

# 論文 エコセメントを用いたコンクリートの付着性状に関する基礎的研究

岸田 幸治\*1・三島 直生\*2・畑中 重光\*3

**要旨**：本報では、鉄筋コンクリート部材に普通エコセメントを適用するための基礎データを得ることを目的に、鉄筋とコンクリートの付着試験および鉄筋コンクリートはりの曲げ試験を行い、普通エコセメントの鉄筋コンクリート部材への適用性について検討を行った。その結果、普通エコセメントコンクリートと鉄筋との付着強度および最大付着応力時のすべり量と圧縮強度の関係は、普通ポルトランドセメントコンクリートと同等であること、また RC はりの曲げ特性においてもセメント種類による違いはほとんどみられないことがわかった。  
**キーワード**：エコセメント, 付着強度, 付着試験, 鉄筋コンクリートはり, ブリーディング

## 1. はじめに

都市ゴミ焼却灰や汚泥を主原料として製造された新しいセメントであるエコセメントは、建設分野における環境負荷低減材料として注目を集めている。しかし、材料としての歴史は浅く、今後より広範囲な利用を進めるにあたっては、さらに多くの研究結果の蓄積が必要となる。その中でも、鉄筋コンクリート（以下、RC と略す）構造物に適用する際には、鉄筋との付着特性や RC 部材としての変形、破壊特性の把握は不可欠となる。これまでにエコセメントと鉄筋の付着特性に関する報告は極めて少なく、コンクリート製品を想定した蒸気養生供試体に関して、普通ポルトランドセメントとほぼ同等である<sup>1)</sup>と報告されている程度である。また、普通エコセメントを用いた RC 部材の変形破壊特性に関しては、蒸気養生された RC はりの曲げ特性に関する報告<sup>1)</sup>および RC はりのせん断特性に関する報告<sup>2)</sup>があり、共に普通コンクリートとほぼ同等であるとしている。

これに対して本報では、標準養生を施したエコセメントコンクリートと鉄筋の付着性状を把握することを試みる。さらに、RC はりの曲げ試験を行い、RC 部材に対するエコセメントの適用性について検討する。

表-1 付着試験の要因と水準

要因	水準
セメントの種類	普通エコセメント (EC) 普通ポルトランドセメント (OPC)
水セメント比 (%)	45.0, 52.5, 60.0
鉄筋埋設位置	水平
鉄筋の種類	D16
試験材齢 (日)	28日
養生方法	水中

表-2 付着試験の測定項目

フレッシュ性状	空気量, スランプ, ブリーディング
硬化体性状	圧縮強度, 付着強度, すべり量

表-3 付着試験の使用材料

材料	記号	特性値
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3300 cm <sup>2</sup> /g
	EC	普通エコセメント 密度: 3.17 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 4220 cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	町屋川産砂, 密度: 2.59 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	志摩産砕石, 密度: 2.68 g/cm <sup>3</sup> (最大寸法13mm)
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	AE	AE剤
	AF	消泡剤

表-4 付着試験に使用した鉄筋の諸性状

主筋	種類: D16 (SD345)
	降伏強度: 345.2N/mm <sup>2</sup>
	引張強度: 509.7N/mm <sup>2</sup>
	伸び率: 27.3%
スパイラル筋	ヤング係数: 197.0kN/mm <sup>2</sup>
	直径: 2.78mm
	内径: 88.1mm
	外径: 95.0mm
	降伏強度: 709.6N/mm <sup>2</sup>

\*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻助教 博士 (工学) (正会員)

\*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

表-5 コンクリートの調合およびフレッシュ性状（付着試験）

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤			フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SP/C (%)	AF/C (%)	AE/C (%)	SL(cm)	Air (%)	TC(°C)
EC	45.0	50	165	366	842	956	0.83	0.40	0.020	18.5	5.6	29
OPC			164	365			0.77	0.40	0.020	19.0	3.6	28
EC	52.5		175	333			0.70	0.40	0.015	16.5	6.2	29
OPC			174	332			0.55	0.40	0.015	12.5	3.2	26
EC	60.0		184	306			0.64	0.40	0.020	18.0	5.3	28
OPC			183	305			0.60	0.40	0.015	16.0	4.3	29

〔註〕W/C：水セメント比，s/a：細骨材率，W：水，C：セメント，S：砂，G：砂利，SL：スランプ，Air：空気量  
TC：コンクリート温度

## 2. 付着試験

### 2.1 実験の概要

表-1 に付着試験の要因と水準を示す。セメントには、普通エコセメントおよび普通ポルトランドセメントを用い、W/C を 45.0，52.5，60.0% の 3 水準とした。鉄筋の埋設方向は水平とし、脱型は材齢 2 日に行い、その後水中養生とした。付着試験は材齢 28 日で行った。本実験では、セメント種類の違いによるブリーディングの影響に着目し検討を行うため、鉄筋の埋設方向をブリーディングの影響が大きいと考えられる水平方向を対象とする。

表-2 に測定項目を示す。試験体打設時にスランプ試験，空気量試験，ブリーディング試験を行い，材齢 28 日において圧縮試験および付着試験を行った。付着試験では，鉄筋の引抜き荷重および鉄筋のすべり量を測定した。

表-3 に使用材料を示す。セメントには JIS R 5214 に適合する普通エコセメント（以下，EC と略す）と JIS R 5210 に適合する普通ポルトランドセメント（以下，OPC と略す）の 2 種類を使用した。表-4 に使用した鉄筋の諸性能を示す。表-5 にコンクリートの調合およびフレッシュ性状を示す。スランプおよび空気量は，それぞれ  $18 \pm 2.5\text{cm}$ ， $4.5 \pm 1.5\%$  となるように混和剤の添加量で調整した。

### 2.2 付着試験の概要

#### (1) 試験体形状

図-1 に付着試験体の概要を示す。付着試験用の試験体は  $150 \times 150 \times 150\text{mm}$  の角柱体に鉄筋とコンクリートの付着長さが 4D (D:鉄筋直径，本実験では 64mm) となるように非付着区間を

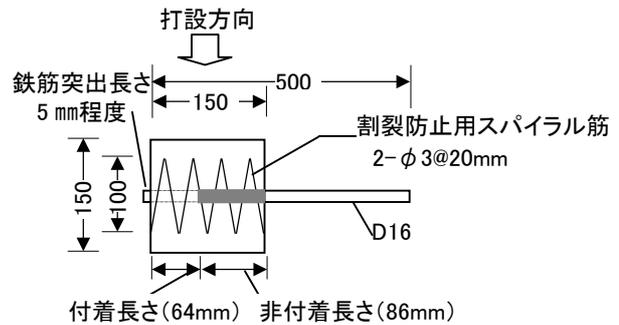


図-1 付着試験の試験体概要



写真-1 付着試験体型枠

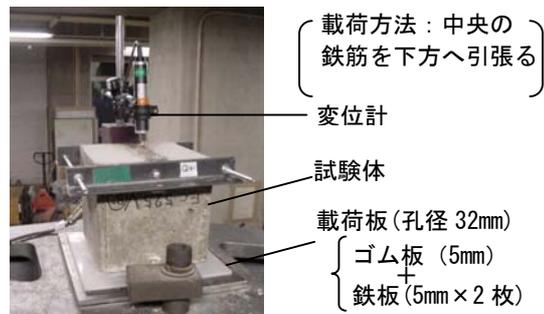


写真-2 付着試験の様子

設けて成型した。また，鉄筋の周辺にはコンクリートの割裂を防止するためにスパイラル筋を埋設した。なお，試験体は各水準 3 体作製した。

#### (2) 試験体の作製

試験体の作製には 1 軸強制練りミキサ（公称容量 100L）を用いてコンクリートの練混ぜを行い，あらかじめ鉄筋を固定した型枠（写真-1）内にコンクリートを打ち込み，テーブルバイブレータで 10 秒間振動を与えた。その後，コテ仕

上げを行い、所定の寸法となるように仕上げた。

型枠は材齢 2 日で取り外し、その後、試験材齢である材齢 28 日まで 20℃±3℃の水中養生とした。

### (3) 試験方法

写真-2 に付着試験の様子を示す。載荷板は、厚さ 10mm の鉄板と厚さ 5mm の緩衝用シリコンゴム板を重ねたものとした。鉄筋を通す穴の直径は鉄筋直径の 2 倍の 32mm とした。載荷速度は鉄筋の引張応力度が毎分 50N/mm<sup>2</sup> 以下となるようにした。鉄筋のすべり量は供試体上部に 5mm 程度突出させた鉄筋の沈下量とし、荷重-すべり関係は動ひずみ測定器により計測した。

### (4) 付着応力度の算定

付着応力度は式 (1) で計算し、各試験体の付着応力度-鉄筋すべり量曲線を得た。

$$\tau_b = \frac{P}{4\pi D^2} \quad (1)$$

ここに、 $\tau_b$  : 付着応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $P$  : 引張荷重 (N)  
 $D$  : 鉄筋の直径 (mm)

## 2.3 実験結果とその考察

### (1) ブリーディング試験

図-2 に、ブリーディング量の経時変化を示す。同図によると、ブリーディング量はセメント種類にかかわらず W/C が大きくなるほど増加し、OPC よりも EC の方がブリーディング量は少ない傾向を示した。また、EC は OPC よりもブリーディング開始が遅い傾向を示した。以上の傾向は既往の研究結果<sup>3)</sup>と符合するが、ブリーディングの絶対量に関しては、本実験では OPC、EC とともに非常に少ない結果となった。

### (2) 圧縮強度試験

図-3 に圧縮強度試験結果を示す。同図によると、圧縮強度は既報<sup>4)</sup>と同様に、同一 W/C の場合、EC は OPC に比べて 5N/mm<sup>2</sup> 程度圧縮強度が低い値となった。

### (3) 付着試験

付着試験時の破壊状況に関しては、W/C が 45.0% の供試体では鉄筋の降伏が生じたが、W/C

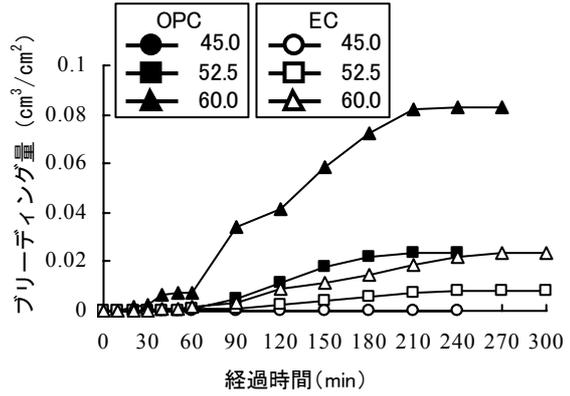


図-2 経過時間によるブリーディング量

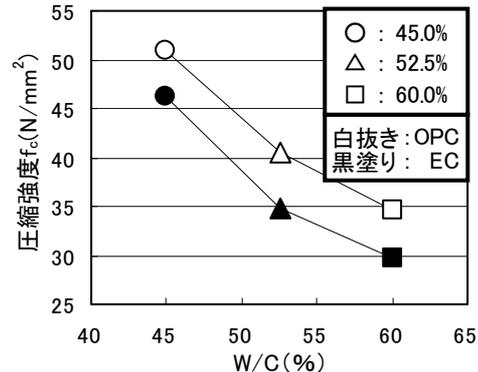


図-3 圧縮強度

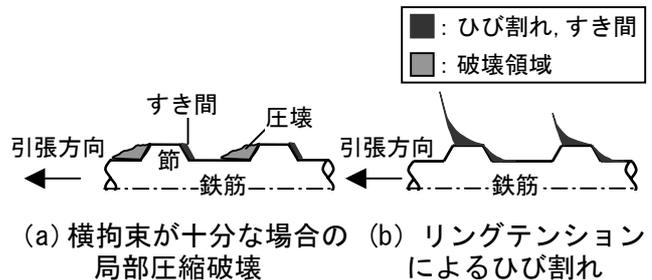


図-4 コンクリートと鉄筋の破壊面

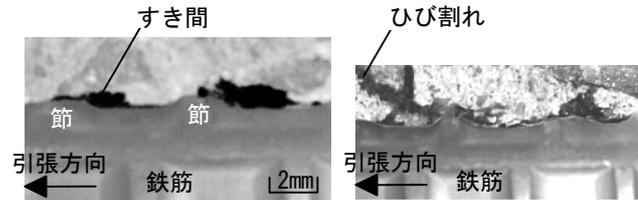


写真-3 EC コンクリートと鉄筋の付着断面

が 52.5% 以上の供試体では割裂破壊せず、鉄筋が滑る結果となった。

図-4 に一般的なコンクリートと鉄筋との付着破壊の例<sup>5)</sup>を、写真-3 に W/C=52.5, 60.0% の EC を用いた供試体の着色剤により着色されたひび割れ状況を示す。本実験では、写真-3(a) のようなすべり破壊が多く見られた。これはス

パイラル筋による拘束が十分になされていたため、図-4(a)のようなリングテンションによるひび割れはあまり進展せず、鉄筋の節で局部圧縮破壊し、鉄筋の節とコンクリートの間に隙間が生じた結果と考えられる。また、W/C=60.0%のECを用いた供試体において、写真-3(b)のようなリングテンションによるひび割れをおこす供試体も一部みられた[図-4(b) 参照]。

図-5 にすべり量と平均付着応力度  $\tau_b$  の関係の例を示す。同図によると、最大付着応力度に差はあるものの全体の形状などは OPC と EC でほぼ同様な傾向を示した。

図-6 に OPC, EC の最大付着応力度の測定結果を示す。同図によると、W/C によらず EC の方が OPC に比べて、最大付着応力度が若干低くなる傾向を示した。これは既往の研究報告<sup>1)</sup>と傾向が異なるが、本実験ではブリーディング量が OPC, EC とともに非常に少なかったこと、および養生方法が異なることなども影響しているもの

と考えられる。ただし、同一 W/C でもセメント種類によって圧縮強度が異なるため、図-7 に、圧縮強度と最大付着応力度（付着強度） $\tau_{bu}$  の関係を示す。同図によると、付着強度は圧縮強度が大きいほど大きくなり、両者の間にはセメント種類によらず一定の相関関係がみられた。また、この関係は、最大付着応力時よりも多少ばらつくものの、すべり量が 0.002D 時でも同様にみられた。

図-8 に最大付着応力時における鉄筋のすべり量と圧縮強度の関係を示す。同図によると、最大付着応力時におけるすべり量についてもセメントの種類によらず、圧縮強度が小さくなるにつれて、大きくなる傾向がみられるが、同時にバラツキも大きくなる結果となっている。

以上の結果から、エコセメントコンクリートの鉄筋の付着性状に関しては、同一圧縮強度の場合には OPC とほぼ同等であると判断できる。

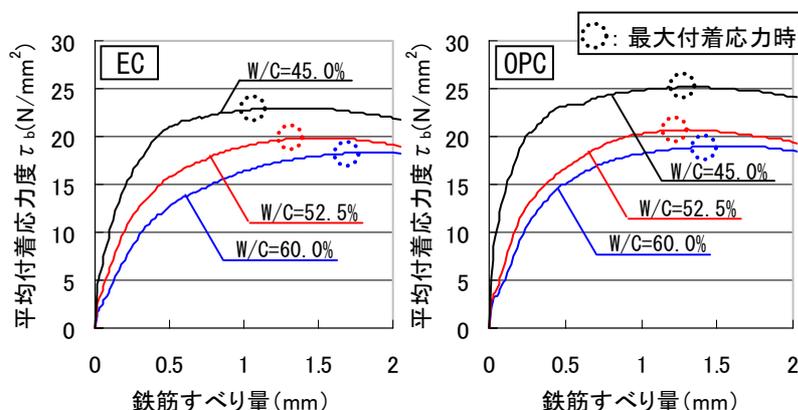


図-5 平均付着応力度  $\tau_b$  と自由端すべり量の関係

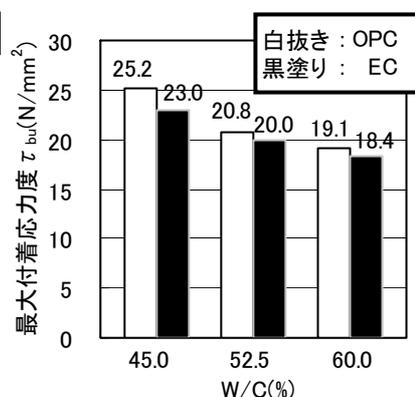


図-6 最大付着応力度  $\tau_{bu}$  の関係

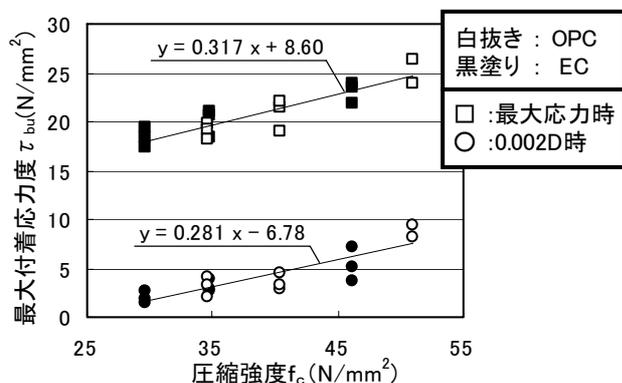


図-7 圧縮強度に対する付着応力度  $\tau_b$  の関係

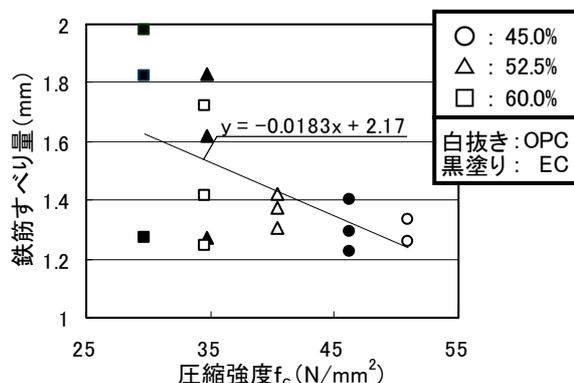


図-8 圧縮強度に対する最大付着応力時における鉄筋のすべり量の関係

### 3. RC はりの曲げ試験

#### 3.1 実験概要

表-6にRC はりの曲げ試験の要因と水準を示す。セメントには、ECおよびOPCを用い、W/Cを45.0，60.0%の2水準に設定した。養生方法は材齢7日まで型枠内で湿布養生し、脱型後は気中養生とした。曲げ試験は材齢28日で行った。

試験項目は、同一調合、同一養生のφ100×200mmの円柱試験体による圧縮試験、およびRC はりの曲げ試験とした。RC はりの曲げ試験では、荷重-たわみ曲線および最大荷重を測定した。

使用材料は、原則として付着試験と同一とし、粗骨材最大寸法のみ20mmとした。表-7に使用した鉄筋の諸性能を、表-8にコンクリートの調合およびフレッシュ性状を示す。スランプおよ

び空気量は、それぞれ18±2.5cm，4.5±1.5%となるように混和剤の添加量で調整した。

図-9にRC はり試験体の概要を示す。試験体は120×200mmの長方形断面を有する全長1700mmのRC はりで、圧縮側主筋にφ9，引張側主筋にD16，せん断補強筋としてφ6を80mm間隔で図の位置に配置した。なお、試験体は各水準1本作製した。

载荷には万能試験機を用い、スパン1200mm，等モーメント区間400mmの単純ばり対称2点载荷とした。たわみはダイヤルゲージにより両端および中央部で载荷荷重5.0kN毎に測定した。なお、载荷はコンクリート圧壊時まで行ったが、鉄筋降伏以後、ダイヤルゲージに異常値が測定されたものは、その後のデータを棄却した。

表-6 要因と水準 (RC はりの曲げ試験)

要因	水準
セメントの種類	普通エコセメント (EC) 普通ポルトランドセメント (OPC)
水セメント比 (%)	45.0, 60.0
試験材齢 (日)	28日
養生方法	7日間湿布養生後、気中養生

表-7 鉄筋の諸性状 (RC はり)

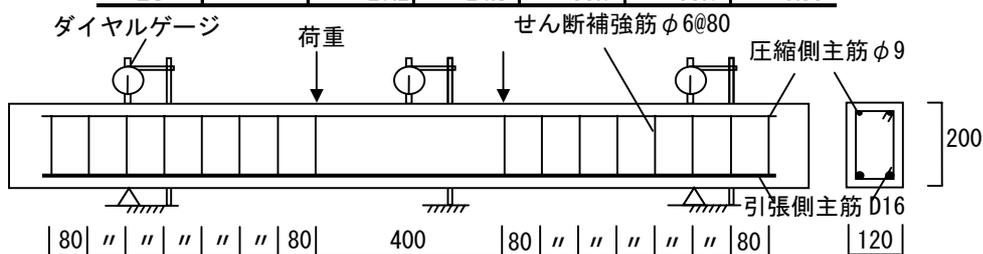
主筋 (圧縮側)	種類: φ9 (SD345)
	降伏強度: 417.0N/mm <sup>2</sup>
	引張強度: 586.6N/mm <sup>2</sup> 伸び率: 17.7%
主筋 (引張側)	種類: D16 (SD345)
	降伏強度: 344.5N/mm <sup>2</sup>
	引張強度: 490.4N/mm <sup>2</sup> 伸び率: 28.0%
	ヤング係数: 210.0kN/mm <sup>2</sup>

表-8 コンクリートの調合およびフレッシュ性状 (RC はり)

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤		フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SP/C (%)	AE/C (%)	SL (cm)	Air (%)	TC (°C)
EC	45.0	42.9	185	411	711	958	0.40	0.015	19.0	6.1	22
OPC					712		0.40	0.015	19.0	5.5	24
EC	60.0	46.4	179	298	818		0.40	0.020	16.0	5.6	23
OPC					819		0.40	0.020	14.5	4.6	22

表-9 RC はりの曲げ試験結果

セメント種類	W/C (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	終局荷重		
				計算結果 (kN)	実験結果 (kN)	実験/計算
OPC	45.0	41.1	29.7	106.0	107.5	1.01
EC		37.3	28.9	105.9	114.6	1.08
OPC	60.0	27.5	23.4	97.5	98.0	1.01
EC		27.2	24.8	99.7	99.1	0.99



(a) 側面図

(b) 断面図

図-9 試験体形状および配筋図 (RC はり)

### 3.2 実験結果

表-9 に試験結果を、図-10 に RC はりのひび割れ発生状況を示す。実験はセメント種類および W/C によらず、全て曲げ破壊する結果となった。また、図-10 によると、RC はりのひび割れ発生状況は、セメント種類によらずほぼ同様な傾向を示した。

図-11 に RC はりの曲げ試験から得られた荷重-たわみ曲線を示す。同図によると、同一 W/C においては荷重-たわみ曲線の傾きはセメント種類によらずほぼ同様である。これは既往の研究報告<sup>2)</sup>と一致する。また、表-9 によると、終局荷重の計算値と実験値との適合性は良好であった。

以上の結果から、EC を用いた RC はりの曲げ特性は、OPC を用いた場合とほぼ同等であるといえる。

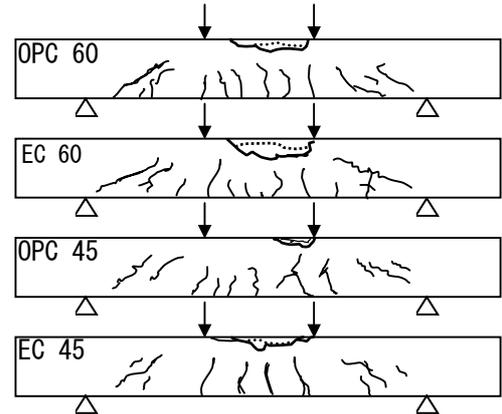


図-10 RC はりのひび割れ状況

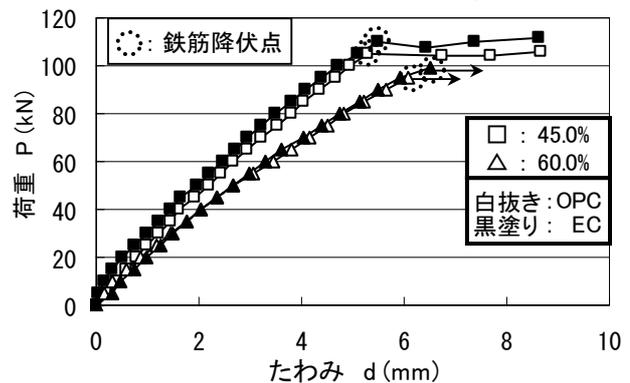


図-11 荷重-たわみ曲線

### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 普通エコセメントを用いたコンクリートと鉄筋の付着性状は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートとほぼ同等である。
- 2) 普通エコセメントを用いた RC はりの曲げ特性は、普通ポルトランドセメントを用いた場合とほぼ同等である。

### 謝辞

本研究は日本建築学会のエコセメント研究小委員会（委員長：榊田佳寛，宇都宮大学教授）の研究の一環として行ったものである。また、本実験に際し、Park kwang min 君（三重大学大学院生）および三重大学大学院工学研究科建築学専攻畑中研究室の皆さんに御助力を頂いた。付記して深く感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所，他：都市ゴミ焼却灰を用いた鉄筋コンクリート材料の開発に関する共同研究報告書，第 289 号,pp.95-106, 2002

- 2) 野間康隆，河野克哉，二羽淳一郎：再生粗骨材および再生 PET 繊維を用いたエコセメントコンクリートはりのせん断特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1595-1600，2006
- 3) 渡辺一郎，金子樹，守屋健一，嵩英雄：エコセメントを用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.244-245，2006.9(関東)
- 4) Park kwang min，坂本英輔，三島直生，畑中重光：エコセメントを用いたコンクリートの長期強度特性に関する実験的研究（長期強度特性と細孔構造の関係），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp. 259-260，2006.9 (関東)
- 5) 谷川恭雄，他：鉄筋コンクリート構造—理論と設計—，森北出版株式会社，pp.33-40，1997.7