

論文 フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートの評価方法の一提案

齋藤 尚^{*1}・堺 孝司^{*2}・鈴木 康範^{*3}・榎原 彩野^{*4}

要旨: 本研究では、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末をそれぞれ 20%置換したコンクリート（ローカーボンコンクリート）の性能の位置付けを、比較対象としたコンクリートに対して評価することを目的とした。具体的には、強度発現性能、ひび割れ抵抗性能、耐久性能および環境負荷低減性能に関する各種実験を行い、上記性能を表す指標を導入して、性能の位置付けを評価した。その結果、セメントに普通ポルトランドセメントを用いたローカーボンコンクリートの性能が、高炉セメント B 種を用いたコンクリートよりも優れると位置付けられた。

キーワード: フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 三成分系セメント, 性能評価

1. はじめに

近年、各産業分野において CO₂ 排出量の削減に向けた取り組みが行われている中、建設産業においても低炭素社会の構築に向けて、今後更なる取り組みが必要となる。建設産業のうち、コンクリート分野に着目すると、コンクリートは材料製造時に多くの CO₂ を排出し、環境負荷の大きな材料である。特に、セメントは CO₂ 排出量が最も多い材料である。コンクリート製造時の CO₂ 排出量を削減させる有効な手段の 1 つには、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材をセメントの一部に置換する方法が挙げられる。混和材を用いたコンクリートは産業副産物の有効利用による環境負荷低減の一面も備えた性能を有し、低炭素社会の構築に向けての有効な材料になることが期待される。しかし、これらのコンクリートは要求される性能を考慮した上で総合的に評価し、適材適所に用いることが肝要である。

混和材を用いた二成分系または三成分系セメントに関する研究は、従来から多く行われており、基礎的性状から実構造物への適用に至るまで多くの知見^{1),2)}が得られている。このようなコンクリートに関する知見は多く得られているが、コンクリートの性能の位置付けを評価した研究³⁾は少ないのが現状である。

筆者ら⁴⁾は、比較的少ないフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末で置換した三成分系セメントを用いたコンクリート（以下、ローカーボンコンクリートと略）の性能に関する検討を行ってきた。その結果、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末をそれぞれ 20%置換したローカーボンコンクリートが、強度発現性、ひび割れ抵抗性、耐久性および環境負荷低減性の観点から、高い性能を有

することを明らかにした。しかしながら、ローカーボンコンクリートの性能の位置付けを、高炉セメント B 種を用いたコンクリートと比較して評価することが課題であった。

本研究では、**図-1** に示すように、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末をそれぞれ 20%置換したローカーボンコンクリートの性能の位置付けを評価することを目的とした。まず、強度発現性能、ひび割れ抵抗性能、耐久性能および環境負荷低減性能に関する各種実験を行った。次に、上記 4 種類の性能を表す指標を導入して、高炉セメント B 種を用いたコンクリートに対する性能の位置付けを評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 にコンクリートに用いた材料の品質を示す。**表-2** に評価の対象としたコンクリートの概要を示す。コンクリートは、セメントの種類 3 ケース、結合材の構成 3 ケース、単位膨張材量 3 ケースを適宜組み合わせた、計 6 ケースとした。セメントの種類は、普通ポルトランドセメント (N) を中心に、一部早強ポルトランドセメント (H)

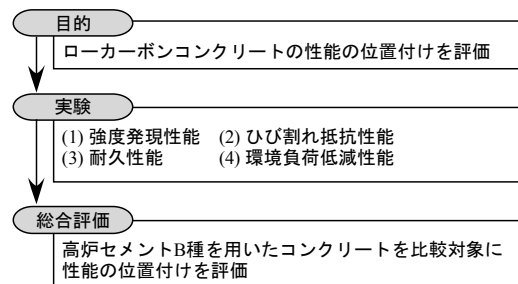


図-1 研究フロー

*1 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 修(工) (正会員)

*2 香川大学 工学部 安全システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 工博 (正会員)

*4 (株) 安藤・間 技術本部 技術研究所 土木研究部 修(工) (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

種類	略号	品質
普通ポルトランドセメント	N	密度 3.15g/cm ³ 比表面積 3390cm ² /g
早強ポルトランドセメント	H	密度 3.13g/cm ³ 比表面積 4740cm ² /g
低熱ポルトランドセメント	L	密度 3.24g/cm ³ 比表面積 3910cm ² /g
フライアッシュ II 種	FA	密度 2.28g/cm ³ 比表面積 3920cm ² /g
高炉スラグ微粉末 4000	BFS	密度 2.89g/cm ³ 比表面積 4250cm ² /g
エトリンサイト-石灰複合系膨張材	EX	密度 3.05g/cm ³ 比表面積 2860cm ² /g
川砂	S	表乾密度 2.62g/cm ³ 吸水率 1.18%
硬質砂岩砕石 2005	G	表乾密度 2.72g/cm ³ 吸水率 0.55%
AE 減水剤	AD	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
AE 剤	AE	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体

表-2 評価の対象としたコンクリート

セメントの種類	結合材の構成 (%)			EX (kg/m ³)
	C	FA	BFS	
N	100	0	0	0
	60	0	40	0
	60	20	20	0
	60	20	20	15
H	60	20	20	15
L	60	20	20	12.5

表-4 評価項目

性能	評価項目	評価方法
強度発現性能 (圧縮強度)	標準養生	JIS A 1108
	簡易断熱養生	2.2 節参照
ひび割れ抵抗性能	断熱温度上昇量	水循環式
	ひび割れ発生日数	JCI 委員会の方法 ⁸⁾
耐久性	相対動弾性係数	JIS A 1148 (A 法)
	中性化速度係数	JIS A 1153
	実効拡散係数	JSCE-G571
環境負荷低減性能	CO ₂ 排出量	JSCE 報告書 ^{10),11)} から算定
	バージン資源投入量	

表-3 コンクリートの配合

配合名 ^{*1}	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									フレッシュ性状 ^{*3}		
			W	B			EX	S	G	AD ^{*2}	AE ^{*2}	SL (cm)	Air (%)	C.T. (°C)
				C	FA	BFS								
N-0-0-0	55	43	161	293	0	0	0	790	1086	3.81	0.023	12.5	4.5	21
N-0-40-0			157	171	0	114	0	793	1092	4.42	0.020	10.5	4.8	20
N-20-20-0			148	161	54	54	0	804	1106	4.30	0.040	11.5	5.4	20
N-20-20-15			148	161	54	54	15	791	1106	4.44	0.032	9.5	4.8	20
H-20-20-15			150	164	55	55	15	787	1110	4.52	0.034	9.5	4.0	21
L-20-20-12.5			143	156	52	52	12.5	804	1122	4.31	0.026	12.5	5.5	21

*1 配合名：(セメントの種類)-(FA 置換率)-(BFS 置換率)-(単位膨張材量) *2 混和剤：原液の量

*3 SL：スランプ, Air：空気量, C.T.：コンクリート温度

および低熱ポルトランドセメント (L) を検討に加えた。結合材の構成は、N 単体および高炉セメント B 種 (BB) を比較用として、既往の検討結果⁴⁾からセメントの種類によらず、FA20%および BFS20%とした。膨張材は、ひび割れ抵抗性の改善を目的に用いた。

表-3 にコンクリートの配合を示す。配合は、水結合材比 (W/B) を 55%、細骨材率 (s/a) を 43%一定とした。ローカーボンコンクリートの W/B は、すべての配合で長期材齢における潜在的な強度発現が同等となるように一定とした。フレッシュコンクリートの性状は目標スランプ 12±2.5cm、目標空気量が 4.5±1.5%となるように、単位水量および混和剤添加量で調整した。膨張材は結合材に含めずに細骨材置換とし、既往の結果⁵⁾から N および H で 15kg/m³、L で 12.5kg/m³とした。なお、コンクリートの作製は、温度 20±2°C の恒温室で行った。

2.2 評価項目

表-4 に評価項目を示す。強度発現性能は圧縮強度で評価した。養生条件は標準養生および簡易断熱養生とした。

標準養生は、構造物のかぶり部分に相当する強度を検討するために行った。ここで、かぶり部分の強度は、環境条件によっては乾燥や雨掛かりの影響で常に湿潤状態を保っているとは限らない。しかし、湿潤養生を土木学会標準示方書⁶⁾などで示される期間行えば、その強度は標準養生とほぼ変わらないと仮定した。簡易断熱養生は夏期およびマスコンクリートを想定し、水和熱による温度履歴を受けた強度を検討するために行った。簡易断熱養生は、厚さ 200mm の発泡スチロールで囲まれた空間内に供試体を 16 本設置し、供試体間の空間を発泡ビーズで埋め、材齢 14 日までは発泡スチロール内で封かん養生し、その後は温度 20±2°C の恒温室で封かん養生する方法とした。供試体は、いずれの養生条件においても φ100×200mm とし、材齢 3, 7, 28, 56, 91 日に試験を行った。

ひび割れ抵抗性能は、温度ひび割れおよび乾燥収縮ひび割れに対して評価した。温度ひび割れ抵抗性能は、既往の研究⁷⁾から 3 次元 FEM による温度応力解析から求めた最小温度ひび割れ指数に大きな影響を及ぼす終局断熱

温度上昇量によって評価した。断熱温度上昇量は、水循環式の装置を用いて、材齢 14 日まで測定した。乾燥収縮ひび割れ抵抗性能は、図-2 に示す JCI 混和材料の委員会⁸⁾の方法で、ひび割れ発生日数の大小によって評価した。ひび割れ発生日数の大小によって評価した理由は、コンクリートにひび割れが早期に発生すると、その後の乾燥収縮や自己収縮などにより、ひび割れ幅が増大し、耐久性の観点からも望ましくない⁹⁾ためである。

耐久性性能は、凍結融解試験による相対動弾性係数 (JIS A 1143)、促進中性化試験による中性化速度係数 (JIS A 1152, 1153 : 促進 13 週) および電気泳動による実効拡散係数 (JSCE-G571) で評価した。供試体は、凍結融解および促進中性化試験では 100×100×400mm、電気泳動試験では φ100×50mm とした。

環境負荷低減性能は、コンクリートの材料製造時における CO₂ 排出量およびバージン資源投入量で評価した。CO₂ 排出量は、表-5 に示す材料製造時における CO₂ 排出量の原単位¹⁰⁾に 1m³ 当たりの単位量を乗じて求めた。なお、膨張材の CO₂ 排出量の原単位は、既往の文献¹⁰⁾で具体的な数値が示されていないため、セメントと同じ値とした。バージン資源投入量は、各材料のバージン資源投入率に 1m³ 当たりの単位量を乗じて求めた。ここで、各材料のバージン資源投入率は、バージン資源投入量とリサイクル資源投入量の和によって除した値と定義した。セメントのバージン資源投入量は、N の場合、産業廃棄物および副産物の使用量が 1 トン当たり 0.189 トン¹¹⁾であるため、バージン資源投入率は 0.811 となる。H および L の場合、産業廃棄物および副産物を用いていないため、バージン資源投入率は 1.0 となる。FA および BFS は、全量が産業副産物であるため、バージン資源投入率は 0 となる。その他の材料はバージン資源投入率を 1.0 とした。

3. 実験結果

3.1 強度発現性能

図-3 に強度発現性能の一例として、セメントに N を用いた場合の圧縮強度の経時変化を示す。標準養生の場合、N-20-20-0 および N-20-20-15 の圧縮強度は、材齢 91 日まで材齢によらずに BB より小さかった。材齢 91 日における BB に対する圧縮強度比は、N-0-0-0 で 82%、N-20-20-0 で 89%、N-20-20-15 で 99% となった。一方、簡易断熱養生の場合、N-20-20-0 および N-20-20-15 の圧縮強度は、材齢 91 日まで標準養生と同様に、BB より小さくなった。材齢 91 日における BB に対する圧縮強度比は、N-0-0-0 で 92%、N-20-20-0 で 96%、N-20-20-15 で 96% となった。

養生条件の違いを比較すると、簡易断熱養生の圧縮強

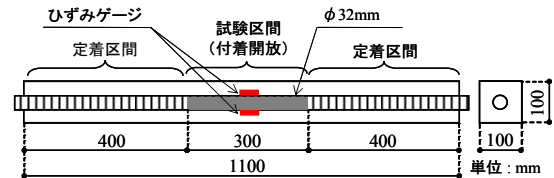


図-2 乾燥収縮ひび割れ試験体

表-5 材料製造時における CO₂ 排出量の原単位

材料	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)
ポルトランドセメント, 膨張材	765.5
フライアッシュ	19.5
高炉スラグ微粉末	26.5
細骨材	3.7
粗骨材	2.9
AE 減水剤・AE 剤	187.5

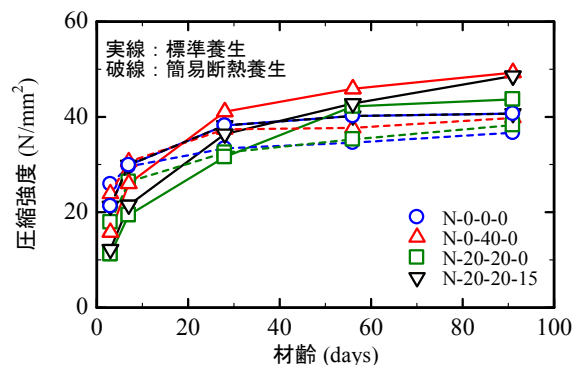


図-3 圧縮強度の経時変化

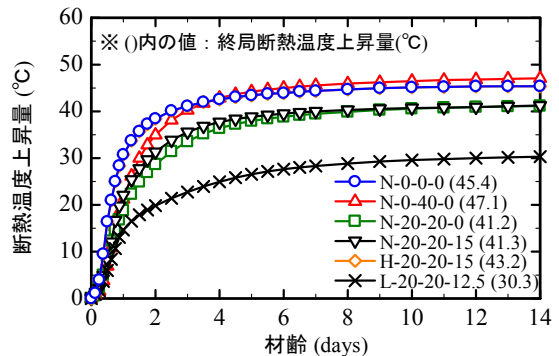


図-4 断熱温度上昇量

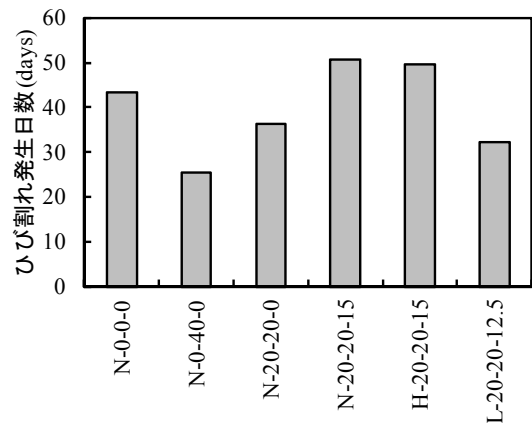


図-5 ひび割れ発生日数

度は、すべての配合で材齢7日まで標準養生よりも高いが、材齢28日以降は低くなる結果となった。これは、発泡スチロール内で養生した材齢14日までは、水和熱による影響を受けたことで強度増進が生じたが、その後は封かん養生としたため、外部からの水分の供給がなく、強度発現の停滞が生じたと考えられる。

3.2 ひび割れ抵抗性能

図-4に断熱温度上昇量を示す。ローカーボンコンクリートの終局断熱温度上昇量は、BBと比較して、N-20-20-0で5.9°C、N-20-20-15で5.8°C、H-20-20-15で3.9°C、L-20-20-12.5で16.8°Cの低減効果が認められた。また、その低減効果はH、N、Lの順番に高くなり、セメントの発熱量の違いが顕著に表れる結果となった。温度上昇速度に関する係数についても、同様の傾向が認められた。

図-5にひび割れ発生日数を示す。ローカーボンコンクリートのひび割れ発生日数は、BBと比較して、N-20-20-0で1.4倍、N-20-20-15で2.0倍、H-20-20-15で2.0倍、L-20-20-12.5で1.3倍大きくなった。ローカーボンコンクリートに膨張材を添加した場合、NおよびHの場合にひび割れ発生日数が大きく増加した。一方、Lの場合は初期の強度発現性が緩慢なため、NやHよりもひび割れ発生日数が低下したと考えられる。

3.3 耐久性能

図-6に凍結融解試験結果を示す。相対動弾性係数は、すべての配合で88%以上の値となり、混和材を用いることによる凍結融解抵抗性の低下は認められなかった。

図-7に中性化速度係数を示す。ローカーボンコンクリートの中性化速度係数は、すべての配合でBBよりもやや大きくなった。セメントの種類で比較すると、中性化速度係数はH、N、Lの順番で大きくなる傾向を示した。これは、促進中性化試験の標準養生期間が材齢28日であるため、セメントの種類によって、強度発現や組織構造の違いが生じた影響と推察される。

図-8に電気泳動による実効拡散係数を示す。ローカーボンコンクリートの実効拡散係数は、すべての配合でBBよりもやや大きくなったものの、N単体と比較して大きく低下した。セメントの種類で比較すると、実効拡散係数はN、L、Hの順番に大きくなった。

3.4 環境負荷低減性能

表-6に各配合のCO₂排出量およびバージン資源投入量を示す。ローカーボンコンクリートのCO₂排出量は、セメントの種類によらず、BBと同程度の値となった。ローカーボンコンクリートのバージン資源投入量は、Nを用いた場合にはBBと同程度となったが、HまたはLを用いた場合には製造時に産業廃棄物または副産物を用いていないため、BBよりも若干高い値となった。

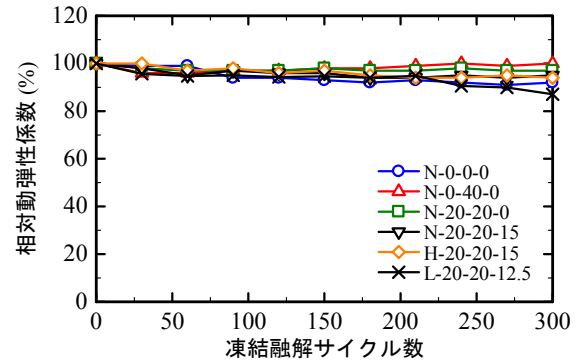


図-6 凍結融解試験結果

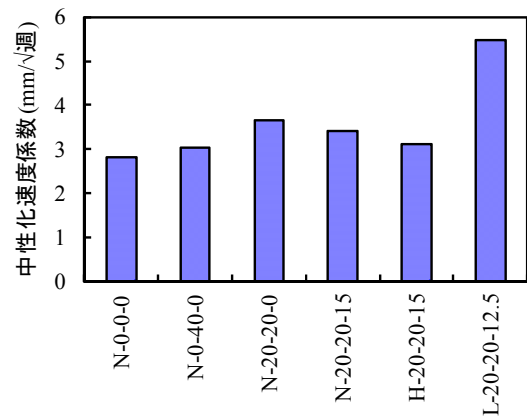


図-7 中性化速度係数

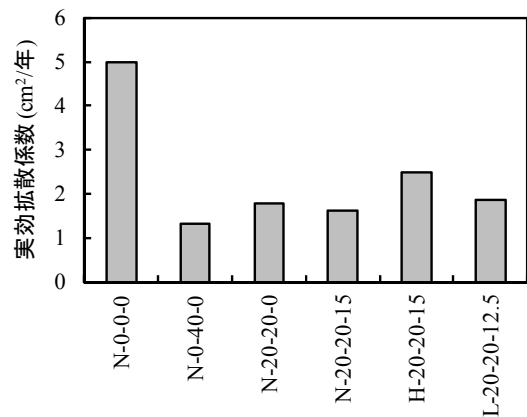


図-8 電気泳動による実効拡散係数

表-6 CO₂排出量およびバージン資源投入量

配合名	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	バージン資源投入量 (kg/m ³)
N-0-0-0	231	2275
N-0-40-0	141	2181
N-20-20-0	133	2189
N-20-20-15	144	2191
H-20-20-15	147	2226
L-20-20-12.5	138	2238

4. コンクリートの性能評価

性能評価では、強度発現性能、ひび割れ抵抗性能、耐久性能および環境負荷低減性能を表す指標を導入して、BBに対する性能の位置付けを検討した。具体的には、各性能ごとにBBに対する性能の物性値の比によって評

表-7 評価に用いた各性能の物性値

配合名	強度発現性能		ひび割れ抵抗性能		耐久性能			環境負荷低減性能	
	標準養生 56日 (N/mm ²)	簡易断熱養生 56日 (N/mm ²)	終局断熱温度 上昇量 (°C)	ひび割れ発生 日数 (日)	相対動弾性 係数 (%)	中性化 速度 係数 (mm/√週)	実効 拡散 係数 (cm ² /年)	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	バー ジ ン 資 源 投 入 量 (kg/m ³)
N-0-0-0	40.2	34.6	45.4	43.3	92	2.81	5.00	231	2275
N-0-40-0	45.9	37.7	47.1	25.3	100	3.03	1.33	141	2181
N-20-20-0	42.2	35.3	41.2	36.3	97	3.65	1.79	133	2189
N-20-20-15	42.8	36.0	41.3	50.8	95	3.42	1.63	144	2191
H-20-20-15	44.2	37.2	43.2	49.6	94	3.11	2.48	147	2226
L-20-20-12.5	23.5	30.1	30.3	32.1	88	5.47	1.85	138	2238

表-8 4種類の指標および総合性能指標の算定結果

配合名	強度発現 性能指標 α	ひび割れ 抵抗性能指標 β	耐久性能指標 γ	環境負荷低減 性能指標 δ	総合性能指標 T
N-0-0-0	0.90	1.37	0.76	0.78	0.95
N-0-40-0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
N-20-20-0	0.93	1.29	0.85	1.03	1.02
N-20-20-15	0.94	1.57	0.88	0.99	1.10
H-20-20-15	0.98	1.53	0.82	0.97	1.07
L-20-20-12.5	0.66	1.41	0.72	1.00	0.95

評価した。評価にあたり、4種類の指標に満足すべき最小値を設定し、一部に極端な性能低下が生じたものを排除した。その上で、それらの指標を平均して、総合的な性能の位置付けを評価した。ここで、各指標を平均化して求めた理由は、一般的に用いられているBBのように、ローカーボンコンクリートが汎用的な性能を有しているかを判断するためである。

4.1 性能評価方法

強度発現性能指標 (α) は、標準養生指標 (α_1) および簡易断熱養生指標 (α_2) の平均値とした。 α_1 および α_2 は、基準となるBBの圧縮強度の比とした。呼び強度を保証する管理材齢は、ひび割れを抑制しつつ、混和材の反応性を有効に活かすために、それぞれ材齢56日とした。なお、ローカーボンコンクリートの圧縮強度は、材齢3日程度で鉛直面の脱型に必要な5N/mm²を満足すれば、初期材齢における強度発現を考慮しないこととした。

ひび割れ抵抗性能指標 (β) は、温度ひび割れ抵抗性能指標 (β_1) および乾燥収縮ひび割れ抵抗性能指標 (β_2) の平均値とした。 β_1 は終局断熱温度上昇量の逆数のBBに対する比、また β_2 はひび割れ発生日数のBBに対する比とした。

耐久性能指標 (γ) は、凍結融解抵抗性能指標 (γ_1)、中性化抵抗性能指標 (γ_2) および塩分浸透抵抗性能指標 (γ_3) の平均値とした。 γ_1 は相対動弾性係数のBBに対する比、 γ_2 は中性化速度係数の逆数のBBに対する比、また γ_3 は実効拡散係数の逆数のBBに対する比とした。

環境負荷低減性能指標 (δ) は、CO₂排出指標 (δ_1) およびバーজন資源投入指標 (δ_2) の平均値とした。 δ_1 はCO₂排出量の逆数のBBに対する比、また δ_2 はバーজন資源投入量の逆数のBBに対する比とした。

性能評価において、各指標の満足すべき最小値は、「4種類の指標 ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$) が0.85以上、かつ4種類の指標を平均して得られた総合性能指標 (T) が1.0以上」とした。これらの値を満足した場合、ローカーボンコンクリートの性能がBBよりも優れると位置付けた。

4.2 性能評価結果

表-7に評価に用いた各性能の物性値を示す。表-8および図-9に4種類の指標および総合性能指標の算定結果を示す。強度発現性能指標は、L-20-20-12.5、N-0-0-0、N-20-20-0、N-20-20-15、H-20-20-15の順番に大きくなり、0.66~0.98の範囲であった。これは、ローカーボンコンクリートにはフライアッシュを置換しており、BBよりも強度発現が緩やかに進行したことが影響したと考えられる。特に、Lを用いたローカーボンコンクリートでは、その影響が顕著に認められ、強度発現性能指標は0.66となった。そのため、Lのように強度発現が緩やかなセメントに対して混和材を用いる場合は、強度発現性の観点からの検討が必要になる。

ひび割れ抵抗性能指標は、すべての配合でBBよりも大きくなり、特にローカーボンコンクリートに膨張材を添加した配合でその傾向は顕著になった。これは、ローカーボンコンクリートの断熱温度上昇量、および乾燥収縮によるひび割れ発生日数の両方がBBよりも優れたことによる。

耐久性能指標は、L-20-20-12.5、N-0-0-0、H-20-20-15、N-20-20-0、N-20-20-15の順番に大きくなったが、いずれの配合もBBよりも小さくなった。特に、ローカーボンコンクリートの耐久性能指標は、4種類の指標の中で、最も小さい値を示した。これは、耐久性能指標の内、実効拡散係数がBBよりも大きくなったことによる。

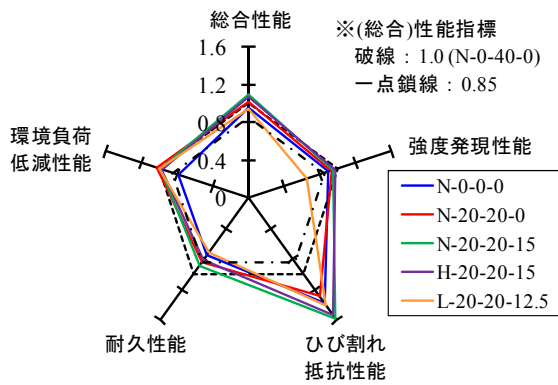


図-9 各指標および総合性能指標の比較

環境負荷低減性能指標は、ローカーボンコンクリートと BB でほとんど差は認められなかった。これは、セメントに混和材を合計 40%置換していれば、CO₂ 排出量、バージン資源投入量ともに、同程度の値になったことによる。

総合性能指標は、N および H を用いたローカーボンコンクリートで 1.0 以上となった。一方、L を用いたローカーボンコンクリートは、強度発現性能指標および耐久性能指標が 1.0 よりも小さくなった影響で、総合性能指標は 0.95 となった。

以上より、4.1 節で示した「各指標が 0.85 以上、かつ総合性能指標が 1.0 以上」となる配合は、N を用いたローカーボンコンクリートであることが明らかになった。このように、ローカーボンコンクリートの性能は、1 種類の指標のみを用いるのではなく、コンクリートの要求性能に応じて、複数の指標を用いることによって、汎用的で優れた性能を有するものを選定できる。

5. まとめ

本研究では、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末をそれぞれ 20%置換したローカーボンコンクリートの性能の位置付けを評価することを目的とした。具体的には、強度発現性能、ひび割れ抵抗性能、耐久性能および環境負荷低減性能に関する実験を行い、上記性能を表す指標を導入し、高炉セメント B 種を用いたコンクリートに対する性能の位置付けを評価した。以下に、本研究の範囲で得られた結果を示す。

(1) 強度発現性能、耐久性能、ひび割れ抵抗性能および環境負荷低減性能の 4 種類の指標を導入することによって、高炉セメント B 種を用いたコンクリートに対するローカーボンコンクリートの性能の位置付けを評価できた。

(2) 本評価方法は 4 種類の指標に満足すべき最小値を設定し、一部に極端に性能低下が生じたものを排除することによって、性能に偏りがなく、総合的な性能が優れるコンクリートを選定ができた。

(3) 性能評価を行った結果、普通ポルトランドセメントを用いたローカーボンコンクリートの性能が、高炉セメント B 種よりも優れると位置付けられた。

参考文献

- 1) 那須清吾：低発熱型コンクリートの温度応力ひび割れ特性，本四技報，Vol.18，No.69，pp.2-13，1994
- 2) 大澤友宏，平田隆祥，二戸信和，人見尚：種々の混和材を高置換したセメント系混合材料の基礎物性と CO₂ 削減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.179-184，2010
- 3) 李柱国，稲井栄一，大久保孝昭：環境配慮型材料設計のためのコンクリートの環境負荷性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.765-770，2007
- 4) 齋藤淳，堺孝司，鈴木康範，福留和人；フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1537-1542，2013
- 5) H.Saito, K.Sakai, Y.Suzuki and K.Fukudome: Effect of Cement Type and Expansive Additive on Resistance to Cracking of Low-carbon concrete Using Fly Ash and Ground Granulated Blast-furnace Slag, First International Conference on Concrete Sustainability, pp.688-693, 2013
- 6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.121-123，2013
- 7) 鈴木康範，齋藤尚，溝渕利明，橘夏海，温度ひび割れ指数の簡易評価式の検討，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-660，pp.1319-1320，2010
- 8) 日本コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書，pp.209-211，2010
- 9) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，p.19，2008
- 10) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案)，コンクリートライブラリー125，pp.46-64，2005
- 11) 土木学会：環境調和型コンクリート材料学の創造に関する研究委員会成果報告書，コンクリート技術シリーズ 96，pp.10-18，2011