

# 硬化コンクリートの単位セメント量の推定方法に関する研究

## ESTIMATION OF UNIT CEMENT CONTENT IN HARDED CONCRETE

河合研至\*・小林一輔\*\*

By Kenji KAWAI and Kazusuke KOBAYASHI

The purpose of this study is to propose new estimation method of unit cement content in hardened concrete. The conventional method for estimation of mix proportion can not be used in case of concrete containing aggregates with acid-soluble constituents. We estimated unit cement content in hardened concrete by quantifying total CaO which was obtained from samples treated with hydrofluoric acid (HF). And we used mineralogical approach and image analysis for the estimation of unit aggregate content. The estimation values showed that this method using treatment with HF, mineralogical approach and image analysis was valid as a method for estimation of unit cement content in hardened concrete.

*Keywords : concrete, quality assessment, cement content, mineralogical approach, image analysis*

### 1. はじめに

コンクリート構造物から採取したコアを用いて、その構造物に使用された単位セメント量を推定する手法を確立することは、コンクリート構造物の耐久性を診断するうえで有用である。

硬化コンクリートの単位セメント量を推定する方法としては、わが国のセメント協会のコンクリート専門委員会が提案している方法<sup>1)</sup>がある。この方法は、硬化コンクリート中の骨材部分をほとんど溶かすことなくセメント部分を完全に溶解するという観点から、試料の溶解に0.1Nの希塩酸を用い、不溶残分および酸化カルシウム量の定量値から、それぞれ単位骨材量および単位セメント量ならびに単位水量を推定している。しかし、この推定方法では、次のような問題点があるため、現実には適用が困難になっている。

1) 使用したセメントや骨材が入手できない場合には、不溶残分や酸化カルシウム量として、それぞれの全国平均値を用いることとしているが、近年、石灰岩がコンクリート用骨材として多く使用されるようになってお

り、この場合、骨材中の酸化カルシウム量として全国平均値を用いることは全く意味がない。

2) 構造物に用いたセメントや骨材と同じものを入手できる可能性は非常に少ない。

本研究では、石灰岩を骨材として用いている場合にも適用可能な硬化コンクリートの単位セメント量を推定する方法について検討を行った結果を取りまとめたものである<sup>2),3)</sup>。

### 2. 硬化コンクリートの構成材料の分離方法

硬化コンクリートの単位セメント量を推定する際、コンクリート中のセメント硬化体部分より直接単位セメント量を推定することができれば理想的であるが、実際にはコンクリートの化学分析値から骨材部分の分析値を差し引いてセメントに関する分析値を得るよりほかに方法はない。したがって、このとき使用材料の物理的性質や化学的性質がわかっていていれば、精度の高い推定が可能となるであろう。しかし、既設の材令を経たコンクリート構造物から試料を取り出し、その構成材料の品質の推定を行う際、製造時に用いられたものと同一の材料を入手することはほとんど不可能であり、試料としてのコンクリートを何らかの方法で各構成材料に、すなわち、骨材とセメント硬化体部分に分離することが必要となつてく

\* 学生会員 工修 東京大学大学院 博士課程  
(〒106 港区六本木7-22-1)

\*\* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第5部  
(同上)

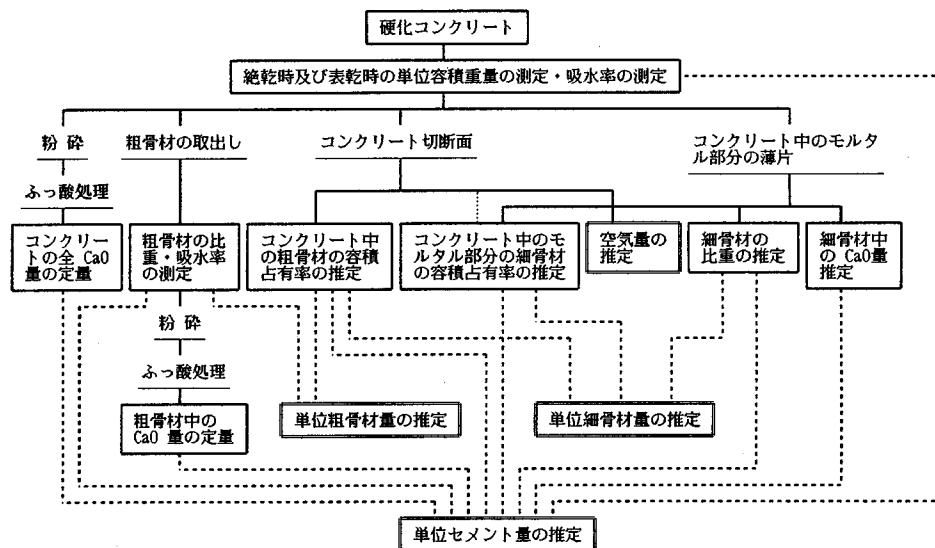


図-1 硬化コンクリートの単位セメント量推定フロー図

る。

この両者を分離する方法としては、塩酸処理では溶解してしまう炭酸カルシウムがグルコン酸ナトリウムではほとんど溶解しない点を利用しグルコン酸ナトリウムを用いる方法が試みられているが、この方法にはグルコン酸ナトリウムのもつ強いキレート力が後の化学分析値に影響を与えるという欠点のあることが判明したので、次のような物理的に両者を分離する方法を用いることにした。しかし、この方法は細骨材に対しては適用が困難であるので、これを物理的に分離することなくモルタル部分の偏光顕微鏡観察によりその組成を推定することを試みた。

### 3. 硬化コンクリートの分析方法

本研究で行った分析ならびに推定のフローを図-1に示す。

まず、分析に先立ち、硬化コンクリートの表乾ならびに絶乾時の単位容積重量と吸水率を測定した。

#### (1) 骨材の分析方法

##### a) 細骨材の分析

硬化コンクリート中のモルタル部分の薄片の作成を行い、薄片中に1本の測線を考え、その測線上を偏光顕微鏡を用いて一端より他端まで走査していく、測線を横切る細骨材の長さを岩石種または鉱物種別に記録した。長さの測定には、目盛付き十字線入り接眼レンズを用い、測線を横切る細骨材の長さを目盛の数で読み、これをマイクロメーターで長さに換算した。1つの供試体から薄片を3枚作成し、1枚の薄片について10測線を行った(図-2)。

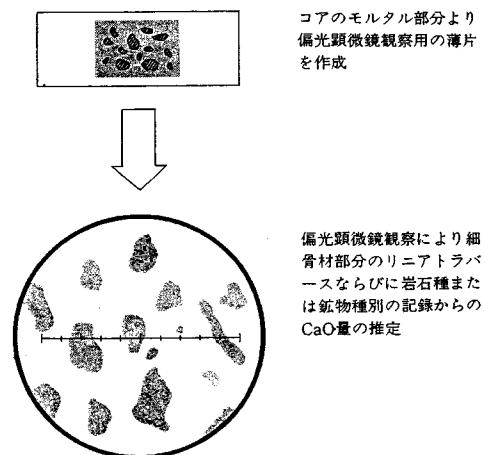


図-2 細骨材の分析における鉱物学的アプローチ

この測定結果より、硬化コンクリート中のモルタル部分の細骨材の容積占有率を、細骨材部分の長さの総和を測線の長さの総和で割ることにより求め、さらに、細骨材中の岩石または鉱物の含有率から、それぞれの岩石種または鉱物種の平均化学組成における比重、酸化カルシウム量を用い、これらの加重平均により、細骨材の比重、酸化カルシウム量を推定した。

##### b) 粗骨材の分析

硬化コンクリートの切断面をセロハンで覆い、断面に現われている粗骨材部分をセロハンに写し取り、その部分を黒く塗りつぶす。これを画像解析装置にかけ、黒く塗りつぶした部分の総面積を求め、これを切断面の断面積で割ることにより、硬化コンクリート中の容積占有率

を求めた。

また、硬化コンクリートより取り出した粗骨材は、比重および吸水率の測定後、ジョークラッシャー、振動ミルおよび、めのう乳鉢を用いて微粉碎し、これをふっ化水素酸で分解して、EDTA滴定法により酸化カルシウム量を定量した。

### (2) コンクリートの分析方法

コンクリート試料においても、粗骨材と同様に微粉碎後、ふっ化水素酸で分解し、EDTA滴定法により酸化カルシウム量を定量した。

### (3) ふっ化水素酸分解・EDTA滴定法

試料をはかり取り、テフロンビーカー(100 ml)に入れ、水で潤し、過塩素酸5 mlおよびふっ化水素酸10 mlを加え、低温で加熱分解し、過塩素酸の白煙が出始めたら、さらに高温にして、蒸発乾固する。

過塩素酸5 mlを加えて加熱し、ふっ化水素酸を完全に追い出す。そして、さらに加熱して、蒸発乾固する。

放冷後、水を加えて溶解し、メスフラスコ(250 ml)に移し入れ、水で標線までうすめる。

この溶液から、一定量を分取してビーカー(300 ml)に入れ、10分間温めた後、メチルレッド指示薬1,2滴を加え、アンモニア水(1+1)を徐々に滴加して中和し、なお2,3滴過剰に加える。時計皿でふたをし約1分間煮沸した後加熱を止め、沈殿が沈むのを待ってすぐにろ紙(5種A, 11 cm)でろ過し残留物を硝酸アンモニウム温洗浄液(2 w/v %)で洗い落とす。その後硝酸アンモニウム温洗浄液でろ紙上を8回洗浄する。ろ液はビーカー(300 ml)に受ける。

ろ液を室温まで冷却した後、トリエタノールアミン(1+2)を加えpHメーターを挿入し、pHが13になるまで水酸化カリウム(約3 N)を加える。ビーカーをマグネットックスターにのせ、回転子をゆっくり回転させながらカルセイン指示薬を少量加える。これを0.05 N EDTA標準液で滴定し、終点付近になったらよくかき混ぜながらゆっくり滴定し、蛍光性緑色が消え、だいだい色になった点を終点とする。

酸化カルシウム量は次の式によって算出した。

$$\text{CaO} (\%) = v \times F \times 0.0005608 / s \times 250 / p \times 100$$

ここで、  
s: 試料のはかり取り量(g)

v: EDTA標準液使用量(ml)

F: EDTA標準液のファクター

p: 溶液の分取量(ml)

## 4. 推定方法

### (1) 単位粗骨材量

単位粗骨材量は、コンクリート中の粗骨材の容積占有率と粗骨材の表乾比重を用いて次式より求めた。

$$G = V_c / 100 \times \rho_c \times 1000$$

ここで、  
G: 単位粗骨材量(kg/m³)

Vc: 硬化コンクリート中の粗骨材の容積占有率 (%)

$\rho_c$ : 粗骨材の表乾比重

### (2) 単位細骨材量

単位細骨材量は、コンクリート中の粗骨材の容積占有率を用いて、コンクリート中のモルタル部分の細骨材の容積占有率をコンクリート中の細骨材の容積占有率に換算し、次式より求めた。ただし、細骨材の吸水率は1%とした。

$$S = V_s / 100 \times \rho_s \times 1000$$

ここで、  
S: 単位細骨材量(kg/m³)

Vs: 硬化コンクリート中の細骨材の容積占有率 (%)

$\rho_s$ : 細骨材の表乾比重

ただし、  
 $V_s' = V_s \times (1 - V_c / 100)$

$V_s'$ : 硬化コンクリート中のモルタル部分の細骨材の容積占有率 (%)

### (3) 単位セメント量

セメント中のCaO分は、コンクリート中のCaOから骨材に含まれるCaO分を差し引いた残分として、単位セメント量を次式より求めた。

$$C = |C_0 - (W_s / 100 \times C_s + W_c / 100 \times C_c)| / C_c \times \rho_c \times 1000$$

ここで、  
C: 単位セメント量(kg/m³)

C<sub>0</sub>: 硬化コンクリート中の酸化カルシウム量 (%)

W<sub>s</sub>: コンクリート試料中の細骨材の重量百分率 (%)

C<sub>s</sub>: 細骨材中の酸化カルシウム量 (%)

W<sub>c</sub>: コンクリート試料中の粗骨材の重量百分率 (%)

C<sub>c</sub>: 粗骨材中の酸化カルシウム量 (%)

C<sub>c</sub>: セメント中の酸化カルシウム量 (%)

$\rho_c$ : コンクリート試料の比重

ただし、  
 $W_s = |(M_s - M_w) \times V_s / 100 \times \rho_{sd}| / M_d \times 100$

$W_c = |(M_s - M_w) \times V_c / 100 \times \rho_{cd}| / M_d \times 100$

M<sub>s</sub>: コンクリート供試体の表乾重量(g)

M<sub>w</sub>: コンクリート供試体の水中重量(g)

M<sub>d</sub>: コンクリート供試体の絶乾重量(g)

$\rho_{sd}$ : 細骨材の絶乾比重

$\rho_{cd}$ : 粗骨材の絶乾比重

### (4) 単位水量

硬化コンクリートの表乾時の単位容積重量から、単位セメント量、単位細骨材量および単位粗骨材量を引いた分を単位水量とした。

## 5. 使用材料・養生方法

使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、等価  $\text{Na}_2\text{O}$  量は 0.52 % である。

骨材は、細骨材として大井川産砂岩、山形産両輝石安山岩ならびに豊島産頑火輝石安山岩を使用し、粗骨材として秩父両神産砂岩ならびに栃木葛生産石灰岩を使用した。最大粗骨材寸法は 20 mm である。骨材の物性を表-1 に示す。

養生は、作製した供試体により、モルタルはポリ容器に密封し 20°C で、コンクリートは脱型後 20°C, 100 % RH の環境下で行った。

## 6. 結果および考察

### (1) モルタルによる推定結果および考察

細骨材の分析方法として用いた偏光顕微鏡による手法の有効性を確認するため、まずモルタルにおいて推定を行った。使用した骨材ならびに供試体の配合を表-2 に示す。

さらに、モルタル中の細骨材の容積占有率の推定結果を表-3 に、モルタルの配合推定結果を表-4 に示す。

表-3 より、細骨材の容積占有率の推定値は配合から

表-1 骨材の物性

骨 材		比 重	粗 粒 率	吸 水 率 (%)
細 骨 材	山形産両輝石安山岩	2.73	2.90	0.936
	豊島産頑火輝石安山岩	2.49	2.90	3.49
粗 骨 材	大井川産砂岩	2.64	3.04	1.00
	秩父両神産砂岩	2.69	6.68	0.636
	栃木葛生産石灰岩	2.77	6.80	0.704

表-2 モルタルの配合

記号	単 位 量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			使 用 細 骨 材
	水	セメント	細骨材	
M1	294	588	1300	山形産両輝石安山岩
M2	281	552	1261	豊島産頑火輝石安山岩

表-3 モルタル中の細骨材の容積占有率の推定結果

記号	推 定 値	原配合からの計算値
M1	50.1%	48.4%
M2	50.9%	50.7%

表-4 モルタルの配合推定結果

記号	単 位 量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		
	水	セメント	細骨材
M1	267	598	1347
	原配合	294	588
M2	261	572	1280
	原配合	281	552
			1261

の計算値とほぼ一致しており、容積占有率の推定手法としての偏光顕微鏡の利用は有効であることがわかる。

また、配合の推定結果に関しては、両者ともほぼ満足な結果が得られていると思われる。M1 における細骨材量の推定値のずれは、容積占有率の推定値のずれに起因するものであり、また単位セメント量は、推定する細骨材中の酸化カルシウム量により変動するため平均化学組成の選択は十分慎重に行う必要がある。

### (2) コンクリートによる推定結果および考察

モルタルによる実験結果より、偏光顕微鏡の利用の有効性が確認されたが、さらにこれをコンクリートに適用して検討を行った。

使用した骨材ならびに供試体の配合を表-5 に示す。

#### a) 細骨材の分析結果

偏光顕微鏡を用いて、コンクリート中のモルタル部分の細骨材の容積占有率の推定を行った結果ならびに比重・酸化カルシウム量の推定結果を表-6 に示す。

酸化カルシウム量の推定においては、細骨材の構成要素を砂岩分、頁岩分、石英分に大別し、これらのそれぞれの酸化カルシウム量の加重平均とした。

この結果より、コンクリートにおいても細骨材の分析方法としての偏光顕微鏡を用いた鉱物学的アプローチは有効であることが確認された。

#### b) 粗骨材の分析結果

画像処理によるコンクリート中の粗骨材の容積占有率の推定結果、比重の測定結果ならびに酸化カルシウム量の定量結果を表-7 に示す。

この結果より、簡便な画像処理により粗骨材の容積占有の推定が可能であることが明らかとなった。しかし、粗骨材の容積占有率の推定値は、単位細骨材量の推定においても用いており、粗骨材の容積占有率の推定値のずれが、単位細骨材量の推定値にずれを生じさせる要因となりかねないため、より高い精度での推定を行う必要があると思われる。

表-5 コンクリートの配合

記号	単 位 量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				使 用 細 骨 材	使 用 粗 骨 材
	水	セメント	細骨材	粗骨材		
C1	219	313	929	838		
C2	201	365	879	915	大井川産砂岩	秩父両神産砂岩 栃木葛生産石灰岩

表-6 コンクリート中のモルタル部分の推定結果

	C1		C2	
	コンクリート中のモルタル部分の細骨材の容積占有率	コンクリート中のモルタル部分の細骨材の容積占有率	酸化カルシウム量	酸化カルシウム量
推 定 値	51.15%	51.93%		
原配合からの計算値	51.00%	49.72%		
推 定 値	1.27%	2.64	1.16%	2.65
使用前の細骨材	0.38%	2.64	0.38%	2.64

また本研究においては、細骨材と粗骨材との区別を切断面に現われている骨材の長さのみによって判断したが、さらに別な角度からの情報を加えることにより、細骨材と粗骨材との区別を一層確かなものとし、骨材の容積占有率の推定精度を高めることができるものと思われる。

#### c) コンクリートの分析結果

供試体の単位容積重量の測定結果ならびに酸化カルシウム量の定量結果を表-8に示す。また、各使用材料の酸化カルシウム量を配合比で積算した計算上のコンクリートの酸化カルシウム量も付記したが、各使用材料の分析では、試料の処理方法、定量方法で異なる点もあり、一概に両者の比較を行うことはできない。

#### d) 配合推定結果

上記の分析結果をもとにして計算した配合推定結果を表-9に示す。また表-9には、使用材料の入手が不可能であり、骨材の不溶残分、酸化カルシウム量ならびにセメント中の酸化カルシウム量として全国平均値を用いた場合の、セメント協会法による配合推定結果も併せて示した<sup>5)</sup>。

本研究で用いた手法による推定結果に関して、単位粗骨材量における推定値のずれは、主にコンクリートより取り出した粗骨材の比重の測定値のずれによるものである。このずれが、そのまま単位セメント量にずれを生じさせる原因となっている。

表-7 コンクリート中の粗骨材の推定結果

	C1		C2	
	コンクリート中の粗骨材の容積占有率	コンクリート中の粗骨材の容積占有率	酸化カルシウム量	比 重
推 定 値	33.61%		34.31%	
原配合からの計算値	30.99%		33.03%	
酸化カルシウム量 比 重	酸化カルシウム量	比 重	酸化カルシウム量	比 重
コンクリートより取り出した粗骨材	3.08%	2.96	32.7%	2.97
使 用 前 の 粗 骨 材	2.43%	2.69	33.6%	2.77

表-8 コンクリートの分析結果

	C1		C2	
	酸化カルシウム量	単位容積重量	酸化カルシウム量	単位容積重量
コンクリートの実測値	11.3%	2.43t/m <sup>3</sup>	23.3%	2.40t/m <sup>3</sup>
使用材料の定量値から求めた計算値	10.0%	—	26.0%	—

表-9 コンクリートの配合推定結果

	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水	セメント	細骨材	粗骨材
C1 本研究における推定結果	208	326	897	995
	セメント協会法による推定結果	277	379	1772
C2 本研究における推定結果	219	313	929	838
	セメント協会法による推定結果	148	324	904
原 配 合		688	851	1019
C2 原 配 合		201	365	879
				915

単位セメント量の推定値については、C1でほぼセメント協会法と同等の推定精度を得ており、またC2においても本推定手法でかなりよい推定値を与えている。分析においてさらに慎重な配慮を行うことにより、さらに精度の高い推定値が期待できる。

ただし、単位水量に関しては、推定方法として単位容積重量から他の単位量を差し引いた残分という方法を取っているため、推定精度を高めることを期待できない。

さらに、実構造物においては細孔中を水が移動し、コア採取時に、単位量の総和が実際に単位容積重量となっているかどうかは疑問となる。

したがって、単位水量の推定手法として、コンクリートの組成から水量あるいは水セメント比の形で推定できる手法を考案する必要があろう。

以上の結果より、本研究で用いた推定方法は、石灰岩等の可溶成分を多く含む骨材を用いている場合にも推定が可能であることが確認できた。

## 7. 結 論

本研究では、コンクリート構造物から採取したコア分析によって、硬化コンクリートの単位セメント量を推定する方法について検討を行い、次の結論が得られた。

(1) 本研究で用いた単位セメント量の推定方法は、セメント協会法と比較し、セメント協会法では適用不可能な石灰岩骨材を用いたコンクリートにおいても、比較的よい精度で推定が可能であることが明らかとなった。

(2) 試料をふつ化水素酸により完全に分解して得られる全酸化カルシウム量の定量値を用いた、硬化コンクリートの単位セメント量推定方法は、石灰岩等の可溶成分を多く含む骨材を用いている場合においても推定を行ひ得ることが明らかとなった。

(3) 単位細骨材量ならびに細骨材中の酸化カルシウム量の分析方法としての鉱物学的アプローチは、推定手法として有効であることが明らかとなった。

**謝 辞：**本研究の実施に際して、細骨材中の鉱物の定性・定量に関して地質鉱物エンジニアリング（株）の丸 章夫博士よりご指導を賜った。さらに、化学分析に関しては東京大学生産技術研究所第5部 白木亮司助手より貴重なるご助言を頂いた。なお、関東学院大学卒業生の尾上康仁、佐藤公保両君には多大なるご協力を頂いた。ここに、付記して厚くお礼申し上げます。

## 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報告、昭和42年9月。

- 2) 河合研至・小林一輔：硬化コンクリート中のアルカリ量の推定に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，第9巻，第1号，pp.651～656，1987年。
- 3) 小林一輔・河合研至：硬化コンクリート中のセメント量の推定方法(Ⅰ)，生産研究，Vol.39，No.9，pp.394～396，1987年9月。
- 4) 笠井芳夫・笠井順一・松井 勇：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，第40回セメント技術大会講演要旨，pp.122～123，昭和61年5月。
- 5) 小林一輔・河合研至：硬化コンクリート中のセメント量の推定方法(Ⅱ)，生産研究，Vol.39，No.10，pp.421～423，1987年10月。

(1988.6.20・受付)