

高炉スラグ微粉末を用いたプレテンションPC桁の性能確認

(株) 安部工業所 開発部 正会員 ○村井 篤
 (株) 安部工業所 九州支店 正会員 江崎 守
 新日鐵高炉セメント(株) 前田 悦孝
 九州大学 大学院 教授 正会員 松下 博通

1. はじめに

熊本県熊本市と高森町を結ぶ道路に建設された俵山4号橋(橋長15.0m、プレテンション方式単純中空床版橋)において、凍結防止剤の道路上散布による劣化防止を目的として主桁の混和材料に初期強度の発現性に優れた比表面積 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を使用した。

高炉スラグ微粉末の使用による耐久性向上効果は、日本材料学会¹⁾等の行った室内試験レベルで確認されている。しかし、高炉スラグ微粉末を使用した本橋梁の性能を定量的に把握するために、実規模の桁による破壊性状および現場位置での耐久性向上効果を確認する必要があるものとする。

そこで、本研究では本橋梁の性能を定量的に把握するため高炉スラグ微粉末を混和した場合と従来の早強セメントのみを使用した場合(以下、スラグ混和、早強単味と略す)のそれぞれについて実際に使用された桁と同一サイズのPC桁による静的曲げ破壊試験を実施した。また、現地環境下で暴露した供試体を用いて耐久性試験を行い追跡調査を実施している。以下に試験結果を報告する。

2. プレテンションPC桁の静的曲げ破壊試験

2.1 試験概要

2.1.1 供試体形状及び使用材料

早強単味とスラグ混和の供試体を各1体ずつ製作した。供試体概要を以下に示す。

構造形式：プレテンション方式中空PC床版橋 (BS-15)

桁 長：14.910m

設計荷重：B活荷重

使用材料：早強ポルトランドセメント (密度 $3.14\text{g}/\text{cm}^3$)

高炉スラグ微粉末 (密度 $2.91\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $6000\text{cm}^2/\text{g}$)

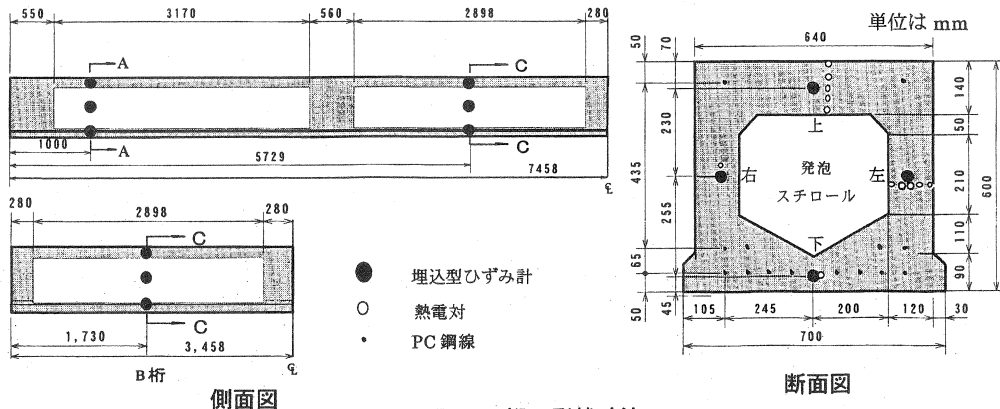


図-1 桁の形状寸法

2.1.2 配合

表-1に早強単味とスラグ混和のコンクリートの配合を示す。

水結合材比が異なるのは、PC桁のプレストレス導入時に必要なコンクリートの圧縮強度 35N/mm^2 を満たすようスラグ混和の配合を決定したためである。

表-1 コンクリートの配合

配合	スラグ 置換率 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単体量(kg/m^3)						目標 空気量 (%)	目標 スランプ (cm)
				水	セメント	高炉 スラグ	細骨材	粗骨材	混和剤		
早強単味	0	40	43	160	400	-	768	1173	3.20	2 ± 1	10 ± 2.5
スラグ混和	50	35	43	160	229	223	732	1143	2.29	2 ± 1	10 ± 2.5

2.1.3 載荷試験装置

載荷試験装置を図-2に示す。図のように支点間距離 $14,316\text{mm}$ の等曲げモーメントスパン $1,500\text{mm}$ の2点載荷で行った。

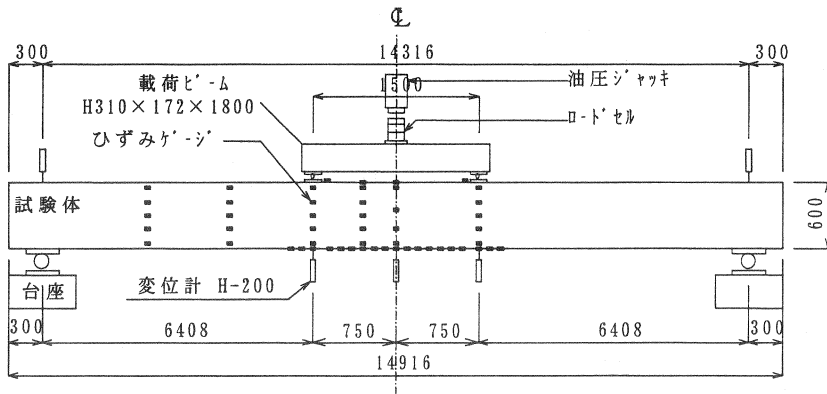


図-2 載荷装置

2.2 試験結果

2.2.1 コンクリートの圧縮強度・静弾性係数

蒸気養生後、屋外暴露した円柱供試体によって測定したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数を表-2、図-3に示す。表-2、図-3より早強単味、スラグ混和の両者ともプレストレス導入時に必要な圧縮強度 35N/mm^2 を満たしていることが分かる。また、載荷試験時にはスラグ混和の圧縮強度が約 6N/mm^2 大きくなった。

表-2 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数

配合	材齢	圧縮強度 N/mm^2	静弾性係数 $\times 10^4 \text{N/mm}^2$
早強単味	導入時	35.7	2.70
	3	42.2	2.84
	7	46.9	3.08
	14	48.6	2.95
	28	55.6	3.12
	載荷時(394日)	59.9	3.41
スラグ混和	導入時	41.5	2.65
	3	49.1	2.83
	7	53.7	3.02
	14	56.3	3.10
	28	64.1	3.19
	載荷時(395日)	65.7	3.49

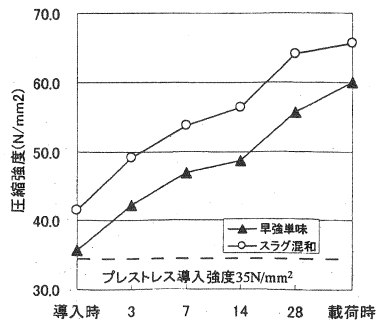


図-3 コンクリートの圧縮強度

2.2.2 ひび割れ発生荷重・破壊荷重及び破壊形態

表-3に各荷重と中央点変位、写真-1.2に早強、スラグ混和の破壊状況写真、図-4,5に破壊までの桁上縁の圧縮ひずみを示す。

各供試体の破壊形態は、いずれの供試体も曲げひび割れ進展に伴う桁上面コンクリートの圧壊であった。

最終的な破壊荷重はスラグを混和した桁の方がやや大きくなった。また、図-4,5より桁上縁の圧縮ひずみの最大値は早強単味が約3000 μ であった

のに対して、スラグ混和はやや小さく約2500 μ であった。土木学会のコンクリート標準示方書²⁾などではコンクリートの終局ひずみを設計基準強度50~60N/mm²で3500~2500 μ 、60N/mm²以上で2500 μ と規定している。これは、コンクリートが高強度になるほど破壊がぜい性的になるためである。スラグ混和の方が破壊荷重が大きくなったのに対して終局ひずみが小さかったのもコンクリート圧縮強度がスラグ混和の方が大きかったためだと考えられる。

表-3 各荷重と中央点変位

		荷重[kN]	中央点変位[mm]
早強 単味	ひび割れ時	186	29.0
	再ひび割れ時	108	17.2
	終局時	258	45.0
	破壊時	432	205.0
スラグ 混和	ひび割れ時	211	31.2
	再ひび割れ時	137	20.8
	終局時	258	40.0
	破壊時	441	190.0



写真-1 早強単味の桁の破壊状況

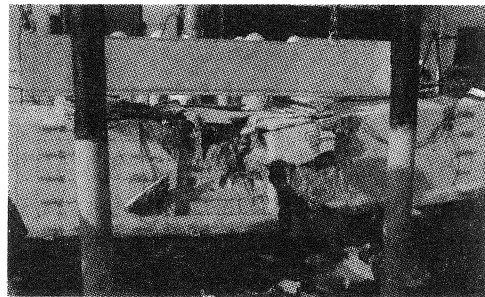


写真-2 スラグを混和した桁の破壊状況

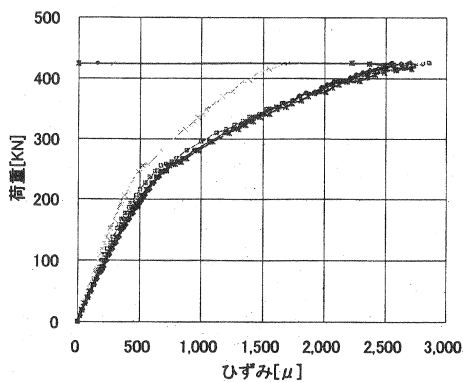


図-4 早強単味桁上縁圧縮ひずみ

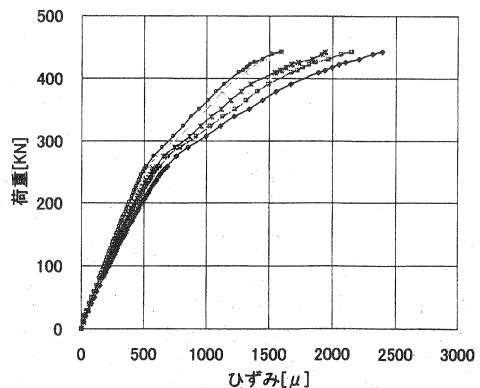


図-5 スラグ混和桁上縁圧縮ひずみ

2.2.3 荷重-中央点たわみ曲線およびモーメント曲率曲線

計測より得られた荷重-中央点たわみ曲線を図-6に、等曲げモーメントスパン内で求めたモーメント-曲率曲線を図-7に示す。

ここで、スラグを混和した桁は破壊寸前の挙動を詳細に把握するため、破壊寸前まで荷重の載荷と除荷を繰り返した。早強単味に比べスラグを混和した桁の方が残留変位が大きくなっているのはスラグを混和した桁のみ破壊寸前まで荷重の載荷と除荷を繰り返したためである。

両者の荷重-たわみ曲線を比較すると、どちらの履歴曲線も小さく残留たわみも小さい。これはプレストレストコンクリート構造物特有の現象であり、早強単味、スラグを混和した桁共に除荷後の残留変位が小さいことが確認できる。

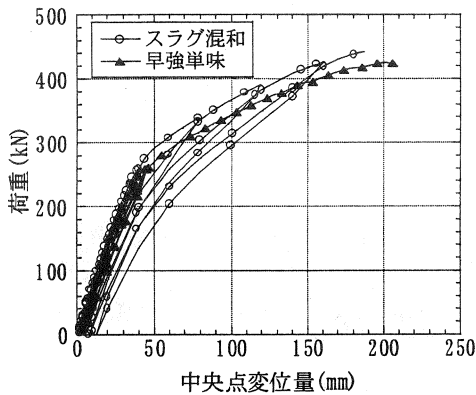


図-6 荷重-中央点たわみ曲線

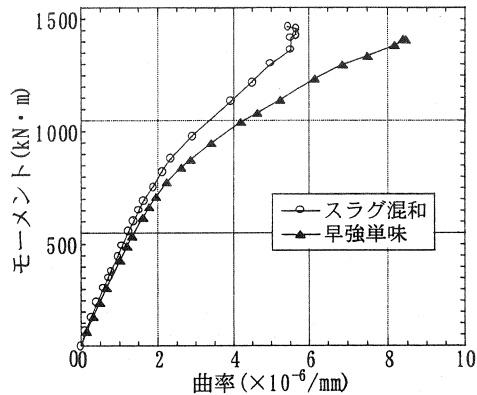


図-7 モーメント曲率曲線

2.2.4 JIS規格値との比較

表-4にJIS A 5373との比較を示す。

表-4よりいずれの供試体もひび割れ曲げモーメントがJIS A 5373に規定されている規格値を上回っており、スラグを混和した場合に於いてもJIS規格を満足することが確認できた。

表-4 JIS規格値との比較 (kN·m)

	早強単味	スラグ混和	JIS A 5373
ひび割れ試験曲げモーメント	777.7	856.3	677
破壊抵抗曲げモーメント	1538.3	1594.9	1440 <small>※参考値</small>

3. 実環境下で暴露した供試体の耐久性試験 (追跡調査)

3.1 試験概要

実環境下で暴露した供試体の耐久性を把握するため、現地暴露の供試体を用いて外観調査、圧縮強度試験、塩分浸透試験および中性化試験の4種類の試験を行うこととしている。詳細を以下に示す。

3.1.1 使用供試体形状

- ・圧縮強度試験

早強単味とスラグ混和の円柱供試体 (φ100×200) をそれぞれ12本、合計24本を現場にて暴露する。

- ・塩分浸透試験、中性化試験

早強単味とスラグ混和の角柱供試体 (100×100×400) をそれぞれ2本、合計8本を現場にて暴露する。

3.1.2 設置位置

- ・ 圧縮強度試験と塩分浸透試験の供試体については橋台配水管直下に設置する。(写真-3)
- ・ 中性化試験の供試体については橋梁付近の護岸天端に設置する。(写真-4)

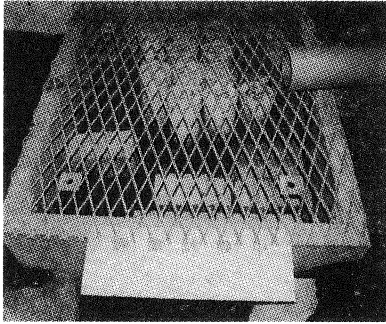


写真-3 圧縮強度試験と塩分浸透試験用
暴露供試体

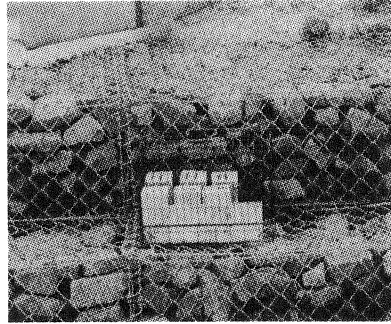


写真-4 中性化試験用供試体

3.1.3 設置期間

設置後1年、5年、10年、20年ごとに試験を行う。
今回は設置後1年の結果について報告する。

3.2 試験結果

3.2.1 外観調査

早強単味、スラグ混和の供試体とも外観上の劣化は認められなかった。

3.2.2 圧縮強度試験

暴露1年後の圧縮強度試験の結果を表-5に示す。

早強単味、スラグ混和の供試体ともに圧縮強度は若干上昇しており、コンクリートの劣化に伴う圧縮強度の低下は認められなかった。

表-5 暴露1年後の圧縮強度 (N/mm²)

	18時間 (脱型時)	脱型後屋外に暴露		現地暴露後 1年
		14日	28日	
早強単味	39.5	55.3	61.6	65.2
スラグ混和	40.9	58.5	71.8	74.8

3.2.3 中性化

早強単味、スラグ混和の供試体共に中性化は認められなかった。

3.2.4 塩分浸透性

塩分浸透性を電子線マイクロアナライザ (EPMA) により測定した結果、暴露後1年では早強単味、スラグ混和の供試体ともに塩化物イオンの侵入は認められなかった。

4. まとめ

以上の結果より以下の知見が得られた。

- 1) 破壊形態は早強単味及びスラグを混和した桁共に曲げ圧縮破壊であった。
- 2) スラグを混和した桁の方が圧縮強度が大きかったため、破壊荷重はスラグ混和の方がやや大きくなった。
- 3) 早強単味、スラグを混和した桁共にJIS A 5373のひび割れ試験曲げモーメントを上回っており、高炉スラグ微粉末を混和してもJIS規格を満足することが確認できた。
- 4) 静的曲げ試験時における桁の挙動に高炉スラグ微粉末を混和した影響はあまりなかった。

5) 実環境下で1年暴露した供試体の耐久性を調査した結果、早強単味、スラグ混和共に劣化は認められなかった。本暴露試験は今後も継続して調査を行う予定である。

5. おわりに

これまでの研究により、高炉スラグ微粉末を用いたプレストレストコンクリートは、実構造物として十分適用可能であることが確認された。

高炉スラグ微粉末は、副産される水砕スラグを乾燥・粉砕して製造するため、省資源、省エネルギーに大きく役立つことができる。また、構造物の耐久性が向上することによりライフサイクルコストの削減も期待できるため今後ますますその使用範囲が広がるものと考えられる。

参考文献

- 1) 高耐久性PC構造物開発検討委員会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発、日本材料学会、1998.3
- 2) 土木学会 コンクリート標準示方書 設計編、平成8年
- 3) 鶴田浩章、松下博通、吉富泰一、前田悦孝：PC桁に適用した高炉スラグ微粉末混和コンクリートの有効プレストレス量の検証、日本コンクリート工学年次論文集、pp、547-552、Vol.23、No3、2001
- 4) 鶴田浩章、松下博通、吉富泰一、前田悦孝：PC桁に適用した高炉スラグ微粉末混和コンクリートの収縮・クリープ性状、日本コンクリート工学年次論文集、pp、793-798、Vol.22、No3、2000
- 5) 坂本賢治、松下博通、陶佳宏、江崎守：高耐久性PC桁の収縮・クリープ性状、第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 pp.103-108、2000. 10
- 6) 後藤剣也、江崎守、吉富泰一、松下博通：高炉スラグ微粉末を用いたPC橋の設計・施工、第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 pp.739-742、2000、10