

## 高炉スラグ系材料を用いたコンクリートの諸性状

DB-12343 山口 匠 DB-12353 林 佳俊

### 1. はじめに

1974年から実施された高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの長期性状試験において、材齢40年では堀から採取したコアの強度が材齢28日の標準養生供試体の圧縮強度の2倍近い値となっており、長期強度の伸びが大きいことが確認されている<sup>1)</sup>。しかしながら、その理由については明確ではない。このため、本年度の実験では合理的な調合設計に資するため、再現実験を念頭に材料の組み合わせを変えて長期強度の発現に寄与する要因を把握することとし、本報告では材齢4週から13週までの結果を報告する。

### 2. 実験概要

高炉スラグ系材料を使用した場合と、一般の材料を使用した場合を比較した試験を行うため、セメント、細骨材、粗骨材、それぞれに高炉スラグ系材料を使用した組み合わせと一般に使用される材料との組み合わせの8種類のコンクリートを作製し、比較検討することとする。

### 3. 使用材料

今回比較する材料の物性についてまとめたものを表1に示す。高炉スラグ系材料と比較するセメント、細骨材および粗骨材は、それぞれ一般のコンクリートに使用されている標準的なものと同等のものを使用する。

### 4. 調合及び試験体の作製

各組み合わせの計画調合表を表2に示す。単位水量はNo.5(NNN)の176kg/m<sup>2</sup>に比べてNo.1(BBB)は210kg/m<sup>2</sup>と

約34kg/m<sup>2</sup>多くなった。また、高炉スラグ細骨材を使用した場合には、空気量が多く入る傾向にあった。

練混ぜは、水平パン型ミキサ(50L)を用いて、各調合3バッチ練った。試験体製作はJIS A 1132に基づき、各バッチごとに3本の供試体のうちの1本を作製した。試験体は100φ×200mmの軽量型枠を用いて円柱供試体を、標準養生(材齢1週、4週、13週、1年、3年、10年)18本、屋外暴露(材齢13週、1年、3年、10年)12本、屋内保存(材齢13週、1年、3年、10年)12本、各8種、計336本作製した。また、100φ×200mmの円柱供試体が9本採取できるような450mm×450mm×205mm壁模擬部材を計8個作製した。

試験項目は、超音波伝播速度、動弾性係数、圧縮強度、ヤング係数である。コアでは、中性化試験も測定した。

表1 使用材料

項目	通常の比較用材料			高炉スラグ系材料		
	普通ポルトランドセメント JIS R 5210	密度(g/cm <sup>3</sup> ) 比表面積(cm <sup>2</sup> /g) 4週強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.16 3310 3880	高炉セメント B種 JIS R 5211	密度(g/cm <sup>3</sup> ) 比表面積(cm <sup>2</sup> /g) 4週強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.04 3880 63.0
粗骨材	砕石2013	表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.65	高炉スラグ粗骨材(BFG)	表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.61
		吸水率(%)	0.48		吸水率(%)	3.8
		実積率(%)	60.9		実積率(%)	58.5
	砕石1305	表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.65		表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.74
		吸水率(%)	0.49		吸水率(%)	2.49
		実積率(%)	60.9		実積率(%)	2.68
細骨材	陸砂	表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.58	高炉スラグ細骨材(BFS)	表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.49
		吸水率(%)	2.34		吸水率(%)	2.68
		微粒分量(%)	1.50		微粒分量(%)	55.7
		実積率(%)	69.2		実積率(%)	2.43
		粗粒率	2.77		粗粒率	2.43
混和剤	AE減水剤ボゾリスNo.70					
練混ぜ水	AE助剤No.303A 水道水					

表2 計画調合表

No.	記号	材料の組合せ			水セメント比(%)	目標スランプ(cm)	目標空気量(%)	細骨材率(%)	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積(L/m <sup>3</sup> )			単位粗骨材かさ容積(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	質量(kg/m <sup>3</sup> )			AE減水剤(C×%)	AE助剤(C×%)	フレッシュ性状					
		セメント	細骨材	粗骨材						セメント	細骨材	粗骨材		セメント	細骨材	粗骨材			スランプ(cm)	空気量(圧力方法)(%)	単位容積質量(kg/L)	練上がり温度(°C)	空気量(質量方法)(%)	練り量(L)
1	BBB	高炉	高炉	高炉	65	18	4.5	44.1	210	106	282	357	0.61	323	772	931	0.25	0.0025	19.0	5.9	17779	21.6	6.6	40
2	NBB	普通	高炉	高炉	65	18	4.5	44.5	210	102	286	357	0.61	323	783	931	0.25	0.0020	18.4	5.6	17756	22.0	6.6	40
3	BNB	高炉	陸砂	高炉	65	18	4.5	50.1	175	89	346	345	0.59	269	893	901	0.25	0.0070	18.8	4.1	18179	22.1	5.1	40
4	BBN	高炉	高炉	砕石	65	18	4.5	43.8	195	99	290	371	0.61	300	794	984	0.25	0.0017	18.8	6.1	17840	21.3	6.9	40
5	NNN	普通	陸砂	砕石	65	18	4.5	48.4	174	85	337	359	0.59	268	869	952	0.25	0.0100	19.3	5.3	18185	20.5	5.3	40
6	BNN	高炉	陸砂	砕石	65	18	4.5	48.5	171	87	338	359	0.59	263	872	952	0.25	0.0090	18.7	5.1	18171	20.0	5.2	40
7	NNB	普通	陸砂	高炉	65	18	4.5	49.6	182	89	339	345	0.59	280	875	901	0.25	0.0080	19.3	5.9	17808	20.5	6.4	40
8	NBN	普通	高炉	砕石	65	18	4.5	41.8	206	100	271	378	0.62	317	743	1001	0.25	0.0020	17.8	3.7	18367	20.0	4.3	40

5. 試験結果

5. 1 ヤング係数

図1から分かるように13週目のものは全てがAIJ式を大きく超えていることが分かる。NNNとBBBはヤング係数ではほとんど同じ値になっているが圧縮強度に関してはBBBの方が大きい。4週目と比べると全体的に大きくなっていることが分かる。そしてNNNとBBBの圧縮強度がほぼ同じ値になったが13週目になって差が大きくなった。

図2から分かるように屋内放置のものはほとんどのものがAIJ式に達していない。NNNの方がヤング係数は高いがBBBの方が強度は大きくなっている。4週目と比べるとこちらも圧縮強度は大きくなっているが、BBBのヤング係数が水中養生のものよりも小さくなっていることが分かる。

図3から分かるように屋外暴露のものは1シリーズのものは全てAIJ式を超える結果となったが2シリーズのものは半分のものがAIJ式を超えることがなかった。屋外暴露はBBBのものがヤング係数も圧縮強度も大きくなった。4週目のものと比べるとNNNもBBBもヤング係数と圧縮強度は大きな値になってはいるが、BBBの方が大きな値になっていることが分かる。

図4から分かるようにコアは水中養生のものと同じようにすべてのものがAIJ式を超えたが、やはり水中養生のものより全体的に小さい値となった。

図を全体的に見ると養生方法が異なるものでも13週までの結果を見ると平均的に1シリーズのものが大きい値を示していることが分かる。

5. 2 超音波伝播速度と動弾性係数

超音波伝播速度、動弾性係数も同じような傾向になっているので今回は省略する。

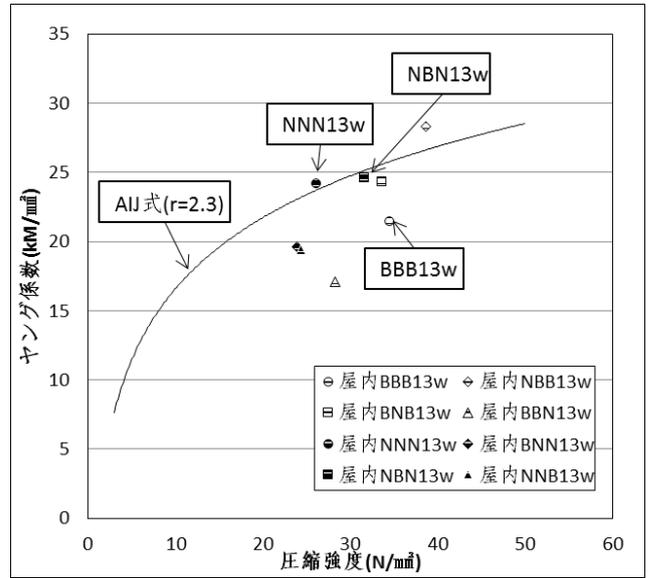


図1 ヤング係数と圧縮強度の関係[屋内]

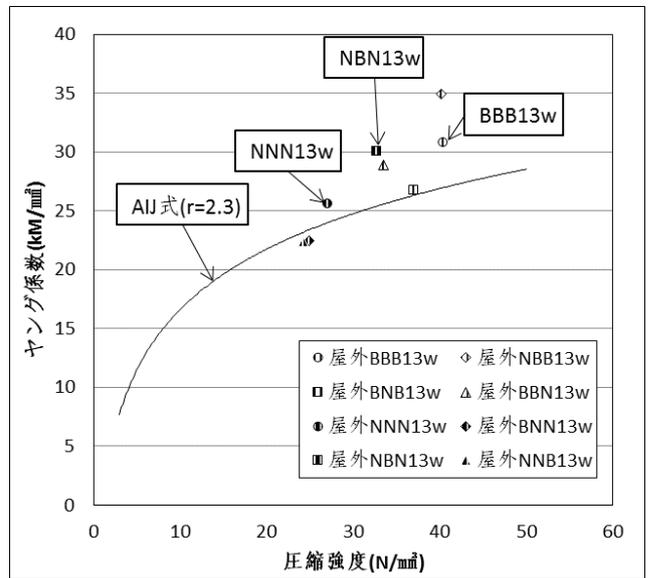


図2 ヤング係数と圧縮強度の関係[屋外]

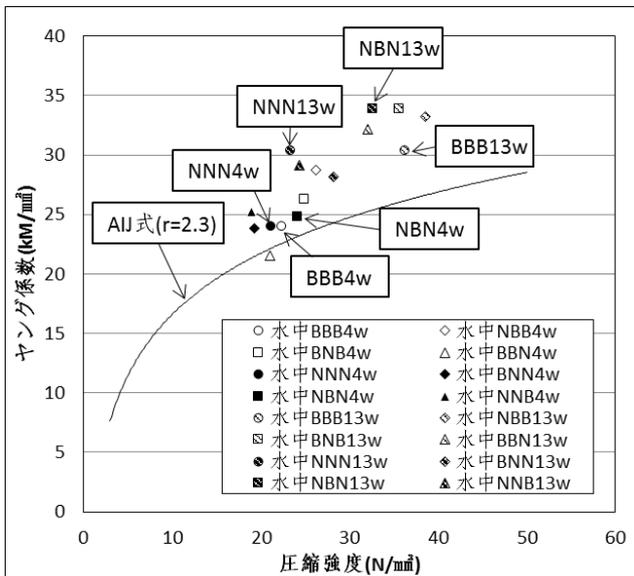


図3 ヤング係数と圧縮強度の関係[水中]

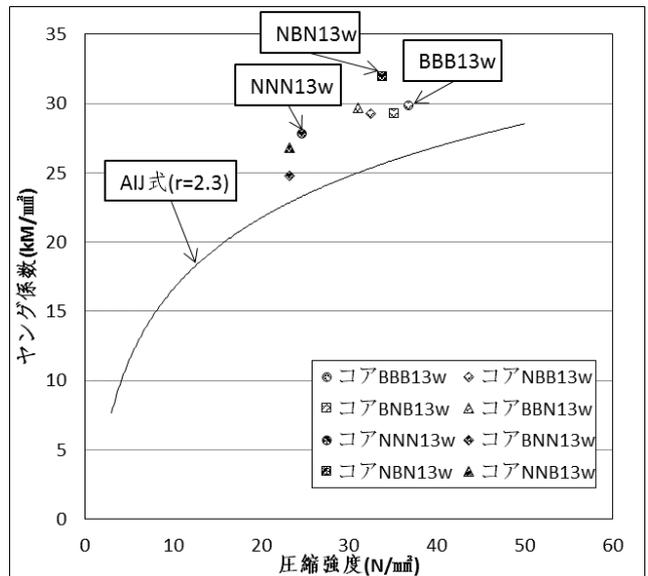


図4 ヤング係数と圧縮強度の関係[コア]

### 5. 3 圧縮強度

1 週目までは通常の比較材料を使ったコンクリートよりも強度が小さかった BBB であったが、4 週目になると、対照的なものである NNN の値を超えた。4 週目から 13 週目になると、どの養生でも  $10\text{N/mm}^2$  以上強度が増進した。(図 5)

BNB (高炉セメント、陸砂、高炉スラグ粗骨材) のものは 1 週目から 4 週目までは強度の増進が大きかったが、4 週目から 13 週目までの期間で BBB 以外の 2 シリーズのものと同じ強度の増進を示した。(図 5)

1 シリーズの中では NBB (普通セメント、高炉スラグ細骨材、高炉スラグ粗骨材) のものが 1 週目から 13 週目まで大きい値を示していることが分かる。(図 5)

2 シリーズに関しては水中養生のものでは、NNN が 13 週目で小さくなっているのが分かる。(図 12~14)

1 シリーズの BBB は屋外暴露で NBB と同じ値を示し、コアでは NBB より大きい値を示している。(図 7)

2 シリーズでは BNN、NNB が水中養生の場合に NNN のものより大きい値を示している。(図 12、14)

### 6. まとめ

一般的に高炉スラグ系材料を用いたコンクリートの場合、長期的な期間で見ると通常の材料を使用したコンクリートより強度が大きくなるとされているが、今回の 13 週目までの結果を見ると短い期間でも、そのような傾向が認められ、セメント、細骨材、粗骨材のいずれを高炉系に置き換えた場合も、強度の伸びが大きいことが分かった。特に高炉スラグ細骨材を用いたものが大きい伸びを示した。結果は 1 シリーズのものが大きく、図をからも分かるようにその差は大きい。このことからさらに長い期間で見ると 2 シリーズとの差がさらに大きくなると推測される。

そして本研究のもう 1 つのテーマである、組み合わせによる変化を考えると、高炉スラグ系細骨材を用いたものは固まるまでに時間がかかるので、初期段階では通常の材料を使用したものの方が早い時期に大きい値になるが、時間が経ち、水酸化カルシウム (アルカリ) の刺激により、セメントだけでなく、細骨材、粗骨材に対しても徐々に水硬性が発揮されてきたものと考えられる。

組み合わせとして考えられるものが高炉スラグ系材料を使う個数である。現状では全て高炉スラグ系材料 (BBB) を用いたものは 1 番強度が大きいとは言えないが、実験結果を見ると他のものより徐々に伸びてきているので、1 番強度が大きくなると考えられる。高炉スラグ系材料が 2 つのものは現状では NBB、BNB、BBN の順に強度が大きいことが分かる。この結果を見ると高炉スラグ系粗骨材を使ったものは強度が大きいことが分かる。1 つのもの

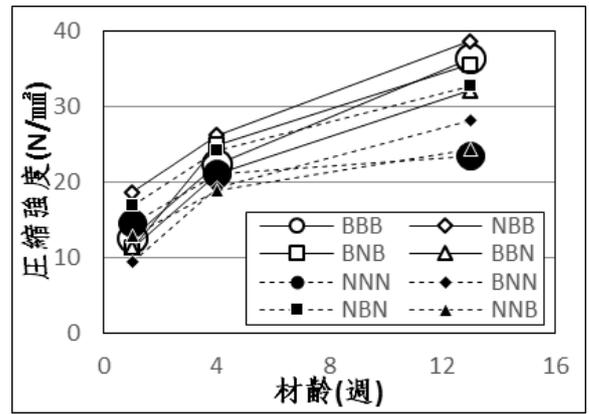


図 5 圧縮強度[水中]

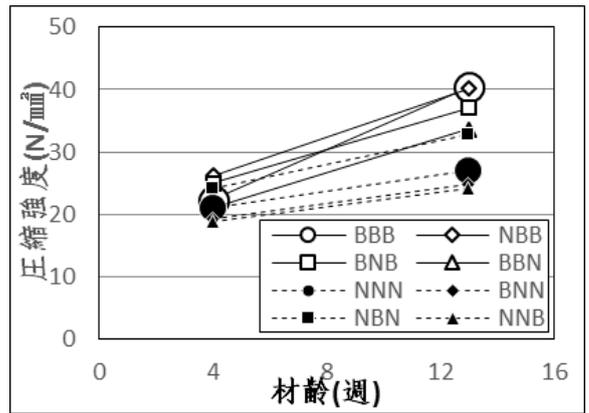


図 6 圧縮強度[屋内]

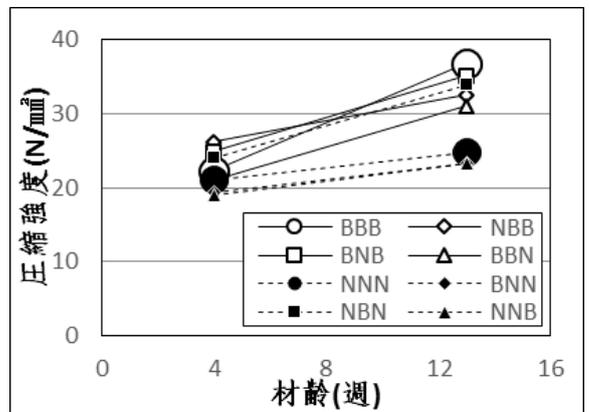


図 7 圧縮強度[屋外]

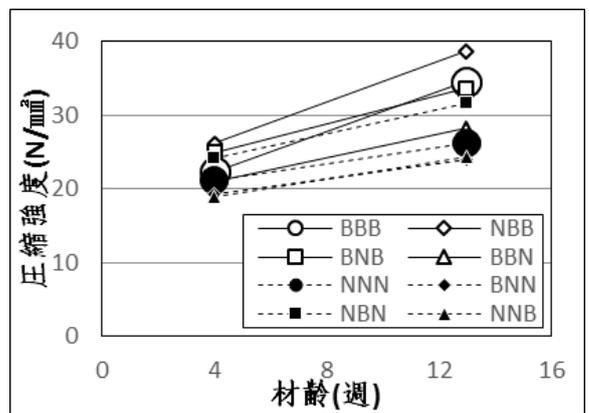


図 8 圧縮強度[コア]

だと NBN、BNN、NNB の順に強度が大きいと考えられる。

このことから高炉スラグ系材料で大きい強度に重要なものは高炉スラグ細骨材であると考えられる。

養生条件の違いについては今回、1 シリーズ、屋外の BBB、NBB が 1 番高い値となった。一般に、コンクリートは屋外に出すことで雨、風、日差しなどの影響を受けるため、水中養生より強度が小さくなるとされているが、高炉スラグ系材料は水中養生より、適度な乾湿の繰り返しが強度が大きくなったものと考えられる。

参考文献

- (1) 紙田晋, 他 3 名: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp, 61-62, 2015. 9
- (2) 日本建築学会: 高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, pp91, 92

謝辞

本研究を進めるにあたり、温かくご指導してくださった阿部道彦先生に深く感謝いたします。また、随時適切な助言をしていただいた、遠藤和義先生、田村雅紀先生、石田航星先生、阿部研究室院生の仲摩和彦氏、ならびに阿部研究室卒論生、ゼミ生の皆さまに深く感謝します。

本研究で使用した高炉スラグ系材料は、鉄鋼スラグ協会より提供していただきました。深く感謝いたします。

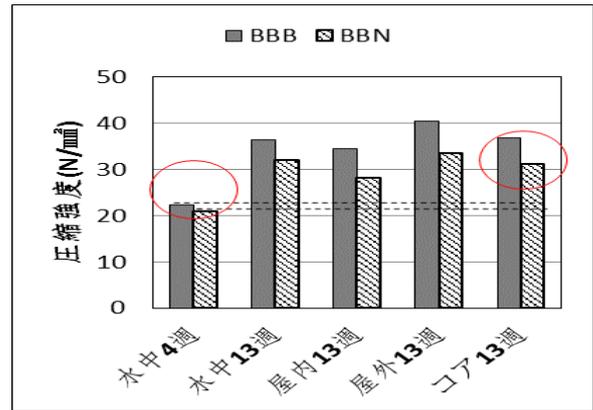


図 11 圧縮強度 [BBB&BBN]

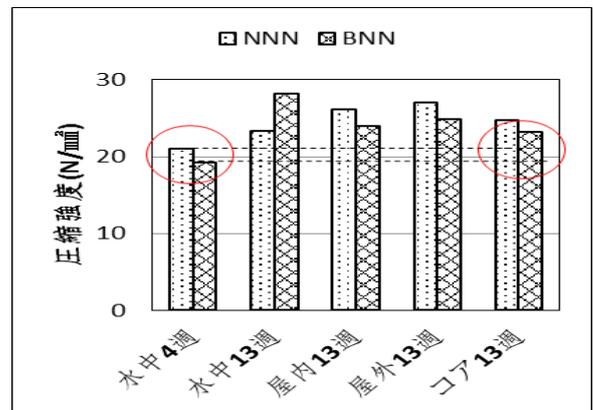


図 12 圧縮強度 [NNN&BNN]

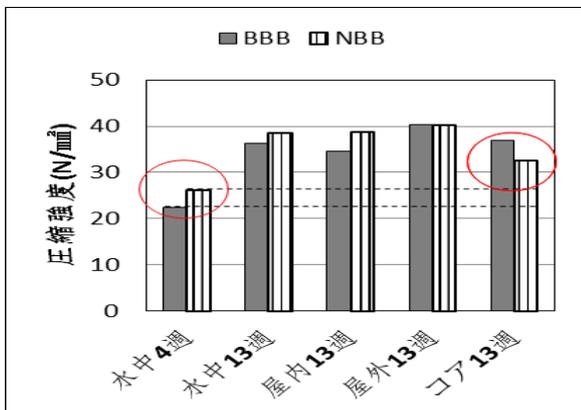


図 9 圧縮強度 [BBB&NBB]

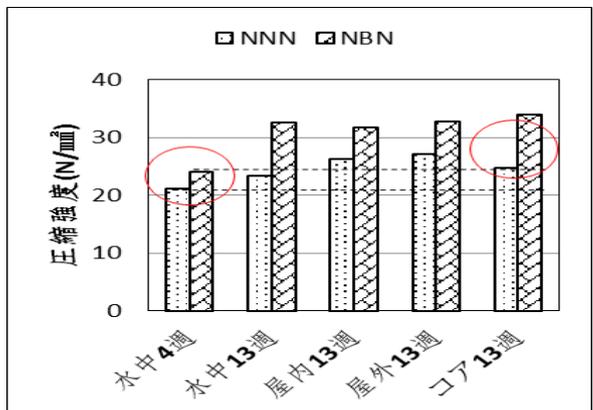


図 13 圧縮強度 [NNN&NBN]

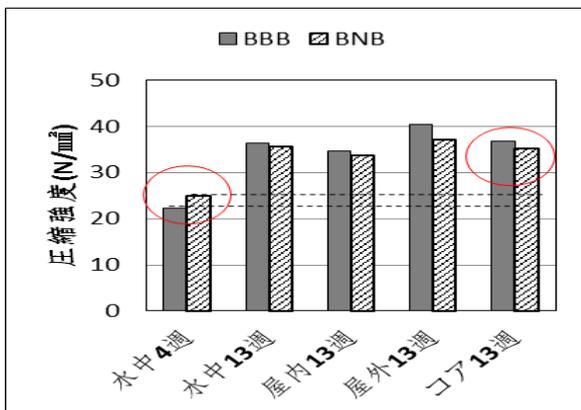


図 10 圧縮強度 [BBB&BNB]

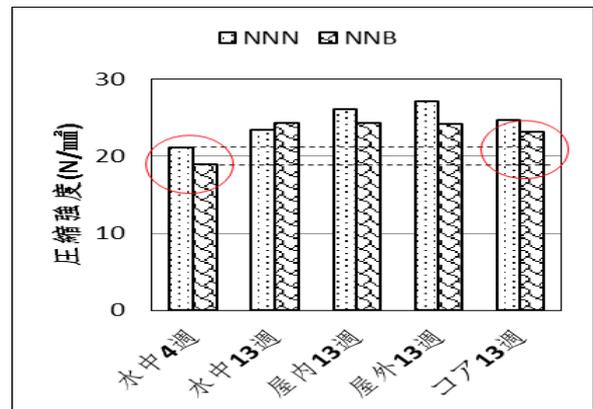


図 14 圧縮強度 [NNN&NNB]