

セメントの水和進行率から求まるコンクリートの有効セメント水比と圧縮強度との関係について

RELATION BETWEEN THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE
AND THE EFFECTIVE CEMENT WATER RATIO CALCULATED
FROM THE RATE OF HYDRATION OF CEMENT

関 慎 吾*・笠 原 清*
栗 山 武 雄*・河 角 誠*

By Singo Seki, Kiyosi Kasahara,
Takeo Kuriyama and Makoto Kawasumi

1. ま え が き

コンクリートは骨材とこれを包んでいるセメントペーストから成り立っている。したがって、コンクリートの強度は、セメントペーストの強度、骨材との混合割合によって支配されるものである。コンクリートが構造用材料として使用されて以来、コンクリートの強度は何によって決定されるかの問題が多く、多くの学者により研究され、数多くのコンクリート強度理論が発表された。これらは前述のセメントペーストの強度、骨材との混合割合などに関係するものであって、その中で最も重要視されているものは、

- ① D.A. Abrams の水セメント比説 (1919 年)
- ② Inge Lyse のセメント水比説 (1925 年)
- ③ A.N. Talbot の空げき説 (1921 年)

等である。

これらの説の中で取りあげられている要素とコンクリート強度との関係は直線式あるいは曲線式にて表わされ、コンクリートの配合決定の時の推定圧縮強度を求めるために一般に用いられている。しかし、これらの式はコンクリート中の単位セメント量と単位水量とを変化させ、すなわち c/w を数種に変化させたコンクリートの圧縮強度試験を行なってその平均的な強度と c/w との関係を表わしているものである。また、各材令ごとに直線式が異なるものであった。ここで筆者らはセメントの水和作用がコンクリートの圧縮強度にどのように影響しているであろうか、また、セメントペースト中の水量とセメントの水和進行率とはどのような関係にあるかについて実験を行なった。そこで水セメント比 (w/c) を数種に変化させたセメントペーストを造り、コンクリートと同様に水中養生を行なって材令 7 日～1 年までのセメントの結合水量を測定した。その結果、セメントペーストの水和進行率は、水セメント比 (w/c) および材令によって大きく影響されることが判明した。すなわちセメントペーストの水セメント比 (w/c) が大きくなるにつ

れて水和進行率は大きくなり、 $w/c=65\%$ にもなると材令 1 年ではほぼ完全に水和する傾向にあることがわかった。一方コンクリートの強度は、セメントペースト中のセメントの水和進行程度とその水和生成物の量に関係するであろうとの推論のもとに、各材令 (7 日～1 年) における水セメント比 (w/c) とセメント水和進行率との関係を求め、これと従来から用いられていたコンクリート強度のセメント水比説との 2 つを合せ考えて、有効セメント水比説なる説を提唱し、水セメント比 (w/c) を変化させたコンクリートの各材令における圧縮強度と有効セメント水比との関係を調査し、この両者の間には直線関係が成立することを示したものである。この有効セメント水比説の特長は、コンクリートの圧縮強度はセメントの化学反応の進行と密接に関係があるという考えに基づいており、それはコンクリート 1 m^3 中の水和結晶したセメント量と、はじめに用いられた水量との比 (これを有効セメント水比と名づけることにする) によって定まるとしたものである。その常温におけるセメントの水和進行率はセメント量、水量と材令によって決定されるものであり、この 3 者とセメント水和進行率との関係を実験的にもとめ、さらにこれらをコンクリートの圧縮強度と関連づけたものである。このセメントの水和進行率が求まれば、コンクリートの有効セメント水比が得られ、コンクリートの各材令における圧縮強度を容易に推定できることに特長がある。

2. セメントペーストの結合水量の測定

セメントペーストの結合水量とコンクリート強度との関係を求めるため、セメントペーストの水セメント比 (w/c) を 25%, 35%, 40%, 55% に変化させ、7 日、28 日、91 日、1 年の 4 種類の材令についてセメントペーストの結合水量を測定したものである。

(1) セメントの性質

実験に使用したセメントは中庸熟ポルトランドセメントであり、その鉱物組成は表一に示すとおりのものであった。また、このセメントの鉱物組成より理論結合

* 正会員 電力中央研究所技術研究所

表-1 セメントの鉱物組成

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	Total
46.9	30.9	3.4	13.0	2.0	96.2

表-2 理論結合水量¹⁾

0.457	C ₃ S	21.8
0.105	C ₂ S	3.25
0.4	(C ₃ A-3C ₃ A/3CaSO ₄)	0.68
0.371	C ₄ AF	4.83
1.37	CaSO ₄	2.74
計		33.3%

水量を浅岡¹⁾の計算式より求めると表-2のごとくになった。

(2) 供試体の製作および試験

水和結合水量測定のための供試体は水セメント比 (w/c) をそれぞれ 25, 35, 40, 55% の 4 種類とし、 $4 \times 4 \times 16$ cm の型わくを使用して製作し、成型後 24 時間は 20°C 湿度 80% の恒温恒湿室内で養生し、脱型後は 20 ± 1°C の水槽中にそれぞれ試験日まで養生した。その材令は 7 日, 28 日, 91 日, 1 年の 4 種類とした。セメントの結合水量の試験は、一般にはガラス管密封養生で試験されるが、今回は水中養生コンクリートの圧縮強度と比較するのがその目的であったので、特に水中養生の結合水量を求めたものである。試験方法は、供試体を鉄製乳鉢で粉碎したのち、0.15 mm の網フルイにてふるい分けを行ない、通過した試料約 5g を水銀柱 5 mm の減圧デシケータ (乾燥剤シリカゲル同封) 中で、3 日間真空乾燥を行なって付着水を除き、白金ルツボに入れ、900~950°C の電気炉で約 3 時間強熱してその結合水量

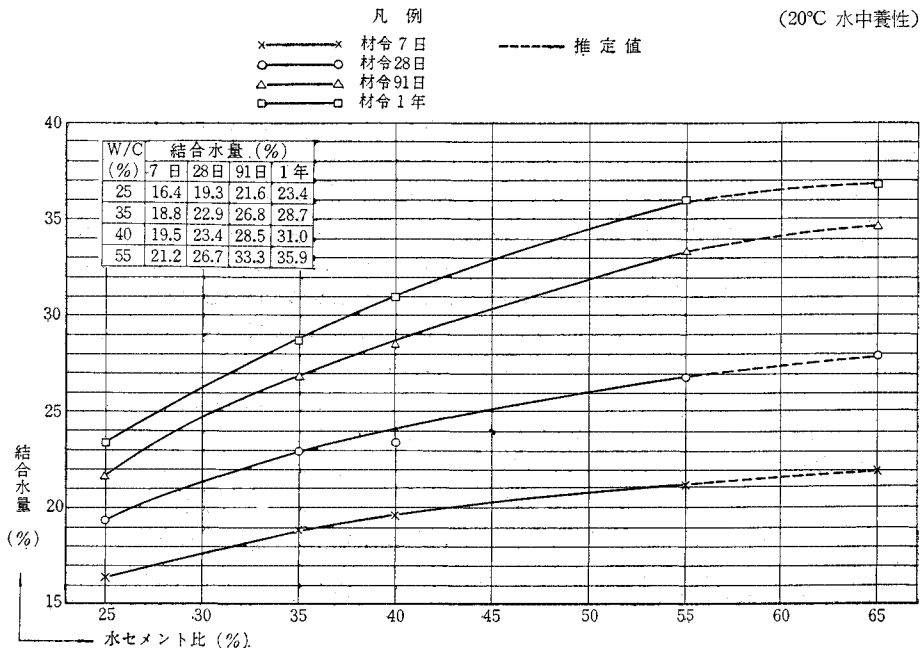
を求めた。 $w/c=55\%$ 以上のセメントペーストについては材料分離が著しくなって供試体を造ることが困難であったので中止した。

(3) 結合水量の測定結果

水セメント比 (w/c) を異にしたセメントペーストの各材令における結合水量の測定結果は図-1 に示すとおりであった。また、このセメントの鉱物組成より計算した理論結合水量は表-2 に示すとおりであって、理論結合水量は 33.3% であるのに対し、 $w/c=55\%$ 材令 91 日, 1 年まで水中養生したセメントペーストの結合水量は、それぞれ 33.3%, 35.9% となつてわずかに約 3% 程度の差が生じた。この程度の差は付着水と結晶水とをどの程度まで区別して測定するかによって異なる可能性があり、また理論式そのものも多くの仮定を含んでいるので理論式から求めた結合水量と実測からの結合水量との間には相当の差があるものと一般に考えられている。

他の研究者の実験によれば、完全結合水量は近藤²⁾は 35~37%, 篠原は 32~37% と述べている。この両者の実験値から考えると、セメントの完全結合水量は 37% 程度と考えられることになる。また、筆者らの行なったコンクリート実験結果から推定して、このセメントの場合には 37% 程度を完全結合水量と考えて計算を進めることにしたい。その理由は $w/c=65\%$ のコンクリートの圧縮強度は表-3 に示す結果となつて、材令 180 日から 1 年までの強度増進はほとんど見られず、セメントがほぼ完全に水和したものと考えられること、また、 $w/c=65\%$ のセメントペーストの結合水量は図-1 で見られるように材令 1 年で 36.8% と考えられること

図-1 中腐熱セメントを用い水セメント比を異にしたセメントペーストの各材令における結合水量



表—3 水セメント比 (w/c)=65% のコンクリートの圧縮強度

コンクリートの配合								圧縮強度 (kg/cm ²)				
c	w	w/c	S	G	S/A	空気量	スランプ	材 令				
kg	kg	%	kg	kg	%	%	cm	7 日	28 日	91 日	180 日	1 年
141.5	92	65	458	1735	21.2	3.0	3.2	113	198	300	309	310

から、このセメントの完全結合水量をセメント重量の37%と考えることにしたのである。

3. 水セメント比 (w/c) の変化がセメント水和生成物に与える影響

セメントの水和進行率は水セメント比 (w/c) が大きくなるにつれて大きくなり、その水和速度も大きくなるものであって、この現象は今回の実験(図—1)からも明瞭に知ることができる。また、水セメント比 (w/c) を変化させたセメントペーストの水和熱の実験からもこのことは容易に知ることができる。

一般にセメントは短時日の間に容易に水和しつくすものではなくて、40 μ 以上もの粗粒の粒子は30年以上を経過してもなお、その内部にはもとのクリンカーのままであることが報告されている⁹⁾。以上のごとく粗粒のセメントは水和するのに長時間を要するのであるが、微細粒のセメントは水和速度が急速であると考えられている⁹⁾。水セメント比 (w/c) が小さくて、セメント粒子間の間げきが小さい場合について、A.E. Komendant⁷⁾ はつぎのように述べている。セメント粒子の大きさは大体75~1 μ の範囲にあるが、これらの粒子間に水が加えられる場合に水が粒子に吸引される速度とセメント粒子の軟化する速度とは粒子の粒径により異なり、また、 C_3A は最も速く、 C_2S は特に遅いとされている。この場合、反応熱により蒸気圧が高められ、大きな粒子の間には水が浸透しにくくなる。さらにコロイドの量が増大した場合、水の量と間げきがこの増大に応じうるものでなければコロイドは相互に圧縮される。この結果、粒子の軟化を遅らせる集塊が形成され、ますますセメント粒子の水和をさまたげ、粒子をコロイド溶液の中に浮遊させた状態で結晶化する。今回の実験においても水セメント比 (w/c) の小さいセメントペーストは十分な水量と間げきが得られず、同様な現象が起こって水和作用が緩慢になったものと考えられる。

この理論と同様な考え方を高野俊介⁸⁾ は実験的に証明された。すなわち“セメントが水和するとき、初期温度および養生温度が高いと水和作用が早いため、セメント粒子の周囲に微細なゲル状水和物や結晶などの新固相が多量に析出し、これらの微細な水和物により粒子が被覆され、一種の半透膜を形成し、この被覆が比較的早く生成することにより、以後の水和進行が阻害される”と述べておられる。また、H.H. Steinour はセメントの水和作用中において $Ca(OH)_2$ の存在によって C_3A の水和生

成を非常に遅延させると述べ、さらに R.H. Bogue¹¹⁾ はセメントの水和過程において $Ca(OH)_2$ が飽和状態に近くなると C_3S および C_2S の水和生成を著しく遅延させるものであると述べている。いずれにしても、セメントの水和作用中において、 $Ca(OH)_2$ が析出され、その量が多くなればなるほど C_3A 、 C_3S 、 C_2S の水和作用を遅延させることは、セメント化学においては一般に認められていることである。

一方水セメント比 (w/c) の変化によるセメント強度に関しては、森茂二郎⁹⁾ ほかの研究によると、セメントペーストの強度は、セメントペースト中の遊離水による空げき率が大きくなればなるほど強度は低下すると発表されている。また、山崎寛司¹⁰⁾ の発表によれば、セメントペーストの強度はセメントの結合水量と直線的な関係にあることを述べ、強度について基礎的研究を行なう場合には、結合水量を調査研究することが有効であると述べておられる。この森・山崎の理論は全く同一のことであり、両者とも結合水量に関係あることを示したものである。

また、T.C. Powers と T.L. Brownyard は1947年に、セメントペーストおよびモルタルの強度は、セメントの水和生成物とそれに含まれる空げきの容積の和の初めに使用した水の容積に対する比 (gel-space ratio) の一次式で表わされることを発表している¹⁰⁾。その後の発展は Powers によって文献17)中に簡潔にまとめられている。

4. セメントの水和進行率 (R_H)

セメントペーストの水セメント比 (w/c) と結合水量と材令との関係の実験結果は図—1に示したとおりであるが、これによると水セメント比 (w/c) が大きく、材令も長期になると、セメントの水和進行は増加することを示した。今回の実験に使用したセメントの完全結合水量を前述のように37%とすると、その水和進行率は表—4のごとくになって、 $w/c=55\%$ で水中養生1年にもなると、セメントの水和進行率は $35.9/37=0.97$ 、すなわち97%も水和したと考えられる。

この実測したセメントのある材令における結合水量と完全結合水量との割合は、セメントの水和進行の割合を示すものであるから、ここで水和進行率 (R_H : Rate of Hydration) と名付けることにする。

$$\text{水和進行率 } (R_H) = \frac{\text{ある材令におけるセメントの結合水量}}{\text{セメントの完全結合水量}} \dots\dots\dots (1)$$

図-2 各材令におけるセメントの水和進行率 (R_H) と水セメント比 (w/c) との関係

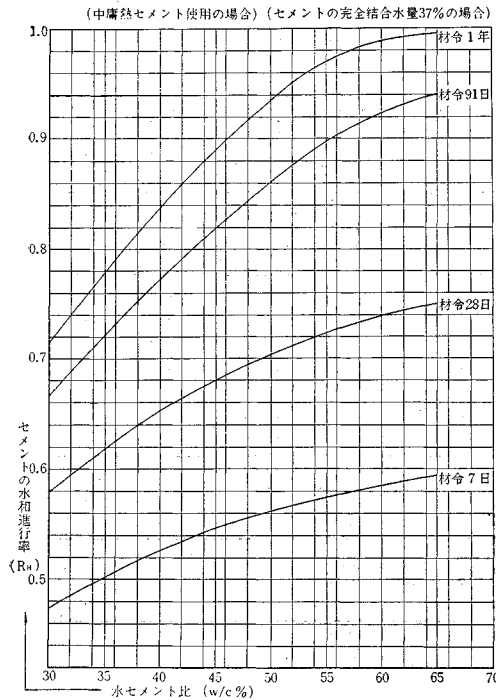


表-4 結合水量から求めたセメントの水和進行率 (R_H)

w/c (%)	結合水量 (%)				セメントの水和進行率 (R_H) (%)				摘要
	7日	28日	91日	1年	7日	28日	91日	1年	
25	16.4	19.3	21.6	23.4	44.3	52.2	58.4	63.2	○
30	17.5	21.4	24.6	26.4	47.3	57.8	66.5	71.4	□
35	18.6	22.8	26.8	28.8	50.3	61.6	72.4	77.8	○
40	19.5	24.2	28.5	31.0	52.7	65.4	77.0	83.8	○
45	20.2	25.4	30.3	33.0	54.6	68.6	81.9	89.2	□
50	20.8	26.2	31.9	34.6	56.2	70.8	86.2	93.5	○
55	21.2	26.7	33.3	35.9	57.3	72.2	90.0	97.0	○
60	21.6	27.2	34.2	36.6	58.4	73.5	92.4	98.9	□
65	22.0	27.8	34.8	36.8	59.5	75.1	94.1	99.5	□

注 (1) セメントの完全結合水量をセメント重量の 37% とする。
 (2) ○印は実測値を示し、□印はグラフより求めた値。

この水和進行率はセメントペーストの水セメント比 (w/c) と材令とによって変化するものであって、これらの関係を 図-2 に示した。この図から任意の水セメント比 (w/c) と任意の材令におけるセメントの水和進行率を求めることができるようになる。

5. コンクリートの有効セメント水比と圧縮強度

コンクリートの圧縮強度を表わす式として最も重要視されているのは、セメント水比説であり、この式を用いてコンクリートの配合決定のための圧縮強度推定値を求めているのである。しかし、この式によれば、材令 7

日、28 日、91 日と材令に応じた式を用いなければならないし、またこの式は数多くのコンクリート試験を行なって、その平均的強度と c/w との関係性を求めたものであって、理論的根拠は少ない式であると考えられる。

そこで筆者らはこのセメント水比説をさらに詳細に検討した。セメント水比説とは c/w と圧縮強度との関係を表わす説であって、コンクリートの終局の強度をセメント水比によって考えると、コンクリート 1m^3 中のセメントが完全に水和結晶した量とコンクリート 1m^3 に使用された単位水量との比によって圧縮強度は決定されると考えることができる。したがってコンクリート 1m^3 中のセメントの任意の材令における水和結晶の生成率が明らかになれば単位水量との比が判明し、コンクリート中のセメントの水和結晶の生成率に応じたコンクリートの強度が求められるであろうとの推論を下した。このように考えて、コンクリートの圧縮強度 σ_c は、

有効セメント水比 (C_H/w)

$$\begin{aligned}
 & \text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ 中 } \times \text{セメントの水和} \\
 & \text{のセメント量 (kg)} \times \text{進行率 } (R_H) \\
 & = \frac{\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ 中の水量 (kg)}}{\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ 中の水和したセメント量 (kg)}} \\
 & = \frac{\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ 中の水和したセメント量 (kg)}}{\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ 中の水量 (kg)}} \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

図-3 セメントの水和進行率による有効セメント水比 (c_H/w) とコンクリートの圧縮強度との関係 (黒部第四ダムコンクリート(材令7日、28日、91日、1年) (中庸熟ポルトランドセメント使用の場合) (供試体寸法 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 円筒型))

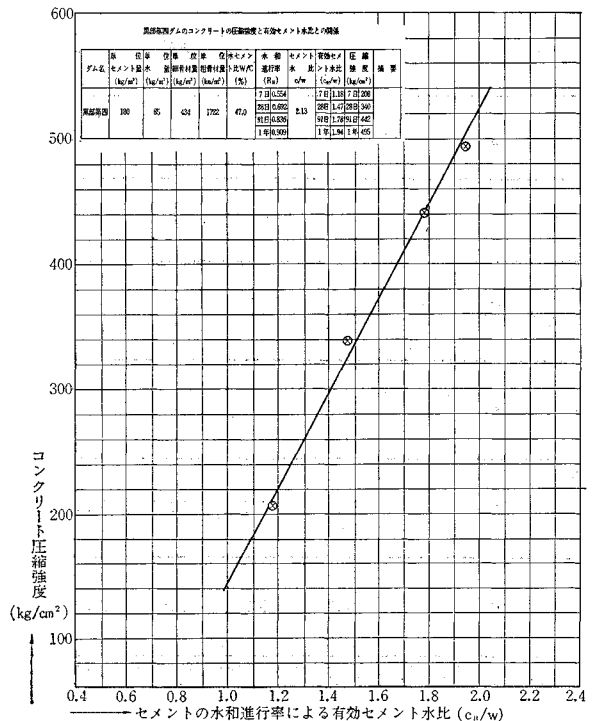
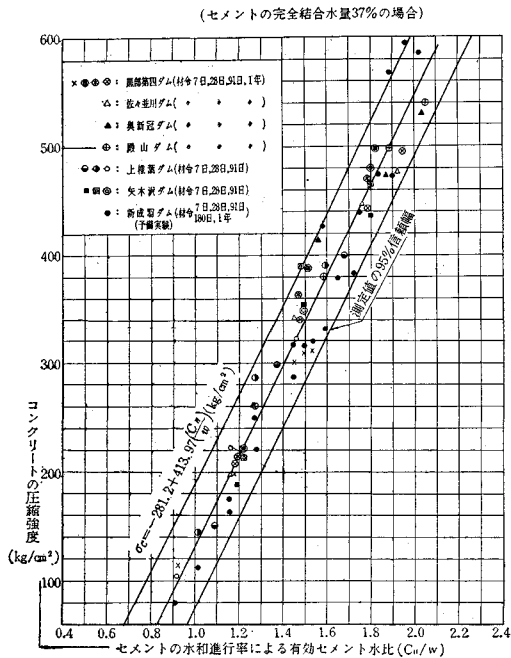


表-5 各ダムにおけるコンクリートの配合と圧縮強度と有効セメント水比との関係(完全結合水量 37% の場合)

ダム名	単セメント位置 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	単細骨材位置 (kg/m ³)	単粗骨材位置 (kg/m ³)	水セメント比 (w/c) (%)	水和進行率 (RH)		セメント水比 (c/w)	有効セメント水比 (c _{eff} /w)		圧縮強度 (kg/cm ²)		空気量 (%)	摘要
						7日	28日		7日	28日	7日	28日		
佐々並川△	230	110	609	1474	47.8	7日	0.556	2.09	7日	1.16	7日	198	3.7	○○○○
						28日	0.695		28日	1.45	28日	342		
						91日	0.842		91日	1.76	91日	446		
						1年	0.917		1年	1.92	1年	477		
黒部第四⊗	180	85	434	1722	47.0	7日	0.554	2.13	7日	1.18	7日	208	4.6	○○○○
						28日	0.692		28日	1.47	28日	340		
						91日	0.836		91日	1.78	91日	442		
						1年	0.909		1年	1.94	1年	495		
〃 ⊗	200	89	425	1726	45.0	7日	0.548	2.22	7日	1.22	7日	221	3.1	○○○○
						28日	0.682		28日	1.51	28日	388		
						91日	0.818		91日	1.82	91日	498		
						1年	0.891		1年	1.98	1年	—		
〃 ⊗	190	89	413	1734	47.0	7日	0.554	2.13	7日	1.18	7日	214	3.0	○○○○
						28日	0.692		28日	1.47	28日	364		
						91日	0.836		91日	1.78	91日	470		
						1年	0.909		1年	1.94	1年	—		
〃 ×	142	92	458	1735	65.0	7日	0.596	1.54	7日	0.918	7日	113	3.0	○○○○
						28日	0.750		28日	1.16	28日	198		
						91日	0.940		91日	1.45	91日	300		
						180日	0.970		180日	1.49	180日	309		
1年	0.996	1年	1.53	1年	310									
奥新冠▲	245	105	573	1671	43.0	7日	0.540	2.33	7日	1.26	7日	260	4.5	○○○○
						28日	0.670		28日	1.56	28日	414		
						91日	0.801		91日	1.87	91日	473		
						1年	0.870		1年	2.03	1年	530		
殿山⊕	220	92	629	1491	42.0	7日	0.535	2.38	7日	1.27	7日	260	2.0	○○○○
						28日	0.665		28日	1.58	28日	380		
						91日	0.792		91日	1.88	91日	499		
						1年	0.860		1年	2.05	1年	540		
上椎葉⊖	249	130	607	1396	52.0	7日	0.567	1.92	7日	1.09	7日	150	4.0	○○○○
						28日	0.713		28日	1.37	28日	298		
						91日	0.877		91日	1.68	91日	400		
						1年	0.954		1年	1.83	1年	—		
〃 ●	210	121	519	1558	57.5	7日	0.581	1.74	7日	1.01	7日	145	3.7	○○○○
						28日	0.731		28日	1.27	28日	286		
						91日	0.913		91日	1.59	91日	390		
						1年	0.982		1年	1.71	1年	—		
〃 ○	191	123	574	1492	64.5	7日	0.594	1.55	7日	0.92	7日	104	4.2	○○○○
						28日	0.749		28日	1.16	28日	222		
						91日	0.940		91日	1.46	91日	321		
						1年	0.996		1年	1.54	1年	—		
矢木沢◎	250	115	500	1500	46.0	7日	0.551	2.17	7日	1.20	7日	—	2.9	○○○○
						28日	0.686		28日	1.49	28日	350		
						91日	0.828		91日	1.80	91日	480		
						1年	0.900		1年	1.95	1年	—		
〃 □	230	106	495	1504	46.0	7日	0.550	2.17	7日	1.19	7日	214	2.9	○○○○
						28日	0.686		28日	1.49	28日	390		
						91日	0.828		91日	1.80	91日	465		
						1年	—		1年	—	1年	—		
〃 ■	250	115	579	1367	46.0	7日	0.550	2.17	7日	1.19	7日	188	2.9	○○○○
						28日	0.686		28日	1.49	28日	354		
						91日	0.828		91日	1.80	91日	437		
						1年	—		1年	—	1年	—		
新成羽● (予備実験)	230	97.1	479	1758	42.2	7日	0.537	2.37	7日	1.27	7日	250	2.0	○○○○
						28日	0.666		28日	1.58	28日	426		
						91日	0.794		91日	1.88	91日	568		
						180日	0.828		180日	1.96	180日	595		
1年	0.862	1年	2.04	1年	586									
〃 ●	200	97.1	503	1758	48.6	7日	0.558	2.06	7日	1.15	7日	175	2.0	○○○○
						28日	0.699		28日	1.44	28日	316		
						91日	0.850		91日	1.75	91日	439		
						180日	0.887		180日	1.83	180日	475		
1年	0.924	1年	1.90	1年	473									
〃 ●	170	97.1	528	1758	57.2	7日	0.580	1.75	7日	1.02	7日	113	2.0	○○○○
						28日	0.731		28日	1.28	28日	221		
						91日	0.911		91日	1.59	91日	330		
						180日	0.945		180日	1.65	180日	379		
1年	0.981	1年	1.72	1年	384									
〃 ●	150	97.1	545	1758	64.8	7日	0.594	1.54	7日	0.91	7日	80	2.0	○○○○
						28日	0.750		28日	1.16	28日	163		
						91日	0.940		91日	1.45	91日	287		
						180日	0.968		180日	1.49	180日	315		
1年	0.996	1年	1.53	1年	320									

(注) ① 摘要 ○印は電研で直接実験を行なったもので、他は報告書より参照したものである。
 ② コンクリートに使用したセメントは中層熟ポルトランドセメントである。
 ③ 供試体寸法はφ15×30cmでいずれも40mmフルイにて湿式フルイ分けをしコンクリート供試体を作ったものである。
 ④ 空気量は40mmで湿式フルイ分けをした値、ただし黒部第四ダムコンクリートの場合は30mmで湿式フルイ分けを行なった。

図-4 セメントの水和進行率による有効セメント水比とコンクリートの圧縮強度との関係 (中庸熱ポルトランドセメント使用の場合)



に關係があると考へて、コンクリートの圧縮強度と有効セメント水比(C_H/w)との関連性について調査したところ、図-3 および表-5、図-4 に示したような結果を得、セメントの水和進行率から求まる有効セメント水比とコンクリートの圧縮強度は各材令とも、ほぼ一直線上にあることが判明した。特に図-3 にはセメントの鉱物組成が結合水量の測定に用いたセメントとほぼ同一である黒部第4ダム コンクリートの各材令における圧縮強度を示したものである。さらに当研究室で行なつたコンクリート実験値 36 点と他のダム コンクリートの実験値 28 点を同様にプロットしたものが図-4 である。これにあてはまる直線式を最小自乗法によって求めたところ、

$$R_c = -281.2 + 413.97(c_H/w) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots (3)$$

となつた。同図には測定値の 95% 信頼幅もともに示してある^{13), 14)}。

表-6 各ダムに用いた中庸熱ポルトランドセメントの化学成分および鉱物組成

ダム名	Loss (%)	In. Sol (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Total (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₂ S (%)	C ₄ AF (%)	CaSO ₄ (%)
佐々並川	0.59	0.31	23.8	4.1	4.1	63.9	1.5	1.24	99.5	42.2	3.9	37.0	12	—
黒部第四	0.7	0.3	23.3	4.3	4.2	64.4	1.4	1.3	99.9	45.0	5.0	33.0	11	—
奥新冠	0.5	0.4	23.3	4.4	3.9	64.1	1.0	1.8	99.2	45.3	4.2	—	—	—
殿山	0.75	0.5	23.5	4.4	3.7	64.2	1.4	1.1	99.6	44.8	5.4	32.0	12	—
新成野	0.85	0.57	23.5	4.4	3.9	63.9	1.4	1.3	99.7	43.0	5.0	35.0	13	—
上椎葉	0.74	0.3	23.7	4.8	3.9	63.4	1.3	1.3	99.4	36.4	6.0	40.6	—	—
矢木沢	0.6	0.6	23.1	4.2	3.9	64.2	1.1	1.9	99.6	47.0	5.0	31.0	12	3

この実験のコンクリートに使用したセメントはいずれも中庸熱ポルトランドセメントであり、その化学成分および鉱物組成は表-6 に示すとおりのものであつた。また、コンクリート 1 m³ 中の単位セメント量は 140~250 kg/m³、水セメント比 (w/c) は 42~65%、また空気量は 3~4%、スランプ 4~7 cm の範囲にあるコンクリートであつた。したがつて中庸熱ポルトランドセメントを使用し、コンクリートの単位セメント量、水セメント比 (w/c) スランプおよび空気量が上記の範囲内であれば、コンクリートの有効セメント水比と圧縮強度との關係は材令にかかわりなく同一の直線によって表わされ、式(3)によってかなりの精度で各材令におけるコンクリートの圧縮強度を推定することが可能となるであらう。その際必要な有効セメント水比は、図-2 から得られる R_H に c/w を乗ずることによって容易に求められる。

なお、 c_H/w は水和セメント・使用水比でもあり、この方がより化学的、学問的であらうが、この量が水和結晶作用によってコンクリートの圧縮強度発現に寄与するセメント水比中の有効部分を表わしていることから、特に(2)を有効セメント水比 (Effective Cement Water Ratio) と名付けることにした。

6. コンクリートの水和セメント空けき比と圧縮強度

前節ではコンクリートの有効セメント水比説によって圧縮強度との関連性を調査したのであるが、本節ではコンクリートの空けきを考慮した、水和セメント空けき比によってコンクリートの圧縮強度を整理した結果を図-5 に示した。

この水和セメント空けき比 (Hydrated Cement Void Ratio) とは次式によって表わされるものとする。

$$\text{水和セメント空けき比} = \frac{\text{コンクリート 1 m}^3 \text{ 中の水和したセメント量 (容積)}}{\text{コンクリート 1 m}^3 \text{ 中の水量 + 空気量 (容積)}} \dots\dots (4)$$

図-5 に示した水和セメント空けき比とコンクリートの圧縮強度との關係は一応直線的であると考えられるが、有効セメント水比を用いて整理した結果に比して、

図-5 コンクリートの水和セメント空けき比と圧縮強度との関係(中庸熟ポルトランドセメント使用の場合)

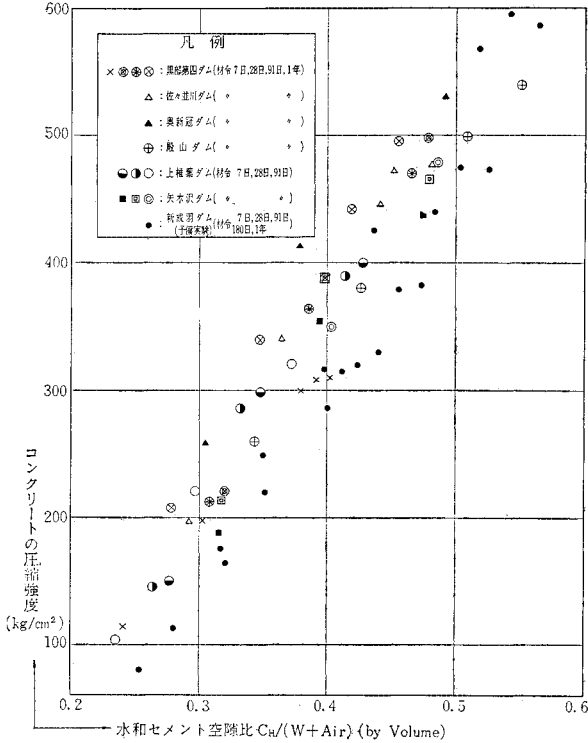
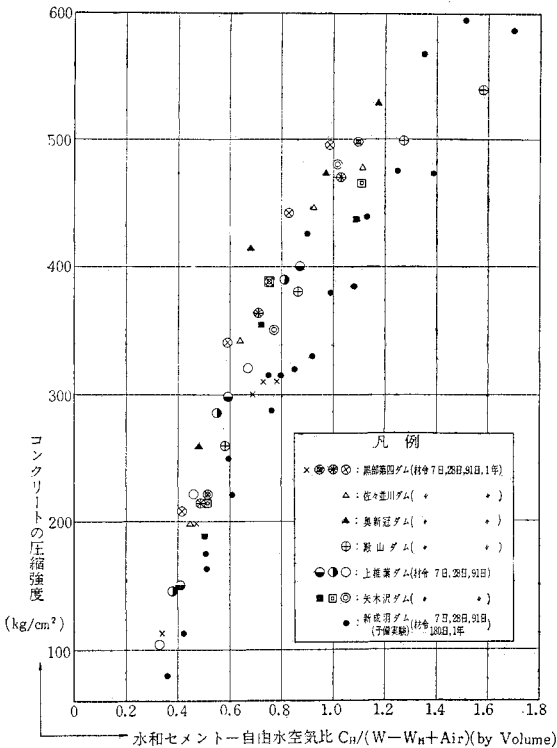


図-6 水和セメント-自由水空気比とコンクリートの圧縮強度との関係(中庸熟ポルトセメント使用の場合)



バラツキが多いように思われた。この原因の一つはコンクリート中の空気量の値が、その圧縮強度試験用供

試体の作製時において実測されたものではないものも含まれているからであろうとも考えられる。

さらにコンクリート 1 m³ 中の水和したセメント量の自由水量(単位水量からセメントの結合水量を差引いた残りの水量)と空気量との和に対する比とコンクリートの圧縮強度との関係を調査した結果を図-6に示した。この比を水和セメント-自由水空気比(Hydrated Cement-Free Water and Air Ratio)と名付けるものであって、つぎの式(5)で定義される。この値は材令と w/c によって変化するが、これはセメントの水和進行率から容易に求めることが可能である。

$$\text{水和セメント-自由水空気比(容積比)} = \frac{C_H}{W - W_H + \text{air}} \quad \dots(5)$$

ここに、

C_H: ある材令におけるコンクリート 1 m³ 中の水和したセメント量(容積)

W: 最初に用いられたコンクリート 1 m³ 中の水量(容積)

W_H: ある材令におけるコンクリート 1 m³ 中のセメント結合水量(容積)

air: コンクリート 1 m³ 中の空気量(容積)

図-6 に示した水和セメント-自由水空気比とコンクリートの圧縮強度との関係は曲線的であった。このことはコンクリート 1 m³ 中の自由水がゼロとなり、しかも空気を混入しない配合では、この式(5)は無有限大となり、一方、コンクリートの圧縮強度はある限度で停止するため、曲線関係を示すのはきわめて当然のことであり、筆者らのこの考え方が誤りでないことを示したものである。図に見られるバラツキの原因の一つとしては、前述のような空気量の値を用いたことにあるとも考えられる。

なお(5)の分子に水和水量を加えたものと強度との関係も図-6を横に引伸したものになるにすぎない。

7. 結語および討論

この論文は、従来コンクリートの強度について提唱されていた Inge Lyse のセメント水比説に加うるに、コンクリートの圧縮強度はセメントの水和進行程度によって支配されるであろうとの推論に基づいて、セメントの水和進行率を求め、同説にこの水和進行率を加え、これを改良したものである。

このセメントの水和進行率を求めるにあたっては、セメントペーストの水セメント比(w/c)を数種類に変化せしめて供試体を作り、これを水中養生し、材令7日、28日、91日、1年の4種類について、各材令におけるセメントの結合水量を測定し、そのセメントの完全結合水量との比、すなわち水和進行率を求めたものである。セメントの水和進行率はセメント量、水

量, 材令によって決定されるものであり, この3者と水和進行率との関係を実験的に求めた。このセメントの水和進行率より任意の材令におけるコンクリート 1m³ 中の水和結晶したセメント量が求められる。このコンクリート 1m³ 中の水和結晶したセメント量の, はじめに用いられた水量に対する比を有効セメント水比と名づけ, この有効セメント水比とコンクリートの圧縮強度との間には直線的関係が成立することを示した。また中庸熟ポルトランドセメントを用いたダム用コンクリートの任意の材令における圧縮強度を有効セメント水比から推定する実験式を導いた。

さらに, 結合水量の測定に用いたものと同じ中庸熟ポルトランドセメントを用い, 水セメント比 w/c を4種類に変化させたセメントペースト, モルタルの供試体を作り, 材令7日, 28日, 91日, 1年の4種類の圧縮強度を求め, セメントペースト, モルタルについてもコンクリートと同様に有効セメント水比と圧縮強度との関連性を調査した。この結果は, 表-7, 図-7に示した。図-7にはコンクリートの圧縮強度も同時に示してある。

セメントペースト, モルタル, コンクリートの3者の圧縮強度と有効セメント水比との関係は, 圧縮強度が, $\sigma_c = 600 \text{ kg/cm}^2$ 以上にもなると, セメントペースト, モルタルの線からコンクリートだけは逸脱する傾向が見られた。このことは, コンクリートの圧縮強度が粗骨材自身の強度, 粗骨材とモルタルとの付着, コンクリート内部材料の不均等性, セメント量の多少, その他によって支配されるものと考えられ, それらの影響が圧縮強度 $\sigma_c = 500 \text{ kg/cm}^2$ 程度を境として現われたものであろうと考えられる。

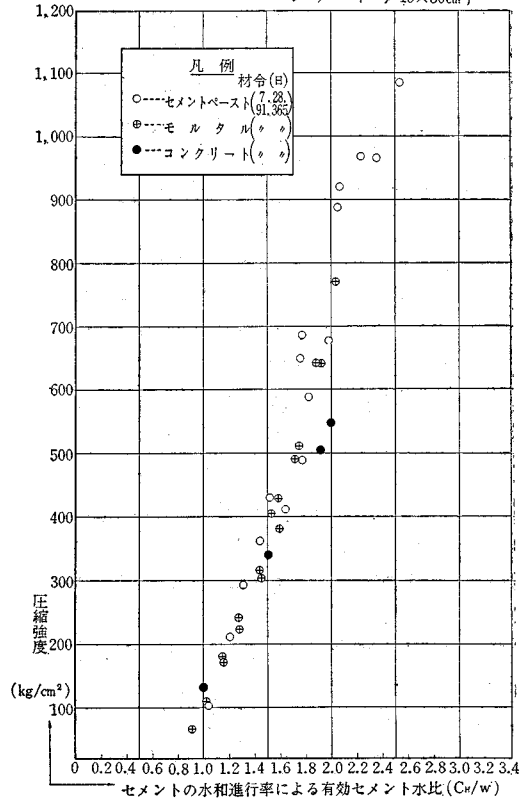
このセメントペースト, モルタルとコンクリートの

図-7 セメントの水和進行率による有効セメント水比と

{セメントペースト
モルタル
コンクリート} の圧縮強度との関係

(中庸熟ポルトランドセメント使用の場合)

供試体寸法 {セメントペースト $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$
モルタル $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$
コンクリート $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ }



圧縮強度の差異に関しては今後の研究に待たなければならない。しかし今回の有効セメント水比と圧縮強度との関連性は, セメントペースト, モルタル, コンクリー

表-7 セメントペースト, モルタルの $R_H, c/w, c_H/w, \sigma_c$ の関係

セメントペースト						モルタル					
w/c (%)	材令	R_H	c/w	c_H/w	σ_c (kg/cm ²)	w/c (%)	材令	R_H	c/w	c_H/w	σ_c (kg/cm ²)
25	7日	0.443	4.00	1.77	686	42.2	7日	0.537	2.37	1.27	242
	28日	0.512		2.05	887		28日	0.666		1.58	430
	91日	0.584		2.34	976		91日	0.794		1.88	643
	1年	0.632		2.53	1085		1年	0.862		2.04	768
35	7日	0.503	2.86	1.44	362	48.6	7日	0.558	2.06	1.15	179
	28日	0.616		1.76	652		28日	0.699		1.44	317
	91日	0.724		2.07	920		91日	0.850		1.75	513
	1年	0.778		2.23	969		1年	0.924		1.90	639
45	7日	0.546	2.22	1.21	209	57.2	7日	0.580	1.75	1.02	112
	28日	0.686		1.52	428		28日	0.731		1.28	223
	91日	0.819		1.82	585		91日	0.911		1.59	382
	1年	0.892		1.98	678		1年	0.981		1.72	492
55	7日	0.573	1.82	1.04	101	64.8	7日	0.594	1.54	0.91	65
	28日	0.722		1.31	291		28日	0.750		1.16	169
	91日	0.900		1.64	413		91日	0.940		1.45	303
	1年	0.970		1.77	485		1年	0.996		1.53	405

(注) R_H : 水和進行率 c_H/w : 有効セメント水比 供試体寸法 {セメントペースト $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$
 c/w : セメント水比 σ_c : 圧縮強度 {モルタル $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$

トの3者ともある範囲内では成立することが示された。

なお、今回の実験では、セメントの完全結合水量を測定することが不可能であったので、コンクリートの圧縮強度の増進、セメントペーストの結合水量の測定値、理論計算による値、および他の研究者による値を参考にして、セメントの完全結合水量をセメント重量の37%としたのである。この完全結合水量の値が多少変化しても、コンクリートの圧縮強度と有効セメント水比との間の直線関係はそこなわれることはなく、その係数がわずかに変化するのみであって、この完全結合水量をさらに正確に把握することができれば、式(3)は一層完全なものになるものと考えられる。

使用したセメントは中庸熱ポルトランドセメントであっても、その鉱物組成が各ダムによって異なっており、また骨材の性質も異なっているので、コンクリートの圧縮強度にバラツキが出たものと考えられる。

なお以上の考え方には空気量の影響が考慮されていないので、セメント・空げき比とコンクリートの圧縮強度との関係を計算し、図示した結果を図-5に示した。ただしここにおけるセメント・空げき比は、水和したセメントの体積の、はじめに使用した水の体積と空気量を加えたものに対する比であるとした。さらに、コンクリート1^m中の水和したセメント量の自由水量(単位水量からセメントの結合水量を差引いた残りの水量)と空気量との和に対する比を水和セメント-自由水空気比と名づけ、これと圧縮強度との関係を図-6に示した。

今回の結果から判断すると、空気量が3~5%までの範囲では、有効セメント水比による強度の推定が実用的であろうと考えられる。このようにセメントの化学作用による結晶進行の面よりコンクリートの圧縮強度を推定する考え方を見いだしたことにいささかの意義を感じていただければ幸である。

8. あとがき

1938年ストックホルムで開催された第2回 Chemistry of Cement の Symposium の中で、S.G. Hedström が、“セメントの水和進行の基礎資料からコンクリートの強度は計算によって求められるであろう¹²⁾”と述べているのを見て以来、コンクリートの強度とセメントの水和結晶との関係について深い関心を抱いてきた。

セメントの結合水量の測定は、一般にはガラス管密封養生の供試体について行なわれているが、筆者らはコンクリート供試体と同様に水中養生(20°C)を行なったセメントペーストの結合水量を測定したことが、コンクリート強度の解析に有効な手段になったものと考えられる。なお、この実験に使用したセメントは中庸熱ポルトランドセメントであるが、さらに、普通ポルトランドセメント、フライアッシュセメントおよび高炉セメント

についても、これと同様な方法で水和進行率が求められれば、これから有効セメント水比(c_H/w)が得られ、コンクリートの圧縮強度を推定することが可能となるであろう。

この実験を行なうにあたっては、東京大学教授 国分正胤氏、当研究所所長付 畑野正氏からはコンクリート関係についてのご指導を賜わり、当研究所燃料化学研究室石原義巳氏よりはセメント化学に関してご援助を得、日本セメント研究所長 中条金兵衛氏、同次長 山田順治氏、主任研究員 山崎寛司氏、小野田セメント中央研究所次長 竹本国博氏からはセメントの水和作用、セメントの結晶組織等につき特別なご指導とご援助を賜わり、また日本セメント研究所主任研究員 近藤実氏、小野田セメント中央研究所 小野吉雄氏からはセメントの完全結合水量その他について貴重な文献と多くの示唆を賜わったものであって、ここに心から厚くお礼申し上げる次第であります。

参考文献

- 1) 浅岡勝彦：理論セメント化学，昭和22年。
- 2) 同上
- 3) 篠原謹爾：セメント糊に関する研究，九州大学彙報，昭和13年，昭和15年。
- 4) 関 慎吾：土木学会論文集，第50号，昭和32年12月。
- 5) 浅岡勝彦：理論セメント化学，昭和22年。
- 6) 吉田徳次郎：コンクリート および 鉄筋コンクリート施工法，1956。
- 7) Komendant, A.E.: Economy and Safety of Different Type of Concrete Dams, Proc. of A.S.C.E., No. 184, May 1955.
- 8) 高野俊介：打込み温度がマス コンクリートの強度におよぼす影響の研究，土木学会論文集，第26号，昭和30年5月。
- 9) 森 茂二郎外：粉末組成の異なるセメントの水和の研究，小野田研究彙報，第8巻第30号，1956。
- 10) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する研究，土木学会論文集，第85号，1962年2月。
- 11) Bogue, R.H.: The Chemistry of Portland Cement, p. 614.
- 12) Hedström, S.G.: The Physical Structure of Hydrated Cements, Chemistry of Cement, Proc. of the 2nd International Symposium, Stockholm, 1938.
- 13) 河田竜夫・国沢清典：現代統計学，広川下巻 p. 11~14.
- 14) Bowker & Lieberman: Engineering Statistics, Prentice-Hall, p. 253~257.
- 15) Yamaguchi, G., Takemoto, T., Uchikawa, H. and Takagi, S.: Rate of Hydration of Cement Compounds and Portland Cement Estimated by X-Ray Diffraction Analysis, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington D.C. 1960.
- 16) Powers, T.C. & Brownard, T.L.: Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, Part 6. Relation of Physical Characteristics of the Paste to Compressive Strength, Journal of A.C.I., Vol. 18, No. 7, March 1947, pp. 845~864.
- 17) Powers, T.C.: Physical Properties of Cement Paste, Chemistry of Cement, Proc. of the 4th International Symposium, Washington D.C. 1960, Vol. 2, pp. 577~613.

(1966. 11. 8・受付)