

論文

[1081] コンクリート構造物の耐久性能の定量的評価

正会員○山中克夫 (三井物産関西支社)

正会員 小沢一雅 (東京大学工学部)

正会員 國島正彦 (東京大学工学部)

1. まえがき

コンクリート構造物の早期劣化の問題が呈されている現在、コンクリート部材の耐久性能を定量的に評価する方法は、確立されていないのが現状である。部材表面付近において堅固で空隙の少ない密実なコンクリートを実現し、劣化の原因となる外的要因の部材内部への伝播を制限することは、構造物の耐久性能を向上するために重要である。¹⁾²⁾本研究は、コンクリート部材表面付近の密実さを比較的簡単に定量的に評価する試験方法を提案した。

2. 試験方法の概要

2.1 真空乾燥法

試験装置は図-1に示すとおりである。試験に用いる供試体は、打設後20℃水中で養生し水中湿潤状態にする。材令7日以降に水中から取り出し、供試体表面の水を入念に拭き取り重量を測る。シリカゲルを十分に入れたデシケーター内に供試体を設置し、真空ポン

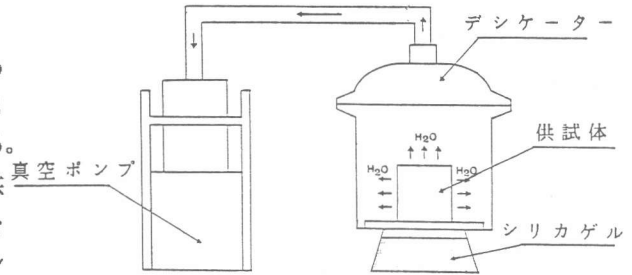


図-1 真空乾燥法試験装置

ンプを作動させ、容器内を温度約15～20℃、気圧10mmHg程度の極めて真空に近い状態にする。真空乾燥開始から12時間後の供試体の減少重量を測定する。コンクリート部材表面に接する気圧を低下させることにより、コンクリート空隙中に存在する水の蒸発を促進し、その蒸発水量でコンクリート部材表面付近の平均的な密実さを簡易的に定量評価しようとするものである。試験に用いた真空ポンプは、真空度0.1Pa、回転数450r.p.m.、排気速度50ℓ/minのものである。デシケーターの容量は、約20ℓのものを用いた。

2.2 真空乾燥時にコンクリート中を移動する水

練り混ぜ水は、セメントとの水和の進行とともにその一部は、セメント硬化体中の結晶水、ゲル水となり、残りは自由水となると考えられる。自由水は毛細管空隙およびゲル細孔中に存在し、容易に移動しうると考えられる。真空乾燥法においては、自由水の影響が最も大きいと考え、コンクリートの配合、材令による水和度より結晶水、ゲル水の量を仮定することによって自由水量を推定し、内部の水分の移動がほぼ終了するまで長時間真空乾燥した実験結果との比較を行った。

使用したコンクリートは表-1に示す水セメント比40%、スランプ8cmの配合のものであり、2層11回突き固めた後、10秒間バイブレーターによって型枠振動を与える締固め方法で、φ10×20cmのシリンダー供試体を作製し、20℃水中で養生した。また、この配合から砂、砂利を取り除いたモルタルおよびペーストについても、同様の実験を行った。材令7日で真空乾燥を開始し、600時間までの供試体減少重量の経時的変化は図-2に示すようであり、減少重量は材令7日(真空乾燥開始時)において水和度50%と仮定したときの自由水量の計算値に漸近

していることがわかる。すなわち、蒸発する水はほとんどが自由水であると考えられる。なおこのときの自由水量は、水とセメントの重量比100%でセメント重量の25%の水が水和反応によって消費され、セメント重量の15%程度の水がゲル水に変化する³⁾と仮定して計算した。

(表-2参照)

2.3 真空乾燥による水分移動機構

コンクリート中の水分の外部への放出のメカニズムは、以下のものであると考えられる。

①部材表面に接する外気圧の低下にともない、コンクリート表面部の空隙中の水は水蒸気へと変化する。

②水蒸気はデシケーター内に放出され、その一部は真空ポンプに吸引され、残りはシリカゲルに吸収される。

③その結果、デシケーター内の湿度はほぼ0に保たれ、コンクリート内部の空隙中の水は、表面に近い部分から少しずつ水蒸気に変化する。

④空隙内で水蒸気に変化した水は、コンクリート内部と外部の気圧差によって、コンクリート外部へと放出される。

表-1 使用したコンクリートの配合

配合No.	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					水 W	セメント C※1	細骨材 S※2	粗骨材 G※3	AE減水剤	補助AE剤	
1	8 ± 1	4 ~ 5	4.0	4.2	16.2	40.5	7.31	10.16	1.01	1.22	
2			5.0	4.4	16.2	32.4	7.96	10.19	0.81	0.65	
3			7.0	4.9	16.8	24.0	9.12	9.58	0.60	0.24	
4	18 ± 1		4.0	4.2	18.2	45.5	6.92	9.64	1.14	1.82	
5			5.0	4.4	18.2	36.4	7.57	9.72	0.91	1.09	
6			7.0	4.9	19.0	27.1	8.72	9.13	0.68	0.27	
7	モルタル			4.0	—	26.3	6.59	1.189	—	1.65	1.98
8	ペースト			4.0	—	48.2	12.05	—	—	3.01	3.62

※1 普通ポルトランドセメント ※2 富士川産川砂 ※3 砕石2005

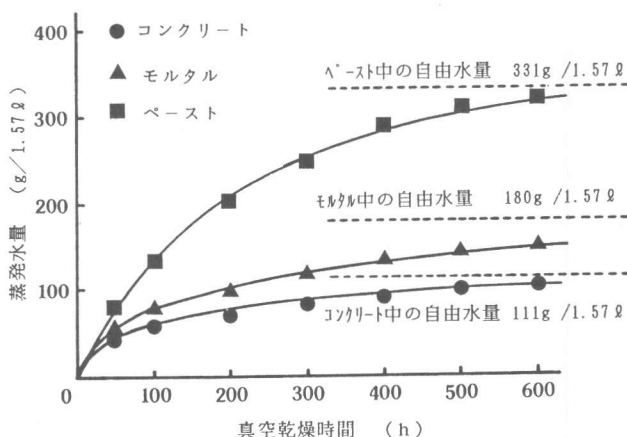


図-2 600時間真空乾燥した場合の蒸発水量の経時変化

表-2 水とセメントの重量比50%のときの推定自由水量

配合No.	単位水量 W (kg/m ³)	水セメント比 W/C (%)	水とセメントの重量比50%時の自由水量 (kg/m ³)
1	16.2	4.0	7.1
2	16.2	5.0	8.9
3	16.8	7.0	11.4
4	18.2	4.0	8.0
5	18.2	5.0	10.0
6	19.0	7.0	12.9
7	26.3	4.0	11.5
8	48.2	4.0	21.1

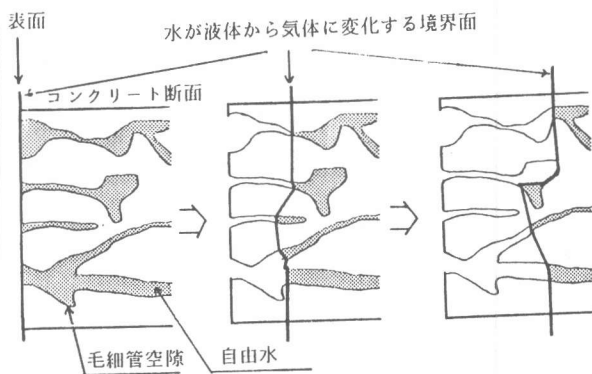


図-3 水の移動メカニズムの模式図

この現象を図-3のような模式図に示すと、液体として空隙中に存在している水が水蒸気に変化する境界面が、時間の経過と共に内部へと進行するものと考えられる。(実際には、コンクリート内部の気泡中の空気と外気の圧力差によって、液体として移動する水の存在も考えられるが、巨視的には無視できると考えた。)

外部に放出される水量は、コンクリート部材表面付近の水で満たされている空隙の量、及び空隙内の気体の透過性を評価する目安となり得ると考えられる。したがって、コンクリート内部から蒸発し放出される水量は、蒸発表面積の影響をうけると考えられ、これを実験によって明らかにした。

直径 $\phi 10$ cm、 $\phi 15$ cm、 $\phi 25$ cm、高さはそれぞれにつき5 cm、10 cm、20 cmのシリンダー供試体を作製し、測定開始材令7日における減少重量の12時間経時的変化を測定した。なお、コンクリートは水セメント比50%、スランプ8 cmのものを用い、前節の実験と同様の方法で締固めを行うことにより、供試体の締固めのレベルは一定とした。供試体は側面を防水加工し、直径の同じ供試体は高さによらず、真空乾燥による蒸発を促進する面積は一定にし、鉛直2方向のみから水分蒸発を促進した。実験結果は図-4に示すようであり、蒸発を促進する面積が一定であれば、12時間程度の真空乾燥による供試体の減少重量は、供試体の高さすなわち全体の体積に関係なくほぼ同等となっている。またこの結果を、単位蒸発表面積当りの水分移動量として整理した12時間経時変化は図-5に示すようであり、8種の供試体の測定結果はほぼ一致しており、同一配合のコンクリートを同一条件の締固めで作製した供試体の12時間真空乾燥した場合の水分蒸発量は、単位蒸発表面積にほぼ比例すると考えられる。

3. 各種要因を変化させたときの蒸発水量への影響

3.1 配合による影響

水セメント比40%、50%、70%、単位水量 $162 \sim 168 \text{ kg/m}^3$ (目標スランプ

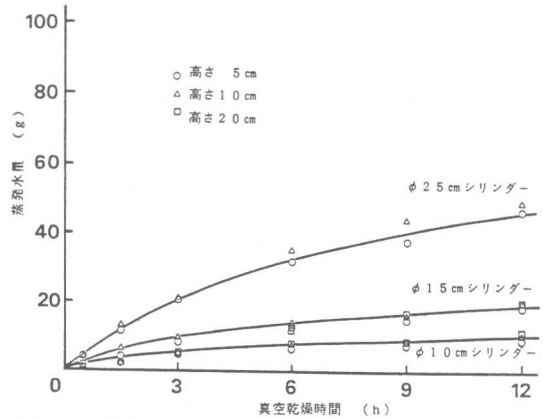


図-4 形状を変化させた供試体の蒸発水量の経時変化

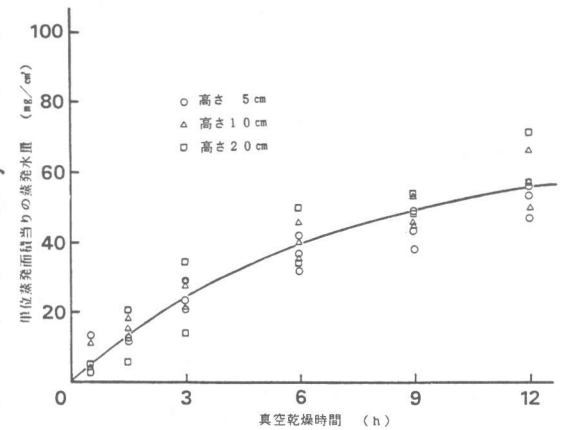


図-5 形状を変化させた供試体の単位表面積当りの蒸発水量

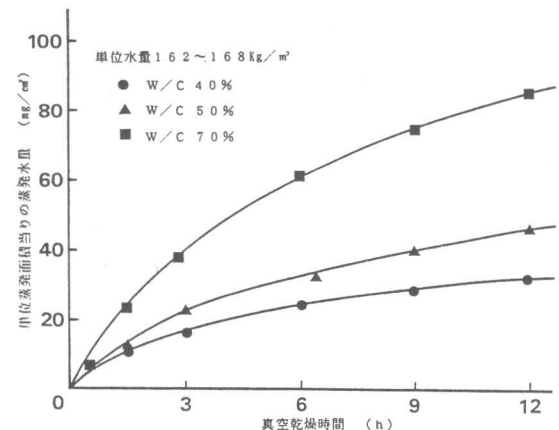


図-6 水セメント比を変えた供試体の蒸発水量の経時変化

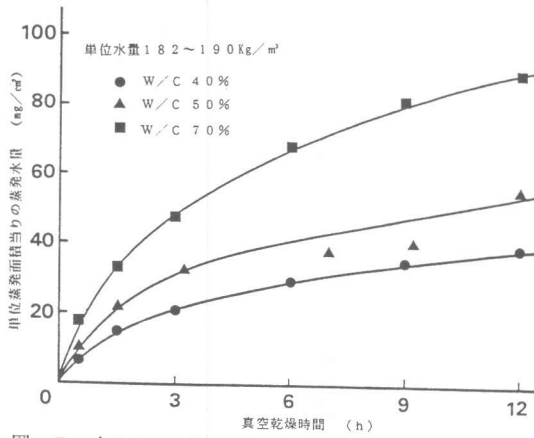


図-7 水セメント比を変えた供試体の蒸発水量の経時変化

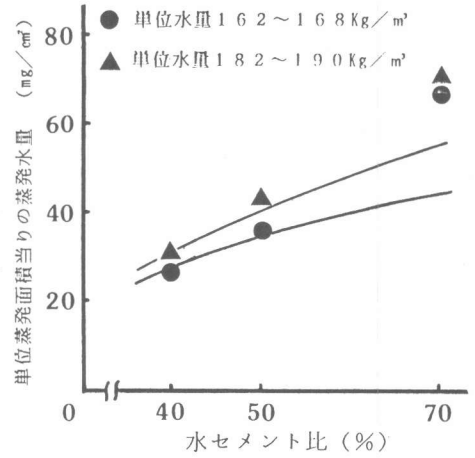


図-8 水セメント比と12時間蒸発水量

8 cm) および $182 \sim 190 \text{ kg/m}^3$ (目標スランプ 18 cm) の2種類とした計6種類の配合のコンクリートを用いて、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ のシリンダー供試体を同一条件で作製し7日間 20°C 水中養生した後、真空乾燥法による12時間の蒸発水量の経時変化を測定した結果を図-6、図-7に示す。水セメント比の大きい配合のコンクリートほど自由水量が多いため、真空乾燥による蒸発水量は大きい値となっている。図-8に12時間蒸発水量と水セメント比の関係を示し、自由水量の算定値の25%の値を実線で示した。12時間真空乾燥した場合の蒸発水量は、供試体内の全自由水量の25%以上に相当していることがわかる。この自由水が表面から内部へと蒸発したと考えると、蒸発表面から深さ6mm程度の部分が乾燥していることに相当し、真空乾燥法によって、耐久性能に影響をおよぼす外的要因が浸入する、部材表面付近のみの密実さを評価していると考えられる。

3.2 締固め方法による影響

水セメント比50%、スランプ8cmの配合でAE剤を使用しないプレーンコンクリートを用いて、締固め(施工)の方法を変えて作製した $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ シリンダー供試体を、7日間 20°C 水中で養生した後12時間真空乾燥を行った。締固め方法は、①突き棒で2層11回突き固めたもの、②2層11回突き固めたうえバイブレーターによる型枠振動を10秒行ったもの、③2層11回突き固めたうえにバイブレーターでコンクリートに直接10秒、型枠に10秒振動を加えたものの3種類である。それぞれの締固め方法を、耐久性に影響する施工レベルで分類すると、それぞれC(劣)ランクの施工、B(並)ランクの施工、A(良)ランクの施工という

表-3 水中養生によって空隙中に浸入した水量

供試体の施工ランク		A	B	C
空気量	(%)	0.5	1.8	2.6
	A (g/m^3)	5	18	26
空隙中に浸入した水量	W (g/m^3)	3.8	4.5	7.0
	W/A (%)	76	25	27

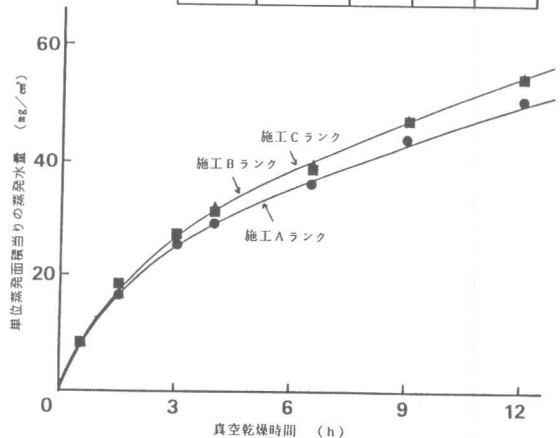


図-9 締固めのレベルを変えた供試体の蒸発水量

ことができる。締固め後のコンクリートの空気量を単位容積重量を測定することより推定すると、それぞれ0.5%、1.8%、2.6%であり、これは締固め方法の違いによるフレッシュコンクリート中のエントラップトエアーの量を示していると考えられる。

打設時から7日間水中養生した後までの供試体の増加重量、すなわち水中養生によってコンクリート内部に浸入した水量は、施工ランクA・B・C供試体の順に3.8kg/m³、4.5kg/m³、7.0kg/m³であり、同じ配合であっても締固めが良いものほど少なくなっている。これは、硬化コンクリート中にエントラップトエアーの量が多いものほどコンクリート内部に水が浸入しやすい空隙構造となっていることによると考えられる。コンクリートのフレッシュ時の空気量と脱型後内部に浸入した水量とを比較すると、表-3に示すように、7日間の水中養生によって空隙内の25%以上は水で満たされていることが明らかとなった。

締固めのレベルを変化させた供試体の、真空乾燥法による蒸発水量の経時的变化を図-9に示す。締固めが良いA供試体の12時間真空乾燥後の蒸発水量は、締固めレベルの劣ったB、C供試体の結果と比較すると、7%程度減少している。フレッシュ時にエントラップトエアーとしてコンクリート中に含まれていた比較的大きな空隙に、水中養生によって水が浸入し、その影響がこの3つの結果の違いに現れているものと思われる。

3.3 材令による影響

20℃水中養生をし、真空乾燥開始材令3日、7日、28日の場合の12時間蒸発水量を、図-10に示す。用いたコンクリートはスランプ8cm、水セメント比40%、50%、70%の配合である。材令3日では、7日、28日と比較して蒸発水量は多くなっている。若材令においては、水和が進行していない分だけ自由水の量が多くなっているためと思われる。材令7日と28日では蒸発水量にほとんど差がみられない。一般に水中養生した供試体の水和反応は、表面付近において最も進行しやすく、材令7日から28日においては表面付近の自由水の状態に大きな差異がなくなるためと考えられる。したがって、材令7日以降で真空乾燥を開始することにより、長期材令でのコンクリートの表面付近の密実さを概ね推定できると考えられる。

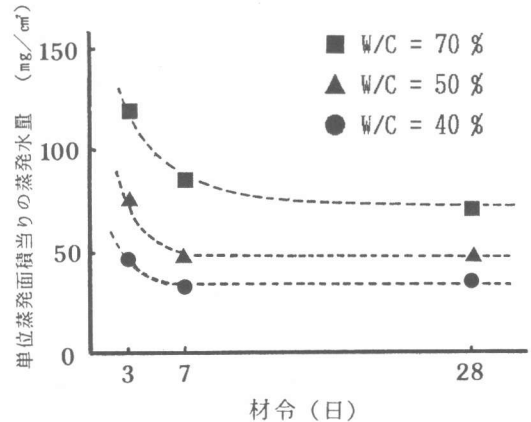


図-10 真空乾燥開始材令を変えた供試体の蒸発水量

4. 耐久性能の評価基準

本研究においては、12時間蒸発水量を供試体の重量減少を測定することによって評価基準とした。コンクリート供試体表面から深さ約6mm程度の空隙内に存在する水の蒸発を促進させることによって、その部分の空隙量を、自由水の蒸発量から間接的に評価するという方法である。同一配合のコンクリートを同一施工条件で打設した供試体を、12時間程度真空乾燥した場合、蒸発する水量は蒸発表面積にほぼ比例する。形状の異なるものの比較を可能にするために、単位蒸発表面積当りの蒸発水量として試験データを整理することが適当と考えた。真空乾燥を開始する材令は、材令7日と28日での蒸発水量の測定結果に大きな違いがみられなかったため、材令7日以上経過した供試体を用いて評価を行うことにした。

5. 真空乾燥法による耐久性性能評価の妥当性

真空乾燥法は、供試体表面に接する容器内の湿度をほぼ0に保つことによって、コンクリート内部の水の蒸発を促進し、それが部材表面部付近から順次外部に放出されやすいか否かを判定している。これによって、部材表面部のみ密実さの特性を評価できるため、逆に、外的要因のコンクリート中への浸入の抵抗性を判定する方法として用いることができると考えられる。

試験データのばらつきは、水セメント比50%の供試体における、単位水量162~168kg/m³、182~190kg/m³の配合のコンクリートを用いた場合の、12時間真空乾燥後の蒸発水量のデータ（材令7日）の12個ずつの変動係数で比較した。それぞれの変動係数は3.3%、6.7%であり、大きなばらつきはみられず、十分データに再現性はあるものと判断される。

また、材料特性の違いによる空隙の量についての評価、施工方法の違いによる比較的大きな空隙の影響についての評価が可能であること、データに再現性があることなどからも、真空乾燥法は耐久性性能の評価方法として妥当であると考えられるのである。

6. まとめ

真空乾燥法は、コンクリート部材表面付近の密実さの特性を評価するために有効な手法であると考えられる。特徴をまとめると以下ようになる。

(1) 12時間の真空乾燥で、部材表面から少なくとも深さ6mm程度の部分の水の移動が生じていると考えられ、耐久性性能に影響をおよぼす外的要因が浸入する部材表面部付近の密実さを評価できる。

(2) 真空乾燥法によって測定される蒸発水量で、材料特性の違いによる空隙の量、施工方法の違いによる比較的大きな空隙の影響について同時に評価することができる。

(3) 単位表面積当りの水分蒸発量を評価基準とすることより、異なる形状の供試体にも適用できる。

(4) コンクリート内部で蒸発する水は、容易に蒸発することができるいわゆる自由水であると考えられる。その移動しやすさは、鋼材腐食に対して有害な外的要因のコンクリート内部への浸入に対する抵抗性と密接な関係があると思われるので、真空乾燥法は、鋼材腐食に対するコンクリート部材の耐久性性能を、定量的に評価できる試験方法であると考えられる。

[謝辞] 本研究は、筆者が東京大学大学院に在学中に行ったものであり、ご指導いただいた岡村教授に対してここに謝意を表します。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（総合A63302044）を受けて行ったものである。

[参考文献]

- 1) 國島正彦、岡村 甫：総合評価に基づくコンクリート構造物の耐久性設計、コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集、1988年4月
- 2) 國島正彦、小沢一雅、山中克夫：設計レベルが異なるコンクリート部材の耐久性性能の評価、土木学会第43回年次講演会概要集、1988年10月
- 3) W. チェルニン著、徳根吉郎訳：建設技術者のためのセメント・コンクリート化学、技報堂、1970年