論文　高炉スラグ系材料を用いたコンクリートの材齢 3 年の性状

齊藤　辰弥[*1]・阿部　道彦[*2]

要旨：高炉セメント，高炉スラグ細骨材および高炉スラグ粗骨材の組合せや養生方法が，力学性状や中性化の進行に及ぼす影響を，一般的な材料と比較し検討した。その結果，高炉水砕スラグによって製造される高炉セメント B 種および高炉スラグ細骨材は，養生時の水分供給が充分であれば長期的に圧縮強度が増加することを確認した。また，高炉徐冷スラグによって製造される高炉スラグ粗骨材は，単独でコンクリートに用いると圧縮強度の増加に寄与しなかったが，高炉セメントや高炉スラグ細骨材と組み合わせると強度は増加した。

キーワード：高炉スラグ，　長期材齢，　養生方法，　コア，　圧縮強度

1. はじめに

高炉セメント B 種，高炉スラグ細骨材および高炉スラグ粗骨材などの高炉スラグ系材料を用いたコンクリートは，幅広く使用されてきている。すべて高炉スラグ系材料を用いたコンクリートで，1974 年に施工された塀のコア調査が材齢 10 年[1)]および 40 年[2),3)]で行われた。その結果，標準養生の供試体は材齢 1 年で圧縮強度の伸びが緩やかになったが，塀から採取したコアは 1 年以降も強度増加がみられた。高炉スラグのうち高炉水砕スラグは，潜在水硬性により長期の強度増進があるとされている[4)]が，材料の組合せや異なる養生方法の長期材齢についての検討例は少ない。

そのため，高炉スラグ系材料が長期強度に寄与する要因の把握を目的として，高炉スラグ系材料と一般的な材料の組合せを換えて，各種養生を行った円柱供試体および屋外暴露の壁模擬部材で比較・検討を行った[5),6)]。

本研究は，材齢 3 年までの結果をまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表－1 に実験の要因と水準を示す。セメント，細骨材および粗骨材は，それぞれ高炉スラグ系材料と比較のために一般的な材料を使用した。その組合せは，すべての組合せで 8 種類とした。高炉セメント B 種の水セメント比は，1986 年の JASS5 から 60%以下とされているが，参考文献[1)-3)]のコンクリートは 1974 年施工であり，さらに今後の規定緩和も視野に入れて，すべての種類で 65%とした。

養生方法は，円柱供試体は標準養生，屋外暴露および屋内保存の 3 水準とし，壁模擬部材は屋外暴露とした。円柱供試体は，材齢 1 週，4 週，13 週，1 年，3 年および 10 年で試験を行い，壁模擬部材は材齢 13 週，3 年および

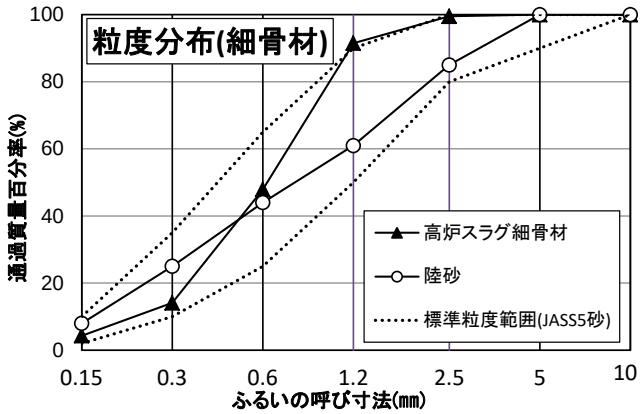
表－1 実験の要因と水準

要因	水準
セメントの種類	普通ポルトランドセメント 高炉セメント B 種
細骨材の種類	陸砂 高炉スラグ細骨材(BFS)
粗骨材の種類	砕石 高炉スラグ粗骨材(BFG)
水セメント比	65%
養生方法	標準養生(水中),屋外暴露,屋内保存
材齢	1 週,4 週,13 週,1 年,3 年,10 年
試験体の種類	円柱供試体,壁模擬部材（コア）

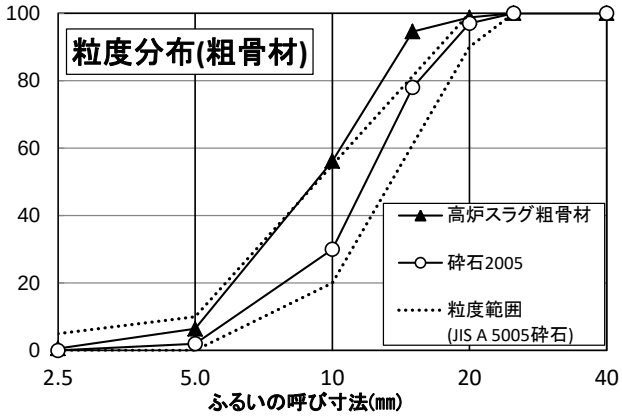
表－2 使用材料

材料	項目	品質	
セメント	試験項目	普通セメント	高炉セメント B 種
	密度(g/cm^3)	3.16	3.04
	比表面積(cm^2/g)	3310	3880
	4 週強度(N/mm^2)	62.9	63.0
細骨材	試験項目	陸砂	BFS
	絶乾密度(g/cm^3)	2.52	2.67
	吸水率(%)	2.34	2.49
	微粒分量(%)	1.50	2.68
	実積率(%)	69.2	55.7
	粗粒率	2.77	2.43
粗骨材	試験項目	砕石	BFG
	絶乾密度(g/cm^3)	2.64	2.51
	吸水率(%)	0.49	3.80
	実積率(%)	61.9	58.5
	粗粒率	6.71	6.38

*1 工学院大学　建築学部建築学科パート職員　(正会員)
*2 工学院大学　建築学部建築学科　教授・工博　(正会員)



図－1 細骨材の粒度分布



図－2 粗骨材の粒度分布

表－3 コンクリートの調合

記号	材料の組合せ			水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m³)	単位量 (kg/m³)			単位粗骨材かさ容積 (m³/m³)	AE減水剤 (C×%)	AE助剤 (C×%)
	セメント	細骨材	粗骨材			セメント	細骨材	粗骨材			
NNN	普通	陸砂	砕石	65	174	268	870	951	0.58	0.25	0.0100
BNN	高炉	陸砂	砕石		171	263	873	951	0.58	0.25	0.0090
NBN	普通	高炉	砕石		206	317	743	1001	0.61	0.25	0.0013
NNB	普通	陸砂	高炉		183	282	871	901	0.59	0.25	0.0085
NBB	普通	高炉	高炉		210	323	783	931	0.61	0.25	0.0020
BNB	高炉	陸砂	高炉		175	269	893	901	0.59	0.25	0.0070
BBN	高炉	高炉	砕石		195	300	794	984	0.60	0.25	0.0017
BBB	高炉	高炉	高炉		210	323	772	931	0.61	0.25	0.0025

10年で試験を行う。このうち，すでに材齢1年まで試験[5),6)]が行われている。

2.2 使用材料

表－2に使用材料，**図－1**と**図－2**に骨材の粒度分布を示す。セメントは，高炉セメントB種(JIS R 5211)と普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は，高炉スラグ細骨材(JIS A 5011-1)と一般的な陸砂を使用した。高炉スラグ細骨材は，陸砂に比べて実積率が小さい値であった。粗骨材は，高炉スラグ粗骨材(JIS A 5011-1、2005区分N) と一般的な砕石(2005)を使用した。高炉スラグ粗骨材は，砕石に比べ吸水率が大きい値であった。化学混和剤は，すべての種類でリグニンスルホン酸系AE減水剤およびアルキルエーテル系AE助剤を使用した。

2.3 調合およびフレッシュ性状

表－3にコンクリートの調合，**表－4**にフレッシュ性状を示す。材料の組合せは，セメント，細骨材および粗骨材が，一般的な材料と高炉スラグ系材料がすべての組合せとなるように8種類とした。記号は，一般的な材料はN，高炉スラグ系材料はBとし，セメント，細骨材，粗骨材の順番となるように表示した。すべての種類で，水セメント比65%，目標スランプ18㎝，目標空気量4.5%とした。目標のフレッシュ性状を確保する単位水量は，

表－4 フレッシュ性状

記号	フレッシュ性状			
	スランプ (㎝)	空気量 (%)	骨材修正係数	単位容積質量 (kg/L)
NNN	19.5	5.3	－	2.24
BNN	18.5	5.1	－	2.24
NBN	18.0	3.7	1.1	2.27
NNB	19.5	5.9	1.2	2.19
NBB	18.5	5.6	1.9	2.18
BNB	19.0	4.1	1.2	2.24
BBN	19.0	6.1	1.1	2.19
BBB	19.0	5.9	1.7	2.18

表－5 試験項目

試験項目	試験方法	
	円柱供試体	壁模擬部材
密度	寸法・質量測定による	
超音波伝播速度	CTM-15(飽和増幅方式、対称法)	
動弾性係数	JIS A 1127	
圧縮強度	JIS A 1108	
ヤング係数	JIS A 1149	
中性化深さ	－	JIS A 1152

すべて一般的な材料である NNN と比較すると，高炉セメント B 種はやや減少させ，高炉スラグ粗骨材はやや増加した。また，高炉スラグ細骨材は大幅に単位水量を増加させた。なお，**表－4** に示す空気量は骨材修正係数を引いた値である。

2.4 試験方法

円柱供試体(φ100×200 ㎜)の養生方法は，すべての供試体で材齢 4 週まで標準養生とした。その後，継続して標準養生とするものと，屋外暴露(東京都八王子市)および屋内保存(20℃，60%R.H.)に分けて，各材齢で**表－5** に示す試験を行った。壁模擬部材(厚さ 220×幅 450×高さ 450 ㎜)は，屋外暴露供試体と同じ場所に暴露し，各材齢で JIS A 1107 に準じてコア(φ100×200 ㎜)抜きを行った後，48 時間吸水を行い，**表－5** に示す試験を行った。また，コア抜きの採取位置は，底面から 8.75 ㎝，22.5 ㎝および 36.25 ㎝の高さから採取した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度の推移(高炉スラグ系材料の特性)

図－3 に圧縮強度の推移(高炉スラグ系材料の特性)を示す。標準養生は，すべての種類で材齢とともに圧縮強度も増加したが、屋内保存は材齢 13 週以降の強度増加はみられないことを確認した。屋内保存で材齢 13 週から強度増加がみられないのは，材齢 4 週まで標準養生であったが，その後，屋内保存となり養生中の水分供給がなくなったためと考えられる。

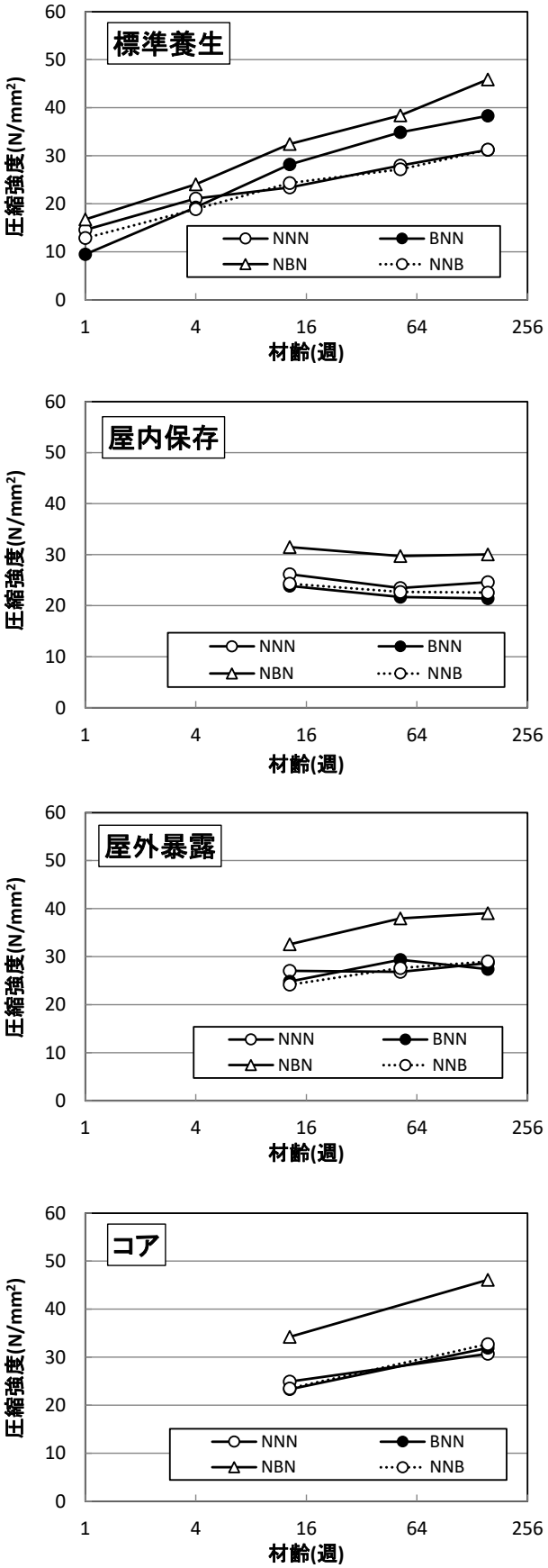
高炉セメント B 種を単独で用いた BNN の圧縮強度の推移は，標準養生において材齢 1 週の初期強度は小さいが，材齢 4 週で NNN と同程度となり 4 週から 13 週にかけて大きく増加した。しかし，屋外暴露や屋内保存およびコアでは，NNN と同等の強度推移となった。高炉セメントの強度発現には，特に養生時の水分供給が，高炉スラグ微粉末に含まれる高炉水砕スラグの潜在水硬性の発揮に重要であることが確認された。

高炉スラグ細骨材を単独で用いた NBN は，単位水量が多くなってしまうが，標準養生の初期強度は NNN に比べて大きく，その後も材齢の経過とともに強度は増加した。特に，材齢 4 週から 13 週にかけての伸びが大きく，さらに NBN は，セメントペースト量が他の種類より多いため，高炉スラグ細骨材に含まれる高炉水砕スラグの反応により強度が増加したと考えられる。

高炉スラグ粗骨材を単独で用いた NNB は，すべての養生において NNN と同等の圧縮強度の推移となった。高炉徐冷スラグは，圧縮強度の増加に影響があまりみられなかった。

3.2 圧縮強度の推移(高炉スラグ系材料の組合せ)

図－4 に圧縮強度の推移(高炉スラグ系材料の組合せ)



図－3 圧縮強度の推移(高炉スラグの特性)

を示す。養生方法は，標準養生で比較した。材齢 3 年の圧縮強度は，すべての種類の中で NBB の組合せが一番大きくなった。

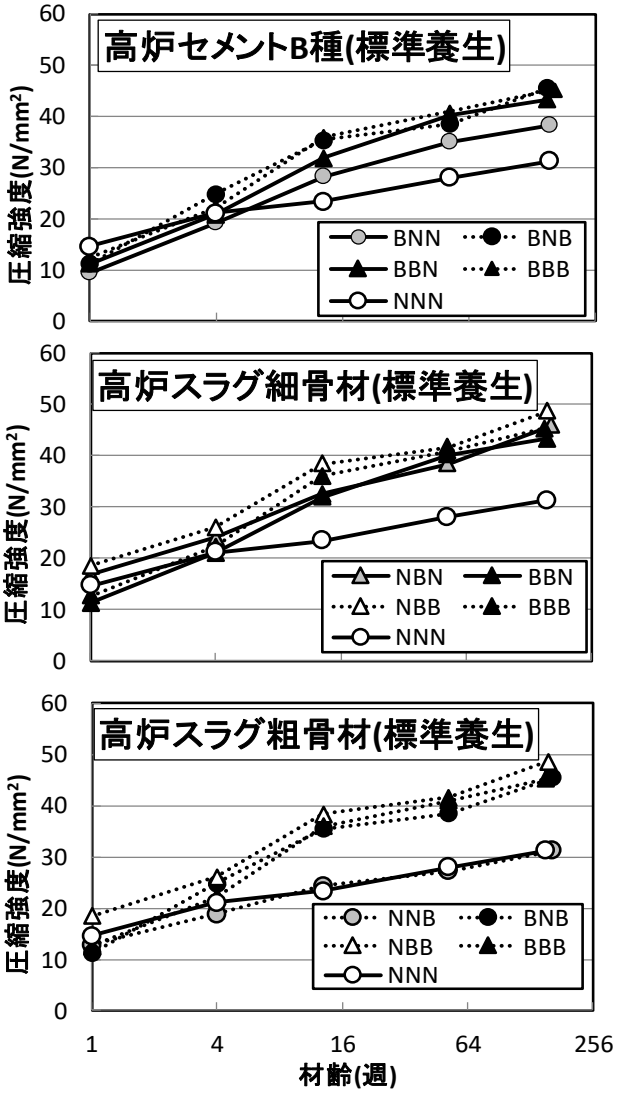
高炉セメント B 種を用いたコンクリートは，細骨材および粗骨材が高炉スラグ骨材との組合せになっても圧縮強度は増加した。NNB と NNN の圧縮強度が同程度であったため、BNB は粗骨材のみが違う BNN と同程度の強度になると予想されたが，BNB の強度は BNN 以上となった。

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは，すべての組合せで全体に NNN に比べて圧縮強度は大きくなった。NBN は，BBN と比べて材齢 1 年から 3 年で強度が逆転し，3 年の強度で NBN が若干大きい。また，NBB と BBB の強度を比較しても NBB の方がやや大きい。これは，セメントが普通ポルトランドセメントであれば，生成された水酸化カルシウムが，高炉セメント B 種を用いている種類よりも多いため，高炉スラグ細骨材の潜在水硬性がより多く発揮され強度が大きくなったと考えられる。

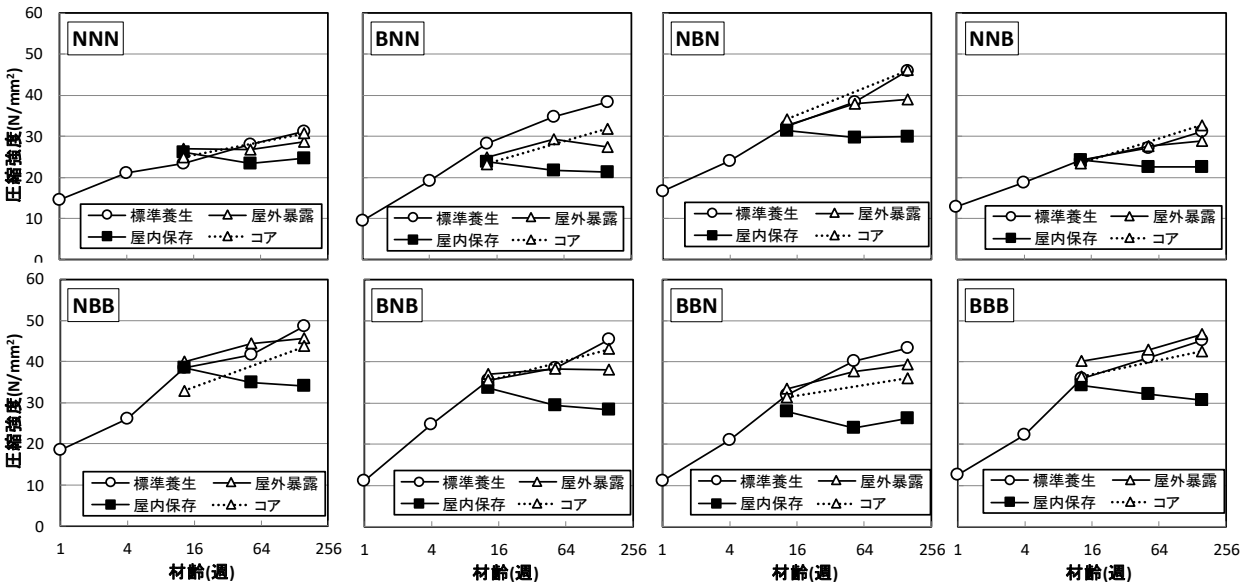
高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートは，セメントおよび細骨材が高炉スラグ系材料となっても圧縮強度は増加した。高炉スラグ粗骨材は，単独でコンクリートに用いる NNB では，NNN と同等の圧縮強度の推移となるが，セメントや細骨材が高炉スラグ系材料と組合さると長期強度は大きくなった。

3.3 圧縮強度の推移（養生方法の比較）

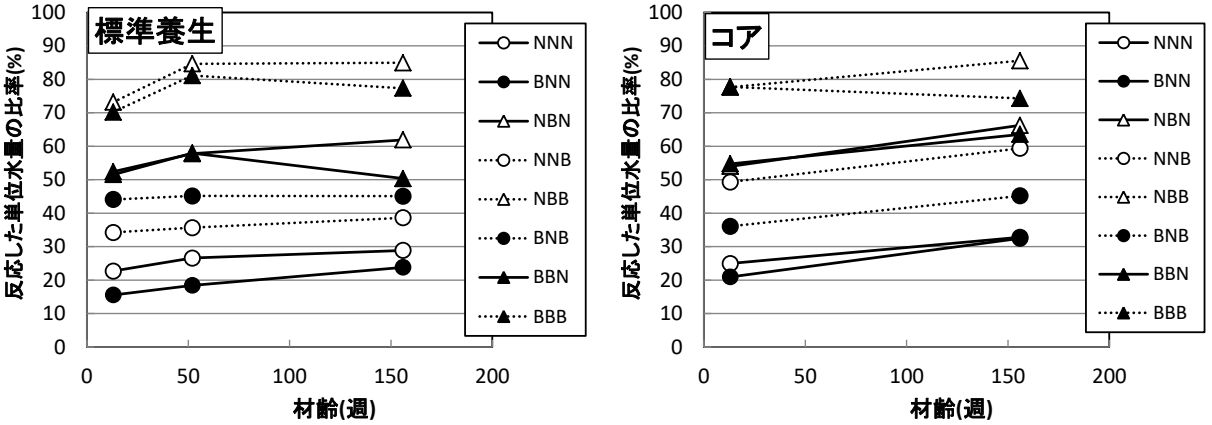
図－5 に圧縮強度の推移(養生方法の比較)を示す。高炉水砕スラグによって製造される高炉セメント B 種および高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は，養生方法の影響を受けやすく，標準養生と屋内保存の差が大きかった。一般的な材料の NNN や高炉徐冷スラグを用いている NNB は，養生方法の影響を受けにくく，標準養生と屋内保存での圧縮強度の差が小さかった。



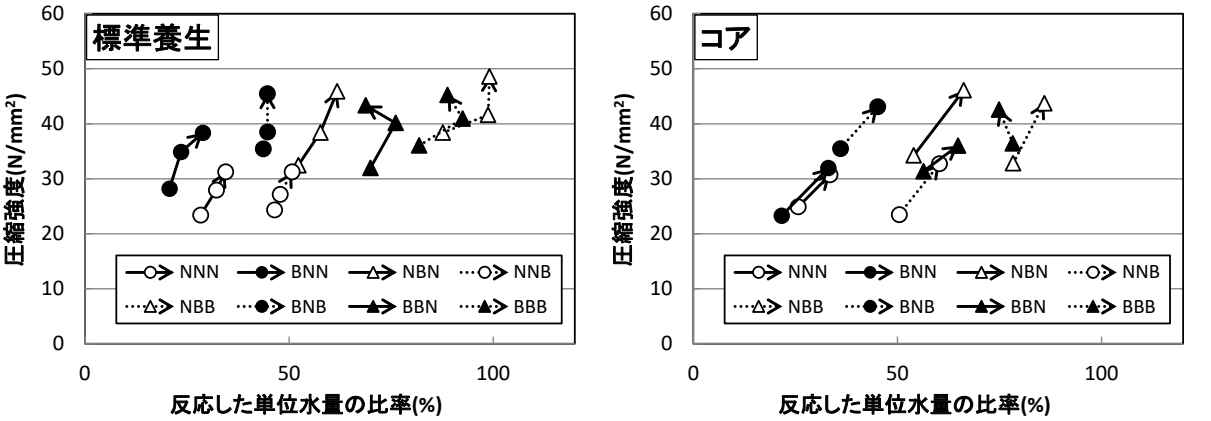
図－4 圧縮強度の推移（高炉スラグ系骨材の組合せ）



図－5 圧縮強度の推移（養生方法の比較）



図－6 反応した単位水量の比率



図－7 圧縮強度と反応した単位水量の比率の関係

3.4 反応した単位水量の比率

フレッシュ時の単位容積質量から骨材中の水分量を除いた値と，圧縮試験後のコンクリート供試体の絶乾密度の差から，水和反応したと仮定した水の量を算出した。その値をそれぞれの単位水量で除して単位水量のうちどれだけ水和したかを算出した。本研究ではその値を，反応した単位水量の比率と呼ぶこととした。

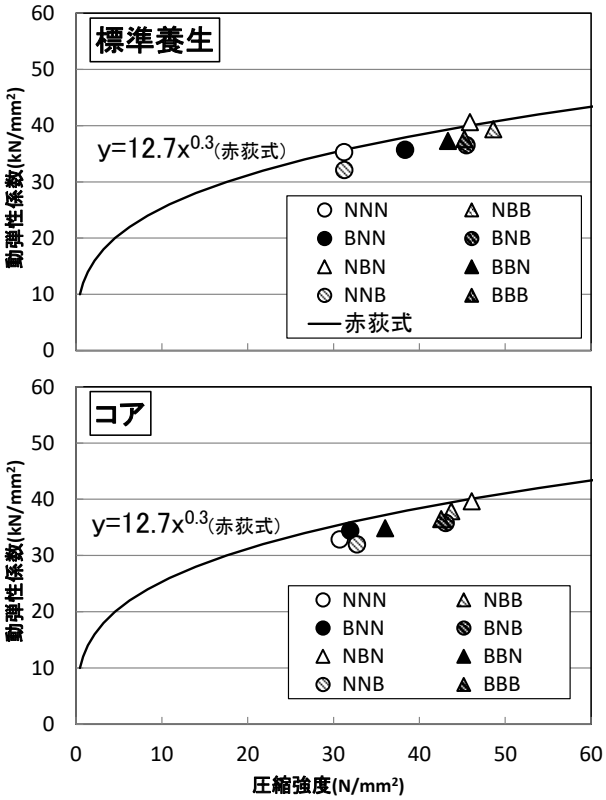
図－6 に反応した単位水量の比率を示す。標準養生の反応した単位水量の比率は，高炉スラグ細骨材を用いた種類が大きくなった。また，セメントと細骨材を同じ種類とすると，高炉スラグ粗骨材を用いている種類の方が反応した単位水量の比率は大きくなった。コア供試体も同様の傾向となった。

図－7 に圧縮強度と反応した単位水量の比率の関係を示す。反応した単位水量の比率が大きくなると圧縮強度も大きくなる傾向となったが，反応した単位水量の比率から圧縮強度を推定するには至らなかった。

3.5 動弾性係数と圧縮強度の関係

図－8 に動弾性係数と圧縮強度の関係(材齢 3 年)を示す。ヤング係数については，試験結果に検討が必要であったため動弾性係数で比較した。

標準養生の動弾性係数は，NNN と NBN がやや大きくなり，全体に赤荻式[7]に対応した。コアの動弾性係数は，標準養生よりもやや小さくなり，屋内保存はさらに小さくなることが確認された。

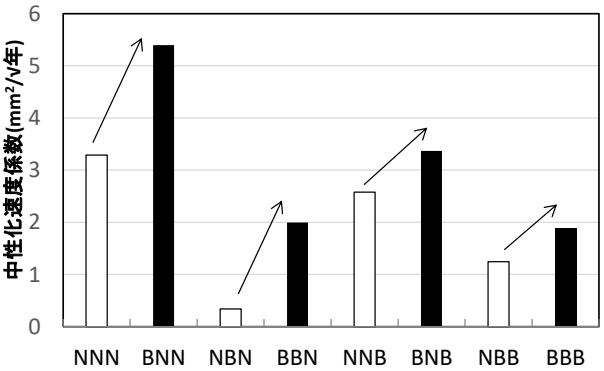


図－8 動弾性係数と圧縮強度の関係（材齢 3 年）

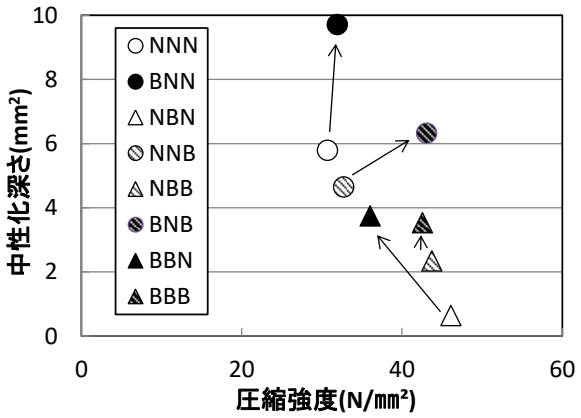
3.5 中性化

図－9 に中性化速度係数を示す。中性化深さは，壁模擬部材から材齢13週と3年にコア抜きを行った際にフェノールフタレインを塗布し JIS A 1152 に準じて測定した。中性化速度係数は，**図－9** に示すとおり、細骨材と粗骨材を同じ材料にした場合，高炉セメントB種を使用した方が大きくなった。これは，高炉セメントB種を用いたコンクリートの初期強度が小さいことや，生成された水酸化カルシウムが普通ポルトランドセメントに比べて少ないからであると考えられる。

図－10 に材齢3年の中性化深さと圧縮強度の関係を示す。材齢3年の中性化深さを同一圧縮強度で比較すると，全体に高炉セメントB種を用いている方が大きくなる傾向となり，特にBNNとBNBでこの傾向は明瞭であった。



図－9 中性化速度係数



図－10 中性化深さと圧縮強度の関係（材齢3年）

4. まとめ

セメント，細骨材および粗骨材に高炉スラグ系材料を用いたコンクリートを，それ以外の一般的な材料を用いた場合と水セメント比65%で比較した結果は，以下のようにまとめられる。

1) 養生中の水分供給が充分であれば，高炉水砕スラグで製造される高炉セメント B 種と高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの潜在水硬性が発揮されることが確認された。しかし，養生中の水分供給が充分でないと一般的な材料を用いた場合と同様の圧縮強度の推移となった。
2) 高炉徐冷スラグで製造される高炉スラグ粗骨材は、単独で用いると長期的な圧縮強度の伸びは確認できなかったが，高炉セメント B 種や高炉スラグ細骨材と組み合わせると長期強度は大きく増加した。
3) 反応した単位水量の比率は，高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは大きくなった。また，セメントおよび細骨材を同じ種類とすると，高炉スラグ粗骨材を用いている種類の方が大きくなった。
4) 中性化速度係数は，細骨材と粗骨材が同じ材料の場合，高炉セメント B 種を使用した方が大きくなった。

謝辞

本研究の骨材の調達に際し、鐵鋼スラグ協会のご協力を頂きました。また，供試体の作製にあたり 2015 年度工学院大学阿部研究室の院生，卒論生にご協力頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

1) 奥村博昭，沼田晉一，野田鉄平：高炉スラグ細骨材を用いた高炉セメントコンクリートの長期性状，第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.117-120， 1986
2) 彦根俊海，尾作勇介，阿部道彦：40 年経過した高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの長期性状，日本建築学会関東支部研究報告集， pp.9-12, 2015.3
3) 紙田晋，森英一郎，彦根俊海，阿部道彦：40 年経過した高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状，日本建築学会学術講演梗概集，pp.61-62, 2015.9
4) 上野敦，他：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの 30 年試験結果，セメント・コンクリート，No.828， pp.8-13， 2016.2
5) 山口匠，林佳俊，阿部道彦：高炉スラグ系材料を用いたコンクリートの諸性状，日本建築学会関東支部研究報告集， pp.153-156， 2016.3
6) 齊藤辰弥，山本知輝，阿部道彦：高炉スラグ系材料を用いたコンクリートの材齢 1 年の性状，日本建築学会関東支部研究報告集， pp.21-24, 2017.3
7) 赤荻満，阿部道彦：非破壊試験による高強度域を含むコンクリートの強度推定，日本建築学会学術講演梗概集, pp.841-842， 2009.7