

# 論文 異なる環境に五年間暴露したコンクリート供試体の圧縮強度

喜多 雄士\*1・皆川 浩\*2・久田 真\*3

**要旨:** 材料, 施工条件, 養生方法を統一して, 初期性能を等しくした普通ポルトランドセメントコンクリート供試体を日本全国 30 箇所に 5 年間暴露し, 圧縮強度の経時変化を調査した。材齢 5 年後の全地点の圧縮強度の平均値は低水セメント比ほど大きくなるが, 一方で変動係数は大きくなり気象作用の影響を受けやすい傾向が得られた。また, 気象作用の小さい封かんや水中暴露した供試体では, 屋外暴露したものと比較して圧縮強度の平均値は大きくなった。そして, 暴露期間 2 年に対して 5 年の圧縮強度の平均値は気象作用の小さい地点の供試体では大きくなったが, 屋外暴露では小さくなった。そして, 圧縮強度と平均気温, 相対湿度の関係について検討した。

**キーワード:** 普通ポルトランドセメント, 暴露試験, 圧縮強度, 変動係数, 平均気温, 平均相対湿度

## 1. 本研究の目的

コンクリートの性能全般に影響を及ぼす要因として考えられるのは, 内的な要因として, 使用材料をはじめ, 配合条件, 練り混ぜ, 打設, 養生などの施工条件が挙げられ, 外的な要因としては供用中の構造物においてコンクリートが曝される気象作用がある。コンクリートの性能を理解, 把握するためにはこれらの内的, および外的要因が性能に及ぼす影響を明らかにしなければならない。本研究では, 気象作用がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

気象作用による影響は主として, 供用開始後に受ける。そこで, 材料, 施工および養生までの内的要因を統一したコンクリート供試体を日本全国 30 箇所に暴露し, 外的要因による影響を評価した。これだけ多くの箇所で暴露試験を行ったのは, 日本の国土は南北に長く, 気候は多様性に富み, 季節による年間の気象条件が大きく変動するためである。また, 暴露方法については, 海洋環境下などの苛酷な環境条件だけではなく, 建物の屋上などの気象作用の影響が大きい箇所を中心とし, 30 箇所のうち 22 箇所は屋上での屋外暴露とした。その一方で, 一切の環境作用の影響を受けない封かん状態の供試体や, JIS 等で規定されている水中環境での保存等も平行して実施した。これは, コンクリートを極端に過酷な環境下におかず, 本来の性能を全うさせた場合の物性変化を明らかにするためである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合

表-1 に実験に用いたコンクリートの配合, 表-2 に使用材料の詳細を示す。コンクリートの水セメント比は

40, 50, 60 %の 3 水準とし, セメント種類は普通ポルトランドセメントを用いた。なお混和剤として, ポゾリス No.70(空気量調整剤: MA303)を使用した。

表-1 配合表

W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
40	44.7	165	413	764	971
50	46.8		330	831	
60	48.2		275	878	

※混和剤は, セメント 100kg あたり 250ml の割合で使用

表-2 使用材料

種類	銘柄, 品質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント
	密度 3.18 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3050 cm <sup>2</sup> /g
水(W)	上水道水
細骨材(S)	大井川水系陸砂
	表乾密度 2.59 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.04 %
	粗粒率 2.66
粗骨材(G)	青海産碎石
	表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.52 %
	粗粒率 6.74, 実積率 62.2 %
混和剤	ポゾリスNo.70(空気量調整剤: MA303)

### 2.2 供試体の作製

コンクリートの練り混ぜは, 100 L 強制 2 軸型ミキサを使用した。まず, セメントと細骨材をミキサに投入し 10 秒間混合した後, 水および混和剤を投入し 30 秒間混合し, 更に粗骨材を投入し, 90 秒間練り混ぜ後, 排出した。練り上がり直後のコンクリートは, 練り板上で 1 往復の切り返しを行った後, フレッシュ性状の確認のため, スランブ試験(JIS A 1101), 空気量試験(JIS A 1128)およびコンクリート温度(50℃の棒状アルコール温度計に

\*1 東北大学工学研究科土木工学専攻建設材料学研究室 (正会員)

\*2 東北大学工学研究科土木工学専攻建設材料学研究室 助教 博(工) (正会員)

\*3 東北大学工学研究科土木工学専攻建設材料学研究室 教授 博(工) (正会員)

よる)を行った。スランプは 10 cm, 空気量は 5 %を目標とした。

供試体の作製には、鋼製の 10×10×40 cm の角柱型枠を用いた。コンクリート供試体の製造は、全て神奈川県茅ヶ崎市で 2003 年 7 月 22 日から 8 月 6 日にかけて行った。

### 2.3 養生方法および発送

供試体は、打設した翌日に脱型を行った。その後、乾燥を防ぐためにコンクリート表面を濡れむしろで覆いながら屋外で散水を行って 28 日間養生を行った。夏期の屋外では高温下での養生となる可能性が懸念されたものの、2003 年の夏期は冷夏であったため平均気温は 20～30 °C の範囲であった。このため、作製した供試体は、極端な高温養生の履歴を受けず、ほぼ一般的とみなせる温度条件下で養生されたものと見なした。

また、設置箇所へ搬送するまでの期間は、条件を統一し、乾燥を防ぐために表面を濡れむしろで覆った。

### 2.4 供試体の設置

供試体の設置場所と設置条件を、表-3 に示す。設置箇所は全国で 30 箇所であり、設置条件は一部異なる。そのうち 22 箇所は、図-1 で示すような屋外暴露であり、打設底面を上側にして設置した。また、3 箇所は封かんにし 20 °C 一定の室内にて保管した。さらに、水中と土中、スプリンクラーによる海水を散水させる飛沫帯、潮の干満のある干満部、海中に全浸漬させる海中部にも供試体を設置した。



図-1 屋外暴露の様子(東北大学)

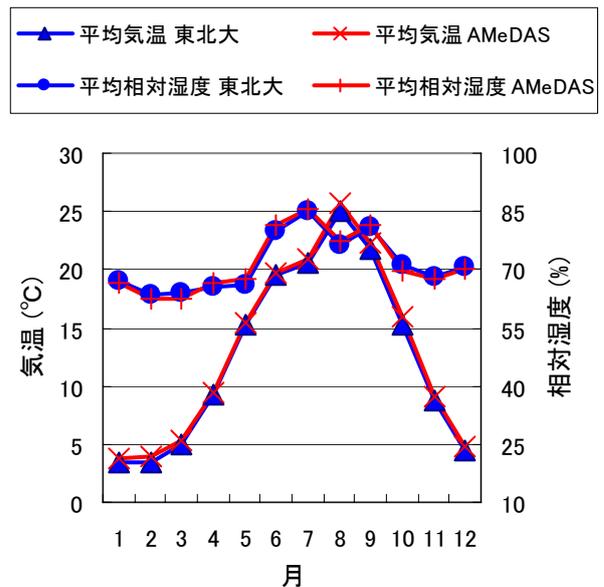


図-2 仙台における年変動 (2007 年)

表-3 供試体の設置箇所と設置条件

No.	設置条件	設置場所	所在地
1	封かん	(独)土木研究所	つくば市南原1-6
2	封かん	(独)港湾空港技研	神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
3	封かん	太平洋セメント(株)	千葉県佐倉市大作2-4-2
4	水中部	(独)土木研究所	つくば市南原1-6
5	土中部	(独)土木研究所	つくば市南原1-6
6	飛沫帯	(独)港湾空港技研	神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
7	干満部	(独)港湾空港技研	神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
8	海中部	(独)港湾空港技研	神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
9	屋外	(独)土木研究所	つくば市南原1-6
10	屋外	(独)港湾空港技研	神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
11	屋外	北海道大学	札幌市北区北13条西8丁目
12	屋外	八戸工業大学	八戸市大字妙字大開88-1
13	屋外	東北大学	仙台市青葉区荒巻字青葉06
14	屋外	新潟大学	新潟市五十嵐二の町8050
15	屋外	金沢大学	石川県金沢市小立野2-40-20
16	屋外	金沢工業大学	石川県石川郡野々市町扇が丘7-1
17	屋外	群馬大学	桐生市天神町1-5-1
18	屋外	東京大学生産技研	千葉市稲毛区弥生町1-8
19	屋外	首都大学東京	東京都八王子市南大沢1-1
20	屋外	中部大学	春日井市松本町1200
21	屋外	岐阜大学	岐阜市柳戸1-1
22	屋外	京都大学	京都市左京区吉田本町
23	屋外	大阪工業大学	大阪市旭区大宮5-16-1
24	屋外	岡山大学	岡山市津島中3-1-1
25	屋外	広島大学	広島県東広島市鏡山1-4-1
26	屋外	徳島大学	徳島市南常三島2-1
27	屋外	九州大学	福岡市東区箱崎6-10-1
28	屋外	鹿児島大学	鹿児島市郡元1-21-40
29	屋外	琉球大学	沖縄県中頭郡西原町字千原1
30	屋外	(社)セメント協会	東京都北区豊島4-17-33

### 2.5 圧縮強度の測定方法

圧縮強度試験のための供試体は、10×10×40 cm の角柱供試体を乾式コンクリートカッターによって一辺 10 cm の立方体に切断したものを使用し、N 値は 1 とした。載荷方法は、JIS A 1108 に準拠して圧縮強度の増加が 0.6±0.4N/mm<sup>2</sup>になるようにして行った。供試体回収の不都合のため、一部データが得られない箇所もあった。

### 2.6 気象情報の取り扱いについて

気温や相対湿度等の気象情報については、信頼性の高い気象情報として AMeDAS から、暴露箇所の最寄の気象情報を取得して用いた。なお、データの都合上、港湾空港技術研究所と首都大学東京については、横須賀市及び八王子市の提供によって行った。

図-2 に、東北大学の気象モニタリングシステム(38° 15' 14" , 140° 50' 20" )から得られたデータと、5.2 km 離れた最寄の仙台管区気象台(38° 15' 42" , 140° 53' 48" )の平均気温と平均相対湿度のデータを用いて比較した。図-2 より、その差は小さいことから暴露地点の最寄の AMeDAS データを用いることは妥当であると見なした。

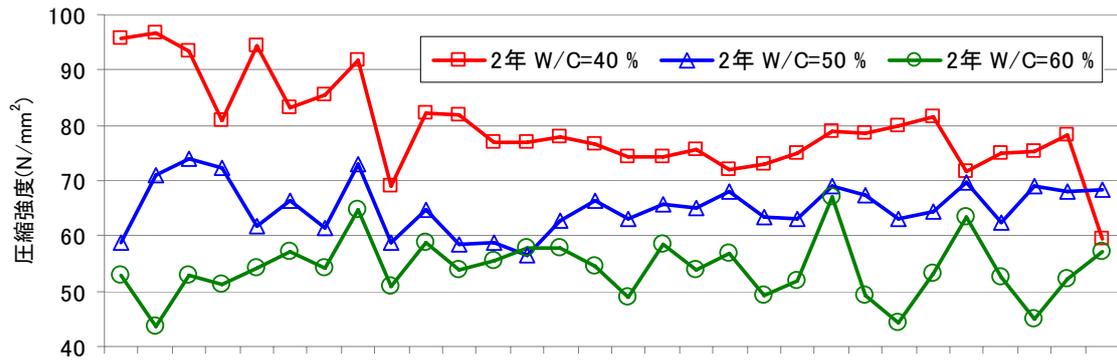


図-3 2年目圧縮強度試験結果

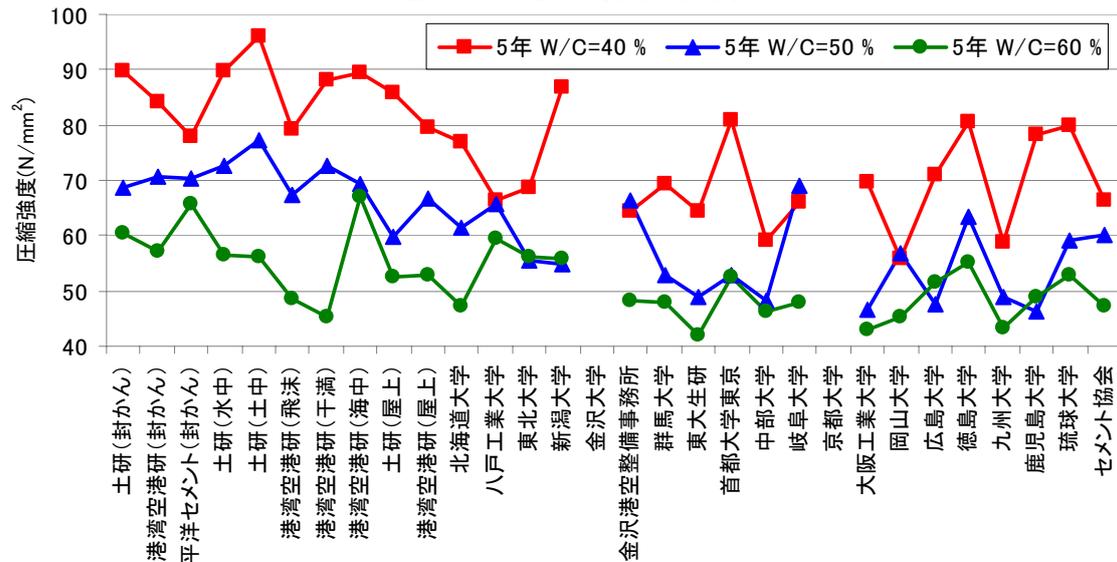


図-4 5年目圧縮強度試験結果

### 3. 実験結果

#### 3.1 材齢2年目と5年目の圧縮強度試験結果(全地点)

図-3は暴露2年目の圧縮強度試験の試験結果, 図-4は暴露5年目の圧縮強度の試験結果を示している。

図-3と図-4より, 一般的に水セメント比が小さいほど圧縮強度が大きくなる傾向が見られる。しかし, 少数ではあるものの低水セメント比よりも高水セメント比の供試体の圧縮強度が大きくなるという逆転現象が起きている。材齢2年では, この逆転現象が起きているのは僅か2地点であったが, 材齢5年では6地点であった。これが, 気象作用によって引き起こされたとすれば, 水セメント比によって, 気象作用の抵抗性が異なることを示唆する。興味深いことは, 封かんや水中などの気象変動の小さい箇所に暴露した供試体は, 水セメント比による圧縮強度の差が明瞭であり, 逆転現象がみられないことである。今後, 暴露期間が長くなるほど気象作用が大きくなり, 水セメント比による圧縮強度の差は小さくなる, もしくは逆転現象が多くなるのかは, 今後の長期材齢(10年, 20年, 30年, 40年, 50年)の供試体を用いて検討していく予定である。

図-3と図-4より, 材齢2年と5年において封かん3

箇所や土木研究所の水中, 土中地点, そして港湾空港技術研究所の水中, 海中, 飛沫帯, 干満部等の乾燥の影響がない, もしくは水分の供給が多い地点に暴露した供試体の圧縮強度は屋外で暴露されているものよりも高い傾向にあった。

#### 3.2 暴露箇所による圧縮強度の違い

暴露箇所による圧縮強度の変化をより明確にするために, 暴露箇所30箇所を3つに分類した。まず, 屋外暴露箇所20箇所を屋外暴露グループとした。(データ回収ができなかった箇所を除く)そして, 封かん暴露箇所3箇所を封かん暴露グループ, 残る水中, 土中, 飛沫帯, 干満帯, 海中の5箇所を湿潤環境グループとした。この分類ごとに圧縮強度を平均して図に示したのが図-5と図-6である。図-5および図-6より, これら3グループを比較してみると, 3.1でも指摘したように封かん暴露グループと湿潤環境グループが屋外暴露グループよりも圧縮強度が大きい傾向が得られた。これは, 環境作用の影響が一切ない封かん暴露グループの場合や, 湿潤環境グループのように環境の変化が小さく外部からの水分の供給が十分ある場合は, 圧縮強度は本研究で実施した屋外暴露よりも大きくなることを示している。

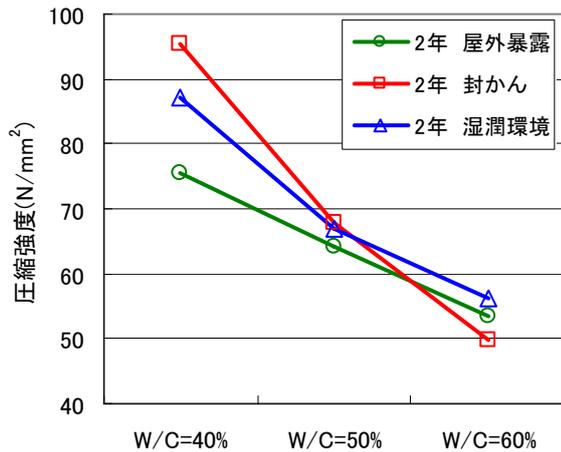


図-5 暴露2年目の圧縮強度の平均値

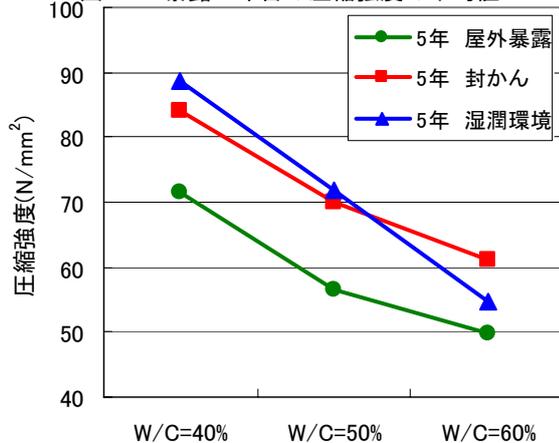
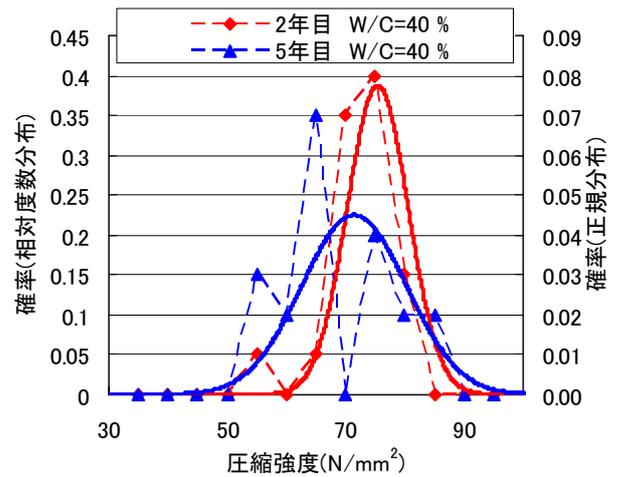


図-6 暴露5年目の圧縮強度の平均値

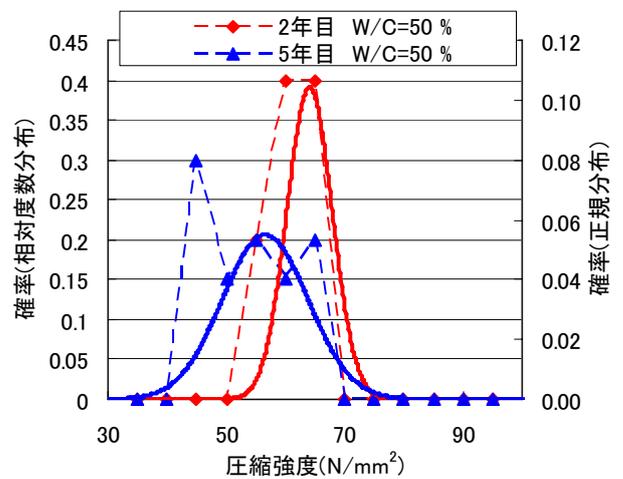
次に、図-5と図-6より2年目と5年目の圧縮強度を比較する。まず、湿潤環境グループの水中や海中等を含むグループは僅かであるものの強度が増進している。このグループに共通していることは、外部からの水分供給がある湿潤な環境下に暴露されていたことである。したがって、強度増進の要因として、セメントの水和反応が水分の継続的な供給によって進行しやすかったことが考えられる。その一方で、屋外暴露グループは材齢2年目に対して、材齢5年目の圧縮強度は低下している。これは、気温の変動や直射日光、風、雨や雨水のpH、そして乾燥等の気象の影響による表層部の劣化が原因である可能性がある。10cmの立方体型供試体の圧縮強度試験では、加圧面以外の表層部にひび割れが生じて破壊する。したがって、表層部の品質が低下していれば、ひび割れや表面剥離が生じやすくなり、供試体に載荷できる最大荷重が低下し、結果として圧縮強度が低下したように測定されると考えられる。表層劣化が圧縮強度の低下にどの程度寄与するかは不明ではあるが、少なからず圧縮強度の低下の原因となっていると考えられる。

### 3.3 屋外暴露箇所の圧縮強度の分布と変動係数

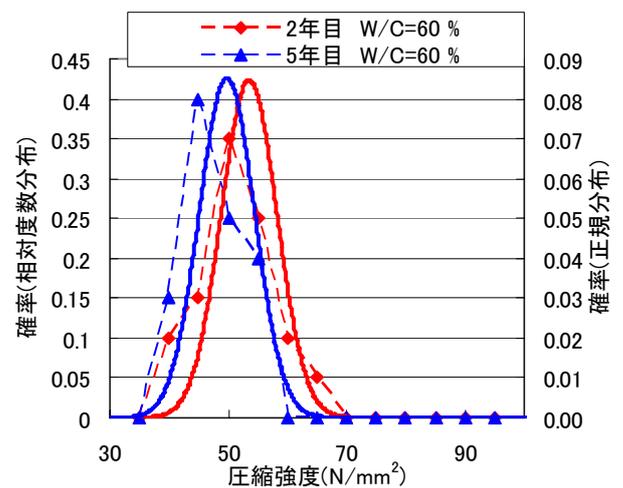
図-7に屋外暴露グループの水セメント比ごとの圧縮強度の相対度数分布を示す。ここで、圧縮強度の分布は、正規分布に従うと仮定して、圧縮強度の標準偏差と平均



(a) W/C=40%



(b) W/C=50%



(c) W/C=60%

図-7 圧縮強度の相対分布表および正規分布

値から正規分布を示した。この相対度数分布と正規分布から、材齢2年目の圧縮強度は、どの水セメント比においても、平均値に近くばらつきが小さいことが分かる。しかし、材齢5年目の水セメント比が40%と50%の場合、標準偏差が大きくなり、緩尖的になっていた。標

準偏差が大きくなり、急尖的な分布が緩尖的な分布に変化したことは、地点ごとの気象作用の影響が表れているものと考えられる。しかし、水セメント比 60 % の場合は急尖的な分布であることは変わらなかった。したがって、水セメント比 60 % の場合は、地点ごとの気象作用の影響を比較的うけにくく、一様に圧縮強度が低下したと考えられる。

図-8 にこれらの変動係数と水セメント比の関係を示す。材齢 2 年目においては、ばらつきを表す変動係数はどの水セメント比においても 9 % 以内であった。しかし、材齢 5 年目の場合、急尖的な分布から緩尖的な分布に変化した水セメント比の 40 % と 50 % の変動係数は 2 年目の結果に対して、6 % 程度大きくなり、変動係数は 12 % 程度まで上昇した。一方、急尖的な水セメント比 60 %

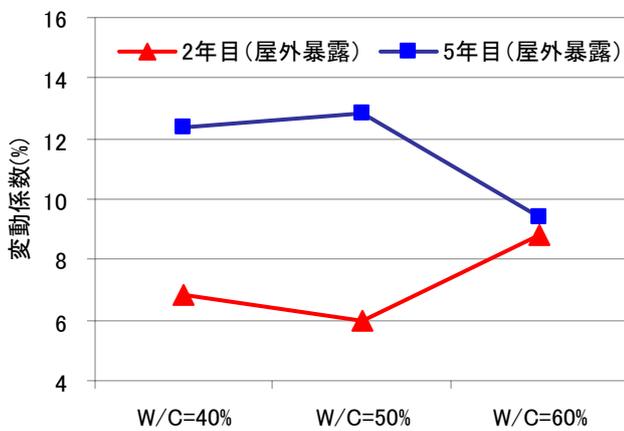


図-8 材齢に伴う変動係数の変化

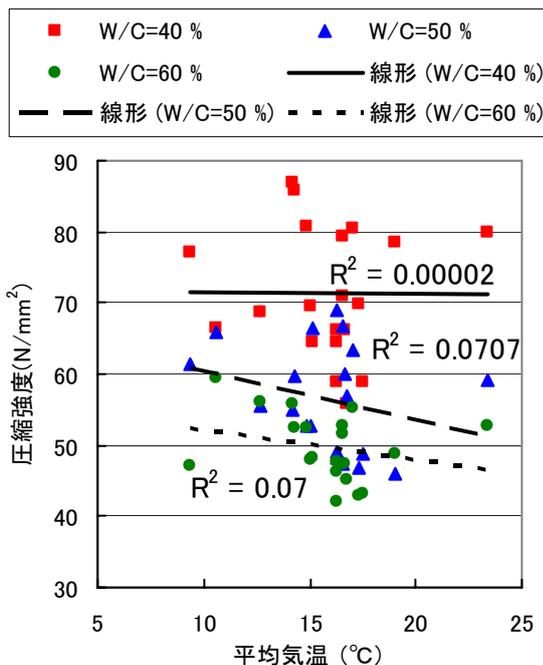


図-9 平均気温と材齢 5 年の圧縮強度の関係

の場合、変動係数はほとんど変化なく 9 % 程度であった。これらの相対度数分布と正規分布そして、変動係数の結果から、低水セメント比配合のコンクリートの場合、気象作用の影響を受けやすく、その結果ばらつきが生じやすい性質があることが示唆される。

### 3.4 圧縮強度に及ぼす気象作用の影響

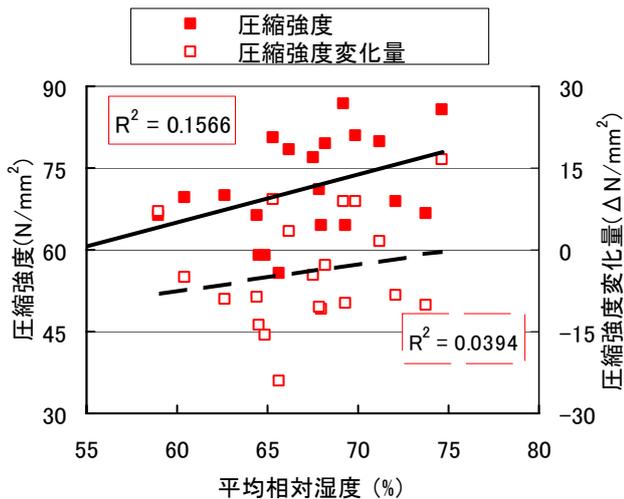
図-9 に水セメント比毎の暴露期間中の平均気温と暴露期間 5 年の圧縮強度の関係を示している。コンクリートの水和反応は、化学反応であるため、温度に依存する。しかし、図-9 より平均気温と圧縮強度の相関係数の二乗値は最大でも水セメント比 60 % の 0.07 であり、両者には明確な関係性は見られなかった。したがって、5 年もの長期間であれば、積算温度に対する水和反応の変化率は収束しており、温度以外の気象因子が圧縮強度に影響していると考えられる。

図-10 は暴露箇所の暴露期間中の平均相対湿度と暴露期間 5 年の圧縮強度及びに材齢 2 年に対する材齢 5 年の圧縮強度の増加量の関係を示す。

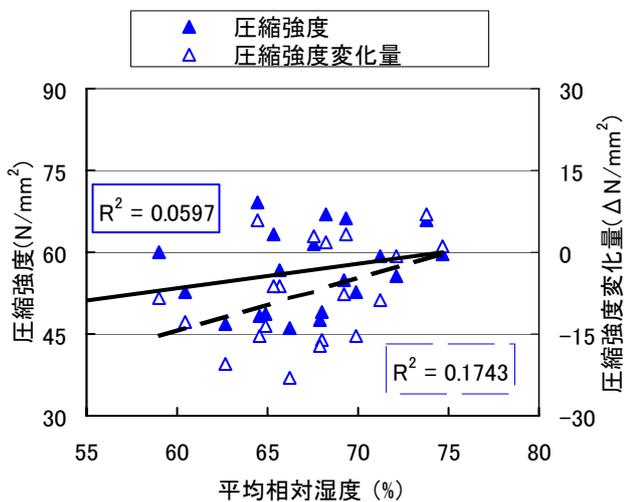
材齢 5 年の圧縮強度について、図-10 より、最も相関係数が高い水セメント比 60 % の場合での相関係数の二乗値は 0.387 であり、弱い正の相関があると言える。一方、他の水セメント比では回帰直線の傾きは正である点は共通しているものの、相関係数は 0.2 未満であるので、相関があるとは言い難い。

次に、材齢 2 年に対する材齢 5 年の圧縮強度の増加量について、図-10 より、水セメント比 60 % の場合の相関係数の二乗は、0.379 であり、圧縮強度の大きさと同様に、弱い正の相関がある。したがって、平均相対湿度が大きい地点であるほど、圧縮強度が大きくなる傾向が見られた。一方、水セメント比が 40 % と 50 % では、相関係数が 0.2 未満であるため、相関があるとは言い難い。

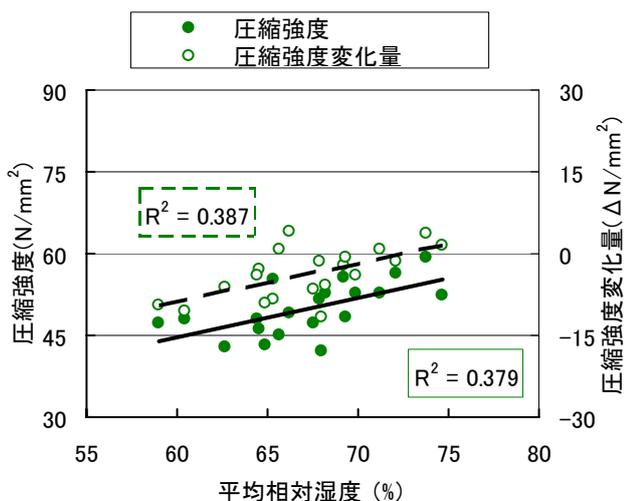
なお、水セメント比 60 % の場合の相対湿度が大きいほど、圧縮強度が大きくなる要因として考えられることは、相対湿度が高いほど水和の進行が促されるということである。既往の研究より、乾燥環境下では水和が停止することが知られているように、相対湿度はコンクリートの水和反応に少なからず寄与していると考えられる。また、養生 28 日期間、湿潤に保つことがコンクリートの性能を確保するために重要であることはよく知られている。これと同様に、材齢 5 年という長期間においても、より湿潤である相対湿度の高い箇所に暴露された場合の方が圧縮強度は高くなると考えられる。また、平均相対湿度が低い箇所を中心に、圧縮強度が低下していることから、中性化や乾燥ひび割れ等の乾燥の影響によって圧縮強度の低下が引き起こされている可能性がある。今後も、相対湿度と圧縮強度の関係性について着目していく必要があると考えられる。



(a) W/C=40 %



(b) W/C=50 %



(c) W/C=60 %

図-10 平均相対湿度と材齢5年の圧縮強度及びに材齢2年に対するの圧縮強度増加量の関係

#### 4. まとめ

内的要因を統一した普通ポルトランドセメントコンクリート供試体を日本全国 30 箇所に暴露し、圧縮強度試験を材齢 2 年と 5 年に行った。これらの試験結果から、以下の結論を得た。

(1)水分が供試体に十分供給されるような環境下では、材齢 5 年でも圧縮強度の増進が認められるが、屋外暴露のような環境では、供試体の圧縮強度が低下するケースが多くみられた。また、一般的に低水セメント比であるほど、圧縮強度は大きくなるが、屋外で 5 年間暴露した気象作用の影響を大きく受けた供試体の一部では、この関係の逆転現象が生じているものもあった。

(2)暴露期間の増加に伴い、暴露供試体の圧縮強度のばらつきは大きくなり、低水セメント比ほど、圧縮強度の分布は緩尖的になり、その変動係数は大きくなる傾向にあった。

(3)暴露期間 5 年の供試体の圧縮強度は、暴露期間の平均気温と比較よりも、平均相対湿度に、関係性が見られ、平均相対湿度が大きくなるほど、圧縮強度が大きくなる傾向であった。この傾向は、水セメント比 60 % の場合で顕著であった。

#### 謝辞

本研究は、表-3 に示す研究機関のご協力を賜り、供試体を全国 22 地点に暴露することができました。また供試体の回収は、土木研究所所属の渡辺博志氏、古賀裕久氏の協力の下で行いました。また、試験に関しては、東北大学建設材料学研究室の学生諸氏にご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1)AQUEM.n.,AL-HAIAT H.,KAYALI O.:Long-term strength and durability parameters of lightweight concrete in hotregime:importance of initialcuring,Vol42,No.8,pp.3086-3
- 2)伊与田岳史,魚本健人:若材齢における乾燥がセメント硬化体の内部組織構造に及ぼす影響,土木学会論文集,No.732,pp.17-26,2003.5
- 3)大塚歩,浅本晋吾,睦好宏史:屋外暴露されたコンクリートの収縮清浄に対する日射および降雨の影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.30,No.1,pp.501-506,2008.7
- 4)久田真,渡辺博志,北山良:コンクリートの全国暴露試験について,日本コンクリート工学協会論文集, Vol.JCI-C65,pp.321-326,2005.6
- 5)佐藤道生:ダムコンクリートを対象とした長期物性の評価,コンクリートテクノ, Vol.27,No.6,pp.26-31,2008.6 092, 2007.8