

論文 三次元拘束による PC 部材の曲げ特性

周 平*1・米倉 亜州夫*2・田澤 栄一*3・森本 英樹*4

要旨：鋼管またはCFRPパイプで三次元的に拘束される円形PC梁部材の曲げ特性を把握するために、コンファインドコンクリートの性状が曲げ特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、鋼管で拘束した場合プレストレス導入の影響は見られないが、CFRPパイプで拘束した場合変形状についてプレストレス導入の効果がみられる。

キーワード：三次元拘束, プレストレス, ケミカルプレストレス, 剛性, 拘束度

1. はじめに

鋼管または、炭素繊維製(以下CFRPと称す)パイプ内にコンクリートを打設し、パイプ軸方向に内部コンクリートのみにPC鋼棒でプレストレスを与えると、拘束体のコンファインド効果によってコンクリートは強度および靱性が大幅に増大する。このような三次元拘束されたPC部材は、破壊に至るまで十分な変形能力を持つことが明らかになっている [1]。そのため、極めて地震に強い構造が得られる。しかし、内部にプレストレスが導入されたコンクリートの性状が部材変形に及ぼす影響について明確にはなっていない。そこで、本研究では、内部コンクリートの応力状態が異なる場合の三次元拘束PC部材の曲げ特性を把握するため、内部コンクリートに導入するプレストレスをパラメータとし、PC鋼棒によりプレストレスを与えた場合と膨張材によりケミカルプレストレスを与えた場合について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

鋼管およびCFRPパイプ 鋼管はSTPG370S-Hを使用し、外径165mm、厚さ5.5mmである。表-1

表-1 鋼管の引張試験結果

厚み (mm)	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
5.5	427	247	199	0.27

に使用した鋼管から切り出した切片の引張試験結果を示す。

表-2 CFRPパイプの機械的性質

積層方法	軸方向			周方向		
	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
±10°/90°	586	74.6	0.105	692	61.7	0.171

CFRPパイプはCFRPシートをマンドレル

にパイプ状に巻きエポキシ樹脂で固めたもので、外径157mm、厚さ3.5mmである。使用したCFRPパイプの繊維積層方法は、パイプと軸方向の繊維方向のなす角度が内側から±10°および90°の2方向で巻かれ

表-3 コンクリート及び膨張コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	E	S	G	Ad
65	43	174	284	-	786	1039	15.2
30	40	155	439	77.5	641	961	2.58
30	40	155	439	154.8	641	961	2.58

*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻, 工修 (正会員)

*2 広島大学教授 工学部第四類(建設系), 工博 (正会員)

*3 広島大学教授 工学部第四類(建設系), 工博 (正会員)

*4 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻

ており、 $\pm 10^\circ$ (1.0mm), 90° (0.75mm)の順に4層積層している。表-2に使用したCFRPパイプと同様な積層方法のCFRPシートの機械特性を示す。

コンクリートおよび膨張コンクリートコンクリートはセメントに早強ポルトランドセメントを用い最大寸法20mmの粗骨材を使用した。膨張コンクリートには、膨張材として静的破碎剤を用い、膨張材をセメントに対して内割りで15%と30%の2種類使用した。表-3にコンクリートの配合を示す。

PC鋼棒およびシース PC鋼棒はC種1号の直径32mmを用い、シースはPC鋼棒の直径に合わせて40mmのものを使用した。

2.2. 使用供試体

供試体は拘束体にコンクリートを充填した後に材齢7日でPC鋼棒によって内部コンクリートの中にプレストレスを導入したものと膨張コンクリートを打設し、ケミカルプレストレスを導入したものの2種類である。コンクリートの打設は、拘束体を専用の打込み台に固定し上部から行い、本研究では、プレストレス導入時に拘束体に応力が発生しにくくするため、拘束体の内側に付着低減剤としてアスファルトを塗布したアンボンド型とした。プレストレス量は内部コンクリートの一軸圧縮強度の約半分から1.5倍程度

まで導入している。グラウトは、緊張終了後すぐに行い、曲げ載荷試験は材齢14日で行った。表-4に供試体一覧及び供試体の略記方法を示す。膨張コンクリートを用いた場合、PC鋼棒は配置したが緊張は行わず、膨張コンクリートのケミカルプレストレスは、材齢14日の計測値とした。

2.3. 実験方法

曲げ載荷試験は図-1に示すようにスパン1500mm、曲げスパン200mmの2点載荷で行い、載荷点は面タッチになるように治具を設置して行った。

測定は、荷重値、曲げスパン中央の拘束体のひずみおよびコンクリート、PC鋼棒のひずみ、支点およびスパン中央の鉛直変位について測定した。

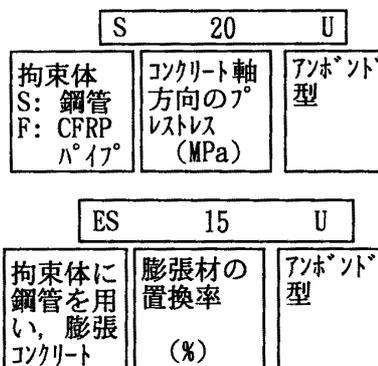
3. 実験結果および考察

3.1 ひずみ分布

供試体のスパン中央断面のひずみ分布の一例を示したものが図-2である。図中の印が測定点であり、断面の鉛直方向の位置(供試体図心から測定点までの距離)における拘

表-4 供試体一覧

円柱供試体の圧縮試験結果				梁供試体	
名称	圧縮強度 (Mpa)	弾性係数 (Gpa)	ポアソン比	有効プレストレス(Mpa)	
				軸方向	半径方向
S00U	21.3	22.5	0.17	0	0
S10U	22.7	21.6	0.17	11.2	0.6
S20U	22.7	21.6	0.17	16.5	1.9
S40U	23.4	22.6	0.16	25.6	5.4
F00U	20.4	20.8	0.16	0	0
F10U	21.9	21.6	0.16	10.8	0.3
F20U	21.9	21.6	0.16	15.4	2.3
F40U	21.3	22.5	0.17	19.7	3.3
ES15U	-	-	-	12.0	6.2
ES30U	-	-	-	8.6	10.0
C0	PC鋼棒を配置し、緊張しない無拘束体の供試体				
S65U	21.6	24.6	0.19	W/C=65%, 圧縮試験	
S30U	72.4	36.3	0.212	W/C=30%, 圧縮試験	



供試体の略記方法

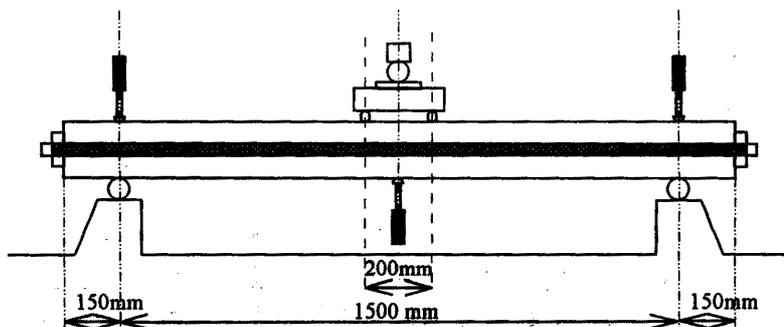


図-1 載荷方法

束体上下縁および内部充填コンクリートの軸方向ひずみ、PC鋼棒の軸方向ひずみを表す。これらの図より鋼管で拘束した場合は、荷重の初期段階では、ひずみに大きな変化がみられないが、鋼管上下縁のひずみとコンクリートおよびPC鋼棒のひずみは、直線的に分布しており、鋼管上縁に座屈が生じるまでは平面保持則が成り立ち、鋼管とコンクリートの付着を低減しているにもかかわらず両者が一体として機能していることが確認された。また、CFRPパイプで拘束した場合、弾性係数が鋼管の場合より小さいため荷重の初期段階からひずみが増大しているが鋼管の場合と同様にひずみ分布は直線的であり、平面保持則が成り立つ。

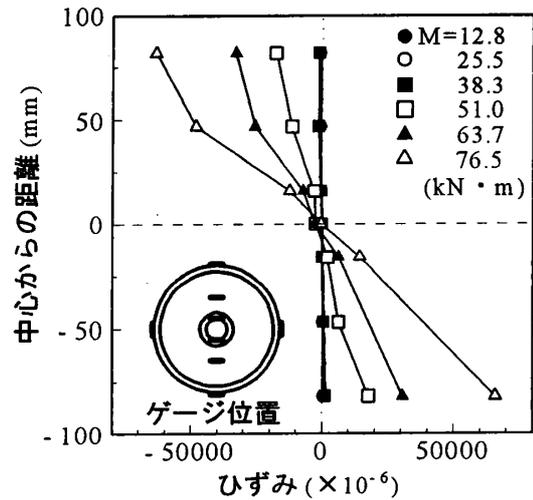


図-2 S20U のスパン中央のひずみ分布

3.2 鋼管で拘束した場合の変形状

図-3および図-4に鋼管で拘束した供試体のスパン中央における荷重-たわみ関係と式(1)で表される曲率と曲げモーメントの関係を示す。いずれの供試体とも荷重が増加するにつれて、鋼管の端部から内部充填コンクリートが抜け出してくるが急激な剛性低下もなく、大変形になっても耐力が低下せず、荷重装置のクリアランスの限界まで変形した。そのたわみ量はスパンの約1/10にも達した。このような大変形能力は通常のRCやPC梁にはないものである。しかし、プレストレス量については、耐力および変形能力についての差異はほとんどみられなかった。

$$\phi = \frac{\epsilon_t - \epsilon_c}{D} \tag{1}$$

ここで、 ϕ : 拘束体の曲率, ϵ_t , ϵ_c : 拘束体の引張縁, 圧縮縁のひずみ, D : 拘束体外径

3.3 CFRPパイプで拘束した場合の変形状

CFRPパイプで拘束した場合荷重をある程度増大させた時点で荷重点付近でCFRPの輪切り状の破断がおこり、終局耐力の測定は不可能であった。そこで、破断までのスパン中央の荷重-たわみ関係、および曲げモーメント-曲率の関係を図-5および図-6に示す。図-5によると内部コンクリートに導入したブ

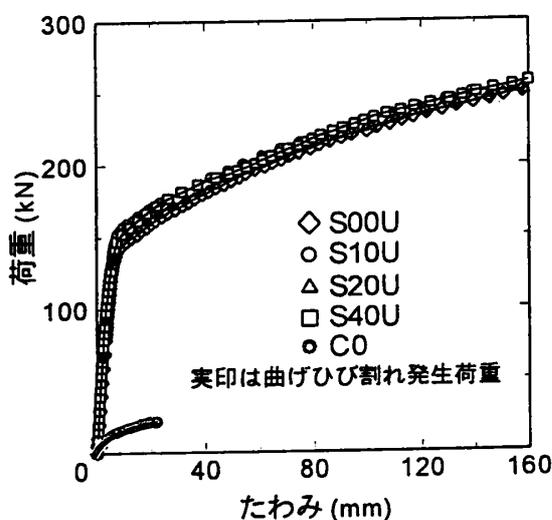


図-3 荷重-たわみ関係(鋼管)

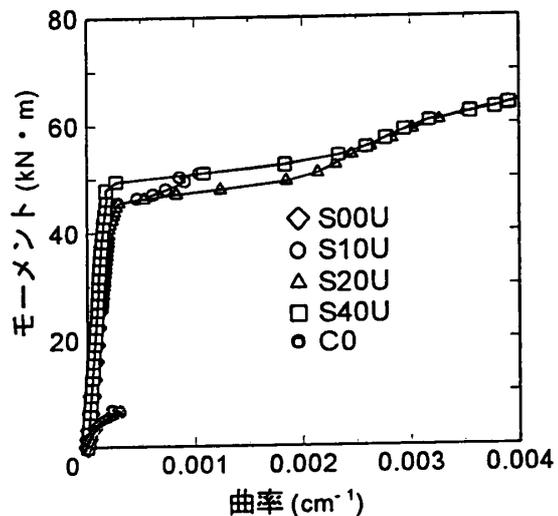


図-4 モーメント-曲率関係(鋼管)

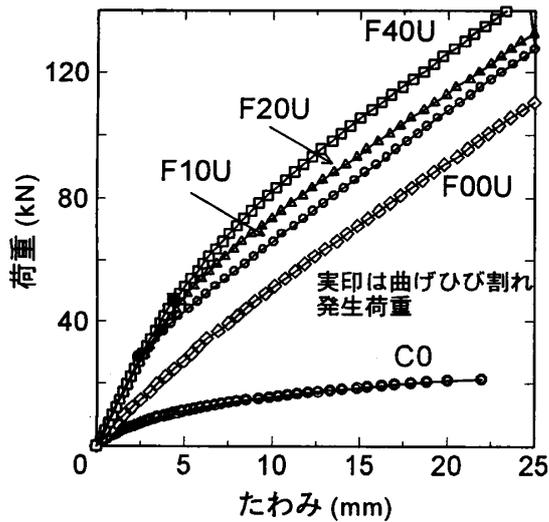


図-5 荷重-たわみ関係(CFRP パイプ)

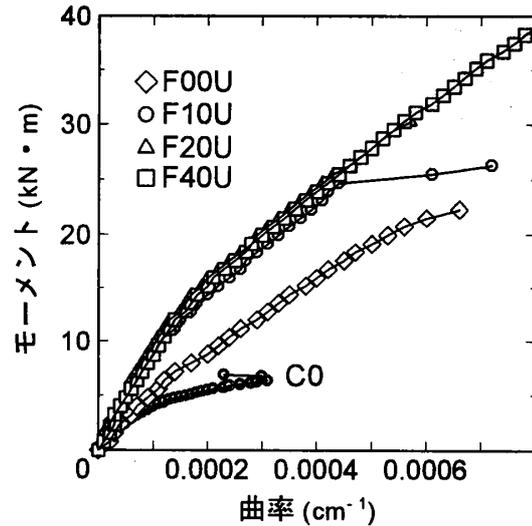


図-6 モーメント-曲率関係(CFRP パイプ)

レストレス量が大きいほど同一荷重におけるたわみが小さく、プレストレス導入の効果が認められるが、曲げモーメント-曲率の関係では、プレストレス導入による差異がみられない。これは、前述したようにCFRPパイプは載荷中に載荷点付近で軸方向と90°に輪切り状に破断するので、はりのたわみは増大するが、完全な放物線状のたわみにならないためスパン中央のひずみの比で求める曲率はあまり変化しないことが考えられる。また、図-3~図-6に示しているように、PC鋼棒を配置し緊張しない無拘束体の梁供試体C0では、拘束体がないため、コンクリートが三軸状態になっていない、ひびわれが発生する後曲げ剛性が急に低下し、破壊荷重がS00U（鋼管で拘束）の1/10程度、F00U（CFRPパイプで拘束）の1/5程度となった。

3.4 コンクリートの曲げひび割れ発生の影響

内部コンクリートの曲げひび割れ発生荷重 P_{cr} を式(2)で表すと、図-3に示すように鋼管で拘束した場合は内部充填コンクリートのひび割れ発生後も鋼管が降伏するまでプレストレスの相違によるたわみ性状に違いはみられない。しかし、図-5に示すようにCFRPパイプで拘束した場合、曲げひび割れ発生荷重以前の曲線のたちあがり部分については、プレストレス導入量の大きさに関わらずほぼ一致しているが、曲げひび割れ発生荷重以後は、たわみの勾配が変化して、プレストレスを導入していないF00Uとほぼ同じ傾きとなっている。このことから、プレストレスを導入したことにより内部充填コンクリートの剛性が向上することと導入したプレストレスの大きさが大きいほどひび割れ発生荷重が増加し、同一荷重におけるたわみが小さくなることが分かる。

$$P_{cr} = \frac{2M_{cr}}{l} = cZ_e(c\sigma_t + \sigma_{ce}) \quad (2)$$

$$cZ_e = \frac{cI_e}{D_c} \quad (3)$$

ここで、 M_{cr} ：曲げひび割れ発生モーメント、 l ：せん断スパン、 Z_e ：換算断面、 $c\sigma_t$ ：曲げ引張強度、 σ_{ce} ：有効プレストレス、 cI_e ：断面2次モーメント、

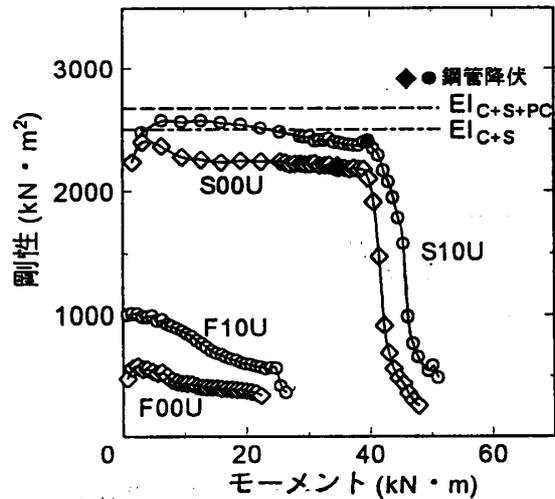


図-7 曲げ剛性とモーメントの関係

D_c : コンクリートの直径

3.5 曲げ剛性および拘束度

外力による曲げモーメントと式(1)で表される曲率の比をはり部材の曲げ剛性として定義し、曲げ剛性とモーメントの関係の一例を示すと図-7のようになる。鋼管で拘束した場合、本研究ではPC鋼棒が供試体断面の中央に配置されているため、引張縁の補強筋として作用していない。そのため鋼管が降伏したのち曲げ剛性は急激に減少している。しかし、CFRPパイプで拘束した場合、鋼管で拘束した場合と比較して曲げ剛性は、4割程度であるが、急激な剛性の低下はみられない。

また、鋼管とCFRPパイプは弾性係数の違いを、弾性係数と拘束体の外内径比で表される拘束度を式(4)で表すと、鋼管は15.27GPa、CFRPパイプは3.06GPaとなる。このことから、CFRPパイプで拘束した場合、鋼管と比較して、剛性および拘束度が小さいので内部コンクリートの挙動に影響を受けやすいと考えられる。

$$R = \frac{E(k^2 - 1)}{\{k^2 + 1 - \sqrt{2 - k^2}\}} \quad (4)$$

ここで、 E : 拘束体の弾性係数、 ν : 拘束体のポアソン比、 k : 外径/内径

3.6 膨張コンクリートの中心軸圧縮試験による 応力-ひずみ関係

梁供試体の膨張圧 (p) は、鋼管に貼付したひずみゲージにより測定したひずみから、厚肉円筒理論 [2] を用いて式(5)で求めた。図-8に膨張圧の経時変化を示す。

$$p = \frac{E_s(k^2 - 1)}{2(1 - \nu_s^2)k^2} (s\varepsilon_\theta + \nu_{ss}\varepsilon_z) \quad (5)$$

ここで、 $s\varepsilon_\theta$, $s\varepsilon_z$: 鋼管の周方向、軸方向ひずみ

供試体は、鋼管によって円周方向に拘束するだけでなく鋼板によって上下方向にも拘束しているため、内部コンクリートは拘束され緻密となり圧縮強度が向上する。そのため、拘束条件が異なった場合これらの把握が困難なため、本研究では同時に同外径で長さ60cmの膨張コンクリート充填鋼管を作成し圧縮試験を行い、図-9に示す充填膨張コンクリート(ES15UとES30U)の応力-ひずみ関係を示した。図中のS30UおよびS65Uは、鋼管に充填したコンクリートと同様な中心軸圧縮試験で求めた膨張コンクリートと同じ水セメント比のコンクリート ($f_c' = 71\text{MPa}$) 及び水セメント比65%の鋼管に充填したコンクリート ($f_c' = 22\text{MPa}$) の応力-ひずみ関係である。

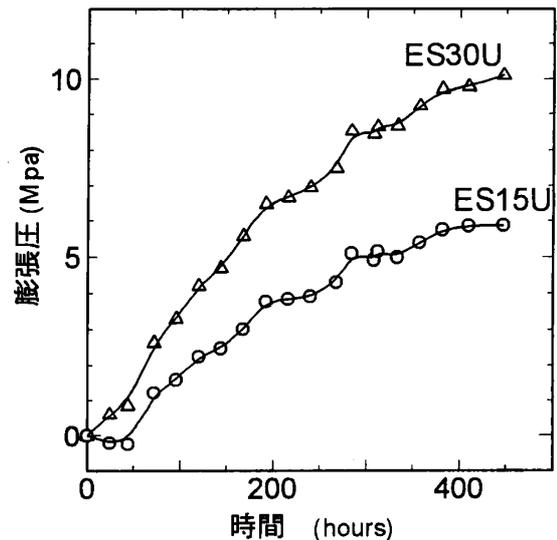


図-8 膨張圧の経時変化

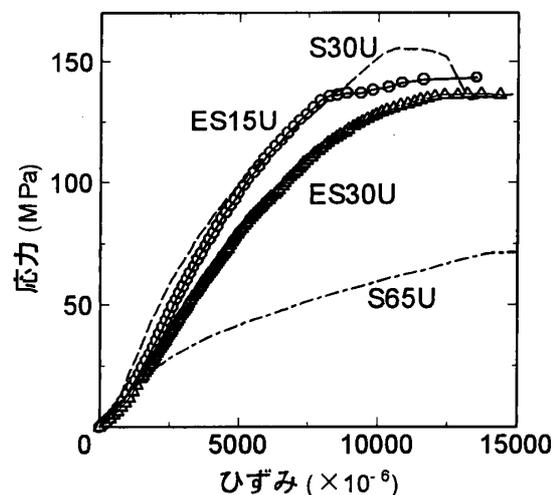


図-9 鋼管で拘束した膨張コンクリートの
応力-ひずみ関係

(1) 鋼管の応力

圧縮試験中の鋼管の応力は、鋼管に貼付した2軸ひずみゲージから荷重前の膨張圧によって生じた応力を考慮し、軸方向および周方向応力を平面応力状態と仮定してMisesの降伏条件とPrandtl-Reussの流れ則を用いて求めた [3]。

(2) コンクリートの応力

コンクリートの応力は、(1)のところで求めた鋼管の軸応力から膨張圧によって生じていた軸応力を差し引き、圧縮試験中の鋼管の分担荷重を荷重中の鋼管の軸応力から求め、全圧縮荷重からコンクリート分担荷重を導いた。このような方法でコンクリートの応力ひずみ関係を求めた場合、鋼管の降伏やコンクリートと鋼管との付着応力など明確でない点が多く、コンクリートと鋼管の分担荷重を正確に分離することが困難である。しかし、大体の傾向は示されていると思われる。

3.7 膨張コンクリート充填鋼管梁の曲げ変形状

図-10に膨張コンクリート充填鋼管の荷重-たわみ曲線を示す。ES30UとES15Uではケミカルプレストレスが異なるが、たわみ性状に相違がみられず、PC鋼棒によってプレストレスを導入した場合と同様、拘束体に作用する側圧の大きさが変形状に及ぼす影響は小さい。しかし、プレストレスを導入した供試体と異なり、膨張コンクリートの場合、膨張圧により鋼管の軸方向に引張ひずみが生じており、曲げ荷重試験によって下縁では他の供試体と比較して早く降伏するにも関わらず、同一荷重でのたわみは小さい。これは、図-9に示すように内部コンファインドコンクリートの剛性および圧縮強度が三次元拘束によって増大するためと考えられる。

4. 結論

(1) 鋼管で拘束したPC部材の曲げ特性は、内部コンクリートのプレストレス量およびひび割れの影響を受けず、プレストレス導入の効果がみられない。鋼管で拘束した場合、鋼管の剛性および拘束度が過大になっているためと思われる。

(2) CFRPパイプで拘束したPC部材の曲げ特性は、プレストレス量が大きいほど内部コンクリートのひび割れ発生荷重が増大し、同一荷重でのたわみは小さくなる。

(3) 鋼管内に水結合材比30%の膨張コンクリートを充填しケミカルプレストレスを導入した場合、PC部材の曲げ特性は、水セメント比65%の普通コンクリートを用いた場合と比較して、ひび割れ発生後のたわみが約1/2程度となった。

【謝辞】

本研究は、広島大学と企業4社との共同研究である「SUPCOM」の研究の一環として行われたものであり、実験に際しては学部生の久山浩蔵君の協力を得た。ここに記して感謝致します。

【参考文献】

- [1] 小林将志ほか：プレストレスト鋼管コンクリート耐荷力試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.2, pp737-742, 1995
- [2] 原田哲生ほか：静的破砕剤の膨張圧測定方法と膨張圧の諸性質，土木学会論文集，No.478, pp91-100, 1993.11.
- [3] 藤井堅ほか：ボンド型およびアンボンド型モルタル充填鋼管柱の座屈強度特性，鋼構造論文集，Vol.1, No.2, pp47-56, 1994

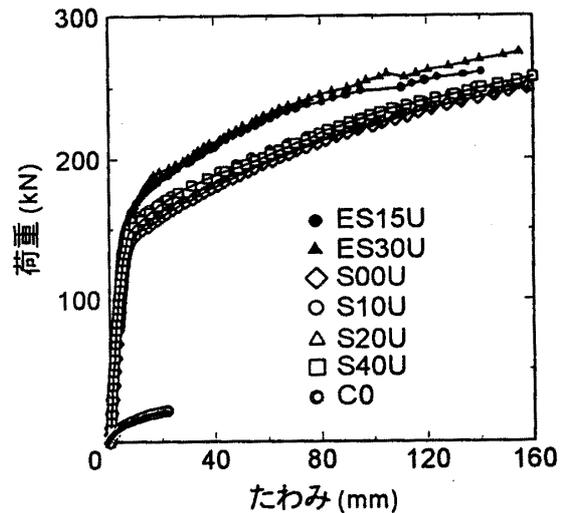


図-10 膨張コンクリート充填鋼管の荷重-たわみ関係