

## 中空P C 鋼棒を用いたプレテンション方式の複合定着に関する研究

オリエンタル建設(株)技術研究所 正会員 ○今井 昌文  
九州工業大学 建設社会工学科 正会員 出光 隆

### 1. はじめに

プレテンション方式は、予め緊張されたP C 鋼材の緊張力をP C 鋼材とコンクリート間の付着によりコンクリート部に伝達する方式であり、P C 鋼材の緊張力をコンクリート部に伝達するために、“伝達長”と呼ばれる付着区間を必要とする。伝達長は、導入緊張力の大きさと、P C 鋼材とコンクリート間の付着特性に依存する<sup>1)</sup>。中空P C 鋼棒を用いたプレテンション方式(以下、H P Cシステムと呼ぶ)の定着は、中空P C 鋼棒ねじの付着と、中空P C 鋼棒端部にねじ固定された定着用ナットの支圧による複合定着である<sup>2)</sup>。複合定着の中空P C 鋼棒張力分布状態、導入緊張力に対して付着が分担する力(以下、付着力と呼ぶ)、定着用ナットの支圧が分担する力(以下、支圧力と呼ぶ。)および伝達長の概念を図-1に示す。複合定着の伝達長は、付着力の大きさと、中空P C 鋼棒ねじとコンクリート間の付着特性に依存する。したがって、H P Cシステムの伝達長を定量的に表すためには、付着力の大きさと、中空P C 鋼棒ねじとコンクリート間の付着特性を把握する必要がある。H P Cシステムの適用分野の拡大を考えたとき、複合定着部の伝達長を定量的に表すことは非常に重要である。これまでのH P Cシステムの定着に関する研究は、径が32mmの中空P C 鋼棒を対象に、ねじとコンクリート間の付着特性および付着特性を用いた伝達長の定量について行ってきた<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>。しかし、伝達長に影響するもうひとつの要因である、導入緊張力に対する付着力の大きさについての研究は行っていない。よって本研究では、新たに開発された径が40mmおよび43mmの中空P C 鋼棒の付着特性について検証を行うとともに、複合定着状態を定量的に表すために必要とする、導入緊張力に対する付着力と支圧力の分担割合について検討を行った。さらに、複合定着部のコンクリートの応力状態についても検討を行った。

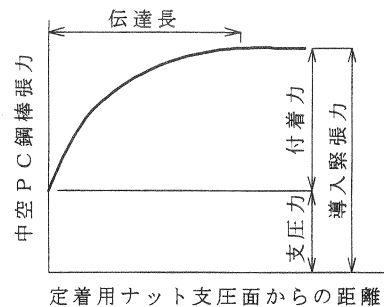
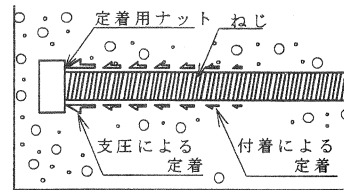
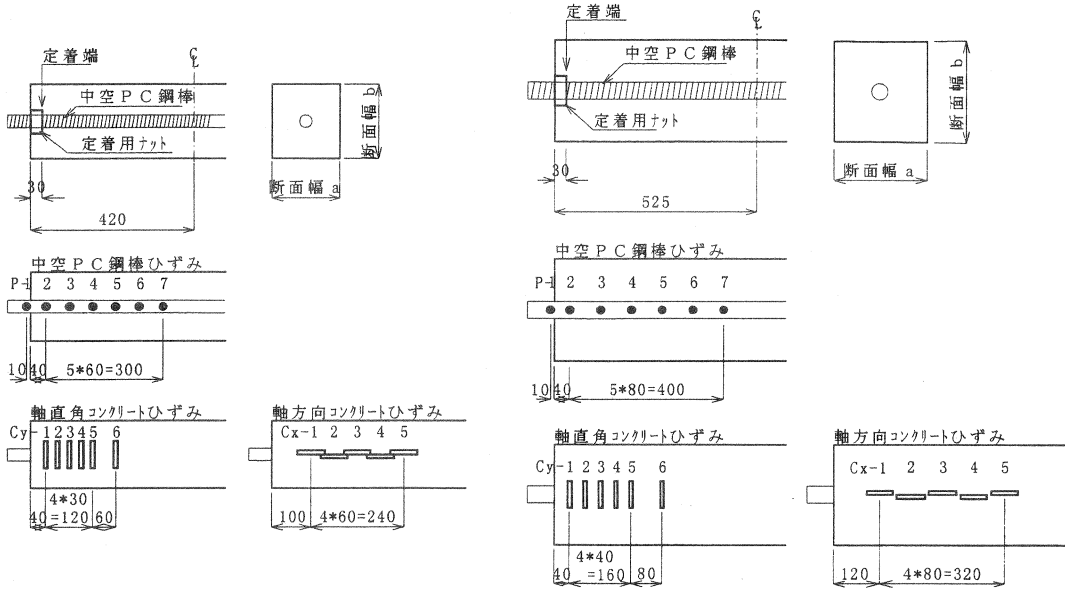


図-1 複合定着の、付着力、支圧力および伝達長の概念

### 2. 実験概要

#### 2. 1 試験体の仕様および実験要因

実験要因は、中空P C 鋼棒の径、定着コンクリート面積および定着用ナット面積である。表-1に試験体寸法および実験要因の一覧を、図-2には試験体の形状寸法と測定項目および測定位置を示す。試験体名称の最初の数字は、試験体を用いた中空P C 鋼棒の径を示す。MおよびBは、定着コンクリート面積の大きさを示している。Mは断面幅aが鋼材径の5.5倍で断面幅bが鋼材径の6倍、Bは断面幅aが鋼材径の6.5倍で断面幅bが鋼材径の7倍の場合を表している。N0、Ns、NmおよびNbは、定着用ナット支圧面積の大きさを示している。N0は定着用ナット無し、Nmは用いた中空P C 鋼棒径の標準ナット面積、NsはNmの0.5倍およびNbはNmの1.5倍の面積の場合を表している。なお、表-1に示した、定着コンクリート面積および定着用ナット支圧面積は、中空P C 鋼棒部分の面積を除いた値である。図-2に示すように、中空P C 鋼棒には



(a) HP32 試験体

(b) HP40 試験体および HP43 試験体

図-2 試験体の形状寸法と測定項目および測定位置 (寸法単位: mm)

全長に渡ってねじが施されており、定着用ナットは部材端で中空PC鋼棒にねじ固定されている。定着用ナットを装着しない試験体の場合には、その区間を非附着区間とし、附着が生じる区間の長さを同じにした。定着用ナット支圧面の位置を以下、定着端と呼ぶ。

2. 2 測定項目および測定位置

中空PC鋼棒ひずみゲージは、ねじの付着を損なわないよう鋼棒の中空部に、1点当たり対角に2枚貼付した。コンクリートは、荷重軸直角方向のコンクリート表面ひずみ（以下、軸直角ひずみと呼ぶ）および荷重軸方向のコンクリート表面ひずみ（以下、軸方向ひずみと呼ぶ）を測定した。なお、軸方向ひずみは、定着用ナットを配置していない試験体のみで測定した。

2. 3 使用材料の品質

中空PC鋼棒の機械的性質を表-2に示す。中空PC鋼棒は、通常用いられているB種2号のPC鋼棒と同等の機械的性質を有している。コンクリートの品質を表-3に示す。プレテンション方式PC部材の場合、プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度は30N/mm<sup>2</sup>以上とするのが一般的である5)。よって、プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度の目標値を30N/mm<sup>2</sup>としている。

表-1 試験体寸法および実験要因の一覧

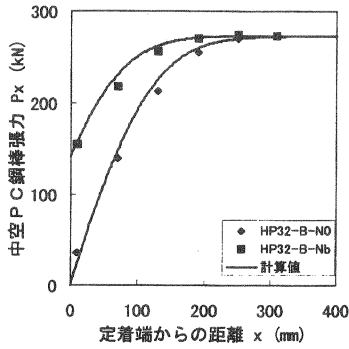
試験体名称	初期緊張力 Pi (kN)	中空PC鋼棒		定着コンクリート			定着用ナット	
		径 D (mm)	断面積 Ap (mm <sup>2</sup> )	断面幅 a (mm)	断面幅 b (mm)	断面積 Ac (mm <sup>2</sup> )	径 Dn (mm)	支圧面積 An (mm <sup>2</sup> )
HP32-M-N0	294	32	424.1	175	190	32446	0	0
HP32-M-Ns							50	1159
HP32-M-Nm							60	2023
HP32-M-Nb				205	220	44296	70	3044
HP32-B-N0							0	0
HP32-B-Ns							50	1159
HP32-B-Nm	205	220	44296	60	2023			
HP32-B-Nb				70	3044			
HP40-M-N0				0	0			
HP40-M-Ns	392	40	549.8	220	240	51543	60	1571
HP40-M-Nm							75	3161
HP40-M-Nb							85	4418
HP40-B-N0				0	0			
HP40-B-Ns				260	280	71543	60	1571
HP40-B-Nm							75	3161
HP40-B-Nb	85	4418						
HP43-M-N0	588	43	809.8	240	260	61143	0	0
HP43-M-Ns							65	1866
HP43-M-Nm							80	3574
HP43-M-Nb				280	300	82743	95	5636
HP43-B-N0							0	0
HP43-B-Ns							65	1866
HP43-B-Nm	280	300	82743	80	3574			
HP43-B-Nb				95	5636			

表-2 中空PC鋼棒の機械的性質

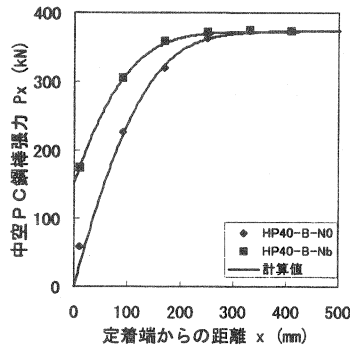
規格 降伏耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	規格 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
930	1080	5

表-3 コンクリートの品質 (プレストレス導入時)

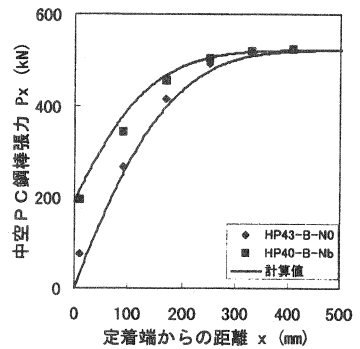
項目	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
適用試験体			
HP32試験体	30.4	26500	2.96
HP40試験体	37.2	27700	2.98
HP43試験体	32.0	25300	3.01



(a) HP32-B 試験体



(b) HP40-B 試験体



(c) HP43-B 試験体

図-3 中空PC鋼棒張力分布

### 3. 実験結果および考察

中空PC鋼棒張力は、中空PC鋼棒ひずみより換算して求めた。中空PC鋼棒張力分布から求めた、付着力と支圧力を表-4に示す。定着端の中空PC鋼棒張力である支圧力は、張力分布を2次放物線で近似できるものと仮定して、P-2~P-4位置の3測点の中空PC鋼棒張力を2次放物線で回帰した式から求めた。付着力は、導入緊張力と支圧力の差である。

#### 3. 1 付着特性

支圧力および付着力に測定値を用いて、文献⑥に示す差分法の考え方により中空PC鋼棒の張力分布状態を試算した。付着特性は、32mmの中空PC鋼棒の試験から求めた式(1)を用いた⑥。計算結果の一例を測定値と比較して図-3に示す。

$$\tau = 1.6 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \ln(1 + 2000 \cdot S/D) \quad (1)$$

ここに、

$\tau$  : 付着応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$f'_c$  : コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

S : すべり (mm)

D : 中空PC鋼棒径 (mm)

表-4 プレストレス導入時の複合定着状態

試験体名称	初期緊張力 P <sub>i</sub> (kN)	導入前緊張力 P <sub>i</sub> ' (kN)	導入緊張力 P <sub>t</sub> (kN)	付着力 P <sub>b</sub> (kN)	支圧力 P <sub>n</sub> (kN)
HP32-M-N0	294	287.9	263.2	263.2	—
HP32-M-Ns			264.4	174.2	90.2
HP32-M-Nm			262.8	156.8	106.0
HP32-M-Nb			264.1	143.9	120.2
HP32-B-N0	292.8	292.8	272.9	272.9	—
HP32-B-Ns			273.5	195.0	78.5
HP32-B-Nm			273.6	181.6	92.0
HP32-B-Nb			273.5	131.3	142.2
HP40-M-N0	392	380.3	354.8	354.8	—
HP40-M-Ns			354.6	238.1	116.5
HP40-M-Nm			354.3	223.9	130.4
HP40-M-Nb			353.3	209.4	143.9
HP40-B-N0	391.3	391.3	371.3	371.3	—
HP40-B-Ns			372.6	261.2	111.4
HP40-B-Nm			373.2	273.5	99.7
HP40-B-Nb			373.2	220.0	153.2
HP43-M-N0	588	557.7	500.6	500.6	—
HP43-M-Ns			501.8	338.8	162.9
HP43-M-Nm			501.5	334.0	167.6
HP43-M-Nb			501.7	301.4	200.3
HP43-B-N0	567.9	567.9	523.5	523.5	—
HP43-B-Ns			521.9	385.3	136.7
HP43-B-Nm			524.0	334.7	189.3
HP43-B-Nb			520.7	328.0	192.6

中空P C鋼棒張力分布の計算値は、径が 32mm の中空P C鋼棒を用いた試験体ばかりでなく、径が 40mm および 43mm の試験体の測定値とも良く一致した。よって、径が 40mm および 43mm の中空P C鋼棒の付着特性は、径が 32mm の中空P C鋼棒と同様に、式(1)を用いて表すことができるものと考えられる。

### 3. 2 導入緊張力に対する付着力と支圧力の分担程度

図-3 に示したように、付着力と支圧力が分かっているならば、式(1)を用いて中空P C鋼棒張力分布を算出することができ、伝達長を求めることができる。表-4 から求めた付着力と導入緊張力の比と、定着用ナット支圧面積と定着コンクリート面積の比の関係を図-4 に示す。以下、付着力と導入緊張力の比を付着分担率、定着用ナット支圧面積と定着コンクリート面積の比を支圧面積比と呼ぶこととする。支圧面積比  $A_n/A_c=0$  は、定着用ナットが配置されていない付着定着のみの場合を示しており、付着分担率は定着用ナットを配置することにより著しく低下することが分かる。本研究の範囲では、付着分担率の低下程度は、支圧面積比を  $A_n/A_c=0.02\sim 0.1$  まで変化させた場合より、定着用ナットの配置の有無に大きく影響されることを確認した。付着分担率と支圧面積比の関係は、式(2)で回帰することができる。回帰式の寄与率は  $r^2=0.9553$  であった。

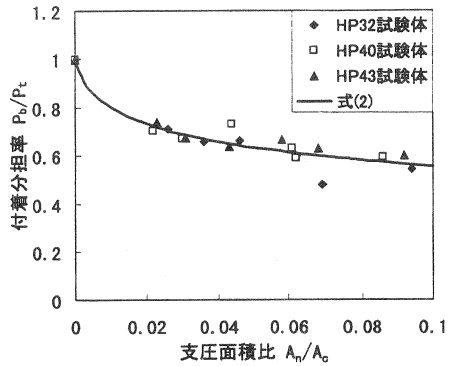


図-4 付着分担率と支圧面積比の関係

$$P_b / P_t = 1 - 0.12 \cdot \ln(1 + 444 \cdot A_n / A_c) \quad (2)$$

ここに、

$P_b$  : 付着力 (kN)

$P_t$  : 導入緊張力 (kN)

$A_n$  : 定着用ナット支圧面積 ( $\text{mm}^2$ )

$A_c$  : 定着コンクリート面積 ( $\text{mm}^2$ )

### 3. 3 定着コンクリート応力状態

複合定着部のコンクリートに生じる応力を、付着力による応力と支圧力による応力を足し合わせることでより求められるものと仮定して検討を行った。まず、付着力による応力状態について、試験体名称の最後のアルファベットが-N0 の付着定着のみの試験体のコンクリートひずみを用いて検討を行った。載荷軸方向の軸方向ひずみ分布および軸直角ひずみ分布の一例を、図-5 および図-6 にそれぞれ示す。ひずみは、導入応力

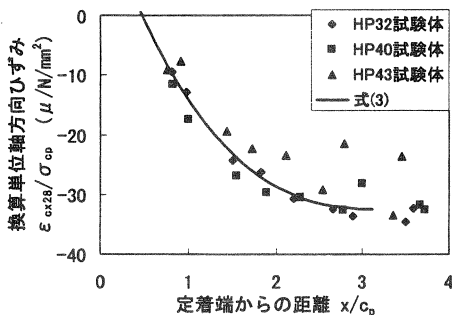


図-5 換算単位軸方向ひずみ分布

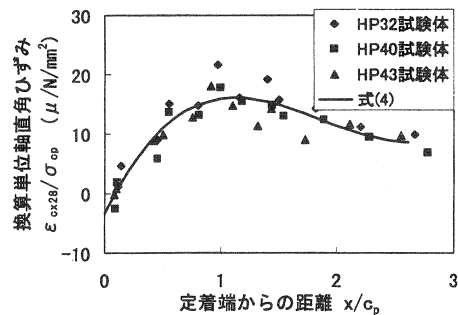


図-6 換算単位軸直角ひずみ分布

(=導入緊張力/定着コンクリート面積)で除すとともに、コンクリートのヤング係数を  $28000\text{N/mm}^2$  に換算して試験体条件の整合を行っている。以下、それらのひずみをそれぞれ、換算単位軸方向ひずみ、換算単位軸直角ひずみと呼ぶこととする。定着端からの距離は、中空PC鋼棒のかぶりで除して無次元化している。載荷軸方向のひずみ分布を3次式で近似できると仮定して回帰した結果を、換算単位軸方向ひずみ分布を式(3)に、換算単位軸直角ひずみ分布を式(4)に示す。それぞれの式の寄与率は、 $r^2=0.8493$  および  $r^2=0.8514$  であった。式(3)から、付着定着の場合の軸方向ひずみは、定着端から中空PC鋼棒径の3.11倍の距離の位置で定常値となることが分かる。また、式(4)から、付着定着の場合の軸直角ひずみは、定着端から中空PC鋼棒径の1.13倍の距離の位置で最大値となることが分かる。

$$\varepsilon_{cx28} / \sigma_{cp} = -1.06 \cdot (x/c_p)^3 + 11.74 \cdot (x/c_p)^2 - 42.26 \cdot (x/c_p) + 17.32 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cy28} / \sigma_{cp} = 4.51 \cdot (x/c_p)^3 - 25.41 \cdot (x/c_p)^2 - 40.14 \cdot (x/c_p) - 3.36 \quad (4)$$

ここに、

$\varepsilon_{cx28}$  : コンクリートのヤング係数を  $28000\text{N/mm}^2$  に換算した軸方向ひずみ ( $\mu$ )

$\varepsilon_{cy28}$  : コンクリートのヤング係数を  $28000\text{N/mm}^2$  に換算した軸直角ひずみ ( $\mu$ )

$\sigma_{cp}$  : 導入緊張力を定着コンクリート面積で除した導入応力 ( $\text{N/mm}^2$ )

$x$  : 定着端からの距離 (mm)

$c_p$  : 中空PC鋼棒のかぶり (mm)

次に、支圧力による応力状態について、3次元の線形有限要素法を用いて検討を行った。図-7に、解析に用いた試験体の切出し位置と解析モデルを示す。解析モデルでは、 $x-x$ 断面は  $y$ 軸方向の変形のみを拘束し、 $y-y$ 断面は  $x$ 軸方向の変形のみを拘束している。また、定着用ナット側面とコンクリートの付着は無いものと考え、ヤング係数を小さくした幅  $1\text{mm}$  の要素(すべり要素)を設け、定着用ナット要素とコンクリート要素間のせん断力の伝達を小さくしている。荷重は、定着用ナットに等分布するものとした。

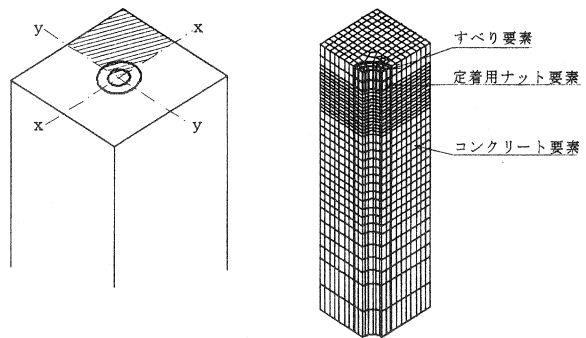


図-7 試験体切り出し位置および解析モデル図

表-4に示した付着力と支圧力の測定値を用いて、それぞれ式(4)および3次元線形有限要素法の解析値から、付着力による軸直角ひずみ分布および支圧力による軸直角ひずみ分布を求めた。計算値の一例を測定値と比較して図-8に示す。付着力による計算値と支圧力による計算値を合計した軸直角ひずみは、測定値と良く一致している。よって、軸方向ひずみも軸直角ひずみと同様に、式(5)と3次元線形有限要素法の解析値から求めることができるものと判断した。軸方向ひずみ分布および軸直角ひずみ分布の計算値から、コンクリートのポアソン比を  $0.2$  として割裂応力分布を求めた。割裂応力分布における割裂応力の最大値と導入応力の比(以下、最大割裂応力比と呼ぶ)と支圧面積比の関係を図-9に示す。同図には、3次元線形有限要素法による解析から求めた、支圧定着のみの場合についての結果を併記した。支圧面積比が大きくなると、付着力が減少し支圧力が増加するが、最大割裂応力比には支圧面積比の影響はほとんど観察されない。これは、図-8にも見られるように、本研究の範囲では、付着力と支圧力によるそれぞれの値が変化しても、その合計値は

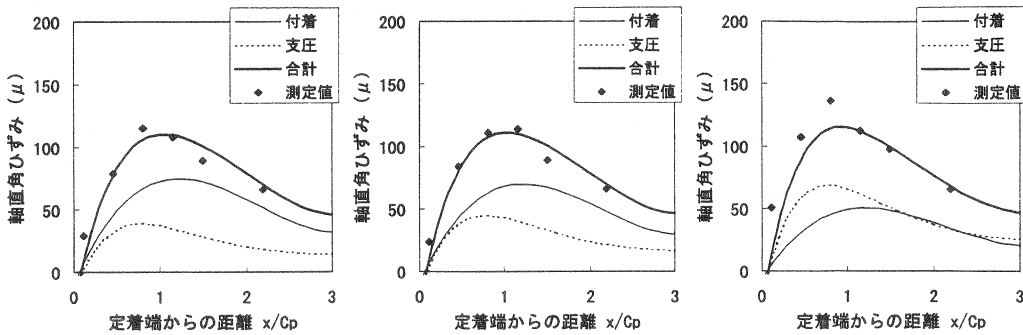


図-8 複合定着部の軸直角ひずみ分布

ほとんど変化していないことによるものと考えられる。複合定着の場合の最大割裂応力は、導入応力の 0.392 倍と、付着定着のみの場合の 0.374 倍より僅かに大きくなるものの、支圧定着のみの場合に比べて著しく小さくなっていることが分かる。

4. まとめ

本研究より得られた結果を以下にまとめる。

(1) 径が 40mm および径が 43mm の中空 P C 鋼棒ねじの付着特性は、径が 32mm の中空 P C 鋼棒ねじと同じであり、既往の提案式を用いることができる。

(2) 導入緊張力に対する付着力の比である付着分担率は、支圧面積比が大きくなるほど小さくなるが、付着分担率の低下程度は、支圧面積比を  $A_n/A_c=0.02\sim 0.1$  まで変化させた場合より、定着用ナットの有無の影響が大きい。

(3) 複合定着部に生じる軸直角ひずみは、付着力によるひずみと支圧力によるひずみの合計ひずみとして求められることを確認した。この関係を用いて求めた割裂応力分布より、複合定着の割裂応力の最大値は、付着定着のみの場合よりは大きくなるが、支圧定着のみの場合より著しく小さくなることを確認した。

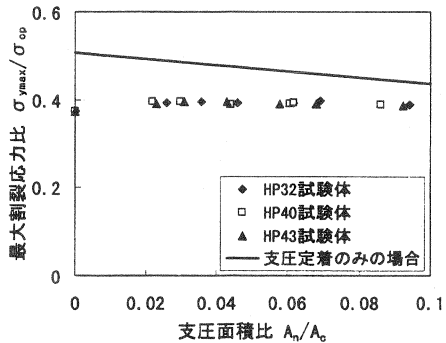


図-9 最大割裂応力比と支圧面積比の関係

参考文献

- 1) 渡辺 明, 藤井 学, 小林和夫: 新体系土木工学 プレストレストコンクリートの力学, 土木学会編, pp.83-92
- 2) 今井昌文, 出光 隆, 橋本順平: プレテンション用緊張材として用いた中空 P C 鋼棒の定着に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.521-526, 1996.7
- 3) 今井昌文, 出光 隆: 中空 P C 鋼棒ねじ部の付着性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.361-366, 1999.7
- 4) 今井昌文, 出光 隆: 中空 P C 鋼棒を使用したプレテンション部材の伝達長に関する研究, 第 9 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.479-484, 1999.10
- 5) 例えば, 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編 [平成 8 年版], pp.321
- 6) 今井昌文, 出光 隆, 横田 勉, 溝口 茂: 中空 P C 鋼棒を用いたプレテンション方式の定着に関する研究, 土木学会論文集, No.679/VI-51, pp.81-92, 2001.6
- 7) 渡辺 明: ボンド定着プレテンション部材の鋼線定着に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 25 号, pp.21-35, 1966.1