

論文

[2128] CFRP緊張材の定着法とその長期および疲労特性

正会員 原田哲夫 (長崎大学 構造工学科)  
 正会員 出光 隆 (九州工業大学 設計生産工学科)  
 正会員 ミヨーキン (鹿児島大学 海洋土木開発工学科)  
 正会員 渡辺 明 (九州工業大学 設計生産工学科)

1. まえがき

ハイテク繊維を用いたFRPロッドおよびストランドをPC緊張材として利用する場合、最も重要な点は定着方法をどのようにするかである。これまで、PC鋼材と同様の定着が困難なため、種々の工夫を施したいくつかの定着方法が開発されてきているが、定着効率、現場施工性、コスト面のすべてに満足のいく方法はほとんどないように思われる。そこで、筆者らは静的破砕剤の高膨張圧、しかも膨張圧は液圧的に作用するという特性を利用した、より確実に、簡便なFRP緊張材の定着方法を開発し、その基礎的な研究を行っている[1]。

本論では、本定着法をアンボンドポストテンション工法、外ケーブル工法の定着法として用いることを目的とし、その場合に解決しておかなければならない問題点として、長期の安定性、疲労特性の2項目について検討を行った。今回は、緊張材にCFRPストランド(φ12.5)を、定着には従来からの静的破砕剤と新たに開発された定着用膨張材を使用した。定着用膨張材とは、従来の静的破砕剤をもとに、充填性および膨張圧の発現時間を定着用に改良されたものである。

2. 定着法の概要

長さ10~20cm程度のスリーブ中(鋼管またはFRP管)にCFRPストランドを挿入して、そのまわりに静的破砕剤または定着用膨張材スラリーを充填するだけで、数時間後には硬化し、500kgf/cm<sup>2</sup>以上の高膨張圧が発生するため、鋼管とCFRPストランドが一体になった定着体が得られる[1]。定着にあたっては次のような方法が考えられる。

(I) 法 この定着体自体を緊張し、ナットで定着する方法。

(II) 法 定着体とするスリーブをあらかじめコンクリート中に埋め込んで固定しておく。それにCFRPストランドを挿入して緊張し、緊張した状態で定着用膨張材を充填して、所定の膨張圧に達した段階で、緊張端の仮定着をゆるめ、埋め込んだ定着体に反力をとらせて固定する方法。FRP緊張材は鋼材に比べ伸びが大きく、現場施工では、(I)法では定着体自体に十分な伸びしろを確保することが困難になるため、その解決法の一つとして考えた。

3. 定着部の長期特性

PC定着部としては、長期にわたって破断荷重のおよそ70%の緊張力をうけることになり、図-1のように定着部口元からの抜け出し量 $u$ (これを口元変位と呼ぶ)が徐々に進行し、緊

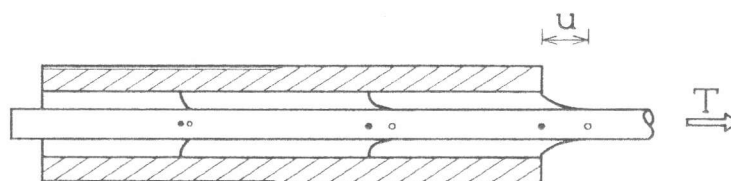


図-1 定着部からの抜け出し(口元変位)

張力の低下が懸念される。そこで、長期載荷実験を実施した。

表-1 長期載荷用供試体一覧

膨張材の種類	鋼管長 (cm) (有効定着長)	緊張最大荷重 (tf) (仮緊張解放前)	定着直後 (tf) (固定部定着時)	定着方法
A	22 (21)	11.52	11.22	I
B		11.46 (11.16)	11.37 (9.81)	II
C	30 (29)	11.58	11.43	I
D	22 (21)	11.89	8.53*	II
E		11.97 (11.51)	11.77 (10.30)	
F	30 (29)	12.01	11.70	I
G	22 (21)	8.55	7.90	
H	30 (29)	11.86 (11.48)	11.42 (10.85)	II

3. 1 供試体および実験方法  
 実験水準として、1) 膨張材の種類、2) 定着方法の違い、3) 定着鋼管長、4) 緊張荷重の大きさをとりあげ、A~Hの8供試体として表-1に示した。定着方法は、2章で述べた(I)法、(II)法である。(II)法による供試体は、図-2(b)のように、ロードセル側を固定しておき(固定側)、膨張圧が500kgf/cm<sup>2</sup>以上になった時点で、油圧ジャッキで所定の荷重まで緊張し、ナットで仮定着する(緊張側)。その後中央の固定部に定着用膨張材を充填し、膨張圧が同様に500kgf/cm<sup>2</sup>以上になった段階で緊張側仮定着のナットをゆるめ、中央の固定部で反力をとらせた。

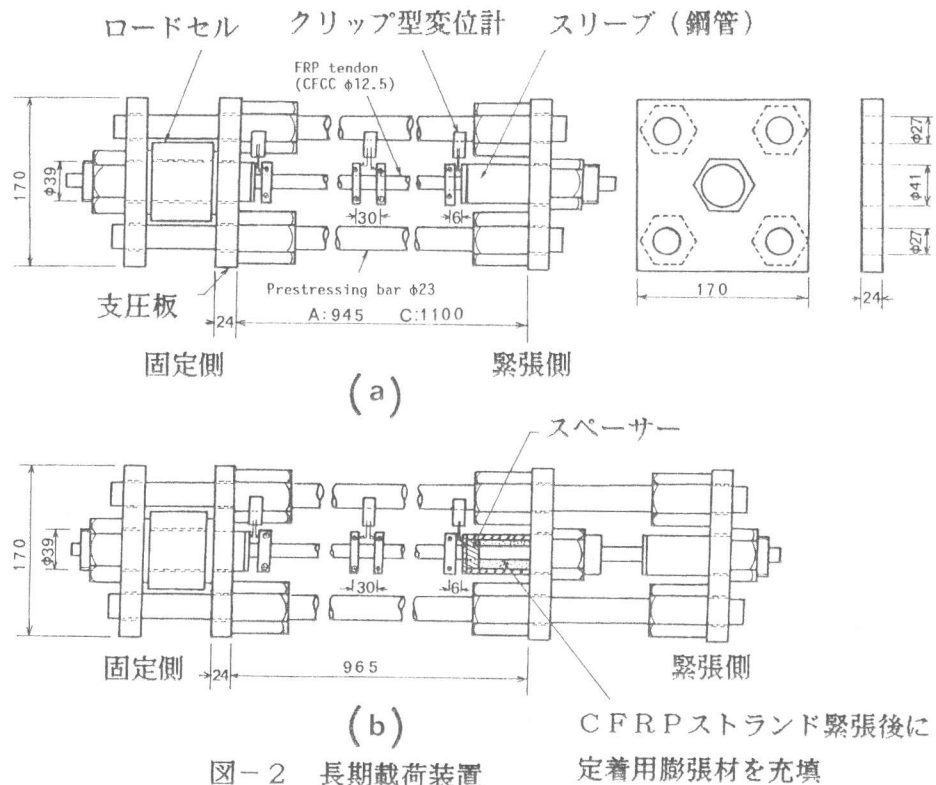


図-2 長期載荷装置

(I)法による供試体は、図-2(a)のように、所定の荷重まで緊張、除荷を2回繰り返し、3回目の緊張で、緊張側定着体をナットで定着した。定着完了直後から、緊張力と口元変位の経時変化を計測した。口元変位は、クリップ型変位計を用いて定着体端部とCFRPストランドにとりつけたアタッチメントとの相対変形量を測定し、アタッチメント位置までのCFRPストランドの変形量を中央部での測定値を用いて補正した。鋼管長は、膨張圧が500kgf/cm<sup>2</sup>の場合、1.9cm以上必要であるが[1]、これに鋼製スペーサーの取り付け部分の長さを考慮した2.2cmを基準とした。緊張荷重は、破断荷重(1.6tf)の70%および50%とした。CFRPストランドの試験区間は、いずれも80cmである。定着用膨張材の充填は、2回(1次、2次)に分けて

行い、固定側が1次充填、緊張側が2次充填側となるようセットした。実験は25℃の恒温室で行った。

### 3. 2 実験結果および考察

表-1によれば、(II)法を用いたB、E、H供試体では、緊張側の仮定着をゆるめ、中央の固定部で定着させたときに0.6~1.3tfのロスがみられる。この原因は当初、プレテンション方式におけるプレストレス導入時と同様に、膨張材の弾性変形によるものと考えていたが、中央固定部の口元変位はほとんど0であって、定着法に固有のロスではない。そこで、図-2(b)と同様のフレームを組んで載荷試験を行ったところ、反力プレート、ナット間のなじみや変形に起因することが確認された。

図-3は、供試体A~Hについての緊張荷重の低下率( $\Delta T/T_0$ )の経時変化を対数時間で表わした。A~Cについては4500時間、D~Hについては2300時間までの結果、 $L=22\text{cm}$ の場合6~11%、 $L=30\text{cm}$ の場合5~6%と、鋼管長が長い方が小さくなっている。D供試体の場合、膨張圧の不足のためか、3回目緊張時に定着直前の11.9tfで、緊張側で抜け出しが生じたため、ただちに定着を行った。しかし、一旦抜け出しが生じて8.5tfとかなり高い緊張力が保持でき、その後の低下は4%である。(II)法であるB、E、H供試体ではさらに小さく、2%以下であった。これは緊張した状態で膨張圧が作用しているため、仮定着解放時のCFRPストランドのホアソン効果に加わって、より強固な定着になっているためと考えられる。

図-4(a)、(b)に、口元変位の経時変化を示す。緊張荷重の低下率は口元変位の挙動と対応しており、緊張荷重の低下率の大きいものほど、口元変位も大きくでている。この口元変位 $\delta$ の経時変化は、式(1)で近似できた。

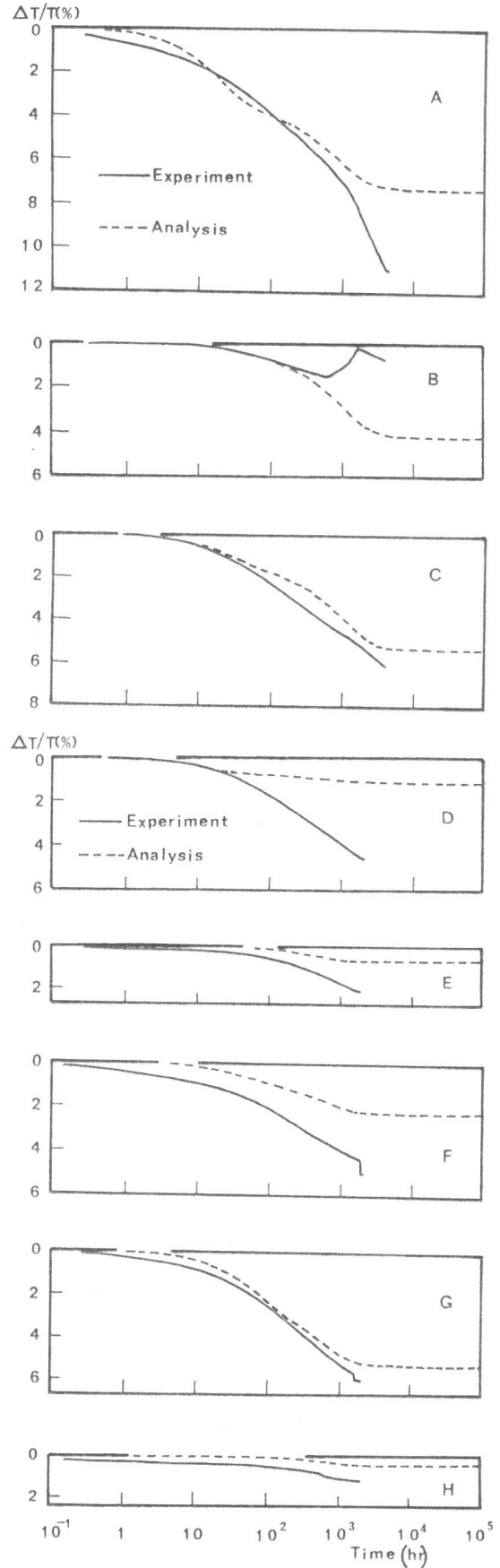


図-3 緊張力の経時変化

$$u(t) = \beta_1(1 - \exp(-t/k_1)) + \beta_2(1 - \exp(-t/k_2)) \quad (1)$$

$\beta_1, \beta_2, k_1, k_2$ : 定数

いま、口元変位は見かけ上、CFRPストランドが伸びたことに相当するから、これをクリープ変形とみなし、緊張力の低下率 $\Delta T/T_0$  ( $T_0$ : 定着直後の緊張力,  $\Delta T$ : 低下緊張力)との関係を求めると、

$$\Delta T/T_0 = 1 - \exp(-\alpha \phi_t) \quad (2)$$

$\alpha$ : 実験装置と緊張材との換算断面積比

$\phi_t$ : 時間 $t$ における口元変位より求めたクリープ係数

$$\phi_t = (u_1(t) + u_2(t)) / (T_0 L_0 / EA_p)$$

式(2)で計算した値は、図-3に実測値と比較して示した。計算値は実測値より、CFRPストランドのリラクセーション相当分だけ小さめに定めており、CFRPストランドのクリープ(またはリラクセーション)の影響を考慮した $\phi_t$ がより正しく評価できれば、長期における緊張力の変化の推定は式(2)でさらに精度よくできることになる。

### 3. 3 定着用膨張材の性質と緊張力低下の関係

膨張圧の発生は水和反応によるもので、温度が高くなれば反応が活性化して膨張圧が大きくなる。また、定着用膨張材自身、その高膨張圧を反力として受けているので、クリープ変形も大きく、緊張力に影響をおよぼすものと推察される。そこで、水和反応の程度

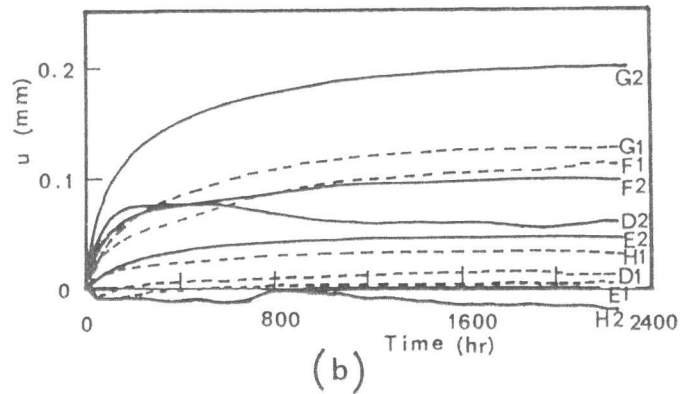
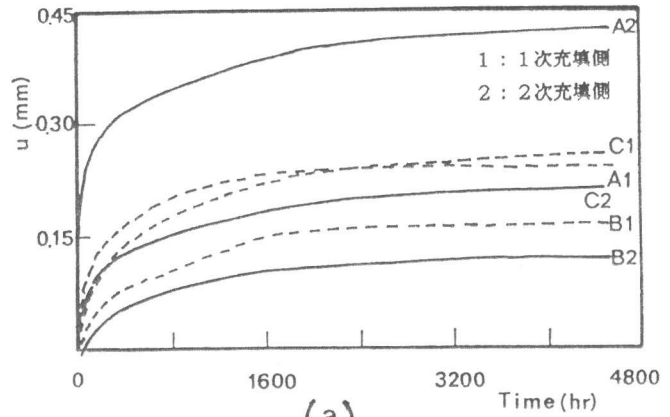


図-4 口元変位の経時変化

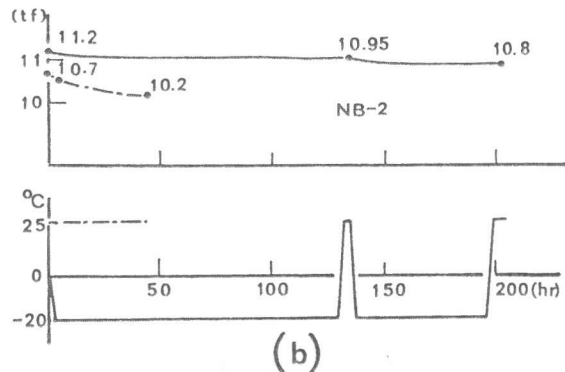
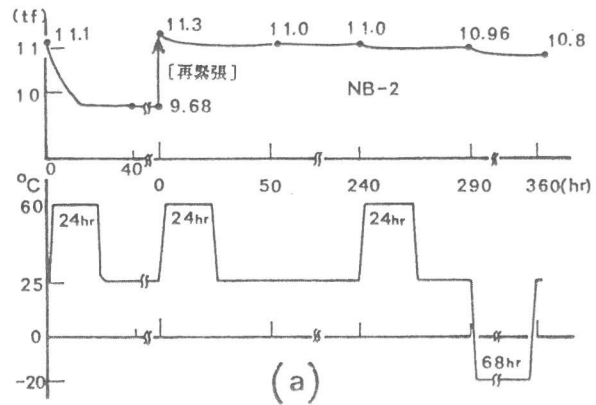


図-5 温度と緊張力の関係

が極端な2つの場合を設定した実験を行った。実験装置は図-2(a)と同様で、CFRPストランド試験区間を30cmと短くし、11.5tfで緊張、定着した。緊張力の測定は25℃の状態で行った。図-5(a)、(b)は温度変化と緊張力変化の関係である。同図より以下のことがいえる。

i) 60℃24時間作用させた後の緊張力の低下率は12.7%で、60℃におけるCFRPストランドのレラクセーション率2.5%を引くと10.2%となる。以後60℃24時間を2回繰り返して、ほぼ完全水和状態(膨張圧は1150kgf/cm<sup>2</sup>)での緊張力の低下率は2.4%、0.6%と、CFRPストランドのレラクセーションに相当する低下率であった[2]。

ii) 緊張定着後ただちに-20℃の環境下におき、水和反応をストップさせた場合の低下率は2%以下と小さかった。

これらの結果は、水和反応の進行状態と緊張力の低下は密接に関係していることを示している。しかしながら、以上、定着用膨張材の性質に起因する緊張力の低下が、10%程度のもであったが、試験区間が30、80cmと短い場合であって、実際の現場施工では長尺で使われることを考えれば、実用上ほとんど問題ない程度に小さくなる。例えば、緊張材長10mとし、今回の実験で最大の口元変位を生ずる場合について計算したところ、緊張力の低下は0.6%であった。

#### 4. 定着部の疲労特性

外ケーブルや、アンボンド方式では、緊張力の変動は直接定着部に作用するため、引張疲労試験を実施し、定着部の疲労安全性について検討した。

供試体は定着部の鋼管長22cm(有効充填長21cm)、定着部を含む全長72cmとした。取り付け状況を図-6に示す。CFRPストランドでは緊張時によりが戻り、破断荷重が低下するので、より戻り防止治具を取り付けた。下限荷重は保証破断荷重14.5tfの60%以上とし、荷重振幅は、CFRPストランドの200万回疲労限内で、できるだけ定着部に負担のかかるよう設定した。所定の繰り返し毎に試験機を止め、0.5tf

から上限荷重まで静的に載荷し、定着部間の変位( $\delta$ )を計測した。0.5tfは初期設定荷重である。疲労試験の開始は、膨張圧が500kgf/cm<sup>2</sup>以上生じた時点である。実験結果を表-2に示す。NB-F1~NB-F4では、より戻りの防止が不十分であったため、CFRPストランドがほぼ中央部で疲労破断した

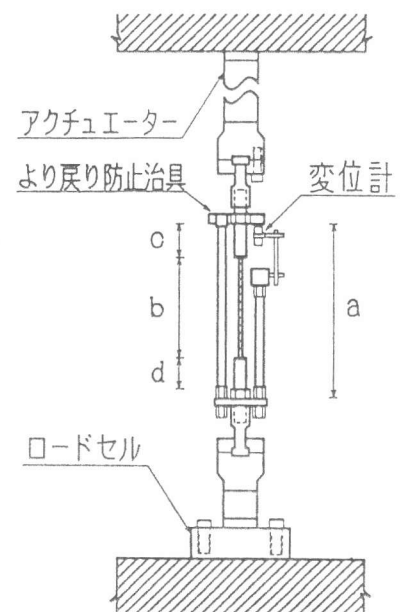


図-6 疲労試験概要

表-2 疲労試験用供試体および試験結果

供試体 記号	膨張材 の種類	上限荷重 (tf)	下限荷重 (tf)	繰り返し回数 (回)	疲労後静的 破断荷重 (tf)	
B-F1	静的破砕剤 $W/B=25\%$	12.0	9.0	$>200 \times 10^4$	15.7	
B-F2		13.5	10.0	$>200 \times 10^4$	16.6	
NB-F1	定着用材 NB-2 $W/B=30\%$	13.5	10.0	2388 **	** よりが戻ったこと によるスト ランドの 疲労破断	
NB-F2				142847 **		
NB-F3		1010 **				
NB-F4		138 **				
NB-F5		13.5	10.0	$>200 \times 10^4$		16.6
NB-F6		14.4	13.0	$205 \times 10^4$		疲労破断
NB-F7		13.5	12.0	$>500 \times 10^4$		14.4

が、定着部に異常は認められなかった。静的破砕剤を用いた場合2体、定着用膨張材を用いた場合3体について、定着部は200万回疲労後においても、健全であった。そのうちの1体NB-F7は、定着用膨張材の耐候性を検討することも目的として、60℃(46時間)→110℃(24時間)→-20℃(160時間)→110℃

(48時間)と過酷な環境下においた後に疲労試験を行ったが、500万回後でも異常はみられなかった。各繰り返し回数毎の荷重～変位( $\delta$ )の関係は、図-7に示すようにほぼ直線であるので、CFRPストランドの弾性係数は一定とみなして、弾性変形量 $\Delta L$ を求め、 $u = \delta - \Delta L$ を口元変位としてプロットしたのが図-8である。繰り返し回数とともに、残留口元変位は徐々に増加しているが、上限荷重が14.4tfの場合で、200万回後の増加量は0.8mmとわずかであった。

## 5. まとめ

(1) CFRPストランドを緊張した状態で、定着用膨張材を充填して定着する方法(口法)では、長期における緊張力の低下はわずかであり、また現場施工性の点でも優れている。

(2) 長期における緊張力の低下は、定着部からのCFRPストランドの抜け出し量(口元変位)と密接に関係しており、口元変位がわかれば、緊張力の低下の定量的な推定が可能である。

(3) 実際の現場施工では長尺で使用されることになるので、長期の緊張力の低下は、無視できる程度に小さくなる。

(4) CFRPストランドの疲労限内で、定着部に最も負担のかかる引張疲労試験を実施した結果、5体の供試体すべて、200万回まで健全であった。そのうちの1体は、定着部を過酷な環境下においた後の疲労試験で、500万回後でも定着部に異常はみられなかった。

謝辞：ご協力賜った「膨張材による定着法研究会」各位に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 原田哲夫、出光隆、渡辺明、高山俊一：静的破砕剤を用いたFRP緊張材の定着方法、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp251～256、1990.10
- 2) 伊藤幸雄、丸山武彦、白鳥信令、榎本剛：より線型CFRPロッドのリラクゼーション特性、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部、pp322～323、1990.9

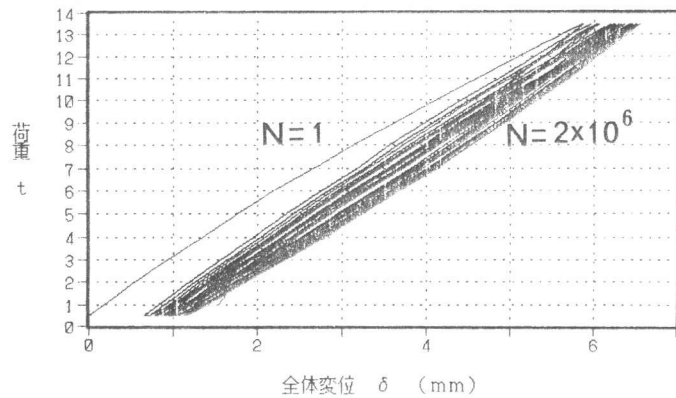


図-7 荷重～定着部間全変位の関係

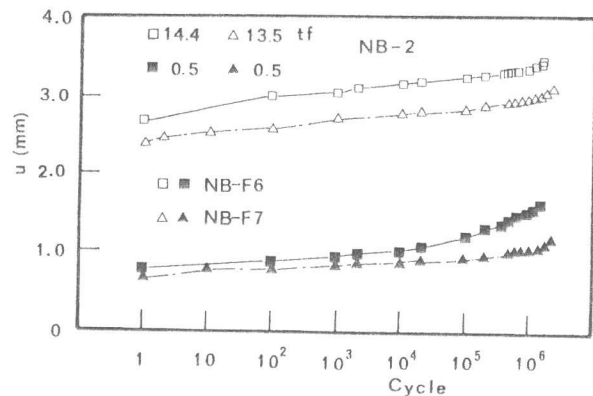


図-8 口元変位の変化