

論文

[2117] PCはりの曲げ挙動に与える鋼材の付着状態の影響に関する研究

正会員 梅原 秀哲 (名古屋工業大学社会開発工学科)

正会員○藤田 宗寛 (名古屋工業大学大学院)

正会員 上原 匠 (名古屋工業大学社会開発工学科)

1. まえがき

ポストテンション方式のプレストレストコンクリート (以下PCと略記) では、PC鋼材の防錆ならびに鋼材と部材の一体化を目的として、鋼材とシース間の空隙にセメントペーストを注入するグラウト作業を行うのが一般的である。しかし、グラウト作業は繁雑で手間がかかるため、十分な信頼性をもって完了することが意外に困難な作業である。たとえば、実橋におけるグラウト充填状況の調査によれば、シース内に何らかの空隙箇所があった例も報告されている[1]。このようにシース内に空隙が存在すると鋼材の付着状態が変化するため、完全にグラウトされている場合と異なった挙動を示す可能性がある。

そこで、本研究では特にグラウト不良に着目し、鋼材径および鋼材の付着状態を変化させたPCはりについて静的載荷試験を行うとともに有限要素解析を行い、鋼材の付着状態がPCはりの曲げ挙動におよぼす影響を検討することを目的とする。

2. PCはりの曲げ試験

2.1 試験概要

供試体は断面形状および鋼材径等によりシリーズI~IVに分けられ、鋼材の付着状態として、シリーズI, IIIではi) ボンド, ii) アンボンド, iii) スパン中央に空隙のあるもの, iv) スパン中央に付着のあるもの, の4つの付着状態の供試体を、シリーズII, IVではi) ボンド, ii) アンボンド, iii) スパン中央に空隙のあるもの, v) スパン中央と両端に空隙のあるもの, の4つの付着状態の供試体を作製した。はりの断面形状及び鋼材の付着状態の概要を図-1, 表-1, 2に示す。PC鋼材はすべて、SBPR110/125を用いた。鋼材の付着をなくす部分では、鋼材表面にグリースを塗り、ウレタン製の布で包んで、その上からビニールテープを巻くことによって、グラウトが鋼材と直接付着しないようにし、これを疑似的な空隙とした。また、曲げ破壊以前にせん断破壊を起こさないように、相当量の

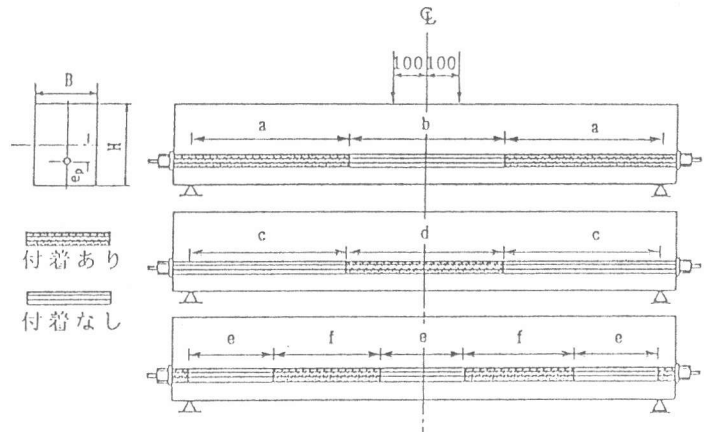


図-1 断面及び鋼材の付着状態の概略図 単位(mm)

表-1 はりの断面及び形状 単位(mm)

シリーズ	鋼材径	B	H	$e_p$	全長	スパン長
I	φ11	150	200	30	2400	2200
II	φ11	150	200	30	1500	1300
III	φ17	200	250	40	1800	1600
IV	φ23	200	300	50	1800	1600

表-2 鋼材の付着状態の概要 単位(mm)

シリーズ	(iii)		(iv)		(v)	
	a	b	c	d	e	f
I	750	700	900	400	—	—
II	450	400	—	—	250	275
III	550	500	550	500	—	—
IV	550	500	—	—	300	350

表-3 最大耐力の試験値とボンドPCはりに対する最大耐力低下率

シリーズ	I				II				III				IV			
付着状態	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(i)	(ii)	(iii)	(v)	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(i)	(ii)	(iii)	(v)
試験値(tf)	3.25	2.45	2.90	3.04	5.80	4.50	5.18	5.08	13.7	11.4	12.3	14.0	22.6	20.6	21.7	22.2
低下率		0.25	0.11	0.06		0.22	0.11	0.12		0.17	0.10	-0.02		0.09	0.04	0.02

スターラップを配置した。

はり供試体は、材令14日まで気中で養生しプレストレスを導入後、直ちにPCグラウトを注入して、材令21日で曲げ試験を行った。プレストレスは、いずれの供試体も鋼材のひずみが試験時に約3400 $\mu$ となるように導入した。コンクリートの圧縮強度は約300kgf/cm<sup>2</sup>、PCグラウトの圧縮強度は約150kgf/cm<sup>2</sup>であった。載荷方法は、図-1

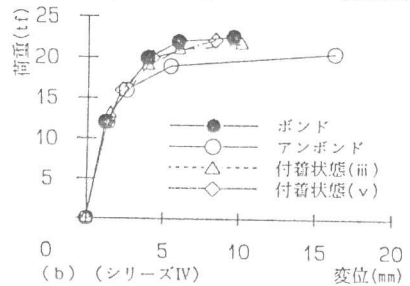
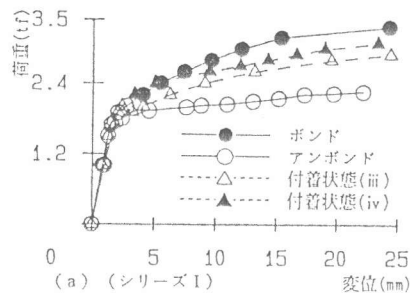


図-2 荷重-変位曲線

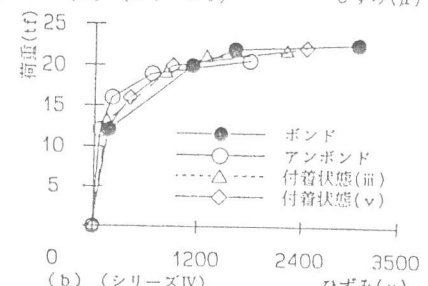
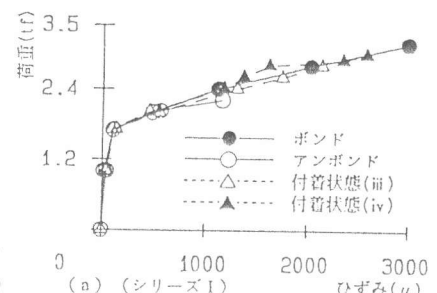


図-3 荷重-鋼材ひずみ曲線

に示すように2点集中載荷とし、載荷点の間隔はいずれの供試体も20cmとした。

## 2. 2 試験結果および考察

最大耐力の試験値および各PCはりのボンドPCはりに対する最大耐力低下率(1-各PCはりの最大耐力/ボンドPCはりの最大耐力)を表-3に示す。また、スパン中央における荷重-変位曲線、荷重-鋼材ひずみ曲線の一例を図-2, 3に示す。なお各供試体は、いずれも最終的にはコンクリート上縁の圧壊による曲げ破壊を呈した。

アンボンドPCはりの最大耐力は、ボンドPCはりより10%~20%程度低下している。鋼材径が大きくなるにしたがって最大耐力低下率が小さくなるのは、鋼材径が大きくなるほど鋼材の付着が低下し、ボンドPCはりの耐力の低下が生じたためと考えられる。

スパン中央に空隙のある付着状態(iii)のPCはりのボンドPCはりに対する最大耐力の低下率は、いずれのシリーズにおいてもアンボンドPCはりのそれに対して半分の値となっている。また、荷重-鋼材ひずみ曲線においても、付着状態(iii)の鋼材ひずみはボンドとアンボンドの中間の値を示した。これは、スパン中央部の空隙において鋼材ひずみが平均化されるためであると考えられ、スパン中央における空隙が最大耐力に大きく影響していると言えよう。

スパン中央に付着のある付着状態(iv)のPCはりの最大耐力低下率は、シリーズIで約6%、シリーズIIIについては耐力の低下は認められなかった。したがって、スパン中央において鋼材が完全に付着していれば、ボンド状態での耐力をかなり維持できるものと考えられる。

スパン中央と両端に空隙のある付着状態(v)のPCはりについては、空隙部分が全体でスパン長の約60%となるが、シリーズIIにおいては付着状態(iii)のはりとほぼ同じ最大耐力を示し、シリーズIVではボンドと付着状態(iii)のはりの中間程度の最大耐力を示した。これより、スパン両

端にある空隙は、はりの最大耐力にはあまり影響を及ぼさないと考えよう。これは、スパン両端におけるコンクリートのひずみ増加量がスパン中央に比べて小さいため、スパン両端における鋼材の付着の有無は、鋼材のひずみにあまり影響を与えないことが原因と考えられる。逆に、スパン中央におけるコンクリートのひずみ増加量は非常に大きいため、鋼材の付着の有無で鋼材のひずみはかなり変化する。したがって、スパン両端における鋼材の付着状態ははりの挙動にあまり影響を与えないが、スパン中央での鋼材の付着状態はかなり大きな影響を与えると言えよう。

### 3. 解析

#### 3.1 解析概要

本解析は、梅原らのPC解析プログラムを用いて行った[2]。このプログラムは有限要素法を用いており、1つの部材に対してコンクリートと鋼材の付着すべり係数を与える方法をとっている。鋼材の付着力が完全で、鋼材とコンクリートとの間にすべりが存在しない場合には鋼材のひずみは、鋼材位置のコンクリートのひずみ増分と一致しなければならない。逆に付着力が全く存在しない場合には図-4に示すように、鋼材のひずみ増分は、鋼材の一方の端から他端まで一様に分布する。なお、図-4において、一例としてコンクリートの要素は8個のはり要素に分割されているが、鋼材については5個のコンクリート要素を貫いてひずみを考慮することになる。多くの実構造物では、鋼材の付着状態はある程度すべりをもったボンドとアンボンドの間であると考えられ、その場合の鋼材ひずみは次式で与えられる。

$$\Delta \varepsilon_s = K_s \left[ \frac{1}{L} \int_0^L \Delta \varepsilon_{cs} dx - \Delta \varepsilon_{cs} \right] + \Delta \varepsilon_{cs} \quad (1)$$

ここに、 $K_s$  : 付着すべり係数

$\Delta \varepsilon_s$  : 鋼材のひずみ増分

$\Delta \varepsilon_{cs}$  : 鋼材位置のコンクリートのひずみ増分

L : 鋼材の長さ

式(1)は、 $K_s=0.0$ のとき $\Delta \varepsilon_s$ が $\Delta \varepsilon_{cs}$ と等しくなり、コンクリートとPC鋼材が完全に付着したボンドの状態を、 $K_s=1.0$ のとき $\Delta \varepsilon_s$ がLで平均された値となり、付着のないすなわちアンボンドの状態を表す。鋼材とコンクリートとの間にすべりが存在する場合には $0.0 < K_s < 1.0$ となり、 $K_s$ が1.0に近づくほど鋼材の付着が低下した状態を表す。

本研究では、1本のPC鋼材でも各位置により付着状態が異なるため、

鋼材の付着状態が異なる部分ごとに付着すべり係数を与えるようにプログラムを修正した。しかしこの場合、鋼材の付着状態が変化する境界において鋼材のひずみは不連続となるが、その影響は無視できるものと仮定し、試験結果と比較して確認することとした。

#### 3.2 試験結果と解析結果との比較

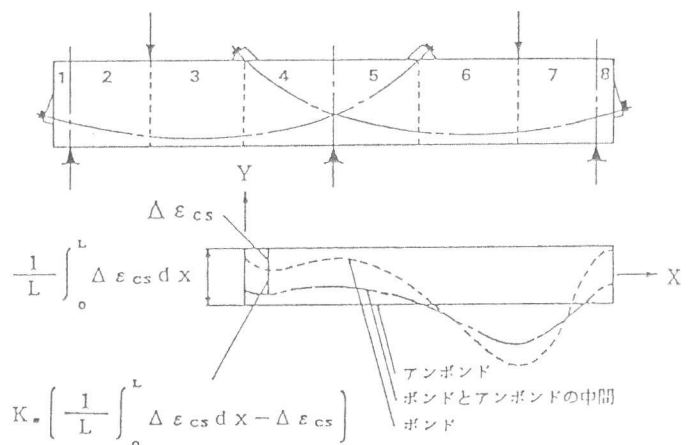


図-4 付着状態により異なる鋼材のひずみ分布



えることが明らかとなった。そこで、シース内の空隙の変化によりPCはりの曲げ挙動が、ボンドからアンボンドへと推移していく過程を解析的に求めることを試みた。

解析モデルとして断面、鋼材径およびスパン長は、曲げ挙動を対象とすることを考慮して、試験を行なったシリーズIのものとした。またコンクリートの圧縮強度を $300\text{kgf/cm}^2$ 、ヤング係数を $3.0 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ とし、プレストレスは鋼材のひずみが $3400\mu$ となるようにした。鋼材の付着状態は、図-7に示すように①スパン中央に空隙のあるもの、②スパン中央に付着のあるもの、③スパン中央と両端に空隙のあるものの3種類とし、その空隙部あるいは付着部の長さをパラメータとして解析を行なった。ただし、解析モデル③における3箇所の空隙の長さは、常に同じ長さとした。また載荷方法として、スパン中央における1点集中載荷と、試験と同じく載荷点間隔を20cmとした2点集中載荷の二通りについて解析し、比較を行なった。

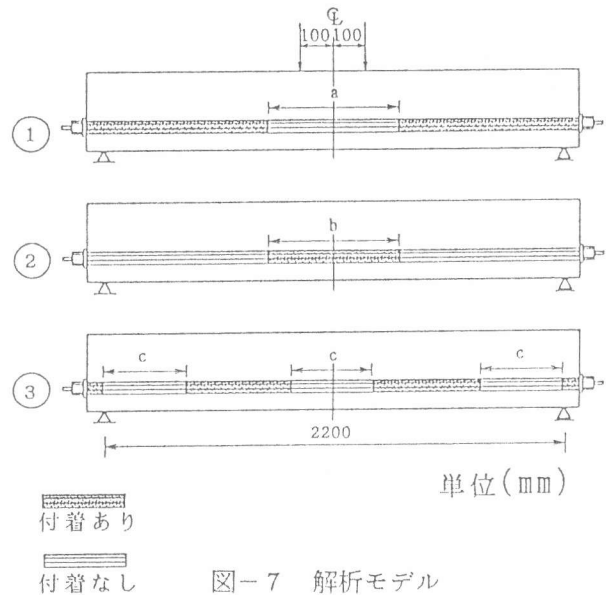


図-7 解析モデル

解析結果を図-8~10に示す。図-8~10は、横軸を(空隙(付着)の長さ/スパン長)、縦軸をボンドPCはりに対する最大耐力の低下率としている。本解析モデルにおいて、アンボンドPCはりのボンドPCはりに対する最大耐力低下率は、1点載荷、2点載荷のいずれにおいても25%であった。また、解析モデル③において空隙の長さとは1つの空隙の長さを表しているため、横軸の値が33%となるとほぼアンボンドの状態を表している。

解析モデル①では、図-8に示すように、1点載荷、2点載荷のいずれの場合においても、空隙の長さが30%程度で最大耐力がボンドとアンボンドの間となり、空隙の長さが大きくなってからよりも小さいときの方が最大耐力の低下する割合が大きくなっている。したがって、スパン中央におけるシース内の空隙がPCはりの最大耐力を大きく低下させると言えよう。

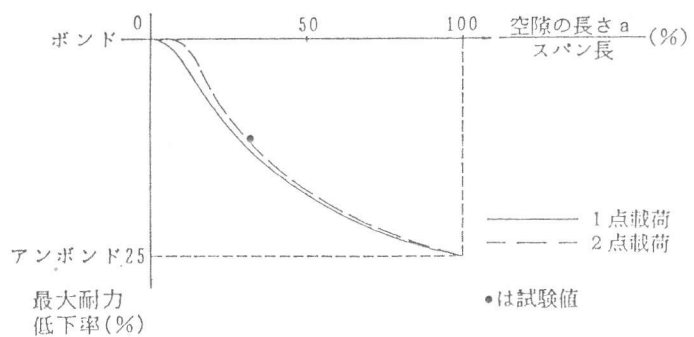


図-8 解析モデル①

解析モデル②において、図-9に示すように、1点載荷の場合には付着部の長さがスパン長に対し約13%、2点載荷の場合には約17%になると急激に耐力が低下することを表している。2点載荷の場合には載荷点間隔が20cm(スパン長の約9%)であり、1点載荷の結果を考慮すると、ボンドPCはりの耐力を維持できる最小の付着部の長さは22%程度になると推測される。しかし、この解析モデルにおいては載荷点間隔が小さく、1点載荷の場合とコンクリートのひずみ分布に

あまり差がないため、17%程度になったものと考えられる。この結果より、スパン中央における鋼材の付着はボンド状態での耐力をかなり維持できると言えよう。

解析モデル③では、図-10に示すように、1点载荷、2点载荷のいずれの場合も、1つの空隙の長さがスパン長に対して20%程度までの範囲においては、解析モデル①の結果とほとんど一致した。したがって、この範囲内ではスパン両端における鋼材の付着状態は、はりの挙動にほとんど影響を与えないと言えよう。それ以上の範囲については、スパン両端の空隙の影響から徐々にアンボンドへと推移していく形となった。

以上、解析モデル①～③の解析結果より、スパン中央における鋼材の付着状態がP Cはりの最大耐力に大きく影響し、スパン両端部における鋼材の付着状態は、ほとんど影響を与えないことが明らかとなった。

#### 4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 試験結果と解析結果とを比較することにより、本研究で用いた解析プログラムで、シース内に空隙が存在している場合も含む、あらゆる鋼材の付着状態のP Cはりについて、その曲げ挙動を十分な精度で推定できることが明らかとなった。
- 2) P C鋼材とシース間の空隙にセメントペーストを注入しても必ずしもP C鋼材とコンクリートの付着は完全にはならず、P C鋼材の径が大きくなるほど付着が低下することが試験および解析より明らかとなった。
- 3) スパン中央のように大きなモーメントの作用する断面では、スパン長の20%程度の付着があればボンドP Cはりの耐力を維持できるが、スパン長の30%程度の空隙があれば最大耐力がボンドとアンボンドの中間に低下するなど、鋼材の付着状態がP Cはりの曲げ挙動に大きく影響し、スパン端部のように作用するモーメントが小さい断面での付着状態はほとんど影響を与えないことが試験および解析より明らかとなった。したがってグラウチングの際には、スパン中央のように大きなモーメントの作用する断面では特に入念に注入しておく必要があると言えよう。

#### 参考文献

- 1) 藤井 学・宮川豊章：P Cグラウト充填状況の非破壊探査法、土木学会論文集、第402号、／V-10、pp.15-26、1989.2
- 2) 梅原秀哲・田辺忠顕・吉田弥智：鋼材の付着状態を考慮したP Cラーメンの履歴挙動に関する研究、土木学会論文集、第396号／V-9、pp.89-98、1988.8

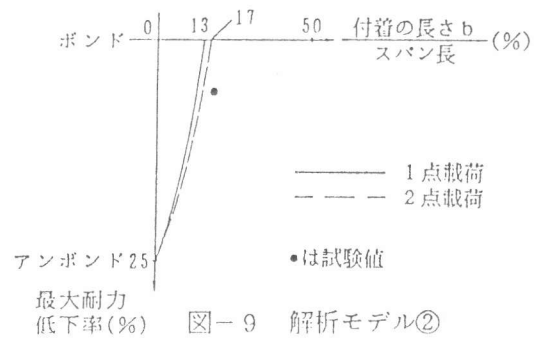


図-9 解析モデル②

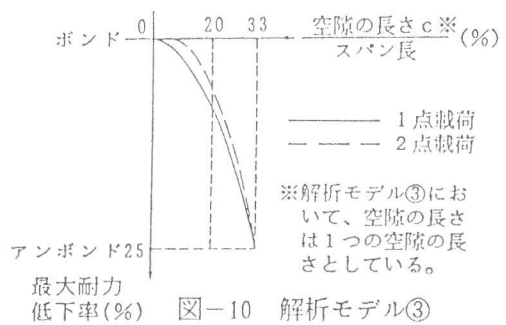


図-10 解析モデル③