

論文

[1169] コンクリートの品質に及ぼす降雨の影響

正会員 浦 憲親 (金沢工業大学)

1. はじめに

現場施工のコンクリート工事には、予測困難なさまざまなことが起り得る。天候の急変にともなう降雨は、その一例である。降雨の際のコンクリートの打込みは、打継ぎ部を整えた上で中止するのが原則である [1-6]。しかし、現実には、工期との関係もあって、打込みを続行するが多い。今日では、一般にコンクリートの製造、運搬、打込みが、各企業体に分れており、計画の変更が出来にくくなっているという事情もある。

本研究は、コンクリートの打込み直後における降雨（小雨程度）が、そのコンクリートの品質に如何なる影響を及ぼすかについて、モデル供試体を用いて行った実験結果を述べるものである。

2. 降雨強度のモデル

降雨強度のモデルは、夕立のように短時間に集中する場合と梅雨のように静かに長く続く場合の2種類を想定した。実験方法は、φ10*20cmの鋼製型わくを利用し、図-1に示すように2層目打込み後、所定の水量を降雨とみなしてただちに加えた。加えた水量は、降雨強度の瞬間的な雨の強さ [7] に相当する0.02、0.05及び0.10mmとした。これは、雨の降り方と1時間当りの雨量になおすと1、3及び6mmとなり、その容積は、型わく一本当りに換算してそれぞれ7.85、23.55及び47.10gとなる。なお、無加水を0mmとした。

加水の方法は、コンクリート打込み後、所定の水量をただちに加える直接法（以下、図中では0とし、加水量0,1,3,6mmと組合せて示す）と1時間かけて加える点滴法（以下、図中では60とし、加水量1,3,6mmと組合せて示す）の2種類とした。点滴法では、供試体の加水面が荒れることを防ぐため、医薬用ビュレットを用いて5分毎に水滴の落下位置を変化させることで行った。なお、供試体個数は、1種類につき5個で、力学的性状試験結果は3個1組の平均値で表している。

3. 実験概要

3.1 供試体

セメントは、市販の普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材・粗骨材は、表-1に示す石川県手取川産で表乾に近い状態で用いた。練混ぜ水には、飲料用の井戸水を用いた。

コンクリートの調合は、水セメント比55%、スランプ18cm、

表-1 骨材の物理的性質

項目 種類	産地	比重	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	最大 寸法 (mm)	粗粒率
細骨材	手取川	2.57	2.37	1.682	67.0	5	3.11
粗骨材		2.60	2.06	1.576	61.9	20	6.70

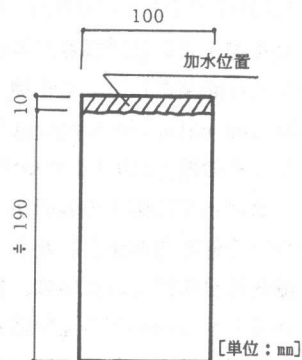


図-1 降雨強度のモデル

空気量1%のプレコンクリートで試し練りにより決定した。コンクリートの打込みは、加水及び無加水にかかわらず型わく上端より、約10mm低くし、加水した水があふれないようにした。その後は、周囲をシートで覆い脱型時まで恒温恒湿室内に静置した。

キャッピングは、加水した水がすべて吸水あるいは蒸発した頃を目安とし、打込み後48時間めに行った。加水量6mmの場合、コンクリート上面に僅かに水が残っていたため、高分子吸収材で吸い取った後にキャッピングを行った。吸い取った水の量は約10gである。脱型は、供試体製作後72時間で行った。養生は、標準養生（水温：20℃）と乾燥養生（室温：20℃、湿度：60%RH）の2種類とした。

3. 2 実験方法

重量は、試験材令ごとに測定し密度も求めた。重量変化率は、材令91日の供試体一本を連続して測定したもので、脱型時を基準として $A = (A_2 - A_1) / A_1 * 100$ (%) 式により求めた。ここで、A：重量変化率(%)
 A_2 ：脱型時の測定値(g) A_1 ：所定材令の測定値(g)

動弾性係数は、JIS A 1127に従って縦振動から求めた。超音波伝播速度は、ジルコン酸チタン酸鉛(P_ZT-4)セラミック製の200KH₂トランジューサーを用いて直接法で超音波伝播時間を測定し、 $V_p = L/T$ により算出した。ここで、 V_p ：超音波伝播速度(m/s) L：供試体の長さ(cm) T：超音波伝播時間(μs)

圧縮強度は、JIS A 1108の規定に従って求めた。静弾性係数は、圧縮試験と同時に検長100mmのコンプレッソメータ（感度：2000*10⁻⁶ひずみ/mm）を用いて荷重-ひずみ度をX-Yレコーダーに記録し、最大応力の1/3で $E = (S_1 - S_2) / \epsilon - 50 * 10^{-6}$ により求めた [8]。ここで、E：静弾性係数(kgf/cm²) S_1 ：最大荷重の1/3に相当する圧縮応力(kgf/cm²) S_2 ：圧縮ひずみ50*10⁻⁶のときの圧縮応力(kgf/cm²) ϵ ：圧縮応力 S_1 によって生ずる圧縮ひずみ

塩化物イオン浸透深さ試料は、供試体を10日間乾燥養生を行った後、3%塩化ナトリウム溶液中に40日間浸水した。塩化物イオン浸透深さの測定は、UNI 7928(Concrete-Determination of the ion chloride penetration)に準じて行った。方法は、浸水した供試体を割裂により二分割し、その断面に0.1%フルオレセインナトリウム及び0.1%硝酸銀溶液を噴霧した。その後、図-2に示す10箇所表面からの色の変化による塩化物イオン浸透深さを24時間後に測定し、その平均値を測定値とした。

細孔径分布測定の試料は、材令91日で圧縮試験後の供試体を用い、図-3に示す位置で、表層から2~3cmの部分粉碎して2.5~5mmのモルタル部分を採取した。次に、試料をアセトンで24時間浸せきした後、105℃で24時間乾燥したものをを用いた。細孔容積の測定は、水銀圧入式ポロシメーターを用いて細孔半径37.5~75000Åについて測定した。

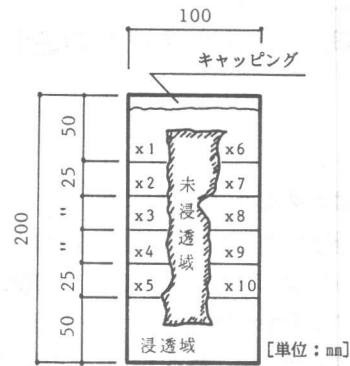


図-2 塩化物イオン浸透深さの測定位置 (X1, X2, ..., X10)

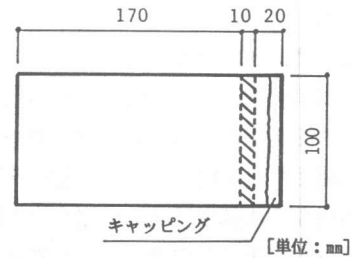


図-3 細孔径分布の測定位置

4. 実験結果及び考察

(1) 重量変化率

図-4には、3日目に脱型した点滴法による材令と重量変化率を示す。

重量変化率は、乾燥養生した場合、加水方法及び加水量にかかわらず、通常のコンクリートと同様に乾燥養生材令の経過とともに減少する。その割合は、無加水0mmの場合よりも1、3及び6mm加水でおおよそ0.1、0.2及び0.5%と加水量の多いほど大きくなる。材令14日までの減少は、材令28日の約88%、脱型

時の3.5~4%で、材令91日以後も低下の傾向は緩慢に続く。標準養生の場合、材令28日でほぼ一定値に達し、無加水が最大の1.2%を示したが、1、3及び6mm加水では1%前後となる。このように、加水量の多いほど、コンクリートが型わく中で水と接する時間が長いいため標準養生の重量変化率は小さくなる。無加水の場合、材令初期からブリージング水しか存在しないため、それが蒸発あるいはコンクリート中に吸収されてしまうと上面での保護層がなくなり、早くから大気に接するので乾燥が進むことになる。従って、3日目の脱型ではかなり乾燥しているため、それ以後に乾燥養生を行っても変化が他に比べて小さくなる。逆に、標準養生の場合、早くから乾燥しているため多く吸水することになるので他に比べて大きくなる。また、直接法でも、点滴法と同様の傾向を示す。

密度は、養生方法によって異なるが、加水量及び加水方法にかかわらずほぼ一定値を示し、加水を受けると無加水よりも僅かに低くなる。

(2) 塩化物イオン浸透深さ

図-5には、加水量と塩化物イオン浸透深さを示す。

塩化物イオンの浸透深さは、加水量1、3及び6mmの違いによる顕著な差は見られないが、加水を受けると無加水より大きくなる。また、同じ加水量では、加水時間の長い点滴法の方が直接法より僅かに大きくなるようである。このことから、フレッシュコンクリートが打込み初期に降雨を受けると塩分の浸透性が大きくなるといえる。特に、コンクリートの耐久性評価の一つとして、塩化物イオン浸透深さを要因として取り上げる場合、降雨だけではなく降り方も影響することに注目する必要がある。

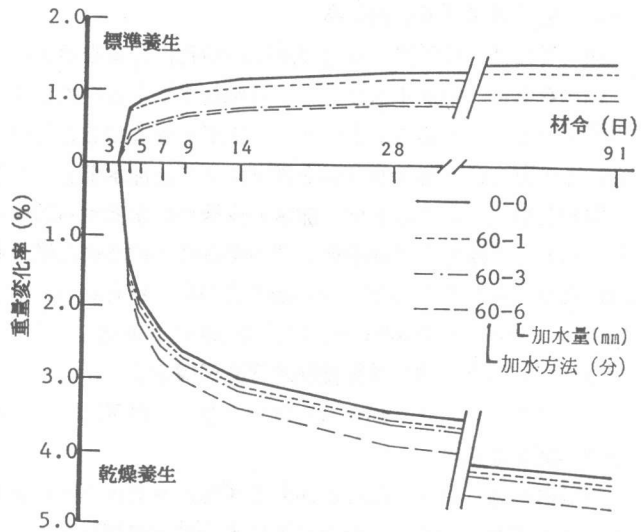


図-4 重量の経時変化

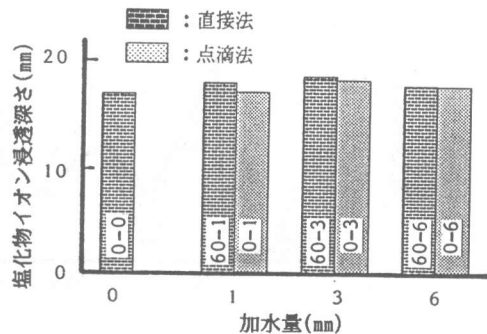


図-5 塩化物イオン浸透深さ

(3) 細孔量及び細孔径分布

図-6には、乾燥養生した点滴法の細孔径分布を示す。

総細孔量は、無加水よりも1~6mm加水した方が大きくなる。これは、ブリージング水と加水によって、上部の方で水セメント比が大きくなることから粗い構造になったものと考えられる。その割合は、無加水0mmを基準にすると加水量1、3及び6mmでそれぞれ1.09、1.12及び1.04倍となる。このことは、加水の影響が加水面から20mm以上下方まで現れることを示している。また、表層から30mm程度までの深さにおける細孔径分布は、それほど顕著ではないが、加水によって異なり0mmと1~6mmの2つに分けられる。その場合の細孔量は、0mmで100Åと2000Å、1~6mmで100Åと1000Åで卓越している。

(4) 圧縮強度、弾性係数及び超音波伝播速度

表-2及び3には、加水したコンクリートの強度、静弾性係数、動弾性係数及び超音波伝播速度の関係を示す。

圧縮強度は、養生方法にかかわらず加水を受けると増大する。乾燥養生の場合は加水方法によって強度が異なり、材令28日では点滴法が直接法を上回る。しかし、材令91日になると点滴法が材令28日よりも約10%下回る。直接法では、ただちに加水した水が型わく中のコンクリートを大気と遮断し、たん水養生した状況となるため強度が増加したのと考えられる。標準養生の場合、材令にかかわらず加水方法の違いによる顕著な差が見られず、同一の加水量ではほぼ同じ強度を示す。無加水の場合、材令28日以後も強度が大きく増加しているが、加水を受けると強度の伸びは低く、材令91日では0mmとの強度差が小さくなりほぼ一定値を示す。なお、降雨強度の場合、強度への影響として、キャッピングが約10mmと厚いこと[9]があげられる。ちなみに、点滴法の試験誤差の変動係数の平均値は3.1%、直接法のそれは3.5%で両者に顕著な違いがないと考える。

静弾性係数は、養生方法によって異なるが、加水方法の違いによる顕著な差を生じない。材令28日では、養生方法にかかわりなく、加水を受けると無加水より約 $0.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 低下し、1~6mmでほぼ一定値を示す。同一の加水量では、標準養生と乾燥養生の差はおよそ $0.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ となる。加水量の影響は、養生方法にかかわらず材令の経過とともに小さくなり、材

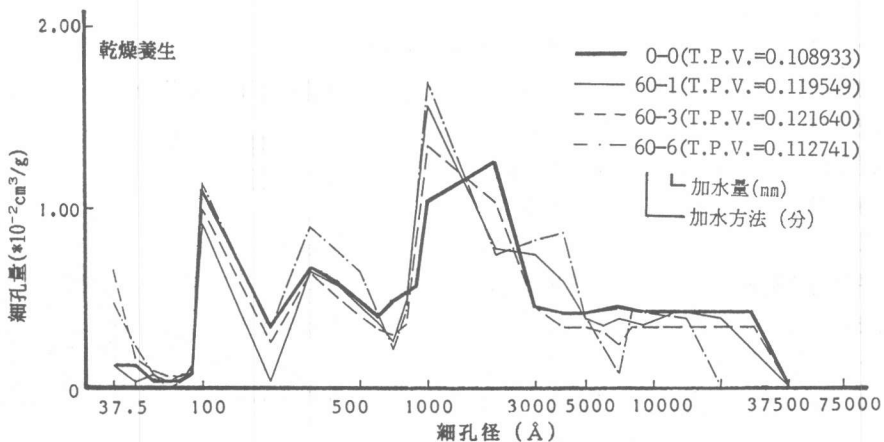


図-6 点滴法によるコンクリートの細孔径分布

令91日では無加水に近づくようになる。乾燥養生した場合、同一の加水量では、加水方法にかかわらず通常のコンクリートと同様に材令91日の方が小さくなるが、いずれの場合もRC基準の $2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ よりも大きい。荷重～ひずみ度曲線は、養生方法によって異なるが、加水方法の違いによる顕著な相違は認められない。ひずみ度は、乾燥養生の場合、荷重の初期から曲線的で約 $1800 \sim 2000 \times 10^{-6}$ で最大となる。標準養生の場合、ほぼ直線的な変形をして最大荷重の少し手前で急激にひずみが進み約 1500×10^{-6} で破壊した。

動弾性係数(E_d)は、静弾性係数(E_s)とほぼ同様の傾向を示し、加水方法及び加水量による顕著な差を生じない。乾燥養生した場合、加水を受けると無加水よりも下回り、この傾向は、材令の経過とともに進行する。標準養生した場合、加水を受けても無加水とほぼ同様の性状を示す。加水量1～6mmの材令91日 E_d/E_s は、養生の影響は少なく1.1～1.2倍程度である。なお、無加水は1.3前後とやや大きい。

超音波伝播速度は、加水量及び加水方法との間には一定の関係が見られないが、養生方法によって差を生じる。乾燥養生した場合、材令28日と材令91日の差は顕著ではないが、標準養生では100m/s程度生ずる。また、同じ材令では、乾燥養生よりも標準養生の方が28日で約300m/s、91日で400m/s大きくなる。

図-7に、圧縮強度と超音波伝播速度の関係を示す。

図-7に、圧縮強度と超音波伝播速度の関係を示す。

超音波伝播速度は、養生方法及び材令によって異なる。圧縮強度との関係を指数曲線とみなすと相関係数 $r=0.82$ となり、これを利用することによって、降雨を受けたコンクリートの性質を評価する一つの指標が得られると考えられる。

ちなみに、本研究で得られた試料をまとめると下式のようになる。

$$V_p = 1.48 \times 10^3 \sigma c^{0.18}$$

表-2 加水供試体の乾燥養生によるコンクリートの強度、弾性係数及び超音波伝播速度

記号	加水量 (mm)	加水方法	圧縮強度 (kgf/cm ²)		静弾性係数 (*10 ⁵) (kgf/cm ²)		動弾性係数 (*10 ⁵) (kgf/cm ²)		超音波伝播速度 (m/s)	
			28日	91日	28日	91日	28日	91日	28日	91日
			0-0	0	無加水	245	266	3.237	2.219	3.391
60-1	1	点滴	292	246	2.555	2.364	3.138	2.835	4210	4030
60-3	3		289	266	2.565	2.402	3.236	3.061	4150	4180
60-6	6		308	305	2.538	2.365	3.373	2.811	4190	4140
0-1	1	直接	256	270	2.494	2.449	3.036	3.012	4110	4130
0-3	3		237	303	2.521	2.281	3.114	2.973	4150	4110
0-6	6		261	314	2.352	2.386	3.522	2.677	4170	4130

表-3 加水供試体の標準養生によるコンクリートの強度、弾性係数及び超音波伝播速度

記号	加水量 (mm)	加水方法	圧縮強度 (kgf/cm ²)		静弾性係数 (*10 ⁵) (kgf/cm ²)		動弾性係数 (*10 ⁵) (kgf/cm ²)		超音波伝播速度 (m/s)	
			28日	91日	28日	91日	28日	91日	28日	91日
			0-0	0	無加水	292	368	3.818	3.236	3.867
60-1	1	点滴	352	402	2.973	2.924	3.846	3.960	4430	4500
60-3	3		354	407	3.068	3.291	3.764	3.931	4470	4540
60-6	6		378	396	2.957	3.384	3.809	4.029	4430	4560
0-1	1	直接	385	401	2.659	3.584	3.824	3.967	4440	4540
0-3	3		404	411	2.982	3.593	3.764	3.984	4440	4480
0-6	6		385	388	3.089	3.485	3.868	4.041	4430	4550

また、これらの指数関係は、動弾性係数、静弾性係数についても相関係数 $r=0.7$ 以上でそれぞれ見られた。

5. 結論

フレッシュコンクリートが降雨を受けた場合を想定して行った、本実験結果を要約すると、次の通りである。

(1) 重量変化率は、加水方法にかかわらず、乾燥養生の場合、加水量が多いほど大きくなるが、標準養生では逆に小さくなる。

総細孔量は、加水を受けると無加水の場合より大きくなる。細孔径分布は、加水と無加水で異なり、それぞれ細孔量が最大となる細孔径が存在する。

(2) コンクリート中への塩化物イオンの浸透は、加水量にかかわらず、加水を受けると増加する。また、加水方法によっても差を生じる。

(3) 圧縮強度は、養生方法にかかわらず、材令28日では加水を受けると大きくなる。しかし、材令91日では、乾燥養生の場合、材令28日よりも低強度となることもある。

(4) 静弾性係数、動弾性係数及び超音波伝播速度は、乾燥養生の方が標準養生よりも加水の影響が顕著に現れるが、加水量の影響はあまり見られない。しかし、圧縮強度との間には指数関係式が成り立つことから、フレッシュコンクリートが加水を受けた場合の強度を予測することが可能である。

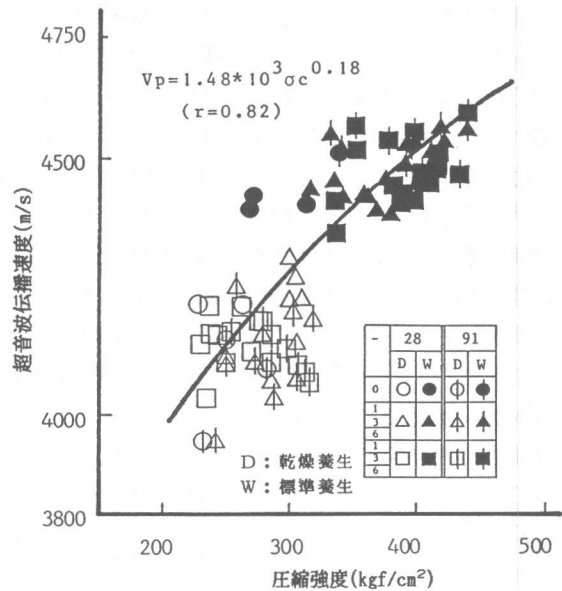


図-7 圧縮強度と超音波伝播速度

〔謝辞〕 常日頃、御指導を頂いている日本大学 福地利夫先生、大濱嘉彦先生、福井大学 川上英男先生、本学、太田 実先生に心から感謝致します。また、本研究の細孔量測定を行うに当たり、日本大学 渡澤正典先生の御協力を得ました。ここに、記して感謝の意を表します。

《参考並びに引用文献》

- [1] R.F.Blanks(Job problems and practice):Concreting in the rain, Journal of the American Concrete Institute, Feb.1942, pp.358-359
- [2] 木沢久兵衛、棚橋 勇：コンクリートの打継ぎ部の仕様に関する二、三の 実験的研究、日本建築学会論文報告集、1961.10, pp.197-200
- [3] 山田順治：降雨中のコンクリートの施工、セメント・コンクリート、No.273,1970.3, p.13
- [4] 柿崎正義：もし工事中に雨が降りだしたらどうすればよいのですか？、コンクリート工学、Vol.19, No2, Feb.1981, p.62
- [5] 近藤泰夫訳：コンクリートマニュアル 第8版、国民科学社、1978, p.225, 250
- [6] 土木学会：昭和61年制定 コンクリート標準示方書 ダム編、1987, pp.41-42
- [7] 高橋喜彦：降水の物理学、地人書館、1959, pp.4-6
- [8] 鈴木計夫：コンクリートの静弾性係数試験方法（案）、コンクリート工学、Vol.23, No.3, Mar.1985, pp.12-16
- [9] 近藤泰夫、坂静雄監修：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、昭和45年、p.279