

論文

[2131] アラミドロープを用いた外ケーブル PRC 部材の挙動

佐伯 昇*1・池田哲郎*2・堀口 敬*3・秦 滋敏*4

1. はじめに

塩害あるいは交通量、交通荷重の増大にともない、長年月供用されたコンクリート橋の損傷が多くなってきている。このため損傷を受けたコンクリート橋の補修あるいは耐力向上のための工法の開発が必要となってきている。現在、ひびわれに対する補修材注入法、鋼板接着法あるいはFRP板接着法などがとられているが、一方、繊維補強材を外ケーブルに用いた補強方法の開発が進められている。

本研究ではアラミドケーブルを外ケーブルに用いたPRC桁の耐力、変形を実験的に調べ、補修あるいは補強効果について検討したものである。断面形状は矩形、T形断面を用い、鉄筋比を変化させて、静的および疲労試験を行い、耐力および剛性の変化について調べた。

2. 実験方法

供試体は図-1のような矩形断面とT形断面を用いた。コンクリートは圧縮強度 $300\text{kg/cm}^2 \sim 350\text{kg/cm}^2$, スランプ8cmのAEコンクリートとした。引張鉄筋にはSD345を用い、圧縮鉄筋およびスターラップにはSD295Aを用いた。外ケーブルに用いたアラミドロープは、公称破断荷重10tf、直径13.5mm、破断応力 19.6tf/cm^2 、繊維実断面積 53.47mm^2 である。T形断面の場合のプレストレス時の概要を図-2に示す。矩形断面の場合はT形の横桁の代わりにサドルを用いている。

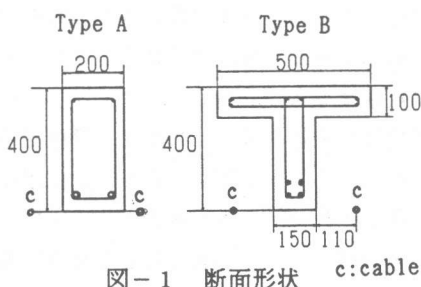


図-1 断面形状 c: cable

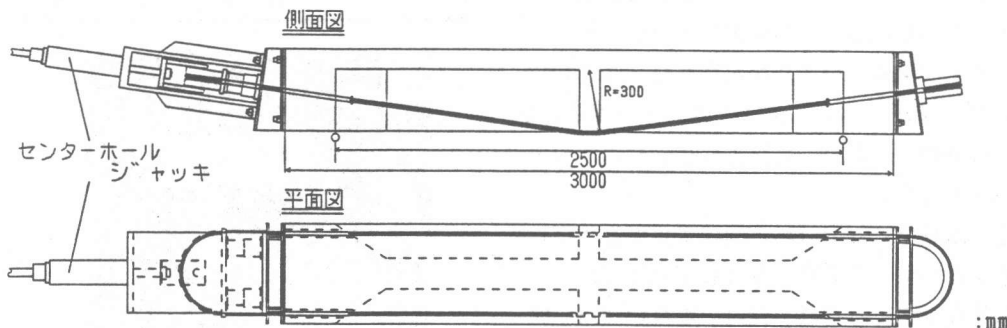


図-2 プレストレス載荷状況 (T形桁)

- *1 北海道大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
- *2 北海道大学大学院 工学研究科土木工学専攻
- *3 北海道工業大学助教授、工博 (正会員)
- *4 日本高圧コンクリート(株)、(正会員)

支間中央にはロープの曲げ上げの為にT形断面では横桁、矩形断面では鋼製サドルを設け、曲げ上げ角度は約15°である。曲げ上げ部における摩擦を除くため、ロープにはグリースとテフロンシートを用いた。

定着は図-3に示すようにケーブルを直径37cmの半円形ジグに巻き付け、接着剤（主材にエピコート828、硬化材にエピキュア-T、増量材に珪砂）で固定する方法と、接着剤を用いないで、多少高価となるがアラミドロープ専用の端末コネクターを用いたものの2方法を試みた。矩形桁の実験には前者の定着を用い、T桁には後者の定着を用いた。専用コネクターは、円錐形の穴をもつ本体部分と、繊維を摩擦によって固定するためのくさびから成っている。この固定作業は繊維を保護しているポリエチレンシースを取り除いて繊維を本体の中に入れ、均等に円錐形に分布させた繊維の中心にくさびを差し込んで固定させるものである。

実験供試体の種類を表-1に示す。静的試験は損傷したコンクリート桁を想定して、曲げひびわれを発生させた後、外ケーブルによってプレストレスを導入して、PRC桁として実験を行ったもの、及び曲げひびわれを発生させないで外ケーブルを設置して実験を行ったものがある。また、一部の桁で曲げひびわれ発生後にエポキシ樹脂を注入する補修工法も行い、外ケーブルにより緊張を与えた後実験を行った(PRC1R, PRC2R)。鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、ひびわれ挙動、たわみ、緊張力変化、および耐力の測定をした。

疲労試験では静的試験と同様に損傷を想定した桁を用いて、上限荷重をそれぞれ5, 7, 9tf(桁の破壊荷重のそれぞれ、PRC1の場合約30, 40, 50%, PRC2の場合約30, 40, 50%), 下限荷重を全て1tfとした。200万回の疲労試験で破壊するものはなく、その後静的耐力試験を行った。疲労試験による1, 3, 1千, 1万, 10万, 200万回における、変形剛性の変化、ひびわれ挙動などの測定を行った。

疲労試験状況を写真-1に示す。

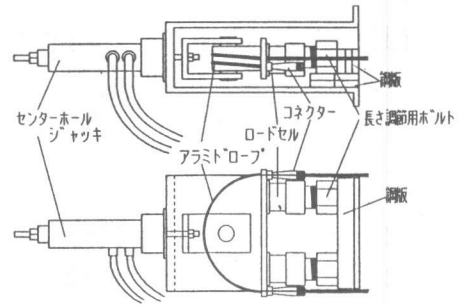


図-3 緊張および定着ジグ

表-1 供試体性状

Beams Series	Beams No.	断面	f_{cb} kgf/cm ²	p_s %	
静的試験	PRC1	A	304	0.55	
	PRC1R	A	429	0.55	
	PRC2	A	364	1.26	
	PRC2R	A	422	1.26	
	PRC3	B	362	0.44	
	PRC4	B	314	0.69	
疲労試験	PRC1	D1	A	315	0.55
		D1R	A	315	0.55
		D2	A	304	0.55
	PRC2	D3	A	429	0.55
		D1	A	419	1.26
		D2	A	364	1.26
		D3	A	422	1.26

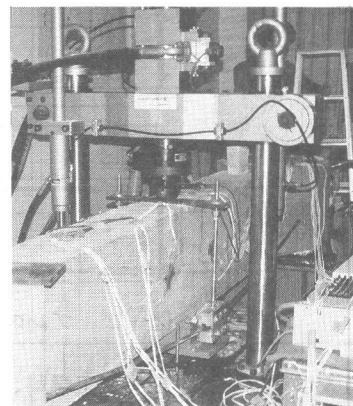


写真-1 疲労試験状況

3. 耐力および変形解析

曲げ耐力 M_p について、アンボンドPC桁としてPannell式²⁾をもとに、塑性ヒンジ長に関する係数などを修正して検討を行った。また塑性ヒンジが形成される前までは、Bransonの変形剛性をを用いて変形を求め、これに対応して緊張力の増加を求め、鉄筋の降伏時における耐力として M_y を算定した。

曲げ耐力は、次式のようになる。

$$M_p = bd^2 f'_{cB} \left[\left(1 - \frac{\beta}{\alpha} (q_s + q_u) \right) (q_s + q_u) + \Delta e q_u \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$q_s = p_s f_{sy} / f_{cB}, \quad q_u = p_p f_{pu} / f_{cB} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$q_u = \frac{q_e + \lambda - \lambda q_s / \alpha}{1 + \lambda / \alpha} \quad \text{or} \quad \frac{p_p \xi f_{pu}}{f_{cB}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\lambda = \frac{\phi d \epsilon_{cu} E_p p_p}{f_{cB} l_p} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

- f_{pu} : ケーブルの破断応力, ξf_{pu} : 終局時のケーブルの応力
- f_{pe} : ケーブルの有効応力, l_p : ケーブルの実長, E_p : ケーブルのヤング率
- $d \Delta e$: 主鉄筋からケーブルまでの距離 (ケーブルが主鉄筋の外側にあると正)
- f_{cB} : コンクリート圧縮強度, ϵ_{cu} : コンクリート終局圧縮ひずみ
- p_s : 鉄筋比, p_p : ケーブルに対する鉄筋比, ϕkd : 塑性ヒンジ長さ

鉄筋の降伏時の曲げ耐力は次式となる。

$$M_y = M_y^* b d^2 f_{cB} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$$M_y^* = (1 - \beta k) (p_s \bar{m}^* + N^* \Delta e^*) + (\beta k - d') p' m_o^* \quad \dots\dots\dots (6)$$

- $z \Delta e^*$: コンクリート圧縮力の作用位置からケーブルまでの距離
- k : 中立軸, \bar{m}^* : 破壊時の引張鉄筋応力 / f_{cB}
- N^* : $N / b d f_{cB}$, p^* : 圧縮鉄筋比, α : 0.8, β : 0.4
- m_o^* : 破壊時の圧縮鉄筋応力 / f_{cB} , d' : 圧縮鉄筋中心からのかぶり / d

ケーブルの有効緊張力から N^* を求め k を算定して、変形を求め、 N^* の増加分を算定して、繰り返して計算を行って、 N^* の増加分がなくなる状態で k を決定し、 M_y^* を求める¹⁾。変形の解析は塑性ヒンジ長 ϕkd を用いれば、塑性回転角 θ_p は $\phi \epsilon_{cu}$ となり、塑性たわみ δ_u は次式で表される

$$\delta_u = L \theta_p / 4 \quad \dots\dots\dots (7)$$

4. 矩形断面の実験結果

矩形断面の場合のひびわれ荷重(P_{cr})、主鉄筋が降伏したときの耐力(P_{sy} 、 M_y に対応する荷重、式(5))および破壊荷重(P_b 、 M_b に対応する荷重、式(1))を表-2に示す。また実験値/算定値の比を示した。 P_{cr} は桁下面の引張応力がコンクリートの引張強度になった時とした。

表-2 矩形断面供試体の実験結果

Beam No.	Test (tf)			Cal. (tf)			Test/Cal.		
	P_{cr}	P_{sy}	P_b	P_{cr}	P_{sy}	P_b	P_{cr}	P_{sy}	P_b
PRC1	6.0	13.0	17.1	6.6	13.0	16.8	0.91	1.00	1.02
PRC1R	7.0	12.0	*	6.7	13.1	16.9	1.04	0.92	-
PRC2	6.0	21.0	24.0	6.7	19.5	23.2	0.90	1.08	1.04
PRC2R	6.0	23.2	27.6	6.7	19.5	23.1	0.90	1.19	1.20

* 破壊判定ミス

荷重たわみ曲線の1例を図-4に示す。表-3は変形剛性の挙動を示したものである。 EI_0 はひびわれ導入前の全断面有効の剛性、 EI_{cr} はプレストレス導入前でひびわれ後の剛性(3回繰返し荷重をかけた後)で供用時ににおいて想定される剛性に対応する。比較の時にはこれを基準にして用いている。 EI_p はプレストレスを導入し、3回繰返し荷重をかけた後の剛性、外ケーブルによる補修直後の剛性に対応する。 EI_{p200} は200万回繰返し荷重後の剛性を示す。D1, D2, D3はそれぞれ荷重レベルが5tf, 7tf, 9tfを示し、D1Rはひびわれ注入剤で補修した桁を表す。

EI_{cr} を1とすると鉄筋比が0.55%の場合、 EI_p は1.2~1.3倍であり、補修したD1Rを除いて EI_{p200} は1.0~1.2倍となっている。これはプレストレス導入によって2~3割剛性が増加し、疲労によって EI_p よりは低下するが、ほぼ EI_{cr} と同じとなる。ただし、ひびわれ補修した桁D1Rの剛性(疲労荷重レベルが破壊荷重の約30%)は大きく、補修効果が認められている。同時に鉄筋比1.26%の場合 EI_0 が EI_{cr} に対して1.1~1.2倍であり、 EI_{cr} 、 EI_p 、 EI_{p200} には

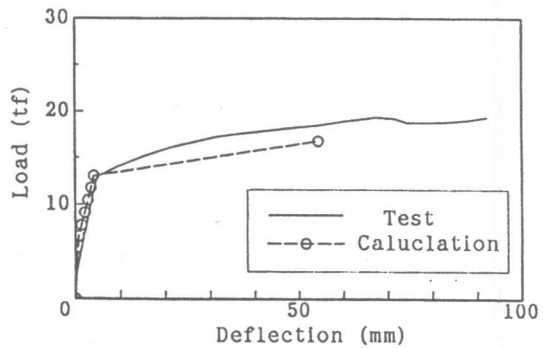


図-4 たわみ性状 (PRC1D2)

表-3 剛性の比較

Beam No.		EI_0	EI_{cr}	EI_p	EI_{p200}
PRC1	D1	1518 (1.54)	986 (1.00)	1295 (1.31)	1137 (1.15)
	D1R	1518 (1.54)	986 (1.00)	1307 (1.33)	1426 (1.45)
	D2	1550 (1.64)	944 (1.00)	1102 (1.17)	911 (0.97)
	D3	1309 (1.68)	779 (1.00)	928 (1.19)	882 (1.13)
PRC2	D1	1519 (1.05)	1445 (1.00)	1504 (1.04)	1504 (1.04)
	D2	1484 (1.13)	1310 (1.00)	1374 (1.05)	1295 (0.99)
	D3	1553 (1.17)	1327 (1.00)	1401 (1.06)	1243 (0.94)

あまり差がなく、剛性低下はなかった。また、200万回疲労試験後の静的耐力と疲労を受けない桁の静的耐力とはあまり変わらなかった。

5. T型断面の実験結果

荷重-たわみ曲線を図-5に示す。引張鉄筋がまだ降伏しないで、塑性ヒンジが形成される前までは直線的に変形が増加し、塑性ヒンジが形成されると大きな変形が生ずる。これと同時にケーブルの緊張力の増加も顕著になる。その挙動を図-6に示す。たわみの増加にほぼ比例してケーブルの緊張力も増加していく。最終的なたわみの大きさは引張鉄筋量の小さいもの、すなわち中立軸が上に上がり圧縮ゾーンが小さくなるほど変形は大きい。圧縮ゾーンは、鉄筋量が小さいものの順に2, 3cm~6, 7cm程度である。

耐力から式(1)を用いて塑性ヒンジ長さに関する係数 ϕ を求めると、図-7のようになる。横軸は中立軸に対応する係数 $(q_u + q_u^*)$ で、 q_u^* は q_u の ξ を1としたものである。 $\xi = 1$ にすると、係数が大きくなり、安全側に ϕ を評価することになる。回帰すると、

$$\phi = 3 / (q_u + q_u^*) + 29$$

となる。またこの安全側の値として、

$$\phi = 1 / (q_u + q_u^*) + 20$$

が求められる。後者の方が変形に対してよい対応を示し、総合的に判断してこちらの方がよいと考えられる。また、圧縮鉄筋を考慮しなかったのは、先に述べたように圧縮ゾーンが最終的に小さくなり、これによる効果が小さくなると考えられるからである。

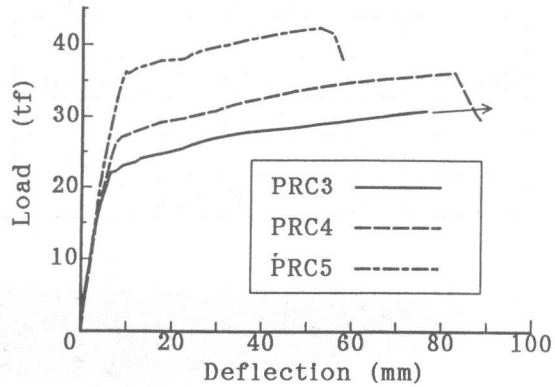


図-5 たわみ性状

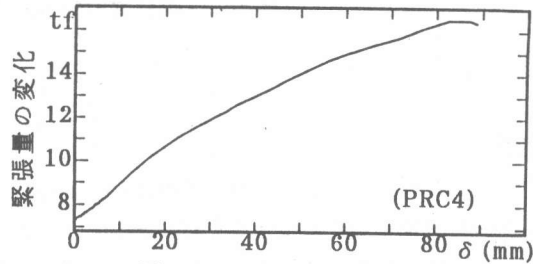


図-6 たわみ-緊張量変化

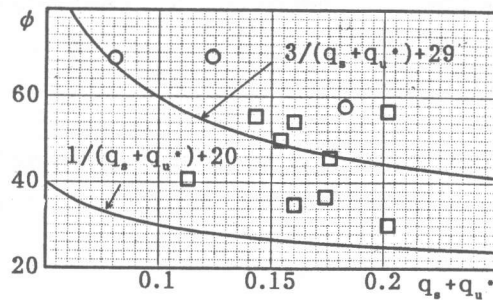


図-7 $\phi - (q_u + q_u^*)$

T形桁の耐力と、終局時のたわみの実験結果、および解析結果を表-4に示す。また、載荷後の供試体性状を写真-2に示す。

表-4 T形桁の実験および解析結果

Beam No.	P_b (tf)			δ_u (mm)		
	Test	Cal.	Test/Cal.	Test	Cal.	Test/Cal.
PRC3	33.9	28.1	1.21	95.5	89.9	1.06
PRC4	37.4	30.8	1.22	82.6	70.4	1.17
PRC5	42.5	38.0	1.12	52.4	60.1	0.87

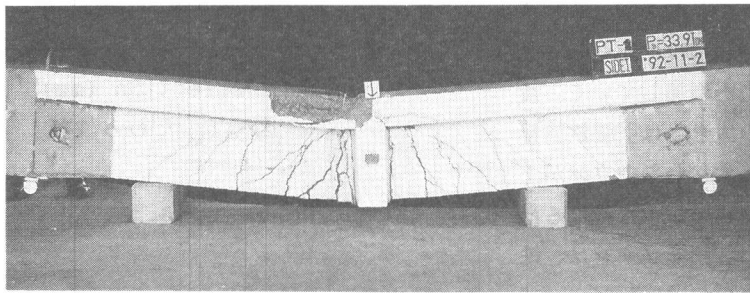


写真-2 載荷後の供試体性状 (PRC3)

6. 結論

- 1) 外ケーブルを用いたPRC桁の挙動はPannellの式を修正し、塑性ヒンジ長に関する係数を適切に設定することにより算定できることがわかった。
- 2) 変形は塑性ヒンジ形成前まではBransonの式を用い、形成後は1)により求まる塑性回転能を用いることにより、把握できる。
- 3) RC桁に曲げひびわれを入れた後、破壊強度の40~50%までの荷重レベルでのPRC桁の疲労試験では、変形剛性低下およびその後の静的耐力に変化が少ないこと、また、ひびわれ注入法による補修した桁において剛性向上に効果があることがわかった。
- 4) 専用の定着具を用いる方が簡単に定着できるが、接着剤による方法も有効であることがわかった。

[謝辞] 本研究に際し、御協力くださいました後町氏(北海道立工業試験場)、吉田氏(ショーボンド建設)、岡村康弘氏(帝人)に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 佐伯、大島、堀口、後町、秦 "アラミド繊維による外ケーブルを用いたPRC部材の2, 3の実験", セメントコンクリート論文集No. 46, PP. (1992)
- 2) F.N.Pannell: The Ultimate Moment of Resistance of Unbonded Prestressed Concrete Beams, M. C. R March 1969