

高膨張圧を受ける定着用膨張材の 耐久性に関する実験的研究

山田 一夫¹・原田 哲夫²・出光 隆³・副田 孝一⁴・Myo Khin⁵

¹理修 太平洋セメント(株) 佐倉研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

²正会員 工博 長崎大学教授 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

³フェロー会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

⁴正会員 工博 太平洋セメント(株) 佐倉研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

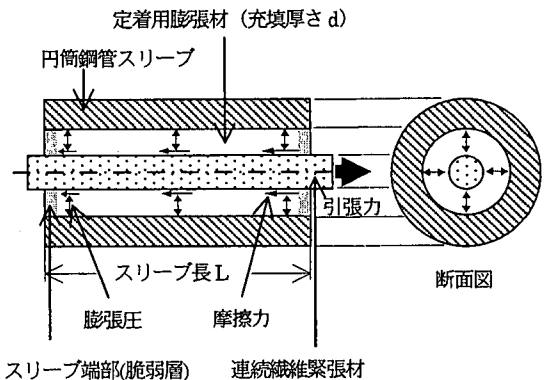
⁵正会員 工修 第一工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒899-4395 鹿児島県国分市中央 1-10-2)

連続繊維補強材の定着に用いられる定着用膨張材(定着用途に適した特殊膨張材)の耐久性に関して、材料的な面から、鋼管スリーブ内で膨張圧を発生した状態での各種促進試験と暴露試験により検討した。乾湿繰返し、中性化促進、凍結融解、屋外暴露の各試験結果から、作用膨張圧は標準試験と同等の値を示し、1年材齢で80MPa以上であった。これらの促進試験による、鋼管スリーブ端部からの脆弱化部分の進行がみられたが、端部をエポキシ樹脂シーリングすることで防止できることが分かった。脆弱化による有効定着長の低下はスリーブ長が200mm以上では1.0%以下となる。作用膨張圧が長期的に設計膨張圧50MPaよりも60%以上高い値を示すことから、有効定着長の長期的低下は定着体設計上無視でき、定着用膨張材による定着体は長期にわたり安定であることが分かった。

Key Words: expansive material, anchoring, FRP tendons, durability, expansive pressure, accelerating test

1. はじめに

カーボン繊維、アラミド繊維など新素材繊維からなる連続繊維補強材をプレストレストコンクリート(PC)構造物などの緊張材として用いる場合の最大の問題点は、その定着方法にある。連続繊維補強材は一般に一方強化材料であるため、せん断や局部荷重に対して弱く、応力集中を生じない定着方法を用いることが必要である。このような定着方法として、筆者らは高い膨張圧を発生する特殊膨張材を用いる方法を開発し、基礎的な研究を行ってきた^{1)~3)}。定着の概要を図-1に示す。連続繊維緊張材は膨張材を介して鋼管スリーブと一体化する。膨張材は鋼管によりその膨張が拘束されるため膨張圧を生じるが、鋼管スリーブと連続繊維緊張材に等しい圧力で作用する。この膨張圧は緊張材に引張力が作用したとき、それに抵抗する摩擦力を生み出す。本用途に適した高い膨張圧を発生する特殊膨張材を定着用膨張材と呼んでいる。材料的には、静的破砕剤をベースにした膨張材であり、材料分離とブリージングを防止し、定着用として適正な膨張圧発生速度に最適化したものである。



スリーブ端部(脆弱層) 連続繊維緊張材

図-1 定着用膨張材を用いた定着体の概要

これまでの研究¹⁾によれば定着用膨張材の高膨張圧と液圧的な圧力伝播という特性により応力集中を起こさず確実に連続繊維補強材を定着でき、素材の繊維混入率より算定した破断強度の100%の引張り強度を発揮できる定着効率が確認されている。また、プレテンション方式のような短期の定着であれば、緊張材の緊張力の低下もほとんどないことが示されており実用上の問題はない。

さらに最近では、定着用膨張材は連続繊維補強材に限らず、PC鋼材を緊張状態のまま定着する、いわゆる中間定着工法としても利用されている⁴⁾。PC鋼材中間定着工法は、浮島橋の補修工事や名神高速道路石山高架橋の解体撤去工事において既に実施が行われている。この場合、仮定着であっても1~2年は所定の定着力を保持することが求められ、それが可能であることが実証されている。

一方、ポストテンション方式の永久定着体として使用するには緊張力の長期的な安定性と材料の耐久性が求められる。これまでの標準的環境における長期的安定性に関する研究³⁾によると、載荷7年にわたる緊張力変化の測定を基に、緊張材長が10mとした場合の緊張力の低下率は2.8%であり実用上は緊張材長がさらに長くなることを考慮すれば、この低下は無視できるものとなる。

しかしながら、定着用膨張材はCaOの水和反応による膨張により定着力を発揮するため、永久定着体として使用する場合は、環境条件の変動による膨張圧の低下や、材料としての耐久性について十分な検討が必要である。定着用膨張材の反応はCaOが水をしCa(OH)₂が生成する反応であるため、コンクリートと同様にCa(OH)₂が中性化することが考えられる。また、膨張圧が持続するため、無拘束に近い状態となっているスリーブ端部部分の脆弱化による定着長の減少の可能性もある。

本報では、連続繊維補強材の定着体として定着用膨張材を充填した鋼管を用いて、暴露試験及び各種の促進試験を行い、鋼管内にある定着用膨張材効果体の耐久性を材料的側面から実験的に検討した結果について報告する。

2. 定着体の設計と定着体の耐久性上の問題点

(1) 定着体の設計

定着用膨張材を用いた定着体の概要を図-1に示す。定着用膨張材はPC構造物の定着具として、長期にわたり使用されるため、連続繊維緊張材の定着力が設計耐用期間中に十分保持されるものでなければならない。スリーブ長Lが与えられた場合、緊張材を定着する所定の定着力Tと有効膨張圧Peとの関係は式(1)で与えられる。

$$T = (\mu \cdot Pe + C) \cdot U \cdot L \quad (1)$$

ここに、T: 定着力(kN), μ : 定着用膨張材と連続繊維緊張材との摩擦係数, Pe: 有効膨張圧(MPa), C: 付着強度(MPa), U: 連続繊維緊張材の周長(mm), L: スリーブ長(mm)である。

スリーブ長さ方向の膨張圧分布は、図-2のようになっ

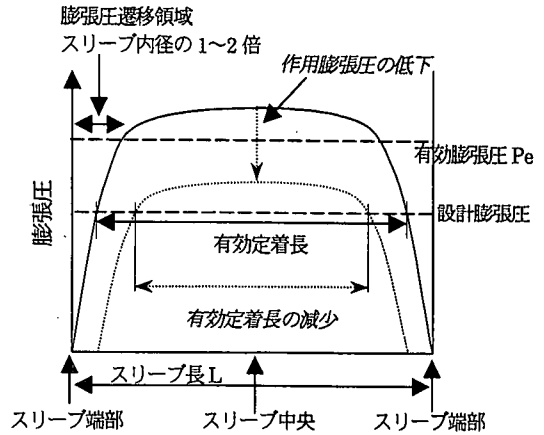


図-2 定着スリーブにおける膨張圧の軸方向分布

ていると筆者らはこれまでの研究結果³⁾から考えている。ここで、以下の議論を明確にするため、図-2を用いて用語を定義する。

- ・スリーブ長：鋼管スリーブの長さ。
- ・定着長：膨張材により緊張材を定着している長さ。定着用膨張材の打設初期では、図-2のスリーブ長に等しい。
- ・有効定着長：膨張材により緊張材を定着している長さであって、その膨張圧が設計膨張圧以上に達している範囲。
- ・膨張圧：鋼管スリーブに膨張材を充填し、膨張させると、鋼管スリーブ内面および連続繊維緊張材に等しい膨張圧が作用する。膨張圧のスリーブ長さ方向の分布は、図-2のように両端部で0となり、中央部に向かい漸増し、中央部では一定となる。議論を明確にするため、膨張圧は以下のように、設計膨張圧、有効膨張圧、作用膨張圧に区別して用いる。
- ・設計膨張圧：定着体の設計に必要な膨張圧。
- ・有効膨張圧：膨張圧はスリーブ端部で低下する。この低下を考慮し、スリーブ全体に作用する膨張圧の平均値を有効膨張圧とする。
- ・作用膨張圧：膨張圧はスリーブ端部を除いたスリーブの中央部分で一定値を示すが、この一定となった膨張圧を指す。

式(1)はスリーブ長Lを決め、有効膨張圧Peと引抜荷重Tの関係を求めたものである³⁾。この関係を用いると、有効膨張圧Peを設定し、緊張材の引抜荷重Tを与えれば、スリーブ長を推定する目安となる。作用膨張圧は経時変化するため、実際の設計では、ある材齢において確実に発現されると考えられる膨張圧を設計膨張圧として用いる。

スリーブ長さ方向の膨張圧分布を考えると、スリーブ端部からスリーブ内径の1~2倍の間では膨張圧が減少している。これは、スリーブ端部では一方向に拘束が

開放されているためである。すなわち、プレテンション方式 PC 部材の緊張材付着区間の端部で、プレストレスが漸減する現象に相当する。この定着端部での膨張圧の減少が、連続繊維緊張材の定着部の応力集中緩和に有効に働いていると考えられ、本定着法の特徴の一つである。

しかしながら、長期において、例えばスリーブ端部が被覆されていない場合には、定着用膨張材硬化体の組織が端部から中心部に向かい劣化が進行することで、図-2の破線で示すように有効定着長が変化してしまうことが懸念される。

ここでは、定着用膨張材の材料的劣化が上記のような問題を生じさせるかどうかについて以下に検討していく。

なお、内径 r_i については定着する緊張材の径と定着用膨張材を充填する寸法の要請から決まる。スリーブの肉厚 t については、鋼管に作用する膨張圧により塑性変形しないように鋼管強度を考慮して十分耐えうるものとする必要がある。本実験においても鋼管が降伏しない範囲で実験を行った。

作用膨張圧 p はスリーブ表面のひずみを用い、式(2)により与えられる⁹⁾。ここに、 E_s : 鋼管のヤング率、 ν : 鋼管のポアソン比、 k : 鋼管の外径/内径比、 ε_θ : 鋼管の周方向ひずみ、 ε_z : 鋼管の軸方向ひずみである。

$$p = \frac{E_s (k^2 - 1)}{2(1 - \nu^2)} (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z) \quad (2)$$

(2) 定着用膨張材の耐久性に影響を及ぼす因子

定着用膨張材を用いた定着体の長期安定性を考えた場合、緊張材に引張力を負荷した状態での定着力の長期における学的評価をおこなうことも必要である。しかし、2.

(1) で述べたように、定着用膨張材そのものの材料的耐久性を検討することも力学的評価の妥当性を裏付ける論拠として重要である。そこでここでは、図-3に示すような観点から検討を行うこととした。

まず、定着用膨張材の耐久性に影響を及ぼす因子を材料の化学反応機構から予測する。本検討で使用した定着用膨張材は生石灰 ($f\text{-CaO}$) を膨張成分とするもので、 $f\text{-CaO}$ が Ca(OH)_2 に反応することで膨張圧を生じる。定着用膨張材は $f\text{-CaO}$ が徐々に反応し続けることで長期(数年)に渡り膨張が継続する。

定着用膨張材硬化体中央部分は膨張に対する十分な拘束があり膨張圧を受けた条件で硬化するため緻密な組織をしている。しかし、スリーブ端部では開放状態に近く拘束が不十分で膨張が拘束されないため中央部分に比べて粗な組織をしていると考えられる。このスリーブ端部は膨張圧の遷移帯であり、不安定な状態にあると考えられる。例えば、外部から水が浸入するなどしてスリーブ

定着力の長期力学的評価 (本検討の範囲外)
材料の耐久性 (本検討の対象)

作用膨張圧の保持 -凍結融解

有効定着長の保持 -スリーブ端部の脆弱化

乾湿繰返しによる未反応 $f\text{-CaO}$ の反応

膨張成分 Ca(OH)_2 の中性化

凍結融解



促進試験：乾湿繰返し試験

中性化促進試験

凍結融解試験

屋外暴露試験

図-3 定着体の耐久性

端部のみで $f\text{-CaO}$ の反応率が高くなった場合には、スリーブ端部では拘束が不十分で組織の脆弱化による有効定着長減少の可能性があるため、本検討では特に着目した。

また、膨張が Ca(OH)_2 の生成によるため、生成した Ca(OH)_2 が中性化する場合には、膨張圧が低下し有効定着長が減少する可能性がある。既報によると、セメント硬化体構造は炭酸化により変化する可能性があり⁷⁾、 Ca(OH)_2 による膨張圧への炭酸化の影響は必ずしも明らかではないため、試験により、実際に変化するかどうかを確認した。

一方、定着体中心部の膨張材は外部環境との物質交換がない独立した条件にあり、端部からの物質移動による影響は少ないと考えられる。しかし、凍結融解により定着用膨張材硬化体の組織の変化が起こることやスリーブの伸縮により作用膨張圧が低下する可能性は考慮する必要があると考えられる。

2. (1) で述べたように、定着力は作用膨張圧の大きさとして、乾湿繰返し、中性化、凍結融解を取り上げ、それぞれの促進試験および屋外暴露試験を行った。

- ・乾湿繰返し試験：スリーブ端部における膨張材の膨張反応の促進(乾燥による微細ひび割れと水の再浸透による膨張反応促進を想定)に伴う、スリーブ端部の膨張材硬化体の脆弱化(有効定着長の減少)と作用膨張圧低下の検討

- ・中性化試験：反応生成物である Ca(OH)_2 の中性化によるスリーブ端部における膨張材の脆弱化(有効定着長の減少)とその中央部への進行、および作用膨張圧低下の検討

- ・凍結融解試験：凍結融解による作用膨張圧の低下およびスリーブ端部から浸入した水が引き起こす凍結融

表-1 定着用膨張材のキャラクター

	化学成分 (mass%)										ブレン比表面積 (cm ² /g)
	Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	計	f-CaO		
材料 A(低温用)	1.5	8.0	1.9	0.9	83.5	0.6	3.4	99.8	56.1	3040	
材料 B(常温用)	1.6	8.8	2.3	1.3	81.5	0.4	3.8	99.7	52.2	2010	

表-2 試験項目と測定内容

試験項目	膨張圧		はつり	中性化
	ひずみゲージ	応力開放法	深さ	深さ
標準養生	○	○		
乾湿繰返し	○	○	○	
中性化促進	○	○		○
凍結融解	○		○	
屋外暴露	○	○	○	

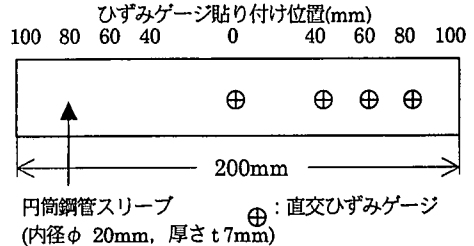


図-4 応力開放法による膨張圧測定位置

解によるスリーブ端部からの膨張材組織劣化による膨張材の脆弱化(有効定着長の減少)の検討
 ・暴露試験: 上記各種環境要因の複合的効果の実環境下での検討

なお、スリーブには鋼管を使用しているが、その材質の劣化が早期に生じるような環境条件は、ここでは対象としていない。いわゆる腐食性環境下では鋼管スリーブの代わりに耐食性の高い「ノンメタリックスリーブ」を用いればよく、その開発を筆者らは行い、力学的な面からは、鋼管スリーブを用いた場合の定着効率と同等であることを確認している^{9,10)}。したがって、ここでは膨張圧の測定の簡便さからも鋼管スリーブを用いたが、定着用膨張材の材料的な耐久性へのスリーブ自体の影響はないと考えている。塩化物イオンによる腐食性環境下では、現在、山形県の暮坪において暴露試験を実施しており、データがまとまれば稿を改めて報告する予定である。

3. 実験方法

(1) 使用材料

定着用膨張材として、マルチケーブル定着用¹¹⁾として市販されている2種類のものを使用した。表-1に2種類の定着用膨張材の化学組成、f-CaO量およびブレン比表面積を示す。

定着用膨張材は静的破砕剤をベースにしているため、周囲の温度の影響を著しく受け、温度が低くなると膨張圧発現が遅延する傾向にある。材料Bは常温での使用を前提に材料設計されている。材料Aは低温環境下での使用を前提に材料設計されており、化学成分およびブレン比表面積を調整することで、材料Bと同程度の時間で膨張圧を発現する。

定着用膨張材を充填するスリーブには、内径φ 20mm×長さL 200mm×厚さt 7mmの配管用炭素鋼管を使用した(図-4)。

(2) 試験体の作製

水粉体比を27%とし、定着用膨張材と水をホバートミキサにて1分間練り混ぜ、スリーブ中に充填した。その後、気温20℃、相対湿度90%の条件下にて1週間養生した。スリーブ両端開口部には、定着用膨張材の膨張がスリーブ長手方向に拘束されないため脆弱部分が生じた(図-1)。この脆弱部分をはつり器具(たがね)を用い、除去した。詳細は後述する。脆弱部を除去した後、端部からの物質移動の影響を考慮する目的で、試験体の半数にはエポキシ樹脂を用いシーリングを施した。なお、脆弱部分がシーリングの役割をする可能性もあるが、シーリングを施す場合に条件をそろえるため、および脆弱層を除去することは耐久性上厳しい側の評価となると考えられるため、全ての水準において脆弱層を除去した。その後、以下に示す5種類の条件下に暴露した。

(3) 耐久性試験

a) 標準試験

温度20℃相対湿度90%の恒温恒湿室内にて暴露した。

b) 乾湿繰返し試験

乾燥条件(温度20℃相対湿度60%)と湿潤条件(20℃水中浸漬)を1週間毎に繰返した。

c) 中性化促進試験

CO₂ガス濃度5%、温度20℃、相対湿度60%の中性化促進試験装置内にて暴露した。

d) 凍結融解試験

ASTM C666 A法に準じて、最低温度-18℃、最高温度5℃、1サイクル所用時間5.4時間の条件で300サイクル

まで試験を実施した。

e) 屋外暴露試験

太平洋セメント(株)佐倉研究所の屋上にて、遮蔽物がない条件で屋外暴露した。

試験期間は、凍結融解試験を除き、最長1年である。

(4) 耐久性の評価

a) ひずみゲージによる作用膨張圧の測定

定着用膨張材の膨張によるスリーブのひずみを、図-4の0mmの位置に、スリーブ長さ方向と周方向に直交して貼り付けた2枚のひずみゲージにより計測し、式(2)により、作用膨張圧 p を求めた。

b) 応力開放法による膨張圧分布の測定

ひずみゲージによる長期測定(数ヶ月以上)は、ひずみゲージを貼り付けている接着剤の劣化等により、必ずしも信頼性ある値が得られるとは限らない。このため、材齢1年の時点で、以下に示す応力開放法により膨張圧分布を測定した。応力開放法では、鋼管スリーブ中央部の相対する面の表裏に新たに、鋼管周方向と長手方向にひずみゲージを直交して貼り付け、この状態でひずみ値を初期化する。その後、スリーブ内の膨張材をコアカッターを用いてすべて除去し、その後24時間静置し、膨張圧によるひずみが開放された状態での鋼管のひずみ値を測定する。このひずみ値を用い、式(2)により膨張圧を計算して求めた。軸方向の膨張圧分布の測定を行うため、図-4に示すように、スリーブ中央、スリーブ中央から40mm、60mm、80mmの位置に直交ひずみゲージを貼り付け、試験を実施した。膨張ひずみの分布はスリーブ長さ方向に関して、中央に対対象であると考えられるため、ひずみゲージの貼り付けは、中心から一方の端部に向かって行った。

本測定は、凍結融解試験を除いた各試験で実施した。凍結融解試験は、膨張圧分布の変化よりも、主に中心部分での膨張圧レベルの変化に着目しており、その変化はひずみゲージで測定可能であるので、膨張圧分布を評価する本方法による測定は行わなかった。また、2次的な理由として本測定には多大な労力を要することもあり、水準を少なくする必要があった。

c) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量の測定

2. (2)でも述べたように、定着用膨張材は CaO が水和反応して生じる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成により膨張圧を発生する。生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量と作用膨張圧の間には高い相関関係が認められ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量に比例して作用膨張圧が増加することが報告されている⁹⁾。そこで、本検討においても生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量と作用膨張圧の関係を調べ、耐久性試験がこの関係にどのような影響を与えるかについて検討した。

材齢3, 6, 12ヶ月にてスリーブ内の定着用膨張材硬化

体をスリーブ中央部から取り出し、アセトン洗浄により水和停止させ、D乾燥(ドライアイスの凝固点、 -79°C での水蒸気分圧における乾燥)を行った試料について、熱重量分析により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の定量評価し、D乾燥後の定着用膨張材水和物に対する重量百分率を計算した。

d) 中性化深さの測定

材齢3, 6, 12ヶ月において、試験体を軸方向にコンクリートカッターを用い切断し中性化深さを評価した。切断面にフェノールフタレイン1%溶液を散布し変色が見られない領域の厚さを、試験開始時のはつり位置(後述)を基準に測定し、中性化深さとした。値は試験体両端部からの中性化深さの平均値とした。

e) はつり深さの測定

定着用膨張材は一般の膨張材と同様に、拘束がある条件では硬化し、硬化と共に膨張圧を発現する。しかし、拘束が無い場合や不十分な場合は、膨張により水和組織が破壊され、脆弱なものとなり膨張圧は発現しない。定着用膨張材を用いた定着体は前述のように端部が一方向に開放しているため、最端部では強固な硬化体は得られない(図-1)。逆に、十分に硬化している部分は、拘束体から反力を得て、膨張圧が作用していると考えられる。そこで、膨張圧が作用していない領域、つまり硬化が不十分な領域をはつることで定量評価しようと試みた。はつり深さの変化を測定することで、図-2に示したような耐久性試験による有効定着長の変化を評価することを目的とした。

はつり器具(たがね)により、人力にて定着用膨張材硬化体の除去が、その硬度のために困難となる位置まで5分間、はつりを行った。定着用膨張材を用いた定着体の端部では拘束が不十分なため、耐久性試験を実施する前においてもある程度、中心部に比較しやや脆弱な部分が存在する。この脆弱部分と、耐久性試験中に材料劣化や膨張反応の進行により生じた脆弱層を区別するため、すべての試験体において耐久性試験開始前に、はつり作業を行った。はつり深さの測定は、試験開始時のスリーブ端部から脆弱層を除去した位置(スリーブ端部から約5mm)を基準とし、その後の各種耐久性試験による脆弱層の生成について、この基準位置からさらにはつることができ深さ(スリーブ端部から5mmの位置からさらにはつることができた深さ)を求め、はつり深さとした。はつり深さの測定は、測定精度0.05mmのノギスを用い測定し、試験体両端部各々5点の平均値とした。

人力による硬化体除去作業であるため、測定値の信頼性評価が必要である。5本の定着用膨張材硬化体(材齢1週間)を異なる日に、はつり深さを測定した。その結果、平均値5.0mm、標準偏差0.20mmであった。このことからはつり深さ試験は $\pm 0.20\text{mm}$ 程度の精度の試験であると考えられる。

表-3 耐久性試験前後の作用膨張圧変化

シーリング	膨張圧 (材料A, MPa)				膨張圧 (材料B, MPa)			
	なし		あり		なし		あり	
材齢 (日)	7	365	7	365	7	365	7	365
標準試験	37	83	43	80	45	104	47	106
乾湿繰返し試験	36	*	39	*	42	*	48	*
中性化促進試験	37	81	47	80	45	93	47	98
凍結融解試験	53	72	48	76	55	74	51	78
屋外暴露試験	—	—	—	—	51	115	47	113

注) 材齢 7 日は耐久性試験開始時, 材齢 365 日は耐久性試験終了時, ただし凍結融解 365 日は 300 サイクル終了時を示す。*)測定中にゲージが接着不良となり測定を中断した。

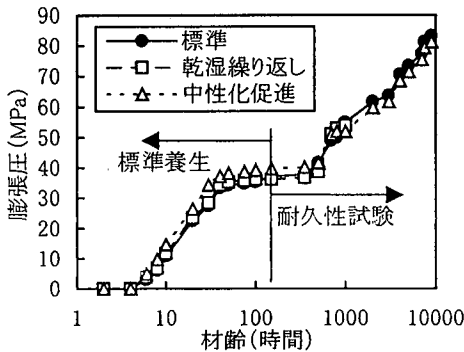


図-5 材料Aの膨張圧経時変化 (シーリングあり)

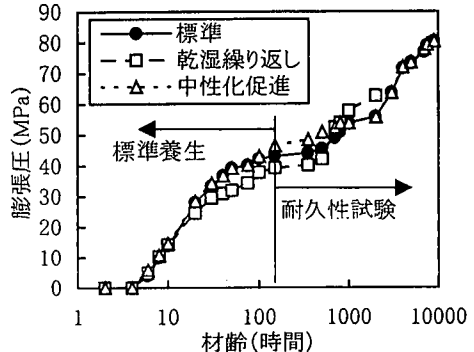


図-6 材料Aの膨張圧経時変化 (シーリングなし)

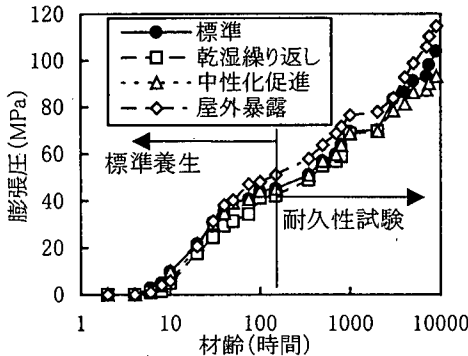


図-7 材料Bの膨張圧経時変化 (シーリングあり)

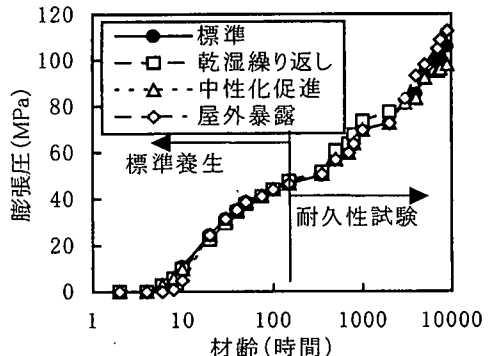


図-8 材料Bの膨張圧経時変化 (シーリングなし)

はつり深さの測定は、スリーブ端部からの膨張材の変化を想定しシーリングの効果調べることを目的としたため、乾湿繰返し、凍結融解、屋外暴露の各条件でのみ実施した。中性化促進試験では、中性化による端部からの膨張材の変化について、フェノールフタレインによる変色域の変化により捕らえることができるため、実施しなかった。

4. 実験結果と考察

(1) 膨張圧

a) ひずみゲージにより求めた作用膨張圧

表-3 に、各試験開始時である材齢 7 日と、試験終了時である材齢 365 日における作用膨張圧の値をまとめる。図-5 と図-6 に材料 A に関してシーリングがある場合とない場合の、標準、乾湿繰返し、中性化促進の各条件下で暴露した結果を示す。図-7 と図-8 には材料 B に関し

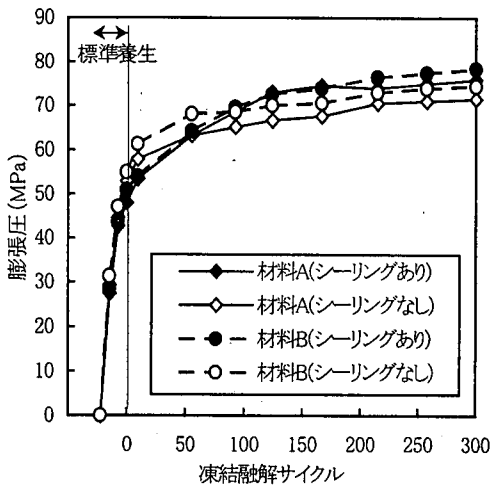


図-9 凍結融解試験による膨張圧変化

て各々シーリングがある場合とない場合の、標準、乾湿繰返し、中性化促進、屋外の条件下で暴露した結果を示す。材料AおよびBについて、凍結融解条件に暴露した結果を図-9に示す。作用膨張圧は、スリーブ中央部に貼り付けたひずみゲージにより評価したものである。

図-5から図-8に示したように、いずれの材料、シーリング条件および暴露条件においても、経時的に作用膨張圧は漸増した。標準条件では、材料Aはシーリングの有無によらず材齢12ヶ月で80~83MPa、材料Bはシーリングの有無によらず104~106MPaの作用膨張圧を示した。暴露条件の違いによる作用膨張圧の経時変化の違いについては、シーリングの有無によらず、いずれの促進試験や暴露試験においても標準養生とほぼ同様の作用膨張圧、材料Aで80~81MPa、材料Bで93~115MPaを示した。さらに、1年材齢においても作用膨張圧は上昇傾向にあった。

図-9によると凍結融解試験においても作用膨張圧の低下は認められず、時間の経過と共に漸増する結果となった。300サイクルにおける作用膨張圧は70~80MPaであるが、これは300サイクルが材齢1620時間(67.5日)であることを考慮すると、他の各試験での作用膨張圧の水準と大差ないと考えられる。

これらの結果から、スリーブ中央部で外部環境から遮断された条件にある膨張材は外部環境条件によらず一定の作用膨張圧を保持し、膨張反応は1年以上にわたり長期的に継続することが示された。

b) 応力開放法による膨張圧分布

材齢12ヶ月にて応力開放法により測定した膨張圧の軸方向分布を材料Aおよび材料Bに関して各々、図-10と図-11に示す。膨張圧の軸方向分布は材料の種類、シーリングの有無および暴露条件によらず、スリーブ中心から80mmではスリーブ端部が開放されていることの影

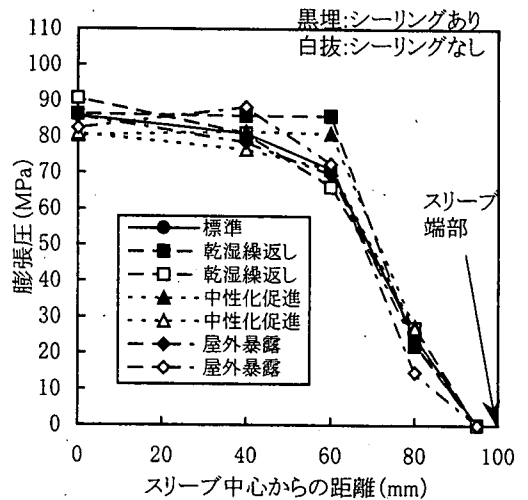


図-10 応力開放法による材料Aの軸方向の膨張圧分布

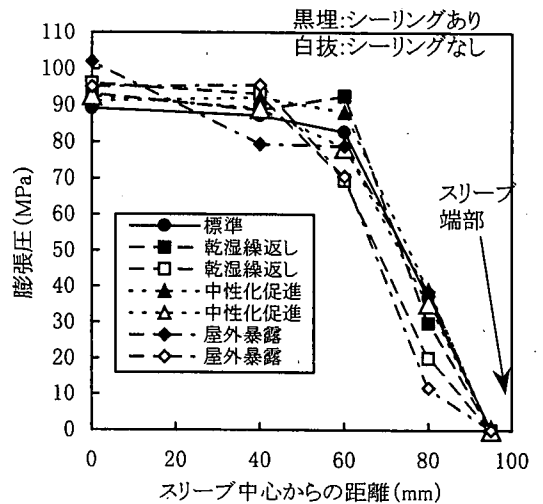


図-11 応力開放法による材料Bの軸方向の膨張圧分布

響を受け、0~60mm区間での膨張圧の1/4程度となったが、スリーブ端部からスリーブ内径の約2倍以上内部の0~60mm区間にかけてはほぼ一定の膨張圧となったことが分かる。

スリーブ中心部の作用膨張圧は、暴露条件によらず材料Aで85±5MPa、材料Bで95±6MPaの範囲であった。この値は、ひずみゲージによる各々の材料の標準条件での作用膨張圧、80~83MPaおよび104~106MPaと近い値である。これらの結果から、スリーブ中心部では外部環境条件により作用膨張圧は影響を受けないことが確認できた。

一方、スリーブ中心部から80mmにおいては標準養生に比較し、シーリングを施さない場合には乾湿繰返しと屋外暴露により、低い膨張圧を示した。スリーブ端部に

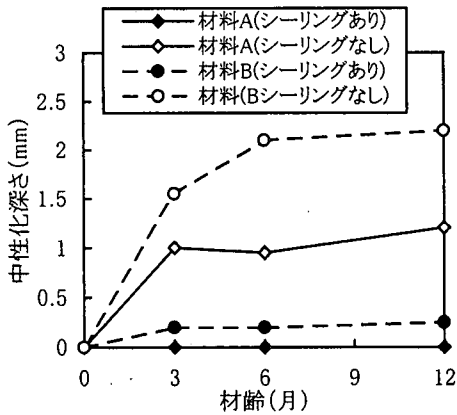


図-12 中性化深さ

おいては、シーリングのない場合には外部からの水の供給により膨張反応が進行したが、拘束条件が不十分であるため、後述するように端部から膨張材の脆弱化が進み、膨張圧が低下したものと推定できる。

(2) 中性化深さ

中性化促進試験における、材料 A および B の中性化深さの測定結果をそれぞれ図-12 に示す。材齢 12 ヶ月でシーリングを施さない場合の中性化深さを比較すると、材料 A で 1.2mm、材料 B で 2.2mm であり、材料 B では中性化がより進行しやすい傾向となった。しかし、その絶対値はスリーブ長さと比較すると小さく、材齢が進むに従い飽和傾向にある。さらに、シーリングを施した試験体については、最大でも 0.3mm と中性化の進行はほとんど認められなかった。

本測定結果を基に、魚本と高田による推定式¹²⁾、式(3)により 50 年経過時の中性化深さを推定する。この式はコンクリートに適用することを前提にしている。定着用膨張材においても硬化体中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は多いものの、硬化体組織はセメントペーストと同様であり、中性化は硬化体中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が炭酸化することにより起きる。定着用膨張材は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成による膨張圧を硬化過程で常に受けている。また、膨張材硬化体は、長期にわたり水和反応が進行するため、緻密な組織をしており⁹⁾、骨材を含まずコンクリートで見られるような遷移帯も存在しないと考えられる。したがって、このコンクリートに適用される式を用いた中性化深さの推定は、膨張材硬化体の中性化深さを過大に見積もる可能性があると考えられ、評価としては安全側になると考えられる。

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) \cdot e^{(8.748 - 2563/T)} \times (2.94WC - 101.2) \times 10^{-2} \times \sqrt{C \cdot t} \quad (3)$$

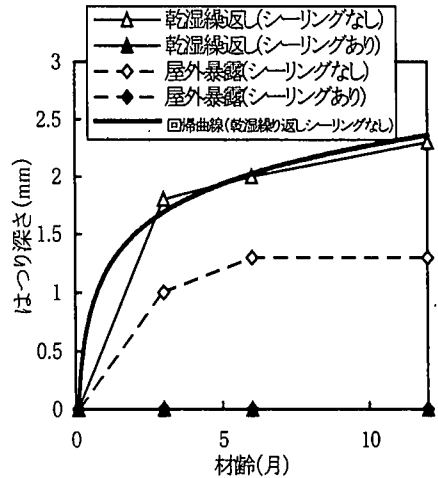


図-13 材料 A のはつり深さ

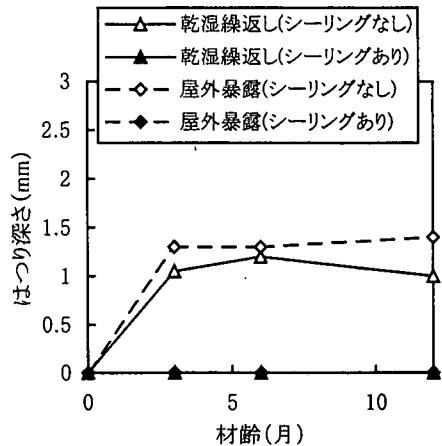


図-14 材料 B のはつり深さ

ここに、X: 中性化深さ (mm)、C: 炭酸ガス濃度 (%), T: 絶対温度 (K)、WC: 水セメント比 (%), t: 経過時間 (週) を示す。促進試験条件: $C=5.0\%$, $t=52$ 週、および屋外暴露条件: $C=0.0351\%$, $t=50$ 年とを比較すると屋外暴露では中性化深さは促進試験の 1.08 倍となる。よってシーリングがない場合、中性化深さは最大で 2.4mm、シーリングがある場合は 0.34mm 程度になると予想できる。

(3) はつり深さ

乾湿繰返しと屋外暴露による、材料 A および B のはつり深さの測定結果を各々図-13 と図-14 に示す。凍結融解における結果を図-15 に示す。はつり深さは繰返し再現精度が前述のように $\pm 0.20\text{mm}$ であったので、本結果は有意な数値となっていると考えられる。はつり深さは、材料、シーリングの有無および暴露条件により異なったが、その値は最大でも 2.7mm であり、中性化促進試験の

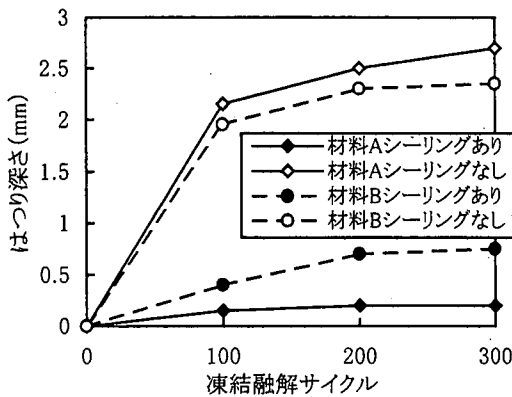


図-15 凍結融解試験におけるはつり深さ

場合と同じように材齢の進行と共に飽和する傾向にあった。図-10、図-11に示したように膨張率はスリーブ中心から60~100mmの範囲で小さくなっていた。膨張圧が作用している領域では組織は緻密になっていると考えられ、はつることができた領域は、膨張圧が減少している領域40mmに比べると端部のごく限られた範囲であった。

細かく比較すると、シーリングの影響がもっとも大きく、材齢12ヶ月ではシーリングしたものでは、材料と暴露条件により異なるが、はつり深さは0~0.8mmであった。しかし、シーリングのないものでは1.1~2.7mmとなった。材料および暴露条件の影響については試験誤差の方が大きく明確な傾向は得られなかった。

(4) 各暴露条件と作用膨張圧の安定性

以上の検討では、作用膨張圧の低下と端部からの物質移動による有効定着長の減少の二点から、検討を加えてきた。

ひずみゲージによる作用膨張圧の測定は長期材齢について信頼性が乏しくなる可能性も考えられた。しかし、応力開放法と比較し1年材齢でほぼ同じ膨張圧を示したため、試験の範囲では信頼できる値を示していると考えられる。

スリーブ中央部における作用膨張圧の経時変化は乾湿繰返し、中性化促進、凍結融解、屋外暴露のいずれの試験においても、標準試験と同様の傾向を示し、試験期間中漸増傾向にあり、低下の傾向は認められなかった(図-5、図-6、図-7、図-8、図-9)。一方、シーリングがない場合で、屋外暴露や乾湿繰返しなど水の供給がある場合には、スリーブ端部近くでは膨張圧の低下が認められた(図-10、図-11)。

これらの結果は、膨張材がスリーブ中央部のように外部環境と物質交換をしないような隔離された条件にあれば、作用膨張圧は温度変化の影響を受けて変動することなく、むしろ徐々に膨張成分であるf-CaOの水和が進行

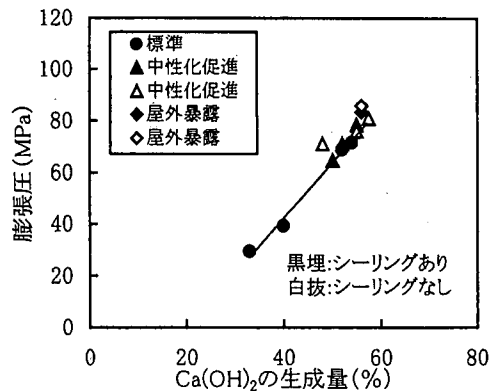


図-16 材料AのCa(OH)₂生成量と作用膨張圧の関係

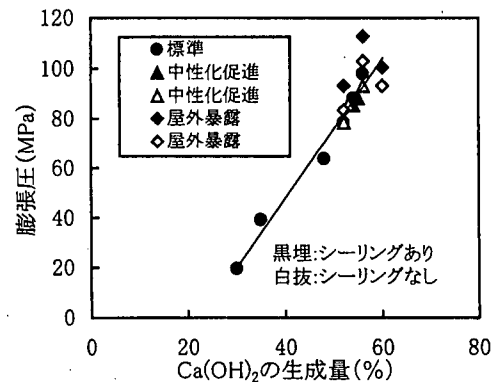


図-17 材料BのCa(OH)₂生成量と作用膨張圧の関係

することで漸増し、長期的にも安定していることを示すものと考えられる。

中性化促進試験において重要な点は中性化深さそのものではなく、図-10および図-11に示したように、本試験の結果からは、中性化は膨張圧分布に影響を及ぼさないことである。中性化は長期的には端面から2.4mm程度まで進行する可能性があるが、スリーブ長200mmと比較すると膨張材硬化体のほとんどの部分は長期的にも中性化しないと考えられることもあり、中性化による作用膨張圧の低下は起こらないと予想できる。したがって、中性化による作用膨張圧の低下をスリーブ長決定時には考慮する必要はないと考えられる。

凍結融解試験においては、余剰水の凍結融解により定着用膨張材硬化体の組織の変化が起り、作用膨張圧の低下が懸念された。しかし、試験範囲の300サイクルまで作用膨張圧は増加傾向であり、作用膨張圧は凍結融解作用により大きな影響は受けなかった(図-9)。

材料AとBのCa(OH)₂生成量と作用膨張圧の関係を各々図-16と図-17に示す。図にはそれぞれ、別途、標準養生した試験体を用いて作成したCa(OH)₂生成量と作用膨張圧の関係も示した。図に示した範囲では、材料毎に、

Ca(OH)₂ 生成量と作用膨張圧の関係には直線関係がある。中性化促進条件と屋外暴露条件においても、Ca(OH)₂ 生成量とスリーブ中心部における作用膨張圧の関係は標準養生による試験体により材料毎に求められた関係とほぼ一致した。もし、定着用膨張材硬化体の組織が外的要因により変化したとするならば、一定 Ca(OH)₂ 生成量であっても作用膨張圧は低くなるものと予想できる。しかし、測定範囲では標準養生による関係を外れるものではなく、この結果からも、定着用膨張材硬化体への暴露環境の影響は、膨張材が外部環境から独立し、物質の交換がない場合には、無視できる範囲のものであると考えられる。

膨張圧の低下が起きるとすれば、2(2)節で述べたように、スリーブ端部から水が浸入し、残存していた膨張材の拘束が、不十分な条件で反応し、硬化体組織の脆弱化する可能性が考えられる。図-10、図-11の結果から、膨張圧は端部からスリーブ内径(20mm)の2倍程度の領域(40mm)で中心部に向かい漸増する領域が認められた。乾湿繰返し試験と屋外暴露試験においては、シーリングがない場合に、膨張圧が遷移する領域がスリーブ中心に向かい5mm程度移動した。スリーブ端部では、シーリングがない場合には、膨張材硬化体に外部から水分が補給され、未水和のCaOが反応している可能性も考えられるが、応力開放法によればその影響はスリーブ端部の限られた範囲であり、中心部の作用膨張圧には影響を及ぼしていない。

以上より、試験の範囲ではいずれの暴露条件においても、作用膨張圧の経時変化は暴露環境の影響を受けず、試験の範囲では微増から飽和の傾向を示した。作用膨張圧の経時変化挙動と各種環境要因の作用機構から考えて、長期的にも全体的な作用膨張圧は安定した値を示すものと予想できる。

(5) 暴露条件の有効定着長におよぼす影響

3. (4) e) において述べたように、はつり深さの測定は、定着用膨張材硬化体の材料としての安定性が損なわれ、スリーブ端部から定着用膨張材硬化体が脆弱化することにより、有効定着長が減少することで定着力への影響が現れることを想定して行ったものである(図-2)。

はつり深さが最大となったのは、シーリングをしない材料Aに関する凍結融解試験300サイクルで2.7mmであった。しかし、シーリングを施すことでこの値は0.8mmになる。

その他の暴露条件ではつり深さが最大となったのは、シーリングしていない材料Aを乾湿繰返しした場合であった。この場合について、はつり深さの材齢依存性を対数近似し、回帰式を求めると式(4)のようになる。図-13に回帰線を示す。

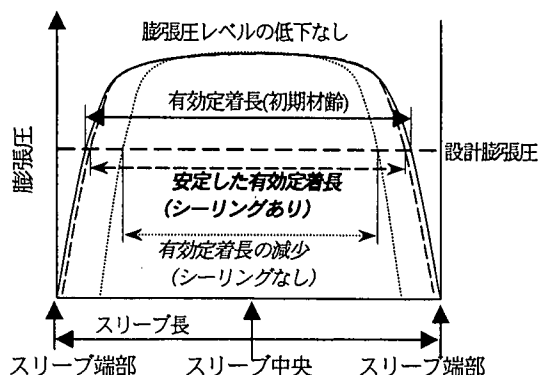


図-18 膨張圧の長期的変化の概念図

$$y = 1.066 + 0.407 \ln x \quad (4)$$

ここに、y: はつり深さ (mm), x: 材齢 (月) である。式(4)より、材齢50年ではつり深さを求めると3.7mmとなる。しかし、材齢1年のデータからの推定であるため、大きな誤差が予想される。

定着長の減少を考慮し、長期にわたり耐久的な定着を実現するには、スリーブを長くするか、シーリングを施すことが必要である。経験的には、スリーブ長さを長くするよりもシーリングを施すほうが施工上は容易である。また、シーリングを施すことで、スリーブ長200mmと比較すると実質的にはつり深さは無視できるので、現実の施工では試験誤差の不確かさの点からもシーリングを施すことが有効であると考えられる。

中性化については、スリーブ端部から中性化は進行していたが、中性化が膨張圧分布には影響を及ぼしていなかったため、有効定着長に及ぼす影響は考慮する必要はないと考えられる。また、シーリングにより長期的にも中性化を1mm以下に抑制できることが分かった。

はつり深さの点では、凍結融解による効果と屋外暴露による効果をあわせて、シーリングがない場合には6.4mm程度(材料Aの凍結融解300サイクルによる2.7mmと乾湿繰返し50年の予測値3.7mmの合計)、シーリングがある場合は0.8mm程度の有効定着長の減少を見込む必要がある。ただし、暴露期間1年間のデータしかないため、この数値には大きな誤差があるものと考えられる。

実際の施工にはシーリングを施し、定着用膨張材と外部環境との水のやりとりを防ぐことが重要である。シーリングをすることで、試験の範囲ではつり深さに影響を及ぼすのは凍結融解のみであるので、1mm程度の有効定着長の減少を見込めばよいと考えられる。

(6) 各暴露条件がスリーブの設計に及ぼす影響

以上の検討結果を基に、スリーブに作用する作用膨張圧の長期変化の概念図を図-18に示す。作用膨張圧の全体的レベルはどの耐久性試験によっても一定で低下せず、逆に漸増傾向にあった。膨張圧の分布についてはスリーブ端部からの定着用膨張材の脆弱化により狭くなる。この減少量はシーリングにより大幅に小さくできる。

2章で述べたように、スリーブ長は、式(1)により計算されるが、この計算式はスリーブ端部の膨張圧の減少を含んだ実験式であり、設計膨張圧は充填後2~3日で発現する50MPaを基準に考えている。本実験結果から、各暴露条件下での材齢12ヶ月によける作用膨張圧は80~100MPaであり、前述のように長期的に作用膨張圧は減少することなく漸増傾向にあるので、作用膨張圧の大きさの観点からは設計上問題とはならない。ただし、スリーブ径の設計に関しては、2(1)で述べたように行うが、設計膨張圧を用いてスリーブの肉厚を決定することは、実際の作用膨張圧が設計膨張圧の60~100%増になるため、問題となる可能性がある。鋼管が塑性変形しても剛性が急激に低下するわけではないので定着力に影響が出るかどうか不明確であるが、スリーブの肉厚の設計に用いる作用膨張圧を設計膨張圧の100%増程度に見積もっておけば、安全側となり、設計上は問題とならない。

次に、有効定着長の安定性について考察する。各種暴露条件の中ではつり深さがもっとも大きくなったシーリングなしの材料Aの凍結融解と乾湿繰返しによるつり深さの合計について考慮する。前述のように、凍結融解300サイクルでは2.7mm、乾湿繰返しの50年材齢予測値3.7mmを合計すると6.4mmとなる。式(1)で考えている定着長は中心部から端部の長さであるので、つり深さが膨張材を充填するスリーブ径によらないとすると、シーリングをしない場合には、膨張材のスリーブ端部での脆弱化によるつり深さの増大による有効定着長の減少を $6.4/(L/2)=12.8/L$ だけ見込むことが必要と考えられる。スリーブ長が200mmの場合を考えると、6.4%の定着長の減少を見込む必要が生じる。

しかし、スリーブ端部をシーリングすることで、この値は $0.8/(L/2)=1.6/L$ となり、スリーブ長が200mmの場合には0.8%の有効定着長の減少を見込めばよいことになる。前述のように現実の発生する作用膨張圧は設計値50MPaの60%以上高い値が得られるので、有効定着長の0.8%程度の減少は、現実の施工では無視し得る値であると考えられる。

以上より、定着用膨張材を用いた定着体に関して、定着用膨張材硬化体の材料面での耐久性を検討した結果、試験の範囲では、作用膨張圧そのものは長期的に安定であること、膨張材充填端面にシーリングを施すことで材料のスリーブ端部からの脆弱化による有効定着長減少も

防ぐことができることが分かった。以上の結果から考えると、定着スリーブの設計において定着用膨張材の耐久性を考慮する必要があるとは言えなかった。本検討から、定着用膨張材を用いた連続繊維定着体が長期にわたり完全に安定であるとは断言できないが、検討した促進試験からは安定であると推察される。さらに長期間にわたる挙動については、実施工体寸法の試験体や実施工体に関するデータ収集により継続し、検証していく予定である。

5. 結論

定着用膨張材を連続繊維補強材の定着材として一般構造物に適用することを目的に、①定着力の長期確保の観点から、各種暴露条件下における定着用膨張材の作用膨張圧そのものの変化、および②定着長に関する定着用膨張材硬化体の安定性の観点から、応力開放法による膨張圧分布の変化、はつり深さおよび中性化深さにより検討した。その結果に基づき、定着力を長期的に確保するために、定着スリーブ設計上の配慮が必要かどうかを判断した。

(1) 乾湿繰返し、中性化、凍結融解、屋外暴露の各条件下での試験結果によると、いずれも標準養生と作用膨張圧自体に有為な差違は認められなかった。作用膨張圧は経時的に増加から飽和の傾向にあり、材齢12ヶ月において材料Aは80~83MPa、材料Bは93~115MPaの作用膨張圧を発現しており、定着スリーブの設計に用いられる設計膨張圧50MPaを十分に確保していた。また、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量と作用膨張圧の関係においても、標準養生による結果との有意な差はなく、定着用膨張材の硬化体組織への影響はないものと判断できた。以上の結果から、少なくとも実験の範囲では、作用膨張圧は安定しており、長期的にも安定していると推定される。

(2) 各種暴露条件が定着用膨張材硬化体のはつり深さに及ぼす影響は、材齢50年を考慮すると、シーリングがない場合には本検討ではスリーブ長Lに対して $12.8/L$ を見積もる必要があった。しかし、この値はスリーブ端部にシーリングを施すことで、 $1.6/L$ 程度に抑制でき、現実の施工体を考えた場合にはその影響はスリーブ長の1%以下程度であり、無視できるレベルと考えられる。

(3) 中性化促進試験によると、定着用膨張材硬化体の中性化深さは、シーリングがない場合で材齢50年の推定値で2.4mmであり、シーリングにより0.34mmに減少する。しかしながら、中性化が作用膨張圧および膨張圧分布におよぼす影響はなく、長期間にわたる使用上も問題ないと考えられる。

(4) 各種暴露条件においても作用膨張圧の低下は認められず、定着用膨張材硬化体のスリーブ端部からの脆弱

化による有効定着長の減少に関しても、施工体寸法を考慮すると無視し得るものであり、さらにスリーブ端部にシーリングを施すことではつり深さおよび中性化深さの進行を有効に抑制できる。定着スリーブ設計上は定着用膨張材の長期安定性を特別考慮することなく、定着用膨張材を用いた連続繊維補強材定着体が PC 構造物の定着具として十分に使用できるものであることが確認できた。

謝辞：実験の実施に当たり、(株)小野田 細野克夫氏、上林真幸氏、太平洋セメント(株)林浩志氏に協力を得た。ここに記して謝意を表する。

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, プレストレストコンクリート技術協会, pp.251-256, 1990.
- 2) Harada, T., Idemitsu, T., Watanabe, A., Khin, Myo and Soeda, K.: New FRP Tendon Anchorage System Using Highly Expansive Material for Anchoring, *FIP Symposium'93 Modern Prestressing Techniques and Their Applications, Kyoto, Proceedings* Vol. II, pp.711-718, 1993.
- 3) 原田哲夫, 出光 隆, Myo Khin, 副田孝一, 渡辺 明: 定着用膨張材による連続繊維緊張材の定着法に関する研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.77-90, 1999.
- 4) 渡辺康行, 菊地秀二, 長橋弘和, 中島規道: 中間定着工法の開発とその施工, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.3, pp.26-30, 1998.
- 5) 副田孝一: 生石灰の水和膨張を利用した静的破砕材の開発およびその応用に関する研究, 九州工業大学博士論文, 1994.
- 6) 原田哲夫, 出光隆, 渡辺明: 静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.360/V-3, pp.61-70, 1985.
- 7) 小林一輔: コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.1-14, 1991.
- 8) Harada, T, Matsuda, H., Khin, M., Tokumitsu, S., Enomoto, S. and Idemitsu, T.: Development of Non-Metallic Anchoring Devices for FRP Tendons, Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2)*, E&FN SPON, pp.41-48, 1995.
- 9) Harada, T., Soeda, M., Enomoto, T., Tokumitsu, S., Khin, M. and Idemitsu, T.: Behavior of Anchorage for FRP Tendons Using Highly Expansive Material Under Cyclic Loading, Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of the Third International Symposium (FRPRCS-3)*, Vol.2, pp.719-726, Japan Concrete Institute, 1997.
- 10) 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, Vol.15, No.2, pp.853-858, 1993.
- 11) 副田孝一, 原田哲夫, 上林真幸, 細野克夫: FRP 緊張材マルチケーブル用としての定着用膨張材の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp.1011-1016, 1993.
- 12) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.119-128, 1992.

(1999. 2. 5 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DURABILITY OF HIGHLY EXPANSIVE MATERIAL FOR ANCHORAGE IN HIGH PRESSURE CONDITIONS

Kazuo YAMADA, Tetsuo HARADA, Takashi IDEMITSU, Koichi SOEDA and Myo KHIN

The durability of highly expansive material for anchoring of continuous fiber reinforcement, FRP tendons, was investigated from the stand point of material by using accelerating tests and an exposure test, in which the highly expansive material was filled in a steel sleeve and attained expansive pressure. During the carried out tests, i.e. wet-dry, accelerated neutralization, freeze-thawing and exposure in out-door condition, the expansive pressure increased with time, similar to the standard curing condition and reach up to 80 MPa within one year. The degradation of expansive material was observed from the end of the steel sleeve. However, the epoxy sealing can protect the ends. The reduction of effective fixing length was less than 1.0% in the case of the sleeve length longer than 200mm and was considered to be negligible. It became clear that the anchoring system with highly expansive material was stable for a long term.