

(64) ノモグラムを用いた外ケーブルによるPC桁の補強設計法

長崎大学大学院 ○ 宮本雅文
 長崎大学 工学部 正会員 原田哲夫
 (株)富士ピー・エス 正会員 徳光 卓
 (株)富士ピー・エス 濱田直明

1. はじめに

設計荷重の変更あるいは耐久性の低下にともない、補強を余儀なくされているコンクリート橋は数多く存在する。補強工法の中でも、最近注目を集め、その施工例も増えてきた工法の一つに外ケーブル工法があげられる。しかしながら、外ケーブル工法によって補強する場合、補強すべき耐荷力に対してどの程度の補強をすればよいのか。具体的には、補強すべき外ケーブル量、プレストレス量をどれだけにするべきか。それらの算定方法を含め、外ケーブル独自の耐荷力評価方法が確立されていないのが現状のようである。¹⁾

そこで、本研究では外ケーブルによる補強設計を平易に行う一つの手だてとして、あらかじめ多くの計算図表を用意しておく方法について検討しようとするものである。もちろん、最近ではコンピュータの急速な発展とともに、数値解析手法も格段の進歩をとげ、いきおい設計もすべてコンピュータに頼り、いまさら図表を用いなくてもとの批判は当然予想されることである。しかしながら、一方では、ものを設計する場合の工学的な感覚が、コンピュータに頼るあまり、失われつつあることも否めないように思われる。外ケーブルによる設計・施工例がまだ数少ないうちは、設計の感覚をつかむ上で、計算図表は大きな効果を発揮するものとする。

本論文では上記の考えに基づき、外ケーブルで補強する場合のPC単純桁を例にとり、主として曲げ耐力に着目した補強設計の一手法について提示する。

2. 外ケーブルPCはりの曲げ耐力解析

2. 1 解析手法および供試体

ここではまず、実際の設計を念頭におき、図-1に示すようなできるだけ実桁に近いモデルPC桁²⁾を対象とし、外ケーブルで補強した場合の曲げ耐力解析を行う。解析手法は、精算法³⁾によった。

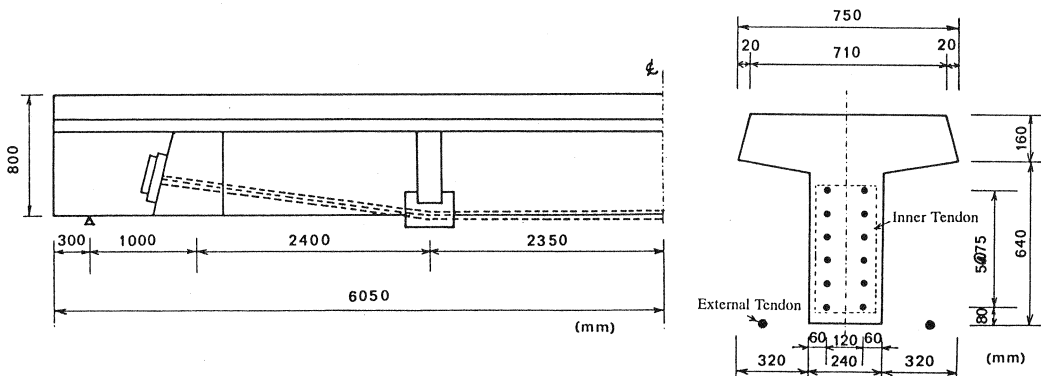


図-1 解析に用いたモデル桁

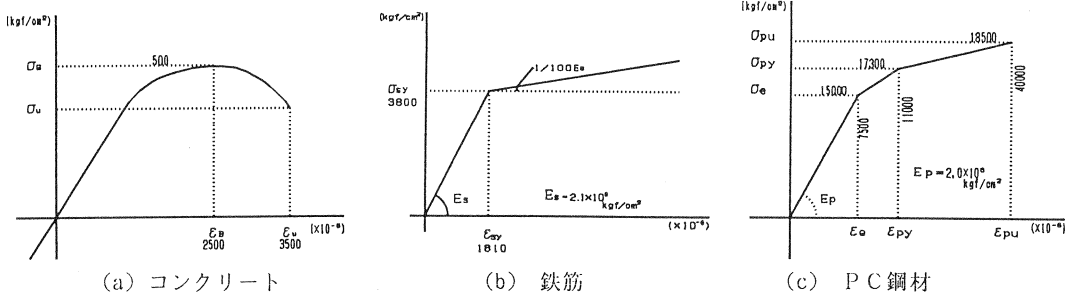


図-2 応力-ひずみ関係

解析に用いたコンクリート、鉄筋、P C鋼材(内、外ケーブル)応力-ひずみ関係は、図-2(a), (b), (c)に示すとおりである。

終局曲げ耐力は、コンクリート上縁ひずみが、 3500×10^{-6} に達した時点とした。内ケーブルとしてφ15.2のP C鋼より線を4, 8, 12本と変化させ、P C鋼材1本あたり、0.6Py (10800kgf/cm²)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。外ケーブル鋼材量は、表-1に示すように2種類とし、その緊張力を39.40, 59.09, 78.79tfと変化させた。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。

2. 2 解析結果および考察

表-2に解析結果を一覧表にして示した。図-3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、59.06tf)の曲げ耐力を比較して示した。内ケーブルの鋼材量の増加に伴って、曲げ耐力が増大していることがわかる。

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

ここで、(Mou - Miu)のMiuに対する割合を補強率αと定義する。

$$\alpha = (Mou - Miu) / Miu \quad (1)$$

表-1 外ケーブル鋼材量

内ケーブル		外ケーブル		内ケーブル鋼材比	外ケーブル鋼材比
緊張材本数	A _{i,s} (cm ²)	緊張材本数	A _{o,s} (cm ²)	A _{i,s} / A _{i,s+o,s}	A _{o,s} / A _{i,s+o,s}
4	5.548	2	5.628	0.50	0.50
8	11.096			0.66	0.34
12	16.644			0.75	0.25
4	5.548	4	11.256	0.33	0.67
8	11.096			0.50	0.50
12	16.644			0.60	0.40

表-2 解析結果一覧

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)
NW 4	0.8Py (78.79)	1 2	114.47	18.329	97.121	196.46
NW 3		8	122.92	18.758	97.550	170.99
NW 2		4	137.93	19.200	98.000	127.38
NW 1		0	107.80	19.860	98.652	63.79
NX 4	0.6Py (59.09)	1 2	119.41	31.86	90.960	191.88
NX 3		8	130.73	34.58	93.680	167.13
NX 2		4	146.09	38.41	97.500	126.31
NX 1		0	152.37	38.96	98.050	60.96
NY 4	0.4Py (39.40)	1 2	122.36	45.93	85.330	188.13
NY 3		8	134.34	48.08	87.470	164.40
NY 2		4	160.16	53.94	93.330	124.50
NY 1		0	162.58	58.12	97.520	59.93
2NW 4	0.4Py (78.79)	1 2	112.20	76.897	155.750	233.04
2NW 3		8	118.18	85.291	164.081	214.46
2NW 2		4	127.84	93.460	172.250	177.50
2NW 1		0	131.01	98.836	177.600	119.56
2NX 4	0.3Py (59.09)	1 2	114.72	79.873	138.900	222.61
2NX 3		8	121.30	88.895	148.020	203.94
2NX 2		4	131.58	103.590	162.650	170.95
2NX 1		0	135.54	112.775	171.840	115.16
2NY 4	0.2Py (39.40)	1 2	116.99	82.854	122.200	212.12
2NY 3		8	124.79	92.965	132.400	193.66
2NY 2		4	137.02	109.380	148.800	161.43
2NY 1		0	140.22	123.159	162.550	108.32

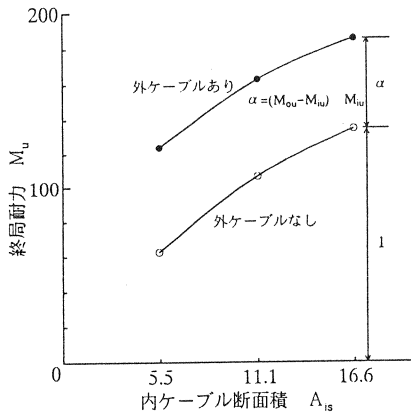


図-3 鋼材量と曲げ耐力の関係

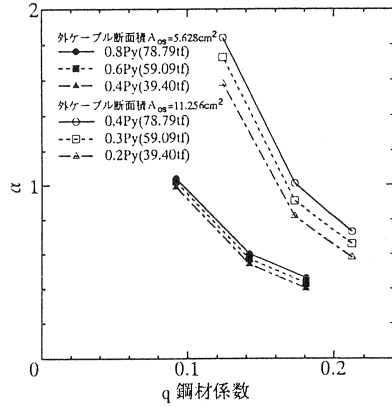


図-4 補強率 α と鋼材係数の関係

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、断面積が大ききく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図-4 が得られる。ただし、ここでの鋼材係数は、次式のように定義した。

$$q = (A_{is} \sigma_{ipy} + A_{os} \sigma_{opy}) / B \cdot d_p \cdot f'_{ck} \quad (2)$$

A_{is} : 内ケーブル断面積、 A_{os} : 外ケーブル断面積、 σ_{ipy} : 内ケーブル降伏強度、 σ_{opy} : 外ケーブル降伏強度、 B : フランジ幅、 d_p : PC鋼材の有効高さ、 f'_{ck} : コンクリート圧縮強度

図-4 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い断面に対しては、大きな補強率は期待できないことを示している。また、同図には外ケーブルの緊張力を同じに設定し、外ケーブル断面積が2倍の計算結果を示した。当然のことながら、外ケーブル補強量が多いほど大きな補強率が得られることがわかる。図-5 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、0.4Py以上ではほぼ横ばいとなっており、通常0.6Py程度で緊張することを考えるならば、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る。

図-6 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)と外ケーブル断面積を2倍にした場合の荷重-たわみ曲線について比較して示した。内ケーブルのみの場合には、PC鋼材降伏後はあまり荷重の増大をとまわずたわみが大きくなって終局状態に至るのに対し、外ケーブルで補強した場合に

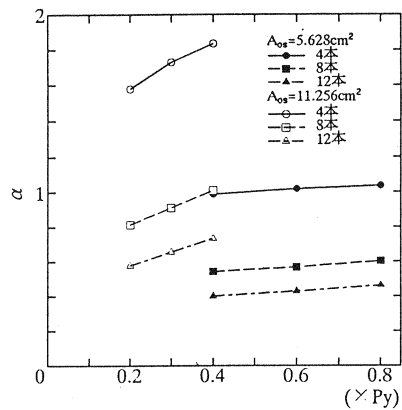


図-5 補強率 α に及ぼす外ケーブル緊張力の影響

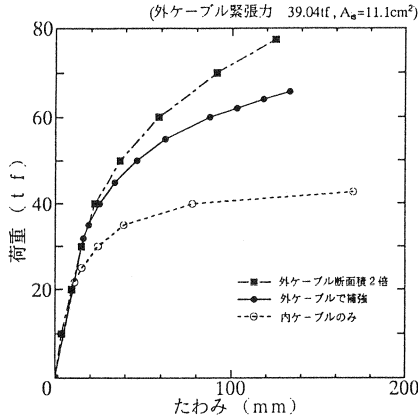


図-6 荷重-たわみ曲線

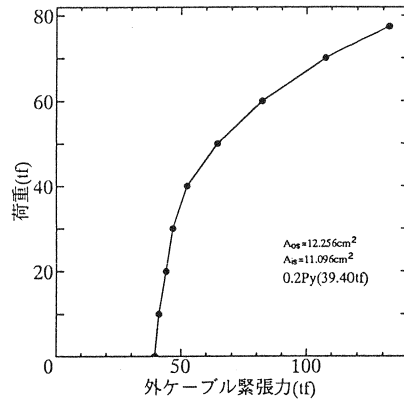


図-7 外ケーブル緊張力の変化

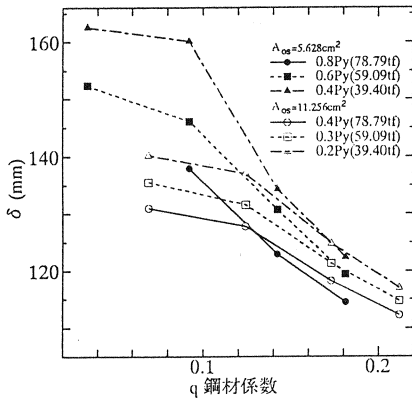


図-8 終局時のたわみと鋼材係数の関係

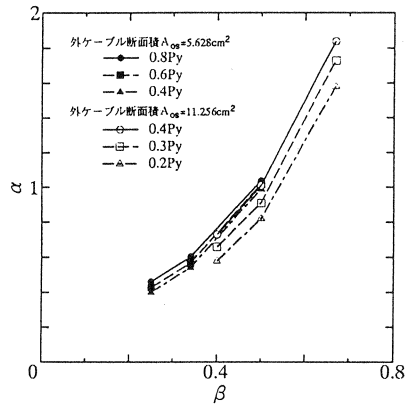


図-9 補強率 α と外ケーブル鋼材比 β の関係

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。また、外ケーブルの断面積を2倍にした場合は、さらに、勾配の低下は少なかったわみも小さくなっている。

図-7には外ケーブルの断面積を2倍にした場合(外ケーブルの緊張力は、 $0.2P_y$)の外ケーブルの緊張力の変化を示した。同図において、外ケーブルの緊張力の変化が大きくなる荷重は、図-6の荷重-たわみ曲線において、たわみが急激に増加する荷重にほぼ対応している。

図-8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が $\epsilon_c = 3500 \times 10^{-6}$ となった時点の最大たわみも小さくなることわかる。また、外ケーブル断面積が大きいほど終局時のたわみは小さくなっている。

図-9は、補強率 α と外ケーブル鋼材比 β の関係を示した。ただし、 $\beta = A_{os} / (A_{os} + A_{is})$ である。同図より両者はほぼ直線関係にあり、補強率 α が大きければ外ケーブル補強率も増え、逆に補強率が小さければ外ケーブル鋼材量も少なくて良いと、当然ともいえる結果であることがわかる。

3. 外ケーブル補強鋼材量決定の一方法

ここでは増加すべき曲げ耐力を外ケーブルで補う場合、補強鋼材量の決定を上記の解析結果で得られたノモグラム(計算図表)を用いて行う方法について述べる。

まず設計において、設計荷重が定めれば、既存の桁の何倍の曲げ耐力が必要となるのか、すなわち、補強すべき曲げ耐力が、式(1)で定義した補強率 α で示される。いま、補強率 α と鋼材係数 q の関係を示した図-3を模式化して表したものが図-10である。図-10は、外ケーブル緊張力を $0.6Py$ とし、外ケーブル断面積をパラメータとして、補強率 α と鋼材係数 q の関係を示した。外ケーブル緊張力を $0.6Py$ としたのは、図-5の結果および通常の緊張力を考慮したからである。

さて、図-10において縦軸に設計補強率 α をとり、横軸に平行線を引けば、鋼材量をパラメータとした曲線と交わり、その交点が外ケーブルを含む鋼材係数 q となる。このとき、設定した α に対応する曲線は複数存在し、 q も複数個存在することになる。しかしながら、求める鋼材係数 q は、経済性の観点から最小の値を採用すればよい。また、 $q < 0.3$ であるかどうかを確認する。この理由については後述する。

一方、図-11は図-9を模式化したもので、同図から設計補強率 α に対する β が決定できる。

A_{0s} は既存の構造物であるからすでにわかっており、 q 、 β の値も既知であるので、これよりただちに外ケーブル鋼材量 A_{0e} が決定できることになる。

$q < 0.3$ であるかどうかを確認する理由は、以下のように考えている。

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の圧縮破壊であり、 $q > 0.3$ 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、いずれも内ケーブルPC鋼材降伏後の、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外ケーブル緊張力の増大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(一種の座屈破壊)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、詳細については今後の検討が必要である。

一方、外ケーブル量が増加することで、終局時のたわみも小さくなって、いわゆる靱性が低下してくる図を図-8に示したが、これらの図を用いて補強鋼材量の許容値を決定することも可能と考えられる。

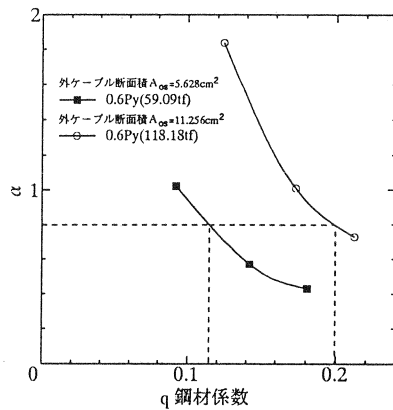


図-10 α から q を決定する方法

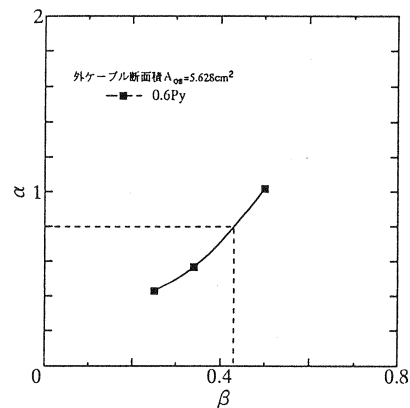


図-11 α から β を決定する方法

4. 結び

通常のPCはりで設計されている、鋼材係数 q が0.3以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、これらの結果に基づくノモグラムを作成した。そしてこれらのノモグラムを用いて、外ケーブルの補強鋼材量を決定する一つの方法について述べた。

上記に示したことが、通常、外ケーブルによる補強の対象となる範囲内で一般にいえることであれば、外ケーブルによる補強設計は曲げに対しては極めて単純明快となる。現在ある桁の終局耐力を基本に、補強率 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、ノモグラムからただ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ノモグラム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、示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)の位置や種々の外ケーブル鋼材量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。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を進めて行く必要がある。

本来、構造物の設計とは、単純で明快であるものほど、感覚的に理解しやすく、それが故に力学的にも無理がなく、より自然で合理的な構造物の設計ができると考えている。構造物の大型化、高機能化が求められ、設計がますます複雑になって、コンピュータに頼らざるを得ないのもまた現実である。

しかしながら、冒頭でも述べたが、コンピュータ全盛時代だからこそ、工学的な感覚を呼び戻す意味でも、一見古めかしいがノモグラムを用いることの重要性は高いものと思われる。

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) 徳光卓・樋野勝巳・丸山久・・・睦好宏史：耐食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.
- 3) 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.