

コンクリート充填鋼管はりの 静的および重錘衝撃実験

前川幸次¹・吉田 博²

¹正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

²正会員 工博 代表取締役 株式会社 エイ・シー・デイ (〒939-13 砺波市豊町4-7)

本研究は、コンクリートを充填した円形鋼管柱を、落石防護柵の支柱に適用することを目的に、数種の鋼棒、すなわち、異型鋼棒、ボンド型PC鋼棒およびアンボンド型PC鋼棒で補強したコンクリート充填鋼管はりの落錘式衝撃曲げ載荷実験を行ない、同時に、静的曲げ載荷実験を行なうことにより、落石防護柵に落石が衝突したときの挙動特性と支柱のエネルギー吸収能に対する検討を行なったものである。

本研究より、コンクリート充填鋼管はりの引張側に適量のアンボンド型のPC鋼棒を配置し、その両端を定着したものが耐力およびエネルギー吸収能とも優れていることが明らかとなった。

Key Words : energy absorption, concrete-filled tubular beam, impulsive load, tendon, ductility, load-carrying capacity

1. はじめに

近年、橋脚や建築構造物に鋼管コンクリート構造を採用するケースが増えている。それは鋼管コンクリート構造が優れた耐震性能を有することによる。すなわち、鋼管とコンクリートの合成効果により部材剛性が向上するだけでなく、それらの相互効果によって鋼管の局部座屈やコンクリートの圧潰が妨げられるため高強度・高靱性となりエネルギー吸収能が高くなるのである。そのような観点から、軸力と曲げを受ける鋼管コンクリート部材の静的実験^{1)~4)}や繰り返し載荷実験等^{5)~10)}が数多く行われている。

また、物体が直撃するような構造物においては、鋼管にコンクリートを充填することによる効果が著しいことも報告されている^{11), 12)}。衝撃荷重が作用する構造物の一つに落石防止柵¹³⁾や防護柵¹⁴⁾がある。これらは他の道路構造物とは異なり、衝撃吸収エネルギーに基づく設計が行われている。したがってこのような構造物においては、鋼管コンクリート部材の優れたエネルギー吸収能と耐衝撃性能を有効に利用できる。著者らはコンクリートを充填した円形鋼管を落石防止柵の支柱に適用することを目的とし、支柱の高強度・高靱性化のために種々のPC鋼棒で補強したコンクリート充填鋼管の静的曲げ実験を行い、

その挙動特性および曲げ耐力の評価方法について報告した¹⁵⁾。

本研究では数種の鋼棒で補強したコンクリート充填鋼管はりの落錘式衝撃曲げ載荷実験を行い、同時に静的曲げ載荷実験を行うことにより、その挙動特性とエネルギー吸収能に対する比較検討を行った。

2. 実験概要

(1) 実験計画と試験体

鋼棒により補強されたコンクリート充填(円形)鋼管はりの挙動を調べるために、先に行なった実験¹⁵⁾から得られた知見を基に以下の項目に着目して実験計画を立てた。

- a) コンクリート充填の有無
- b) PC鋼棒量(PC鋼棒の有無、本数)
- c) PC鋼棒の付着の有無(ボンド型PC鋼棒とアンボンド型PC鋼棒)
- d) 鋼棒の材質(ボンド型PC鋼棒と異径鉄筋)
- e) 載荷方法(静的載荷と落錘衝撃載荷)

試験体に用いた材料は、一般構造用炭素鋼鋼管(STK400: ϕ 139.8×4.2mm)、PC鋼棒(C種1号: ϕ 13 mm)、異径鉄筋(SD295: D22mm)、普通コンクリート(設計基準強度29.4MPa, 最大粗骨材25

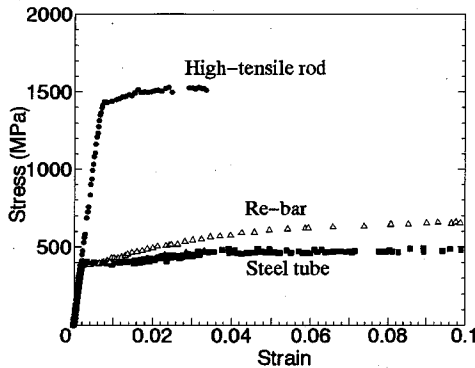


図-1(a) 応力-ひずみ関係 (鋼材)

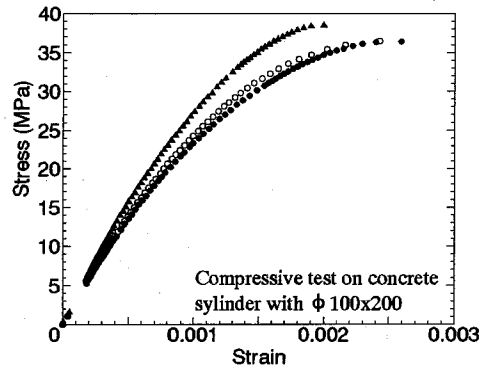


図-1(b) 応力-ひずみ関係 (コンクリート)

表-1 使用鋼材の物理的性質

Material	Size(mm)	E(GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	F_y (kN)	F_u (kN)	L.E.(%)
Steel tube	$\phi 139.8 \times 4.2$	198.9	399	486	—	—	35
high-tensile rod	$\phi 13$	207.8	1448	1540	192	204	9
deformed re-bar	$\phi 22$	206.8	393	629	149	239	36

note: E = Modulus of elasticity, σ_y = Yield stress, σ_u = Ultimate stress

F_y = Yield strength, F_u = Ultimate strength, L.E. = Limit of elongation

表-2 コンクリートの配合および物理的性質

W/C (%)	Unit weight (kgf/m ³)			
	Water	Cement	Sand	Gravel (≤ 25 mm)
53	175	330	797	1049
Strength (MPa)	Average		Standard deviation	
Compressive f_c	36.32		2.82	
Tensile f_t	2.80		0.29	

note: Modulus of elasticity $E_c = 27.6$ GPa

mm)である。図-1(a)および(b)には、それぞれ鋼材およびコンクリートの材料試験における応力-ひずみ関係の例を示す。表-1は鋼材の機械的性質を示しており、鋼管がJIS12B号試験片、PC鋼棒と鉄筋がJIS14号A試験片による各々2本の引張試験結果の平均値である。また、表-2はコンクリートの配合および機械的性質を示している。試験体製作日を4回に分けて行ったので、各々について6本の円柱供試体 ($\phi 10 \times 20$ cm)を作製し、35~45日の室内養生後に圧縮試験と割裂試験を行った結果の平均値と標準偏差を示した。なお、試験体への載荷実験はコンクリート打設から35日以後に行ったが、コンクリートの材料試験日とは必ずしも一致していない。

試験体の製作は、直立させた長さ2mの鋼管に所定の鋼棒を配置し、上部からパイプレータをかけながらコンクリートを打ち上げた。試験体は7種類

(A~G)で、各種類について静的載荷試験に1体(Sシリーズ)と落錘衝撃載荷試験に3体(Iシリーズ)を製作した。それらの仕様は次の通りであり、断面構成諸元を図-2(a)に示す。

TYPE-A: コンクリートとPC鋼棒を完全付着させるために、 $\phi 13$ のボンド型PC鋼棒(全ネジPC鋼棒)2本を配置した。つまり、高強度鉄筋による補強を行ったコンクリート充填鋼管と言える。

TYPE-B: $\phi 13$ のボンド型PC鋼棒1本を配したコンクリート充填鋼管で、その他はTYPE-Aと同じ。

TYPE-C: コンクリートとPC鋼棒の付着を無くするために、 $\phi 13$ のアンボンドPC鋼棒(瀝青材を塗ったPC鋼棒)を用い、その鋼棒2本をTYPE-Aと同じ位置に配置した。なお、はりの両端では25mm厚の鋼板とナットを用いて定着したが、プレストレスは導入していない。

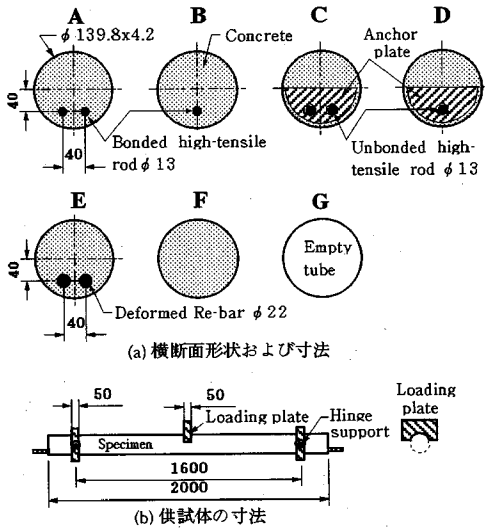


図-2 供試体の形状および寸法

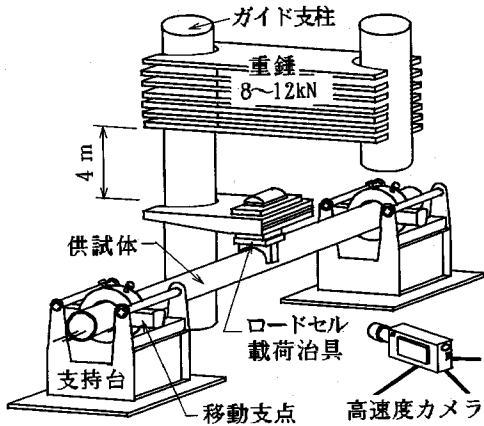


図-3 落錘衝撃試験装置

TYPE-D : $\phi 13$ のアンボンドPC鋼棒1本を配したコンクリート充填鋼管で、その他はTYPE-Cと同じ。
 TYPE-E : $\phi 22$ の異径鉄筋2本をTYPE-Aと同じ位置に配置した。TYPE-AおよびCのPC鋼棒とTYPE-Eの鉄筋の公称引張強度(力)がほぼ同程度になるようにD22を用いた。ただし、材料試験の結果から、D22の鉄筋の引張強度は $\phi 13$ のPC鋼棒の約1.17倍であった。
 TYPE-F : 鋼棒による補強を行わないコンクリート充填鋼管。
 TYPE-G : 中空鋼管。
 なお、供試体にはその他の付属物(ダイヤフラム等)を取り付けていない。

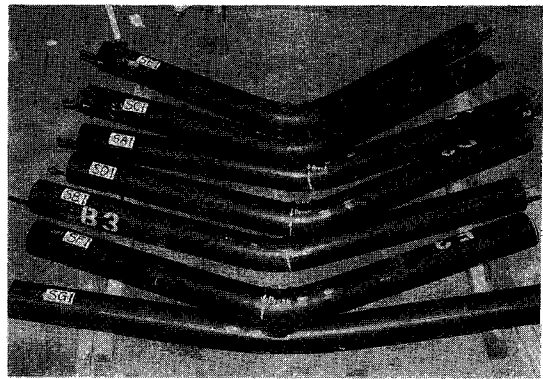
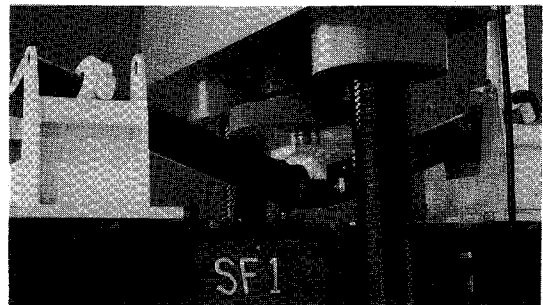


写真-1 静的荷重試験および試験後の供試体

(2) 荷重方法と測定方法

試験体の支持条件と治具は静的荷重および落錘衝撃荷重において同一であり、図-2(b)に示すように、試験体には支間長が1.6mになるような可動・回転治具を取り付け、その治具を図-3の支持台上にセットして1点荷重を行った。また、支持および荷重治具には鋼管の円周の約1/3が幅50mmで面タッチとなるような鋼板を用いた。

静的荷重試験においては、耐圧試験機(島津・UH-C500A)を用いた変位制御(0.5~5mm/min)により加力した。ただし、試験機のストローク限界が150mmであることから、ストローク限界に達する毎に除荷・加力ヘッドの再セット・再荷重を行った。荷重は試験機の計測器の出力を用い、変位はスパンの6等分点に設置したレーザ式変位計(キーエンス・LB60)により計測した。また、鋼棒の中央部および鋼管の中央部と中央から75、150mmの断面には部材軸方向にひずみゲージ(東京測器・FLA5およびYL10)を貼付し、ひずみの計測を行った。静的荷重試験の状況を写真-1に示す。

落錘衝撃荷重試験においては図-3のような荷重装置を用いた。荷重板の上部にはロードセル(東京測器・KC100-A)、半円柱状の被打撃部と傾斜防止具がセットされている。重錘は鋼板と鋼塊をボルトと溶接で一体化したもので、それは2本の鋼管柱をガ



写真-2 落錘衝撃載荷装置

イドとして最大落下高4.0mからほぼ自由落下する。重錘重量は当初8.0kNで製作したが、1回の落錘衝撃ではほとんどの試験体が完全破壊に到らなかったため、重量を10.0kNおよび装置の限界値である12.0kNについても実験を行った。そしてロードセルの出力、鋼管および鋼棒ひずみは、動ひずみ計（東京測器・DA12A、三栄・DC6M92）とAD変換ボードを介して0.2msec間隔でサンプリングした。また、高速ビデオレコーダー（コダック・エクタブロ1000）を用いて載荷点付近の画像を每秒1000コマのレートで撮影し、その画像から1.0msec毎の載荷点変位を解析した。なお、ビデオ画像にはロードセルとの同期をとるためのフラッシュ信号を入れたが、±2msec程度の誤差はあり得る。落錘衝撃載荷試験の状況を写真-2に示す。

3. 実験結果および考察

(1) 静的載荷試験

図-4は静的載荷試験の結果を表しており、図の上側には荷重とスパン中央たわみの関係が、そして下側にはその曲線の積分値（外力仕事=吸収エネルギー）とたわみの関係が示されている。試験体名は静的載荷試験であることを表すために、各タイプ名（A～G）にSを付してある。また、終局状態の吸収エネルギーの値を試験体名の後に記入してある。ここに、終局状態とは最大耐力時をさすが、SAおよ

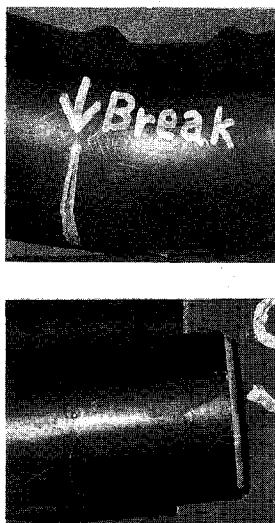


写真-3 鋼管の破断とコンクリートの抜け出し (SF)

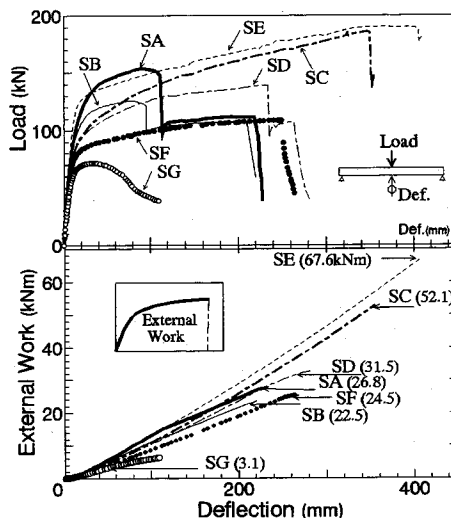


図-4 静的荷重, 仕事量-たわみ曲線

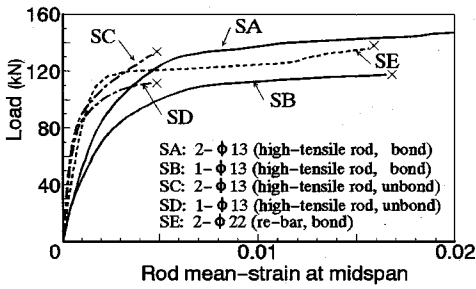
びSBの場合には、PC鋼棒の破断によって最大耐力を一旦失った後に一定の耐力を持続するので、鋼管が破断して最終的に耐力を失ったときとする。

a) コンクリート充填の効果

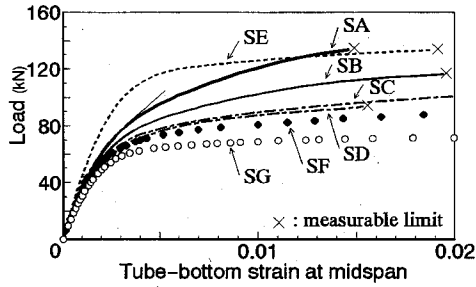
鋼管のみのSGでは最大耐力に達した後、凹形の局部座屈変形が進展して耐力が低下し、コンクリートを充填したSFでは凸形の局部座屈変形が生じた後もその断面の引張側に鋼管の破断が発生するまで耐力を持続した。写真-3はSFの破断の状況（引張試験における破断面に類似）と供試体端部におけるコンクリートの抜け出し状況を示している。コンクリートを充填することにより最大耐力および塑性変形能力が向上し、図中に記入した両者の終局状態の吸収エネルギー値で比較するとSFはSGの約8倍になっている。

b) PC鋼棒の種類と量による補強効果

試験体の耐力は鋼棒による補強によって上昇しているが、それらの塑性変形能力（吸収エネルギー）は鋼棒の種類によって大きく異なっている。すなわち、アンボンド型PC鋼棒を使用したSCおよびSDの荷重-たわみ曲線の勾配は、それぞれボンド型PC鋼棒を使用したSAおよびSBに比べて早期に低下している。しかし、SAおよびSBは、たわみが100mm前後のときに鋼棒の破断を生じ、その後SFと同様な挙動をしているのに対して、SCおよびSDはほぼ終局状態に到って初めて鋼棒が破断した。これは、PC鋼棒の伸び限界が9%と小さい上にボンド型PC鋼棒はコンクリートと一体となって曲げに抵抗するため荷重点付近で塑性域が集中するのに対して、アンボン



(a) 中点での鋼棒の荷重-ひずみ関係



(b) 鋼管底面での荷重-ひずみ関係

図-5 鋼棒および鋼管の荷重-ひずみ関係

ド型PC鋼棒は定着長さ（ここでは試験体長さ）全体の一様な伸びによって曲げに抵抗するので曲げ変形が大きくなるまで有効に働かないことによる。限界吸収エネルギー（終局状態に到るまでの吸収エネルギー）に着目した場合、アンボンド型PC鋼棒による補強はボンド型PC鋼棒に比べて効果的である。また、SC、SDおよびSFの吸収エネルギーの比較から、適量のアンボンドPC鋼棒を用いることにより限界吸収エネルギーをより効果的に増大できることがわかる。

c) 鋼棒の材質による影響

鉄筋を用いたSEとボンド型PC鋼棒を用いたSAの比較のために、それらの鋼棒の公称引張強度（力）はほぼ等しくされている。したがって、鉄筋の断面積はPC鋼棒の2.9倍となり、SEの曲げ剛性が僅かに大きい。そのためSEの載荷初期のたわみはSAに比べて小さくなっている。一方、鉄筋の降伏ひずみは0.2%でありPC鋼棒に比べてはるかに小さいので鉄筋は早期に降伏するが、伸び限界は35%と大きいために鉄筋は破断することなく、SEの耐力および塑性変形能力はともに優れた結果になっている。ただし、実用上は配筋スペースの問題があると考えられる。

d) 荷重-鋼棒・鋼管ひずみ関係

図-5(a)および(b)は、それぞれ荷重-鋼棒ひずみ関係および荷重-鋼管ひずみ関係を表している。なお、鋼棒ひずみは鋼棒中央部に貼付したゲージの平均値であり、鋼管ひずみはスパン中央下側における部材軸方向の値である。また、曲線が途切れている

のはゲージの不都合により計測できなくなったためであり、鋼棒や鋼管の破断を表すものではない。図から、鋼棒の種類による上述したような挙動を説明できる。

まず、SCおよびSDのアンボンド型PC鋼棒ひずみはそれぞれSAおよびSBのボンド型PC鋼棒ひずみに比べて十分小さく、逆にSCおよびSDの鋼管ひずみはそれぞれSAおよびSBの鋼管ひずみより大きく、むしろSFのそれに近い。したがって、アンボンド型PC鋼棒はほとんど曲げ剛性に寄与していないといえる。ただし、終局状態において、SCおよびSDのアンカープレートがコンクリートにめり込むとともにPC鋼棒がアンカー部近くで破断して飛び出したことから、アンボンド型PC鋼棒は曲げ変形が大きくなるにしたがって有効に働くものと考えられる。

次に、SAおよびSEの単位荷重（kN）に対する鋼棒ひずみ ϵ_{rod} と鋼管ひずみ ϵ_t のはり理論による値は次式で表される。ただし、引張側のコンクリートを有効とし、初期剛性を用いた。

$$SA: \quad \begin{aligned} \epsilon_{rod} &= 14.0 \times 10^{-6} / \text{kN} \\ \epsilon_t &= 25.2 \times 10^{-6} / \text{kN} \end{aligned} \quad (1.a)$$

$$SE: \quad \begin{aligned} \epsilon_{rod} &= 11.3 \times 10^{-6} / \text{kN} \\ \epsilon_t &= 21.6 \times 10^{-6} / \text{kN} \end{aligned} \quad (1.b)$$

また、図-5の曲線の初期勾配の逆数として実験値が次のように得られる。

$$SA: \quad \begin{aligned} \epsilon_{rod} &= 18.3 \times 10^{-6} / \text{kN} \\ \epsilon_t &= 25.1 \times 10^{-6} / \text{kN} \end{aligned} \quad (2.a)$$

$$SE: \quad \begin{aligned} \epsilon_{rod} &= 9.6 \times 10^{-6} / \text{kN} \\ \epsilon_t &= 20.1 \times 10^{-6} / \text{kN} \end{aligned} \quad (2.b)$$

理論値と実験値はほぼ等しい。ところで、図からSEの鉄筋ひずみはSAに比べて小さくなっているが、鉄筋の降伏ひずみ（約0.2%）が小さいため、降伏ひずみに達すると急激にひずみが増加している。

e) 大変形によるスパン長の変化を考慮した

モーメント-たわみ関係

図-4のSCおよびSEの勾配は終局状態においても右上がりになっているが、先に行った実験¹⁵⁾では、荷重がほとんど上昇することなく変位が増加するという載荷点部の塑性回転変形を示した。この理由として、先の実験では本実験と同じスパン長ではあるが、載荷点間隔250mmの2点集中載荷による一様曲げ領域が存在したことが一因と考えられる。さらに、先の試験体は曲げ剛性が高く、最大たわみが200mm程度であったため変形の影響が少なかったことも考えられる。そこで、図-6のような最大曲げモーメントとたわみの関係を求めた。最大曲げモーメントは、図中に示すようなたわみ変形に伴うスパン長の変化（実験中に数回計測した値で補間を行った）を考慮

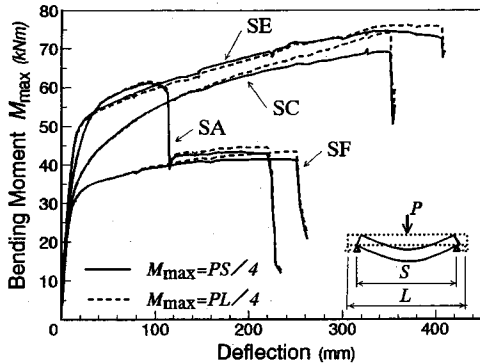


図-6 曲げモーメント-たわみ曲線

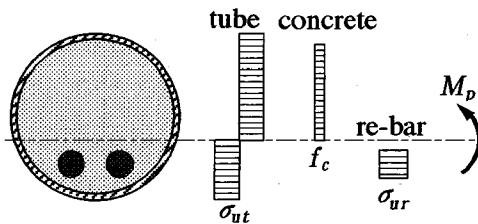


図-7 仮定した応力分布

したものが実線で表され、考慮しないものが破線で表されている。スパン長の変化を考慮することにより図-4のような耐力の右上がり傾向は小さくなり、SEでは耐力の低下（除荷域）が認められる。

f) 断面分割法による曲げ耐力の算定

コンクリート充填鋼管はりの曲げ耐力 M_p の算定には、鉄筋コンクリート部材において行われている手法を用いることができる。鉄筋コンクリート部材の一種と見なせる試験体SEについて断面分割法による曲げ耐力の検討を行う。

まず、ここでは M_p が終局状態を表すことから、図-7のようにコンクリートの引張強度を無視した応力分布を仮定し、各材料強度として表-1および2の極限強度 (σ_u および f_c) を用いた。その結果、 $M_p = 62.2 \text{ kNm}$ が得られ、図-6から得られる最大曲げモーメント $M_{max} = 73 \text{ kNm}$ に比べて約15%低く見積もられる。

次に、コンファインド効果を考慮したコンクリートの圧縮強度として $f_{c,confined} = 52.8 \text{ MPa}$ を用いたところ曲げ耐力は $M_p = 67.0 \text{ kNm}$ となり、実験値に比べて8.1%低く見積もることができた。ここに、コンファインドコンクリートの圧縮強度 $f_{c,confined} = 52.8 \text{ MPa}$ は以下のように仮定した。図-8は、試験体と同じ材料で作製したコンクリート充填鋼管2本 ($\phi 139.8 \times 4.2 \times 300$) および中空鋼管1本 ($\phi 139.8 \times 4.2 \times 150$) の圧縮試験による荷重-ひずみ

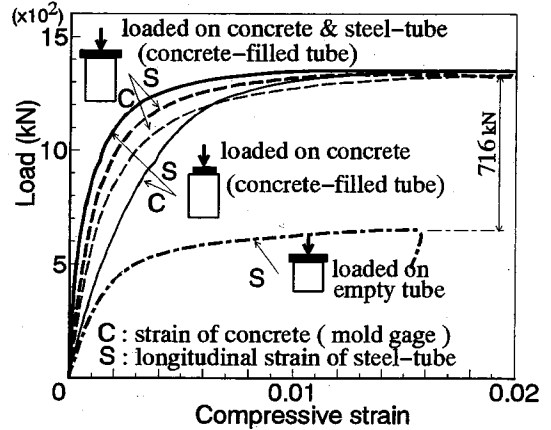


図-8 鋼管・充填鋼管短柱の荷重-圧縮ひずみ曲線

表-3 静的曲げ耐力 (kNm)

供試体	SA	SB	SC	SD	SE	SF
実験値①	61.0	50.2	68.5	55.6	73.0	41.2
断面分割法②	64.6	55.8	-	-	67.0	44.1
②/①	1.06	1.11			0.92	1.07

関係を表している。コンクリート充填鋼管への載荷は図のように二通りを試みた。いずれの場合も載荷板近くで局部座屈が発生し、中空鋼管では降伏強度 $F_y (= 714 \text{ kN})$ に達することなく耐力を失っているが、コンクリート充填鋼管短柱と鋼管短柱の強度差 (716 kN) はコンファインドコンクリートの圧縮強度に相当すると考えることができる。したがって、コンファインドコンクリートの圧縮強度 $f_{c,confined}$ は次式で求められる。

$$f_{c,confined} = 716 \text{ kN} / A_c = 52.8 \text{ MPa} \quad (3)$$

ここに、 A_c はコンクリート部の断面積である。

同様にコンファインドコンクリートの圧縮強度を用いて算定した曲げ耐力を表-3に示す。SEの場合は低く算定されたのに対して、SAおよびSBは鋼棒の伸び限界が小さいこと、SFは写真-3で示したようにコンクリートが端部から抜け出すなどの影響で実験値が低くなったものと思われる。

一方、SCおよびSDのように鋼棒がアンボンドの場合には平面保持の仮定が成り立たず、図-7のような応力分布を仮定できない。アンボンドPC部材の曲げ耐力は、ボンドタイプの85~95%であると言われているが¹⁶⁾、アンボンド型のSCおよびSDの実験値は、ボンド型であるSAおよびSBの実験値よりもそれぞれ高くなっている。これは、通常アンボンドPC部材はコンクリート充填鋼管の場合と異なって、アンボンドPC鋼棒が全塑性強度を発揮する前に

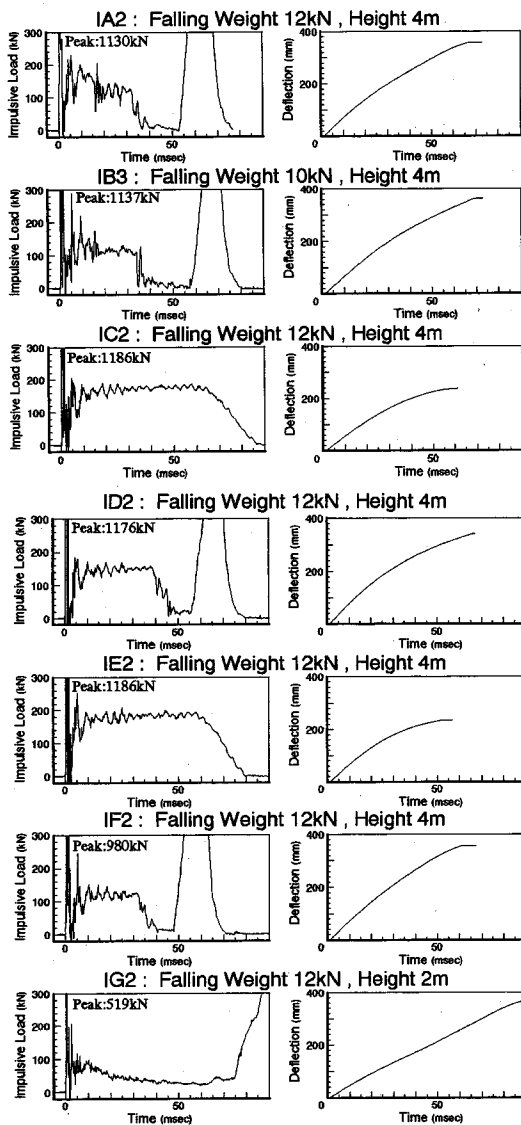


図-9 荷重およびたわみの経時変化

コンクリートの圧潰により脆性的に耐力が失われるためであると考えられる。

(2) 落錘衝撃載荷試験

本節では試験体名は衝撃載荷試験であることを表すために、各タイプ名(A~G)にIを付し、さらに適当な番号を付けて区別する。

図-9は各タイプの代表的な試験体について時間-衝撃力関係、および時間-載荷点(載荷板)変位関係を示している。ただし、変位は最大値までをプ

ロットした。落錘条件として、試験体IB3は10kNの重錘を4mの自由落下、および試験体IG2は12kNの重錘を2mの自由落下とし、その他の試験体は12kNの重錘を4mの自由落下とした。時間-衝撃力曲線におけるPeak値は計測された最大値ではあるが、試験体の最大耐力と考えるのは妥当でない¹¹⁾。試験体IC2およびIE2は1回の落錘で完全に破壊させることはできず、重錘が飛び跳ねたため60msec付近で衝撃力が低下している。それら以外の試験体においては50msec付近で衝撃力が急激に増加している。これは、30~40msecにおいて鋼管が破断し耐力を失ったため試験体が接地したことを表している。

なお、測定された鋼管・鋼棒のひずみ速度は、鋼棒の種類によって異なり、1~5/secであった。文献12)によれば、この値は鋼材の破断ひずみや引張強度の上昇に影響していることになる。

図-10には、各タイプの代表的な試験体について図-9のような時間-衝撃力関係と時間-載荷点変位関係から時間軸を消去して得られる衝撃力-載荷点変位関係が実線で示され、対応する静的載荷試験体の荷重-載荷点変位関係が○印で示されている。衝撃載荷試験において鋼管が破断しなかった試験体については変位の最大値までをプロットした。また、各々の曲線の変位軸に関する積分値(吸収エネルギー)と変位の関係も同様に示してある。荷重-変位関係図中の+印は終局限界状態(これは、荷重値が急激に低下する状態とする。ただし、鋼棒の破断による一時的な低下は含めない。)を表し、そのときの限界吸収エネルギー量が記入されている。個々の図中には、試験体名、落錘条件および破壊状況("break"は載荷点の引張側で鋼管が円周方向に破断したことを表し、"crush"は試験体が接地して押し潰されたことを表す)なども記入されている。

さらに、IAおよびICタイプについてそれぞれ3種類の落錘条件による衝撃力-変位関係が、図-11に示されている。これらの図から次のことがわかる。

a) PC鋼棒の種類による補強効果

IAタイプとICタイプあるいはIBタイプとIDタイプの比較からPC鋼棒のボンド型とアンボンド型による違いがわかる。まず、図-11のIAとICについて、3種類の落錘条件のいずれにおいてもアンボンド型の鋼管は破断しないが、ボンド型の鋼管はIA3およびIA2が完全破壊をしており、アンボンド型の優位性が認められる。ボンド型の場合にはいずれにも衝撃力の急激な変動が見られ、PC鋼棒が破断したものと考えられる。たとえば、写真-4はIA1の試験後の状況であるが、鋼管の局部屈座領域でコンクリートの圧潰が見られ、コンクリートを取り去ると2本の

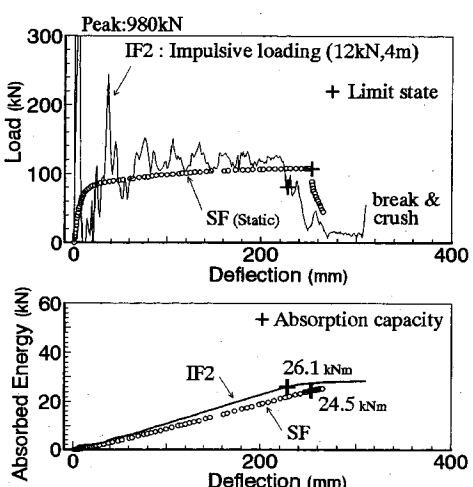
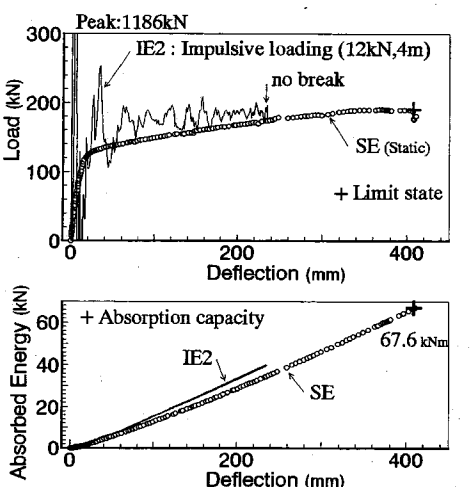
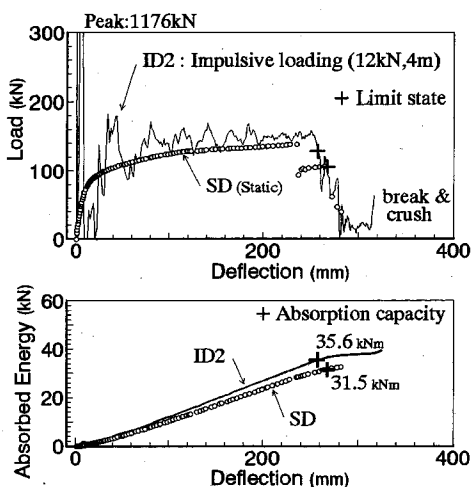
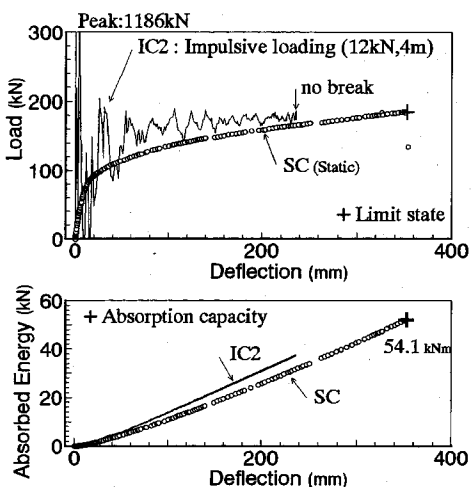
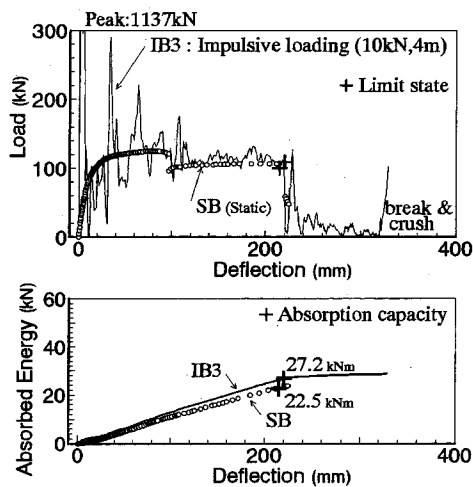
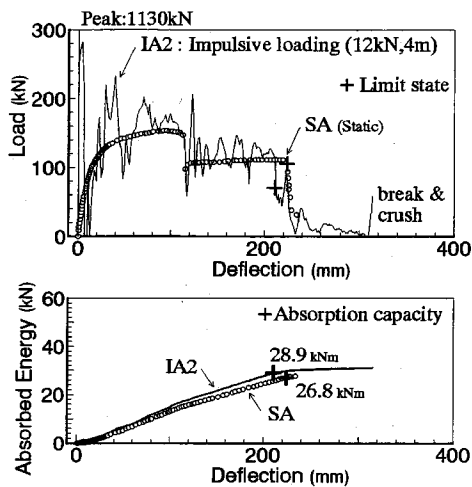


図-10 荷重，吸収エネルギー—たわみ関係

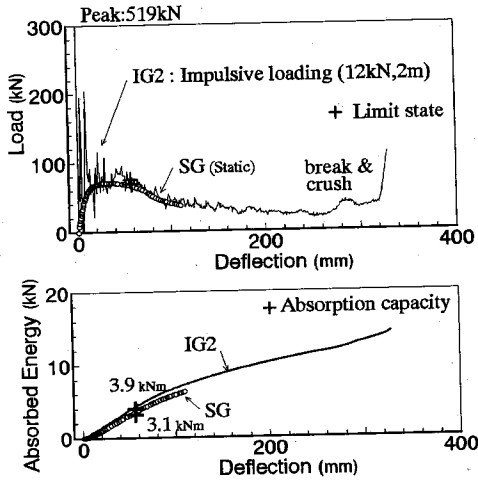


図-10 荷重, 吸収エネルギー—たわみ関係 (つづき)

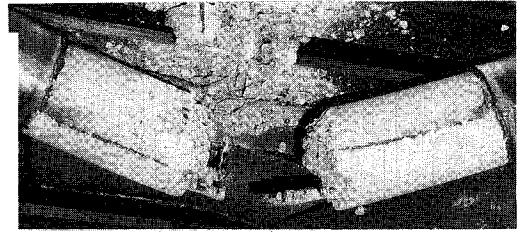


写真-4 衝撃載荷後の供試体IA1

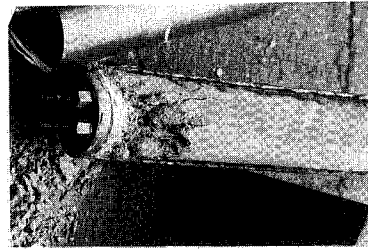


写真-5 衝撃載荷後の供試体IC2

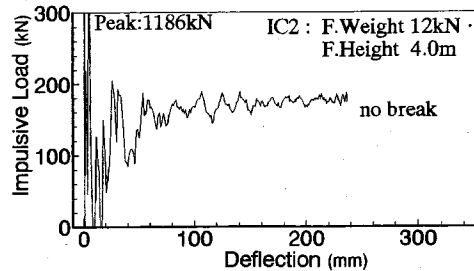
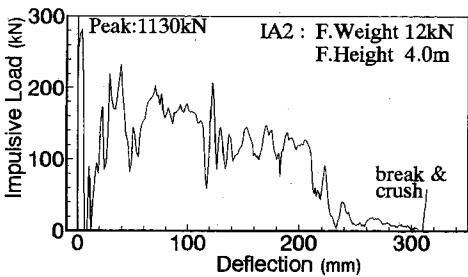
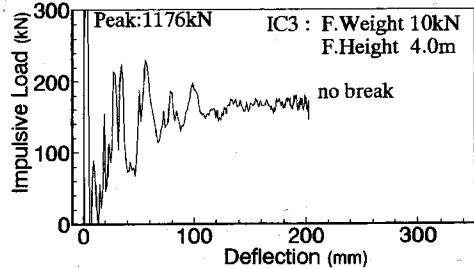
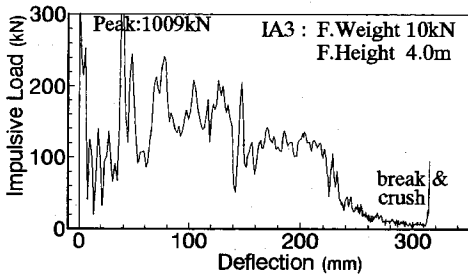
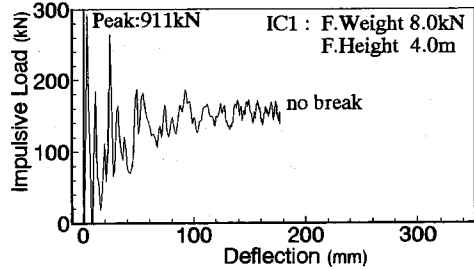
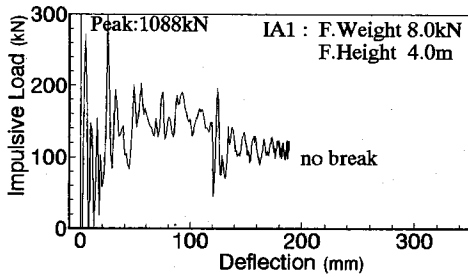


図-11(a) 衝撃荷重—たわみ曲線 (TYPE-A)

図-11(b) 衝撃荷重—たわみ曲線 (TYPE-C)

表-4 静的および衝撃試験によるエネルギー吸収能

Specimen Types	Types of reinforcements	Energy absorption capacity (kNm)	
		Static loading	Impulsive loading
A	2-bonded bars	26.8	31.7 (IA3: 10kN, 4m) 28.9 (IA2: 12kN, 4m)
B	1-bonded bar	22.5	22.9 (IB1: 8kN, 4m) 22.5 (IB2: 10kN, 4m) 27.2 (IB3: 10kN, 4m)
C	2- unbonded bars	54.1	non-break
D	1- unbonded bar	31.5	35.6 (ID2: 12kN, 4m)
E	2-deformed re-bars	67.6	non-break
F	no-reinforcement	24.5	26.1 (IF2: 12kN, 4m)
G	empty tube	3.1	4.9 (IG1: 8kN, 4m) 3.9 (IG2: 12kN, 4m)

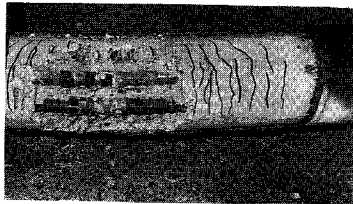


写真-6 試験後の供試体 IE3

鋼棒は破断していた。IAタイプについて衝撃力の急激な変動が見られる位置の変位量は静的載荷試験体SAにおける一時的な耐力の低下位置とほぼ一致している。アンボンド型の衝撃力は振動しているが、その平均的な値と右上がりの傾向はSC曲線と同等である。

図-10から、アンボンド型のID2は鋼棒量が少ないため完全破壊しているが、衝撃限界吸収エネルギーは35.6kNmで、これはボンド型のIB3の1.3倍のエネルギー吸収能力である。アンボンド型の場合の破壊状況を写真-5に示す。ID2は鋼棒が定着部付近で破断して飛び出した。また、IC2の定着部付近のコンクリートは写真のように支圧力で圧潰していた。

b) PC鋼棒量の効果

図-10のICタイプおよびIDタイプの比較からアンボンドPC鋼棒の本数による違いがわかる。鋼棒が2本のIC2では、鋼棒が1本のID2に比べて衝撃力の平均的値が僅かに大きいだけでなく、それが右上がり傾向を示し、鋼棒が適量であれば衝撃限界吸収エネルギーを飛躍的に増大できる可能性を示している。

c) 鋼棒の材質による比較

図-10のIAタイプ、ICタイプおよびIEタイプから鋼棒の材質による影響がわかる。鉄筋はボンド型の鋼棒と言えるが、PC鋼棒に比べ破断までの伸びが大きいので、IAタイプのような鋼棒の破断は起こらず、どの落錘条件においても完全な破壊に到らない。写真-6はIE3の試験後のコンクリートおよび鉄筋の状況である。引張クラックが多数見られるが、鉄筋は破断していない。

d) コンクリート充填および補強効果

図-10のIF2とIG2の比較から、コンクリート充填の効果が著しいことがわかる。

e) 限界吸収エネルギー

表-4は静的載荷試験および落錘衝撃載荷試験における限界吸収エネルギーをまとめたものである。衝撃試験の場合が僅かに大きくなる傾向はあるが、両者は同等であるといえる。したがって、静的曲げ挙動を解析的に把握できるようになれば、衝撃限界吸収エネルギーを評価できる。

f) 落錘衝撃載荷装置の特性

完全破壊に到らなかった試験体について、落錘の位置エネルギーに対する最終的な衝撃吸収エネルギーの比を求めると、IA1 (77%), IC1 (76%), IC2 (78%), IC3 (77%), ID1 (81%), IE1 (79%), IE2 (82%), IE3 (82%)であった。したがって、本実験の落錘衝撃載荷装置のエネルギー伝達効率は約80%といえる。

4. 結論

本研究で得られた結果は、静的載荷試験および落錘衝撃載荷試験ともほぼ同様であり、以下のように要約することができる。

- (1) 鋼管にコンクリートを充填することで、鋼管のみの場合に比較して大きい耐力および塑性変形能力を得ることができる。
- (2) 限界吸収エネルギーに関しては、ボンド型PC鋼棒による補強よりアンボンド型PC鋼棒を用いた方が効果的である。

(3) 鉄筋の方がPC鋼棒に比べ破断までの伸びが大きいので、ボンド型 PC 鋼棒よりも同程度の引張強度を有する鉄筋を用いた方が、耐力および塑性変形能力とも優れている。ただし、限られたスペースに大量の鉄筋を配置することは困難である。

(4) 曲げ耐力は鋼管による拘束を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を用いて、断面分割法で推定が可能である。

(5) 落錘衝撃載荷試験における限界吸収エネルギーは、静的載荷試験のものとはほぼ同等であり、静的曲げ挙動から衝撃限界吸収エネルギーの評価が可能である。

謝辞：本実験において供試体の提供を頂いた日本ゼニスパイプ株式会社および本実験のための落錘衝撃試験装置を製作、提供頂いた金森藤平商事株式会社に感謝いたします。また、実験に協力を願った高木一成、裕司両君に感謝します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：コンクリート充填鋼管の耐力（その1），土木研究所資料第1728号，1981.
- 2) 中井博，吉川紀：コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐力に関する実験的研究，土木学会論文集，第344号/I-1，pp.195-204，1984.
- 3) 建設省土木研究所：コンクリート充填鋼管の耐力（その2），土木研究所資料第2724号，1989.
- 4) 松村弘道，佐久間仁：充填型角形鋼管コンクリート柱の耐力と靱性に関する実験，構造工学論文集，Vol.34B，pp.227-236，1988.
- 5) 桜井孝昌，他：交番曲げを受けるコンクリート充填角形鋼管梁の耐力に関する実験的研究，構造工学

論文集，Vol.34A，pp.265-274，1988.

- 6) Usami,T. et al. : *Steel and Concrete-Filled Steel Compression Members under Cyclic Loading, Stability and Ductility of Steel Structures under Cyclic Loading*, CRC Press, Florida, pp.123-138, 1992.
- 7) 宇佐美勉，他：コンクリートを部分的に充填した無補剛箱形断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動，構造工学論文集，Vol.39A，pp.249-262，1993年3月.
- 8) 葛漢彬，他：繰り返し挙動を受けるコンクリート充填鋼柱の強度と変形能に関する研究，構造工学論文集，Vol.40A，pp.163-176，1994年3月.
- 9) 中井博，他：コンクリートを充填した長方形箱形断面柱の耐力と変形能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1347-1360，1993年3月.
- 10) 中井博，他：地震荷重を受けた後の合成柱（充填形式）の耐力，および変形能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.40A，pp.1401-1412，1994年3月.
- 11) 伊藤一雄，他：モルタル充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する実験的考察，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1581-1589，1991.
- 12) 伊藤一雄，他：コンクリート充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する解析的考察，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1553-1563，1992.
- 13) 日本道路協会：落石対策便覧，丸善，1983.
- 14) 日本道路協会：防護柵設置要綱，丸善，1972.
- 15) 前川幸次，他：PC鋼棒で補強されたコンクリート充填鋼管はりの曲げ耐力に関する研究，構造工学論文集，Vol.39A，pp.153-164，1993.
- 16) 土木学会：プレストレストコンクリート構造の現況と設計方法の動向，コンクリート技術シリーズNo.5，1994.

(1994. 9. 5 受付)

IMPULSIVE LOADING TESTS ON CONCRETE-FILLED TUBULAR STEEL BEAMS REINFORCED WITH TENDON

Koji MAEGAWA and Hiroshi YOSHIDA

This paper presents an experimental approach for the energy absorption capacity of the concrete-filled tubular steel beams subjected to the static and impulsive loads. Twenty-eight test beams of the concrete-filled steel tube reinforced with several types of tendons, that is, reinforced bars, bonded PC bars and unbonded PC bars, are tested under static and impulsive loads. It was confirmed from the test results that both the filling up a steel tube with concrete and the well-disposing tendons were effective for increasing the strength and ductility, and thus the energy absorption capacity of the tubular steel beams.