

外ケーブルにより補強した PC はり部材の曲げ耐力

田中 恭哉* ・ 原田 哲夫**
小野 忠宏*** ・ 曳村 俊貴****Flexural Strength Analysis of Prestressed Concrete Beams
Reinforced with External Tendons

by

Kyouya TANAKA*, Tetsuo HARADA**, Tadahiro ONO***
and Toshitaka HIKIMURA****

Recently in Japan, many reinforced concrete structures (RC) as well as prestressed concrete structures (PC) damaged by chlorides attack have been repaired by various methods. On the other hand, even though RC/PC members which are not damaged encounter the grade-up scheme, since the design load for these structures have increased.

External prestressing method, which is simple and easy to construct is considered to be one of the most suitable method to improve the existing condition. However, the estimation of ultimate strength for the structures with external prestressing tendons has not been clearly specified in the design.

In this paper, the authors have discussed the efficiency of increasing ultimate flexural strength of PC beams reinforced with external cables. The ultimate flexural strength was calculated on the assumption that the elongation of the cable at the ultimate state is equal to that of the concrete which is in the same location as the cable. The change of external cable eccentricity caused by the deflection of the beam was also taken into account in this analysis.

1. ま え が き

近年、塩害をはじめ、コンクリート構造物の早期劣化がクローズアップされ、その対策としての各種補修・補強方法の研究、開発が活発に行われている。部材耐荷力の回復あるいは向上を目的とした行為を一般に補強と呼んでおり、補強工法のなかでは、外ケーブル工法が注目を集めている。

一方、設計荷重の法改正にともない、道路橋では平成5年11月25日より従来の TL-20から TL-25に変更された。現在供用中の RC 桁、PC 桁ではこの設計荷重

の増大に対して、耐荷力の不足分を外ケーブル工法によって補強する方法が実施されはじめており、その数は今後ますます増加するものと予想される。

以上のように、外ケーブル工法が採用される理由には、ケーブルの再緊張あるいは取り替えが可能であり、自重の軽減や施工性の向上、工期短縮、維持管理が容易であるといった多くの利点を有していることがあげられる。しかしながら、外ケーブル工法によって補強する場合、例えば、補強耐荷力に対してどの程度外ケーブルで補強すればよいのか。具体的には補強すべき外

平成6年4月28日受理

* 大学院海洋生産科学研究科 (Graduate School of Marine Science and Engineering)

** 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

*** 西松建設㈱ (Nishimatsu Construction Co., Ltd.)

**** ショーボンド建設㈱ (Sho-Bond Corporation)

ケーブル鋼材量、プレストレス量をどれだけによればよいか、それらの算定方法を含め、外ケーブル独自の耐力評価法が確立されていないのが現状のようである。

そこで、本論では内ケーブル PC はり部材と、さらにそれに外ケーブルで補強された PC はり部材それぞれの終局曲げ耐力を精算法を用いて計算し、外ケーブルによる補強効果を鋼材量、外ケーブルのプレストレス量をパラメータとして比較検討するとともに、曲げ挙動の特徴について論じた。

2. 解析法

2.1 精算法

グラウトが施されたボンド PC はり部材では、曲げモーメントに対し断面内での平面保持が仮定できるが、外ケーブルあるいはアンボンド PC はり部材では、平面保持が成り立たない。これはコンクリートとの付着がないため、ある断面において、ケーブル位置のコンクリートとケーブルのひずみが等しくならないからである。したがって、外ケーブル PC はりの曲げ耐力を精度よく算定するには、定着間ケーブルの伸びとケーブルと同じ高さ位置にあるコンクリートの全変形量が等しいという条件の他に、はりのたわみによるケーブル偏心量の変化 (y_n) を考慮した解析をしなければならない。ここでは精算法として、以下のような手順で曲げ耐力の計算を行う。

まず、Fig. 1 のように要素分割法によって断面を m 層に分割し、部材軸方向には Fig. 2 のように n 分割する。荷重、内ケーブル緊張力、外ケーブル緊張力およびそれらの作用位置を設定し、各断面に生じるひずみ分布を求める。このひずみ分布は、各断面において、ある仮定したひずみ分布をもとに、圧縮合力と引張合力による内力の釣合い、内力によるモーメントと外力モーメントの釣合いを満足するような分布となるまで繰り返し計算を行って求める。このとき、Fig. 3 (a), (b),

(c) に示すコンクリート、鉄筋、PC 鋼材(内、外ケーブル)の応力-ひずみ関係を用いた。また、コンクリート、鉄筋、内ケーブルについては、平面保持が成り立つものとした。

上記、各断面でのひずみ分布の計算を n 分割すべてについて行う。各要素において、断面のひずみ分布より、曲率 ϕ_i が直ちにわかる。曲率 ϕ_i がわかれば各点でのたわみが計算でき、外ケーブルの設定位置との関係 (y_n) がわかる。ここで、たわみ計算には猪股⁹⁾による曲げひびわれが発生した断面と発生していない断面との平均断面曲率を考慮する方法を適用した。

一方、外ケーブル位置のコンクリートひずみを各要素について積分した値は、定着区間の外ケーブル全体

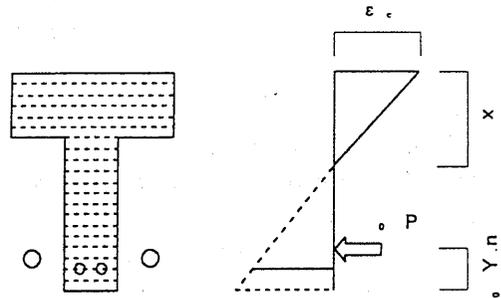


Fig. 1 Discrete element and strain distribution.

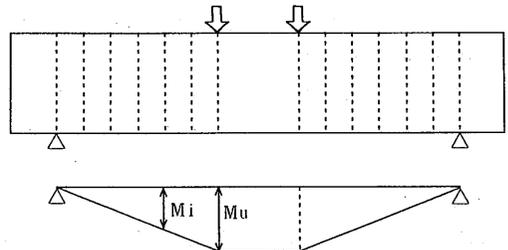


Fig. 2 Division of longitudinal element and distribution of moment.

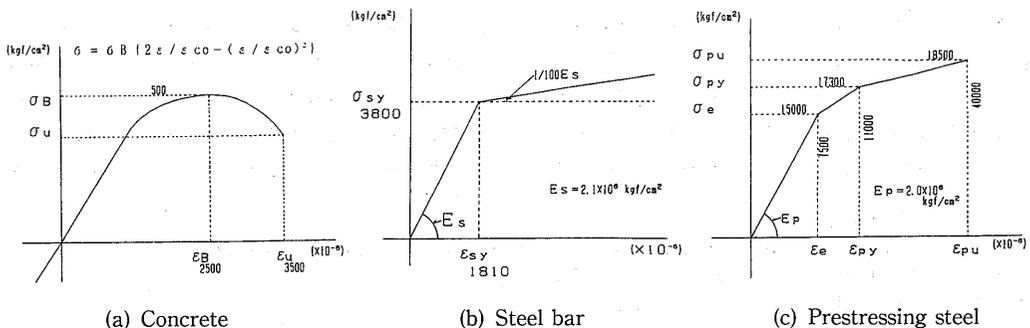


Fig. 3 Stress-strain relationships for analysis.

の伸びと等しいという変形の適合条件を満足する必要がある。外ケーブルの伸び量からは、外ケーブルの増加緊張力が計算できる。当然のことながら、コンクリートには、増加緊張力分のプレストレスが付加されることになる。

はりのたわみともなう外ケーブル位置 (y_n') および外ケーブル緊張力 (σ_p') の変化によって、断面力のつりあいと変形の適合条件を許容範囲内で満足するまで、 y_n' および σ_p' の設定値を変化させながら上記の計算を繰り返す。各荷重段階で収束すれば、荷重を増加させた次のステップで同様の計算を行い、上縁コンクリートひずみが 3500×10^{-6} に達した時点を終局とみなし計算を打ちきる。このようにして、各荷重段階および終局時の耐力およびたわみが計算できる。Fig. 4 に、上記計算のフローを示す。

2. 2 精算法の検証

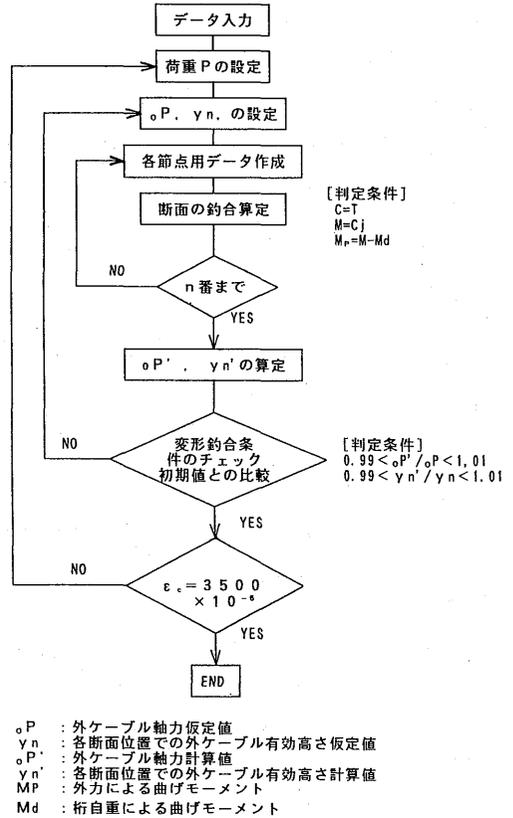
精算法の精度を実験結果と比較することで確認する。解析の対象とした供試体は、文献2)によるもので、モデル化した図を Fig. 5 に示す。文献2)では、外ケーブルとして、通常のPC鋼材以外に、CFRP ストランド (カーボン繊維)、組紐状 AFRP ロッド (アラミド繊維) を用いた丁寧な実験が行われており、終局状態までの実験データが比較しやすいからである。

一例として、Fig. 6 (a)にはCFRP ストランドを外ケーブルとした終局までの荷重-たわみ曲線を、Fig. 6 (b)には外ケーブル緊張力の変化を示した。また、Table 1 には終局耐力の実験値と計算値を比較して示した。今回、主な検討目的である終局荷重についていえば、かなりの精度で実験結果と合致しているといえよう。なお、ここでは $m=60$ 分割、 $n=13$ 分割とし、CFRP ストランド、組紐状 AFRP ロッドの応力-ひずみ関係等、その他の材料特性については、すべて文献2)と同様である。

3. 外ケーブル PC はりの曲げ耐力解析

3. 1 解析の対象

シミュレーションをするにあたっては、実際の設計



- σ_p : 外ケーブル軸力仮定値
- y_n : 各断面位置での外ケーブル有効高さ仮定値
- σ_p' : 外ケーブル軸力計算値
- y_n' : 各断面位置での外ケーブル有効高さ計算値
- MP : 外力による曲げモーメント
- Md : 桁自重による曲げモーメント

Fig. 4 Process of analysis for ultimate strength.

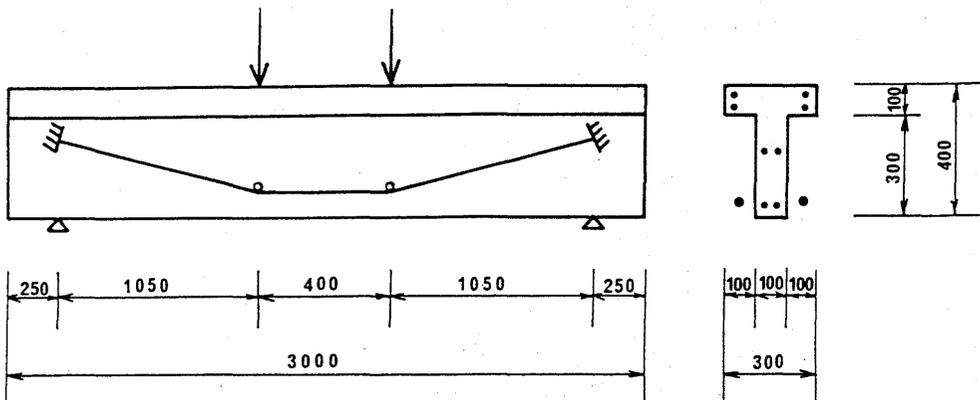


Fig. 5 Outline of PC beam for analysis.

Table 1 Experimental and calculated results at ultimate state.

Type of external tendon	Flexural strength (tonf)		Cal./Exp.
	Cal.	Exp.	
Steel	22.7	22.2	1.02
Carbon	20.1	20.0	1.01
Aramid	19.0	18.7	1.02

を念頭におき、できるだけ実桁に近いモデルであることが望ましい。ここでは、Fig. 7 に示す供試体⁴⁾をモデル供試体として解析を行った。内ケーブルには $\phi 15.2$ の PC 鋼線より線を 4, 8, 12 本と変化させ、PC 鋼材 1 本あたり、 $0.6P_y (=10800\text{kgf/cm}^2)$ で緊張して、プレストレスを与えた供試体である。鋼材本数に比例して、導入プレストレスも増加することになる。

ここでは、この内ケーブル PC はりに、外ケーブルで

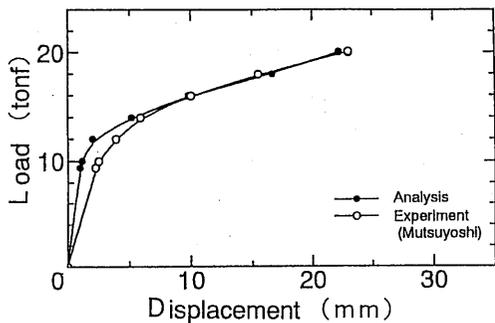


Fig. 6 (a) Load-displacement curve (CFRP strand).

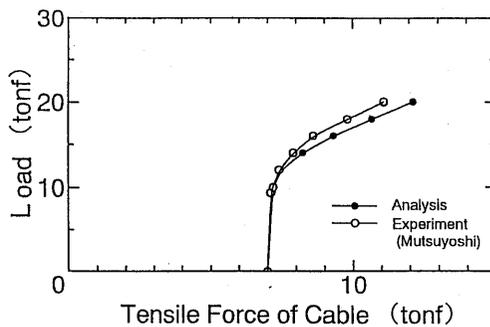


Fig. 6 (b) Load-tensile force curve of external cable (CFRP strand).

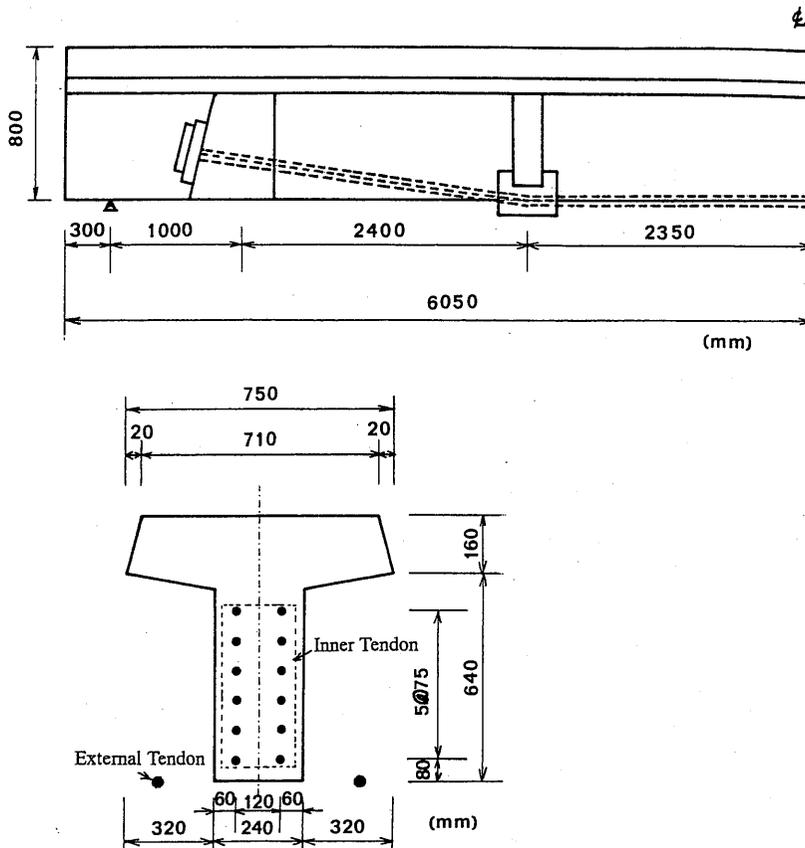


Fig. 7 Details of PC beam for ultimate strength analysis.

補強した場合についての曲げ耐力を計算する。外ケーブル鋼材量は、Table 2に示すように一定とし、その緊張力を0.2Py, 0.4Py, 0.6Pyと変化させた。コンクリート、内および外ケーブルとしてのPC鋼材の特性は、Fig. 3と同様のものを用いた。

なお、内ケーブル本数0で、外ケーブルのみで補強した場合の耐力についても計算を行った。いずれも要素分割は、m=160, n=11 (左半分)とした。

3. 2 解析結果および考察

Table 3に解析結果を一覧表にして示した。Fig. 8には内ケーブル鋼材量を横軸にとり、内ケーブルのみの曲げ耐力と外ケーブルで補強した場合(外ケーブル緊張力は、0.6Py)の曲げ耐力を比較して示した。鋼材量が増すにつれ、曲げ耐力も増大しているが、外ケー

ブルによる曲げ耐力の増加分は、内ケーブル鋼材量によらずほぼ同じようである。

いま、外ケーブルで補強した曲げ耐力を M_{ou} 、内ケーブルのみの場合の曲げ耐力を M_{iu} とすれば、曲げ耐力の増加は $(M_{ou} - M_{iu})$ で与えられる。

ここで、 $(M_{ou} - M_{iu})$ の M_{ou} に対する割合を補強率 α と定義する。

Table 2 Cross-section area of prestressing steel for each specimen.

Internal cable		External cable		External cable ratio A_{is}/A_{is+os}
Number of tendon	A_{is} (cm ²)	Number of tendon	A_{os} (cm ²)	
4	5.548	2	5.628	0.50
8	11.096			0.66
12	16.644			0.75

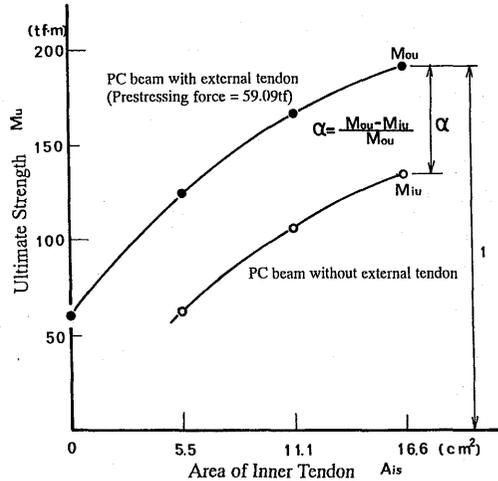


Fig. 8 Relationship between ultimate flexural strength and cross-section area of internal prestressing steel.

Table 3 Calculated results.

供試体番号	外ケーブル緊張力 (tf)	内ケーブル本数 (本)	たわみ δ (mm)	外ケーブル増加軸力 ΔP (tf)	全軸力 P_o (tf)	曲げ耐力 M_u (tf·m)	内ケーブルひずみ ϵ_{in} ($\times 10^{-6}$)	外ケーブルひずみ ϵ_{out} ($\times 10^{-6}$)
NX4	0.6Py (59.09)	12	119.41	31.86	90.96	191.88	14652	9268
NX3		8	122.36	45.93	85.33	188.13	14864	7581
NX2		4	126.77	48.55	68.25	177.75	15414	6063
NX1		0	130.73	34.58	93.68	167.13	20404	10003
NY4	0.4Py (39.40)	12	134.34	48.08	87.47	164.40	20726	8325
NY3		8	139.48	56.63	76.33	156.93	21475	6781
NY2		4	146.09	38.41	97.50	126.31	31794	11491
NY1		0	160.16	53.94	93.33	124.50	32141	9910
NZ4	0.2Py (19.70)	12	167.63	67.95	87.65	119.75	33290	8372
NZ3		8	152.37	38.96	98.05	60.96	—	10901
NZ2		4	162.58	58.12	97.52	59.93	—	11545
NZ1		0	173.65	73.25	92.95	58.13	—	9805

$$\alpha = (M_{ou} - M_{iu}) / M_{ou} \quad (1)$$

一般に、曲げ耐力には鋼材量、鋼材強度およびコンクリート強度、断面積が大ききいてくると考えられ、内ケーブルと外ケーブルの総鋼材量を用いた鋼材係数 q を用い、 α との関係を図示すると Fig. 9 が得られる。ここでの鋼材係数は、

$$q = (A_{is}\sigma_{py} + A_{os}\sigma_{opy}) / B \cdot d_p \cdot f_{ck} \quad (2)$$

であって、PC 鋼材比（鉄筋比に相当）に PC 鋼材とコンクリートの強度比を乗じた形で表される。Fig. 9 から鋼材係数が増せば、 α の値はそれに反比例するように低下していることがわかる。このことは、鋼材係数が比較的大きな断面に対しては、大きな補強率は期待できないことを示している。

Fig. 10 は、補強率 α に及ぼす外ケーブル緊張力の影響を調べたものである。 α の値は、 $0.4P_y$ 以上ではほぼ横ばいとなっており、通常、 $0.6P_y$ 程度の緊張力を与えることを考えると、外ケーブル緊張力の大きさは、終局曲げ耐力にほとんど影響しないといえよう。これは、一般に、プレストレス自体の大きさは、PC 部材の曲げ耐力にほとんど影響しないのと同様と考えられる。

Fig. 11 には、内ケーブルのみ（8本）の場合とそれに外ケーブルで補強した場合（緊張力36tf）の荷重-たわみ曲線について、両者を比較して示した。内ケーブルのみの場合は、PC 鋼材降伏後はあまり荷重の増大をとまわず、たわみがかなり大きくなって終局状態

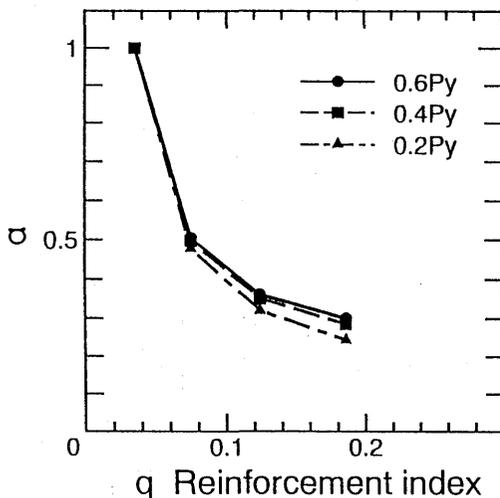


Fig. 9 Relationship between α and reinforcement index.

に至るのに対し、外ケーブルで補強した場合には、前者に比べて終局までの荷重-たわみ関係の勾配の低下は少なく、より小さいたわみで終局に至っている。Fig. 12 には終局時の最大たわみと鋼材係数の関係を示した。鋼材係数が大きくなって鋼材割合が大きくなるほど、上縁コンクリートひずみ $\epsilon_c = 3500 \times 10^{-6}$ となった時点の最大たわみも小さくなることわかる。

一般に PC はりの破壊パターンの境界を示す鋼材係数 q の値は 0.3 といわれている。すなわち、 $q < 0.3$ であれば、鋼材降伏後のコンクリート圧縮破壊であり、 $q > 0.3$ では、圧縮破壊先行型の破壊である。今回は、外ケーブルで補強した最大の鋼材係数でも 0.2 程度であって、Table 3 に示すように、いずれも内ケーブル PC 鋼材の降伏の後、上縁コンクリートの圧壊で終局となる破壊パターンであった。しかしながら、外ケーブルの鋼材量を含む総鋼材量が多くなり、荷重増加にともなう

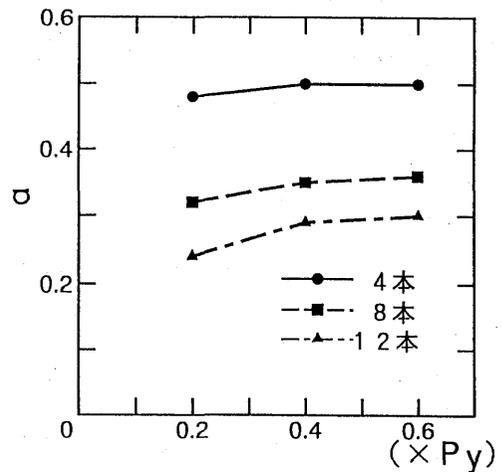


Fig. 10 Relationship between α and amount of prestressing force of external cable.

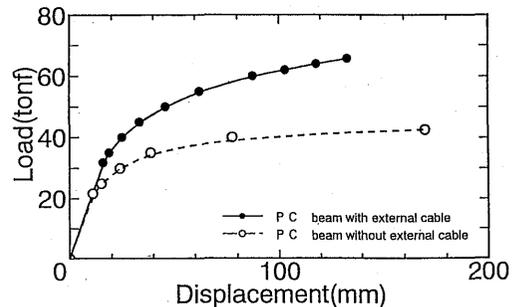


Fig. 11 Load-displacement curve.
(External prestressing force = 36tf, $A_{is} = 11.1 \text{cm}^2$)

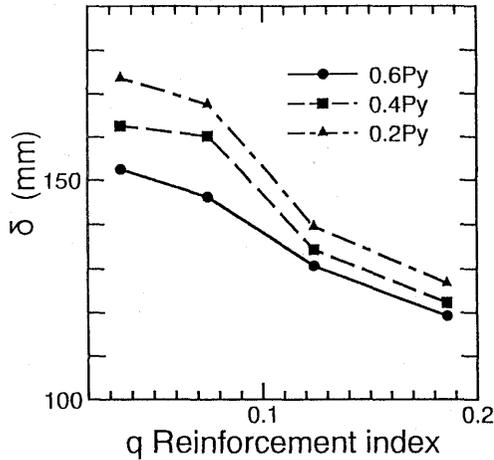


Fig. 12 Maximum displacement at ultimate state.

外ケーブル緊張力の増加偏心軸力が支配的となった場合、たわみの小さい段階で、コンクリートの圧縮破壊が突発的に起こる破壊（一種の屈座破壊）の危険性が予想される。これについては、外ケーブルの鋼材量を含む総鋼材量の鋼材係数で、0.3以下とすればその危険性は防げるものと考えているが、今後の検討が必要である。

なお、Fig. 8で外ケーブルによる曲げ耐力の増加が、内ケーブル鋼材量にかかわらずほぼ同じであるのは、いずれも外ケーブルの鋼材量が一定であって、内ケーブルがすべて降伏後にコンクリートが圧縮破壊し、外ケーブルも終局時にはほぼ降伏に近いひずみを示しており（Table 3）、緊張材の能力が十分に発揮されたからだと考えられる。

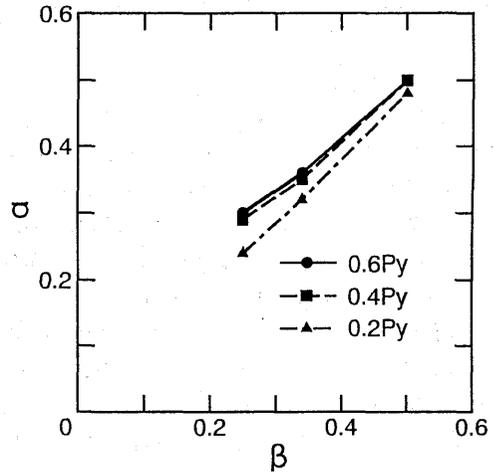
3. 3 外ケーブル補強鋼材量決定の一方方法

Fig. 13には α と外ケーブル鋼材比 β の関係を示した。ただし、 $\beta = A_{os}/(A_{os} + A_{is})$ 。同図より、両者はほぼ直線関係にあり、外ケーブル鋼材量に比例した補強効果であることがわかる。

いま、設計において α を設定すれば、Fig. 9より外ケーブルを含む鋼材係数 q が決まる。一方、Fig. 13から、同一の α に対応する β が決定できる。鋼材係数 q から、総鋼材量 $(A_{os} + A_{is})$ が求められる。 A_{is} は既存の構造物であるからすでにわかっており、 β の値もわかっているので、これよりただちに外ケーブル鋼材量 A_{os} が決定できることになる。

4. ま と め

通常のPCはりで設計されている、鋼材係数が0.3以

Fig. 13 Relationship between α and β .

下の供試体を対象に、外ケーブルで補強したPC単純はり部材の曲げ耐力を精算法により算定した。今回は、外ケーブルによる耐力増加量を調べるのが主目的であって、それを補強率 α として定義し、鋼材係数（鋼材量は内、外ケーブル総鋼材量）との関係は、反比例する曲線形状となることや、総鋼材量に占める外ケーブル鋼材量と α はほぼ比例することなどがわかった。これらの関係が、通常、外ケーブルによる補強の対象となる範囲内で、一般的にいえることであれば、外ケーブルによる補強設計は3. 3で述べたように極めて単純明快となる。現在ある桁の終局耐力を基本に、補強したい α を設定しさえすれば、それに見合った外ケーブル鋼材量を関係図表から直ちに求められるからである。もちろん、実際の設計ではこのような関係図表を終局耐力に影響するいくつかの要因をパラメータとし、図表にしておく必要がある。

上記のような方法が一般的に適用できるかどうかについては、例えばデビエータ（偏向部）の位置や外ケーブル鋼材量等をパラメータとした計算を行って、今後検討しなければならない。今回はPC単純桁のみを対象とし、しかもごく限られたパラメータでの解析であって、実際にはPC連続桁や、RC桁の場合も多くあり、これらを対象とした研究は今後重要と考える。

本論文をまとめるにあたり、数値計算、図面の整理等を手伝っていただいた構造工学科 平成6年度卒業研究生 瀧田直明、宮本雅文、田中鎮治、西尾彰浩、山下祐司の諸氏ならびに貴重な助言をいただいた(株)富士ピー・エス菅野昇孝、徳光卓の両氏に感謝の意を表す。最後に、本論文の一部は、筆者の小野忠宏、曳

村俊貴の平成5年度卒業研究として行われたことを付記しておく。

参考文献

- 1) 睦好宏史：外ケーブル PC 構造物の現状と問題点，コンクリート工学，No. 8, pp. 24-35, 1993.
- 2) 睦好宏史・町田篤彦：FRP を外ケーブルに用いた PC はりの力学的性状および曲げ耐力，土木学会論文集，No. 442/V-16, pp. 153-159, 1992.
- 3) 猪股俊司：構造コンクリート曲げ部材使用限界状態の統一設計計算法，コンクリート工学，Vol. 26, No. 12, pp. 95-105, 1988.
- 4) 徳光 卓・榎野勝巳・丸山久一・睦好宏史：耐蝕性材料を用いた外ケーブル工法の開発，プレストレストコンクリート，Vol. 35, No. 5, pp. 61-68, 1993.