

論文 アンボンド PC を適用した連続はりの耐荷特性に関する一考察

西永 卓司*1 ・ 小林 和夫*2 ・ 仁枝 保*3

要旨：本研究ではアンボンドタイプの2スパンPC連続はりに対して荷重試験を行い、変形特性、PC鋼材応力、最大耐力、曲げひび割れ発生以降の荷重レベルから始まる曲げモーメント再分配挙動などをボンドタイプと対比検討するとともに、繰返し計算法による非線形解析を実施して実験値と比較した。その結果、アンボンドタイプはボンドタイプに比べ曲げひび割れ発生以降のPC鋼材応力が小さく、また最大耐力や部材剛性が低下し、解析時のPC鋼材変形適合係数の概略値としては0.2前後が適当と考えられた。
 キーワード：アンボンドPC、2スパンPC連続はり、曲げ耐荷特性、非線形解析

1. はじめに

アンボンドPCを適用した不静定構造部材として2スパン連続はりを取り上げ、曲げ荷重試験によりその基本的耐荷特性を考察するとともに、その定量化手法について検討した。

2. 荷重試験概要

2.1 連続はり供試体の種類

供試体は、図-1に示すように幅x高さx全長=10x16x330cmの長方形断面の2スパン(2x145cm)PC連続はりで、PC鋼棒(φ13)を各1本ずつ断面の上下に対称に配置した。

PC鋼棒は、グリース充填プラスチックシース被覆型のアンボンド鋼棒を用いたアンボンドタイプと金属製スパイラルシース内にセメントペーストグラウト(W/C=35%、NMB社製の注入用高性能混和剤ボゾリスGF-700使用)を注入したボンドタイプの2種類とした。

各供試体ともPC鋼棒の緊張応力は $0.6f_{py}$ (f_{py} :実降伏点で123kgf/mm²)とした。なお、図-1中に示すスターラップと組立筋とはともにD6異形鉄筋(実降伏点:42kgf/mm²)で作製した。

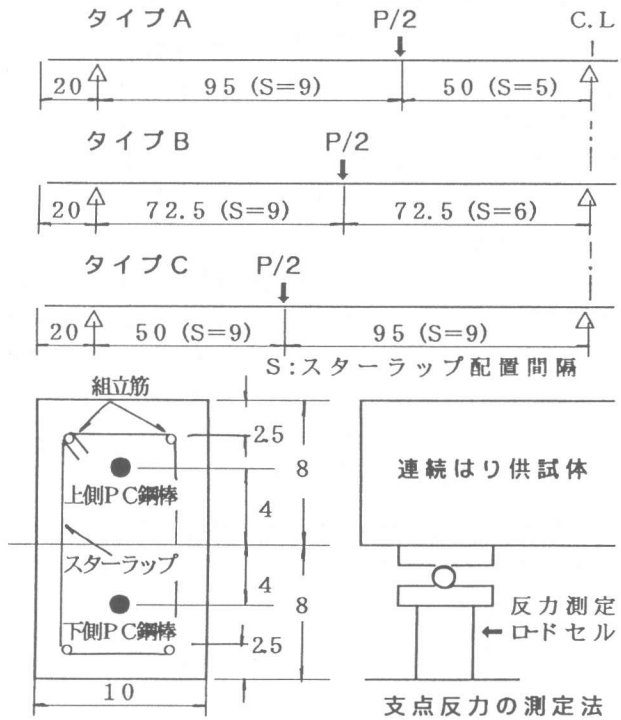


図-1 供試体寸法と荷重試験 (単位: cm)

*1 大阪工業大学大学院 工学研究科修士課程土木工学専攻、(正会員)

*2 大阪工業大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 大阪工業大学講師 工学部土木工学科、(正会員)

コンクリート強度としては、設計強度 $f'_c=400\text{kgf/cm}^2$ の他に $f'_c=700\text{kgf/cm}^2$ の供試体(実強強度 f_c :表-1参照)も作製した。

荷重は左右スパン各1点の対点荷重とした。アンボンド部材の鋼材応力やモーメント再分配に及ぼす荷重点位置の影響を調べるため図-1のように端支点～荷重点間の距離を95cm(タイプA)、72.5cm(タイプB)、50cm(タイプC)の3種類設定した。コンクリートの全断面を有効とした弾性理論による荷重点モーメント M_B と中間支点モーメント M_A の比はタイプA、B、Cでそれぞれ $M_B/M_A=1/1.81$ 、 $1/1.20$ 、 $1/0.88$ である。供試体は上下対称配筋で中間支点と荷重点断面の終局抵抗モーメント M_{uA} 、 M_{uB} (計算値)は等しい。

供試体種類を表-1に示す。

2.2 荷重試験方法

PC連続はりの曲げひび割れ発生以降の荷重レベルから始まる曲げモーメントの再分配挙動を調べるため、図-1に示すように3支点位置にロードセルを設置して各荷重階の支点反力を測定した。また、変位計で左右スパンの中央位置のたわみを測定した。さらに、ボンドタイプの場合、上側PC鋼棒には中間支点位置、下側PC鋼棒には荷重点位置に貼付した防水ストレインゲージ(ゲージ長3mm)でPC鋼材ひずみ(応力-ひずみ関係より応力に換算)を測定した。一方、アンボンドタイプでは図-2のように部材片端において2枚の定着板間にロードセルを挿入した状態でPC鋼棒をナット定着し、PC鋼棒の作用力を直接的に測定した。同時に、ストレインゲージ(ゲージ長67mm)で荷重点と中間支点断面(上下縁より15mm位置)のコンクリートひずみも測定した。

3. 結果と考察

3.1 結果と解析方法

表-1、2に曲げひび割れ発生、最大荷重を示す。図-5、6に荷重-たわみ関係、図-7に荷重-コンクリート圧縮ひずみ関係、図-8、9に荷重-PC鋼材応力関係を示す。また、図-10、11に荷重-中間支点、荷重点モーメント(実験値:ロードセルの支点反力測定値から算出)関係を示す。これらの表と図中の各計算値は、各材料特性の実測値を用いて算定したものである。

表-1の曲げひび割れ発生荷重の計算値は弾性解析法による中間支点と荷重点断面の曲げモーメントが各々の曲げひび割れ発生モーメントの計算値に達したときの荷重を表す。

表-1 供試体種類と曲げひび割れ発生荷重

はり種類	鋼材付着位置*1)	荷重点位置*2)	コンクリート*3) (kgf/cm^2)		荷重点下*4)		中間支点上	
			f'_c	f_c	実験値	計算値	実験値	計算値
					$P_{CB,m}$ (tf)	$P_{CB,c}$ (tf)*5)	$P_{CA,m}$ (tf)	$P_{CA,c}$ (tf)*5)
U-1	U	タイプA	400	487	10.95	10.94 (1.00)	7.00	6.04 (1.16)
B-1	B	タイプA		462	14.50	10.89 (1.33)	7.50	5.99 (1.25)
U-2	U	タイプB		486	8.75	7.24 (1.21)	5.00	6.03 (0.83)
B-2	B	タイプB		456	8.55	7.24 (1.18)	6.50	6.02 (1.08)
U-3	U	タイプC		465	7.55	6.67 (1.13)	6.50	7.61 (0.85)
B-3	B	タイプC		473	8.80	6.24 (1.41)	9.75	7.26 (1.34)
U-4	U	タイプB	700	681	10.42	8.02 (1.30)	8.44	6.68 (1.26)
B-4	B	タイプB		681	7.35	8.08 (0.91)	9.71	6.64 (1.46)

*1) U:アンボンドタイプ、B:ボンドタイプ *2) 図-1参照
*3) f'_c :設計強度、 f_c : $\phi 10 \times 20$ cm 供試体の実測強度(6本平均)
*4) 左右スパンでの平均値 *5) アンボンドタイプも近似的にボンドタイプと同様のPC鋼材換算断面を用いて算定、()中の値は実験値と計算値との比

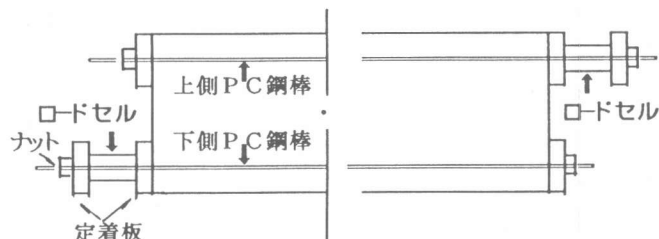


図-2 アンボンドタイプのPC鋼棒応力測定

表-2に示す最大荷重の計算値 P_{u1} 、 P_{u2} は、中間支点と荷重点位置に塑性ヒンジを仮定した極限解析法による次式から算定した値である。

$$P_{u1}, P_{u2} = 2 \cdot [M_{uA}(1/b) + M_{uB}(1/a + 1/b)]$$

ここに、 M_{uA} 、 M_{uB} ：中間支点、荷重点断面の終局抵抗曲げモーメント計算値で、 P_{u1} 、 P_{u2} はP C鋼材の変形適合係数をそれぞれ $\beta=1.0$ 、 0.2 として M_{uA} と M_{uB} を算出した場合の値、 a 、 b ：荷重点から端支点、中間支点までの距離

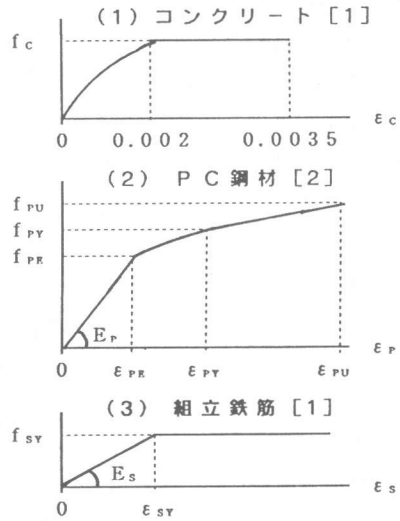
なお、計算値 P_{u} は弾性解析による中間支点と荷重点断面の曲げモーメントがそれぞれ M_{uA} 、 M_{uB} に到達した時の荷重のうち小さい方の値を示す。

一方、図-5～図-11中に併記した諸量の計算値は、以下の方法により算定したものである。

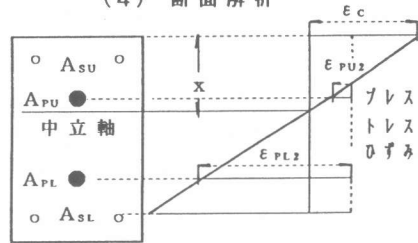
まず、構成材料の応力-ひずみ関係を図-3のようにモデル化[1、2]して断面解析(切断法適用)を行い、断面の曲げモーメント-曲率($M-\phi$)関係を算定した。この際、P C鋼材変形適合係数はボンドタイプでは $\beta=1.0$ 、アンボンドタイプでは従来研究[3]を参考に大略値として $\beta=0.2$ とした。

次に、図-4のように、(1)静定基本系として中間支点で切断した単純はりを選定し、与えられた荷重 P に対して中間支点モーメント M_A を仮定し、スパンの曲げモーメント分布を求める。(2)各位置 x の曲げモーメント M_x に対応する曲率 ϕ_x を先に求めた $M-\phi$ 関係から定める。(3)スパンの曲率分布が求まると、弾性荷重法により中間支点位置のたわみ角 θ を算定し、所定の連続条件(本連続はりは左右スパン対称であるから、 $\theta=0$)を満足しているか否かを調べる。(4)連続条件を満足する時は仮定した M_A は適切で、荷重 P を上げて同様の計算を行う。(5)一方、(3)で連続条件を満足しない時は新たな M_A を仮定し、連続条件が満足されるまで(1)～(3)の計算を行う。なお、中間支点または荷重点モーメントが M_{uA} 、 M_{uB} に到達後は最大荷重の計算値(極限解析値)までその値で一定とした。

以上のようにして、各荷重階に対応するスパン上の曲げモーメント分布が求まると、あらかじめ算出されている断面解析の結果を用いて、連続はり部材の荷重と諸量との関係が算定できる。



(4) 断面解析



例えば：鋼材 A_{PL} の総ひずみ $E_{PL} = E_{PL1} + \beta \cdot E_{PL2}$
 E_{PL1} ：鋼材の有効緊張力によるひずみ
 E_{PL2} ：荷重によるコンクリートひずみ

図-3 応力-ひずみ関係と断面解析

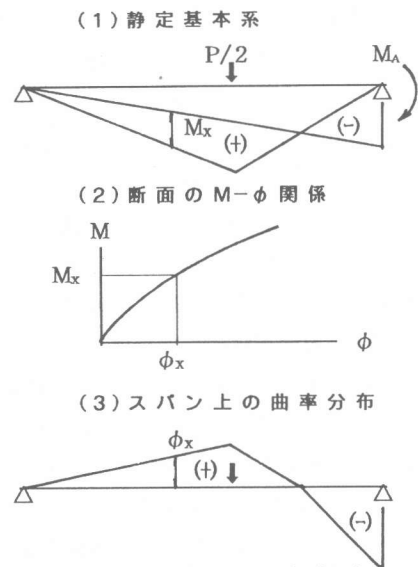


図-4 連続はりの解析法

3.2 考察

(1) 曲げひび割れおよび最大耐力

表-1のように、中間支点部と載荷点部の曲げひび割れ発生荷重の実験値は肉視によりバラツキがあるが、弾性解析による各々の曲げモーメントが曲げひび割れ発生モーメントの算定値に達した時の荷重として求めた計算値と大略一致している。

いずれの連続はりも中間支点上と載荷点下でコンクリートが圧壊して曲げ破壊した。本供試体は極限解析から算定($\beta=1.0$)

した終局荷重作用時のせん断力に対して安全なように土木学会コンクリート標準示方書式[1]でスターラップを配置したが、PC鋼材付着の有無にかかわらず、終局時まで著しいせん断ひび割れの進展はみられなかった。

一方、表-2から、アンボンドタイプ場合にはボンドタイプに比べて最大耐力は10~20%低下することが認められる。また、ボンドタイプの場合にはコンクリート強度の影響はきわめて小さいのに対し、アンボンドタイプの場合は $f'_c=700\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートの適用によって最大耐力が $f'_c=400\text{kgf/cm}^2$ のものに比べて15%程度増大しており、最大曲げ耐力に及ぼすコンクリート強度の影響がかなり大きい。これは、著者ら[3]が先にアンボンドPC単純はりで得た結果と同様である。

表-2で最大荷重の実験値 P_u と中間支点、載荷点に塑性ヒンジの生成(崩壊のメカニズム)を仮定した極限解析法の計算値 P_{u1} ($\beta=1.0$)、 P_{u2} ($\beta=0.2$)を比べると、供試体各4本の平均でボンドタイプは $P_u/P_{u1}=1.07$ 、アンボンドタイプは $P_u/P_{u2}=1.11$ である。これより、アンボンドタイプでも曲げ破壊耐力はPC鋼材変形適合係数を適切に設定すれば、ボンドタイプと同様に極限解析法で算定できる。なお、表-2には省略したが、アンボンドタイプの P_u/P_{u2} ($\beta=0.3$ に設定)の平均は1.06で、上記ボンドタイプでの比と同等となり、最大耐力面では β は0.2より多少大きい0.3程度の方がよいと考えられる。

また、表-2より、最大耐力の実験値は弾性解析法による中間支点、載荷点の曲げモーメントがそれぞれの終

表-2 最大荷重の実験値と計算値

はり	実験値 P_u (tf)	計算値(極限解析)			計算値(弾性解析)			限界断面*4)
		*1) P_{u1} (tf)	$\frac{P_u}{P_{u1}}$	*2) P_{u2} (tf)	$\frac{P_u}{P_{u2}}$	*3) P_{uc} (tf)	$\frac{P_u}{P_{uc}}$	
U-1	18.01	20.17	0.89	17.09	1.05	12.47	1.44	A
B-1	22.50	19.70	1.14	—	—	14.37	1.57	A
U-2	15.90	16.42	0.97	13.97	1.14	12.42	1.28	A
B-2	17.42	16.05	1.09	—	—	14.26	1.22	A
U-3	15.03	16.03	0.94	13.62	1.10	13.19	1.14	B
B-3	17.39	16.19	1.07	—	—	15.68	1.11	B
U-4	17.97	18.06	1.00	15.89	1.13	14.12	1.27	A
B-4	17.75	18.06	0.98	—	—	16.05	1.11	A

*1) PC鋼材の変形適合係数を $\beta=1.0$ として算定

*2) $\beta=0.2$ (アンボンドタイプ想定)として算定

*3) ボンド部材: $\beta=1.0$ 、アンボンド部材: $\beta=0.2$

*4) A:中間支点断面、B:載荷点断面

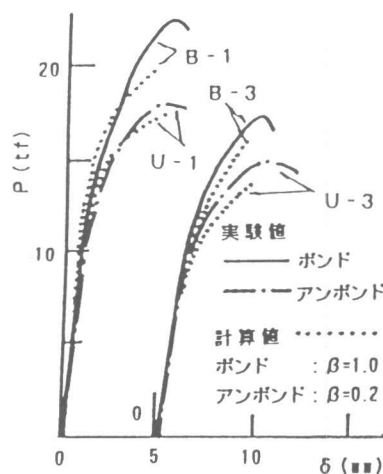


図-5 P-δ

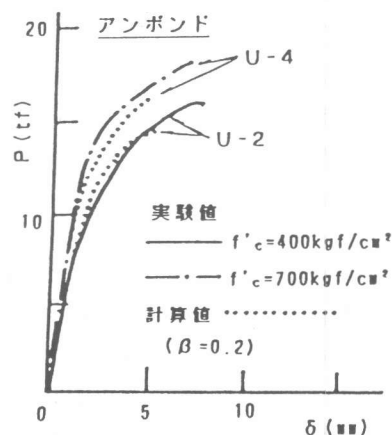


図-6 P-δ

局抵抗曲げモーメント M_{uA} 、 M_{uB} (ボンド： $\beta=1.0$ 、アンボン
ド： $\beta=0.2$)に達した時の荷重のうち小さい方の値とし
て算出した計算値 P_{uc} をかなり上回ることが示される。

(2) 荷重-たわみ関係 ($P-\delta$)

図-5に示すように、荷重-たわみ関係に関しては、
曲げひび割れ発生までの弾性域ではPC鋼材付着の有無
による差異はみられない。しかし、それ以降の荷重域に
達すると、アンボンドタイプのたわみはボンドタイプに
比べてかなり増大し、PC鋼材に付着が存在しないと部
材の剛性が低下することが認められる。

また、図-6のように、アンボンドタイプの連続はり
においても、高強度コンクリートの適用は部材剛性を増
大させる上で有効である。

図-5、6に示すように、先に述べた繰返し計算法に
よる非線形解析から算定した $P-\delta$ 関係は、アンボン
ドタイプでは β の概略値として $\beta=0.2$ とするとボン
ドタイプ($\beta=1.0$)と同様に実験値と比較的よく一致
している。

(3) 荷重-コンクリートひずみ関係 ($P-\epsilon_c$)

図-7に一例として、載荷点断面の荷重-コンクリ
ート圧縮ひずみ(上縁より15mm下方位置)関係を示すが、
上記の $P-\delta$ 関係の場合と同様のことが言える。

PC鋼材付着の有無によらず、荷重-コンクリートひ
ずみ関係についても非線形解析による計算値は実験値と
比較的よく一致している。

(4) 荷重-PC鋼材応力関係 ($P-\sigma_r$)

図-8、9は断面の下側に配置したPC鋼棒の応力を
例示したものであるが、アンボンドタイプではボン
ドタイプに比べて荷重の増大にともなうPC鋼材応力の増
加量が著しく小さくなることが明瞭に認められる。その結
果、後者の場合にはPC鋼材応力が終局状態においてほ
ぼ実降伏点にまで達しているのに対し、前者では到達
応力は実降伏点に比べてかなり小さい。この傾向は断面
の上側に配置したPC鋼材では一層顕著であった。

アンボンドタイプの場合、図-9のように、 $f'_c=700$
kgf/cm²の高強度コンクリートを使用すると $f'_c=400$ kgf
/cm²に比べて終局時のPC鋼材応力が増大する。

$P-\sigma_r$ 関係の非線形解析法による計算値と実験値を
比較すると、ボンドタイプ、アンボンドタイプに対して
PC鋼材変形適合係数をそれぞれ $\beta=1.0$ 、 $\beta=0.2$ とした
計算値は傾向的には実験値と大略一致している。なお、

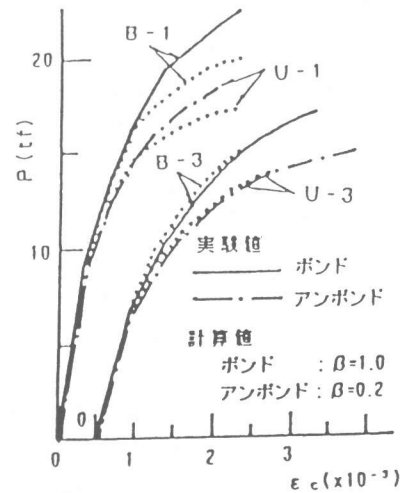


図-7 P- ϵ_c

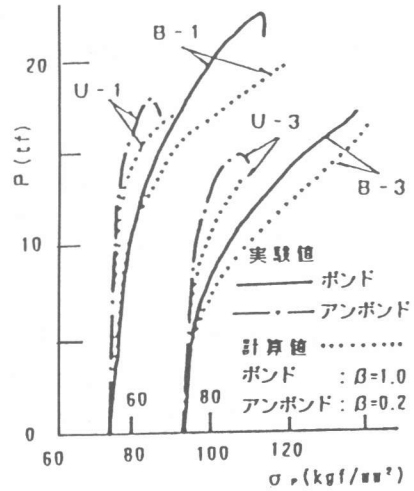


図-8 P- σ_r

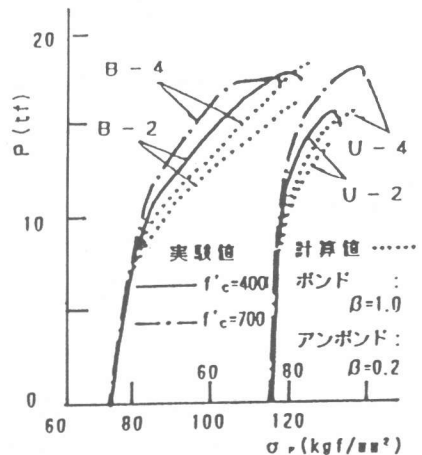


図-9 P- σ_r

前述の最大耐力とは異なり、アンボンド鋼材の応力面からは β は0.2より若干小さくした方がよいと考えられる。

(5) 荷重-曲げモーメント関係 (P-M)

図-10のように、作用荷重の増大にともなう中間支点、載荷点断面における曲げモーメントの増加曲線の形状に関しては、P C鋼材付着の有無によって特に顕著な差異はみられない。しかし、終局時の最大到達モーメントの値については、ボンドタイプに比べてアンボンドタイプではかなり小さくなるのが明瞭にうかがえる。

図-11にアンボンドタイプに対する荷重-曲げモーメント関係の計算値と実験値との比較例を示すが、非線形解析($\beta=0.2$)は実験値の挙動をよく表している。ボンドタイプでも $\beta=1.0$ とした計算値はこれと同様であった。

したがって、前述の非線形解析法を適用し、ボンドタイプと同様にアンボンドタイプP C連続はりの終局状態までの曲げモーメント再分配挙動の推定が可能である。

4. 結論

アンボンドP C連続はりの耐荷特性に関して実施した本研究の主な結果を要約すると、次のとおりである。

- (1) アンボンドはりの最大曲げ耐力はボンドはりに比べて10~20%低下する。また、その値はP C鋼材変形適合係数 β の導入により極限解析法で算定できる。
- (2) アンボンドはりでは、最大曲げ耐力に及ぼすコンクリート強度の影響はボンドはりの場合に比べて大きく、 $f'_c=700\text{kgf/cm}^2$ の使用により最大曲げ耐力は $f'_c=400\text{kgf/cm}^2$ の場合に比べて15%程度増大する。
- (3) 曲げひび割れ発生後、アンボンドはりはボンドはりに比べて剛性が低下し、またP C鋼材応力の増加量が著しく小さい。高強度コンクリートを使用するとこれらはかなり増大する。
- (4) 曲げひび割れ発生以降から曲げモーメントの再分配が認められたが、荷重-中間支点、載荷点モーメント関係の曲線形状にはP C鋼材付着の有無で特に顕著な差異はみられない。
- (5) ボンドでは $\beta=1.0$ 、アンボンドでは概略 $\beta=0.2$ とし、非線形解析で曲げひび割れ発生から終局時までの曲げモーメント再分配挙動、P C鋼材応力やたわみを比較的よく算定できた。しかし、アンボンドはりの最大耐力の面からは $\beta=0.2$ より多少大きい $\beta=0.3$ 程度の方が適切で、解析時の β 値に関してはさらに試験データを蓄積し検討する必要があると考えられた。

[参考文献]

- 1] 土木学会：コンクリート標準示方書(平成3年版)ー設計編一、1991
- 2] Park, R. and Paulay, T. : Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Inter.Pub., 1975
- 3] 小林和夫 他：高強度コンクリートを用いたアンボンドP Cはりの曲げ耐荷特性、コンクリート工学年次論文報告集、第15巻、第2号、1993

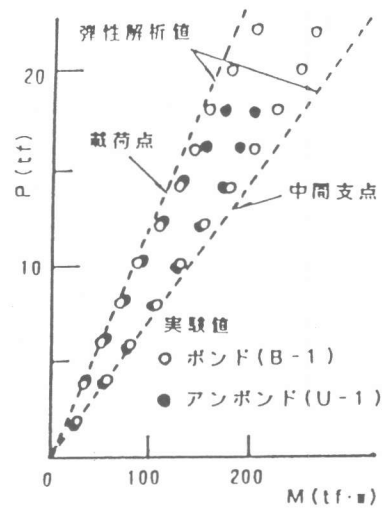


図-10 P-M

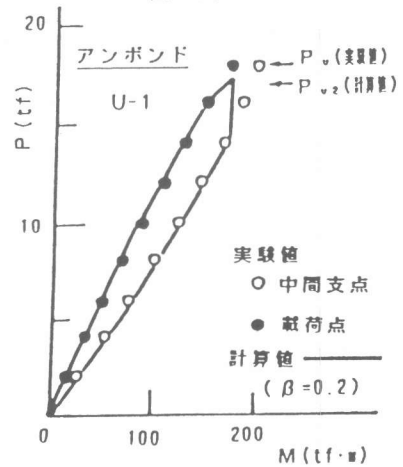


図-11 P-M