

コンクリート用高炉スラグ骨材の利用技術の近況

State of the Arts in Technology of Using Blast Furnace Slag Gravel for Concrete Members

高 野 良 広^{*(1)}

Yoshihiro TAKANO

片 桐 健 詞^{*(2)}

Kenji KATAGIRI

赤 司 有 三^{*(1)}

Yuuzou AKASHI

竹 田 重 三^{*(3)}

Shigemi TAKEDA

真 沢 正 人^{*(2)}

Masato SANAZAWA

松 井 淳^{*(4)}

Atsushi MATSUI

抄 録

コンクリート用高炉スラグ骨材は、JIS規格化以降20年以上経過しているが、一般の建設工事で本格的に使用された例はほとんどなく、使用量も年間150万t程度に止まっている。最近の天然資源の保護、枯渇に対応したりサイクル材活用へのニーズの高まりを受け、LNG地下タンクコンクリートの粗骨材としての利用検討、天然砂混合用細骨材としての適用検討をもとに、最近の高炉スラグ骨材の利用拡大へ向けた取り組みを紹介した。LNG地下タンクでは、高炉スラグ粗骨材使用時のポンプ圧送性確保対策および極低温時の耐久性評価について述べた。また天然砂混合用材としての高炉スラグ細骨材の適用検討では、高炉スラグ細骨材の固結抑制対策および効果的な天然砂との混合方法について述べた。

Abstract

Twenty and more years have already passed since establishment of JIS for blast furnace slag gravel. However, the annual quantity of use accounts for 1.5 million tons only due to very few examples of big construction projects. On the other hand, the needs for recycling and saving constructional materials have been highlighted recently according to serious shortage of new natural resources. This report introduces two examples of experimental uses of blast furnace slag gravel as current technological development. One is the use as aggregate for underground concrete tank-pit in construction of LNG facility. Technical method is explained to keep the pumpability of fresh concrete mixed with blast furnace slag gravel. It is also focussed on the evaluation of slag gravel's strength in extremely low temperature. The other example deals with the effective use of blast furnace slag gravel as fine aggregate by mixing with natural sand. The study explains the countermeasure for delaying adequately the hardening of fine slag aggregate after air-cooling. Moreover, the effective method is proposed in mixture of fine slag aggregate and natural sand.

1. はじめに

溶鉱炉での鉄鉄製造過程で副産される高炉スラグは、鉄鉄1t当たり約300kg生成し、我が国における総生産量は年間2 300万t以上に及んでいる¹⁾。高炉スラグは図1に示すように、熔融スラグをピットやヤードに放流して製造される徐冷スラグと熔融スラグに水を吹き付けて製造される水砕スラグとに大別され、外観は、前者が碎石状、後者が砂状である。コンクリートの骨材として使用される高炉スラグ粗骨材は、徐冷スラグを破碎したのち粒度調整して製造され、また高炉スラグ細骨材は、水砕スラグを粒度調整して製造される。

コンクリート用高炉スラグ骨材(粗骨材及び細骨材)の技術開発は1970年代より行われ、1977年には、JIS A 5011“コンクリート用

高炉スラグ粗骨材”が、1981年にはJIS A 5012“コンクリート用高炉スラグ細骨材”が制定されている(その後、JIS A 5011-1“コンクリート用スラグ骨材—第一部：高炉スラグ骨材”として一本化)。高炉スラグ骨材は、1980年には全国で351万t使用されたが、その後は減少を続け、一時は年間100万t前後の使用量にまで低下した。しかし、最近の海砂採取規制など天然資源の保護、枯渇に対応したりサイクル材活用への機運の高まりから、高炉スラグ骨材の利用拡大が望まれてきつつあり、2000年度実績では150万t程度に増大している。

本報では、大規模LNG地下タンクコンクリートへの高炉スラグ粗骨材の適用、天然砂代替としての高炉スラグ細骨材の利用技術検討を例に、最近の高炉スラグ骨材の利用に関する技術開発や技術蓄積への取り組み状況を紹介する。

^{*(1)} 設備技術開発センター 土木建築技術部 マネジャー
千葉県富津市新富20-1 ☎293-8511 ☎(0439)80-2976

^{*(2)} 君津製鐵所 資源リサイクル部 マネジャー

^{*(3)} スラグ・セメント事業推進部 マネジャー

^{*(4)} 太平洋セメント(株) 研究本部 セメント・コンクリート技術センター
主任研究員

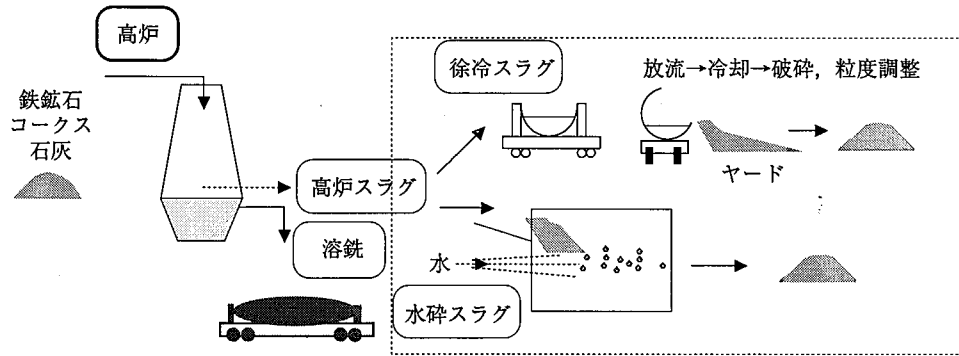


図1 高炉スラグの製造フロー

2. 粗骨材利用技術

2.1 LNG地下タンクへの高炉スラグ粗骨材適用に対する課題

東京電力(株)富津火力発電所では、1998年5月より実施中の増設工事において、LNG地下タンクや放水路等のコンクリートの粗骨材にスラグ碎石を天然碎石の代替材として使用することで、コスト縮減と資源の有効利用を図っている²⁻⁴⁾。この内、LNG地下タンクは、直径73.5m、高さ43.6m、内容量12.5万klのタンクを、写真1に示すように2基建設するものであり、底版厚6.0m、側壁厚1.8mで、総コンクリート量は82 000m³にも達する。高炉スラグ粗骨材は、この中に約41 000 t 使用されている。

このLNG地下タンクのコンクリートに高炉スラグ粗骨材を使用するにあたっては、高炉スラグ粗骨材が多孔質で吸水率が大いことに起因する下記の2点が課題となった。

1) コンクリートのポンプ施工性の確認と対策の立案

LNG地下タンクの底版工事におけるコンクリートのポンプ圧送は、配管総延長が約150mにも及び、高圧での圧送が必要となる。そのため高炉スラグ粗骨材がコンクリート中の水分を吸水し、コンクリートの流動性低下による配管閉塞が生じる恐れがある。従っ

て、ポンプ圧送中に配管閉塞を起こさないコンクリートの材料、配合の検討が必要である。

2) 高炉スラグ粗骨材コンクリートの極低温強度特性の評価

LNG地下タンクの底版や側壁コンクリートは、液化天然ガスが貯蔵されている状態では約-70℃の極低温状態となっているが、供用期間中に実施する開放点検時には常温に近い温度まで上昇するため、大きな温度変化の凍結融解作用を受ける。一般に凍結融解作用を受けるコンクリートに多孔質の骨材を用いた場合、骨材の吸水率が多いため、凍結時の体積膨張量が大きくなり、コンクリートにひび割れが生じやすいと言われている⁵⁾。高炉スラグ粗骨材は、天然粗骨材と比較して多孔質で吸水率が大いいため、凍結融解作用を受けやすいことが想定され、コンクリートに用いる上では、これに対する耐久性確認が必要である。

そこで、高炉スラグ粗骨材と天然粗骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送特性と凍結融解特性の比較試験をもとに、高炉スラグ粗骨材混入の影響を検討した。

2.2 高炉スラグ粗骨材がコンクリートのポンプ圧送性に与える影響

ポンプ圧送中の高炉スラグ粗骨材の吸水がコンクリートの打設性へ与える影響を評価するため、ポンプ圧送試験を実施した。表1に使用材料を、表2に配合条件を示す。表2中のGS-0は天然粗骨材100%のコンクリート、GS-50は高炉スラグ粗骨材と天然粗骨材を

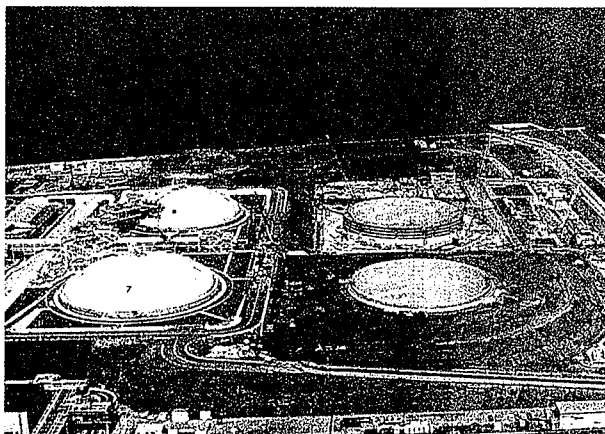


写真1 建設中の地下LNGタンク

表1 使用材料

材料項目	使用材料	品質
セメント	高炉セメントB種	密度3.04g/cm ³ 、比表面積3 990cm ² /g
細骨材	天然細砂	表乾密度2.60g/cm ³ 、吸水率1.70%、粗粒率2.73
粗骨材	石灰碎石	表乾密度2.71g/cm ³ 、吸水率0.71%、最大粒径20mm
	高炉スラグ碎石	表乾密度2.58g/cm ³ 、吸水率2.68%、最大粒径20mm
混和剤	AE減水剤	標準型(I種)

表2 試験に用いたコンクリート配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	設計値			単位量(kg/m³)					
			f'ck(28) (N/mm²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材G		混和剤 AD
									天然	スラグ	
GS-0	55	42	24	12	4.5	159	289	758	1104	—	0.723
GS-50		45		±2.5		159	289	808	520	492	0.723
GS-100		47		15	±1.5	170	310	821	—	921	0.775

容積比50%：50%で混合したコンクリート、GS-100は高炉スラグ粗骨材100%のコンクリートである。

試験は、写真2に示すように、高さ約10mの盛土上から総配管延長62mにてコンクリートを打設する方法にて行い、圧送前後のスランプ、空気量の測定と合わせ、図2に示す7か所で管内圧力を計測し、圧送性が変化する場所を把握することにした。

圧送の結果、GS-0とGS-50については配管の閉塞もなく良好な打設状況であったが、GS-100についてはスランプ15cmと他より流動性を高にしたにも関わらず、図2の②のテーパ部で配管閉塞が発生した。この原因を高炉スラグ粗骨材の吸水と考えれば、流動性低下による管内圧力の上昇や圧送後のスランプ低下などの現象が生じるはずであるが、図3の管内圧力の変化や表3に示す圧送前後のスランプ変化から判るように、GS-100と他の2配合とに有意な差は生じていない。このことから、配管閉塞の原因は高炉スラグ粗骨材の吸水によるものだけでなく、高炉スラグ粗骨材の骨材形状や表面粗度に起因する配管内での骨材のブロッキングによる影響もあることが分かった。

本試験結果をもとに、本LNG地下タンク工事では、施工性を確

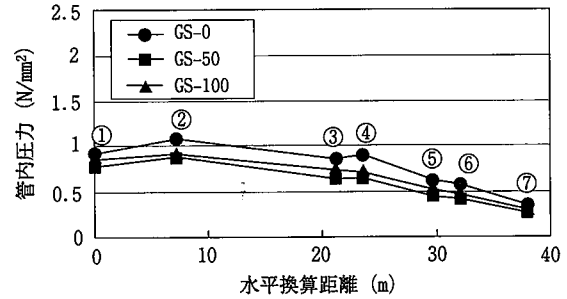


図3 管内圧力の計測結果

表3 ポンプ圧送前後でのコンクリート品質変化

記号	圧送前			圧送後		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
GS-0	10.5	5.2	31.3	10.5	5.9	29.1
GS-50	8.0	5.1	27.1	9.0	6.0	27.0
GS-100	16.0	5.0	26.4	14.5	4.6	25.0

実に維持するため、高炉スラグ粗骨材と天然粗骨材を容積比50%：50%で混合したコンクリートを用いることとした。

2.3 高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解特性

本LNG地下タンクでは、供用期間50年に5回程度の開放点検が実施されることが想定されたため、コンクリート温度が極低温（-70℃）から常温（+16℃）になるサイクルが5回あるものとして凍結融解試験を行うこととした。配合条件を表4に示す。なお本試験では、セメントとしてフライアッシュ混入三成分系セメントを用いた。凍結融解試験は次の手順で行った。

- 1) 材齢28日まで水中養生した供試体（10cm×10cm×40cm）を鋼製容器に入れ、これを常温（16℃）の変性アルコール溶液槽に浸漬する。
- 2) 溶液槽内の変性アルコールの温度が-70℃になるまで液体窒素を注入し、供試体温度が-70℃に達した時点から一定時間その状態を保持する。
- 3) 所定の時間経過後、鋼製容器を気中に取り出し、供試体温度が常温（16℃）になるまで放置する。
- 4) 以上を1サイクルとして5回繰り返し、1、3、5回目については動弾性係数を測定する。

試験結果を図4に示す。これより、温度差約90℃の凍結融解作用を受けたことにより、動弾性係数が75%程度まで低下しているが、高炉スラグ粗骨材を50%混合したMBF-50と天然粗骨材のみを用いたMBF-0では、ほとんど差がないことが分かる。従って、極低温下から常温への凍結融解作用に対しては、少なくとも粗骨材容積の50%までの範囲であれば、高炉スラグ粗骨材混合の影響はないことが分かった。

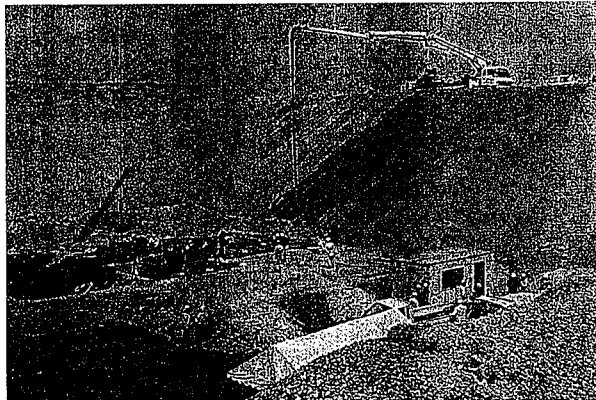


写真2 ポンプ圧送試験状況

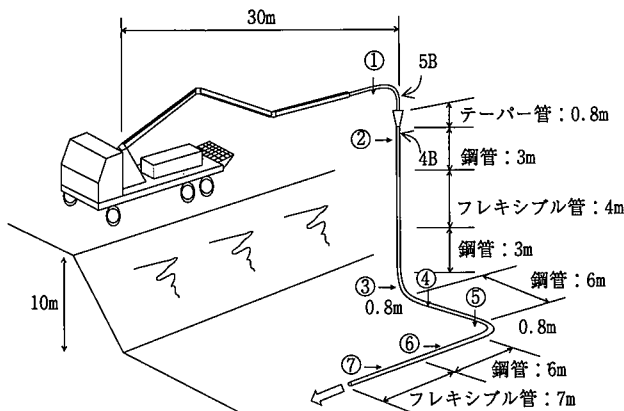


図2 ポンプ圧送試験概要

表4 凍結融解試験の配合条件

配合No.	f'ck(91) (N/mm ²)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	
									天然	スラグ
MBF-50	24	15	55.0	48.0	4.5	158	285	868	491	467
MBF-0		±2.5		45.0	±1.5	149	270	828	1060	—
										0.712
										0.738

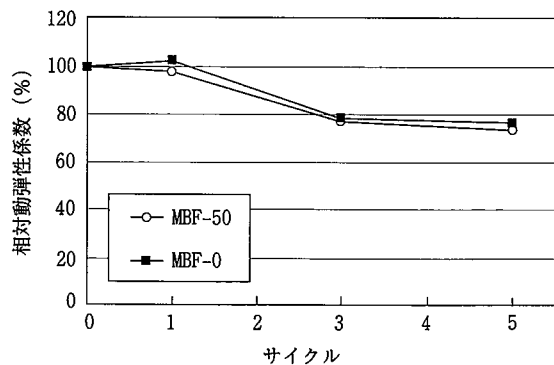


図4 極低温の凍結融解試験結果

2.4 まとめ

これらの取り組みにより、コンクリートへの高炉スラグ粗骨材の混合割合が粗骨材容積の50%以下の範囲であれば、ポンプ圧送性や極低温条件での凍結融解特性は、天然粗骨材100%使用のコンクリートと同等であることが分かった。

3. 細骨材利用技術

3.1 高炉スラグのコンクリート細骨材としての利用上の課題

高炉スラグ細骨材は、溶鉱炉で出銑後、比重分離された熔融高炉スラグを操業床にて水砕化する炉前法にて殆どが生産されるが、一部の工場では熔融スラグを一旦鍋車に受け、専用プラントまで輸送したのち水砕化する炉外法でも製造されている。このようにして製造される高炉スラグ細骨材は、潜在水硬性や針状粒を有しており、利用する上では次の2点の課題解決が必要である。

1) 保管時の固結遅延技術の開発

高炉スラグ細骨材は潜在水硬性を有するため、保管条件によっては固結する場合がある。高炉スラグ細骨材に対するユーザーからのクレームのほとんどが、この固結に関するものであり、出荷後使用までの間、これを防止できる安価な方策を見出す必要がある。

2) コンクリート利用技術の構築

高炉スラグ細骨材は表面がガラス質で形状が悪く、コンクリートに用いた場合、単位水量やブリーディングが増大するといわれており⁹⁾、コンクリート品質への悪影響が懸念される。そのため、高炉スラグ細骨材の特徴を生かせる利用法や技術データの蓄積を図り、天然材と遜色のない利用技術を構築する必要がある。

次節より、これらの課題に対する取り組みを紹介する。

3.2 固結遅延技術

3.2.1 固結現象の把握

高炉スラグ細骨材の固結現象把握のため、表面水率の異なる試料を直径10cm、高さ20cmの円柱容器に充填し、雰囲気温度を変化させて固結の経時変化を調べた。なお固結の評価は、コンクリート凝結試験に用いるプロクター貫入抵抗試験機を用いて行った。一例として、表面水率4%の結果を図5に示す。これより、雰囲気温度が高くなるほど貫入抵抗が上昇し始めるまでの時間が短く、固結が早くなることが分かる。貫入抵抗値が1.5N/mm²を超えるあたりから試料中に固結した部分が確認された。同様に表面水率を変化させた場合や持続荷重を作用させた場合についても実施したが、これらの影響はそれほど顕著でなく、雰囲気温度が最も固結に影響することが分かった。このことは、実フィールドでの固結現象が、夏場に生じやすいという経験的事実を裏付けている。

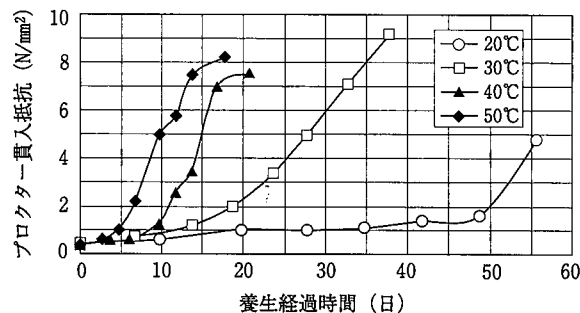


図5 養生温度の水砕固結への影響 (表面水率4%)

3.2.2 固結遅延技術の開発

高炉スラグ細骨材の固結遅延には、温度を低くすることが効果的と類推されるが、製品が山積みで貯蔵されることや出荷後ユーザーに温度管理を求めることは困難であることなどから現実的でない。そこで、固結を遅延できる薬剤の散布を対策とすることとした。

スラグの水和生成物は、硫酸塩を含んだ場合にエトリンガイト、含まない場合に低C/S比のC-S-H、C₂ASH₈、C₄AH_xおよびハイドロタルサイトが生成する⁷⁻⁹⁾。高炉スラグ細骨材の固結が、これら水和物によるものと考えれば、同様な水和反応にて硬化するセメントの凝結遅延剤が、固結遅延に効果があるものと推察される。そこで、セメントの凝結遅延剤の中から、コストや環境面への影響を考慮して薬剤を選定し、その効果を評価した。結果を表5に示す。これより、多糖類であるD-2や無機物であるE-1を除き、いずれも固結遅延効果があることが分かった。特に、Naを含んだモノオキシカルボン酸系であるA-1は、0.015%の少量添加で効果があり、コスト的にも安価で最適であることが分かった。

そこでA-1を用い、実フィールドでの効果を確認した。結果は図6

表5 固結遅延剤の評価試験結果

記号	分類	添加量 (%)	プロクター貫入抵抗 (N/mm ²)				
			0日	7日	14日	28日	40日
N	無添加	—	0.2	0.6	3.0	9.0	13.0
A-1	モノオキシカルボン酸系	0.015	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4
		0.030	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
A-2	同上	0.030	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
B-1	トリオキシカルボン酸系	0.015	0.2	0.2	0.4	0.4	0.5
		0.030	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5
C-1	ジオキシカルボン酸系	0.015	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5
D-1	単糖類	0.030	0.2	0.2	0.2	0.4	0.8
D-2	多糖類	0.030	0.2	0.2	0.5	1.0	4.0
E-1	無機物	0.015	0.2	0.3	0.8	1.4	5.4

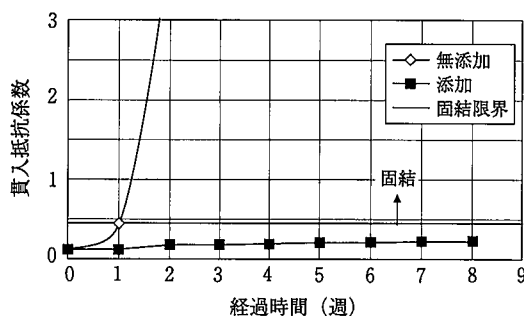


図6 実フィールドでの固結遅延材の効果

に示すように、無添加の場合が1週間より固結が始まるのに対し、添加した場合は8週後においても固結しておらず、良好な効果が確認された。なお、固結遅延剤を散布した高炉スラグ細骨材を用いてもコンクリートの品質上問題ないこと、固結遅延剤以外にも、山砂などの天然砂と一定割合以上で混合することで、固結が防止できることが確認されている^{10, 11)}。

3.3 コンクリート利用技術

3.3.1 水砕の天然砂への混合率の影響

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎物性把握のため、種々の天然砂と高炉スラグ細骨材を混合し、水セメント比55%、目標スランブ12cmの条件で試験を行った。図7にスラグ混合率とスランブの関係を示す。これよりスラグ混合率とスランブに明瞭な関係はなく、スラグ混合率が增大するほどスランブが低下する場合や、50%程度までならスランブが増大する場合など、組み合わせる天然砂によって、相性の良し悪しがあることが分かる。

そこでこれを一定の指標で評価するため、細骨材の実積率とスランブの関係を調べた。結果を図8に示す。これより細骨材の実積率とスランブには、正比例の関係があることが分かり、高炉スラグ細骨材の混合により、天然砂単味に対し実積率を大きくできる場合は、高炉スラグ細骨材の使用が正の効果を与えることが分かった。

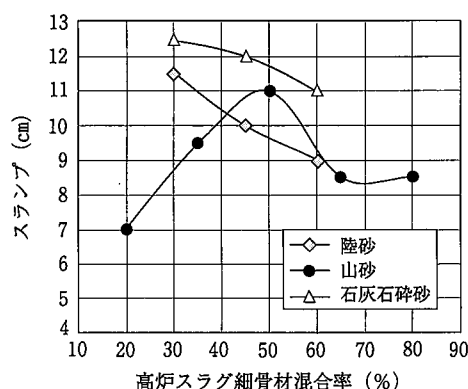


図7 高炉スラグ細骨材混合率とスランブ

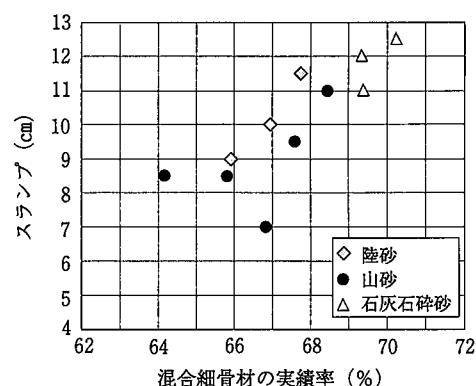


図8 細骨材の実積率とスランブ

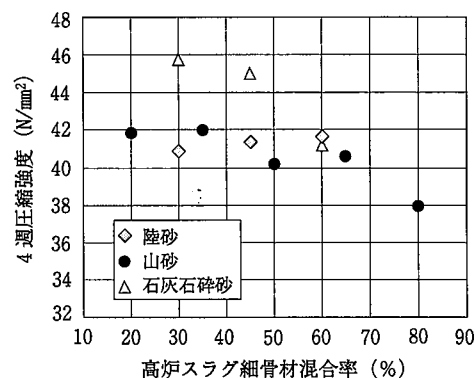


図9 高炉スラグ細骨材混合率と圧縮強度

一方、スラグ混合率と圧縮強度の関係を図9に示すが、これによれば、スラグ混合率と圧縮強度には一定の関係はみられず、組み合わせる天然砂によって最適な混合率が存在することが分かった。

3.3.2 天然砂の粒度改善を目的とした利用法の検討

細目天然砂の粒度改善を目的に、高炉スラグ細骨材を30%混合したケースを検討した。細骨材の品質を表6に、コンクリート配合を表7に示す。高炉スラグ細骨材の混合により粒度が改善されたことにより、天然砂単味に対して実積率が1.8%増大し、単位水量が7kg/m³減少している。フレッシュコンクリートの物性を表8に示すが、高炉スラグ細骨材を混合した場合と天然砂単味とは同等であり、一般に言われるブリーディング増大もない。また表9に硬化コンクリートの物性を示すが、両者の間には、耐久性に関する指標である乾燥収縮や凍結融解抵抗性の有意な差は認められない。以上から、本例においては、高炉スラグ細骨材の混合により、天然砂単味と同等以上のコンクリート性能が得られることが確認された。

表6 各細骨材の品質

	天然砂 (細目)	スラグ (粗目)	天然砂70% スラグ30%
絶乾密度(kg/l)	2.51	2.66	2.56
表乾密度(kg/l)	2.58	2.72	2.62
吸水率(%)	2.90	2.41	2.75
単位容積質量(kg/l)	1.61	1.60	1.69
実積率(%)	64.0	60.3	65.8
粗粒率	2.09	3.25	2.44

表8 フレッシュコンクリートの物性

天然砂 (%)	スラグ (%)	測定 項目	練混ぜからの経過時間(min)				ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
			0	30	60	90	
100	0	スランブ	17.8	13.3	10.5	7.1	0.30
		空気量	5.8	4.5	4.3	3.9	
70	30	スランブ	17.9	12.3	10.0	8.5	0.26
		空気量	5.6	4.3	3.9	3.7	

表7 細目天然砂の粒度補完材として高炉スラグ細骨材を用いた場合のコンクリート配合

目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	細骨材の種類		スラグ 混合率 (%)	配合条件		コンクリート1m ³ 当たりの配合量(kg/m ³)			
		天然砂	スラグ		水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	水	セメント	細骨材	
									天然砂	スラグ
18	4.5	細目	粗目	0	55.0	47.0	185	336	805	0
				30	55.0	47.0	178	324	573	259

表9 硬化コンクリートの物性

天然砂 (%)	スラグ (%)	圧縮強度 (N/mm ²)			引張強度 (N/mm ²)	乾燥収縮 ($\times 10^{-4}$)	凍結融解 (%)
		7日	28日	91日	28日	365日	300サイクル
100	0	27.5	35.9	43.9	2.91	-8.52	91.2
70	30	27.4	37.4	44.7	3.17	-7.95	90.4

3.4 まとめ

- 1) 保管時の高炉スラグ細骨材の固結に与える要因として、雰囲気温度が最も影響することを明らかにし、また固結の抑制策として、固結遅延材の散布による効果的かつ安価な対策を開発した。
- 2) 高炉スラグ細骨材を天然砂に混合する場合の品質影響因子を見出し、実用範囲での天然砂への限界混合率を求めた。さらに、細目天然砂の粒度改善として高炉スラグ細骨材を混合することを検討し、天然砂単味と同等以上の性能が確保できることを確認した。

4. おわりに

以上、コンクリート用高炉スラグ骨材の利用拡大に向けた最近の取り組みを紹介した。

循環型社会への移行が唱えられる現在、リサイクル材料の有効活用が従来にも増して求められるようになってきている。高炉スラグ骨材は、JIS化以降20年以上経過し、有用なリサイクル材料であるにも関わらず、いまだ市場での認知度は低く、汎用化されるには至っていない。これからの社会的要請に応えるためにも高炉スラグ骨材の用途開発や需要開拓、さらには製造プロセスの革新を継続的に実施する必要がある。

謝 辞

本論で紹介した高炉スラグ粗骨材の適用では、東京電力富津火力建設所、鹿島・清水JV、奥村・ハザマJV及び近隣生コンクリートプラントの方々に、また高炉スラグ細骨材の技術開発では、太平洋セメントの方々に多大な御尽力をいただきました。関係各位に紙面を借りて厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会:鉄鋼スラグ統計年報(平成12年度実績). 2001
- 2) 福田, 上原ほか:高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの火力発電所土木設備への適用について(その1). 第55回土木学会年次学術講演会第VI部門, 2000.9
- 3) 土山, 坂田ほか:高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの火力発電所土木設備への適用について(その2). 第55回土木学会年次学術講演会第VI部門, 2000.9
- 4) 赤司, 横坂ほか:高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの火力発電所土木設備への適用について(その3). 第55回土木学会年次学術講演会第VI部門, 2000.9
- 5) 長谷川ほか:教室III耐久性(その5)―凍害―. コンクリート工学, 25 (5), (1987)
- 6) 土木学会:高炉スラグ骨材コンクリート施工指針. 1993
- 7) 広島ほか:セメント技術年報. (73), 89(1983)
- 8) LOU Zonghan et al.:Proc. 8th Int. Congr. Chem. Cement. Rio de Janeiro, Vol.IV, 1986, p.30
- 9) 内川 浩:セメント・コンクリート. (484), 81(1987)
- 10) 金谷宗輝ほか:高炉スラグ細骨材の固結とその抑制技術. 無機マテリアル学会誌. 301(2000)
- 11) 松井 淳ほか:固結抑制高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎物性. 日本建築学会2000年度大会, A-1材料施工, 2000, p.475