

1600t テンドンシステムの開発

—ディビダーク ストランド工法—

岩	城	良*
夏	目 忠	彦**
岩	淵	明***
竹	田 哲	夫†
石	原 重	孝††
小	林 奎	一†††
赤	崎 重	雄††††

1. はじめに

最近、原子炉格納容器、石油開発のための海洋プラットフォーム、液化ガス貯蔵のためのタンク、長大橋等の大型構造物にプレストレストコンクリート(PC)構造が数多く採用されてきている。

これらの大型PC構造物では、大きなプレストレス力が必要となるが、従来用いられているPCテンドンは引張荷重が100tから500tクラスのものが多いため、数多くのテンドンを配置しなければならず、テンドンの配置が複雑になるとともに、建設コストの増大を招く要因の一つになっている。

大型PC構造物をより経済的、合理的に建設するためには、一度に大きなプレストレス力を導入できる大容量テンドンシステムの開発が望まれており、海外においても、既に1000tクラスのPCテンドンシステムが開発され、原子炉格納容器に使用されている。

このような現状を踏まえ、大容量テンドンシステムとして、前回の500tテンドンシステムの開発¹⁾に引続き、1000tおよび1600tディビダークストランド工法を取り上げ、種々の試験を実施した。その結果、設計・施工上の基本資料を得るとともに、我が国での実用化の確認ができたので、ここにその概要を報告する。

2. ディビダークストランド工法について

2.1 概 要

ディビダークストランド工法は、西ドイツの Dycker-

hoff & Widmann 社 (DYWIDAG) が開発したマルチストランドによるポストテンション方式のPC工法である。

この工法の特長は、次のとおりである。

- 1) 定着具の構造を工夫し、定着部コンクリートに作用する局部応力を小さくできる。
- 2) 高強度の直径15.2mmのストランド(φ5mmの素線7本をより合わせた鋼より線)を用い、3本から61本まで束ねて用いることができ、任意のプレストレス量を選定できる。
- 3) ウェッジ定着であるため、セット量(すべり量)が小さく、緊張力のロスが少ない。
- 4) テンドンを構成するストランド全数を同時に緊張することができ、ウェッジの押込みも自動的に行えるため、緊張作業も容易で、緊張管理も精度良く行える。

なお、表-1にJIS G 3536「PC鋼線及びPC鋼より線」に規定されているA種7本鋼より線およびB種に相当するより線を用いたテンドンの強度および許容引張荷重を示す。

2.2 定 着 具

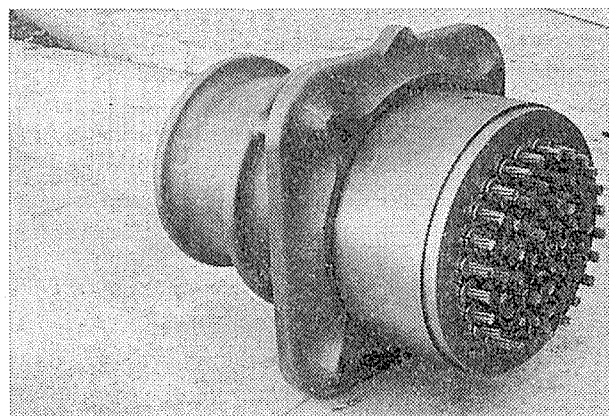


写真-1 定着具 外観

* 鹿島建設(株)技術研究所土木部次長
 ** 鹿島建設(株)技術研究所主任研究員
 *** 鹿島建設(株)技術研究所研究員
 † 鹿島建設(株)土木設計本部設計主査
 †† 鹿島建設(株)土木設計本部副主査
 ††† 鹿島建設(株)機械部技師
 †††† 住友電気工業(株)特殊線事業部 PC 開発室技師

表—1 テンドンの強度および許容引張荷重

ストランドの種類	ストランドの数	引張荷重 P_u (kgf)	降伏荷重 P_y (kgf)	許容引張荷重		
				使用状態 (kgf)	プレストレッシング直後 (kgf)	プレストレッシング中 (kgf)
A 種	3	69 300	59 100	41 580	48 510	53 190
	4	92 400	78 800	55 440	64 680	70 920
	5	115 500	98 500	69 300	80 850	88 650
	7	161 700	137 900	97 020	113 190	124 110
	9	207 900	177 300	124 740	145 530	159 570
	12	277 200	236 400	166 320	194 040	212 760
	15	346 500	295 500	207 900	242 550	265 950
	19	438 900	374 300	263 340	307 230	336 870
	37	854 700	728 900	518 820	598 290	656 010
61	1 409 100	1 201 700	845 460	986 370	1 081 530	
B 種	3	79 800	67 800	47 880	55 860	61 020
	4	106 400	90 400	63 840	74 480	81 360
	5	133 000	113 000	79 800	93 100	101 700
	7	186 200	158 200	111 720	130 340	142 380
	9	239 400	203 400	143 640	167 580	183 060
	12	319 200	271 200	191 520	223 440	244 080
	15	399 000	339 000	239 400	279 300	305 100
	19	505 400	429 400	303 240	353 780	386 460
	37	984 200	836 200	590 520	688 940	752 580
61	1 622 600	1 378 600	973 560	1 135 820	1 240 740	

(注) 許容引張荷重の算定は、土木学会制定「プレストレストコンクリート標準示方書」による。

使用状態： $0.6 P_u$ または $0.75 P_y$ のいずれか小さい方

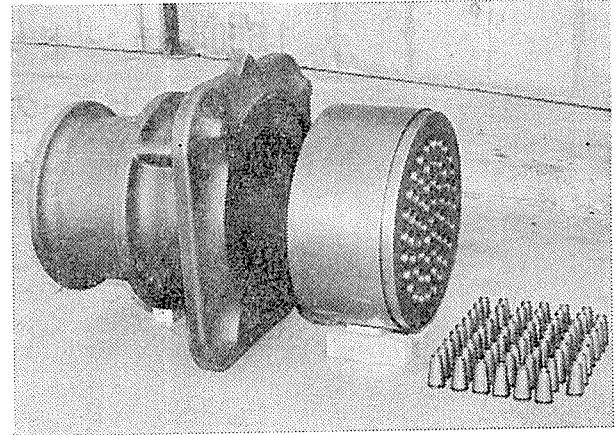
プレストレッシング直後： $0.7 P_u$ または $0.85 P_y$ のいずれか小さい方

プレストレッシング中： $0.8 P_u$ または $0.90 P_y$ のいずれか小さい方

ストランド 19 本までを束ねて用いるアンカーグロケットタイプの定着具については、既に前報¹⁾に報告したので、ここでは、37 本および 61 本ストランドに用いるリブキャストアンカータイプの定着具について述べる。

このタイプの定着具の外観および組立概要図を写真—2、図—1 に示す。また定着具の構成要素の外観およびその形状寸法を写真—2、図—2 に示す。

リブキャストアンカータイプは、リブの付いた鋳鉄製のアンカーを用いたもので、このリブの効果により定着



写真—2 定着具の構成要素

部コンクリートに作用する大きな支圧力を分散させ、コンクリートに作用する局部応力を小さくすることができる。

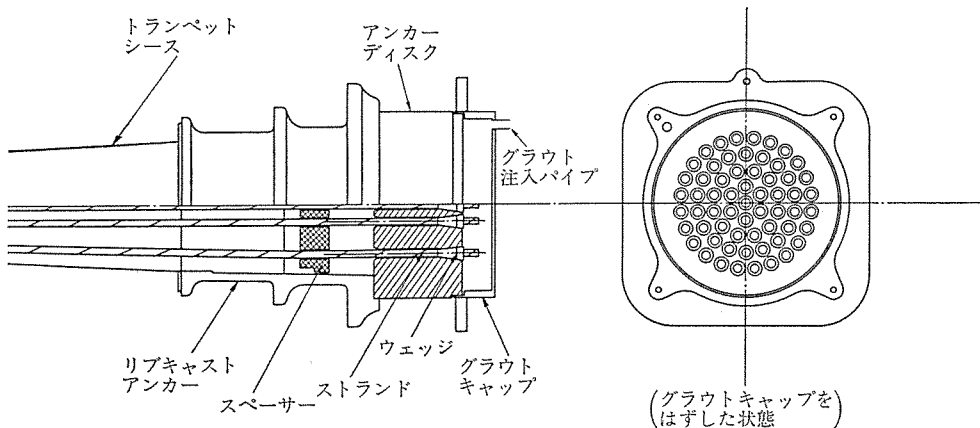
2.3 緊張装置

ディビダークストランドジャッキは、束になったストランドを同時に緊張し、その状態で、ジャッキ内に装着されているウェッジ定着ラムによって、ウェッジをアンカーディスクに押し込むことができる。このジャッキによる緊張・定着の機構を図—3 に示す。また、1 000 t および 1 600 t テンドンに用いる 1 300 t ジャッキの外観およびその仕様を写真—3、表—2 に示す。

3. 実用化のための諸試験

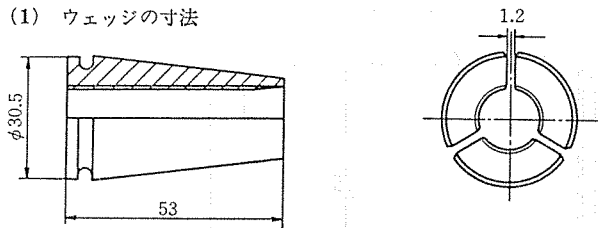
新しい工法を実用に供するには安全性・信頼性を十分に確認しておく必要がある。今回の開発では、1 000 t および 1 600 t テンドンの設計・施工上の仕様は、試験によって次の規準を満たすように決め、それで安全性・信頼性を保証することとした。

- ① コンクリート標準示方書 土木学会 昭和 55 年
- ② プレストレストコンクリート標準示方書 土木学

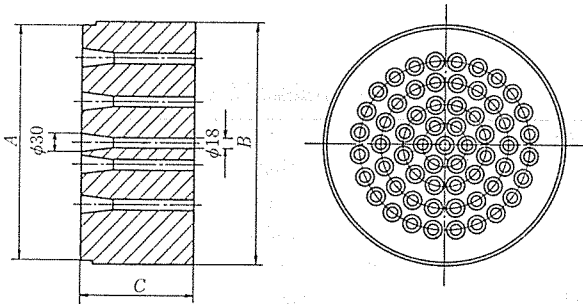


図—1 定着具組立概要図

(1) ウェッジの寸法

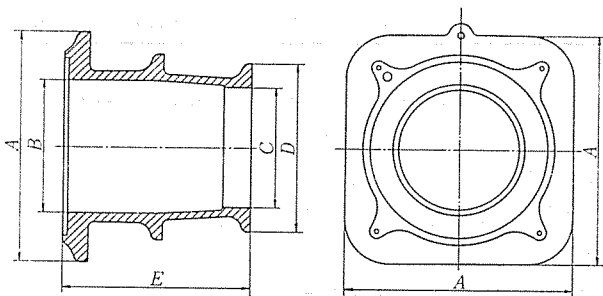


(2) アンカーディスクの寸法



ストランドの数	A (mm)	B (mm)	C (mm)
37	φ290	φ300	150
61	φ370	φ380	180

(3) リブキャストアンカーの寸法



ストランドの数	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)
37	395	φ225	φ195	φ270	350
61	495	φ284	φ260	φ360	405

図-2 定着具の形状寸法

表-2 1300 t ジャッキの仕様

機 械 形 式	DWJ-1 300-250
最 大 出 力 (t)	1300
ス ト ロ ー ク (mm)	250
緊 張 ラ ム 受 圧 面 積 (cm ²)	2710.40
最 大 圧 力 (kg/cm ²)	480
閉 じ た ジャ ッ キ の 長 さ (mm)	1200
開 いた ジャ ッ キ の 長 さ (mm)	1360
最 大 直 径 (mm)	890
重 量 (kg)	3200

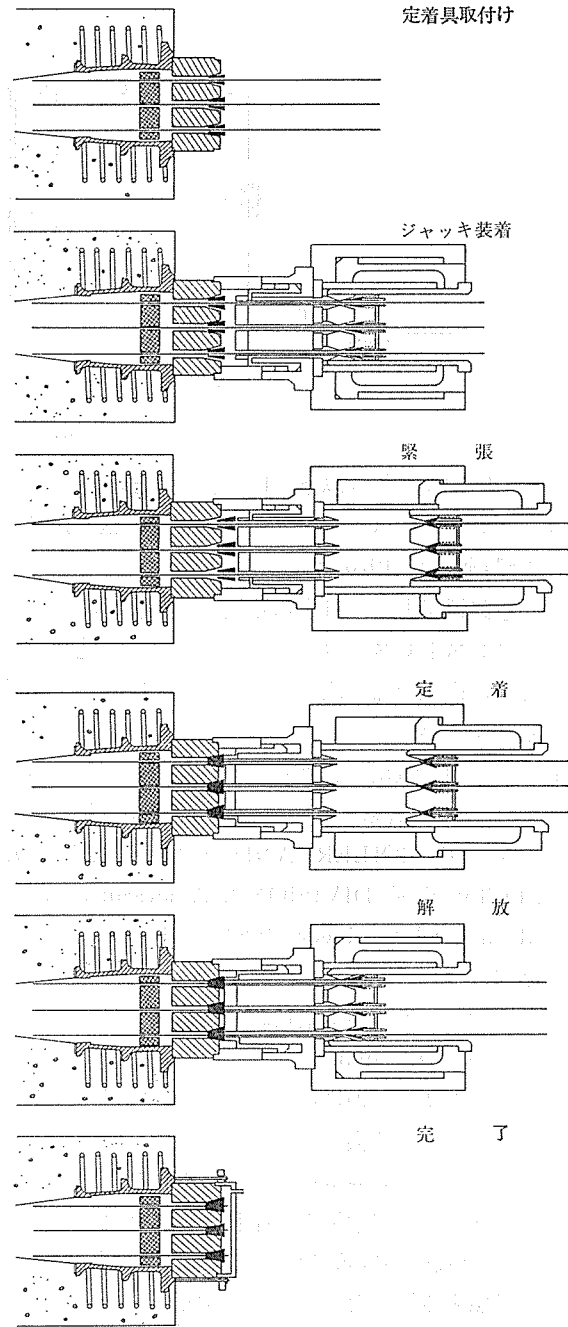


図-3 緊張・定着機構

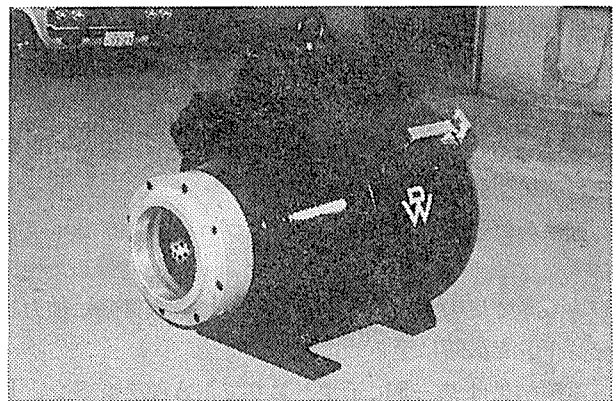
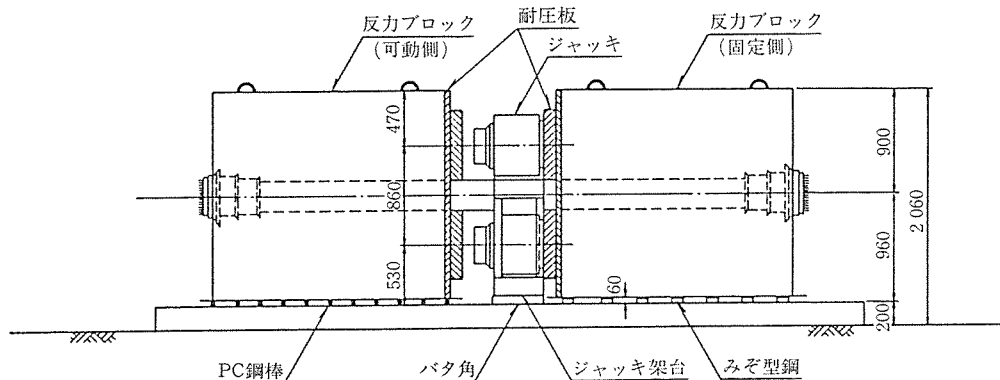


写真-3 1300 t ジャッキの外観



図—4 引張強度試験要領

会 昭和 53 年 (以下, PC 示方書と略記)

- ③ プレストレストコンクリート設計・施工指針 日本建築学会 1975 年
- ④ 道路橋示方書 日本道路協会 昭和 53 年
- ⑤ プレストレストコンクリート原子炉構造物 (压力容器, 格納容器) 設計・施工指針 (案) 土木学会 昭和 51 年
- ⑨ 原子力発電用コンクリート格納容器に関する技術基準 (案) 資源エネルギー庁 昭和 54 年
- ⑦ ASME BOILER AND PRESSURE CODE SECTION III DIVISION 2 American Society of Mechanical Engineers 1980 (以下 ASME 規格と略記)
- ⑧ 海洋コンクリート構造物設計施工指針 (案) 土木学会 1977 年 3 月
- ⑨ コンクリートのひびわれ調査補修指針 日本コンクリート工学協会 昭和 55 年版
- ⑩ 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案) 日本コンクリート工学協会 昭和 58 年 2 月

以下に確認試験の概要を述べる。文中右肩に番号を付記して参照する規準を示すことにする。

3.1 緊張材系の引張強度試験

ストランド 1 本毎の強度が規格引張荷重以上であることは既に確認されているが, ストランドを複数本束ねた tendon とアンカーディスク・ウェッジを組み合わせた緊張材系が tendon 規格引張荷重の 100% 以上の強度を有していることも確認しておく必要がある。このため緊張材系の引張強度試験を実施した。

図—4 に示すように 2 つの反力ブロックに tendon を挿入しアンカーディスクおよびウェッジで定着した後, ジャッキで反力ブロックを押し広げて緊張材系に加力し tendon を破断に至らせた。

試験結果は表—3 に示すとおりで, A 種 tendon, B 種 tendon とともに規格引張荷重の 100% 以上の耐力を有

表—3 引張強度試験結果

テンド ン容量	種類	試験材	破断荷重 ① (kgf)	引張荷重 ② (kgf)	①/② (%)
1 000 t	A 種	A-1	884 700	854 700	103.5
		A-2	897 700	854 700	105.0
		A-3	871 700	854 700	102.0
	B 種	B-1	1 027 800	984 200	104.4
		B-2	1 040 800	984 200	105.8
		B-3	1 053 800	984 200	107.1
		B-4	1 001 800	984 200	101.8
1 600 t	A 種	A-1	1 511 800	1 409 100	107.3
		A-2	1 546 100	1 409 100	109.7
		A-3	1 529 000	1 409 100	108.5
	B 種	B-1	1 700 800	1 622 600	104.8
		B-2	1 649 200	1 622 600	101.6
		B-3	1 666 400	1 622 600	102.7
		B-4	1 649 200	1 622 600	101.6

しており, 破断時伸びも 3.0% で規定値の 2.0% 以上であった。またアンカーディスクやウェッジに過大な変形等が生じることもなかった。

以上より, 緊張材系は十分な強度を有しているものと判断できる。

3.2 緊張材系の疲労試験

構造物内に配置した緊張材系には, 地震や機械振動などによる繰返し荷重が作用する場合もあるため, 十分な耐疲労性能が要求される。

ここでは高サイクル疲労および低サイクル疲労試験を実施して緊張材系が耐疲労性能を有していることを確認した。

(1) 高サイクル疲労試験

ストランドをウェッジで疲労試験機に保持し, ストランド-ウェッジ系に繰返し荷重を載荷した。荷重レベルは ASME 規格⑦⑧に準じて上限荷重を $0.66 \times$ 規格引張荷重, 下限荷重を $0.60 \times$ 規格引張荷重とし, 繰返し回数は 200 万サイクルとした。

ストランドが途中で破断したり過度に変形することもなくウェッジが割れることもなかった。また 200 万サイ

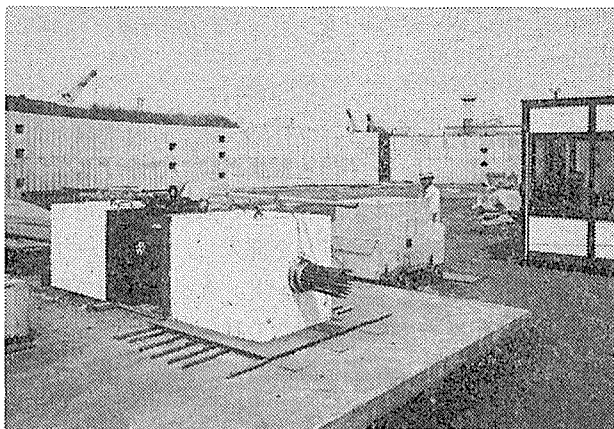
クル載荷後にも系に異常は生じていなかった。

(2) 低サイクル疲労試験

写真—4 のようにテンドンを挿入した2つの反力ブロックをジャッキで押し広げる方法で試験を行った。これも ASME 規格⑦⑧に従い、荷重レベルは上限荷重を $0.80 \times$ 規格引張荷重、下限荷重を $0.40 \times$ 規格引張荷重とし、繰返し回数は 50 サイクルとした。

載荷中、載荷後とも緊張材系に異常はなかった。

これら2つの試験から、緊張材系は高サイクル、低サイクルの疲労に対して十分な耐疲労性能を有していると判断できる。



写真—4 低サイクル疲労試験状況

3.3 定着部コンクリートの耐力試験

1000 t、1600 t テンドンでは導入力が非常に大きいため定着部コンクリートに大きな局部応力が作用する。この局部応力に対処するために定着部コンクリートをスパイラル筋で補強し、そのまわりに用心鉄筋を配する。

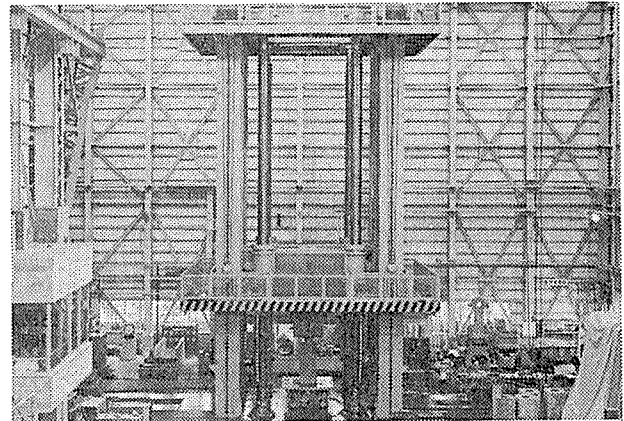
1600 t テンドンのような大容量テンドンの施工例はまだないので、補強筋や用心鉄筋の配置形状、最小縁辺距離およびコンクリート強度等は試験によって決定した。

これら諸元の決定に際しては、前述の規準類①②③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩を参照して以下に示す判断基準を満足することとした。

- a. 使用時健全性の評価基準
 - プレストレッシング直後の許容引張荷重時補強筋の応力度 \leq 許容応力度
 - プレストレッシング中の許容引張荷重時試験体表面のひびわれ幅 ≤ 0.10 mm
- b. 破壊安全度の評価基準
 - 試験体の破壊荷重 $\leq 1.1 \times$ テンドン規格引張重

ここに、破壊荷重とは載荷継続中に荷重が上昇しなくなった時の最大荷重を示す。

ここでは、定着部破壊強度試験で定着部コンクリート



写真—5 定着部破壊強度試験

表—4 定着部破壊強度試験試験体概要

試験体が対象とするテンドン容量	1000 t	1600 t
試験体数	2	2
試験体の断面寸法 (mm)	650×650	830×830
試験時のコンクリート強度 (kgf/cm ²)	400	400

の補強方法等を決め、定着部ジャッキ装着緊張試験で使用性を検討することにした。

(1) 定着部破壊強度試験

補強筋配置、縁辺距離およびコンクリート強度をパラメータにして行ったいくつかの試験のうち、判定基準を満たしたものについて報告する。当試験で用いた試験体は正方形断面を有するブロック試験体で、表—4 にその条件を示す。

試験は日本大学理工学部および東京大学工学部の大型構造物試験機（容量はそれぞれ 3000 t および 2000 t）を用いて行い、PC 示方書に示されている許容引張荷重を含む載荷ステップを設定して定着部に載荷した（写真—5 参照）。

試験体の補強筋（スパイラル筋）には、各ピッチごとにひずみゲージを貼付しており、各荷重段階で補強筋のひずみおよび試験体表面のひびわれ幅を測定した。

試験結果を表—5 に示す。結果はすべて判定基準を満足しており、今回の試験と同じ補強を施した定着部であれば十分な耐力を有する安全な定着部であると判断できる。

1000 t および 1600 t テンドン用アンカーはリブキャストアンカーと呼ばれるタイプのもので、前述のように3つのリブがそれぞれコンクリートに圧縮力を伝達することで局部応力を分散させている。リブキャストアンカー設計時に想定したリブの圧縮力分担比率が実際と合致しているかどうか確かめるために、モールドゲージを用いてリブ間のコンクリート応力を測定したところ、分担比率は良く合っていた。

表—5 定着部破壊強度試験結果

テンド ン容 量	試験体 測定 項目 荷重	A		B	
		補強筋の 応力度 (kgf/cm ²)	ひびわれ 幅 (mm)	補強筋の 応力度 (kgf/cm ²)	ひびわれ 幅 (mm)
		600 t (0.6・P _u ^B)	809	0.04	880
690 t (0.7・P _u ^B)	1084	0.06	1067	0.06	
755 t (0.9・P _y ^B)	1241	0.08	1229	0.08	
破壊荷重 ① (t)	1472		1466		
①/P _u ^B	1.496		1.490		
1000 t	975 t (0.6・P _u ^B)	809	0.04	880	0.04
	1140 t (0.7・P _u ^B)	1084	0.06	1067	0.06
	1240 t (0.9・P _y ^B)	1241	0.08	1229	0.08
	破壊荷重 ② (t)	1798		1787	
	②/P _u ^B	1.108		1.101	

(注) ●P_y^B: B種テンドンの規格降伏荷重
 ●P_u^B: B種テンドンの規格引張荷重
 ●0.6P_u^B, 0.7P_u^B, 0.9P_y^B: B種テンドンの使用状態,
 プレストレッシング直後, プレストレッシング中, それぞ
 れの許容引張荷重 (土木学会 PC 示方書)
 ●値は測定値中最大のものを示した。

表—6 定着部ジャッキ装着緊張試験結果

テンド ン容 量	試験体 測定 項目 荷重	A				B			
		補強筋の 応力度 (kgf/cm ²)		ひびわれ 幅 (mm)		補強筋の 応力度 (kgf/cm ²)		ひびわれ 幅 (mm)	
		緊張	固定	緊張	固定	緊張	固定	緊張	固定
1000 t	600 t (0.6・P _u ^B)	659	675	—	—	735	813	—	—
	690 t (0.7・P _u ^B)	1129	916	0.04	0.04	953	1037	0.04	0.04
	755 t (0.9・P _y ^B)	1053	1106	0.06	0.06	1163	1403	0.06	0.06

(注) ●P_y^B: B種テンドンの規格降伏荷重
 ●P_u^B: B種テンドンの規格引張荷重
 ●0.6P_u^B, 0.7P_u^B, 0.9P_y^B: B種テンドンの使用状態,
 プレストレッシング直後, プレストレッシング中, それぞ
 れの許容引張荷重 (土木学会 PC 示方書)
 ●値は測定値中最大のものを示した。

部に沈み込む形で破壊に至った (写真—6 参照)。

(2) 定着部ジャッキ装着緊張試験

定着部破壊強度試験で求めた補強を施した定着部を2つ有する試験体にテンドンを挿入し、アンカーディスク、ウェッジをセットしてテンドンをジャッキで緊張することで使用性を検討した。この試験でも補強筋のひずみ、試験体のひびわれ幅を測定した。結果は表—6に示すように定着部破壊強度試験を裏付け、また判定基準を満たしており定着部の使用時健全性が証明できた。

3.4 シースの性能試験

大口径シース (内径は 1000 t 用 130 mm, 1600 t 用 175 mm) が加工性、耐力等所定の性能を有していることを確認するためにシースの試験を実施した。

シースの試験は PC 示方書③に規定されているので、試験条件等はそれに従った。

その結果、いずれのシースとも PC 示方書③の規定を満足していることが確認された。

3.5 テンドン挿入性試験

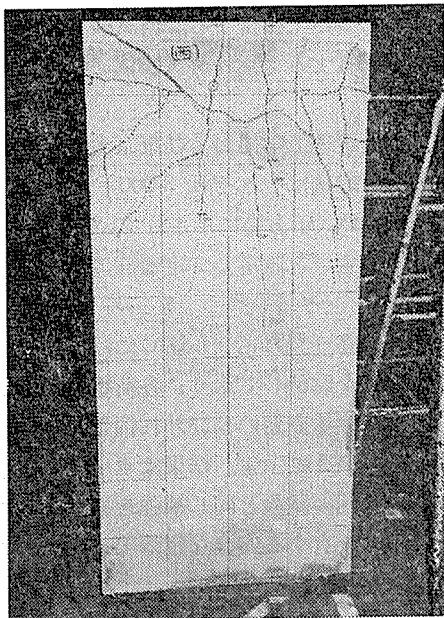
一般にテンドンをシースに挿入する方法として、引込み挿入、押込み挿入の2種類がある。本試験ではこれら2種類の挿入方法を用いて実際にテンドンをシースに挿入し、その作業性を検討した。

引込み挿入はストランドを所定本数束ねてテンドンとし、先端に装着した挿入キャップをウィンチで引張ることによってテンドンをシースに挿入する方法である。また押込み挿入はストランド1本ずつをプッシングマシンで所定本数だけシースに挿入する方法である。

500 t テンドンに比べてリストランド本数は増加したが、引込み挿入、押込み挿入ともに作業性は良好であった。

3.6 摩擦係数測定試験

シース・テンドン間の摩擦等によって緊張端で与えた



写真—6 定着部コンクリートの破壊状況

次に破壊形態について述べる。載荷荷重の増加に従って、まずブロック載荷端から 30~40 cm (≒断面の一辺の長さ×1/2) の所に鉛直軸方向にひびわれが入り、その長さを成長させるとともにひびわれ数が増加していった。その後リブ付近に水平方向のひびわれが入り、スパイラル筋に囲まれた部分が一体となってコンクリート内

プレストレス力は端部から離れるに従って小さくなるため、断面設計時にはプレストレス力の減少量を正しく評価しておく必要がある。本試験では tendon 張力の摩擦損失量を測定し、tendon の曲げ角度の影響による摩擦係数 μ 、および長さに沿った摩擦係数 λ を算出した。

試験に用いたテストベッドは実構造物規模の写真-7、図-5 に示したもので、 μ と λ を分離するために曲率

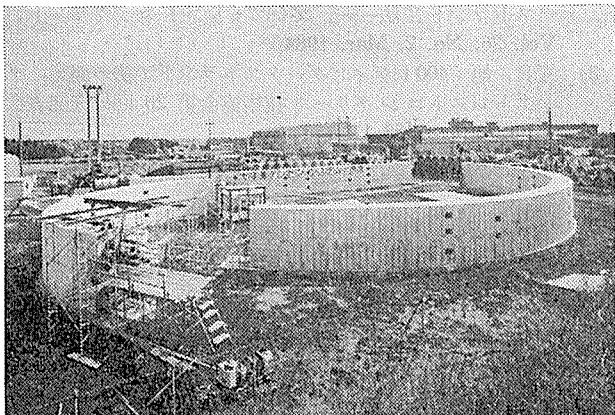


写真-7 テストベッド (左から R10, L40, R20)

半径を変化させている。

両端部に設置したロードセルから得られた荷重データに最小二乗法を適用して求めた μ 、 λ を表-7 に示す。

μ 、 λ とともに PC 示方書に示された設計用値よりもかなり小さな値を示しており、摩擦による緊張力損失量が少ないことがわかる。ただし本試験では亜鉛びきシースを使用し tendon には防錆材や減摩材は塗布していない。

3.7 グラウト注入試験

セメントグラウトに関する注入試験は既に前報¹⁾で報告してあるので、ここではアンボンドタイプを想定したグリースの注入について報告する。グリースはその目的から、防錆効果を有すること、注入が容易であること、シースへ充てん後空隙を残さず固まること等の性能が要求される。今回用いたグリースは JIS, ASTM 等で規定された試験を実施してアンボンド tendon 用グラウト材としてその性能が保証されたものである。

注入試験用に用いたシースは 図

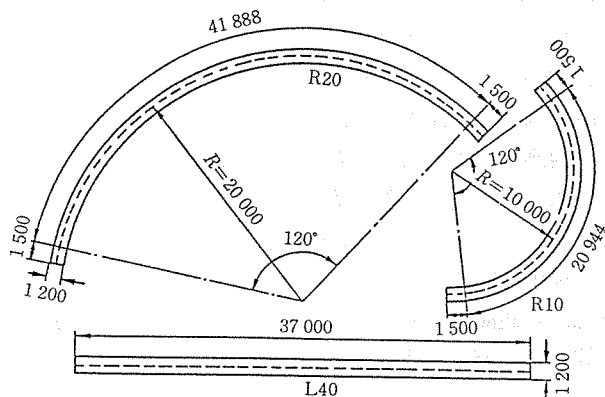


図-5 テストベッドの形状・配置図

表-7 摩擦係数

Tendon 容量	摩擦係数	
	μ	λ
1000 t	0.139	0.00054
1600 t	0.131	0.00077

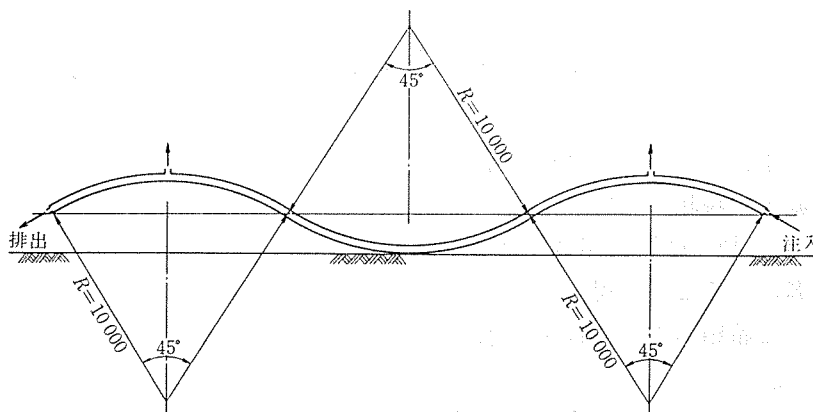


図-6 グラウト注入試験シース加工図

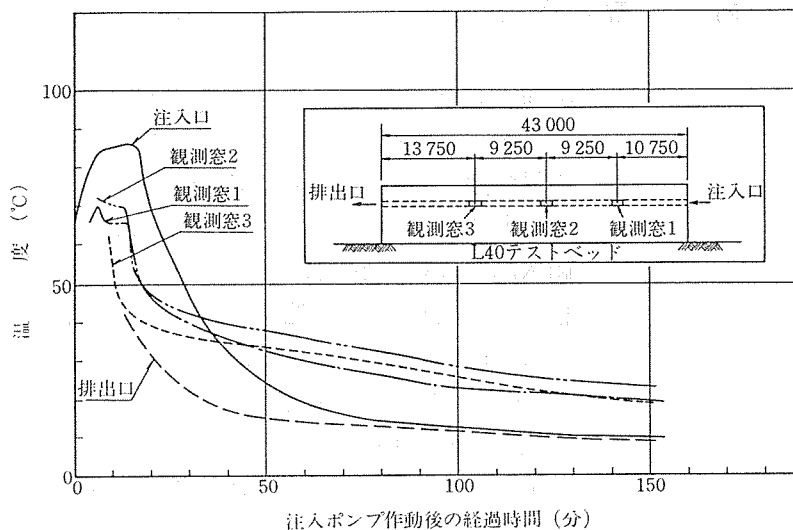


図-7 シース軸方向の温度分布と時間の関係

報 告

—5 の L40 テストベッド内のシースおよび図—6 のように加工したシース単体である。

約 90°C に加熱して液体状にしたグリースを一方の定着端注入口から注入し、観測窓から注入状況、充てん状況を観測し、また温度分布を測定した。

注入状況は良好で図—7 に示したシース軸方向の温度分布からもわかるように、時間経過に伴う温度低下も少なく途中で固まって詰まることもなかった。注入後に観測窓から観測した充てん状況およびシース単体を切断して観測した充てん状況はともに良好であった。

4. おわりに

以上報告した 1600 t テンドンシステムの開発により、

大型 PC 構造物をより経済的・合理的に設計・施工できる見通しが得られた。

現在、更に実構造物への適用性の諸検討および新分野への用途開発についても鋭意推進中であり、機会があれば、これらの成果についても紹介したいと思っている。

参 考 文 献

- 1) 石原, 他: 500 t テンドンシステムの開発——ディビダークストランド工法——, プレストレストコンクリート, Vol. 26, No. 2, Mar. 1984
- 2) 夏目, 他: 400 t ディビダークストランド工法の開発, プレストレストコンクリート技術協会第 23 回研究発表会講演概要集, 1983.11

【昭和 59 年 7 月 10 日受付】

◀刊行物案内▶

プレストレストコンクリート構造物の設計・施工の現状

本書は第 11 回 PC 技術講習会のためのテキストとして編纂したもので、PC 構造物の設計・施工の現状について、我が国のみならず、諸外国の現状にまで言及・解説しています。また、耐久的な PC 構造物作製のための注意点や、新しい建築設計規準法の解説なども盛り込み、大いに参考になることと思います。

ご希望の方は、代金を添えて（社）プレストレストコンクリート技術協会宛お申し込みください。

体 裁: A4判 112 頁
定 価: 3,500 円 **送 料:** 450 円
内 容: (A) 諸外国における PC 橋梁設計・施工の発展 (第 9 回 FIP ストックホルム大会セミナー報告) 1) 架設工法の発展, 2) プレキャスト技術応用範囲の拡張, 3) 断面形状とその構成, 4) 複合構造物, 5) 結論。(B) PC 構造物の設計基本——考え方 1) まえがき, 2) 許容応力度設計方法から限界状態設計法へ, 3) 限界状態, 4) 水準—1 の安全検証法, 5) プレストレストコンクリートの限界状態, 6) 断面応力の計算, 7) 曲げ破壊に対する安全度の検討, 8) せん断。(C) 耐久的な PC 構造物構築のための注意点 1) まえがき, 2) 橋梁における PC 構造物に関して, 3) 建築における PC 構造物に関して, 4) 構造物の欠陥に対する一般的注意, 5) あとがき。(D) PC 建築構造物の新しい設計法について 1) まえがき, 2) 新耐震設計法の概要, 3) PC 造建築物に対する新耐震設計法の適用, 4) PRC 造の設計, 5) 結語。(E) 最近施工された PC 橋 1) 新プレストレストコンクリート鉄道橋設計標準の概要, 2) 注目される施工法, 3) 実施例。