

論文 凍結融解環境下における連続繊維シートの付着性状の評価

上原子 晶久^{*1}・菅原 隆^{*2}

要旨：凍結融解作用による母材コンクリートの劣化の有無と連続繊維シートの種類を実験水準とした付着試験を行い、その結果に基づき連続繊維シートとコンクリートとの付着性状に及ぼす凍結融解作用の影響について検討した。その結果、付着特性は凍結融解による母材の劣化の有無、及び連続繊維シートとコンクリートとの線膨張係数の相違に起因する温度応力の差に影響されることを示した。

キーワード：連続繊維シート、凍結融解作用、付着、母材コンクリート、線膨張係数

1. はじめに

RC 構造物の補修・補強技術については、設計手法が整備されている。しかしながら、補修・補強後の構造物において、周囲の環境条件に起因する経年劣化を予測する手法については、検討事例¹⁾があるものの、汎用的な手法が提案されていないのが現状である。

以上の背景の下、著者らは連続繊維シート補強コンクリートについて、凍結融解(F-T)作用が連続繊維シートとコンクリートとの付着性状に及ぼす影響について検討を進めてきた^{2,3)}。以上の検討では、シートで補強される側の母材コンクリートが劣化していないという条件の下で付着特性の評価を行い、さらにはその結果を適用して、シート補強 RC 部材の曲げ耐力の経年劣化を予測することを試みた²⁾。しかし、実際の構造物に補修・補強することを考慮すると、母材コンクリートは何らかの劣化作用を受けていることは看過できない。

本稿では、寒冷環境下に立地する構造物を想定して、凍結融解作用による母材コンクリートの劣化の有無を考慮しながら、凍結融解の繰り返し履歴を受けた場合の連続繊維シートとコンクリートの付着特性を明らかにする。

2. 実験概要

図-1 に本研究の方法を示した。表-1 に直接引張

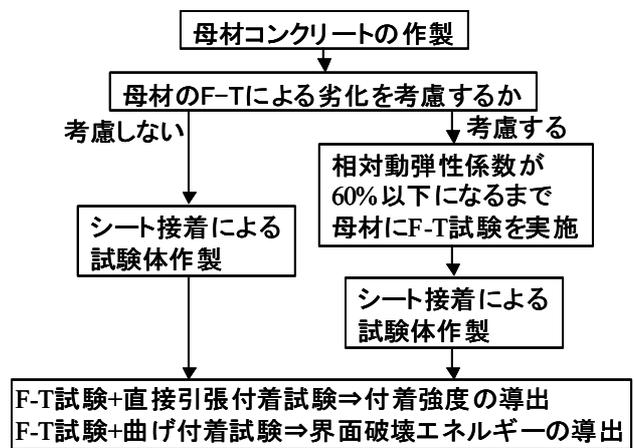


図-1 本研究の方法

試験体、並びに表-2 に曲げ付着試験体の一覧をそれぞれ示した。図に示した様に、母材コンクリートの劣化を考慮しない場合にはシートを接着後、凍結融解試験を行い、所定のサイクル数ごとに直接引張付着試験と曲げ付着試験を行う。一方、母材コンクリートの劣化を考慮する場合には、シート接着前に所定の養生を終えた母材コンクリートを凍結融解試験に供する。母材劣化の程度は、表-1、並びに表-2 に示した様に相対動弾性係数が概ね 60%以下となる様にした。その後の試験については、母材コンクリートの劣化を考慮しない場合と同様である。一連の工程において、凍結融解試験は ASTM-C-666B 法(気中凍結・水中融解方式)で統一した。

*1 弘前大学 理工学部地球環境学科助手 博(工) (正会員)

*2 八戸工業高等専門学校 建設環境工学科教授 博(工) (正会員)

表-1 直接引張付着試験の試験体と実験結果の一覧

番号	シート種類	母材 F-Tの有無	母材に対するF-T劣化状況		載荷試験実施時の F-T サイクル数	平均最大荷重 (kN)	付着強度 (N/mm ²)	破壊モード*
			F-T試験終了時のサイクル数	F-T終了時の相対動弾性係数(%)				
1	炭素	なし	—	—	1	1.9	2.2	P
2	炭素	なし	—	—	100	1.9	2.2	P
3	炭素	なし	—	—	300	1.7	1.9	P
4	炭素	あり	23	54	100	1.8	2.0	C
5	炭素	あり	49	51	300	1.4	1.6	C
6	アラミド	なし	—	—	1	2.0	2.3	P
7	アラミド	なし	—	—	100	1.9	2.2	P
8	アラミド	なし	—	—	300	1.6	1.8	P
9	アラミド	あり	36	57	100	1.1	1.2	C
10	アラミド	あり	49	51	300	0.9	1.0	C

* P:シート剥離, C:コンクリート破壊

表-2 曲げ付着試験の試験体と実験結果の一覧

番号	シート種類	母材 F-Tの有無	母材に対するF-T劣化状況		載荷試験実施時の F-T サイクル数	最大荷重 (kN)	界面破壊エネルギー (N/mm)	破壊モード*
			F-T試験終了時のサイクル数	F-T試験終了時の相対動弾性係数(%)				
11	炭素	なし	—	—	1	14.0	0.98	P
12	炭素	なし	—	—	1	15.7	1.23	P
13	炭素	なし	—	—	1	17.9	1.60	P
14	炭素	なし	—	—	300	14.7	1.08	P
15	炭素	なし	—	—	300	17.1	1.46	P
16	炭素	なし	—	—	300	12.2	0.74	P
17	炭素	あり	87	45	100	16.1	1.75	P
18	炭素	あり	36	51	100	9.0	0.55	P+C
19	炭素	あり	36	57	100	11.9	0.96	P
20	炭素	あり	23	59	300	16.8	1.91	P
21	炭素	あり	23	57	300	5.9	(0.24)	C
22	炭素	あり	36	56	300	10.8	(0.79)	C
23	アラミド	なし	—	—	1	12.4	1.27	P
24	アラミド	なし	—	—	1	14.8	1.80	P
25	アラミド	なし	—	—	1	16.4	2.22	P
26	アラミド	なし	—	—	300	11.7	1.13	P
27	アラミド	なし	—	—	300	11.4	1.07	P
28	アラミド	なし	—	—	300	9.9	0.81	P
29	アラミド	あり	23	56	100	11.9	1.73	P+C
30	アラミド	あり	36	55	100	7.1	0.61	P
31	アラミド	あり	23	59	100	9.8	1.17	P
32	アラミド	あり	36	54	300	10.4	1.32	P
33	アラミド	あり	64	55	300	5.7	0.40	P
34	アラミド	あり	23	55	300	4.4	(0.24)	C

* P:シート剥離, C:コンクリート破壊, P+C:シート剥離とコンクリート破壊との混在

3. 試験体

3.1 使用材料

コンクリートの示方配合表を表-3 に、連続繊維シートと接着含浸樹脂の物性値を表-4 にそれぞれ示した。コンクリートについては、凍結融解作用による劣化を促進させるため、母材コンクリートの劣化を考慮する場合には、目標空気量を 2.5%とした。

母材コンクリートの劣化を考慮しない場合には、シート補強後における凍結融解作用による劣化を憂慮して空気量を 5%とした。

本実験では一方向連続繊維シートを使用した。弾性係数の違いや熱特性の違いを明らかにするため、それぞれ物性の異なる炭素繊維シートとアラミド繊維シートを使用した。

表-3 示方配合表

W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)					母材 F-Tの 有無
			W	C	S	G	AE	
55	45	5	168	305	798	1010	0.092	なし
55	45	2.5	168	305	828	1047	0.015	あり

表-4 連続繊維シートと接着含浸樹脂の物性値

材料	厚さ (mm)	引張 強度 (N/mm ²)	弾性率 (kN/mm ²)
炭素繊維シート	0.111	3860	277
アラミド繊維シート	0.169	2850	83
接着樹脂(エポキシ)	N/A	30	1.5

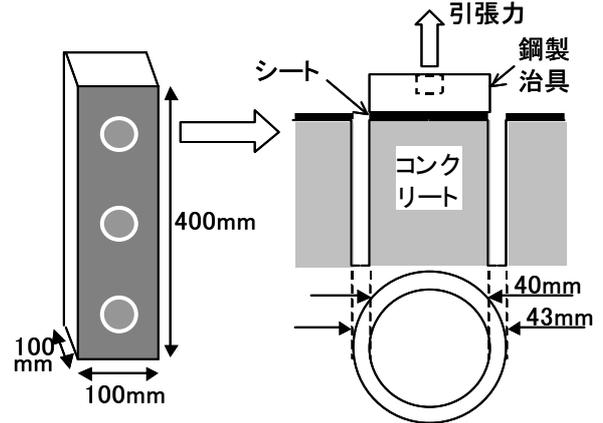


図-2 直接引張付着試験の試験体、及び荷重方法の概要

3.2 作製方法

母材コンクリートは 100mm×100mm×400mm のコンクリート角柱である。以下試験方法ごとに詳細を記す。なお、母材コンクリートの劣化の有無によらず、作製方法は同様である。

(1) 直接引張付着試験

図-2 に試験体を示した。連続繊維シートは、母材コンクリートの長軸方向を繊維配列方向として 4 側面に接着した。シートの接着幅は 80mm、接着長さは 380mm とした。シートの接着方法は、母材表面のケレン・プライマー塗布+養生・接着含浸樹脂の下塗り・シート接着・接着含浸樹脂の上塗り+脱泡・養生という一般の手順に従った。

(2) 曲げ付着試験

図-3 に試験体を示した。連続繊維シートの接着前に母材コンクリートを中央で切断して、それら 2 つをつき合わせてシートを接着した。シートの接着幅は 50mm、接着長さは 340mm とした。シートの接着方法は、直接引張付着試験と同様である。

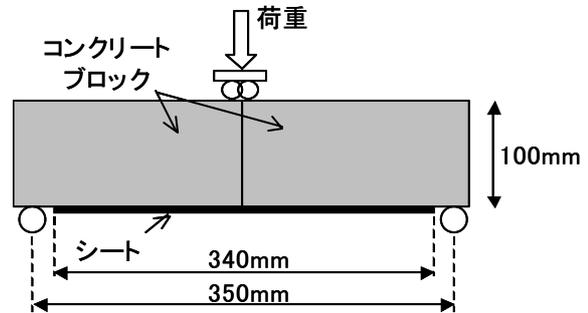


図-3 曲げ付着試験の試験体、及び荷重方法の概要

4. 試験方法

試験項目ごとに詳細を以下に記した。

4.1 直接引張付着試験

図-2 に概要を示した。試験方法は、既往の指針案⁴⁾を参考にした。荷重には、建研式引張試験機を用いた。所定のサイクル数を経た試験体に対して円筒形に溝を掘り、シート面に接着した円筒形の鋼製治具を鉛直方向に引張る方法で最大荷重を計測した。

試験箇所は、試験体 1 本当たり 3 箇所とした。

荷重の実施時期は、連続繊維シート接着後の凍結融解サイクル数が 100 サイクルごとに実施した。ただし、母材コンクリートの劣化を考慮しない場合には、1 サイクル時にも荷重試験を実施した。母材の劣化を考慮した場合に、1 サイクル時の試験を略したのは、母材の劣化の有無が 1 サイクル時のシートとコンクリートとの付着特性に及ぼす影響は小さいと考えたためである。なお、試験開始を 1 サイクルからとしたのは以下による。すなわち、凍結融解試験開始以降の付着試験において、温度履歴を同一にするためである。

4.2 曲げ付着試験

図-3 に概要を示した。荷重方法は、既往の曲げ試験方法に従い、3 点曲げ荷重方式で万能試験機(容量 1000kN)を用いて最大荷重を計測した⁵⁾。試験体数は、シートの種類ごとに 3 体とした。荷重試験の実施時期は、母材コンクリートの劣化を考慮しない

場合には1, 300 サイクル時とした。一方、母材の劣化を考慮した場合には100, 300 サイクル時とした。以上で1 サイクルを略した理由は直接引張付着試験時と同様である。さらに、100 サイクルにおける載荷試験を行ったのは、付着性能の低下の様子を詳細に観察したいと考えたためである。

5. 実験結果

結果の一覧を表-1, 表-2 にそれぞれ示した。以下、試験項目ごとに報告する。

5.1 直接引張付着試験

図-4 に付着強度と凍結融解サイクル数との関係を示した。付着強度 f_{bnd} は以下の式で求めた。

$$f_{bnd} = \frac{4P_{\max,bnd}}{\pi D^2} \quad (1)$$

ここに、 $P_{\max,bnd}$ は最大荷重、 D は鋼製治具とシートとの接着面積である。なお、表-1 に示した最大荷重は、載荷試験を実施した3箇所での平均値である。

図-4 より、母材コンクリートの劣化の有無で比較すると、母材の劣化を考慮しない場合には、連続繊維シートの種類によらず、凍結融解サイクル数が増加しても付着強度は大きく減少していない。一方、母材の劣化を考慮した場合には、以上と同じ傾向が見られるものの、付着強度は相対的に大きく減少している結果が得られた。これは、破壊モードの違いによるものと考えている。母材の劣化を考慮した場合には、シートとコンクリートとの界面でシートが剥離していた。一方、母材の劣化を考慮した場合には、溝切部の最下面でコンクリートが引張破壊していた。すなわち、母材が劣化している場合において付着強度は、あらかじめ凍結融解作用で損傷を受けているコンクリートの引張強度に依存しているのである。そのことが、母材の劣化の有無により付着強度に大きな差が生じる原因と解釈している。以上の様な凍結融解作用による破壊モードの変化は、斉藤らの研究でも示されている⁶⁾。このことから、本考察は矛盾のないものと考えている。

一方で、母材の劣化を考慮した場合に、シートの

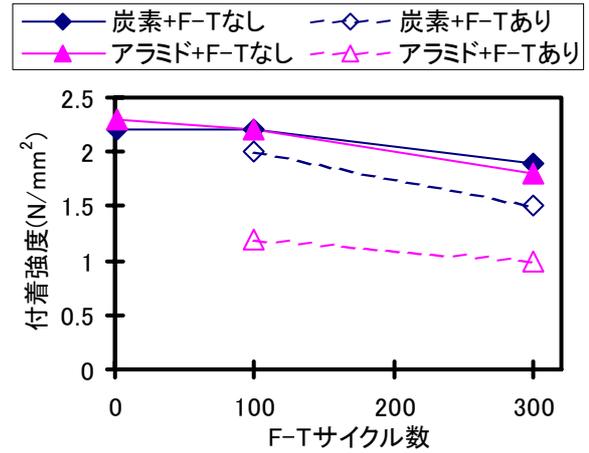


図-4 付着強度と凍結融解(F-T)サイクル数との関係

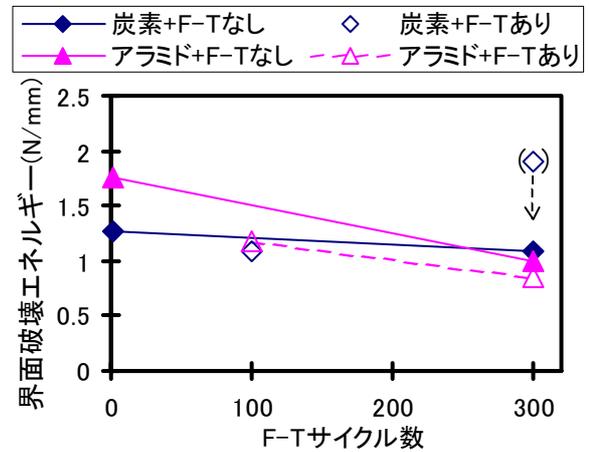


図-5 界面破壊エネルギーと凍結融解サイクル数との関係

種類で比較すると、両者の付着強度に大きな差が生じた。本稿6章で原因を述べる。

5.2 曲げ付着試験

図-5 に界面破壊エネルギーと凍結融解サイクル数との関係を示した。界面破壊エネルギー G_f は、以下の式により求められる。

$$G_f = \frac{1}{2} \frac{(T_{\max,fx})^2}{b_f^2 t_f E_f} \quad (2)$$

$$T_{\max,fx} = \frac{P_{\max,fx} \ell}{4h} \quad (3)$$

ここに、 $T_{\max,fx}$ はシートに作用する最大引張力で式(2)により求める、 $P_{\max,fx}$ はアムスラー試験機の示す最大荷重、 ℓ はスパン、 h は試験体の高さ、 b_f はシー

表-5 温度応力の計算に必要なパラメータ

		弾性率(kN/mm ²)	線膨張係数(/°C)
繊維	炭素	245	-0.38×10 ⁻⁶
	アラミド	78	-6.0×10 ⁻⁶
樹脂		1.5	60×10 ⁻⁶
FRP	炭素	277	1.06×10 ⁻⁶
	アラミド	83	-1.3×10 ⁻⁶
コンクリート		30	10×10 ⁻⁶

※ 繊維体積含有率は0.2で一定とした

トの接着幅、 t_f はシートの厚さ、そして E_f はシートの弾性係数である。

図-5 で示した界面破壊エネルギーは、実験水準ごとの平均値である。しかし、実験時にシートが剥離せずにコンクリート部で破壊したデータは平均値から除外した。従って、母材コンクリートの劣化を考慮して、なおかつ炭素繊維シートを接着した場合の300サイクル時のデータは1体のみの結果である(試験体No.20)。従って、当該実験水準のプロットは参考値とする。追試を含めた検討は今後の課題としたい。本図より、母材コンクリートの劣化の有無で比較すると、図-4 で示した付着強度と凍結融解サイクル数との関係で観察された傾向が再確認された。すなわち、母材の劣化を考慮した場合に、界面破壊エネルギーが減少する傾向にある。一方、連続繊維シートの種類で比較すると、アラミド繊維シート接着の場合が、炭素繊維シート接着の場合よりも凍結融解サイクル数の増加に伴い界面破壊エネルギーが減少する割合が大きい。このことについては、次章で考察を試みる。

6. シートの付着性状に及ぼす温度応力の影響

4章で示した付着強度、並びに5章で示した界面破壊エネルギーに及ぼす凍結融解作用の影響については、母材の劣化の有無よりも、連続繊維シートの種類による感度が高いことは以上で示した通りである。本章では、その原因を解明する手掛かりとして、シート、並びにコンクリートの温度応力(=弾性率×線膨張係数×温度増分)を概算することを試みる。

温度応力の計算に必要なパラメータを表-5に示した。本計算例において、連続繊維シートの線膨張

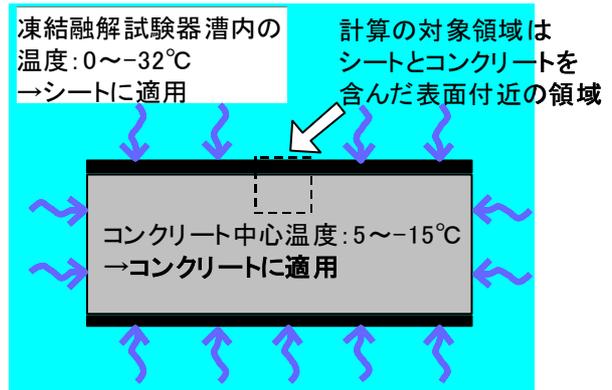


図-6 温度応力計算上の設定条件、および仮定

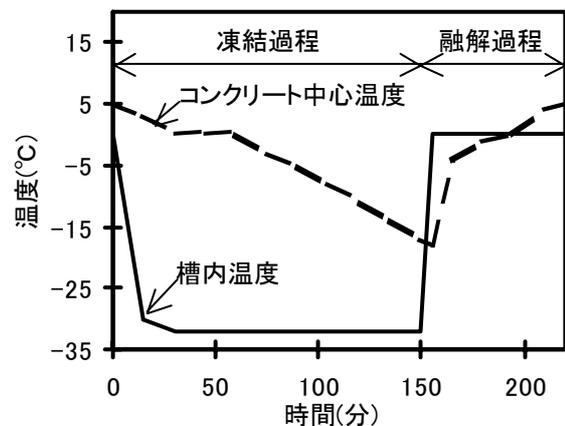


図-7 凍結融解試験における温度履歴

係数は既往の設計指針を参考に計算した⁴⁾。なお、本研究で使用した1方向連続繊維シートの線膨張係数は、シートの繊維配列方向と配列直交方向で異なる⁴⁾。本計算例では、簡便を考慮して繊維配列方向の線膨張係数のみを考慮することとした。コンクリートの弾性率と線膨張係数は、示方書の推奨値を用いた⁷⁾。計算上の設定条件、および仮定を図-6に示した。連続繊維シートの温度は、凍結融解試験器槽内の温度(図-7)と仮定する。一方、コンクリート内の温度は、凍結融解試験時に計測している100mm×100mm×400mm角柱コンクリートの中心温度(図-7)とする。本来ならば、シートの温度は熱伝導解析などにより、厳密に決定すべきである。さらには、コンクリート内の温度分布もまた考慮すべきである。しかし、本計算例はあくまでも簡便な試算という前提であるので、以上を考慮しなかった。計算の領域は、シートを含んだ試験体表面に近い領域を想定した。また、図-7に示した温度履歴に基づき、凍結・

融解過程をあわせた1サイクルの時間間隔で計算を行った。

以上により計算した結果を、各構成材料に作用する応力と時間との関係として図-8に示した。この図より、コンクリートと炭素繊維シートの応力履歴を比較すると、両者は概ね凍結・融解過程を圧縮応力が作用した状態で推移している。一方、コンクリートとアラミド繊維シートの履歴の大略に着目すると、両者が相反していることが分かる。つまり、凍結過程の初期においてコンクリートには圧縮応力が作用し、アラミド繊維シートには引張応力が作用している。ところが融解過程の初期では、以上が正反対になっている。このことは、アラミド繊維シート接着の場合には、見かけ上コンクリートとの温度応力差が大きくなることを意味する。以上は、コンクリートの線膨張係数が正值であるのに対して、アラミド繊維シートのそれが負値であることに起因する。応力差が生じることにより、母材コンクリート、あるいはシートとコンクリートとの境界層における損傷の度合いが大きくなるものと予想される。その結果、アラミド繊維シート接着の場合の付着強度や界面破壊エネルギーが凍結融解作用の影響を比較的大きく受けたものと解釈している。

以上は、あくまでも不確定な要素を含んだ試算であり、主因とするのは早計である。本研究では気中凍結・水中融解方式で凍結融解試験を行っているので、連続繊維シートの遮水性能を付着性能の評価に考慮しなければならないと考えている。以上を含めて、詳細な検討は今後の課題としたい。

4. まとめ

本稿の範囲内で以下の結果が得られた。

- (1) 連続繊維シートとコンクリートとの付着強度は、母材コンクリートの凍結融解作用の影響を受けることを示した。これは、母材の劣化の有無により破壊モードが変化することによる。
- (2) 連続繊維シートの界面破壊エネルギーについても本結論(1)と同じ傾向にあることが確認された。
- (3) 付着強度、及び界面破壊エネルギーに及ぼす凍結融解作用の影響は、凍結融解による母材の劣化の

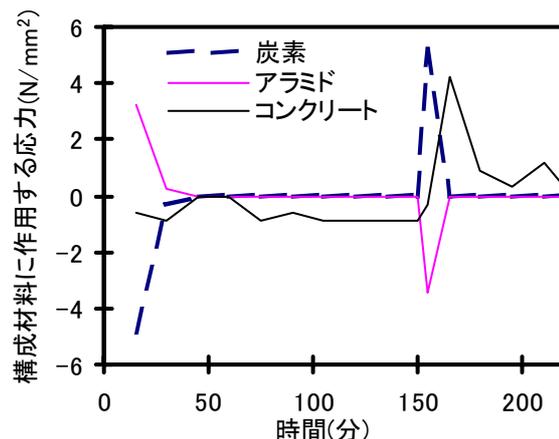


図-8 各構成材料に作用する応力と時間との関係

有無よりも、連続繊維シートとコンクリートとの線膨張係数の違いに起因する温度応力差の影響が大きい可能性を示した。

本研究は、一井利光氏、中村亜矢子氏（元八戸工業高等専門学校）の卒業研究の成果によるものです。また、本実験結果の考察に対して、佐藤靖彦博士（北海道大学大学院）、並びに小林 朗氏（日鉄コンポジット(株)）に助言を頂きました。ここに記して各位に深くお礼致します。

参考文献

- 1) 例えば、下村 匠、笠原裕子：連続繊維シートによるコンクリート構造物の補修補強機構のモデル化、応用力学論文集, Vol.6, pp.1157-1168, 2003.8
- 2) 上原子晶久、菅原 隆：凍結融解環境下における連続繊維シートで補強されたRC構造物の劣化予測、第4回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文集, pp.389-394, 2004
- 3) 一井利光、菅原 隆、上原子晶久：連続繊維シートの付着特性に及ぼす凍結融解作用の影響、平成15年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp.592-593, 2004
- 4) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、コンクリートライブラリー101, 2000
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編【2001年制定】、2001
- 6) 斎藤佑樹、上田多門、佐藤靖彦、戴 建国：凍結融解により劣化したコンクリートとFRPシートの界面における付着性状、第60回土木学会年次学術講演会概要集, 第V部門, pp.1015-1016, 2005.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編【2001年制定】、2001