

論文 フライアッシュ IV 種を用いたプレキャストコンクリート製品の耐久性に及ぼす振動・養生方法の影響

水野 克基*1・近藤 秀貴*1・相内 豪太*2・前島 拓*3

要旨: 本研究は、IV 種相当のフライアッシュを混和した中流動コンクリートを用いて、コンクリート二次製品 (PCa) を製造することを想定し、打込み時の振動方法および蒸気養生後の後養生方法が各種耐久性に及ぼす影響を実験的に検討したものである。その結果、IV 種のフライアッシュを用いた配合においても十分な初期強度発現性と優れた耐久性を有することを示し、さらに蒸気養生後に多少でも給水することにより PCa の表層品質および各種耐久性が向上することを明らかとした。

キーワード: コンクリート二次製品, フライアッシュIV種, 耐久性, 透気係数, 振動方法, 蒸気養生, 後養生

1. はじめに

コンクリート二次製品 (PCa) は工場において品質管理された中で、耐久性に優れたコンクリートとして製造されている。しかし、SDGs やカーボンニュートラルへの対応などから更なる耐久性の向上や混和材の有効利用が求められている。さらに製品工場では人手不足が顕在化しており、PCa 製造においては施工不具合を軽減するとともに省人化・省力化を図る必要がある。他方、福島県内では東日本大震災以降の原子力発電所の稼働率低下に伴い石炭火力発電がフル稼働しており、産業副産物としてフライアッシュが大量に排出されている。このフライアッシュを有効利用するため、既往の研究¹⁾により実コンクリート構造物への適用が検討されているものの、未だ PCa 製品として実装された例はない。また、福島県原町火力発電所で副産されるフライアッシュ (FA) は、JIS 品質規格の II 種も一部満足する IV 種であり、ロット毎の不均一性や未燃カーボンによるエントレインドエアの減少、低活性度による初期強度の減少に注意する必要があることが指摘されている。そのため、PCa 製品として FA を利用するには、コンクリートの品質及び耐久性確保を可能とする製造方法について検討する必要がある。そこで本研究では、福島県内の PCa 工場において中流動コンク

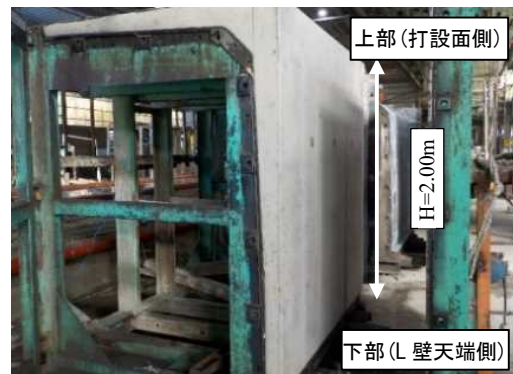


図-1 L 形擁壁製造

リート配合を対象に、製造方法による耐久性への影響を把握し、より高耐久な製品作りを行う為に実大製品を用いて以下に示す試験を行った。

PCa 製造において打設時に与える振動条件が耐久性に及ぼす影響を評価するため、振動強度及び方法をパラメータとして PCa 製品を作製し、製品表面に対する透気試験および製品から採取したコアを用いた塩分浸透性試験を実施するとともに、気泡間隔係数の測定を行った。また、振動締め固め後における材料の均質性を確認するため粗骨材分布率²⁾を測定した。本実験では鋼製の型枠に振動機を固定し振動を与える型枠振動 (外部振動) と、

表-1 使用材料

材料名	種類・品質・産地など			密度	フライアッシュの物性値		
					強熱減量(%)	2.2	2.7
セメント	普通ポルトランドセメント			3.15		振動	後養生
細骨材	砕砂 A	福島県東白川郡産	粗粒率	2.95	2.62		
粗骨材	砕石 2005A	福島県東白川郡産		6.70	2.67	MB 吸着量(mg/g)	0.20
混和材	フライアッシュIV種 (原町火力発電所産)			右記	密度(g/cm ³)	2.19	2.01
混和剤	高性能減水剤				比表面積(cm ² /g)	2490	2650
	AE 剤						

*1 丸栄コンクリート工業株式会社 (正会員)

*2 日本大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*3 日本大学 工学部土木工学科 (正会員)

表-2 計画配合

設計基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	W/B (%)	Air (%)	スランプフロー (cm)	s/a (%)
30	41.3	33.0	4.5±1.5	55±10	48.6

	単位量 (kg/m ³)						
	水 W	セメント C	フライアッシュIV種 FA	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤 Ad	AE 剤 AE
振動方法	165	400	100	786	846	B×0.9%	6A
後養生方法	165	400	100	781	841	B×0.9%	6A

表-3 振動締め条件とコンクリート性状

ID	振動方法	振動機数	振動時間	追加振動	スランプ フロー	空気量	σ 14
MV-S	型枠振動 90Hz	1 機	打設開始から 終了まで (4分)	型枠振動 (30秒)	51.5cm	4.3%	43.0N/mm ²
RV-S	型枠振動 115Hz			棒振動 (15秒)	54.5cm	4.9%	42.7N/mm ²
RV-D		2 機			51.5cm	4.9%	47.3N/mm ²
ID	振動方法	挿入間隔	振動時間	挿入層数	スランプ フロー	空気量	σ 14
PV-15s2	棒振動	30cm	15秒	2層	56.5cm	4.7%	38.9N/mm ²
PV-15s3				3層	57.5cm	5.3%	39.7N/mm ²
PV-30s2		15cm		30秒	2層	51.0cm	5.1%

棒振動（内部振動）について評価した。

PCa 製造時には工場内で型枠を転用し打設を行っているため、材齢1日での脱型ができるよう高温蒸気による促進養生を行っている。しかしこの蒸気養生後の急激な乾燥は耐久性に影響を及ぼすといわれている³⁾⁴⁾。そこで、蒸気養生後の後養生（保湿・給水養生）を行うことが耐久性向上に与える影響を把握するため、透気試験、塩分浸透性試験と材齢182日までの圧縮強度試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合、供試体製造手順

(1) 使用材料と配合

表-1・表-2に使用材料と計画配合を示す。スランプフロー55cmの中流動コンクリートで、初期強度発現性と耐久性の向上、地産地消、流動性を高めた際の分離抵抗性を抑制する観点からFAをセメント質量に対して25%外割で配合した。

(2) 供試体製造手順

供試体（実大製品）製造時にはそれぞれのコンクリートのフレッシュ性状の確認と強度確認用のテストピース(φ100×200mm)を採取した。養生方法は打設後3時間前置きを取った後、20℃/hの昇温速度で45℃まで昇温し3時間保持後、自然放冷する蒸気養生とし、材齢18時間で脱型した。

2.2 打設時の振動方法比較実験

(1) 対象製品

図-1に対象製品を示す。高さ2.00m×底版幅1.45m×長さ2.00m：製品質量1630kgのL形擁壁を対象とした。本L形擁壁の型枠は底版側から打ち込む鋼製型枠となっており打設時は天端側が下部となっている（図-2）。

(2) 振動締め条件

表-3に振動締め方法を示す。対象製品は通常スランプ18cmのコンクリートをRV-Dの方法により打設している。今回の配合はスランプフローを55cmに設定したため振動周波数を下げ、振動機の数減らすなど通常より少ない振動を設定した⁵⁾。また、棒振動のみによる打設方法も設定した。棒振動に用いた振動機は振動部φ28mm×207mmで振動数230Hzのものを使用し、型枠振動には1200Wの振動機を用い、振動数はインバータ制御により90Hz～115Hzとした。振動機1機の場合は縦壁背面側のみとした。

(3) 評価方法

供試体（実大製品）の評価は、各振動条件により製造したL形擁壁の耐久性を評価するため透気試験と塩分浸透性試験を行った。また、各振動条件により製造されたL形擁壁の均質性を把握するために気泡間隔係数の測定、粗骨材分布率の測定を行った。透気係数は供試体の表面を直接計測したが、その他の試験は供試体よりφ100mmのコアを採取し計測を行った。なお、透気試験はトレン

ト法による透気係数とウエナー法による電気抵抗率によりグレーディング評価する物で供試体の状態(含水率)が違っても同じグラフ上でコンクリートの表層品質を比較評価できるものである。

塩分浸透性試験は、凍結防止剤散布環境下における塩分浸透抵抗性を評価するため、既往の研究⁷⁾を参考に、40℃一定の恒温槽内で供試体の一面から3%NaCl溶液を182日間湛水し塩分浸透を促進した。また、塩分浸透試験後には浸透面から深さ方向への塩化物イオン濃度をイオンクロマトグラフ法により分析した。なお、イオンクロマトグラフ分析に必要な粉体量(10g)が採取できる厚さとして試験面から3mm間隔で供試体を研磨して粉末試料を採取し、この内の10gを分析試料として用いた。

粗骨材分布率は図-2に示す供試体のA(下部)、B(中部)、C(上部)についてコアを採取しその単位体積質量と、コアの周面を画像処理し、粗骨材部の面積を計測し粗骨材率を求めた。

2.3 後養生方法の比較実験

(1) 対象製品

後養生設備の大きさを踏まえ、対象製品は高さ1.20m×底版幅0.85m×長さ0.95m：製品質量330kgのL形擁壁とした。

(2) 後養生条件

表-4に本実験で検討した後養生条件を示す。打設時の振動方法はPV-30s2の方法により打設した。脱型後は速やかに図-3に示す通りに各供試体を養生し、後養生期間以降は屋外に暴露した。

ミスト養生は製品2本に対し毎分0.5L程度噴霧するものを用意した。シート養生は評価対象面となるL形擁壁縦壁正面側が水平になるよう架台に置き、養生用シート4辺をビニールテープにより固定した。給水は養生用シート中央に切り込みを入れスポイトにより給水した。養生用シートは毛細管現象により均一な給水養生ができるものを用いた。テストピースも製品同一養生としたが、

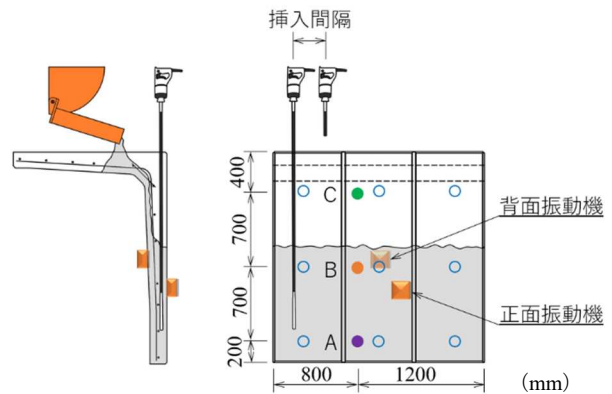


図-2 供試体製造概要、試料採取位置



図-3 各種後養生

シート養生のものはテストピース側面を覆うようにシートを貼り、シートの隙間から給水した。

(3) 評価方法

供試体の評価は、透気試験、塩分浸透性試験と圧縮強度試験により行った。圧縮強度試験は材齢7日、14日、28日、91日、182日にて評価した。なお、後養生方法の比較実験では、供試体間で打設方法が同一のため、均質性の評価は行わなかった。

表-4 後養生条件とコンクリート性状

ID	後養生方法	養生期間	スランブフロー	空気量
W-0.5h	水中養生	30分	45.0cm	5.9%
W-1d		1日		
W-3d		3日		
W-6d		6日		
M-1d	ミスト養生	1日	50.0cm	5.9%
M-3d		3日		
S-3d	シート養生	3日		
N	気中養生	—		

3. 実験結果

3.1 振動方法が各種耐久性に及ぼす影響

(1) 透気試験の結果

透気試験結果は図-2に青丸で示す9点の平均とし、各振動条件における材齢14日と56日時点の透気試験結果を図-4に示す。

材齢14日・56日どちらにおいてもRV-Dの振動方法は表層品質がよく、MV-S・RV-Sは他に比べ劣る結果となった。PV-15s2は材齢14日から材齢56日にかけて表層品質がよくなるという結果であった。

なお、MV-S・RV-Sは表面に気泡痕が多数確認され、製品出荷基準を満たさない状態であったが、これは振動

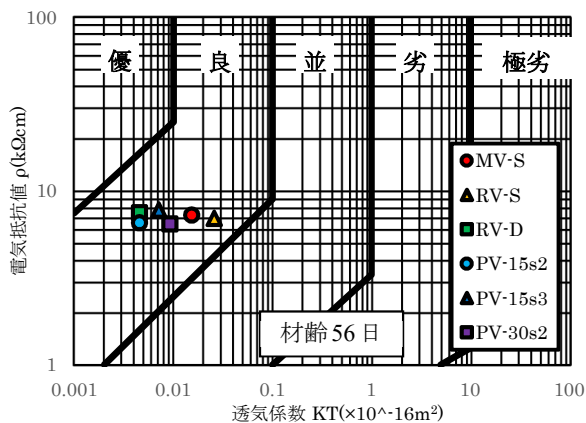
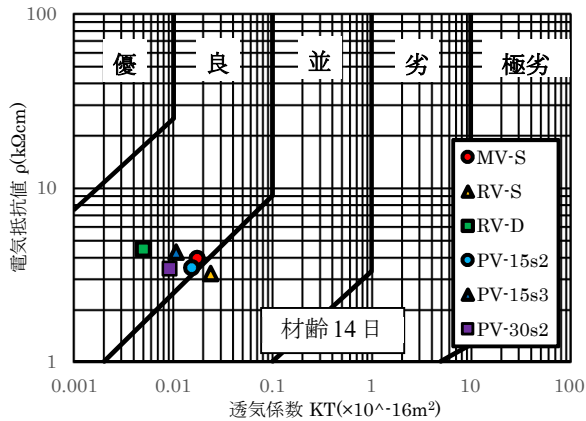


図-4 各振動条件における透気係数

機を減らしたため型枠全体を均一に振動できなかつたものと考えられる。ただし、透気係数も他に比しては劣るものながら、良～並の評価に入っており表層品質としては悪くないコンクリートであった。

(2) 塩分浸透性試験の結果

塩分浸透性試験の結果を図-5に示す。各振動条件における差はさほど見られなかったが、浸透面より13.5mm以深では塩化物イオン濃度が 2.0kg/m^3 以下となっており、遮塩性の高い製品であった。

(3) 気泡間隔係数

リニアトラバース法により求めた気泡間隔係数と空気量を図-6に振動条件・計測位置が分かるよう図示した。数値の上段は気泡間隔係数(μm)で下段は硬化後の空気量(%)である。

気泡間隔係数だけを見ればPV-15s2以外はばらつきが少なく均質な仕上がりといえる。PV-15s2は2層(1m毎)でしか、棒振動を行っていないため気泡間隔係数に偏りが生じたものと考えられる。次に空気量を見た場合、PV-15s2以外は下部(L壁天端側)の空気量が多い結果となった。しかし空気量が多くても気泡間隔係数が他の計測位置と変わらないことから下部には粗大な気泡が多く残ったと考えられる。粉体量が多く粘性のある配合であったことから粗大な気泡が抜けきらなかった可能性があ

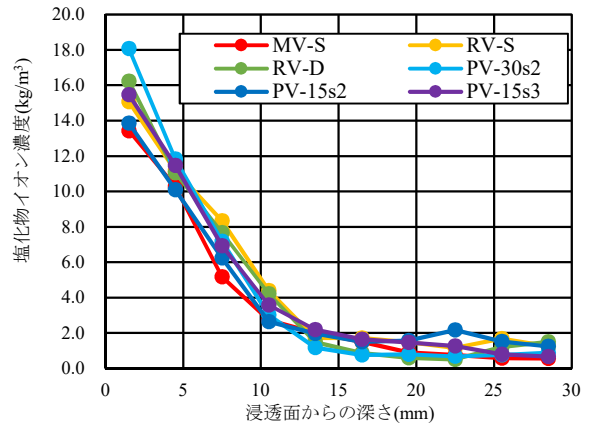


図-5 浸漬182日塩分浸透性試験

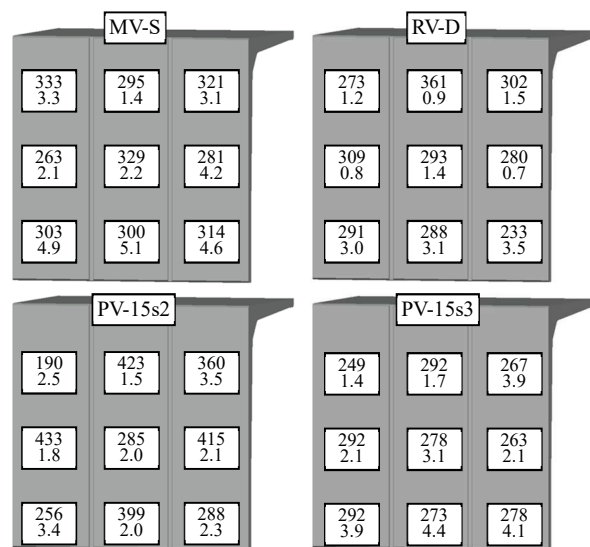


図-6 気泡間隔係数と空気量

る。いずれにしろフレッシュコンクリート時よりも硬化後の空気量が大幅に減少する結果であった。

(4) 粗骨材分布率

粗骨材分布率を把握するために計測した供試体各位置での見掛け密度を図-7に示す。また、画像処理より求めた粗骨材の分布率を図-8に示し、粗骨材分布率の計測例を図-9に示す。グラフにはそれぞれ計測位置(A・B・C)3点の標準偏差を示した。

見掛け密度は採取したコアの寸法と質量を計測し、質量を体積で除して求めた。見掛け密度は粗骨材の分布だけに依らず、振動締め後の残存空気量も影響している物となっている。

粗骨材分布率は採取したコアの表面に見える直径5mm以上の骨材をCAD上で面積を求め、対象とした範囲(50mm×100mm)で除して求めた。

見掛け密度・粗骨材分布率の結果からは型枠振動を用いた振動方法の方がばらつきの少ない結果となったが、いずれのケースにおいても上部(打設面側)に近い位置

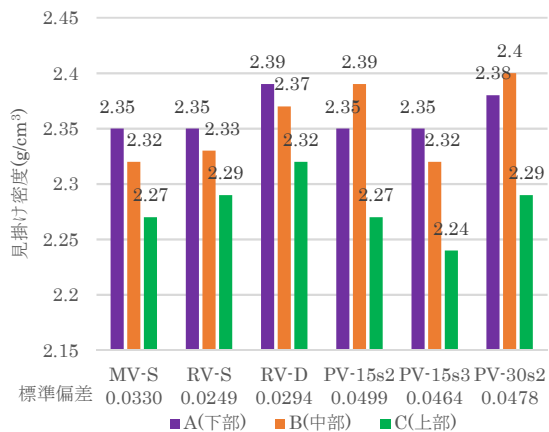


図-7 見掛け密度

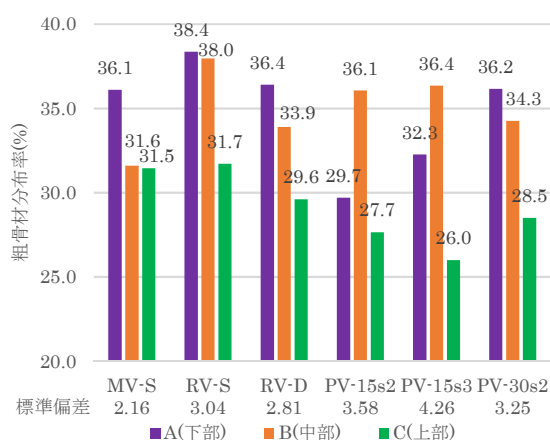


図-8 粗骨材分布率

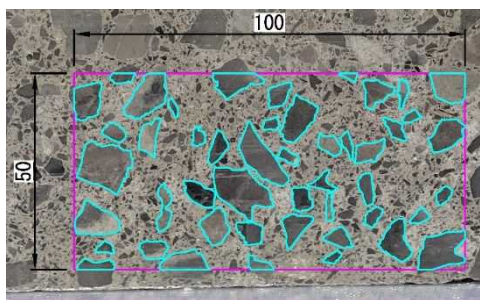


図-9 粗骨材分布率の計測例

では粗骨材が少なくなっていることが分かった。

3.2 後養生方法が各種耐久性に及ぼす影響

(1) 透気試験の結果

各後養生方法における透気試験の結果を図-10に示す。後養生条件毎に、縦壁2点、底版面(型枠側)1点の計3点の結果を示している。シート養生S-3dの条件については縦壁面のみシート養生を行っているため、1点は気中養生とほぼ同じ条件であり図中においても気中養生と同じような評価を示している。

後養生に水中養生を6日間行ったW-6dが特に表層品質がよく、次いでW-3dがよいという結果であり、後養生時に多くの水分を供給した条件ほど品質改善が図れた。

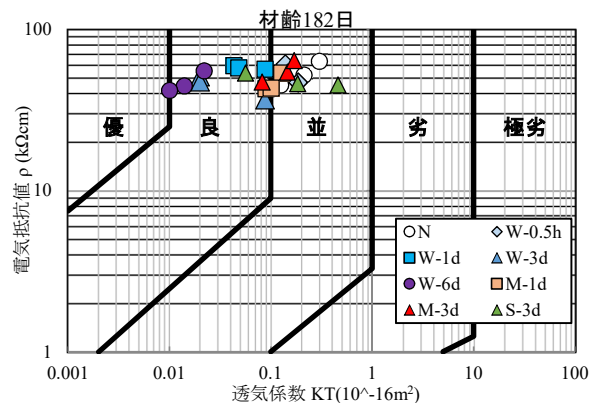
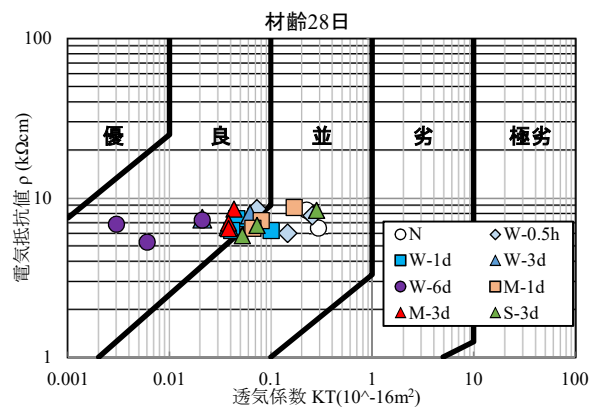


図-10 各後養生における透気係数

しかしながら、その他の後養生条件においても気中に置いた物に比べれば良好な結果を示したことから、蒸気養生後に後養生を施すことでPCa製品の品質向上に寄与することが明らかとなった。

(2) 塩分浸透性試験の結果

塩分浸透性試験の結果を図-11に示す。試験を行った3条件においては浸透面より13.5mmで塩化物イオン濃度が2.0kg/m³以下となり、本実験の範囲内では後養生の差が遮塩性に与える影響はあまり見られなかった。

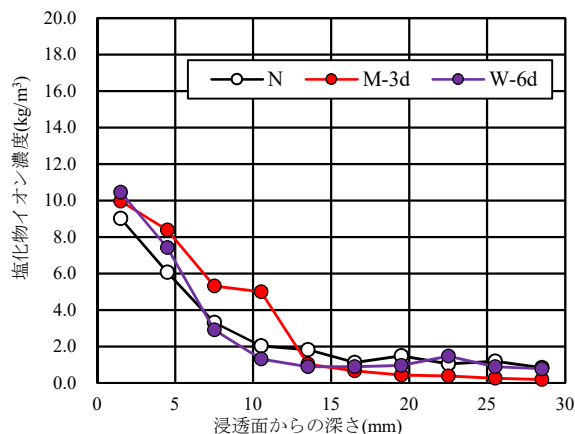


図-11 浸漬182日塩分浸透性試験

(3) 圧縮強度

各条件における圧縮強度を図-12に示す。水中養生を1日以上施したW-1d、W-3d、W-6dについては初期の強度から優位な差が見られた。また、材齢91日以降の長期材齢においては気中養生のNに対し、保湿・給水養生を施した条件はいずれも強度が高い結果であった。特に蒸気養生後30分のみ水中養生した条件でも材齢182日では気中養生の物に比べ25%以上の強度増進が見られ、蒸気養生直後における給水の重要性を示す結果となった。

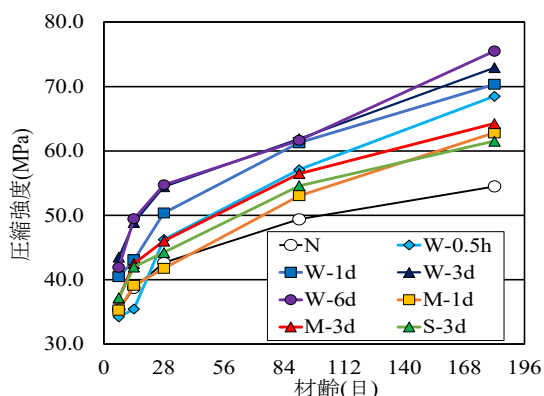


図-12 各後養生における圧縮強度

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に述べる。

- (1) IV種相当のフライアッシュを混和した中流動コンクリートを用いたコンクリート二次製品は、従来の振動方法で製造した条件においても十分な表層品質および耐久性を有することを明らかとした。
- (2) 振動方法をパラメータとした製品では、最も振動を与えた従来からの振動方法が表層品質の高い結果であり、本検討配合においては十分な振動を与えることで表層品質が向上する結果であった。
- (3) 振動方法をパラメータとした製品では、硬化後の空気量がいずれの条件においても減少する結果であり、気泡間隔係数も300 μ m程度であった。このことから、コンクリートの粘性を高めた配合を選定し、これに応じた適切な振動方法について検討する必要があると考えられる。

- (4) 養生方法をパラメータとした製品では、蒸気養生後に与える水分の量が多い養生条件ほど強度発現性および各種耐久性の向上が顕著であった。なかでも蒸気養生後に30分程度の水中養生を施した条件においても長期における品質の向上へ寄与する可能性が示された。

今後は本研究により得られた知見を基に、耐久性の向上に寄与する混和材を用いて流動性を高めたコンクリートにより、高耐久な製品をより効率的に生産する方法を開発することでSDGs、カーボンニュートラルに貢献していきたい。

参考文献

- 1) 榊原直樹, 富塚翔太, 子田康弘, 岩城一郎: フライアッシュIV種で管理される石炭灰を用いたコンクリートの品質と性能評価, セメント・コンクリート論文集, 73巻, 1号, p.176-183, 2020.3
- 2) 梁 俊, 丸屋 剛, 坂本 淳: 過振動を受けたコンクリートの品質変動, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 67th, V-565, 2012.8
- 3) 大塚浩司, 庄谷征美, 阿波 稔: 蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響, 土木学会論文集, No.585/V-38, 97-111, 1998.2
- 4) 齋藤寛泰, 小澤満津雄, 阪口裕紀, 森本博昭: 蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート部材の初期応力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.443-448, 2011
- 5) 鈴木将充, 古川翔太, 早川健司, 加藤佳孝: 締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め方法に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1049-1054, 2020
- 6) R. J. Torrent and G. Frenzer: "A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete", Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering(NDT-CE), pp. 985-992, 1995
- 7) 相内豪太, 前島拓, 松浦忠孝, 岩城一郎: 凍結防止剤散布環境下における石炭ガス化スラグを細骨材として用いたコンクリートの各種耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1636-1640, 2022