

論文

[2025] グラウトの付着性能を考慮したPRCはりの曲げ性状

正会員 辻 幸和 (群馬大学工学部)  
 正会員 岩井 稔 (鹿島建設(株))  
 正会員 ○奥泉貴朗 (群馬大学大学院)  
 正会員 橋本親典 (群馬大学工学部)

1. まえがき

コンクリートの硬化後にプレストレスを導入するポストテンション方式のPRCはりは、PC鋼材がシースの中に配置され、緻密なセメントペーストによってグラウトされることにより防食されている。また、グラウトによりPC鋼材と周囲のコンクリートとが一体化されているために、PRCはりの構造設計においては、平面保持を仮定した計算が行われている。このようにPRCはりにとってきわめて重要な部分を占めるグラウトも、施工上に欠陥のある場合、あるいは、外力による緊張材の初期緊張ひずみからのひずみ増加量が過大となる場合等においては、十分な付着性を満たさない場合も考えられる。

本研究では、ポストテンション方式によりプレストレスを導入したPRCはりにおいて、PC鋼棒の緊張レベルを低レベルから高レベルまで変化させた場合に、PC鋼棒とグラウトとの付着性能がPRCはりの曲げ性状に及ぼす影響を、解析値と実測値を比較することにより検討するものである。そして、PRCはりの曲げ性状をより改善するために、機械的プレストレスだけでなく、膨張コンクリートを用いてケミカルプレストレスを導入したはりについても検討を行った。

2. 実験概要

機械的プレストレスの導入量は、PC鋼棒の引張強さ ( $\sigma_{pu}$ ) に対する緊張時の有効引張応力度 ( $\sigma_{pe}$ ) の比  $\sigma_{pe}/\sigma_{pu}$  で、0.14程度から0.70程度の高レベルまで変化させた。また、ケミカルプレストレスは、結合材のうちセメントと置き換えて使用する膨張材を、単位量Eで  $0 \text{ kg/m}^3$  から  $55 \text{ kg/m}^3$  まで変化させて導入した。これらの組合せを表-1に、自由膨張させたコンクリートの圧縮強度とともに示す。

実験に用いたはり供試体の断面形状は、図-1に示

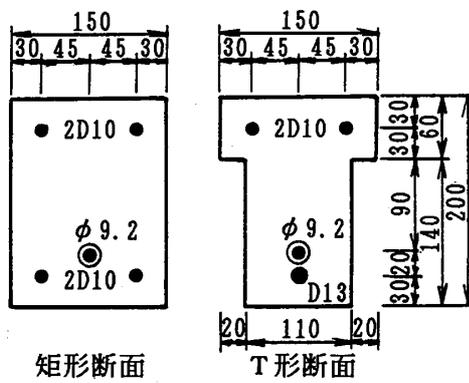


図-1 断面形状 単位:mm

表-1 PC鋼棒の緊張レベルと単位膨張材量の組合せならびに圧縮強度

$\sigma_{pe}/\sigma_{pu}$	RC	0.14	0.42	0.56	0.70
0		514	514		496
40		498	507		498
50		454	454		467
0	482	514	482		482
45	500	424	500	424	500
50	488	465	454	465	467
55	403	404	403	404	404

数字は自由膨張させたコンクリートの圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

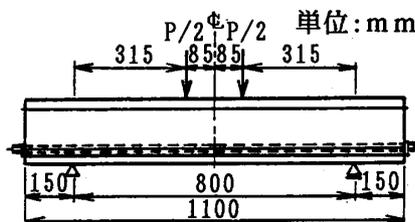


図-2 載荷方法

表-2 使用鋼材の機械的性質

呼び名	降伏点 ( $\text{kgf/mm}^2$ )	引張強さ ( $\text{kgf/mm}^2$ )	伸び (%)
D13	37.5	43.0	25
D10	39.7	58.0	25
9.2mm	142.0	150.0	9

す矩形およびT形の2種類である。使用した鋼材はD10およびD13の異形棒鋼（いずれもSD35）と、呼び名9.2mmのPC鋼棒（SBPR 110/125）であり、それぞれ図-1に示す位置に配置した。表-2に、これらの機械的性質を示す。載荷方法は、図-2に示すように、支間長80cm、最大曲げモーメントの一定となる区間が17cmの2点集中載荷を行い、圧縮縁、鉄筋およびPC鋼棒のひずみを、スパン中央にそれぞれ貼付したワイヤストレーンゲージにより測定した。

はり供試体の養生は、材令14日まで水中養生（平均水温12℃）を行い、その後は実験室内（平均室温15℃）に放置して乾燥させた。材令21日にPC鋼棒の緊張を行って所定の機械的プレストレスを導入し、その直後にPCグラウトを行った。そして、材令28日に載荷試験を行った。

コンクリートの配合は、水結合材比を50%、単位結合材量を $330\text{kg/m}^3$ 、細骨材率を38%とし、スランブが $4\pm 1\text{cm}$ 、空気量が1.5~2.5%となるようにした。また、PCグラウトは、水セメント比を40%とし、アリアルスルホネートを主成分とするPCグラウト用高性能混和剤をセメント重量の2.5%、膨張剤としてのアルミニウム微粉末をセメント重量の0.02%それぞれ添加した。土木学会規準「PCグラウト試験方法（JSCE-1986）」に準じて圧縮強度試験を行った結果、はり供試体の載荷試験時のPCグラウトの材令と等しい材令7日においては、PCグラウトの圧縮強度は水中養生の場合で約 $160\text{kgf/cm}^2$ と小さいものの、材令28日における圧縮強度の約70%であった。

セメントは普通ポルトランドセメントを、膨張材はエトリンガイト系のものをそれぞれ用いた。骨材は、渡良瀬川産の川砂および川砂利を用い、比重はそれぞれ2.60および2.66、粗粒率はそれぞれ2.70および6.98（最大寸法15mm）であった。

### 3. 解析方法

解析には、図-3に示すような積層モデルを採用した。この際に、PC鋼棒がグラウトとの付着によって周囲のコンクリートと完全に一体化されていると仮定した場合（以下、付着有と略称する）には、ひずみ分布は平面保持に従うとし、またPC鋼棒の付着作用がないと仮定した場合（以下、付着無と略

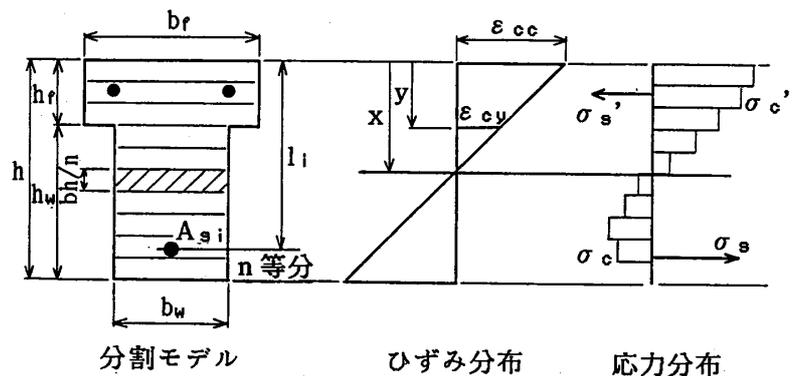


図-3 曲げ解析に用いた積層モデルの説明図

称する）には、はり長さ方向の変形の適合条件を満足する厳密な理論解を求める解析方法を用いた<sup>1), 2)</sup>。ケミカルプレストレスの推定は、仕事量概念に基づく推定方法<sup>3)</sup>によった。

### 4. PC鋼棒のひずみ

PC鋼棒のひずみ増加量と外力による曲げモーメントとの関係を、PC鋼棒の付着の有無を考慮した解析値とともに、図-4および図-5に示す。単位膨張材量 $E$ が $0\text{kg/m}^3$ の矩形断面およびT形断面について、PC鋼棒の緊張レベルが0.70の場合である。

付着有と付着無の解析値を比較すると、曲げひびわれ発生までの荷重段階における同一の外力モーメントに対するPC鋼棒のひずみ増加量は、わずかではあるものの付着無とした解析値の方が小さくなっている。そして、実測値は付着有とした解析値にほぼ一致している。しかしながら、曲げひびわれ発生付近の荷重段階において、実測値は、付着有の解析値からはずれ、矩形断面では付着無とした解析値に近いひずみ変化を示し、T形断面では付着有と付着無の解析値の間に位置している。このような現象は、膨張材を使用してケミカルプレストレスを複合させたPRCはりにおいても認められた。曲げひびわれの発生にともなう断面内の応力状態の急変により、PC

鋼棒とグラウトとの付着が低下して、P C 鋼棒と周囲のコンクリートとの一体化が弱まったことが原因と考えられる。

解析値と比較することにより、本実験においては、矩形断面では曲げひびわれ発生直後に急激な付着力の低下が生じたこと、T形断面では鉄筋が降伏するまでの間に徐々に付着力の低下が生じていたことが、それぞれ推察されるのである。

5. 引張鉄筋のひずみ

図-6 は、引張鉄筋のひずみ増加量と外力モーメントの関係を示したものである。矩形断面で、単位膨張材量が  $0 \text{ kg/m}^3$  の P R C はりの場合である。曲げひびわれが発生するまでの荷重段階において、付着有と付着無の解析値は一致しており、いずれも実測値と同様なひずみ変化を示している。曲げひびわれ発生以降の荷重段階では、P C 鋼棒のひずみ変化とは逆に、付着無とした解析値が同一の外力モーメントに対する付着有の解析値よりも大きくなっている。P C 鋼棒の付着の有無により、同一の外力モーメントであっても断面内の応力分布が異なるために、引張鉄筋のひずみ変化にも影響が現れているのである。

実測による引張鉄筋のひずみ増加量は、P C 鋼棒の緊張レベルにかかわらず、図-6 に示すようにいずれの解析値よりも小さくなっていった。実測値が解析値よりも小さくなる原因としては、曲げひびわれの発生位置とひずみの測定位置の相違による影響などが考えられる。この図においては、P C 鋼棒の付着性能を評価することが困難である。しかしながら、引張鉄筋の降伏後の実測によるひずみ変化は、付着無の解析値に近づく傾向があり、この荷重レベルまでには、P C 鋼棒とグラウトとの付着力がほとんど失われていると思われる。

6. 破壊モーメント

単位膨張材量が  $0 \text{ kg/m}^3$  および  $50 \text{ kg/m}^3$  の場合の矩形断面における P R C はりの破壊モーメントについて図-7 に示す。破壊モーメントの実測値は、P C 鋼棒の緊張レベルの増加にしたがい、大きくなっている。また、単位膨張材量を増加させると、破壊モーメントは、一般にわずかではあるが小さくなっていることが認められる。

付着有とした解析値では、P C 鋼棒の緊張レベルにかかわらず一定の値となっている。これに対して、付着無とした解析値では、実測値と同様に、緊張レベルの増加により破壊モーメントが大きくなっている。破壊モーメントを与えるひずみの分布状態において、P C 鋼棒も平面保持に

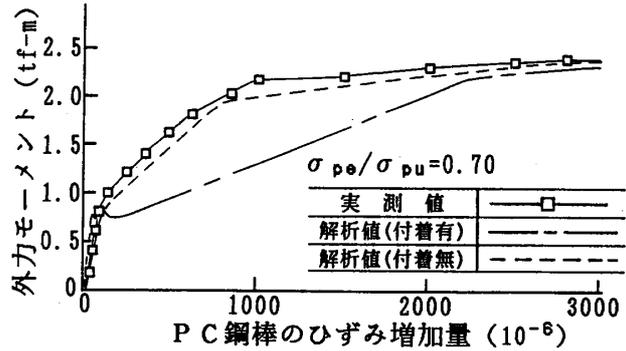


図-4 P C 鋼棒のひずみ変化 (矩形断面)

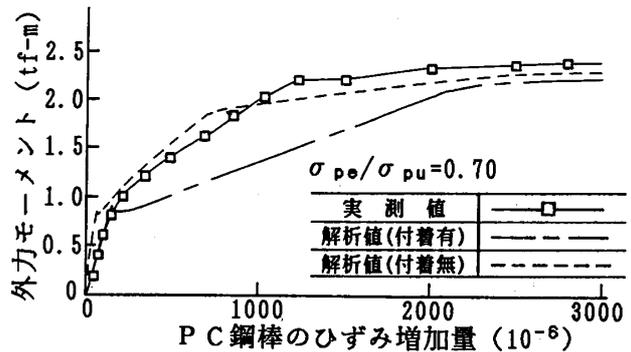


図-5 P C 鋼棒のひずみ変化 (T形断面)

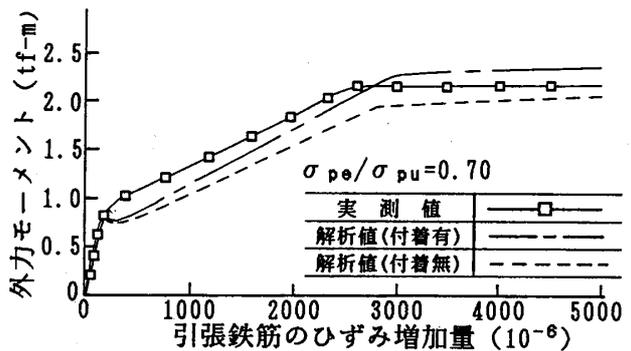


図-6 引張鉄筋のひずみ変化 (矩形断面)

従うと仮定した付着有の解析値では、P C鋼棒の緊張レベルや単位膨張材量にかかわらず、P C鋼棒の応力度が引張強さに達する。しかしながら、付着無とした解析値では、緊張レベルが高い場合においてP C鋼棒の応力度が引張強さに達するものの、緊張レベルの低い場合には、破壊時においてもP C鋼棒の応力度は引張強さに達してはず、コンクリート圧縮縁が破壊ひずみに達したためである。付着無の解析値において、単位膨張材量が $50\text{kg/m}^3$ の方が小さいのは、表-1に示すように、圧縮強度が小さいためである。

実測値と解析値を比較すると、矩形断面においては、実測値が付着無の解析値とほぼ一致している。また、T形断面では、付着有・付着無の解析値は、実測値よりも小さくなっているものの、緊張レベルの増加にともなう破壊モーメントの増加の程度は、付着無とした解析値と同様な傾向が認められた。解析値と比較することにより、P C鋼棒とグラウトとの付着力は破壊時においてはほとんど存在しないことが確かめられた。

7. P C鋼棒の付着性状

図-8および図-9には、外力モーメントの増加にともなうP C鋼棒の付着の程度を示す。縦軸は、P C鋼棒のひずみ増加量について、P C鋼棒のひずみも平面保持に従うと仮定し、実測される圧縮縁および鉄筋のひずみから求めた推定値に対する実測値の比を表している。P C鋼棒と周囲のコンクリートとの一体化が完全であり、実測によるひずみ増加量が平面保持に従う場合には、この値が1.00となる。また、P C鋼棒とグラウトとの間に付着力が存在しない場合には、この値はP C鋼棒のひずみ増加量が同じ位置のコンクリートの部材全長にわたっての伸びひずみと一致する変形の適合条件を満足する値をとる。横軸は、破壊モーメントに対する外力モーメントの比を表している。なお、破壊モーメントには、付着有とした解析値を採用し、矩形断面の場合で $2.41\text{tf-m}$ 、T形断面の場合で $2.30\text{tf-m}$ とした。

図-9に示すT形断面の場合、載荷初期の外力モーメントの小さい状態においては、P C鋼棒のひずみ増加量は、平面

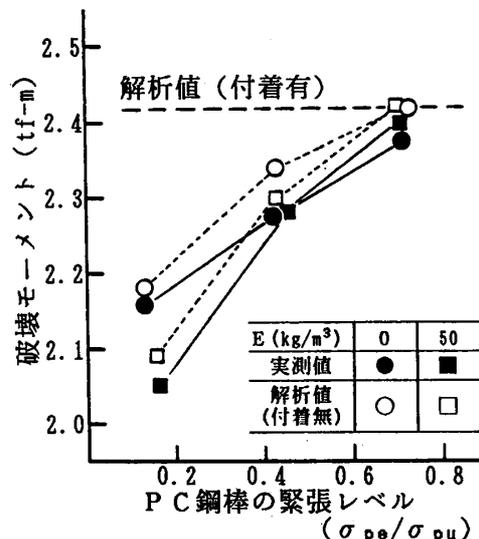


図-7 破壊モーメント (矩形断面)

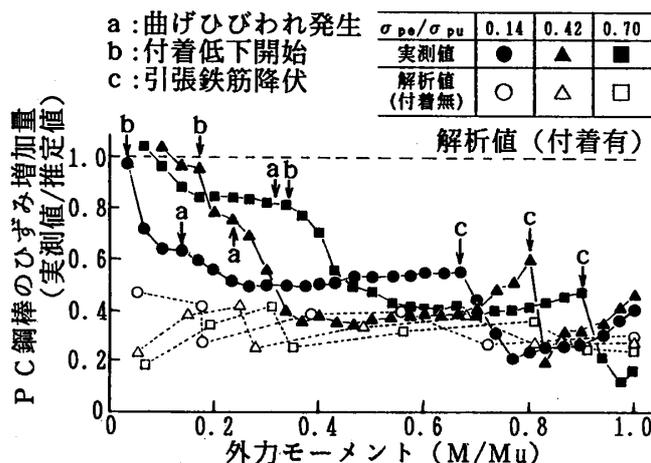


図-8 P C鋼棒の付着性能 (矩形断面)

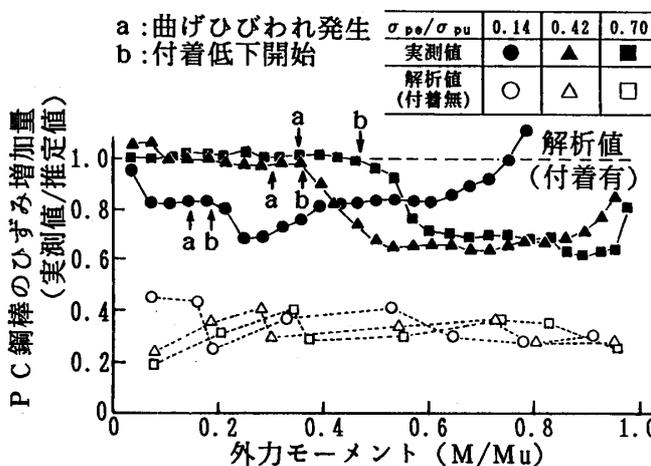


図-9 P C鋼棒の付着性能 (T形断面)

保持に従っていることが認められ、P C 鋼棒とグラウトとの間の付着がほぼ完全であることが確かめられる。図-8に示す矩形断面の場合にも、P C 鋼棒の緊張レベルにより多少のばらつきがあるものの、T形断面と同様にP C 鋼棒のひずみは平面保持に近い状態にあると思われる。そして、外力モーメントが増加するにしたがい、矩形・T形のいずれの断面においても、緊張レベルの小さいはりから順に、P C 鋼棒のひずみは平面保持から離れて、付着無とした解析値に近づく傾向が認められる。このことより、P C 鋼棒とグラウトとの付着の低下は、断面形状およびP C 鋼棒の初期緊張レベルにかかわらず生じていることも確かめられた。

矩形断面では、付着低下の開始とともに、P C 鋼棒のひずみ増加量の比は付着無とした解析値と一致する程度まで小さくなっており、急激な付着低下が生じたことが認められる。その後、外力モーメントが増加してはりの変形が進むにつれて、P C 鋼棒とグラウトとの間に作用する摩擦力のためか、わずかにひずみ増加量の比が増加する傾向も認められる。しかしながら、引張鉄筋の降伏により、付着が完全にない状態となっている。

また、T形断面においても、付着低下が開始すると、P C 鋼棒のひずみ増加量の比が減少し、付着無の状態に近づくことが認められるが、矩形断面と比較すると緩やかな減少である。そして、外力モーメントが増加すると、P C 鋼棒の緊張レベルにかかわらずひずみ増加量の比も増加して、付着有とした状態に近づいている。T形断面では、曲げひびわれの進展にともない、断面の底面に引張鉄筋に沿って付着ひびわれが生じていた。このため、P C 鋼棒だけでなく引張鉄筋においても付着の低下が生じ、P C 鋼棒の分担する引張応力が大きくなったためと思われる。引張鉄筋の付着低下が生じなければ、矩形断面と同様に、引張鉄筋の降伏までにはP C 鋼棒の付着がほとんどなくなると推測される。

#### 8. P C 鋼棒の付着低下モーメント

図-10は、P C 鋼棒の付着低下が生じるときの外力モーメント（以下、付着低下モーメントと略称する）についてまとめたものである。P C 鋼棒とグラウトとの付着低下の開始は、図-8および図-9に示したP C 鋼棒のひずみ変化により判定した。縦軸は、コンクリート引張縁に導入されたプレストレスが0となるディコンプレッションの状態からの増加量で示してある。

曲げひびわれ発生モーメントは、一般には、断面下縁に導入されるプレストレスに比例して大きくなる。しかしながら、ディコンプレッション状態からのモーメント増加量で示すと、P C 鋼棒の初期緊張レベルや単位膨張材量の影響をほとんど受けて、ほぼ一定の値となっている。

これに対して、付着低下モーメントは、ディコンプレッション状態からのモーメント増加量で示しても、緊張レベルの高いはりほど大きくなっている。そして、膨張材を用いてケミカルプレストレスを導入したはりでは、更にモーメントが大きくなっている。

矩形断面では、大部分のはりにおいて、曲げひびわれ発生以前の小さな外力モーメントによって付着低下が生じている。そして、膨張材の使用により付着低下モーメントは増加しているが、増加の程度は緊張レベルの増加によって緩和されている。一方、T形断面では、すべてのはりが、曲げひびわれの発

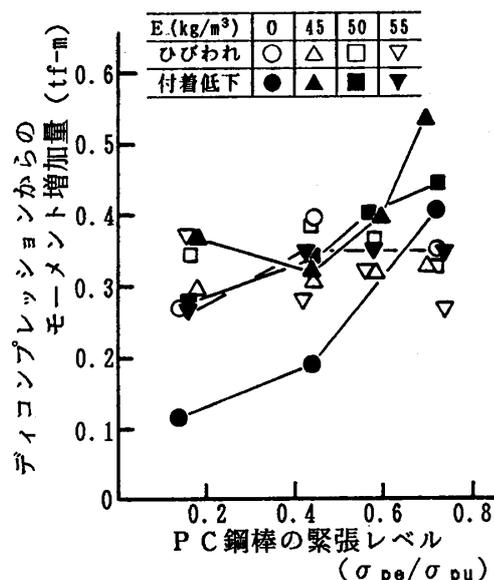


図-10 付着低下モーメント（矩形断面）

生後に付着低下を生じた。

図-11は、付着低下モーメントを断面引張縁に導入されたプレストレスと関連させて示したものである。プレストレスは、P C鋼棒の緊張による機械的プレストレスと、膨張作用の拘束により導入されるケミカルプレストレスとの和で示している。この図より付着低下モーメントは、断面形状や単位膨張材量にかかわらず、断面下縁のプレストレスに比例してほぼ直線的に増加している。図中には、Eが0 kg/m<sup>3</sup>のP R CはりについてP C鋼棒位置のコンクリート応力が0となるときの外力モーメントの解析値も実線で示している。この解析値は、矩形断面とT形断面とでわずかに差があるものの、断面下縁に導入されたプレストレスに比例して増加している。そして、付着低下モーメントは、この解析値よりも少し大きな値であるが、ほぼ同様の増加傾向が認められる。

このことより、P Cグラウトの強度が比較的小さな値であったために、P C鋼棒位置のコンクリートの応力が0となるような小さな外力モーメントによって、P C鋼棒とグラウトとの付着低下が生じたと思われる。

## 9. 結論

ポストテンション方式によりプレストレスを導入したP R CはりにおけるP C鋼棒とグラウトとの付着性能を、はり供試体の載荷試験を行うとともに、P C鋼棒の付着の有無を考慮した解析結果と比較することにより検討した。本研究の範囲内で次のことがいえる。

(1) P C鋼棒とグラウトとの付着低下は、断面内のプレストレスが小さいほど小さな外力モーメントによって生じ、プレストレスが極端に小さいと、曲げひびわれが発生する以前の荷重段階においても生じる場合のあることが認められた。

(2) P C鋼棒とグラウトとの付着低下が生じるときの外力モーメントは、膨張コンクリートを用いてケミカルプレストレスを導入することにより、機械的プレストレスのみを導入したはりよりも、大きくすることができると思われる。この傾向は、緊張レベルの低いはりほど顕著であり、FRPロッドなどのように、破壊までのひずみ増加量が大きい緊張材を用いた場合に、付着低下モーメントを大きくすることができる可能性を示唆するものである。

本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究 (C) (課題番号 01550373) により行ったものである。

### [参考文献]

- 1) 六車・渡辺・西山：アンボンドP C部材の曲げ終局耐力に関する研究，プレストレスコンクリート，vol. 26, No. 1, Jan. 1984, pp. 10~16
- 2) 岩井・辻・岩田：グラウトの付着低下を考慮したP R Cはりの曲げ特性，土木学会第44回年次学術講演会概要集，平成元年10月，pp. 448~449
- 3) 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, June 1981, pp. 99~105

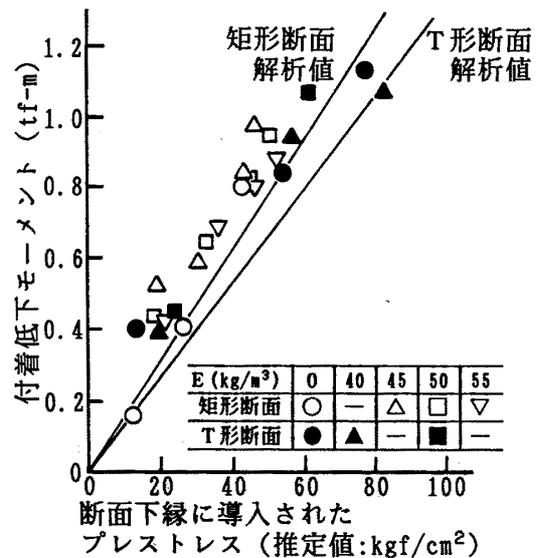


図-11 断面下縁に導入されたプレストレスと付着低下モーメントとの関係