

論文

[2189] 定着用膨張材を用いた FRP 緊張材の定着機構の一考察

原田哲夫^{*1}・ミヨーキン^{*2}・徳光 卓^{*3}・出光 隆^{*4}

1. まえがき

筆者らは FRP 緊張材をソフトタッチで確実に定着できる特長をもつ、定着用膨張材を用いた定着法を開発し、基礎的な研究を行ってきた[1],[2],[3]。この方法を現場施工に適用するには、2通りの緊張定着システムが考えられる。一つは、鋼管（スリーブ）に FRP 緊張材を通し、鋼管とのわずかな隙間に定着用膨張材を充填し、硬化・膨張して緊張材と一体になった鋼管自体を緊張し、ナット定着する方法である。もう一つは、まず定着体となるスリーブを所定の位置にセットして、FRP 緊張材を挿入し緊張を行う。次に緊張した状態で定着用膨張材を充填して、所定の膨張圧が発生した段階で、緊張端の仮定着をゆるめ、定着する方法である。前者、後者それぞれ、便宜的に（Ⅰ）法、（Ⅱ）法と呼ぶことにする。鋼製の定着体とする場合には、実用上は（Ⅰ）法で十分と考えられるが、FRP 緊張材の特長を活かすためには、定着部も含めて、オールノンメタリックとすることが望まれる。一方、（Ⅱ）法では、長期載荷実験（初期緊張力 12 tf, 定着長 30 cm, 試験区間 80 cm, CFRP ストランド）において、3 年後の緊張力低下が 3 % 以下とわずかであり、緊張力の低下はほとんど見られないことを確認している。したがって、ノンメタリック定着体の場合には、現場での施工性や定着効率、上記の結果等を考慮すれば、（Ⅱ）法の方が適していると考えている[4]。この場合、設計上問題となるのは、所定の緊張力の定着および緊張材の破断までに必要なスリーブ長をいくらにとればよいかである。

以上、必要スリーブ長の決定には、（Ⅰ）法、（Ⅱ）法いずれを採用する場合においても、それぞれの定着機構を明らかにしておく必要がある。

そこで、本論では（Ⅰ）法、（Ⅱ）法について、CFRP ストランド、組紐状 AFRP を用いて基礎的な実験を実施し、定着用膨張材による定着機構に関しての考察を行った。なお、FRP 緊張材に限らず、（Ⅱ）法による定着機構を明らかにすることは、最近注目されている緊張された PC 鋼材の中間定着の設計においても重要と考えられる。

2. 実験概要

（Ⅱ）法による定着効率を確認するための実験は、図-1 に示すように以下の手順で実施した。

① FRP 緊張材を定着具 A, B および C 間に挿入後、

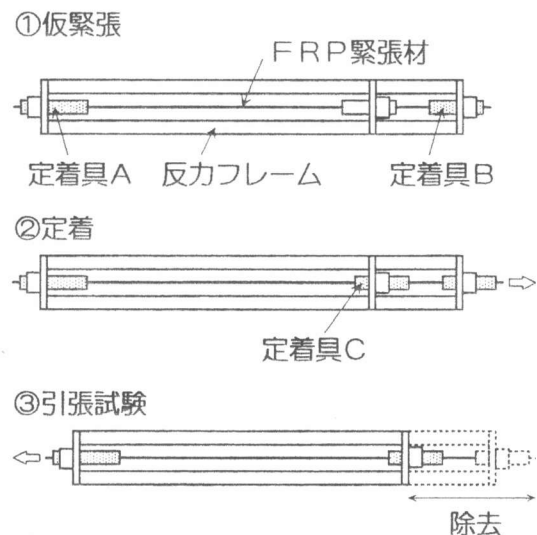


図-1 緊張定着方式

- * 1 長崎大学助教授 工学部構造工学科、工博（正会員）
- * 2 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科、工修（正会員）
- * 3 （株）富士ピー・エス 本店技術部 （正会員）
- * 4 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科、工博（正会員）

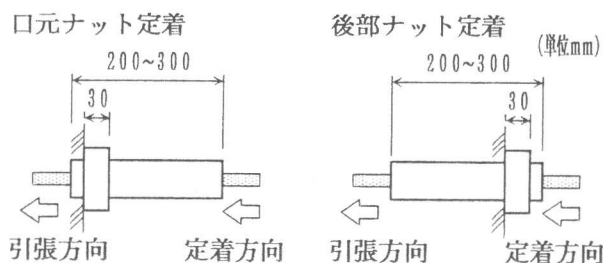


図-2 (a) ナット定着位置の違い

定着用膨張材 (W/B=27%) を充填、所定の膨張圧発現の後、定着具Bを緊張し、仮固定する (定着具A、B間で緊張状態)。なお、所定の膨張圧とは、本実験では400kgf/cm²以上を目標としている。②定着具Cに定着用膨張材を充填、所定の膨張圧発現ののち、定着具Bを再緊張・除荷して定着具Cに荷重を移し、最終的に定着具Cで定着 (定着具A、C間で緊張状態)。③定着具Bを除去し、定着具Aにカプラーを接続して、A側から緊張することにより、定着具Cの性能試験を行う。

今回の実験では表面のひずみ挙動から定着効率、機構を明確にすることが主な目的であるため、スリーブには鋼管 (外径40mm、内径24mm) を用い、ナット定着とした。図-2 (a) に示すようにナットの定着位置は2通りあり、それぞれ1) 口元ナット定着、2) 後部ナット定着と便宜的によぶことにする。ノンメタリック定着具の場合は、一般にはナット定着が困難なので、いわゆる口元定着 (今回実験の1) 口元ナット定着に相当) を考えている。スリーブ表面にはひずみゲージを軸方向に2cm間隔に、図-2

(b) に示すような位置と番号で貼付しており、②の段階では緊張状態での定着効率が、③の段階では緊張荷重以上での緊張材の破断もしくは引き抜け状態の定着部の挙動を検討できる。膨張圧は鋼管中央部表面のひずみ値 ε_θ , ε_z を用いて算定した。緊張材にはCFRPストランド ($\phi 12.5$) および組紐状AFRP ($\phi 12.7$) を用い、定着具C定着時の緊張荷重を各々12tf、10tfとした。

(I) 法の実験は、FRP緊張材を定着具A、B間に挿入後、定着用膨張材 (W/B=27%) を充填し、所定の膨張圧発現の後、定着具Aにカプラーを接続して、A側から緊張することにより、定着具Bの定

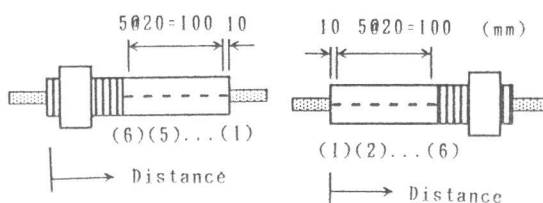
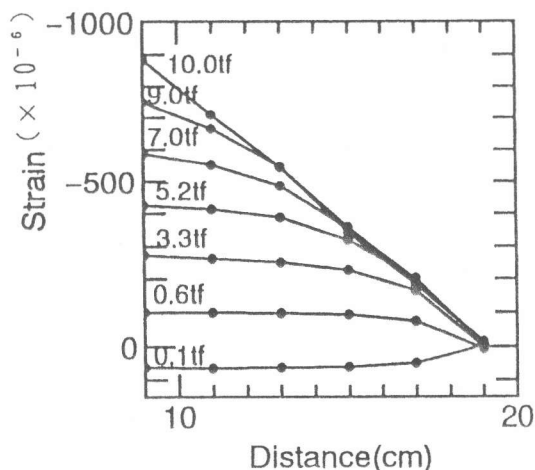
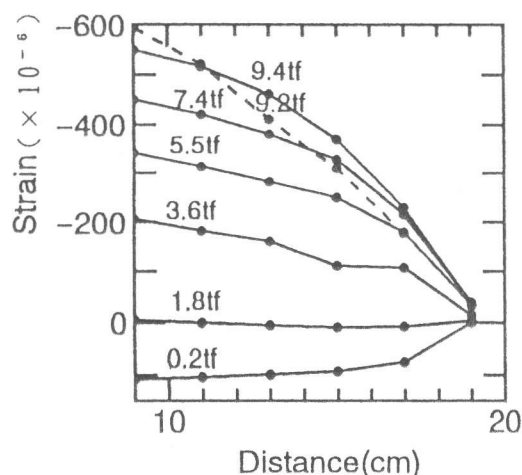


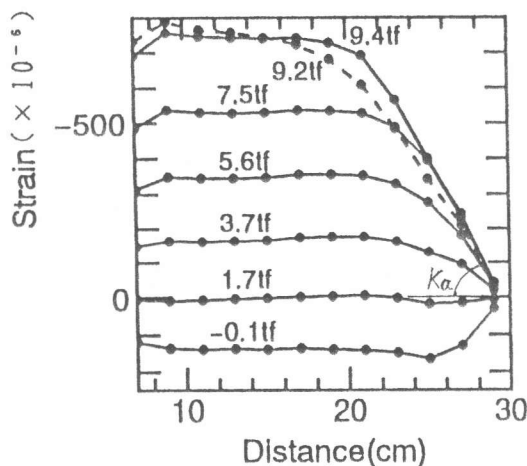
図-2 (b) ひずみゲージ番号と貼付位置



(a) CF-200の場合



(b) AF-200の場合



(c) AF-300の場合

図-3 (II) 法口元ナット定着の場合の鋼管ひずみ分布

着効率を確認した。ひずみゲージ等の貼付は上記と同様である。なお、(Ⅱ)法におけるC定着具、

(Ⅰ)法におけるB定着具のスリーブ長は20cmおよび30cmとした。また、供試体はCFRPストランドスリーブ長20cmではCF-200および組紐状AFRPスリーブ長30cmではAF-300のように表すことにする。

3. 実験結果

図-3 (a), (b), (c) は、CF-200, AF-200およびAF-300の場合の(Ⅱ)法における口元ナット定着の場合のスリーブ表面のひずみ分布を示した。横軸の数値は図-2 (b) に示す、スリーブ内側(緊張材側)からの距離(Distance) (cm)を表す。この場合には、プレテンション方式のプレストレス導入と同様に、定着体内部でひずみ一定となるまでに必要な伝達長が存在することがわかる。この伝達長がこの定着方法の場合の必要定着長と解される。この長さを L_a とすれば、例えばAF-300の場合では、仮緊張解放直後で $L_a=10\text{cm}$ 程度となる。なお、図中の破線は、仮緊張解放約100時間後(b):111時間, (c):90時間)のひずみ分布で、緊張力の低下はほとんどないが、伝達長がわずかに長くなっていることがわかる。

図-4 (a), (b) には、CF-200, AF-200, 後部ナット定着の場合のスリーブ表面のひずみ分布を示した。図-4 (a) では、緊張荷重の12tfを解放したときに、ひずみ0の位置から引張側にカーブしている点は、図-3 に示したひずみ値が一定となる点、すなわち伝達長に相当する点とほぼ等しいとみなせる。AFの場合には、CFの場合よりも伝達長が小さいため、カーブしはじめる点は、この計測範囲にはみあたらない。

図-5 (a), (b) は、後部ナット定着において、(Ⅰ)法および(Ⅱ)法の場合のスリー

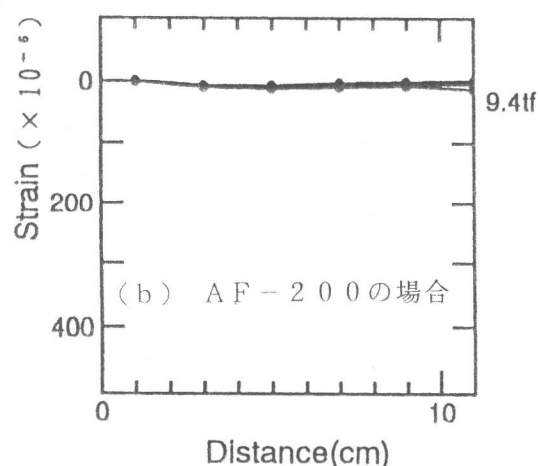
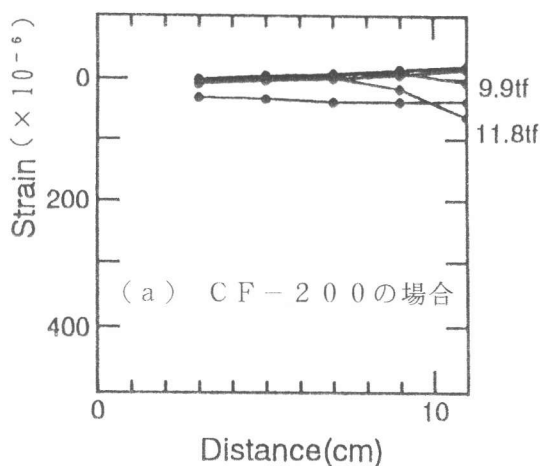
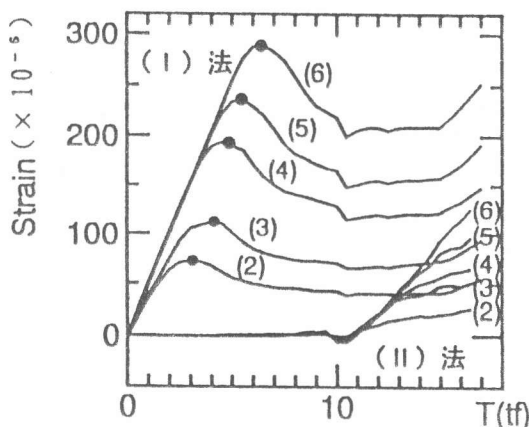
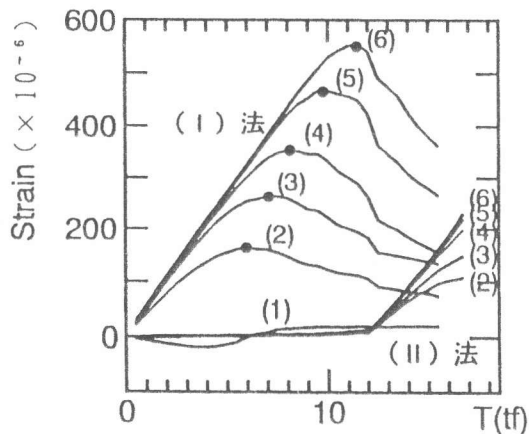


図-4 (Ⅱ)法後部ナット定着の場合の鋼管ひずみ分布



(a) CF-200の場合

(b) (Ⅰ)法 AF-300, (Ⅱ)法 AF-200

図-5 後部ナット定着での引張試験における鋼管ひずみ分布

ブ表面各点のひずみ（図中の番号は計測点位置を示す。図-2（b）参照）と緊張力の関係を示した。（Ⅰ）法では、緊張力が増加するにつれて緊張端に近い位置から順次、ひずみはある緊張力で直線部分からはずれ、いずれもピークひずみを示してから次第に下降していることがわかる。これらの点は、緊張材と定着用膨張材との付着が弱まり、ずれはじめた点とみなすことができるが、このことについては4章で考察する。

（Ⅱ）法では、初期緊張力に相当する荷重 T_0 まで各点のひずみの変動はなく、その後の挙動は緊張力 T_0 分、（Ⅰ）法のひずみをシフトした状態の挙動を示していることがわかる。なお、スリーブ内側1cmの点での挙動は、膨張圧分布が図-6のようになり、膨張圧も小さいため、当初からスリーブには力が伝達していないことを示していると考えられる。

図-7には、口元ナット定着の場合の各点のひずみの挙動を示した。図-5と同様、緊張端に近い位置から順次、ひずみ0の位置からずれはじめている。しかしながら、図-5の場合と異なり、（Ⅱ）法の挙動は緊張力 T_0 のシフト分よりかなり小さい荷重からずれはじめていることがわかる。

4. 定着機構に関する一考察

3章で述べた実験結果に基づき、（Ⅰ）法、（Ⅱ）法それぞれにおける1）口元ナット定着、2）後部ナット定着の場合の定着機構について考察してみる。図-8は、口元ナット定着の場合で、図-8（a）は（Ⅰ）法での引張試験時のスリーブおよびFRP緊張材の分担力の割合、図-8（b）は（Ⅱ）法での緊張後定着時のスリーブおよびFRP緊張材の分担力の割合について模式的に示したものである。この場合には、緊張材の分担力 T_p とスリーブ（鋼管）の分担力 T_s の和はどの断面位置においても0である。図-8（b）の鋼管の圧縮力分布は、図-3（a）、

（b）、（c）に対応している。この状態でA側から引張力 P_r を作用させた場合は、図-8（a）の状態をそのまま重ね合わせて考えればよいことになる。ただし、初期緊張力 T_0 （CF：12tf、AF：10tf）に達するまでは、図-8（b）の分布形状は変化しない。 T_0 を越える荷重が作用し、図-8（a）に示す緊張力の影響範囲 L_b が、 L_a の位置に達した場合には、緊張材はすべり出すものと考えられる。

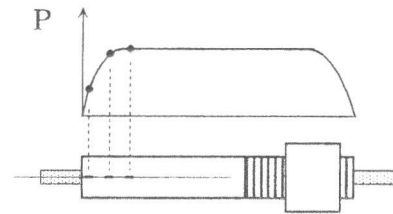


図-6 膨張圧の鋼管軸方向分布

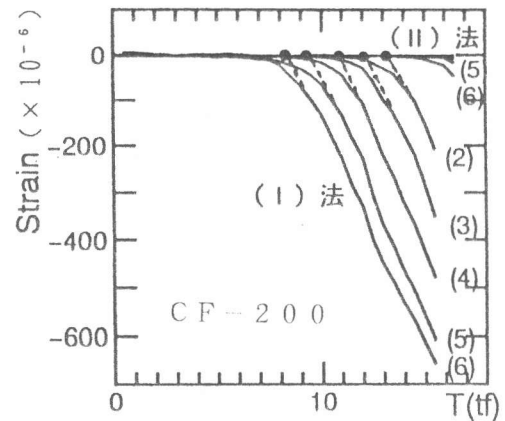
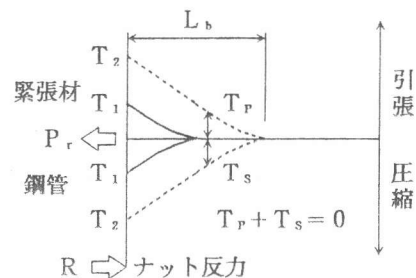
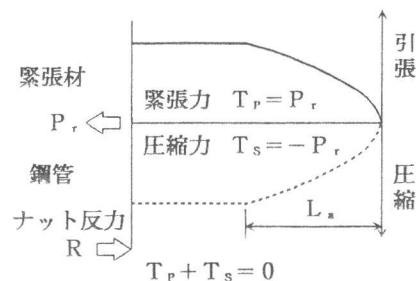


図-7 口元ナット定着での引張試験における鋼管表面ひずみ挙動



(a) (Ⅰ)法 口元定着引張試験時の張力負担状態



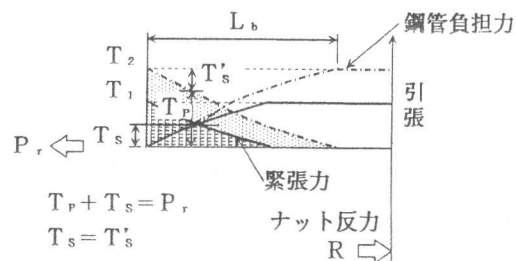
(b) (Ⅱ)法 口元定着緊張後定着時の張力負担状態

図-8 口元ナット定着における定着機構模式図

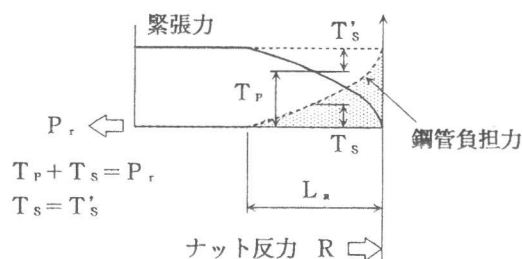
図-9は、後部ナット定着の場合で、図-8と同様、図-9(a)は(I)法で引張試験時の各分担割合、図-9(b)は(II)法での各分担力の割合について模式的に示したものである。図-9(b)に対応する実験結果は、図-4(a), (b)である。この場合には、定着体のどの断面位置においても $T_p + T_s = P_r$ となる。上記と同様、図-9(b)の状態からA側から引張力を作用させた場合にも図-9(b)の状態に図-9(a)の状態を重ね合わせて説明することができるが、ここでは図-10、図-11を用いて以下に説明する。

まず、仮緊張力を解放し、定着具Cに緊張力を移すと緊張材の張力は定着長 L_a 部分で後部から、口元部に向かって漸増し、 L_b 部分では一定となる。 L_a 部分では図-11(a)のように、ポアソン効果で細くなった緊張材が元の径にもどろうとすることでくさびを形成し、さらにくさびの部分での接触圧が増加膨張圧として付加され、定着されることになる。一般に、FRP緊張材のみかけのポアソン比は大きく、接触圧も大きくなるものと推察される。ポアソン比が大きく、FRP緊張材と定着用膨張材との摩擦係数が大きいほど L_a は短くなるものと考えられる。これが(II)法の定着機構と考えられる。

さて、この状態で T_0 よりさらに大きな引張荷重 T_1 が作用すれば、口元部から T_1 にみあう定着長 L_1 が発生する。さらに、荷重を増加すれば、定着長は口元部から後方へと伸びていく。(I)法では、一般にFRP緊張材のポアソン比が大きいことから、引張荷重が作用すれば、図-11(b)のように荷重の大きい口元部から細くなり付着も弱まって抜け出しやすくなるものと思われる。スリーブ長が短くて、荷重 T_2 による定着長が L_b 以上となった場合、ポアソン効果によって細る影響が L_a 部分におよび、 L_a 部分定着のくさび作用が弱められ、この段階でFRP緊張材はスリーブから一気に抜け出すものと思われる。逆に、FRP緊張材自体の破断荷重 T_{max} 時点で、定着長が L_b より短ければ定着部からの引き抜けはおこらず、FRP緊張材の破断で終局となる。次に、(II)法で定着された状態で、さらに引張荷重を作用させた場合の必要定着長 L の求め方について考察を行う。図-5において、ピーク値を示す荷重とそのゲージ位置の関係をプロットしたものが図-12(a), (b)の●印で、直線関係を示していることがわかる。このことは、この2cmの区間ではある一定の限界付着応力 $\tau = \mu p$ (μ : 定着用膨張材



(a) (I)法 後部定着引張試験時の張力負担状態



(b) (II)法 後部定着緊張後定着時の張力負担状態

図-9 後部ナット定着における定着機構模式図

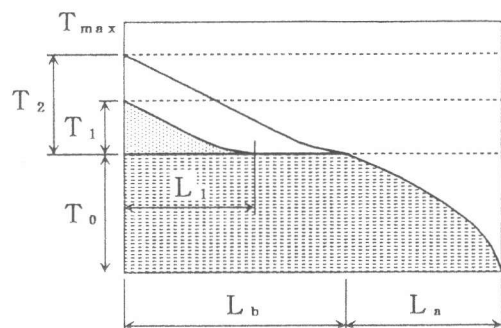


図-10 (II)法後部ナット定着での緊張定着後の引張試験時張力分布

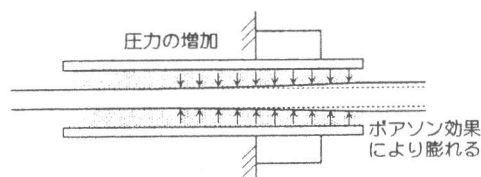


図-11(a) (II)法での定着時

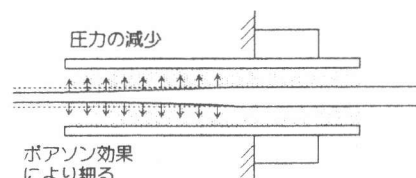


図-11(b) (I)法での引張時

とCFRPストランドの摩擦係数、 p ：膨張圧）に達した段階で緊張材がすべりはじめると考えられる。この直線勾配 Kb は τU （ U ：FRP緊張材の周長）であり、例えば荷重 T_1 にみあう定着長 L_1 は、 $L_1 = T_1 / Kb$ で与えられる。一方（Ⅱ）法でも、図-3で導入荷重が大きくなると、伝達長区間でのひずみの変化はほぼ直線的に変化しているとみなすことができる。このことは、上記と同様に限界付着応力 $\tau' = \mu p'$ （ p' ：定着前の作用膨張圧＋接触圧による増加膨張圧）に達した段階ですべりを生じながら定着されているからだと考えられる。したがって、伝達長区間は勾配 Ka の直線として、図-12に示した。図-12において、 L_a は勾配 Ka の直線と、 T_0 との交点までの距離として求められる。初期緊張力 T_0 より大きい引張力に対する定着長 L_b の求め方は、図-5の結果から、勾配 Kb の直線を T_0 を原点とする位置にシフトして、緊張材の破断荷重との交点までの距離を L_b とみなす。これより、 $L = L_a + L_b$ の値が必要定着長をあたえることになる。 L の値が、用いたスリーブ長より長い場合には緊張材の破断で、短い場合には引き抜けがおこる。図-12（a）、（b）の結果はそれぞれ、このことを示している。

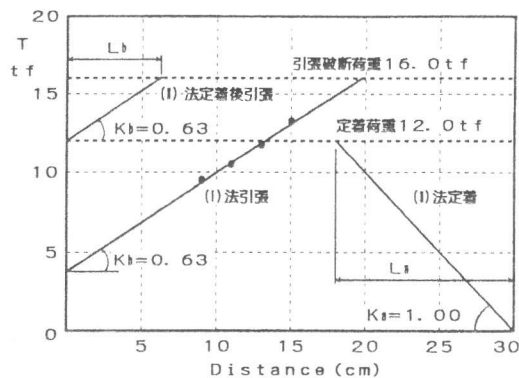
5. まとめ

（Ⅰ）法、（Ⅱ）法とそれぞれに口元ナット定着、後部ナット定着が考えられ、それらの定着機構について、実験結果に基づく定性的な考察を行った。その結果、（Ⅱ）法で定着された状態でさらに引張力を作用させた場合の必要定着長は、 $L = L_a + L_b$ で与えられるという知見を得た。

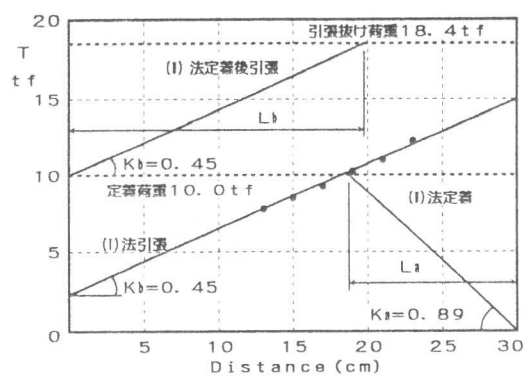
謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（一般研究C 05650437）を受けて行ったものである。実験を遂行するにあたってご協力を賜った小鉢博文、曳村俊貴両氏（平成五年度 長崎大学卒論生）ならびに「膨張材による定着法研究会」各位に厚く御礼申し上げます。

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、pp. 251-256、1990年10月。
- 2) 原田哲夫・出光隆・ミヨーキン・渡辺明：CFRP緊張材の定着法とその長期および疲労特性、コンクリート工学年次論文報告集、13-2、pp. 759-764、1991。
- 3) 原田哲夫・ミヨーキン・樋野勝巳・徳光卓：定着用膨張材を用いた連続繊維緊張材マルチケーブルの定着法、第3回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、pp. 285-290、1992年11月。
- 4) 原田哲夫・出光隆・ミヨーキン・榎本 剛：FRP緊張材用ノンメタリック定着具の開発：コンクリート工学年次論文報告集、15-2、pp. 853-858、1993。



(a) CF-300の場合



(b) AF-300の場合

図-12 L_a および L_b の求め方