17 年間自然暴露した FRP 緊張材を用いたプレテンションはりの有効プレストレス

前田工繊　正会員　○中井　裕司
川田建設　正会員　渡部　寛文
東京製綱　正会員　榎本　剛
土木研究所　正会員　魚本　健人

１．目的

アラミド繊維および炭素繊維製 FRP と PC 鋼より線を用いたプレテンションはりを，海岸の飛沫帯と内陸部に自然暴露した．材齢 0.2 年，3.7 年および 17 年で静的な載荷試験を行い曲げひび割れ性状の調査を行った． ひび割れ再開荷重より有効プレストレスを推定し，計算値と比較し純リラクセーション率が妥当であることを確認した．

２．試験方法

自然暴露試験のパラメータを **Table1** に示す．自然暴露サイトは，塩害環境の厳しい伊豆半島の飛沫帯(**Photo1**)と千葉県の内陸部である．材齢 0.2 年で，曲げ耐力の 65％(14kNm)で全ての試験体に曲げひび割れを導入した．3.7 年と 17 年の暴露後，残る試験体に曲げ耐力の約 80％(18kNm)で載荷しひび割れを再開させた．残る 6 体を 2030 年までの 32 年間を目標に土木研究所の施設で自然暴露する予定である．

Table 1. Parameter of exposure

Name of specimen	*Initial loading*	*3.7years exposure*	*17years exposure*	*Destructive test*	*DOKEN Re-exposure*	*Quantity*
N[A,C,S]Control	*yes*			*1999*		3
N[I,T][A,C,S]1	*yes*	*yes*		*2002*		6
N[I,T][A,C,S]2	*yes*	*yes*	*yes*		*yes*	6
N[I,T][A,C,S]3	*yes*	*yes*	*yes*	*2016*		6

Initial letter designates type of exposure: N = Natural.
[I,T] designates exposure site: I = Splash zone on the Izu Peninsula; T = Inland site at Chiba Prefecture.
[A,C,S] describes the tendon: A = Aramid; C = Carbon; S = Steel.

使用した緊張材の材料特性を **Table 2** に示す。FRP は，Aramid で Technora®，Carbon で CFCC®である．導入プレストレスは緊張材の保証耐力の 62%とした．試験体の断面は，**Fig.1** に示す 0.2m×0.15m である．導入された初期のプレストレスは均等圧縮で 4N/mm^2 程度である．純リラクセーション率は各材料の試験値であり，Aramid＞Carbon＞Steel である．有効プレストレスに影響するヤング率は，Aramid＜Carbon＜Steel である．

Table 2. Properties of tendons and reinforcements

Material	Aramid	Carbon	Steel
Designation	Technora	CFCC	SWPR-7A
	φ6.0	φ7.5	φ9.3
Nominal cross section area	32.5	45.3	51.6
Nominal diameter (mm)	6.4	7.6	9.3
Guaranteed capacity (kN)	56.9	57.0	88.8
Tensile Capacity (kN)	62.5	60.0	103
Young's modulus (kN/mm^2)	46	104	197
Relaxation rate (%)	2.54+2.74logT	0.231+0.345logT	1.5

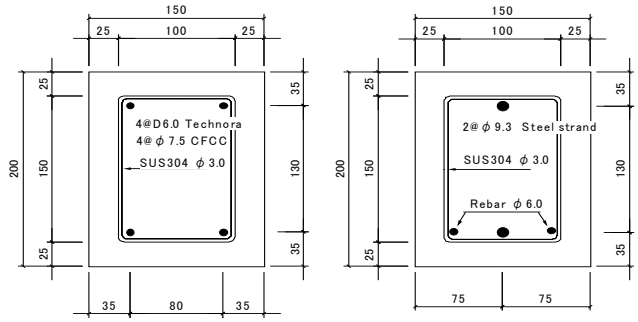

Fig.1 Section of specimens

Photo1　Izu exposure site

キーワード　アラミド繊維，炭素繊維，FRP，リラクセーション率，有効プレストレス，自然暴露，
連絡先　ACC 建設用先端複合材技術協会　http://acc-club.jp/

３．試験結果

千葉の暴露サイトの試験体にセットされた埋込ひずみ計で測定したコンクリートの収縮ひずみを **Fig.2** に示す．全試験体は測定された平均値の収縮が生じたものと仮定して，以下の議論を進める．**Table3** に示す有効プレストレスの計算値は式(1)で，緊張材のリラクセーションによる応力度の減少量を式(2)で，**Fig.2** の収縮をコンクリートの弾性変形およびクリープと乾燥収縮の総和とし，これによる応力度の減少量を式(3)で考慮した．なお，ひび割れモーメントの計算値は，コンクリートの引張強度を 3.76N/mm^2 とコンクリートの圧縮強度(66N/mm^2)から推定した．

$$\sigma_{pe} = \sigma_{pi} - (\Delta\sigma_{pr} + \Delta\sigma_{ps}) \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma\sigma_{pi} = \gamma_0(1 - 2\Delta\sigma_{ps}/\sigma_{pi})\sigma_{pi} \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{ps} = E_p\varepsilon_{cs} \quad (3)$$

ここで，σ_{pe}：緊張材の有効プレストレス，σ_{pi}：緊張直後の緊張材の応力度，$\Delta\sigma_{pr}$：リラクセーションによる緊張材応力度の減少量，$\Delta\sigma_{ps}$：コンクリートの収縮による緊張材応力度の減少量，γ_0：リラクセーション率，E_p：緊張材のヤング率，ε_{cs}：コンクリートの総収縮量

有効プレストレスは，曲げひび割れモーメントとひび割れ再開モーメントを計測することで，実測した．0.2 年時に，曲げひび割れモーメントは目視で確認した．3.7 年と 17 年時において，ひび割れ再開モーメントは，純曲げ区間のひび割れに取付けたπゲージの測定値が，1.5kNm までの割線勾配に対して 0.002mm 軟化側にシフトした時点とした．**Table4** と **Fig.3** に実測値と計算値の比較を示す．実測値は計算値に対して大きめを示し，材料試験で決定されたリラクセーション率が，長期に暴露された試験体においてほぼ妥当な値であることが分かった．

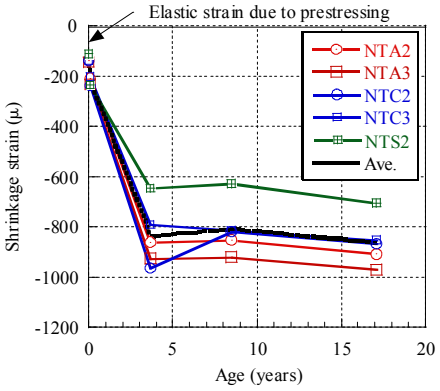

Fig.2 Shrinkage strain and age

Table3 Effective prestress

Age	Tendon	Jacking force	Prestressing stress	Relaxetion rate	Shrinkage strain	Apparent relaxetion rate	Effective prestress	Effective prestress ratio	Compresive stress due to prestressing
(year)		(kN)	(MPa)	(%)	(μ)	(%)	(MPa)		(MPa)
0.2	Aramid	139	1068	7.4	220	7.3	980	0.918	4.25
	Cabon	143	786	0.8		0.8	758	0.963	4.58
	Steel	111	1076	1.5		1.5	1014	0.943	3.49
3.7	Aramid	139	1068	11.1	830	10.3	919	0.859	3.97
	Cabon	143	786	1.3		1.0	692	0.894	4.25
	Steel	111	1076	1.5		1.5	888	0.857	3.17
17.1	Aramid	139	1068	16.7	860	15.5	863	0.802	3.71
	Cabon	143	786	2.0		1.5	685	0.883	4.20
	Steel	111	1076	1.5		1.5	882	0.851	3.15

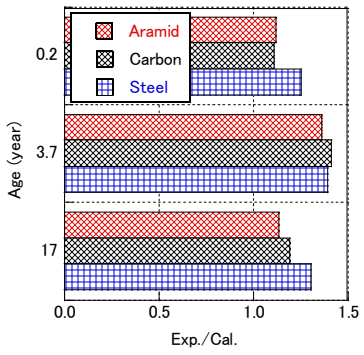

Fig.3 Effective prestress Exp./Cal.

Table4 Effective prestress estimated by opening of cracks

State	Age(year)		unit	Aramid	Carbon	Steel
Cracking moment	0.2	Exp.	(kNm)	9.0	9.3	9.0
		Cal.	(kNm)	8.0	8.3	7.2
		Exp./Cal.		1.12	1.11	1.25
Crack reopening moment	3.7	Exp.	(kNm)	5.4	6.0	4.4
		Cal.	(kNm)	4.0	4.2	3.2
		Exp./Cal.		1.36	1.41	1.39
Crack reopening moment	17.1	Exp.	(kNm)	4.2	5.0	4.1
		Cal.	(kNm)	3.7	4.2	3.1
		Exp./Cal.		1.13	1.19	1.30

参考文献

・渡部寛文，中井裕司，榎本剛，魚本健人：FRP 緊張材を用いた PC はりの長期耐久性に関する検証試験；土木学会，第４回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，2012.11