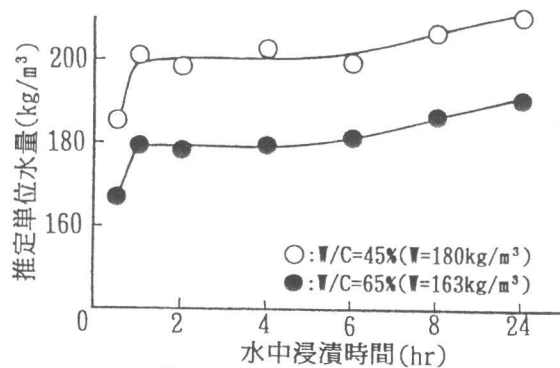


図-4 水中浸漬時間の影響

て20kg/m<sup>3</sup>程度多い値となっており、通常の大気圧状態では浸水しにくい空隙にも強制吸水するためと推察される。本方法では大気圧に解放した後の水中浸漬が重要なポイントである。

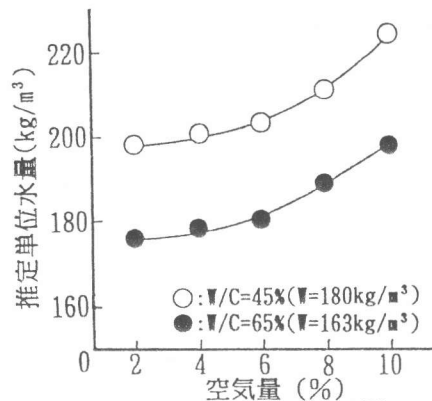


図-5 空気量の影響

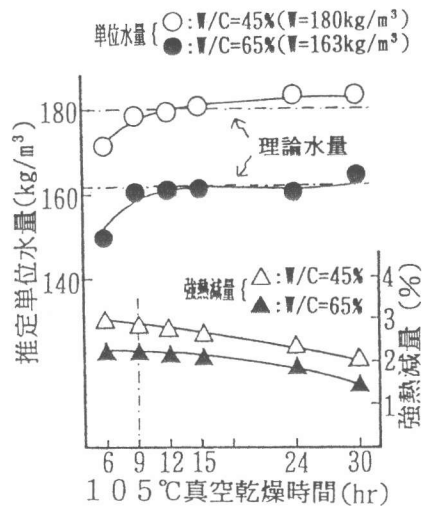


図-6 乾燥条件の影響

また図-5はコンクリートの空気量との関係を示したものであり、AE助剤量を変えて空気量を変化させた。通常コンクリートの範囲である空気量6%程度までは大きな影響を受けず、それ以上の場合には推定水量はかなり大きくなる傾向にある。これは、適正量の連行空気量の影響は受けにくい、これより過剰の空気量となるとコンクリート組織が粗となり、吸水量が増加するものと考えられる。

以上のことから、所要時間を考慮し供試体の吸水条件は真空脱気1時間、注水後の脱気1時間、開放後の水中浸漬2時間が適していると考えられる。また、いずれの配合も単位水量は理論水量に比べて約20kg/m<sup>3</sup>多く配合推定の計算においては、コンクリートの吸水率から、水量約20kg/m<sup>3</sup>に相当する補正係数1%を減じて水量を算出することとした。

### (3) 供試体の絶乾燥条件の検討

コンクリート供試体を十分に吸水させた後、105℃で乾燥し、絶乾重量を測定して吸水率を求めるが、セメント協会法では2日間を要する[1]。一般的にはコンクリート中の水分を100℃以下の自由水と100℃以上のセメント結合水に分けて考えることが多いが、配合推定試験においてはその区別は大きな意味をもたないものと考えられ、105℃真空乾燥(10<sup>-1</sup>Pa)を行って時間の短縮、迅速分析化を図った。図-6は真空乾燥時間との関係を示す。これによれば、セメント協会法の105℃-2日間乾燥は真空乾燥9時間程度に相当し、それ以上では結合水の分解が進み、ig. lossは小さくなる傾向にあるが、その分は自由水(吸水率)が多くなり、結果的には推定水量には影響を及ぼさないことが判る。このことから、真空乾燥は9時間以上必要であり、所要時間を考慮すると12時間程度が適当である。

以上の結果から、コンクリートの配合推定手法を整理して示すと図-7のようになる。

コンクリート試料は容量20ℓ程度の真空デシケータに入れ真空ポンプ(10<sup>-1</sup>Pa排気速度35ℓ/m in)で1時間真空脱気し、真空状態を保ちながら注水し、さらに1時間脱気する。その後、大気

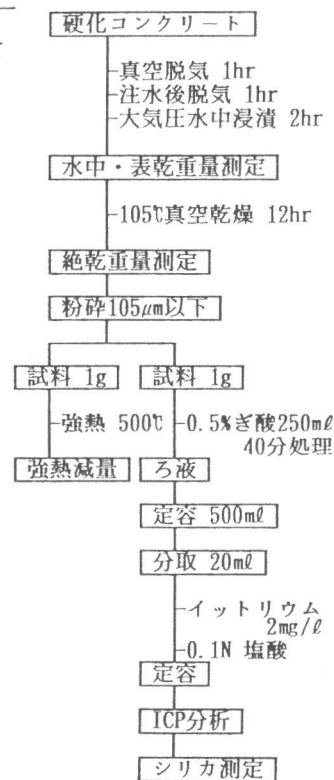


図-7 配合推定手法フロー図

圧に開放し、2時間水中に浸漬した後水中重量および表乾重量を測定し、105℃にて12時間程度の真空乾燥して絶乾重量を測定、105μm以下に縮分・粉砕した。次に粉砕試料より1gを分取し、石灰石が分解しないように500℃でig. lossを測定する一方、他の1gを濃度0.5%の硝酸溶液250ml中に入れ、マグネットスターラで40分間処理した後ろ過し、ろ液中のシリカ分を誘導結合プラズマ発光分光分析（ICP）により分析する[3]。

絶乾時のコンクリート中の各材料の重量割合は次式

により求める。

$$X + Y + Z = 100$$

$$a = a * Y / 100 + Z$$

$$b = \beta * X / 100 + \gamma * Y / 100$$

上記計算結果よりコンクリート中の各材料の単位量

は次式で求める。

$$\text{単位セメント量 (kg/m}^3\text{)} = X * W / (99 + \rho_1)$$

$$\text{単位骨材量 (kg/m}^3\text{)} = Y * W * (1 + \rho_2 / 100) / (99 + \rho_1)$$

$$\text{単位水量 (kg/m}^3\text{)} = W * (Z + \rho_1 - 1 - \rho_2 * Y / 100) / (99 + \rho_1)$$

図-8は4種類の配合の材令28日供試体の推定単位水量である。これによれば、理論水量と推定水量には高度の相関関係が認められ、コンクリートの配合の影響をほとんど受けず、従来法より迅速に理論水量の±10kg/m<sup>3</sup>の範囲で求めることができる。

#### (4) 脱型時材令の影響

コンクリートは脱型の材令が早いと乾燥は進み、組織はポーラスになるものと考えられる。図-9はコンクリートを所定の材令で脱型し、材令28日まで20℃室内養生した時の脱型時材令の影響について示したものであり、若材令で脱型したものほど吸水率は大きく、セメントの水和反応が進んでいないために結合水（ig. loss）は小さくなる傾向にあり、一方脱型材令が遅いと吸水率は小さく、結合水は多くなるため、脱型材令1日を除き推定単位水量には大きな影響を及ぼさない。

#### (5) 供試体のひび割れ

採取されたコンクリートコアにひびわれが発生している場合がある。そこで、コンクリート供試体を耐圧試験機で加圧すると、図-10に示すように供試体の圧縮強度に近くなると急激に推定単位水量が理論値より大きくなる傾向にある。これは、供試体にマイクロクラックが生じ、クラックに吸水したためと考えられ、コンクリートにこのような欠陥がある場合には推定単位水量は理論値より大きくなるものと推察される。

セメント量 (%)	X
骨材量 (%)	Y
結合水 (%)	Z
表乾時の単位容重 (kg/m <sup>3</sup> )	W
骨材の500℃ig. loss (%)	a
セメントのSiO <sub>2</sub> (%)	β
骨材のSiO <sub>2</sub> (%)	γ
試料のig. loss (%)	a
試料のSiO <sub>2</sub> (%)	b
コンクリートの吸水率 (%)	ρ <sub>1</sub>
骨材の吸水率 (%)	ρ <sub>2</sub>

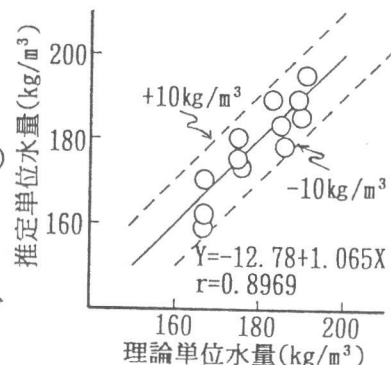


図-8 推定単位水量

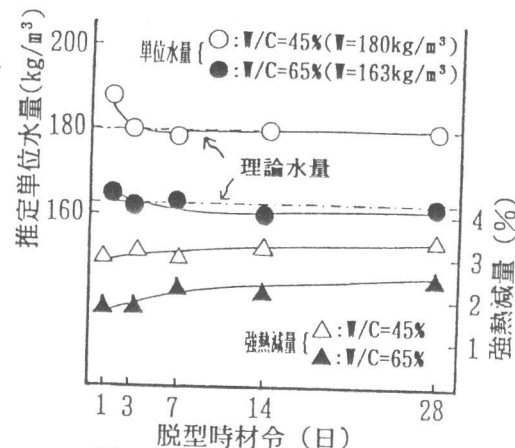


図-9 脱型時材令の影響

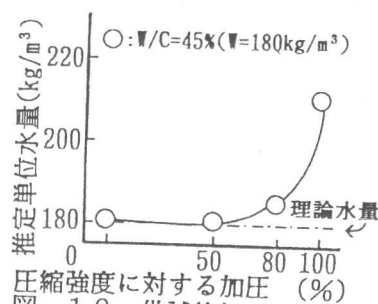


図-10 供試体加圧の影響

### 3. 長期材令コンクリートの配合推定

材令2年まで20℃密封養生したコンクリート供試体について検討を行った。コンクリートに使用される骨材は、各種のものが混合して使用される場合が多く、実際の使用状況を考慮して表-1に示す硬質砂岩、礫岩および石灰石を用い、表-3に示す骨材の組み合わせによるコンクリート供試体を作製した。また、セメントは表-1に示す普通ポルトランドセメントを使用し、コンクリートの配合は表-4に示す5種とした。

図-11および図-12は単位セメント量と単位水量を表したものであり、推定単位セメント量および推定単位水量は理論量と高度の相関関係が認められ、推定単位セメント量は理論量に対して±15kg/m<sup>3</sup>、また推定単位水量も理論量に対して±10kg/m<sup>3</sup>の範囲に入っており、使用骨材の種類及びコンクリートの配合にかかわらず短期材令の場合と同様に推定することができる。

### 4. 中性化したコンクリートの配合推定

硬質砂岩粗骨材、礫岩砕砂を用いたW/C 45%および55%の2配合について、2項と同様にコンクリート供試体を作製後、材令28日まで密封養生し、さらに20℃にて炭酸ガス濃度10vol%の条件下で所定材令まで炭酸化を促進した。図-13はフェノールフタレイン1%溶液によって判別した中性化率とセメント回収率との関係を示したものである。若干の炭酸化では影響を受けないが、いずれの配合もさらに炭酸化が進み中性部分が増えると推定セメント量は減少する傾向にある。図-14は水酸化カルシウムとケイ酸エチル溶液で合成したCSH[5]の希塩酸やぎ酸による分解性を示したものであり、CSHのCa/Siモル比が低下するとシリカゲルの特性に近づき、Ca/Si比が1以下の場合には、シリカ分は溶解しづらく、不溶残分は増加する傾向にある。したがって、本方法での推定単位セメント量の減少は炭酸化により水酸化カ

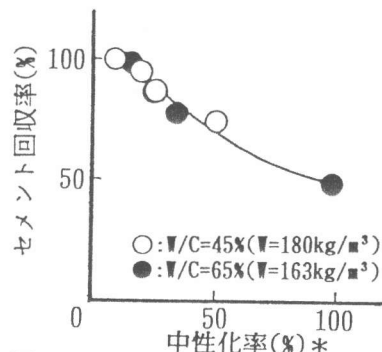


図-13 中性化率とセメント回収率  
\* 中性化率(%)=中性化体積/供試体体積×100

表-3 骨材の組み合わせ

粗骨材	細骨材
硬質砂岩	礫岩砕砂
石灰砕石	礫岩砕砂
石灰砕石	石灰砕砂

表-4 コンクリートの配合

セメント量(kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	s/a (%)
250	65	48
300	55	46
350	50	45
400	45	44
450	40	43

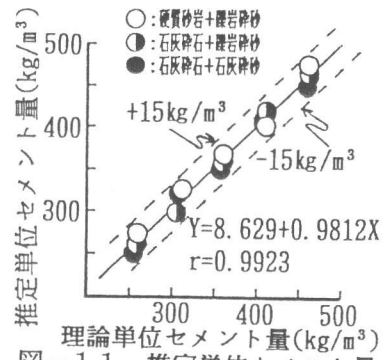


図-11 推定単位セメント量

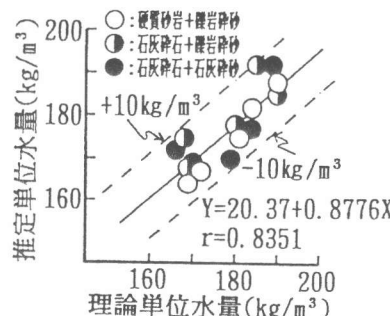


図-12 推定単位水量

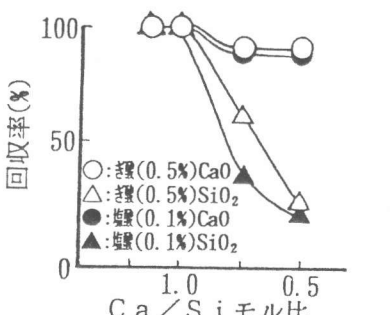


図-14 CSHの酸分解によるCaO及びSiO<sub>2</sub>回収率

ルシウムから炭酸カルシウムが生成する反応の影響を受けないものの、C S Hが分解されてCa/Si比が低下すると[5]シリカ分の溶解性が低下するためと推察される。なお、グルコン酸ナトリウム法では炭酸カルシウムの生成自体の影響を大きく受け[2]、またセメント協会法[1]でもC S HのCa/Si比が低下すると塩酸によるカルシウムの回収率減少と不溶残分の増加の影響を受けることから、いずれの方法においても中性化したコンクリートの配合を的確に判定することは難しいものと考えられる。

#### 5. まとめ

硬化コンクリートの単位水量はコンクリート試料を真空ポンプで1時間真空脱気し、真空状態を保ちながら注水、さらに1時間脱気し、その後大気圧に解放して2時間水中に浸漬した後水中重量および表乾重量を測定し、105℃にて12時間程度の真空乾燥して絶乾重量を測定することにより安定した吸水率を得ることができ、理論量の $\pm 10\text{kg/m}^3$ の誤差で単位水量を推定できることが判った。また本単位水量推定方法とコンクリートをぎ酸溶解し、そのろ液のシリカ分をI C P分析し単位セメント量を求める方法[3]を組み合わせることで、セメント協会法で5~6日間要していた硬化コンクリートの配合を、石灰石骨材の使用割合やコンクリートの材令にかかわらず2日間程度と迅速に、単位セメント量および単位水量ともに精度よく推定が可能であり、打設されたコンクリートの品質確認等に広く役立つものと思われる。

本配合推定方法は、非常に早期材令で脱型された場合や過剰の空気量、ひび割れなどの欠陥がある場合のコンクリートは推定水量が理論量より多い傾向にあり、養生条件、乾燥状態、配合、空気量など相互の影響が考えられる実構造物への適用性、コンクリート吸水率の補正係数について、今後検討を行う予定である。また中性化した部分のコンクリートでは推定単位セメント量は少なくなる傾向にあるが、従来提案されているいずれの方法においても、適切に配合を推定することは困難であり、さらに検討を要するものと思われる。

#### 参考文献

- 1) セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果」およびF-23「同(その2)」
- 2) 笠井 芳夫 他; グルコン酸ナトリウムによるセメント量判定方法の検討、セメント技術年報、pp. 214-217、1986など
- 3) 吉田 八郎、横山 滋 他; 石灰石骨材を使用した硬化コンクリート中のセメント量推定方法、コンクリート工学年次論文報告集、pp. 347-352、1990
- 4) 笠井 芳夫 他; グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリート中のセメント量判定試験方法に関する研究、日本大学生産工学部第23回学術講演会、pp. 65-68、1990. 12
- 5) 鈴木 一孝 他; コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol. 1, No. 2, pp. 39-49、1990. 7など