

冬期施工における高強度繊維補強工法の 接着効果管理手法に関する一提案

室蘭開発建設部 日高道路事務所 ○竹内 英嗣
黄瀬 雅巳
伊東 行光

冬期施工におけるコンクリート構造物の耐震補強や劣化補修では、高強度繊維補強工法が導入されているが、厳しい寒冷地気候の環境下で接着剤となる樹脂の接着効果確認管理が課題となっている。本研究では、高強度繊維補強工法における接着剤樹脂の硬化特性を把握するためポータブル硬度計と付着強度試験による室内試験を実施し、接着効果確認への適用性について検討を行った。その結果、接着剤樹脂は 24 時間で基準付着強度 $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の強度発現が認められ、硬度と付着強度の関係では分布領域に相関を見出すことができた。このことから、ポータブル硬度計による接着効果確認の可能性が高いことが分かった。また、本試験は、一定温度条件で実施していることから、今後、実現場での実証試験が必要と考える。

キーワード：炭素繊維シート、エポキシ樹脂、アクリル樹脂、硬度計貫入試験、付着強度試験

1. はじめに

当事務所管内では、構造物の耐震補強や劣化補修のために高強度繊維補強工法が導入されている。本工法では、高強度繊維に樹脂系接着剤を含浸させ構造物本体と緊密に接着させるものであるが、冬期間施工では低温下における接着効果確認が難しく、施工管理や品質管理に課題が多い。（写真-1 参照）

このことから、施工管理のコスト縮減や省力化を図り、さらに構造物の品質向上・技術力向上を目的として、接着効果管理手法に係る検討を事務所の監督職員で行うことにした。

以上から、本研究では、含浸接着樹脂の硬化確認のためポータブル硬度計による針貫入試験と接着効果確認のための付着強度試験を実施し、その相関性を検討するとともに、施工管理手法への適用性について検討した。



写真-1 高強度繊維補強工法の冬期施工状況

2. 供試体の製作について

図-1 に供試体の断面形状を、写真-2 に実験に用いた供試体モデルを示す。

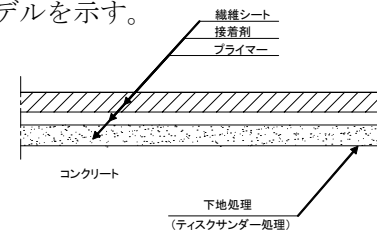


図-1 供試体断面図

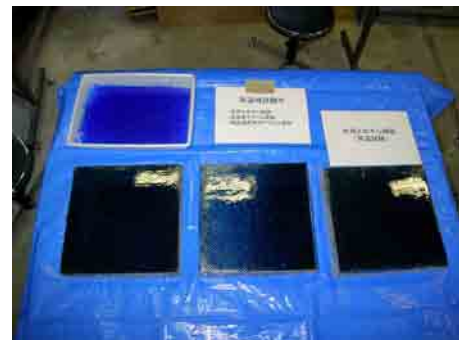


写真-2 供試体モデル（冬用エポキシ樹脂）

(1) 供試体の母材

供試体の母材は、モルタル平板（JIS A 5304）とした。モルタル平板のサイズは、 $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 6\text{cm}$ である。モルタル平板の品質特性を表-1 に示す。

表-1 モルタル平板の品質

種類	縦	横	厚さ
普通平板	300	300	60
曲げ強さ荷重	12KN		
曲げ強度	4.0N/mm ²		

(2) 高強度繊維シートの種類と性能

高強度繊維シートは、実際の現場で使用している炭素繊維を用いた。炭素繊維の性能を表-2に示す。

表-2 炭素繊維シートの性能

種類	品番	繊維目付 (g/m ²)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)
炭素繊維(高強度)	FTS-C1-30	300	0.167	3400	2.45×10 ⁵

(3) 含浸接着樹脂の選定と性状

含浸接着樹脂は、冬期施工現場状況を勘案し3種類選定した。表-3に選定樹脂材と実際の施工環境条件を示す。

表-3 含浸接着樹脂と施工環境一覧

含浸接着樹脂	施工環境条件	施工気温
冬用エポキシ樹脂	防寒養生状態	5~10℃
低温アクリル樹脂	冬期現場での平均気温	-9℃(平均気温)
極低温アクリル樹脂	冬期現場における最低気温	-14℃(最低気温)

表-4に各樹脂の性状を示す。

表-4 各樹脂の性状

含浸接着樹脂	使用材料	適用温度 (℃)	可使用時間 (分)	乾燥時間 (時間)	混合比(重量比) 主剤:硬化剤:促進剤
冬用エポキシ樹脂	FR-E3P(冬用)	5~15	27	11	2:1:0
低温アクリル樹脂	FR-RMM(W)	-5~10	30	3	100:8.0:1.5
極低温アクリル樹脂	FR-RMM(W)	-10~-15	30	3	100:8.0:2.0

表-5に各樹脂の硬化物特性を示す。

表-5 樹脂の硬化物特性

項目	物性値
引張強度	30N/mm ² 以上
曲げ強度	40N/mm ² 以上
引張剪断強度	10N/mm ² 以上
コンクリート付着強度	1.5N/mm ² 以上

(4) 供試体の製作

供試体は、実際の施工現場で施される手順に従って製作した。

施工手順は、①モルタル平板をサンダーにより平滑にする、②プライマー施工、③必要に応じてパテ処理、④含浸接着樹脂塗布(下塗り)、⑤炭素繊維シート貼り付け、⑥含浸接着樹脂塗布(上塗り)⑦養生である。

①~③の下地処理施工は、含浸接着樹脂の接着性能を改良するために行われ、現場温度条件で供試体製作を実施することが望ましいが、本試験結果を多くの現場に適用させるためには、接着性能を一定条件とする必要がある。したがって、常温環境下で施工を実施し、供試体下地処理品質を一定のものとした。施工時温度は、12~15℃である。

④~⑥の炭素繊維貼付施工は、含浸接着樹脂の可使用時間が短いことから実験室内で施工を行った。施工時温度は、5~10℃である。含浸接着樹脂の施工では、実現場施工における表面仕上げと同等となるよう、ワックス材を3%添加した。

出来上がった供試体は、速やかに低温試験室内で養生した。

また、硬度計の貫入試験にあたり、炭素繊維の硬化影響が懸念されることから、含浸接着樹脂のみを大型トレイに入れ樹脂供試体とした。

写真-3~4に施工状況を示す。



写真-3 下地処理施工状況

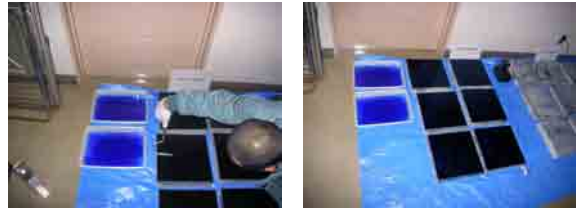


写真-4 炭素繊維貼付施工状況

(5) 養生

各供試体は常温・低温試験室で養生した。表-6に養生条件を示す。

表-6 養生条件一覧

養生ケース	現場対応条件	冬用エポキシ樹脂	低温用アクリル樹脂	極低温用変性アクリル樹脂	試験場所
CASE1	常温時(+5~10℃) 常温時・防寒養生時を想定	●	●	●	材料試験室内
CASE2	低温時(-5℃): 低温時-9℃	●	●	●	大型冷蔵試験室内
CASE3	極低温時(-15℃) 現場屋外気温時		●	●	小型冷蔵試験室内

写真-5~7に養生状況を示す。



写真-5 常温養生 (5~10℃) の状況



写真-6 低温養生 (-5℃) の状況



写真-7 極低温養生 (-15℃) の状況



3. 実験概要

モルタル平板に炭素繊維シート1層貼り付けた供試体を常温室及び低温試験室で養生し、各含浸接着樹脂の経時硬度及びコンリート付着強度をポータブル硬度計による針貫入試験と建研式引張試験器による付着強度試験により確認した。

(1) 養生期間と試験回数

- 各供試体の養生期間：24時間・3日・12日
- ポータブル硬度計貫入試験：
 - モルタル平板供試体 10回/1ケース
 - 樹脂供試体 10回/1ケース
- 付着強度試験：
 - モルタル平板供試体 5回/1ケース

(2) 試験ケース

試験ケースを表-7に示す。

表-7 試験ケース一覧

試験ケース	養生温度	養生期間	冬用エポキシ樹脂	低温アクリル樹脂	極低温アクリル樹脂
ケース1	常温	24時間	●	●	●
		3日	●	●	●
		12日	●	●	●
ケース2	低温(-5℃)	24時間	●	●	●
		3日	●	●	●
		12日	●	●	●
ケース3	極低温(-15℃)	24時間	—	●	●
		3日	—	●	●
		12日	—	●	●

(3) ポータブル硬度計貫入試験

ポータブル硬度計は、押し込み法によるデュロメータを使用した。硬度計に作用させる荷重は、人力荷重であればバラツキが生じるため、3kgの重錘により载荷した。表-8に性能諸元を示す。

表-8 ポータブル硬度計の諸元一覧

硬度計	タイプ	スプリング荷重値(0-100目盛)	測定子(mm)形状/高さ
デュロメータ	Dタイプ	0-44450mN(0-4533gf)	先端R0.1 30°円錐形/2.50

写真-8に硬度計と重錘の形状を示す。



写真-8 使用した硬度計と重錘

写真-9に試験状況を示す。



写真-9 ポータブル硬度計貫入試験状況

(4) 付着強度試験

付着強度試験は、建研式引張試験器を使用した。

表-9に試験器の諸元を示す。

表-9 建研式引張試験器の諸元一覧

試験器	タイプ	最大荷重	最小表示	接着板サイズ
小型接着剥離試験機	BA-450D	10kN	0.01kN	4×4cm

付着強度試験にあたり、事前にアタッチメント(接着板)を接着し、コンクリートカッターで切り込みを入れる作業を実施した。アタッチメントのサイズは、4cm×4cm(1600mm²)である。写真-10にアタッチメント施工状況を、写真-11に付着強度試験状況を示す。



アタッチメント取り付け 切り込み施工
写真-10 アタッチメント取り付け状況



写真-11 付着強度試験

4. 試験結果

(1) 各供試体の養生結果

冬用エポキシ樹脂は、常温養生における24時間経過後に、指触判定で硬化が確認された。一方、 -5°C 養生では、24時間～12日間で硬化は認められなかった。これは、冬用エポキシ樹脂の適用温度条件が $5^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ であり、何らかの硬化剤や硬化促進剤を混入しなければマイナス下の低温条件では使えないものとする。なお、常温試験は、 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ の環境下で実施した。

写真-12に24時間養生 (-5°C)、写真-13に3日養生 (-5°C) 結果を示す。



写真-12 冬用エポキシ樹脂 (-5°C) 24時間後未硬化



写真-13 冬用エポキシ樹脂 (-5°C) 3日後未硬化

低温アクリル樹脂及び極低温変性アクリル樹脂は、常温、 -5°C 、 -15°C の養生で、24時間経過後における指触判定で硬化が確認された。低温アクリル樹脂の適用温度条件は $-5^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ であるが、 -15°C の温度環境でも硬化性能を保持していることが分かった。

(2) ポータブル硬度計貫入試験結果

物体の硬度を計測する手法は、「押し込み法」・「引っかかり法」・「はね返り法」などがある。本試験では、一般的にプラスチックの硬度を計測する「押し込み法」を採用した。硬度計は、樹脂用硬さ測定に使用されているデュロメータを用いた。デュロメータの原理は、押針と荷重スプリングが連結されており、押針先端が加圧面と同一平面の時「硬度 100」を示し、押針突出高さが最大の時「硬度 0」を示す。

図-2に硬度測定の様子を示す。

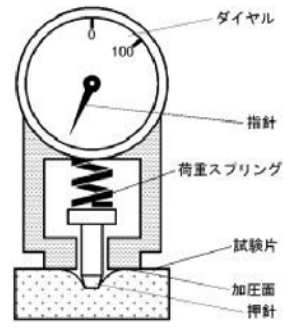


図-2 デュロメータの測定の仕組み

硬度測定値は、物体毎の相対比較値として硬さを数値化したものであることから、タイプの違う測定機器や測定法と比較ができない特性がある。したがって、本試験結果は、「タイプDデュロメータ」による硬度として取り扱う。

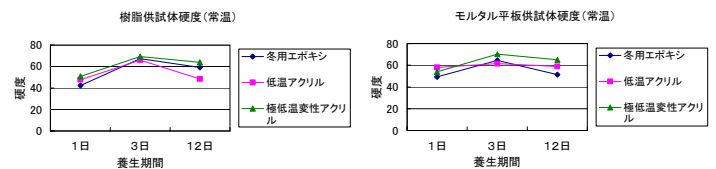
測定は各ケースの供試体毎に10回行ったが、試験結果は上限・下限を棄却し8個のデータの平均値を硬度とした。表-10に試験結果を示す。

表-10 硬度試験結果

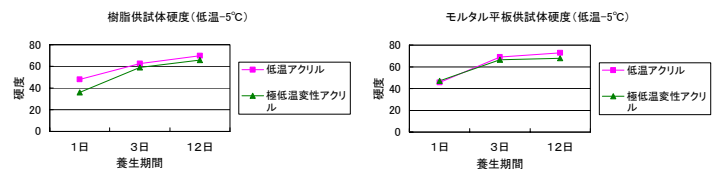
樹脂供試体				モルタル平板供試体			
養生期間	冬用エポキシ	低温アクリル	極低温変性アクリル	養生期間	冬用エポキシ	低温アクリル	極低温変性アクリル
ケース1(常温)				ケース1(常温)			
1日	42.2	47.8	50.8	1日	49.3	57.9	53.9
3日	67.4	66	69.3	3日	64.6	61.4	70.1
12日	59	48.4	63.9	12日	51.3	58.9	65.1
ケース2(低温 -5°C)				ケース2(低温 -5°C)			
1日	NG	47.9	35.9	1日	NG	45.7	47.1
3日	NG	62.5	59.1	3日	NG	68.9	66.4
12日	NG	69.8	65.8	12日	NG	72.8	67.8
ケース3(極低温 -15°C)				ケース3(極低温 -15°C)			
1日		53.2	59.8	1日		53.2	58.9
3日		62.9	66.8	3日		70.9	65.1
12日		71.3	51.2	12日		69.6	68.8

図-3に各ケース毎の測定結果グラフを示す。

ケース 1



ケース 2



ケース 3

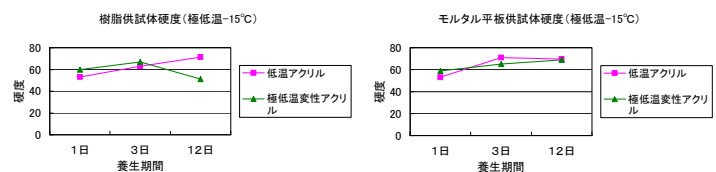


図-3 硬度試験結果

常温養生では、材齢 3 日まで各含浸接着樹脂の硬度は増加するが、材齢 12 日では硬度が低下又は平行を示した。また、含浸接着樹脂の種類による大きな硬度差は認められない。

-5℃養生では、材齢 24 時間～12 日まで硬度の増加が認められた。低温アクリル樹脂の硬度が極低温変性アクリル樹脂の硬度をやや上回っている。

-15℃養生では、材齢 24 時間～12 日まで硬度の増加が認められたが、樹脂供試体における極低温変性アクリル樹脂のみ 12 日硬度が低下した。

測定結果より、材齢増加に伴い硬度が増加する傾向が認められた。また、含浸接着樹脂の種類別や養生温度別による相関は認められない。樹脂が硬化した場合の硬度の範囲は、材齢 24 時間で硬度 40～60、材齢 3 日で硬度 60～70、材齢 12 日で硬度 60～70 である。

材齢 12 日硬度が材齢 3 日硬度を下回ったことは、測定手法に問題があったものと推定する。硬度計を手動で垂直に保持することが難しく、また、重錘の重心位置を正確に載荷することも困難であった。

(3) 付着強度試験結果

付着強度試験は、含浸接着樹脂を使用することから JIS A 6909 に準拠して実施した。樹脂硬化物特性では、コンクリート付着強度を 1.5N/mm² 以上と規定している。

引張試験で得られた値は、kN で示される。付着強度 (N/mm²) は、試験値をアタッチメント (接着板) の面積 1600mm² で除して求める。

写真-14 に母材の破壊状況を示す。



写真-14 母材の破壊状況

左からモルタル平板からの破壊、中央がアタッチメントの接着剤とモルタル平板、炭素繊維の破壊、右が炭素繊維の破壊を示す。各ケースともに引張荷重による母材の破壊程度はランダムに出現した。

表-12 に付着強度試験結果を示す。

表-12 付着強度試験結果一覧

ケース	養生	冬用エポキシ		低温アクリル		極低温変性アクリル	
		試験値 kN	付着強度 N/mm ²	試験値 kN	付着強度 N/mm ²	試験値 kN	付着強度 N/mm ²
ケース1 常温	1日	4.33	2.71	4.78	2.99	5.10	3.19
	3日	6.69	4.18	4.78	2.99	3.91	2.45
	12日	7.73	4.83	5.55	3.47	5.60	3.50
ケース2 低温-5℃	1日	NG	NG	2.87	1.79	2.72	1.70
	3日	NG	NG	4.04	2.53	3.86	2.41
	12日	NG	NG	5.88	3.68	5.72	3.57
ケース3 極低温-15℃	1日	2.72	1.70	2.72	1.70	2.89	1.80
	3日	4.91	3.07	4.91	3.07	4.41	2.76
	12日	5.88	3.68	5.88	3.68	5.22	3.26

図-4 に各ケース別の付着強度と材齢の関係を示す。

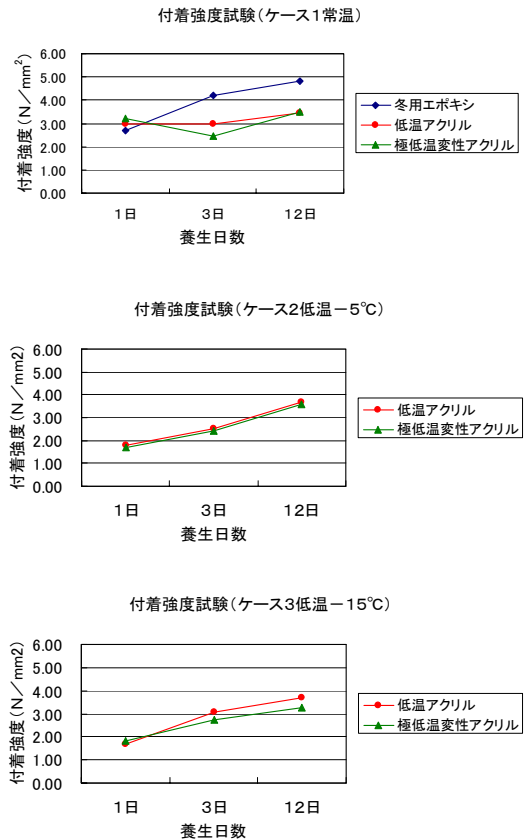


図-4 付着強度と材齢の関係

付着強度は、各ケースともに 24 時間養生で基準値 1.5N/mm² を越えていた。材齢 24 時間～12 日にかけて付着強度の増加が確認された。付着強度が最も高いのは、常温養生における冬用エポキシ樹脂である。低温アクリル樹脂及び極低温変性アクリル樹脂では、常温養生の 24 時間材齢で 2.5～3.5 N/mm² を示したのに対し、材齢 3 日～12 日では養生温度に関わらず 2.5～3.7 N/mm² 程度と近似した値であった。

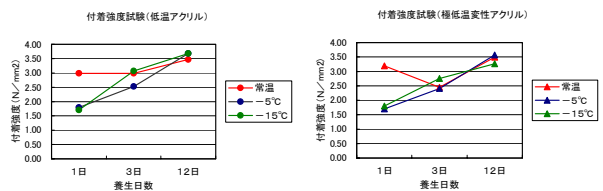


図-5 低温アクリル・極低温変性アクリルの付着強度

図-5 に低温アクリル樹脂と極低温変性アクリル樹脂の養生環境と材齢と着強度の関係を示す。各含浸接着樹脂とも常温時における 24 時間付着強度は高いものの、材齢 3 日～12 日における付着強度は、ケース 1～3 で $3.5 \sim 3.7 \text{ N/mm}^2$ 付近で収束している。

4. 含浸接着剤の硬度と付着強度の関係

図-6 に硬度と付着強度の関係を示す。

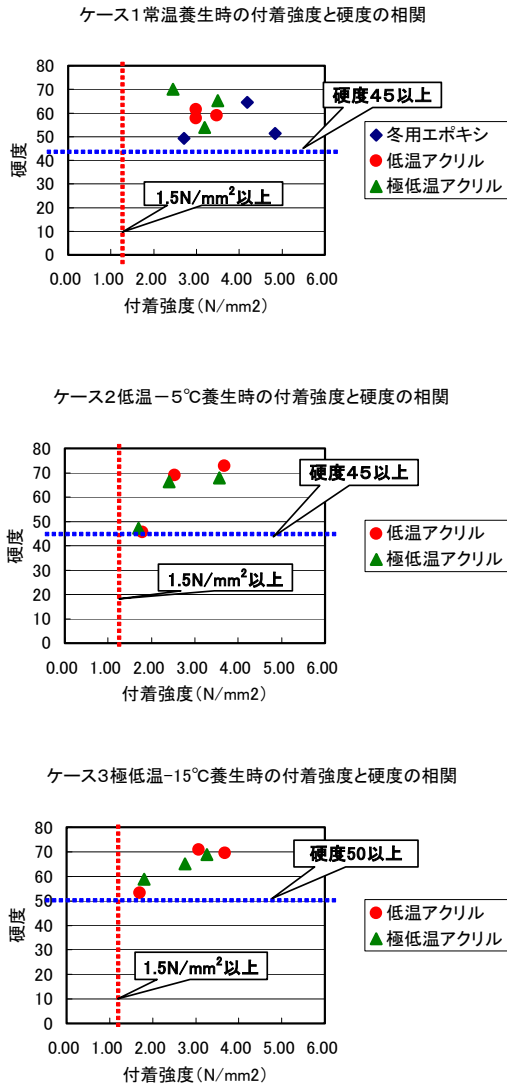


図-6 ケース別の硬度と付着強度の関係

含浸接着樹脂の硬度と付着強度には、良い線形相関が認められなかった。これは、含浸接着剤の種類によらず、硬度にバラツキが多いためと考えられる。一方、硬度と付着強度の関係を領域で見ると、付着強度の基準値 1.5 N/mm^2 以上において、常温と低温 -5°C 養生時では含浸接着剤の種類によらず硬度 45 以上の領域に分布相関が認められた。また、極低温 -15°C 養生では、低温アクリル樹脂と極低温変性アクリル樹脂に硬度 50 以上の分布相関が認められた。

このことから、含浸接着樹脂材の硬度を計測することにより接着効果が確認できる可能性が高いと考えられる。

5. まとめ

本研究では、高強度繊維補強工法における含浸接着樹脂の硬化確認手法に関する検討を行った。これらの成果をまとめると以下のようになる。

- ・冬用エポキシ樹脂は、 -5°C 以下の温度環境では硬化しないことが分かった。一方、低温アクリル樹脂は、 -15°C までの温度環境で十分に硬化することが認められた。
- ・含浸接着樹脂の硬化硬度は、12 日間の養生期間で硬度が増加することがわかった。硬度値のバラツキが大きい、24 時間で硬度 $40 \sim 60$ 、3 日～12 日で硬度 $60 \sim 70$ を示した。
- ・付着強度は、12 日間の養生期間で強度が増加し、24 時間養生で基準値 1.5 N/mm^2 以上を確認した。含浸接着樹脂の種類や養生温度の違いによらず、材齢 3 日～12 日における付着強度は近似している。
- ・含浸接着樹脂の硬度と付着強度の関係では、分布領域に相関が認められた。付着強度 1.5 N/mm^2 以上と硬度 $40 \sim 50$ の領域分布である。このことから、含浸接着樹脂の硬度を計測することにより、接着効果が確認できる可能性が高いものと考えられる。

6. おわりに

本試験によりデータを得られた硬度と付着強度の関係について明らかにするため、今後新たな試験や、実現場での試行試験などでサンプル数を増やし検討する必要があると考える。また、本試験で測定した硬度計測値のバラツキが大きかったことから、硬度計測手法の改善についても必要と考えられる。

最後に、本研究は品質向上に関して監督職員自らで行ったが、試行錯誤のところもあり、湿度管理等との関係を含め今後更なるインハウスエンジニアリングが重要と考える。今回の試験及び論文作成に際してご協力をいただいた関係者の方々に対し、深く感謝の意を表すものである。