## 論文 多量に高炉スラグ微粉末を用いた長寿命コンクリートの CPC 梁の 曲げ性状

横沢 和夫\*1·石田 孝太郎\*2·辻 幸和\*3

要旨:高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメントのC種を超えた 75%と多量に使用したコンクリートによる, 耐塩害性と耐硫酸性に優れた長寿命コンクリート(以後 LL コンクリートと称する)にケミカルプレストレス を導入した CPC 製品の製造が可能になることを報告した。すなわち本研究は, LL コンクリートを用いた CPC 梁および製品用の普通コンクリートを用いた RC 梁を作製して曲げ載荷実験を実施した結果を報告する。そし て, LL コンクリートと膨張材を併用した CPC 梁の曲げ性状は普通コンクリートに膨張材を用いた CPC 梁と ほぼ同等であり,耐塩害性に優れたコンクリート製品を製造できることを明らかにした。 キーワード:曲げ性状, CPC 梁,長寿命コンクリート,高炉スラグ微粉末,コンクリート製品

## 1. はじめに

インフラ施設の長寿命化を図ることは、「環境保全と 経済活動や豊かな生活が両立する持続可能な社会」の実 現を目指している我が国にとって重要な課題である。イ ンフラ施設の主要部分を占めるコンクリート構造物につ いても、各方面でコンクリートの長寿命化に関する研究 開発が進められている。長寿命化に対する明確な定義は ないが、100 年を超えてその性能を維持できる材料と考 えている。なかでも、セメントの代替としての高炉スラ グ微粉末は、CO<sub>2</sub>の削減<sup>1)</sup>と高耐久性を両立できる材料 として期待されている。しかしながら、セメントに対す る置換率が高くなると著しく強度発現が遅くなることな どから、これまで低い置換率の利用に留まってきた。

コンクリート製品への適用を対象として高炉スラグ微 粉末のセメントに対する置換率を75%まで高め、細骨材 に高炉スラグ細骨材を混合し、膨張材を用いている長寿 命コンクリート(以後は,LLコンクリートと称する)は、 耐塩害性および耐硫酸性を普通コンクリートの2倍以上 に高められることを報告した<sup>2),3)</sup>。コンクリート製品は、

一般に高強度で部材厚が薄いことから、耐塩害性を高め

るためには,曲げひび割れ発生モーメントの増大および 曲げひび割れ幅の抑制を図ることが,重要となっている。

本研究は、LL コンクリートを用いた鉄筋コンクリート 梁に膨張材を併用することでケミカルプレストレスやケ ミカルプレストレインを導入した CPC (Chemically Prestressed Concrete) 梁の曲げ性状について報告する。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体の形状寸法と作製

供試体の形状寸法は、図-1に示すように、580×220mm の矩形断面で、梁長を2900mmとした。引張鉄筋にD16 またはD13の、圧縮鉄筋にD10のそれぞれSD295を6 本ずつ使用した。配力鉄筋は上段・下段とも、D10の SD295をそれぞれ 300mm間隔で配置した。

コンクリートの配合を表-1に示す。配合1は、振動 成形および遠心成形のコンクリート製品に適用されてい るものであり,配合2は,配合1に膨張材を混入したも のである。配合3と配合4は,高炉スラグ微粉末の置換 率を75%まで高めたものである。水粉体比W/Pを34.4%, 細骨材に天然砂と高炉スラグ細骨材を混合したものを用

悪口		s/ <b>s</b>	5 c <sup>2</sup> /D		単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
	<b>W</b> / <b>D</b> <sup>1</sup> )			Air	-	セメ			細骨材			아프 프로그네	供考
名	W/P	5/a	Sg 7P	(%)	W	ント C	BFS <sup>3)</sup>	Ex4)	陸 砂	Slag <sup>5)</sup>	粗骨材	(%)	油石
配合1	40.3	39.0	0.0	2	157	390	0	0	715	0	1144	0.70	製品用ベース
配合 2	40.3	39.0	0.0	2	157	350	0	40	715	0	1144	0.70	コンクリート
配合3	34.4	39.0	75.0	2	134	97.5	292.5	0	365	376	1167	0.35	耐塩害性コン
配合4	34.4	39.0	75.0	2	134	57.5	292.5	40	365	376	1167	0.35	クリート

表-1 コンクリートの配合

1)P=C+BFS+Ex, 2)高炉スラグ微粉末置換率, 3)高炉スラグ微粉末, 4)膨張材(エトリンガイト系), 5)高炉スラグ細骨材

\*1 特定非営利活動法人 持続可能な社会基盤研究会 副理事長 工学博士(正会員)

\*2 ゼニス羽田株式会社 技術開発部 技術開発部長

\*3 特定非営利活動法人 持続可能な社会基盤研究会 理事長 工学博士(正会員)

いており、両者は膨張材の有無が異なっている。

高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 に適合する高炉スラグ 微粉末 4000 を, 膨張材には JIS A 6202 に適合するエトリ ンガイト系を粉体の内割りで 40 kg/m<sup>3</sup> 混和した。

供試体の養生は、コンクリート工場製品の製造条件を 考慮して、前置き時間を4時間以上とり、昇温が15℃/h で50℃の温度で蒸気養生を6時間行った。その後は蒸気 を切って自然放冷し、材齢1日で脱型後、常温で気中養 生を行った。なお、脱型後の気中温度が10℃程度以下と なる場合は、簡易の20℃恒温箱を使用した。

## 2.2 実験水準

梁実験の水準は、**表-2**に示すようにコンクリート製品用の普通コンクリートが膨張材使用の有無の2水準

(RC1, CPC2) および LL コンクリートが鉄筋比の違い の2水準(CPC4-16, CPC4-13) とした。また,同一の水 準で3体作製し,合計12体を実験対象とした。

## 2.3 載荷方法および測定項目

曲げ載荷方法は、図-1に示したように等曲げ区間を 有する二点集中載荷とし、曲げひび割れが発生してから 引張鉄筋が降伏し、破壊に至るまで静的漸増載荷した。

測定項目は、ワイヤ ストレインゲージ(以後は、WSG と略称する)により、コンクリートの圧縮縁ひずみ、圧 縮鉄筋のひずみ、および引張鉄筋のひずみを測定した。 また、供試体側面の引張鉄筋位置に 100mm 間隔で設置 したパイ型変位計によって,等曲げモーメント区間内の 曲げひび割れ幅を測定した。

#### 2.4 LL コンクリートの品質

梁の曲げ載荷実験の前に,配合1~配合4について膨 張収縮性状および圧縮強度を測定し,LL コンクリートの 品質を確認した。

## (1) 膨張収縮性状

図-2に、気中養生の後水中養生した供試体の一軸拘 東下における膨張収縮性状の測定結果を示す。高炉スラ グ微粉末の置換率を75%に高めても、配合2の供試体と ほぼ同じ膨張量を示している。また、気中養生を14日し た後に水中養生すると、膨張量は増加することも確認さ れた。本実験結果から、高炉スラグ微粉末の置換率を75% に高めても所定の膨張量が得られることが確認できた。

## (2) 圧縮強度,引張強度,静弾性係数

高炉スラグ微粉末を多量に使用すると、強度の増進が 懸念される。表-2には、梁と同様に養生した圧縮強度 等も示している。膨張材を併用しても、普通コンクリー トとほぼ同じ圧縮強度とともに、引張強度と静弾性係数 もほぼ同様な発現をしている。そして LL コンクリート は、水粉体比が小さいこともあって、製品用コンクリー トに比べて、圧縮強度と引張強度はともに約 20%増加し ている。



図-1 梁供試体の形状寸法と鉄筋の配置ならびにひずみと曲げひび割れ幅の測定位置

	配	鉄筋の	の種類	コンクリートの力学特性,材齢 14 日					
供試体	合	圧	引	圧縮強度	引張強度	静弹性係数			
	名	縮	張	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )			
RC1	1		D16	46.7	2.84	27.3			
CPC2	2	D10	D16	46.9	2.84	27.9			
CPC4-16	4	D10	D16	54.4	4.23	33.7			
CPC4-13	4		D13	54.5	3.60	33.0			

表-2 梁の実験水準とコンクリートの力学特性



# 3.LL コンクリートを用いた CPC 梁の曲げ性状

## 3.1 曲げひび割れ発生荷重

曲げひび割れ発生荷重とその平均値を,**表-3**に示す。 なお,曲げひび割れ発生の判定は,等曲げモーメント区 間の中央に位置する,コンクリートの圧縮縁に2枚,圧 縮鉄筋と引張鉄筋にそれぞれ6枚設置した WSG の急変 点から判断した。**表-3**より,LLコンクリートの曲げひ び割れ荷重は,膨張材の併用によるケミカルプレストレ スの導入効果により,コンクリート強度の差を考慮して も **RC**梁に比べて高いといえる。

## 3.2 コンクリートの曲げ引張ひずみ

## (1) ケミカルプレストレスの導入効果

**表**-3には、曲げひび割れ発生時の各位置(圧縮縁, 圧縮鉄筋および引張鉄筋)のひずみの実測値も整理して 示した。なお、引張縁のひずみは、圧縮縁、圧縮鉄筋お よび引張鉄筋に貼付した WSG の平均値を用いて、平面 保持の仮定に基づき外挿した算定値である。図-3は、 各位置のひずみを圧縮縁からの距離で表示した例である。 いずれの供試体も平面保持が成立していることが確認で きた。

**表-3**より, 引張縁の平均ひずみは, 普通コンクリートを用いた RC1 で(163~184)×10<sup>-6</sup>に対し, CPC2 で(178~199)×10<sup>-6</sup>, LL コンクリートを用いた CPC4-16 で(214~248)×10<sup>-6</sup>, D13 の引張鉄筋を配置した CPC4-13 では(181~213)×10<sup>-6</sup>と, 引張ひずみの終局値がそれぞれ大きくなっており, ケミカルプレストレスの導入効果が認められる。

### (2) 引張応カーひずみ曲線の解析的検討

載荷前の梁の体積変化(ケミカルプレストレイン)を仕 事量一定の概念<sup>4),5)</sup>で評価し,これを積層モデルによる 断面解析手法<sup>6)</sup>に適用して,曲げひび割れが発生する直 前の測定値を再現できるコンクリートの引張応力度とひ ずみの関係を,トライアンドエラーにより同定した<sup>7)</sup>。 なお, CPC 梁の載荷試験時の A 法一軸拘束供試体に生じ た仕事量  $U^{4)}$  は,A 法一軸拘束器具で,RC が-100×10<sup>6</sup>, CPC2 が 230×10<sup>-6</sup>, CPC4 が 500×10<sup>-6</sup> として算定した。



## c)試験体 CPC4-16

## 図-3 外挿して求めた引張縁のひずみの終局値

コンクリートの引張側の応力度とひずみの関係は、土 木学会コンクリート標準示方書の圧縮側のコンクリート の応力度とひずみの関係式と相似形をとる**式(1)**を適用 した。

供試体名		曲げひび	実測ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )								計算引張ひずみ*1	
		割れ発生	圧縮縁(	2 点)	圧縮鉄筋	(6点)	引張鉄筋	(6点)		$( imes 10^{-6})$		
		荷重 (kN)	最小/最大	平均值	最小/最大	平均值	最小/最 大	平均値	引張縁	$\mathcal{E}_{t0}$	E <sub>tu</sub>	
RC1	1	51.1	-150/-151	-151	-97/-129	-113	102/141	122	184	190	190	
	2	51.7	-133/-136	-135	-90/-118	-102	97/136	119	163	180	180	
	3	50.0	-132/-133	-133	-89/-110	-99	95/122	111	163	170	170	
	平均	50.9							174	180	180	
CPC2	1	55.1	-141/-152	-146	-98/-115	-104	107/130	120	178	170	170	
	2	58.3	-151/-162	-157	-107/-123	-114	121/144	134	197	190	190	
	3	57.9	-137/-201	-169	-123/-198	-155	114/150	134	199	190	190	
	平均	57.1							191	183	183	
CPC4-16	1	79.6	-182/-188	-185	-130/-139	-134	134/155	142	214	165	185	
	2	81.4	-176/-184	-183	-125/-145	-135	151/226	171	248	180	200	
	3	74.4	-174/-174	-174	-125/-136	-130	138/184	158	229	180	200	
	平均	78.5							230	175	195	
CPC4-13	1	78.6	-174/-179	-177	-108/-125	-122	131/161	143	213	180	190	
	2	78.2	-178/-161	-169	-97/-141	-124	103/131	118	181	160	160	
	3	81.2	-171/-178	-176	-116/-157	-134	114/143	127	193	150	175	
	平均	79.3							196	163	175	

表-3 曲げひび割れ発生直前に実測されたひずみと計算値

\*1 同定により計算された値



a)供試体 RC1 (3体目)



b)供試体 CPC4-16(3体目)
 図-4 曲げひび割れ発生直前のひずみ分布

$$\sigma_{t} = k \cdot f_{t} \left\{ 2 \left( \frac{\varepsilon_{t}}{\varepsilon_{t0}} \right) - \left( \frac{\varepsilon_{t}}{\varepsilon_{t0}} \right)^{2} \right\}$$
(1)

ここに、 $\sigma_t$ : 引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\varepsilon_t$ : 引張ひずみ、k: 係数で今回は 0.85 を採用、 $f_t$ : 引張強度 (N/mm<sup>2</sup>) で、 **表-2** で示した圧縮強度の実験値を用いて、**式(2)**に示 す土木学会コンクリート標準示方書の圧縮強度の関係式 から算定した。なお、 $f'_c$ は圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) である。

$$f_t = 0.23 f_c'^{2/3} \tag{2}$$

図-4には、曲げひび割れが発生する直前の断面内の ひずみ分布の代表例について、測定値と計算値を併せ示 した。なお、図中の凡例の計算値の数値は、コンクリー トの引張ひずみの特性値  $\epsilon_{t0} \ge \epsilon_{tu} \ge \epsilon_{50}$ が 150×10<sup>-6</sup>、 ば「150-150」の表記は  $\epsilon_{t0}$ が 150×10<sup>-6</sup>、 $\epsilon_{tu}$ が 150×10<sup>-6</sup> として算定した場合を意味する。 $\epsilon_{t0} \ge \epsilon_{tu}$ の同定には、 $\epsilon_{t0}$  $\ge \epsilon_{tu} \ge to 10 \times 10^{-6}$ 刻みで変化させ、測定値との最小二 乗誤差が最小となるときの値を採用した<sup>7</sup>。

図-4a)に示した RC1において,曲げひび割れが発 生する直前のひずみ分布を再現できる  $\varepsilon_{t0} \ge \varepsilon_{tu}$ は、同一 の値で 170×10<sup>6</sup> となった。また、図-4b)に示した CPC4-16 では、RC1 と同様に  $\varepsilon_{t0} \ge \varepsilon_{tu}$ を 150~200×10<sup>6</sup> の範囲で同一の値とした場合,ひずみ分布に測定値との 差異が認められた。トライアンドエラーの結果, ε<sub>n</sub>を 180 ×10<sup>-6</sup>, ε<sub>tu</sub> を ε<sub>t0</sub>よりも少し増加させて 200×10<sup>-6</sup>とするこ とで,ひずみ分布の測定値を再現できることが確認され た。すなわち CPC 梁の場合,コンクリートの引張側の応 力度とひずみの関係に,膨張コンクリートの伸び能力を 考慮することで,断面内のひずみ分布の測定値を評価で きることが示唆された。

このようにして、すべての供試体について  $\varepsilon_{t0} \ge \varepsilon_{tu} \ge \epsilon_{fu} \ge \epsilon_{fu}$ 

は、D16を引張鉄筋に配置した梁において同定したコン クリートの引張側応力度とひずみの曲線を示す。



図-5 コンクリートの引張応力度とひずみ曲線

## 3.3 引張鉄筋のひずみ増分

**図-6**は, RC1, CPC2 および CPC4-16 の荷重と引張 ひずみの増分の関係について,測定値と積層モデルによ る解析値を比較したものである。



図-6 引張鉄筋(D16)のひずみの増分

この図より、以下の現象が認められる。

・ケミカルプレストレスの導入により,曲げひび割れ発 生荷重が増加する。

- ・LL コンクリートを用いた CPC4-16 の引張ひずみは, 曲げひび割れ発生後も初期に導入されたケミカルプレ ストレインにほぼ等しい約 500×10<sup>-6</sup>程度小さくなる。
- ・釣合い鉄筋比以下の曲げ引張破壊時の荷重は、膨張材 を用いても、低下することはない。
- ・積層モデルによる解析値は,曲げひび割れ発生直後の 荷重段階を除いて,測定値と良く一致している。

図-7は、引張鉄筋をD13とした引張鉄筋比の小さい CPC4-13の引張鉄筋のひずみの増分について、各3体と その平均値を示している。CPC4-16と比較して低鉄筋比 のCPC4-13のひずみの増分は、大きなバラツキを示して いる。また、曲げひび割れ発生時の荷重と鉄筋降伏まで の荷重の差が小さく、引張鉄筋が降伏に至るまでのひず みの変動が大きくなっている。CPC梁では、曲げひび割 れ発生荷重が増加することに対し、最小鉄筋比を RC梁 よりも大きくすることが必要であるといえる。



図-7 低鉄筋比のひずみの増分

## 3.4 曲げひび割れ幅

RC1, CPC2 および CPC4-16 に関する曲げひび割れ幅 の最大から3本の平均値と荷重の関係を,図-8に示す。





図-9 低鉄筋比の CPC4-13 梁の曲げひび割れ幅



ケミカルプレストレインの導入効果により,引張鉄筋 のひずみの増分が減少することに伴い,曲げひび割れ幅 が減少することが明確に認められる。CPC4-16の曲げひ び割れ幅の発達過程は,曲げひび割れの発生前後の荷重 段階を除けば,CPC2 とほぼ一致している。このことか ら,LL コンクリートにおける膨張材の使用効果は,製品 用の普通コンクリートとほぼ同じと考えて良い。

図-9には、引張鉄筋比の小さい CPC4-13 曲げひび割 れ幅の最大値、最大から3本の平均値である代表値、曲 げモーメントー定区間の平均値を、土木学会コンクリー ト標準示方書の算定値(JSCE式)<sup>8)</sup>とともに示している。 JSCE 式が小さくなっている曲げひび割れ幅は、最大値だ けでなく、最大から3本の平均値である代表値について も、曲げひび割れが発生した後の荷重段階で大きくなっ ている。なお他の梁では、JSCE 式を超える曲げひび割れ 幅は最大値でもなかった。

曲げモーメントー定区間の各位置において、パイ型変 位計により実測した曲げひび割れ幅の分布を、RC1 は**図** -10に、CPC2 は**図**-11に、CPC4-16 は**図**-12に それぞれ示す。曲げひび割れの発達がほぼ安定した引張 鉄筋のひずみの増分 $\varepsilon_s$ が1000×10<sup>-6</sup>に相当する荷重段階 での分布例である。

RCI 梁では,曲げひび割れの幅が大きいとともに,曲 げひび割れが顕著に発達している箇所が認められる。 CPC 梁の曲げひび割れ幅は CPC2 と CPC4-16 ともに, RC1 梁に比べて小さく,バラツキも小さく安定している ことが認められる。そして LL コンクリートを用いても, ケミカルプレストレインの導入による曲げひび割れの制 御効果は,製品用の普通コンクリートに比べて圧縮強度 が約 20%増加していたこともあって,やや顕著に現れて ていることが認められる。

## 4. まとめ

高炉スラグ微粉末の置換率を75%に高め、膨張材を併 用した LL コンクリートの品質および曲げ性能に関する 実験から、次の知見が得られた。

- (1) LL コンクリートの膨張収縮性状と圧縮強度は, 膨張 材を混和した普通コンクリートとほぼ同じであること が確認できた。
- (2) LL コンクリートを用いた CPC 梁の引張ひずみの終局 値は、普通コンクリートにより作製された RC 梁およ び CPC 梁よりも少し大きくなることが確認された。
- (3) LL コンクリートを用いた CPC 梁は、ケミカルプレス トレスの導入による曲げひび割れ発生荷重が大きいだ けでなく、ケミカルストレインが引張鉄筋に導入され ているため、曲げひび割れ幅を小さく制御できている ことが確認できた。

### 参考文献

- 満渕麻子ほか:低炭素型のコンクリートの強度発現性 に及ぼす養生条件の影響,セメント・コンクリート論 文集, Vol.66, pp.332-337 (2012)
- 2) 石田孝太郎ほか:高炉スラグ微粉末を利用した長寿命 コンクリートの製造,第69回セメント技術大会講演 要旨 2015, pp. 242-243 (2015)
- 3)石田孝太郎ほか:高炉スラグ微粉末を多量に利用した 長寿命コンクリートの品質、コンクリートテクノ、 Vol.34, No.11, pp.18-22, Nov. 2015
- 4) 辻幸和:ケミカルプレストレスの推定方法について、
  セメント技術年報 XXVII, pp.340-344, 1973
- 5) 辻幸和:ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定 方法,コンクリート工学, Vol.19, No.6, pp.99~105, 1981.6
- 6) 辻幸和,栖原健太郎:曲げモーメントを受ける CPC 部材の断面解析,膨張コンクリートの性能評価,技報 堂出版, pp.74-80 (2011)
- 7) 栖原健太郎,田所雄治,柄澤英明,辻幸和:膨張コン クリートの引張ひずみの終局値に関する一考察,コン クリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.172-177