

高炉スラグ微粉末 3000 を混和したコンクリートの耐火性

東京工業大学 正会員 ○岩波 光保

(株) デイ・シイ 正会員 大澤友宏, 非会員 藤原 了

1. はじめに

近年、大深度地下の有効活用の高まりを受けて、シールド工法による大規模なトンネル工事の施工計画が増えてきている。このようなトンネルでは、想定する火災に対して機能を損なわないように、トンネル躯体に所定の耐火性が求められる。建設コスト削減のために二次覆工を省略した場合、セグメントが直接火災の影響を受けるため、セグメント表面に耐火被覆を施すか、セグメントを有機繊維混入コンクリートで製造する必要がある。一方、2013年に高炉スラグ微粉末(BFS) 3000がJIS化され、環境負荷軽減効果などのメリットを活かして、今後広範な利用が期待されている。セグメントの耐火性の観点からは、BFS3000を用いた場合、ブレン値が小さいため、従来より用いられているBFS4000とは異なる硬化体の微細構造を形成することが予測される。そこで、本稿では、BFS3000を混和した有機繊維混入コンクリートの耐火性を調べた。ここで、耐火性とは、高温環境に曝された際に生じる爆裂現象に対する抵抗性のことを指す。

2. 実験概要

(1) 試験体概要

耐火性の評価に用いた試験体は、 $100 \times 100 \times 400$ (mm) のコンクリート角柱である。試験体のパラメタとしては、BFSの種類(3000, 4000)、BFSの置換率(0%, 25%, 50%)、有機繊維混入率(外割りの体積比で0%, 0.1%, 0.2%)である。コンクリートの配合を表-1に示す。配合のケースは、BFSの有無と種類(N: 無混和, L: 3000, A: 4000)一置換率一繊維混入率で表記している。セメントには、普通ポルトランドセメント、細骨材には硬質砂岩砕砂、粗骨材には硬質砂岩碎石、有機繊維にはポリプロピレン(PP) 繊維(直径 $65\mu\text{m}$ 、長さ12mm)、混和剤には高性能減水剤と空気量調整剤を用いた。配合条件は、セグメント用コンクリートを想定して、W/Cを35(%), スランプを 3.0 ± 1.5 (cm), 空気量を 2.0 ± 1.5 (%)とした。試験体数量は各ケース2体とした。

(2) 耐火実験

試験体製作後、28日間標準養生を行った後に、耐火実験に供した。耐火実験は、RABT60曲線¹⁾に準拠して行った。耐火実験実施中には、試験体の1面のみが所定の高温に曝されるように試験体を炉内に配置した。表-1に、標準養生終了後のコンクリートの圧縮強度と耐火実験実施時点のコンクリートの含水率を示す。

(3) 耐火性評価のための測定

耐火実験終了後、コンクリートの耐火性を評価するため、試験体の質量減少率、火害深さ、中性化深さの測定を行った。試験体の質量減少率は、火害によるコンクリートの損傷程度を平均的に把握するために、耐火実験前後で質量を測定することで算出した。火害深さは、火害によるコンクリートの局所的な損傷程度を把握するために、高温に曝された試験体表面に測定格子を設けて、耐火実験前からの欠損深さを測定した。測定点数は15点とした。中性化深さは、コンクリート内部への火害の進行状況を把握するために、火害深さの測定後に試験体を割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧することで測定を行った。

3. 実験結果と考察

BFS3000を用いることで、次の点から、コンクリートの耐火性が優れることが期待された。すなわち、BFSを用いることで、水酸化カルシウムの生成が抑えられ、高温下における安定性が高まる。また、セメント硬化体の組織構造が相対的に疎となるため、必要以上に強度が出過ぎることがなく、爆裂発生時の水蒸気圧や熱応力を緩和できる。

実験結果の一覧を表-2に示す。質量減少率に着目すると、有機繊維を混入していないケースでは、BFS混和

キーワード：有機繊維混入コンクリート、高炉スラグ微粉末 3000、耐火性、耐爆裂性

連絡先：〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 TEL：03-5734-3194

表-1 コンクリートの配合, 圧縮強度および含水率

ケース	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (B×%)		繊維量	圧縮強度	含水率
	W	C	BFS	S	G	SP	AE	Vol%	N/mm ²	%
N-0.0	137	391	0	839	1060	1.20	0.02	0.0	92.0	4.4
N-0.1	137	391	0	839	1060	1.25	0.02	0.1	92.1	4.6
N-0.2	137	391	0	839	1060	1.45	0.02	0.2	89.4	5.0
L-25-0.0	137	294	98	832	1060	1.00	0.02	0.0	85.0	5.0
L-25-0.1	137	294	98	832	1060	1.05	0.02	0.1	84.2	5.3
L-25-0.2	137	294	98	822	1060	1.25	0.02	0.2	78.9	4.5
L-50-0.0	137	137	196	824	1060	0.90	0.02	0.0	77.8	4.7
L-50-0.1	137	137	196	824	1060	0.95	0.02	0.1	75.8	5.3
L-50-0.2	137	137	196	824	1060	1.15	0.02	0.2	67.6	4.7
A-25-0.0	137	294	98	832	1060	0.95	0.02	0.0	87.6	5.0
A-25-0.1	137	294	98	832	1060	1.00	0.02	0.1	89.1	4.2
A-25-0.2	137	294	98	832	1060	1.25	0.02	0.2	87.1	4.4
A-50-0.0	137	137	196	824	1060	0.85	0.02	0.0	81.5	5.0
A-50-0.1	137	137	196	824	1060	0.90	0.02	0.1	84.5	4.4
A-50-0.2	137	137	196	824	1060	1.15	0.02	0.2	83.0	4.6

によって耐火性は向上するが, 置換率25%までで効果は頭打ちとなった. これは, 置換率がこれ以上に大きい場合にはコンクリート強度が低くなるためと考えられる. BFS種類で比較すると, BFS3000の方が, わずかではあるが耐火性向上効果は大きかった.

次に, 火害深さに着目する. ここで, 平均火害深さは, 測定データの全平均値であり, 最大火害深さは, 測定データがワイブル分布に適合するものと仮定して, 非超過確率95%で推定した最大火害深さのことである. 有機繊維を混入していない場合, BFSの混和によって局所的な火害の進行が抑えられた可能性が高い. 強度レベルはほぼ同じであることから, BFSを混和したコンクリートの耐火性が優れていることが示唆される. 置換率の影響については, ケースごとに傾向がまちまちであり, 一定の傾向は認められなかった. スラグ種類についても, 明確な差異は認められなかった.

中性化深さについては, BFS無混和のケースとBFS混和のケースでは, 水酸化カルシウムの生成状況が異なるため, 測定結果に大きな差異を生じた. ここでは, BFS種類の影響を見ることを目的に, LシリーズとAシリーズの比較に主眼を置き, それぞれ, 繊維混入率0.1%と0.2%の測定結果の平均値を比較した. その結果, BFS3000 (L-25: 39.1mm, L-50: 42.4mm)の方が, BFS4000 (A-25: 45.7mm, A-50: 45.9mm)より平均中性化深さが小さく, 耐火性に優れる結果となった. これは, セメント硬化体の組織構造が疎となるため, 爆裂発生時の水蒸気圧や熱応力を緩和できると考えた当初の想定を裏付けるものである.

4. まとめ

有機繊維混入コンクリートにBFS3000を混和した場合, 若干ではあるが, BFS4000よりも耐火性に優れる結果が得られた. したがって, セグメントを製作する場合, BFS種類をBFS4000からBFS3000に変更することは可能である. 有機繊維を混入しないコンクリートでは, BFS3000の高い耐火性がさらに期待できることから, 耐火被覆を設置する場合のセグメントや二次覆工への適用は検討に値する. さらに, 中小規模の火災を対象とした耐火性については, これまであまり検討されていないが, この場合にもBFS3000の優位性が期待できる.

参考文献

1) 土木学会: トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針 (案), コンクリートライブラリー, 2014

表-2 実験結果

ケース	質量減少率 (%)	火害深さ (mm)		中性化深さ (mm)
		平均	最大	
N-0.0	7.99	6.9	13.3	38.5
N-0.1	6.31	1.0	2.7	34.5
N-0.2	6.36	0.8	2.4	19.7
L-25-0.0	7.41	4.7	10.1	54.6
L-25-0.1	6.41	0.6	4.3	39.1
L-25-0.2	6.72	1.3	2.6	39.1
L-50-0.0	8.52	4.9	10.7	45.4
L-50-0.1	6.52	1.0	2.2	38.4
L-50-0.2	6.89	0.2	0.8	46.4
A-25-0.0	7.93	5.7	9.7	38.3
A-25-0.1	6.40	0.9	1.7	37.9
A-25-0.2	6.85	0.9	3.1	53.4
A-50-0.0	8.17	3.4	6.7	48.6
A-50-0.1	6.70	1.4	3.3	44.3
A-50-0.2	7.05	2.0	3.6	47.4