

論文 膨張材を用いたマルチ定着法に関する実験的研究

中島規道*1・三上浩*2・原田哲夫*3

要旨：アラミド繊維を用いた組紐状の補強材を緊張材とし、さらに定着用膨張材による定着法を用いて任意のマルチ配線について定着を行い、その引張試験を行なった。その中で、配線形式、定着長、膨張圧がその定着性能に与える影響について検討した。そして、膨張圧の増加に伴い付着強度が増加することおよび膨張材による定着機構を明らかにした。

キーワード：A F R P ロッド、マルチ配線、膨張圧、付着強度

1. はじめに

近年、連続繊維補強材（F R P ロッド）のP C 緊張材への適用研究が進み、一部の橋梁等においては実用化もなされている。しかしながら、現在開発されているF R P ロッドは、1本当たりの耐力が30tf程度までであり、より高耐力のF R P ロッドが要求されている。緊張材として大容量を得るためにF R P ロッドのマルチ配線化が有効であるが、素材の特性から定着部やシースの大型化を伴う問題となっている。筆者らは、これまでF R P 緊張材の素材の研究に加え定着用膨張材を用いた定着法の研究を進めてきている。この方法は、膨張材の水和反応により生じた膨張圧を利用して緊張材を固持するものであり、緊張材の種類によらずその全体を均質にかつ確実に定着できる優れた特性が示されている¹⁾²⁾³⁾。本研究では、F R P 緊張材を任意の形式でコンパクトにマルチ配線化する事を目的とし、特に従来より高い膨張圧の下で緊張材を密着配置して引張試験を実施した。そして試験結果より配線形式、定着長、および膨張圧が定着性能に与える影響を検討し、定着機構の解明を試みたものである。

2. 試験概要

2. 1 試験体

F R P ロッドは、アラミド繊維を組紐状に編みエポキシ樹脂を含浸・硬化したものを使用した（A F R P ロッド）。ロッド単体の機械的性質を表-1に示す。マルチ配線の形式は、公称径7mmのA F R P ロッドを12本束ねたもの、および公称径9mmのA F R P ロッドを7本束ねたものの2種類であり、定着具の径を小さくするために図-1に示す

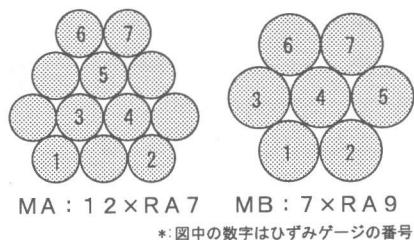


図-1 マルチ配線形式

表-1 F R P ロッドの諸元

名称	公称径 (mm)	断面積 (mm ²)	保証荷重 (tf)	弾性係数 (kgf/mm ²)
RA7	7.3	42	6.4	7.0
RA9	9.0	63	9.6	7.0

表-2 マルチ配線形式の諸元

名称	形式	断面積 (mm ²)	保証荷重 (tf)	最大径 (mm)	周長 (mm)
MA	12×RA7	504	76.8	32	126.5
MB	7×RA9	441	67.2	30	114.0

*1 三井建設(株) 技術研究所、工修 (正会員)

*2 三井建設(株) 技術研究所、工博 (正会員)

*3 長崎大学工学部構造工学科、工博 (正会員)

密着配置とした。その機械的性質を表-2にそれぞれ示す。それらのマルチ配線は、試験体全長に渡って同一断面となっており、圧力を受ける定着部のみエポキシ樹脂で一体化されている。またこの樹脂は、充填材として定着部における母材の強度低下を防ぐ事も目的としている。

定着具は、外径90mm、内径45mmの鋼管(STKM15A)を使用した。また定着長は、20cm、30cm、40cmそして50cmの4種類を使用した。図-2に試験体の一例を示す。

膨張材は、定着用に開発された石灰系の膨張材を水/セメント比27%で使用した。膨張圧は、従来用いられている値として500kgf/cm²、さらに高膨張圧として800kgf/cm²の2水準を目標とした。定着体内に膨張材を注入後、それぞれ所定の圧力に達するまで養生を行なった。なお膨張圧管理は、ダミー試験体に取り付けた圧力計および熱電対により実施した。また膨張圧を800kgf/cm²に設定した試験体は、短時間に高膨張圧を発現させるため、注入後10時間から40℃および50℃に加熱して促進養生を行なった。

試験体数は、マルチ配線形式、定着長、および膨張圧を試験水準とし、その組み合わせにより合計8体とした。試験体名一覧を表-3に示す。

2.2 引張試験

図-3に試験方法を示す。引張試験は、鋼製反力フレームにセットした油圧ジャッキを用い、定着具の後部よりテンションロッドを介して実施した。マルチ配線の各ロッドの長さの違いの影響を排除するために、試験体の全長は5.4mとした。試験時の荷重をロードセルにより、また定着具外周およびFRPロッドのひずみをひずみゲージによりそれぞれ測定した(図-1および図-2参照)。

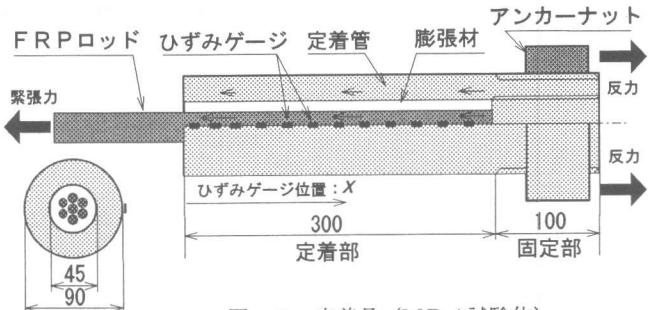


図-2 定着具(MB 4 試験体)

表-3 試験体名一覧

試験体名	緊張材 形式	定着具	
		定着長 (cm)	膨張圧 (kgf/cm ²)
MA-1	12×RA7	30	
MA-2		40	800
MA-3		50	
MA-4		40	500
MB-1	7×RA9	20	
MB-2		30	800
MB-3		40	
MB-4		30	500

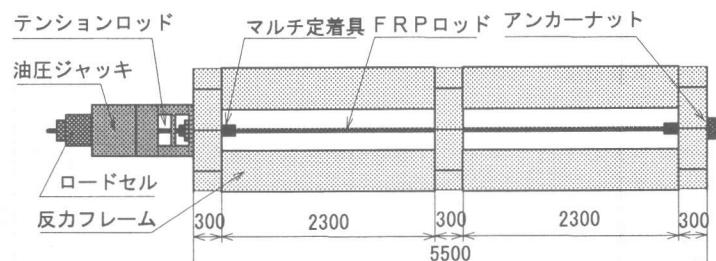


図-3 試験装置

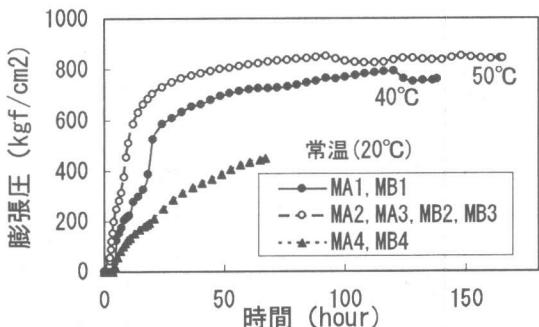


図-4 膨張圧の経時変化

3. 膨張圧の発現性状

膨張圧注入後の経過時間と膨張圧の関係を図-4に示す。注入後48時間の膨張圧は、常温放置で養生した試験体で384kgf/cm²であり、促進養生を行なった試験体は、591kgf/cm²および755kgf/cm²となった。定着用膨張材は、初期反応の温度依存性が大きく、自己発熱も大きい為、練り混ぜ直後に温度を上昇させる事は極めて危険であるが、10時間程度の間隔を置く事により促進養生も可能である事が確認できた。しかしながら、養生温度の違いが膨張圧の発現性状に与える影響については、明確にできなかった。

また、膨張圧の定着具軸方向の分布を膨張圧500kgf/cm²の試験体について図-5に示す。定着具端部からの距離が5cm未満の領域を除くと膨張圧はほぼ等分布となっており、FRPロッドを均質に保持している事が示された。

4. 付着性状

4. 1 定着具のひずみ

定着具軸方向のひずみと荷重との関係を、7本マルチの試験体について図-6および図-7に示す。図中、凡例の数値は、定着具の口元より各ゲージ位置までの距離を示している（図-2参照）。両図に示した荷重-ひずみ関係は、勾配が緩やかな10cm未満の領域と、同一の直線から順次分離を示す10cm以上の領域に別れている。後者の直線勾配はAFRPロッドと定着体が一体として挙動している時の剛性を示しており、すなわち変曲点は、そのゲージ位置において緊張力の伝達区間にに入った荷重を示している。この伝達機構に関しては次節で考察する。

引抜けが生じたMA1試験体と、AFRPロッドの破断となったMB2を比較すると、終局状態を除いた両試験体の挙動はほぼ同一であり、定着具の長さの違いにのみより破壊形式が異なった事が明らかである。また、MB2は終局状態においても口元から20cm以上の離れた領域では、緊張力の伝達領域と成っておらず、定着能力に余裕のあったことが示唆された。

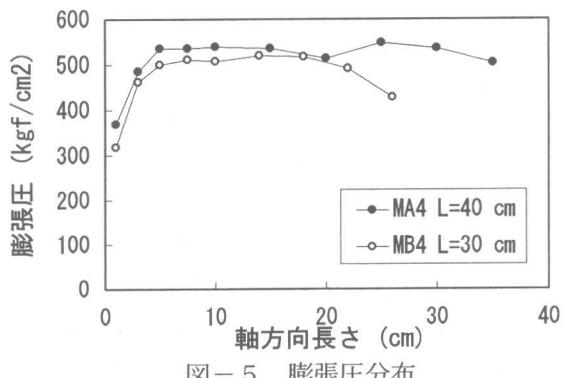


図-5 膨張圧分布

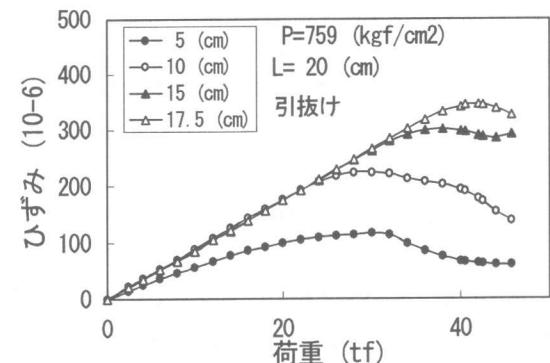


図-6 荷重と定着具のひずみの関係(MB1)

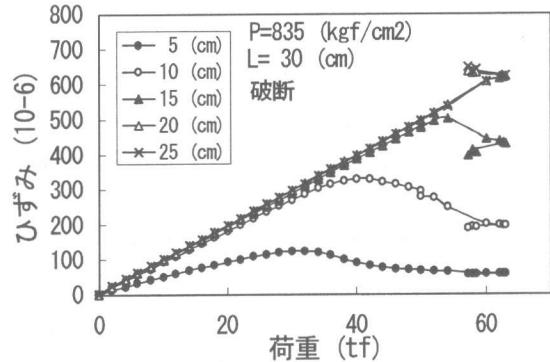


図-7 荷重と定着具のひずみの関係(MB2)

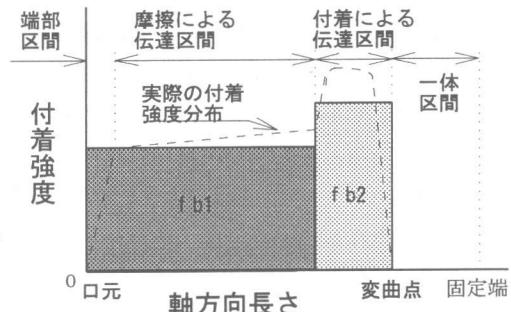


図-8 膨張圧による定着モデル

4. 2 付着強度

伝達長と荷重の関係を12本マルチの試験体について図-9に示す。膨張圧の増加により同一長さにおける定着力が増加する傾向が認められる。また、直線の勾配は摩擦による伝達力を示しているが、この値はひずみゲージの位置および緊張荷重が異なっても変化が無い事も示されている。同様に、口元近傍の各ゲージの変曲点の荷重を図-11に示す。口元付近の領域は、その位置に関らずほぼ同一の荷重でひずみが変化しており、定着体内に滑りが生じる以前の最大付着力とその分布領域を示していると見なす事が可能である。また、図-9と同様に圧力の増加により付着力による定着力も増加する事が示された。

これらの結果より膨張材による定着法の力の伝達モデルとして膨張材と緊張材の界面での滑りの発生前後において2つの伝達方法を仮定した(図-8参照)。それは、摩擦力による伝達力および付着力のみによる伝達力で、それぞれ摩擦付着力と純付着力と仮称する。そして、実験結果よりそれぞれの付着強度を平均値としてを算定した結果を図-11および図-12に示す。なお、純付着の領域の長さは、7.5cmと仮定して算定した。

両付着強度には大きな差が生じており、摩擦付着強度は純付着強度の1/2程度となっている。これは滑り発生後の摩擦力はいわゆる静止摩擦よりも動摩擦に近いと考えられる事、および使用したA F R P ロッドはみかけのポアソン比が大きいため、荷重の負担の大きい口元付近は断面積が小さなり、他の部分に比べ実質的に膨張圧が低下する事によると考えられる。

マルチ配線形式の影響はどちらの付着強度においても認められ、7×R A 9配置の試験体は12×R A 7配置に比して10~40%程度大きくなつた。これは、両配置の面積/周長の比がほぼ等しい事から、ロッド径の違いに伴う表面の凹凸の大きさの影響が現れたものと推測される。

また、両付着強度はいずれも膨張圧に依存するため、膨張圧を考慮し、それぞれの特性値を摩擦係数として求めた結果を表-4に示す。バラツキが認められるも

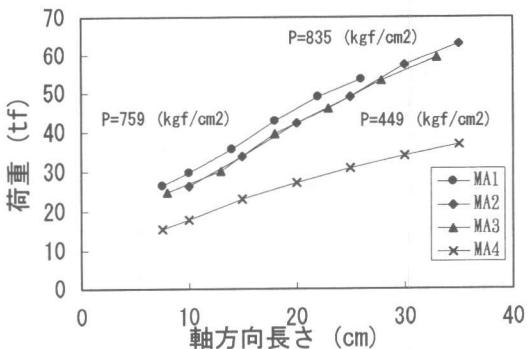


図-9 伝達長と荷重の関係

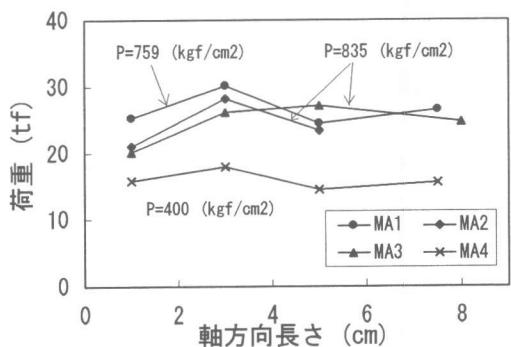


図-10 伝達長と荷重との関係

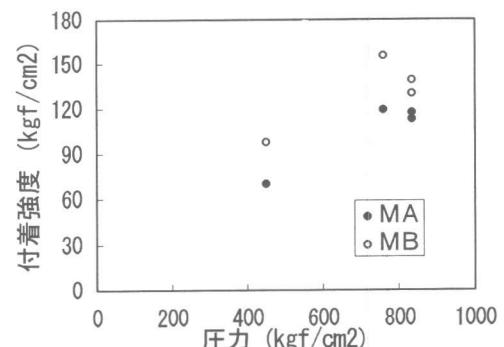


図-11 摩擦付着強度

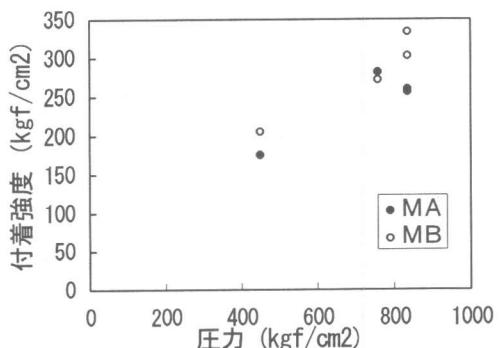


図-12 純付着強度

の、それぞれの摩擦係数はほぼ等しいと見なす事が可能であり、膨張圧と付着強度の間の線形関係が示唆された。

最後に、緊張力と膨張圧および定着長の関係をまとめとして式（1）に示す。

$$T = \mu_1 \cdot P \cdot U \cdot (L - l_c) + \mu_2 \cdot P \cdot U \cdot l_c \quad (1)$$

T：緊張力 P：膨張圧 L：定着長

U：マルチ配線束の周長

l_c ：純付着領域の長さ

μ_1 ：摩擦付着領域の摩擦係数

μ_2 ：純付着の領域の摩擦係数

5. AFRP ロッドのひずみ

図-13 および図-14 に荷重と AFRP ロッドのひずみとの関係を示す。共に 12 本マルチ配線で、ロッドの引抜けが生じた試験体を例とした。MA 4 は、引抜け荷重は低いものの終局までマルチ配線が一体として挙動している。それに対し、MA 1 は、マルチ配線の内部のロッドから徐々に滑りが進行し最終的にロッド束の抜出しに至る挙動を示した。この内部のロッドの滑りは、7 本マルチとした試験体では認められなかった。膨張圧、定着長等の要因も影響しているものの、この現象は多数の AFRP ロッドを変則配置した事による影響であると考えられる。

6. 破壊形式

表-5 に各試験体の最大荷重および破壊形式を示す。8 体の試験体中、AFRP ロッドの破断に至ったものは、膨張圧が高く、定着長が長い 4 体であるが、その何れにおいても最大荷重は保証荷重を下回っている。その割合は、保証荷重の 85% から 94% であり、ロッド単体の実耐力から判断すると低い値となっている。また、ロッドの破断位置は、破断した全ての試験体において同一であり、定着具の口元部分のマルチ配線の内側部分のロッドで生じた。破断位置および AFRP ロッドの幾何学的性質から、破断荷重の低下原因として次の事が推測される。

- (1) 口元部分は、自由表面であるため膨張圧の変化が生じている事、および AFRP ロッドと定着具との最初の応力伝達区間である事から応力状態が複雑なものとなっている。
- (2) 組紐状 AFRP は、表面の凹凸が大きい為、ロッドを接触させた場合、充填材を介してもロッド間で点接触による応力集中が生じやすい。

一般に FRP 緊張材を用いた場合定着部が欠点となりやすく、定着方法に応じた低減係数を設定し母

表-4 摩擦係数

試験体 名称	摩擦係数		試験体 名称	摩擦係数	
	μ_1	μ_2		μ_1	μ_2
MA 1	0.157	0.370	MB 1	0.205	0.357
MA 2	0.141	0.305	MB 2	0.155	0.362
MA 3	0.135	0.310	MB 3	0.166	0.399
MA 4	0.155	0.390	MB 4	0.217	0.457
平均値	0.147	0.344	平均値	0.185	0.394

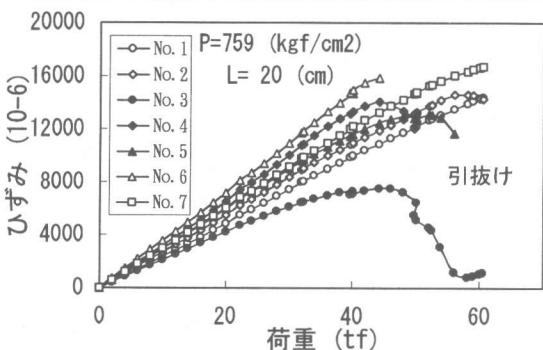


図-13 荷重と緊張材ひずみの関係(MA1)

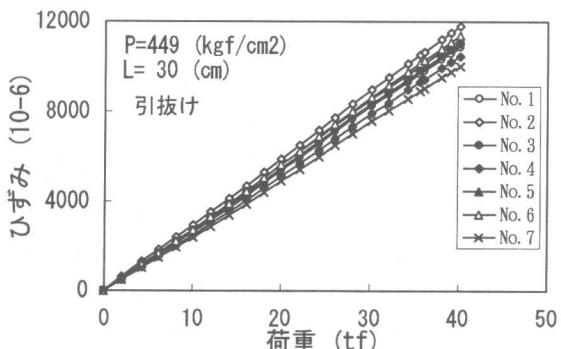


図-14 荷重と緊張材ひずみの関係(MA4)

材の強度を減じる等の方法により設計が行われている。膨張材による定着法は、F R P 緊張材を単体で用いた場合、母材の強度をほぼ100%期待できるが、本試験で用いた密着形式では、他の機械式定着方と同様の低下が認められた。膨張圧に関する試験要因の数が十分ではないものの、破断強度の低下原因是、密着配置に加えて高膨張圧が負の要因として作用した可能性が高いと考えられる。今後、マルチ配線の形式および内部の充填材の種類等も含め、圧力の影響について検討を進めていく必要がある。

また、引抜けが生じた試験体の試験後の観察によると、膨張圧の低い試験体の表面は比較的滑らかであったが、膨張圧の高い試験体のロッド束表面は損傷が著しく、高膨張圧によるロッド束の把握力は、極めて強いものである事も認められた。

6.まとめ

本研究では、定着用膨張材を用いてF R P 緊張材を任意の形式でコンパクトにマルチ配線化する事を目的として試験を行なった。膨張圧の増加は付着強度が増大し定着長を短縮できる利点があるが、反面終局時に破断強度が低下し欠点となる可能性が認められた。膨張圧、定着長さらに配置形式の最適な組み合わせについては、今後明らかにして行きたい。本試験で得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 膨張材を用いた定着法によりF R P ロッドのマルチ配線を任意の形式で定着する事ができる。
- (2) 膨張圧は、定着具の両端部を除いた区間でほぼ等分布となる。
- (3) 膨張材を用いた定着法では、摩擦力により力の伝達を行なう領域と、純粋な付着力により伝達を行なう領域の2つに分類できる。
- (4) 膨張圧の増加に伴い付着強度は増大する。また、両者の間には、ほぼ線形関係が認められる。
- (5) A F R P ロッドのマルチ定着を密着配置で行なう場合、膨張圧およびロッドの配置方法に留意する必要がある。

参考文献

- 1) 中島規道、田村富雄：マルチ配線P C 緊張材の中間定着法の研究、土木学会第49回年次学術公演会概要集V部門、 pp782-783、 1994
- 2) 原田哲夫、ミヨーキン、徳光卓、出光隆：定着用膨張材を用いたF R P 緊張材の定着機構の一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 2、PP1135-1140、19994
- 3) 蓮尾孝一、田村富雄、平山達郎：膨張材による連続遷移緊張材の定着の研究、日本建築学会学術公演概要集（関東）、PP805-806、1993

表-5 試験結果

試験体 名称	試験体 諸元			試験結果		
	形式	保証荷重 (tf)	定着長 (cm)	膨張圧 kgf/cm ²	最大荷重 (tf)	破壊形式
MA-1	12× RA7	76.8	30	*759	60.5	引抜け
MA-2			40	835	68.0	破断
MA-3			50	835	65.1	破断
MA-4			40	449	40.1	引抜け
MB-1	7× RA9	67.2	20	*759	45.7	引抜け
MB-2			30	835	63.1	破断
MB-3			40	835	59.1	破断
MB-4			30	449	37.0	引抜け

* : 定着具の円周方向ひずみより算定。他は圧力計の値。