

500t テンドンシステムの開発

—ディビダークストランド工法—

石	原	重	孝*
竹	田	哲	夫**
夏	目	忠	彦***
岩	淵		明†
合	津	信	貞††
赤	崎	重	雄†††

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート（以下 PC と略記する）構造物は PC 橋梁、PC タンク、PC パージをはじめ大型化する傾向にあり、これに伴い大容量テンドンの需要が高まりつつある。大型 PC 構造物に大容量テンドンを適用する有利性としては、設計・施工における合理化、省力化の推進、工期短縮および工費低減等があげられる。

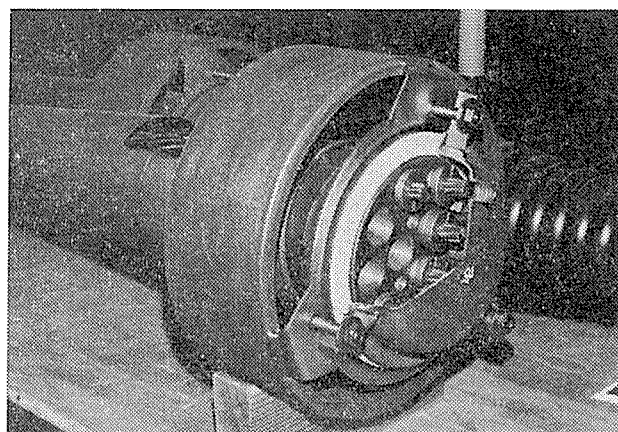
一方、コンクリート構造物の設計法は、現在、許容応力度設計法から限界状態設計法への移行段階にあり、各限界状態における構造物および部材の安全性、使用性を定量的に検討しておくことも必要である。

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、今回 500t（テンドンの規格引張荷重を示す）ディビダークストランド工法（19-φ15.2mm）を取り上げ、種々の試験を実施し、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報

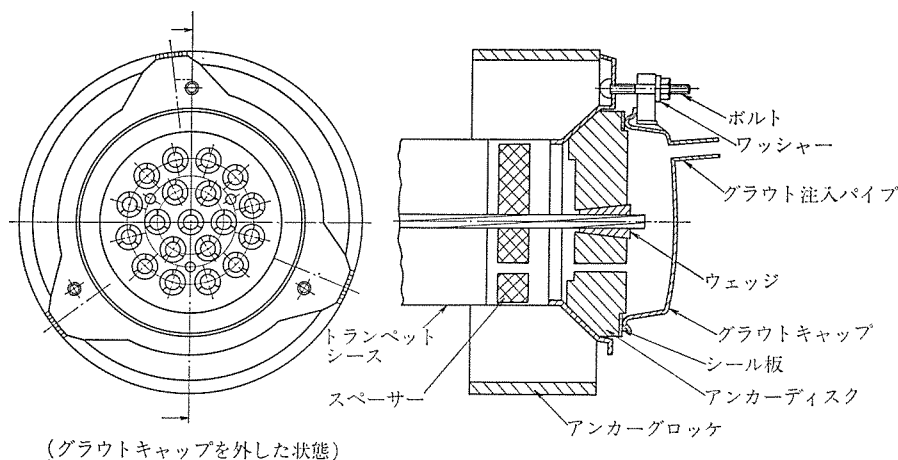
告する。

2. ディビダークストランド工法の概要

ディビダークストランド工法は、西ドイツの Dyckerhoff & Widmann 社（DYWIDAG）が従来のディビダ



写真—1 定着体外観



（グラウトキャップを外した状態）

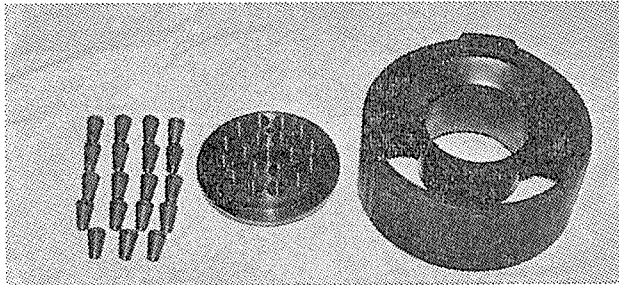
図—1 定着体概要図

* 鹿島建設（株）土木設計本部副主査
 ** 鹿島建設（株）土木設計本部副主査
 *** 鹿島建設（株）技術研究所主任研究員

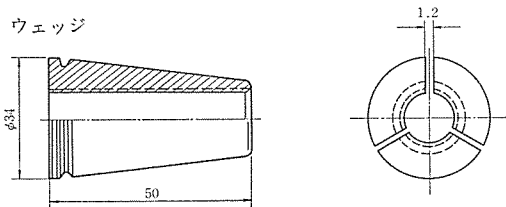
† 鹿島建設（株）技術研究所研究員
 †† 鹿島建設（株）機械部技術課技師
 ††† 住友電気工業（株）特殊線事業部 PC 開発室技師

ーク鋼棒の豊富な経験をもとに開発したストランドによる緊張・定着工法でヨーロッパを中心に各種 PC 構造物に広く使用されている。

本工法の定着体の外観および組立て概要図を写真—1, 図—1 に, また定着体の構成要素の外観およびその

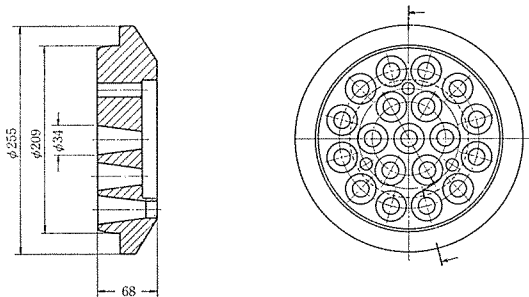


写真—2 定着体の構成要素



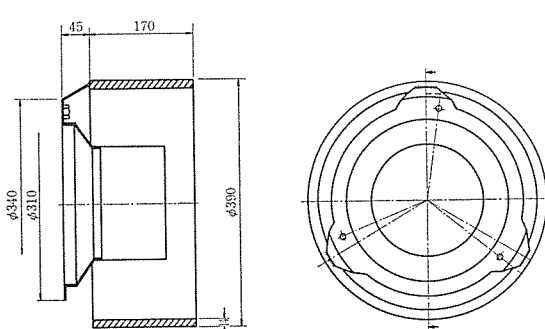
材質: クロムモリブデン鋼 SCM415

アンカーディスク



材質: 機械構造用炭素鋼 S45C

アンカークロック



材質: リング 溶接構造用圧延鋼 SM41A
 支承板 熱間圧延軟鋼板 SPHC

図—2 定着体の形状寸法

形状寸法を写真—2, 図—2 に示す。

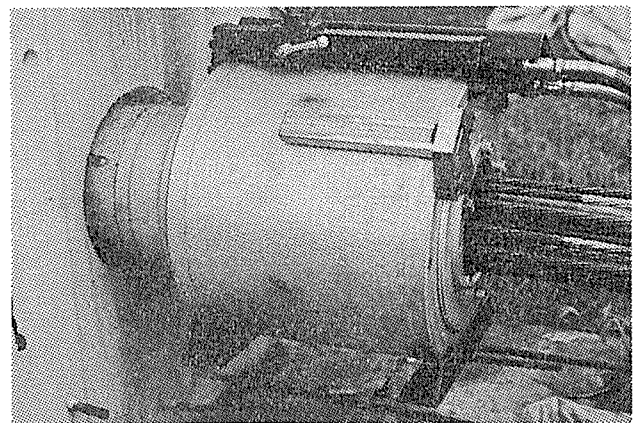
この工法の特徴は, 次のとおりである。

- 1) 定着体に従来のディビダーク鋼棒にも用いられているアンカークロックを用いており, その優れた耐荷機構により, 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 $\phi 15.2$ mm のストランド ($\phi 5$ mm の素線 7 本をより合わせた鋼より線) を用い, 3 本から 19 本 (引張荷重 80 t~505 t) 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) ストランド全数を同時に緊張することができ, ウェッジの押し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よく行える (写真—3 参照)。

500 t テンドンには, JIS G 3536「PC 鋼線及び PC 鋼より線」に規定されている A 種 7 本より線 15.2 mm または, B 種に相当するより線 15.2 mm が 19 本用いられる。土木学会「プレレストコンクリート標準示方書」(以下 PC 示方書と略記する) による許容引張荷重を表—1 に示す。

3. 500 t テンドンシステムの諸試験について

本システムを我が国で実用化するために, 種々の試験を行ったが, その試験名および調査項目の概要を表—2 に示す。試験にあたっては, PC 示方書の規格に従うことを原則とし, PC 示方書に規定されていない規格につ



写真—3 ディビダークストランドジャッキ (緊張状況)

表—1 テンドンの強度および許容引張荷重

テンドン 構 成	種 類	引張荷重 (P_u) kg	降伏荷重 (P_y) kg	許 容 引 張 荷 重		
				設計荷重 作用時 ($0.6 P_u$) kg	プレストレ ス直後 ($0.7 P_u$) kg	プレストレ ス中 ($0.9 P_y$) kg
19×15.2	A種	438 900	374 300	263 340	307 230	336 870
19×15.2	B種	505 400	429 400	303 240	353 780	386 460

表—2 500 t テンドンシステム試験一覧表

目的	試験名	調査項目
規格値に対する安全性の確認	① 緊張材系の耐力試験	i) テンドンの引張耐力 ii) テンドンの疲労強度
	② 定着部コンクリートの耐力試験	i) 使用時健全性 ii) 破壊耐力
	③ 定着部箱抜部分の止水性試験	i) 止水性のよい間詰め方法の検討
設計用諸数値の把握	④ 摩擦損失等測定試験	i) 緊張力の摩擦損失量 ii) 緊張力の定着損失量
施工性の検討	⑤ 施工性試験	i) テンドン挿入作業性 ii) 緊張作業性 iii) グラウト作業性（充てん度）

いては、他の指針類（例えば、コンクリート工学協会「コンクリートのひびわれ調査・補修指針」など）を参考にした。

なお、ストランドやアンカークロケ等の個々の材料における強度・外観などの試験については、JIS 等による規定を十分満足していたので、本文では記述を省略した。

3.1 緊張材系の耐力試験

ここでは、ストランドとウェッジとを組み合わせた緊張材系の試験について述べる。

3.1.1 引張耐力試験

(1) 目的

φ15.2mm ストランドとウェッジとを組み合わせたテンドンの引張性能を確認するために、引張耐力試験を行った。

(2) 試験概要および結果

試験機の容量から、B種ストランド9本からなるテンドンを、300 t 横形引張試験機を用いて引張試験を行った。その結果を表—3 に示す。

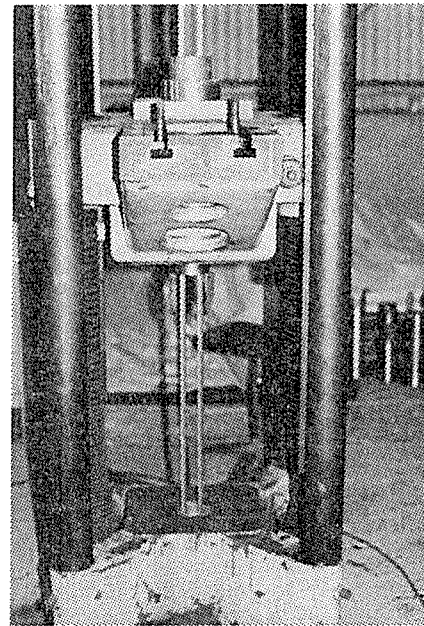
表—3 テンドンの引張耐力試験結果

テンドン No.	(A) 破断荷重 kg	(B) 規格引張荷重 kg	A/B	破断時伸び %
1	247 000	239 400	1.03	4.38
2	246 500	239 400	1.03	4.26
3	246 250	239 400	1.03	4.06
平均	246 580	239 400	1.03	4.23

規格値について我が国には規程がないので、FIP リコメンデーション⁴⁾に従うものとし、定着具と組み合わせた場合には、破断荷重 $\geq 0.97 \times$ 規格引張荷重、破断時伸び $\geq 2.3\%$ と考えると、この試験結果は規格値を満足するものであり、このテンドンは十分な引張性能を有するものと判断できる。

3.1.2 テンドンの疲労試験

(1) 目的



写真—4 緊張材系の疲労試験状況

この工法に用いられるウェッジとストランドとを組み合わせたテンドンの疲労性能を確認するために、疲労試験を行った。

(2) 試験概要および結果

ストランド1本、および2本のテンドンについて、50 t 堅形疲労試験機を用いて試験を実施した。試験の状況を写真—4 に示す。土木学会「プレストレストコンクリート鉄道橋設計施工基準⁵⁾」によると、「定着具の疲労強度は、PC 鋼材の下限応力を規格引張強度の 60% ($0.6\sigma_{pu}$) とし、上限応力を $0.6\sigma_{pu} + 10 \text{ kg/mm}^2$ とし、疲労により定着具の機能が失われるまでの繰返し回数が100万回以上であるのがよい。」とある。この载荷条件にもとづいて、A種、B種それぞれのストランドについて試験した結果、いずれも200万回以上の繰返しに耐えており、このテンドンシステムは十分な疲労性能を有するものと判断できる。

3.2 定着部コンクリートの耐力試験

(1) 目的

PC 示方書では「定着部の補強について、各 PC 工法ごとに慣用的に用いられている補強法で十分安全であると認められている場合はその補強法を用いることができる。」と解説している。当工法はこれまでヨーロッパで使用実績はあるものの、日本での実績がなく、高い信頼度で安全であると言える補強法がない。そこで、当工法で想定している最小縁辺距離を有する定着部が十分安全であると判断できるような補強法を検討するために、定着部の载荷試験を行った。

(2) 耐荷性能の評価基準

ここでは十分安全であると判断できる耐荷性能を、使

用時に健全であること（使用時健全性）およびテンドン規格引張荷重時に破壊しないこと（破壊安全性），と考えた。その評価基準は具体的には，B種ストランドを対象とした場合以下ようになる。

(i) 使用時健全性の評価基準

a. プレストレッシング直後の許容引張荷重時 355 t

グロケリングの応力度
 \leq 許容応力度 1 400 kg/cm²

補強筋の応力度
 \leq 許容応力度 1 800 kg/cm²

b. プレストレッシング中の許容引張荷重時 385 t

試験体表面のひびわれ幅 \leq 0.1 mm²⁾

(ii) 破壊安全性の評価基準

試験体の破壊荷重 \geq テンドン規格引張荷重 505 t

(3) 試験概要および結果

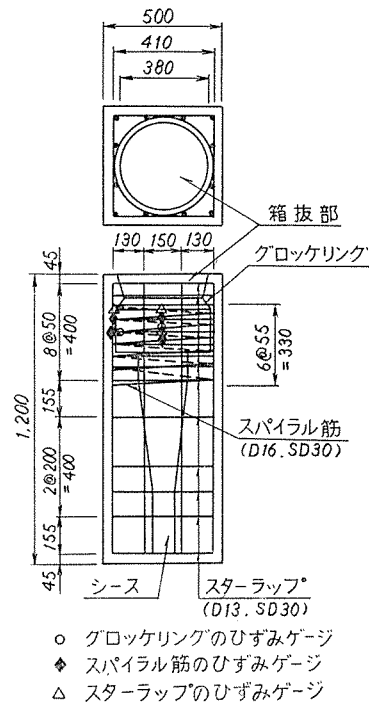
試験は，定着部アンカーディスクを直接大型構造物試験機で破壊まで加圧する定着部破壊強度試験と，実際の緊張作業と同じ状況を再現する定着部ジャッキ装着緊張試験の2つの方法で行った。

(i) 定着部破壊強度試験

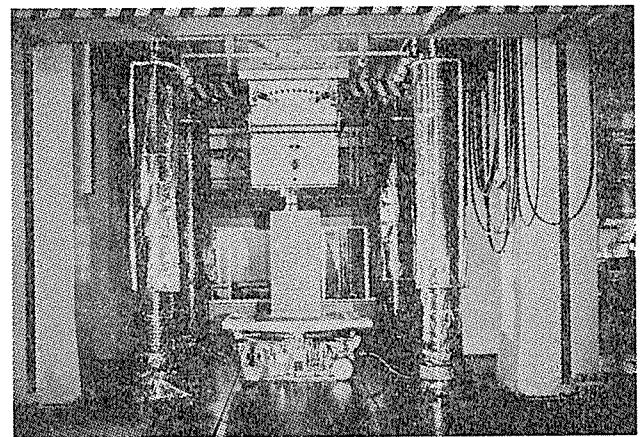
試験体は一辺が最小縁辺距離の2倍の正方形断面を有するブロック試験体で，図—3 にその形状寸法，並びに補強筋，ひずみゲージの配置状況を示す。試験体は水平にしてコンクリート打設を行い，3体製作した。試験時のコンクリート圧縮強度は ϕ 15 cm \times 30 cm の円柱供試体で 270 kg/cm² であった。

試験は日本大学理工学部 の 3 000 t 級大型構造物試験機を用いて，写真—5 のように定着部に載荷する方法で行った。載荷ステップはA種およびB種ストランドからなるテンドンの設計荷重作用時，プレストレッシング直後およびプレストレッシング中，それぞれの許容引張荷重（表—1 参照）を含み，かつ滑らかな荷重—ひずみ曲線が描けるように設定し，各荷重段階でグロケリング，補強筋のひずみ，試験体表面に発生したひびわれ幅，定着具の変形状況を測定した。

試験結果をB種ストランドからなるテンドンの各許容引張荷重に着目してまとめると表—4になる。プレスト



図—3 定着部破壊強度試験試験体概要図



写真—5 定着部破壊強度試験状況

表—4 定着部破壊強度試験結果

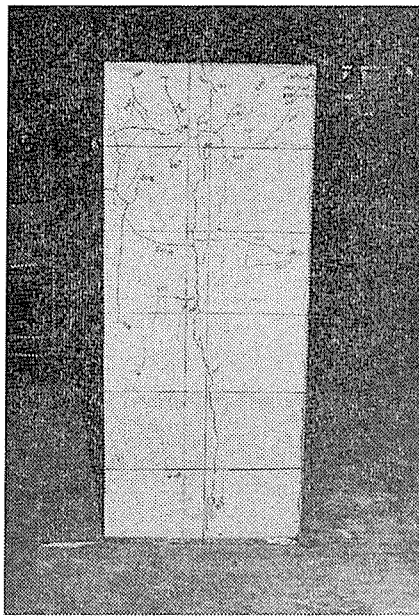
供試体 項目 荷重 (t)	A			B			C			注
	グロケリングの 応力度 (kg/cm ²)	補強筋の 応力度 (kg/cm ²)	ひびわれ 幅 (mm)	グロケリングの 応力度 (kg/cm ²)	補強筋の 応力度 (kg/cm ²)	ひびわれ 幅 (mm)	グロケリングの 応力度 (kg/cm ²)	補強筋の 応力度 (kg/cm ²)	ひびわれ 幅 (mm)	
305 (0.6 P _{uB})	525	809	—	643	819	—	599	649	—	1) 応力度およびひびわれ幅は実測値の最大値を示す。 2) ひびわれ幅の表中，—は目視で確認できなかったことを示す。
355 (0.7 P _{uB})	771	1 124	—	916	1 117	—	851	804	—	
385 (0.9 P _{yB})	928	1 350	0.10	1 153	1 367	0.10	1 035	909	0.06	
破壊荷重 (t)	561			508			546			

報 告

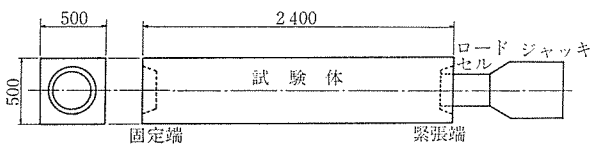
レッシング直後の許容引張荷重時のグロッキング、および補強筋の応力度はいずれも許容応力度を下回っており、かつ許容応力度を超える確率はかなり小さいと考えられる値であった。またプレストレス中の許容引張荷重時の試験体表面のひびわれ幅は 0.10 mm 以下であり、かつ定着具に過大な変形は生じなかった。試験体の破壊荷重は 3 体ともテンドン規格引張荷重を超えており、これについてもテンドン規格引張荷重を下回る確率は小さいものと考えられる。試験体 B の破壊荷重は 508 t と小さいが、試験体のコンクリート打設面が弱点となり破壊に至ったものである。破壊状況を写真—6 に示す。また、これら試験結果を解析的にフォローするために 2 次元弾性 FEM 解析、3 次元弾塑性 FEM 解析を行った。弾性域でのひずみ分布は実験結果と解析結果とは良く一致したが、クラック発生後では補強筋、グロッキングの応力は完全な一致とまではいかなかった。解析精度を上げるためには解析に使う物性値の評価精度を上げる必要があるものと思われる。

(ii) 定着部ジャッキ装着緊張試験

試験体は 図—4 に示すように定着部を 2 つ有しており、これらは定着部破壊強度試験と同じ補強方法で補強されている。このうち一方を緊張端としてジャッキとロードセルを装着し、他方を固定端とした。試験体は 3 体で試験時のコンクリート圧縮強度は 270 kg/cm² である。



写真—6 定着部破壊強度試験体破壊状況



図—4 定着部ジャッキ装着緊張試験概要図

表—5 定着部ジャッキ装着緊張試験結果

供試体 項目 荷重 (t)	A				B				C				注 1) 応力度およびひびわれ幅は、実測値中の最大値を示す。 2) ひびわれ幅の表中、—は目視で確認できなかったことを示す。	
	グロッキングの応力度 (kg/cm ²)		補強筋の応力度 (kg/cm ²)		ひびわれ幅 (mm)		グロッキングの応力度 (kg/cm ²)		補強筋の応力度 (kg/cm ²)		ひびわれ幅 (mm)			
	緊張	固定	緊張	固定	緊張	固定	緊張	固定	緊張	固定	緊張	固定		
305 (0.6 P _u ^B)	559	834	1048	842	—	—	—	—	634	783	851	1109	—	—
	977	1216	1260	1094	—	—	—	928	1153	1453	1411	—	—	
355 (0.7 P _u ^B)	1190	1390	1500	1264	998	1336	1552	1063	1096	1348	1352	1602	0.10	0.10
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

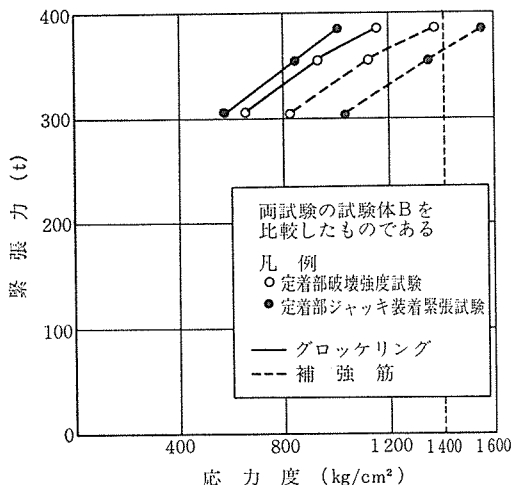


図-5 定着部破壊強度試験と定着部ジャッキ装着試験の各応力度の比較図

測定項目および荷重ステップは定着部破壊強度試験と同一であるが、荷重荷重は実際の緊張作業を考慮して 400 t を最大とした。

試験結果を定着部破壊強度試験と同じフォーマットで整理したのが表-5 であり、定着部破壊強度試験と耐荷性能を比較したのが図-5 である。この試験においても定着部は十分な耐荷性能を有していることが確認された。また表-4 と表-5 の比較および図-5 から、定着部の耐荷性能を調べるには、構造物試験機による荷重試験を行えばよいことがわかった。

3.3 定着部箱抜部分の止水性試験

(1) 目的

PC バージ等の海洋 PC 構造物では海水による PC 鋼材の腐食が大きな問題となる。特に定着具が弱点となって海水が浸入する可能性が大きい。土木学会「海洋コンクリート構造物設計施工指針(案)」では、定着具が腐食しないよう保護することを規定している。

このため定着部箱抜中に設置された定着具に海水が浸透しないような間詰め方法を種々比較検討した。

(2) 試験概要と結果

図-6 に示すような定着部近傍のみを取り出した試験体に図-7 の 4 種類の方法で間詰めし、着色水を用いて 6 kg/cm^2 の圧力を 1 週間加えた。写真-7 に加圧状況を示す。加圧後、試験体を切断し、着色水の浸透状況を観察した。

試験体切断面の着色水の浸透状況を図-8 に示す。もっとも止水性の良い間詰め方法は、無収縮モルタル打設後、打継上部をエポキシでコーティングした間詰め方法 3 であった。無収縮モルタルだけの間詰め方法 1 でもかなりの止水効果があるので、実構造物では環境条件を考慮していずれかの方法を採用すればよいものと考えられ

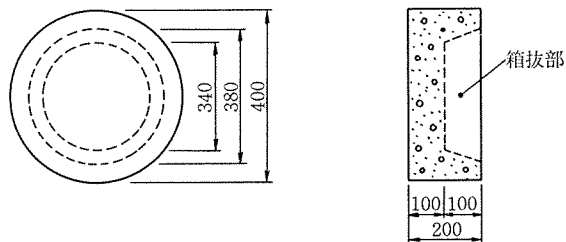


図-6 止水性試験試験体形状寸法

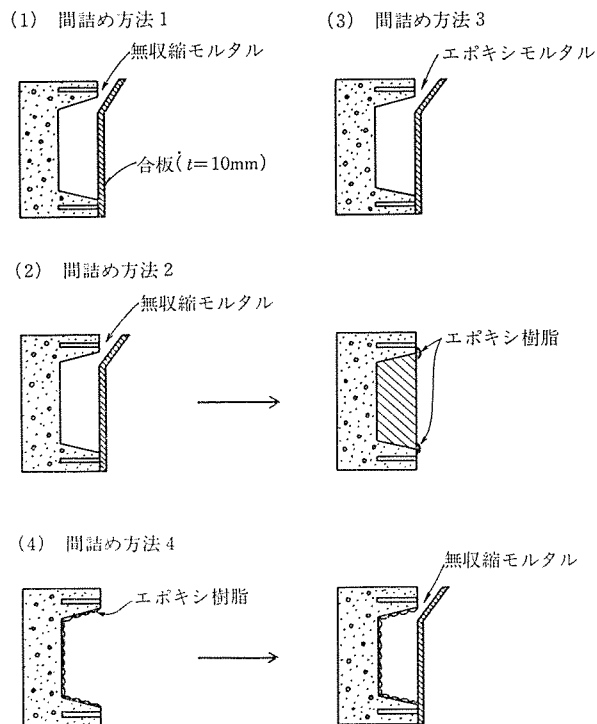


図-7 間詰め方法



写真-7 定着部箱抜部分の止水性試験 (加圧状況)

る。

3.4 摩擦損失等測定試験

(1) 目 的

シースと tendon との間の摩擦やストランドを定着す

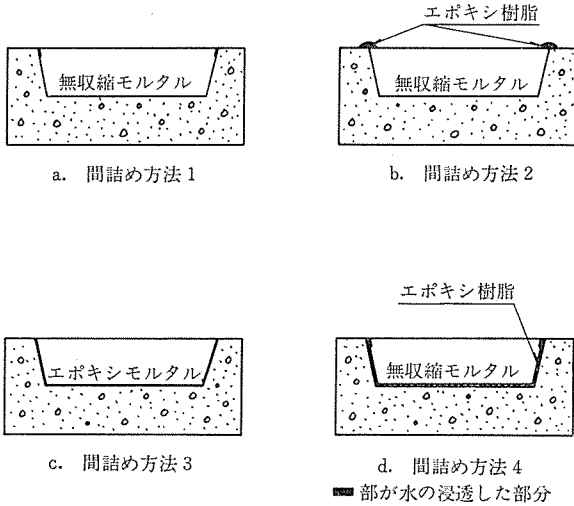


図-8 着色水の浸透状況

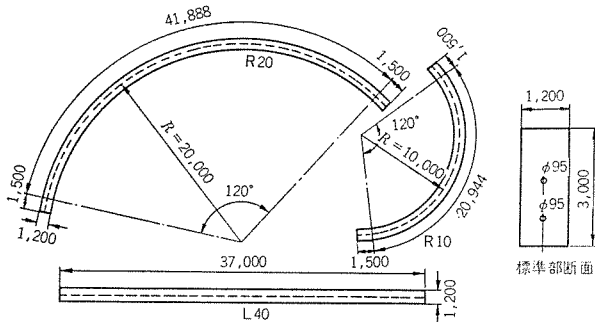


図-9 テストベッド形状寸法図

る際、ウェッジのすべりによりプレストレス力が減少するので、設計ではその影響を考慮して各断面のプレストレス力を計算しなければならない。その設計用数値を把握するために、実構造物を想定した大型テストベッドを用いて緊張・定着作業を行い、シース・ tendon 間の摩擦係数およびセット量（すべり量）の測定を行った。摩擦係数は tendon 図心線の角変化に関する項と、 tendon の長さに関する項に分けて考えられるので、この試験用のテストベッドには、R 10（曲率半径 10 m，中心角 120°，長さ 24 m），R 20（曲率半径 20 m，中心角 120°，長さ 45 m）および L 40（直線，長さ 37 m）の 3 体を用いた（図-9）。

(2) 試験概要および結果

緊張端にロードセルとジャッキを、固定端にロードセル，セット量測定用ラムチェアおよびジャッキを取り付けて、 tendon 緊張時の両端の荷重および tendon 定着時の緊張力損失量，セット量を測定した。図-10 にその要領を示す。緊張は 1 本の tendon について 3 回行ったので，データとして 18 セットが得られた。

摩擦係数は荷重データに最小自乗法を適用して求めた。結果を表-6 に示す。角度変化に伴う摩擦係数 μ ，長さ変化に伴う摩擦係数 λ とともに PC 示方書の設計用値よりも小さく，特に λ は 1 桁も小さい。これはシースの波打ちがほとんどなかったことが原因と思われる。実施工ではシースの波打ちはより大きくなると予想されるので，設計にあたっては PC 示方書の値を用いれば所定のプレストレスを導入できるという意味で安全であると考えられる。しかし μ は tendon 曲率半径が大きいほど小さくなる傾向があり， tendon 形状に合った μ を設計に考慮してもよいものと思われる。

定着時のセットロス量 ΔP は次のようにして求めた。図-11 に示すように，まず緊張端で所定の荷重 P_i （プレストレスング中の許容引張荷重 385 t）まで緊張し，荷重 P_e となっている固定端を更に $P_e' (\approx P_i)$ まで緊張したのち定着して P_s を測定した。これより $\Delta P = P_e' - P_s$ が求める緊張力損失量である。

またこの時，ジャッキ前部のラムチェア内の外側ストランド 6 本に標点を付けて，セット量をスケールで直接測定した。

これら実測の緊張力損失量，

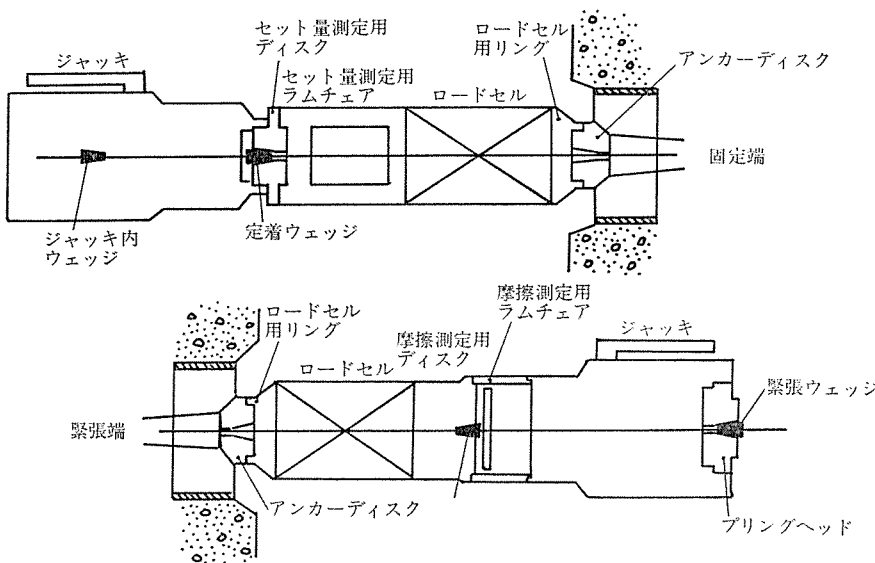
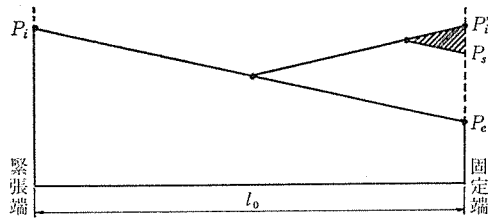


図-10 摩擦損失等測定要領図



図—11 緊張力損失量測定に伴う荷重変化

表—6 摩擦係数測定結果

使用データ		角変化に伴う 摩擦係数 μ	長さ変化に伴う 摩擦係数 λ
テスト ベッド	荷重ステップ (t)		
L40 および R20	385	0.206727	0.000541
	200, 350, 385	0.202241	0.000498
	第1回目の緊張に おける 385	0.203849	0.000571
L40 および R10	385	0.247625	0.000541
	300, 350, 385	0.242923	0.000498
	第1回目の緊張に おける 385	0.235311	0.000575
平均		0.223113	0.000537
標準偏差		0.019224	0.000031

表—7 定着セット量測定結果

テスト ベッド	緊張力損失量 (t)	緊張力損失量より 求めたセット量 (mm) ①	実測のセット量 (mm) ②	③/①
L40	—	—	4.2	—
	—	—	3.3	—
R20	36.7	2.8	3.8	1.36
	42.8	3.6	3.0	0.83
R10	47.5	2.9	3.5	1.21
	48.1	3.0	3.8	1.27

セット量, 更に緊張力損失量をセット量に換算した値を表—7 に示す。セット量については前述の定着部ジャッキ装着試験でも測定したが, 3.0~5.0 mm の間にあり, 平均値は 3.8 mm であった。したがってセット量としては, 測定時最大値である 5.0 mm とするのがよいものと判断される。

3.5 施工性試験

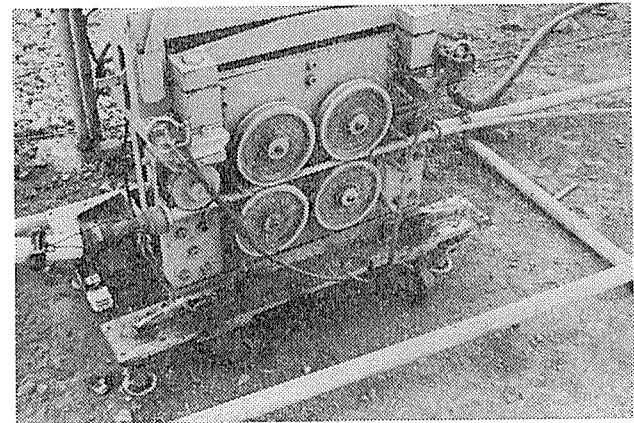
(1) 目的

テンドンの挿入作業性, 緊張作業性, グラウト注入の作業性および注入状況を調査するために, 前述の大型テストベッドを用いてテンドン挿入からグラウト注入に至るまでの実際の PC 作業を行った。

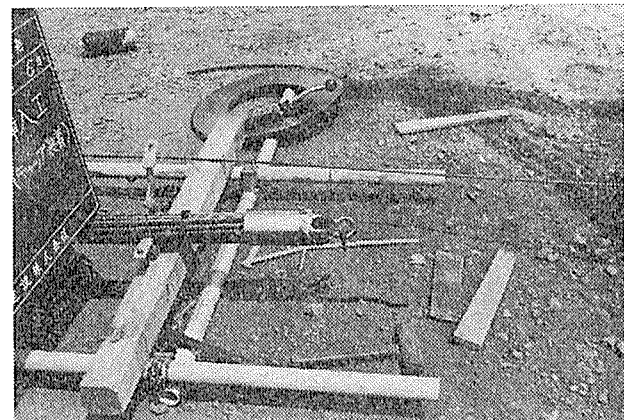
(2) 試験概要および結果

(i) 挿入作業性

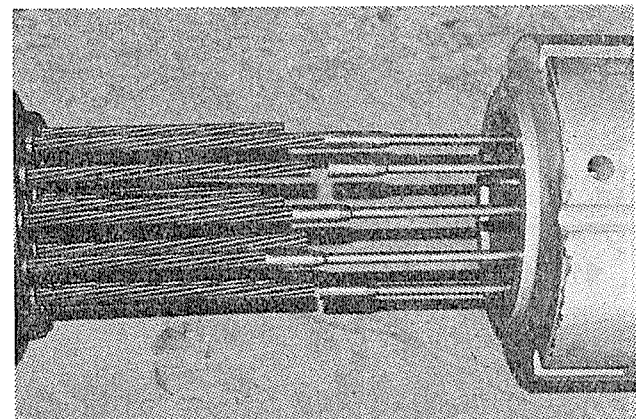
写真—8 に示すプッシングマシン (挿入圧力 250 kg/cm², 挿入速度 0~3 m/秒 に調整可能) を用いて, スト



写真—8 プッシングマシンを用いた押込み挿入状況



写真—9 ウィンチを用いた引込み挿入状況



写真—10 ジャッキ装着用ガイドパイプ

ランドを1本ずつ挿入する「押込み挿入」と, 19本のストランドを束ねて1本のテンドンにしその先端に写真—9 に示す挿入キャップを取り付けて挿入する「引込み挿入」と, 2種類の方法で挿入を行い, その作業性を比較検討した。

両挿入法とも作業性は良好であった。したがって実施工時においては現場の作業スペース, テンドン配置等を考慮して適切な挿入法を採用すればよいものと思われる。

(ii) 緊張作業性

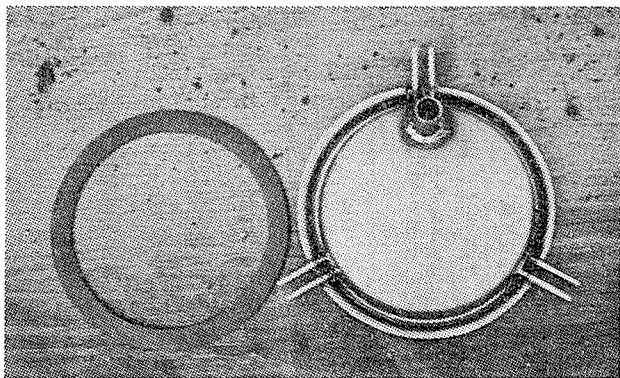


写真-11 グラウトキャップ

1本のテンドンが19本のストランドから構成されているため、緊張自体よりもジャッキ装着に手間取ることが予想されたので、ジャッキ装着用ガイドパイプ(写真-10)を試作し、その有効性を確認することにした。

ガイドパイプを用いた結果、ジャッキ装着に要するマンパワーは用いない場合に比べて減少できることがわかった。

(iii) グラウト作業性

定着部に写真-11に示すようなグラウトキャップを装着し、PC示方書に適合するグラウト(C/W=44%, フロー値9秒)を注入圧1.8 kg/cm², 吐出量20 l/分で注入した。テストベッドには観測窓を設けてあるので、その部分のシースを透明なアクリルシースにしてグラウトの注入状況を観測した。

グラウトはグラウトキャップから漏れることもシース

内で滞ることもなく流れ、グラウト作業は順調に所要の目的を達した。またグラウト硬化後、グラウトキャップ、アクリル製シースを取り去って観測したところ、空隙の存在はなく充填度も十分満足のいくものであった。

4. おわりに

以上報告した500tテンドンシステムのほかにも、実用化のための種々の試験を実施し、本システムは既に橋梁、タンク、バージ、建築建屋など広範囲の構造物に使用されている。

現在、本システムを適用したいいくつかの実構造物で、フォローアップのために測定したデータを整理中であるが、良好な結果が得られており、機会があれば紹介したいと思っている。

最後に、本システムの実用化にあたり、有益なご助言およびご助力を頂いた方々に、深く感謝する次第であります。

参 考 文 献

- 1) 土木学会「プレストレストコンクリート標準示方書」昭和53年
- 2) コンクリート工学協会「コンクリートのひびわれ調査・補修指針」1980年5月
- 3) 土木学会「海洋コンクリート構造物設計施工指針(案)」1977年
- 4) FIP「Recommendations for acceptance and application of post-tensioning system」March 1981
- 5) 土木学会「プレストレストコンクリート鉄道橋設計施工基準」昭和40年

【昭和58年12月7日受付】

◀刊行物案内▶

PC 定 着 工 法

(1982年改訂版)

本書は、現在我が国において多く用いられているPC定着工法19種についてとりあげ、それぞれの工法の概要、構造、施工法、特長、注意事項などを解説したものであります。

設計者、施工者の利用とともに教育用テキストなどにも広く使用できることと思います。

また付録としてPC鋼材一覧表(改訂版)等を添付してあります。

ご希望の方は代金を添え(現金書留かまたは郵便振替東京7-62774)プレストレストコンクリート技術協会宛(電03-261-9151)お申し込みください。

体 裁: B5判 94頁

定 価: 2,800円(会員特価2,500円)

送 料: 350円