

論文

[2098] 横拘束筋を配置したアンボンド PC はりの曲げ耐荷性状

正会員 ○小林和夫 (大阪工業大学土木工学科)

正会員 仁枝 保 (大阪工業大学土木工学科)

1. はじめに

ポストテンション工法のPC構造においては、PC鋼材とシースの間隙にグラウトを注入してPC鋼材とコンクリートとの間に間接的に付着を与えると同時に、PC鋼材を防錆保護するのが普通である。しかし、最近グリース充填プラスチックシースなどで被覆したアンボンドPC鋼材を用い、グラウト注入作業が不要なアンボンドPC工法が注目されるようになり、PC施工の省力化・合理化や耐久性の向上などの面から今後の発展が期待されている[1]。

本研究は、PC鋼材断面積と緊張応力を要因とした長方形断面のアンボンドPC単純はりに対して静的載荷試験を実施し、横拘束鉄筋配置によるコンクリートの横拘束の有無が最大耐力や終局域のPC鋼材応力・変形特性などの基本的曲げ耐荷性状におよぼす影響をボンドPCはりとの比較のもとに検討したものである。

2. 試験概要

2.1 供試体の種類

供試体は、図-1、図-2に示す幅×高さ×全長=15×20×200cmの長方形断面(PC鋼棒有効高さ $d_p=14$ cm)の単純はりとし、以下の要因を選定して静的曲げ載荷試験を実施した。

(a) PC鋼材付着の有無: PC鋼棒(神鋼鋼線工業社製のC種1号-φ13, φ17)とスパイラルシースとの間隙にセメントペーストグラウトを注入したボンドタイプ(B)および同様のPC鋼棒をグリース充填プラスチックシースで被覆したアンボンドタイプ(U)の2タイプとした。

なお、グラウトは注入用高性能減水剤ポゾリスGF-700を用いてW/C=35%(早強ポルトランドセメント)とした。はり載荷試験時(プレストレス導入直後にグラウトし約1週間後に試験)のグラウト用セメントペーストの圧縮強度は405kg/cm²であった。

(b) 横拘束鉄筋の配置間隔: 図-2に示すように、横拘束鉄筋(端部に135°フック付き閉合型矩形スターラップ)の配置間隔sとして、 $s = \infty, 7.0$ cm, 3.5cmの3種類を選定し、スパン中央部49cm区間

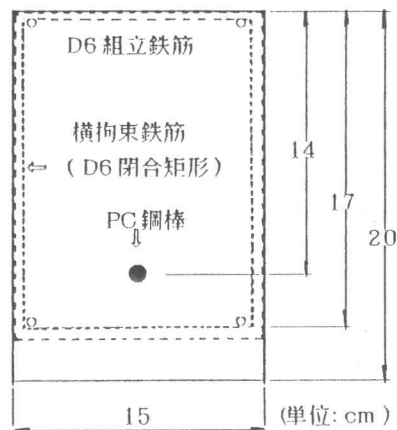


図-1 供試体断面寸法

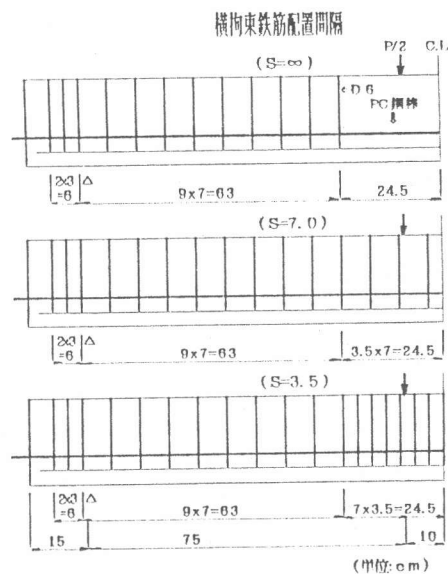


図-2 供試体の配筋図

に配置した。これらは、横拘束鉄筋比（1組の横拘束鉄筋の体積と横拘束鉄筋間隔に対応するコアコンクリート体積との比）でそれぞれ $\rho_1 = 0, 1.04, 2.07\%$ に相当する。

なお、供試体の断面寸法が小さいので、横拘束鉄筋に対するかぶりコンクリートの存在とその寸法効果の影響を除去するため、本実験では図-1に示すように断面圧縮縁および両側面に対するかぶり厚が0となるように横拘束鉄筋を配置した。

(c) PC鋼材緊張応力：プレストレス導入時のPC鋼材緊張応力がアンボンドPCはりの曲げ耐荷性状におよぼす影響を検討するため、PC鋼材緊張応力として $0.60 f_{py}$, $0.75 f_{py}$ (f_{py} : PC鋼材の実降伏点強度)の2レベルを設定した。

なお、アンボンドPCはりでは、プレストレス導入後に直ちに荷重試験を実施したため、有効プレストレスは緊張応力に等しい。一方、ボンドタイプでもプレストレス導入後約1週間で荷重試験を実施したため、この場合にも有効プレストレス力は近似的にPC鋼材の導入時緊張力に等しいとみなすことができる。

PCはりの荷重試験時におけるコンクリートの圧縮強度は、 $416 \sim 437 \text{ kg/cm}^2$ であった。

以上の要因をもとに作成したPCはり供試体の種類を表-1に示す。

2.2 荷重試験

試験は、図-2に示すようにいずれもスパン170cmの単純はりとし、せん断スパン長と曲げスパン長をそれぞれ75cm、20cmとした対称2点荷重による単調漸増荷重とし、スパン中央と両支点位置の鉛直変位、スパン中央部の曲率（250mmπ型ゲージによる）、上下縁コンクリートひずみ、PC鋼棒応力（ボンドタイプ：スパン中央部のPC鋼棒に貼布した2枚の検長3mm防水ストレインゲージによるひずみ測定値から鋼棒の応力-ひずみ関係を用いて算出、アンボンドタイプ：図-3のようにはり両端部に設置したロードセルで直接的に測定）を測定した。

表-1 PCはり供試体の種類

供試体 記号	PC 鋼材 A_p	プレストレスレベル		PC 鋼材 付着 有無	横拘束鉄筋	
		PC鋼材 緊張応力 σ_{pi}	断面下縁 カストリス (kg/cm^2)		配 置 間 隔 s (cm)	鉄筋比 ρ_1 (%)
E-1	$\phi 13$ (*1)	$0.60 f_{py}$	80	無	∞	0
E-2				無	7.0	1.04
E-3				無	3.5	2.07
E-4				有	∞	0
E-5				有	3.5	2.07
E-6	$\phi 17$ (*2)	$0.60 f_{py}$	115	無	∞	0
E-7				無	7.0	1.04
E-8				無	3.5	2.07
E-9				有	∞	0
E-10				有	3.5	2.07
E-11				無	∞	0
E-12				無	3.5	2.07

*1) $f_{py} = 142.2 \text{ kg/mm}^2$

*2) $f_{py} = 117.2 \text{ kg/mm}^2$

$f_{pu} = 149.6 \text{ kg/mm}^2$

$f_{pu} = 128.6 \text{ kg/mm}^2$

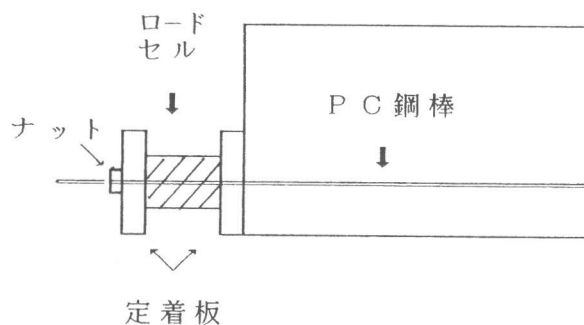


図-3 アンボンドタイプ

3. 結果と考察

3.1 結果

曲げひびわれ発生荷重、最大荷重とその時のPC鋼材応力の実験値および計算値を一括して表-2に示す。

荷重-PC鋼材応力関係、荷重-たわみ関係の代表的数例をそれぞれ図-6~10, 図-11~15に示す。

表-2, 図-9~10, 図-14~15中に併記した計算値はコンクリート, PC鋼材, D6組立鉄筋の応力-ひずみ関係を図-4のように仮定して算定した。

コンクリートの応力-ひずみ関係については、無拘束の場合には f_c 以下の低下勾配としてParkら[2]の提案による係数 Z 値を用いたが、横拘束を与えた場合には精度上著者の一人らが提案している文献[3]のモデル式を用いることとした。また、PC鋼材にはBlakeleyら[4]のモデル式を用いた。計算にあては、図-5のようにPC鋼材総引張ひずみ ϵ_p を便宜的に変形適合係数 β を用いて下式で表し、

ボンドはりでは $\beta = 1.0$ 、アンボンドはりでは既往研究[5]を参考にしてここでは近似的に $\beta = 0.25$ とした。

$$\epsilon_p = \epsilon_{p0} + \beta (\epsilon_{p1} + \epsilon_{p2}), \quad \epsilon_{p2} = \epsilon_c (d_p - X) / X$$

ϵ_{p0} : PC鋼材緊張ひずみ, ϵ_{p1} : PC鋼材位置のプレストレスによるコンクリートひずみ, d_p : PC鋼材有効高さ

3.2 考察

(1) 耐荷力

横拘束鉄筋に関係なく、PC鋼材付着の有無でひびわれ分

表-2 載荷試験結果

供試本 記号	曲げひびわれ発生荷重		最大荷重時鋼材応力			最大荷重		
	実験値 P_{cr} (t)	計算値 P_{cr} (t)	実験値 σ_{pu} (kg/cm ²)	応力増分		実験値 P_u (t)	計算値 P'_u (t)	$\frac{P_u}{P'_u}$
				実験値 $\Delta\sigma_{pu}$ (kg/cm ²)	計算値 $\Delta\sigma_{pu}$ (kg/cm ²)			
E-1	3.75	4.22	11820	3230	3840	6.57	6.44	1.02
E-2	3.03	4.20	13840	5320	5170	6.65	7.13	0.93
E-3	3.93	4.21	14390	5830	5690	7.54	7.35	1.03
E-4	3.75	3.87	12850	4280	5660	8.27	7.21	1.15
E-5	3.99	4.26	14000	5530	5330	8.09	7.46	1.08
E-6	4.65	5.02	9660	2530	2510	8.69	7.95	1.09
E-7	4.60	4.99	10280	3220	3810	8.98	8.98	1.00
E-8	5.11	4.97	11900	4900	4730	10.04	9.50	1.06
E-9	4.25	4.92	11650	4490	4200	9.96	9.04	1.10
E-10	4.50	4.89	11850	4750	4660	10.60	9.71	1.09
E-11	5.09	5.78	10690	1890	1650	9.58	8.49	1.13
E-12	5.45	5.96	11540	2740	2930	9.72	9.47	1.03

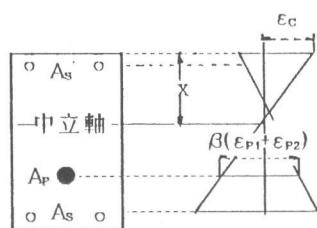
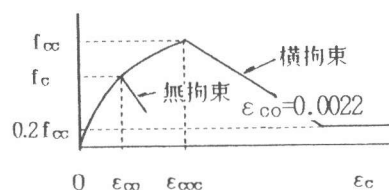
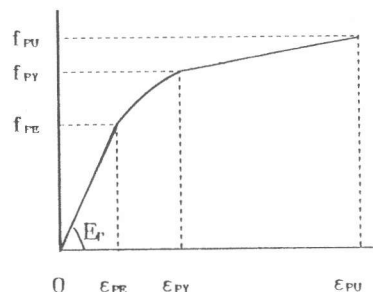


図-5 断面のひずみ分布

(1) コンクリート



(2) PC鋼材



(3) 組立鉄筋

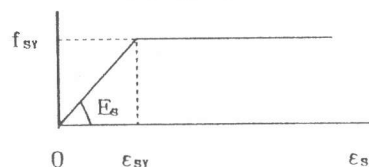


図-4 応力-ひずみ関係

散性状にはかなりの差が認められたが、曲げ破壊性状については両者で特に顕著な差異はみられず、いずれの場合にも横拘束鉄筋の配置間隔を密にするとコンクリートの圧壊が緩やかに生じ韌性に富んだ破壊性状を呈した。

表-2に示すように、曲げびびわれ耐力については、PC鋼材付着の有無や横拘束鉄筋の影響はみられない。

一方、最大曲げ耐力に関しては、横拘束鉄筋無配置の場合、アンボンドタイプではボンドタイプに比べて15~20%低下する。しかし、前者の場合は横拘束鉄筋の配置による耐力の増大が後者より顕著で、例えばPC鋼材緊張応力 $0.6 f_{py}$ の場合に3.5cm間隔($\rho_1=2.07\%$)で配置すると最大耐力は15%程度増大し、その結果両者の差は5%程度に小さくなる。このような横拘束鉄筋の配置にとともなうアンボンドPC部材の最大曲げ耐力の増大はPC鋼材緊張応力の小さい場合ほど顕著である。

さらに、前記方法で $\beta=1.0$ として求めたボンドタイプの最大耐力計算値は実験値とかなりよく一致している。一方、本供試体のアンボンドタイプでは、 $\beta=0.25$ と仮定した近似計算により、横拘束鉄筋配置間隔を密にすることによる最大耐力の増大傾向がよく説明でき、最大耐力そのものも実験値とかなりよく一致している。

(2) PC鋼材応力

横拘束鉄筋無配置の場合、図-6のように、曲げびびわれ発生以後の荷重レベルではアンボンドタイプのPC鋼材応力はボンドタイプに比べて小さく、最大荷重時には両者に著しい差が認められる。しかし、アンボンドタイプの場合、比較的低荷重レベルでの $P-\sigma_p$ 曲線には横拘束鉄筋によって明瞭な差はみられないが、配置間隔を密にし横拘束を大にするほど最大荷重時に到達しうる鋼材応力が増大し(図-9)、終局域においてはボンドタイプとの差が小さくなる(図-7)。これに対して、ボンドタイプの場合には、図-10のように最大荷重に至るまでの荷重レベルにおける $P-\sigma_p$ 曲線の形状ならびに最大荷重時のPC鋼材応力におよぼす横拘束鉄筋の影響は非常に小さい。

アンボンドタイプに対してのPC鋼材の導入緊張応力($0.6 f_{py}$, $0.75 f_{py}$)と横拘束鉄筋との関係については、図-8に示すように横拘束鉄筋が終局領域の $P-\sigma_p$ 曲線におよぼす影響はPC鋼材の緊張応力が小さい場合ほど著しくなることが認められる。

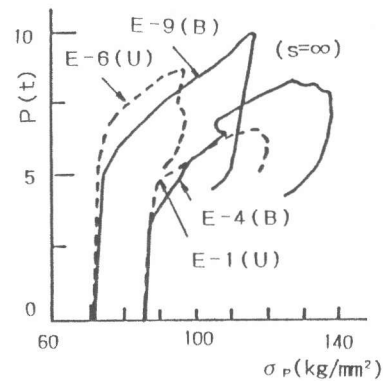


図-6 $P-\sigma_p$

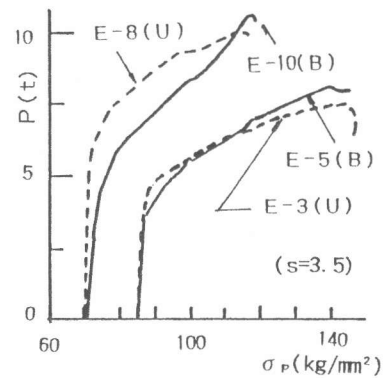


図-7 $P-\sigma_p$

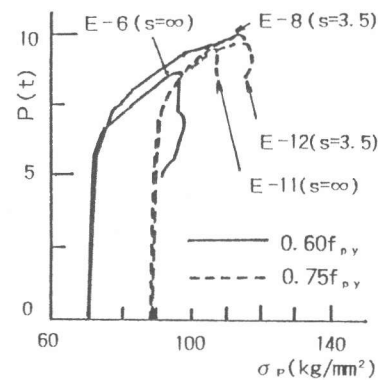


図-8 $P-\sigma_p$

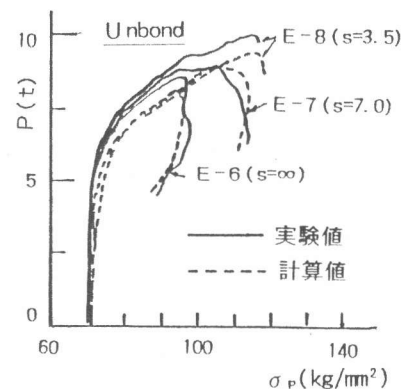


図-9 $P-\sigma_p$

本実験結果によると、アンボンドPCはり部材においても、PC鋼材係数 ($q = p f_{py} / f_c$, p : PC鋼材比, f_{py} : PC鋼材降伏点強度, f_c : コンクリート圧縮強度) が $q = 0.22$ ($\phi = 13$) ~ 0.30 ($\phi = 17$) の範囲においては、PC鋼材の有効プレストレス応力が $0.6 f_{py}$ 程度でも $\rho_1 = 2\%$ の横拘束鉄筋の配置により部材の終局状態には鋼材の降伏点強度に等しい応力にまで到達し、前記のように最大耐力もかなり増大する。

一方、図-9, 10に示すように、PC鋼材の変形適合係数 β をボンドタイプでは $\beta = 1.0$ 、一方アンボンドタイプでは本供試体の場合は近似的に $\beta = 0.25$ と仮定することによって、最大荷重に至るまでの荷重域およびそれ以降の $P - \sigma_p$ 曲線をかなりの精度で求めることができる。また、表-2のように、最大荷重到達時のPC鋼材応力実験値に及ぼすPC鋼材付着と横拘束鉄筋の影響もこのような方法でかなりよく推定できる。

(3) 荷重-たわみ関係

横拘束鉄筋無配置の基本部材について、アンボンドタイプとボンドタイプの $P - \delta$ 関係を比較すると、図-11に示すように前者は後者に比べて最大耐力が低下するとともに、曲げひびわれ発生以後から最大耐力に至る荷重域での部材剛性も次第に低下することが明瞭に認められる。特に、この傾向はPC鋼材量が少ない場合に顕著である。最大耐力時のたわみはボンドタイプの方が大きくなる傾向にあるが、ボンドタイプはアンボンドタイプに比べて最大耐力以後のフォーリングブランチ領域における $P - \delta$ 曲線の低下勾配がやや急激で、この点から評価した場合の部材靱性に関してはむしろアンボンドタイプの方が大きいようである。特に、この傾向はPC鋼材量の多い場合に顕著である。

次に、横拘束鉄筋の配置効果に関しては、アンボンドタイプの場合、無拘束に対応する最大耐力までの荷重域では横拘束鉄筋による $P - \delta$ 曲線の差はみられない。しかし、横拘束鉄筋の配置間隔を密にすると最大耐力が増大すると同時に、配置間隔を 3.5 cm ($\rho_1 = 2.07\%$) と横拘束を非常に大きくするときわめて大きな変形領域まで耐力低下を生じず、きわめて靱性の優れた耐荷性状を示す。また、配置間隔を 7 cm ($\rho_1 = 1.03\%$) とした場合には、無拘束のものと比較すると最大耐力の増加は非常に小さいが、部材靱性そのものは著しく改善さ

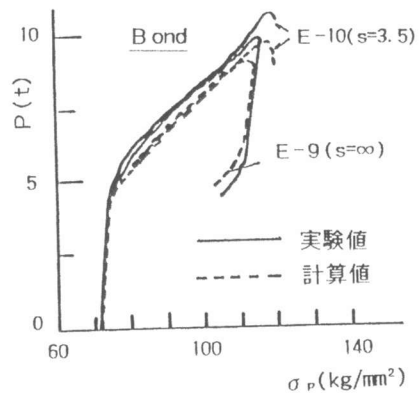


図-10 $P - \sigma_p$

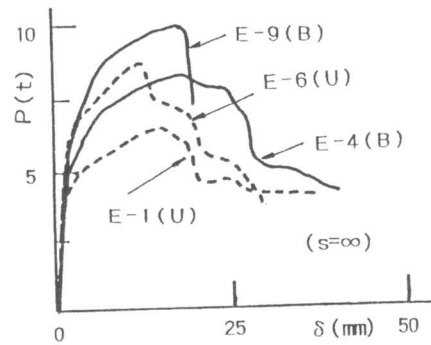


図-11 $P - \delta$

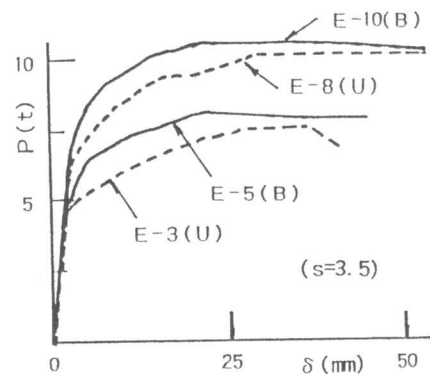


図-12 $P - \delta$

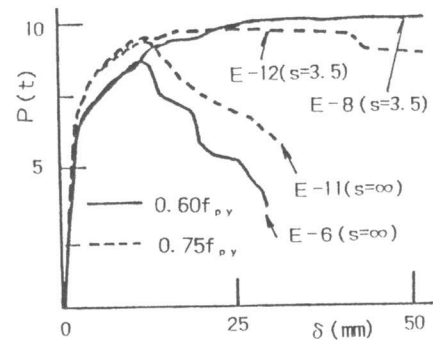


図-13 $P - \delta$

れることが認められる(図-14)。一方、ボンドタイプについては、横拘束鉄筋を3.5cm間隔で配置しても最大耐力の増加はほとんど期待できないが、部材靱性そのものはアンボンドタイプの場合と同様にやはり大幅に改善されることがわかる(図-15)。なお、本実験結果では横拘束鉄筋の配置による曲げ部材靱性の改善効果に関しては、アンボンドタイプとボンドタイプの両者で特に顕著な差異はみられない。

さらに、アンボンドタイプの場合、図-13のように、横拘束鉄筋無配置の場合にはPC鋼材緊張応力によって最大耐力が異なりP- δ 曲線もかなり相違するが、横拘束鉄筋を3.5cm間隔で配置した場合には $0.6 f_{PY}$ と $0.75 f_{PY}$ の間での差異はきわめて小さい。

図-14、15に示すように、全体的にみると横拘束鉄筋の多少によるP- δ 曲線の相違は、先に述べた方法によってよく推定できる。

4. 結論

本研究から得られた主な結果をまとめると、以下のようである。

- (1) アンボンドタイプの場合は横拘束鉄筋の配置にともなう最大曲げ耐力の増大がボンドタイプの場合より著しい。この傾向は、PC鋼材緊張応力の小さい場合ほど顕著である。
- (2) ボンドタイプでは最大荷重に至る荷重-PC鋼材応力曲線は横拘束鉄筋にほとんど影響されないのに対し、アンボンドタイプでは横拘束を大きくするほど最大荷重時の鋼材応力が増大する。後者の傾向は、PC鋼材の緊張応力が小さい場合ほど顕著である。
- (3) 鋼材係数が0.3程度以下のアンボンド部材では、PC鋼材の有効プレストレスが $0.6 f_{PY}$ 程度でも2%程度の横拘束鉄筋を配置すれば、終局時鋼材応力は降伏強度に到達する。
- (4) ボンドタイプはアンボンドタイプに比べ剛性が大きい。無拘束の場合は最大耐力以降の荷重-たわみ曲線の低下勾配は後者よりやや急激となる。後者の場合、1%程度の横拘束筋比では終局時鋼材応力や耐力の増加はさほど大きくないが、靱性は著しく改善される。
- (5) 本供試体の場合、アンボンド鋼材の変形適合係数を0.25とすることにより横拘束鉄筋の多少によるフォーリングブランチ域を含めた耐荷性状の相違をかなりよく推定できた。

[参考文献]

- 1] 日本コンクリート工学協会：プレレストコンクリートの利用性追求研究委員会報告書-プレストレス技術の現状と将来への展開，1991.7
- 2] Park, R. and Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Inter. Pub., 1975
- 3] 藤井学・小林和夫・宮川豊章・井上晋・松本利彦：横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係の適用に関する検討，セメント技術年報，42巻，1988
- 4] Blakeley, Roger W.G. and Park, R.: Prestressed Concrete Sections with Cyclic Flexure, Jour. of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No. ST-8, Aug. 1973
- 5] 六車 照・渡辺史夫・西山峰広：アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究，プレレストコンクリート，Vol.26, No.1, Jan. 1984

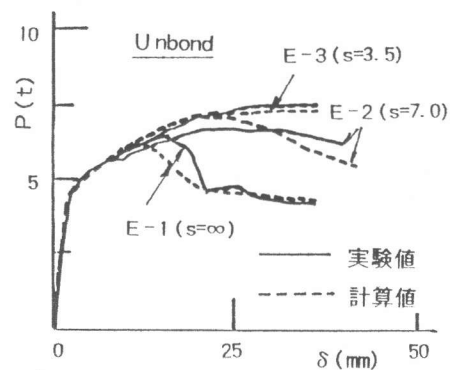


図-14 P- δ

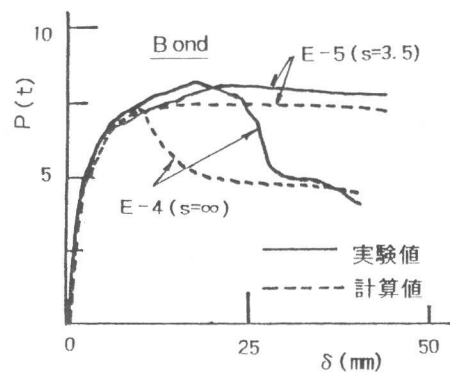


図-15 P- δ