

論文 プライマーを塗布したコンクリート表層モルタルスキンの強度特性

尾崎 允彦*1・佐藤 靖彦*2

要旨: FRP シート接着時の剥離に大きな影響を及ぼすコンクリート表層のモルタルスキンに着目し、モルタル薄片供試体の曲げ試験を行い、その強度特性と引張構成則を明らかにした。剥離に影響すると想定される表層深さ、プライマーの有無と種類、温度をパラメータとした。実験の結果、コンクリート表面に近いほどモルタルスキンの強度は増加した。また、プライマーを塗布することで強度は大幅に増加したが、高温時にはプライマー塗布による効果はほとんどなかった。

キーワード: モルタルスキン, プライマー, 温度, コンクリート表層, メゾスケール

1. はじめに

FRP シート接着によりコンクリート構造物を補強する場合、補強後耐力はFRP シートの剥離によって決定することが多い。その際、剥離後のFRP シートにはコンクリート表面から 0.5-2 mm 程度のコンクリート層が接着している¹⁾。つまり、FRP シートの剥離はコンクリート表層の数 mm 程度が破壊することによって引き起こされる。

コンクリート表層は図-1 のようにセメントスキン(0.5 mm)、モルタルスキン(5 mm)、コンクリートスキン(30 mm)に分けられる²⁾。そのため、FRP シートの剥離時の破壊層はモルタルスキン層に該当し、一般的なコンクリート中心部の特性とは異なると考えられる。コンクリート表層については表層品質に着目した研究³⁾は見られるが、その力学的特性に着目した研究は少ない。また、著者らの最近の研究⁴⁾では、コンクリート表層の引張構成則を中心部と変化させることで剥離現象の再現解析が可能となっている。そのため、コンクリート表層の強度特性とその構成則の検討は、FRP シート剥離現象の解明に直接的に寄与する。

そこで、本研究ではモルタルスキンに着目し、その強度特性と構成則を明らかにする。また、実際のFRP シート接着時にはコンクリート表面にプライマーを塗布するため、本研究ではプライマー塗布時のモルタルスキンの特性についても評価する。さらに、プライマーは温度によって物性が大きく変化するため、プライマーを塗布し

た場合のモルタルスキンの温度による強度特性の変化についても検討する。

2. 実験概要

2.1 供試体条件

コンクリートの表層部を構成するモルタルスキンの強度特性を把握するために、モルタルスキンの材料構成を模したモルタルの薄片供試体を作製する。Kreijger の研究²⁾ではコンクリート表層を 2 mm ずつ切断し、各層の骨材の粒度分布や骨材セメント比 (a/c) を調べている。各層の粒度分布は図-2、a/c は図-3 の赤線となる。なお、黒線は本実験で使用する a/c である。本研究では、この材料構成を参考に表-1 に示す全 32 ケースの供試体を作製し、後述するようにパラメータを変化させることで表層深さ、プライマー、温度の影響を検討する。供試

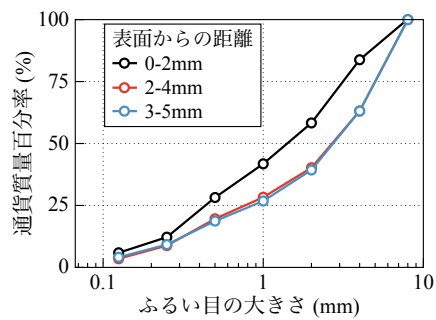


図-2 粒度分布²⁾

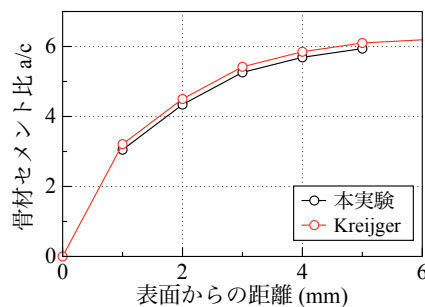


図-3 骨材セメント比の変化

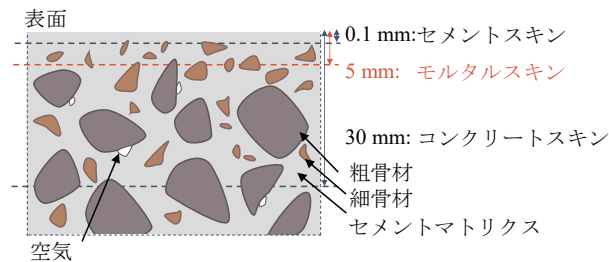


図-1 コンクリート表層の構成

*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻・日本学術振興会特別研究員 DC 修士(工学) (学生会員)

*2 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-1 供試体の条件

供試体	粒度分布	a/c	W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	プライマー	温度	パラメータ	
A55-N	0-2 mm	3.05	55	265	無	室温 (20°C程度)	表層深さ	
A60-N			60	282				
A70-N			70	314				
B55-N	2-4 mm	5.26	55	188				
B60-N			60	202				
B70-N			70	227				
C55-N	3-5 mm	5.69	55	178				
D55-N	2-4 mm	3.05	55	265				
A55-EP	0-2 mm	3.05	55	265	エポキシ プライマー	0°C	プライマー の有無 と種類	
A60-EP			60	282				
A70-EP			70	314				
A55-UP			55	265	ウレタン プライマー			
A60-UP			60	282				
A70-UP			70	314				
A55-N-0			55	265	無		40°C	温度
A60-N-0			60	282				
A70-N-0			70	314				
A55-N-40			55	265				
A60-N-40			60	282				
A70-N-40			70	314				
A55-N-60			55	265	エポキシ プライマー		60°C	
A60-N-60			60	282				
A70-N-60	70	314						
A55-EP-0	55	265	0°C					
A60-EP-0	60	282						
A70-EP-0	70	314						
A55-EP-40	55	265		40°C				
A60-EP-40	60	282						
A70-EP-40	70	314						
A55-EP-60	55	265	60°C					
A60-EP-60	60	282						
A70-EP-60	70	314						

体寸法は高さ 10±0.7 mm, 幅 23±1.5 mm である。材料は細骨材に混合砂 (表乾密度 2.59 g/cm³, 吸水率 2.22%), セメントに普通ポルトランドセメントを用い, AE 減水剤を使用した。また打設後, 35 日間の封緘養生を行った。

(1) 表層深さを变化させた実験

コンクリート表層モルタルスキンの材料構成はコンクリート表面からの位置によって異なる。このため, コンクリート表面から 0-2 mm, 2-4 mm, 3-5 mm のモルタルスキンの材料構成を模し, 各層の粒度分布は図-2, a/c は図-3 の黒線のように設定する。a/c はコンクリート標準示方書⁵⁾の標準的な概略値に合わせるため, コンクリ

ート表層 5 mm の a/c が 6.1 から 5.9 になるように, 変化度合いを保ちながら Kreijger の研究より若干小さく設定した。菅原ら⁶⁾は表層に鋼片を埋め込んだ実験によって, 水セメント比によりコンクリート表層の強度が変化することを示唆している。また, 既設コンクリート構造物への補強を想定した場合, 練り混ぜ時の加水などで所要の強度を満足していないコンクリートの存在も考えられる。このため, 本実験では水セメント比の上限を 70%として水セメント比を变化させた供試体を表-1 のように用意した。ここで, 供試体名は表層 0-2 mm を A, 2-4 mm を B, 3-5 mm を C と名付けた。D は粒度分布が 2-4 mm,

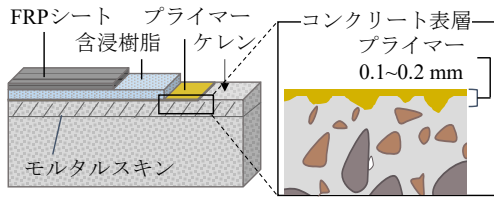
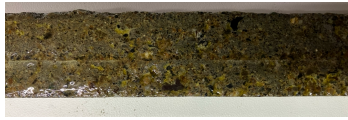
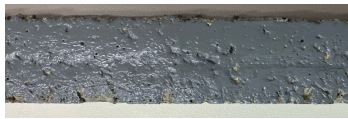


図-4 FRP シート接着時のモルタルスキン



(a) エポキシプライマー



(b) ウレタンプライマー

図-5 薄片供試体へのプライマーの塗布状況

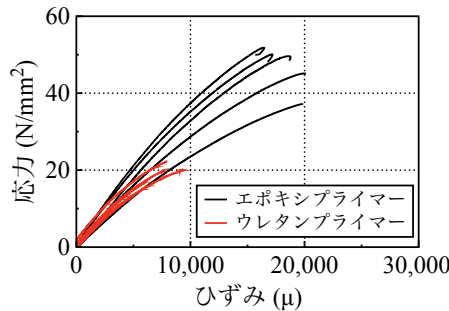


図-6 プライマーの応力-ひずみ関係

a/c が 0-2 mm の値を用いた供試体である。また、アルファベットの後ろの数字は水セメント比を表す。

(2) プライマーを変化させた実験

図-4 に示すように FRP シート接着時には、コンクリート表面のケレン後、プライマーを塗布する。このため、モルタルスキン表面にプライマーが含浸しており、強度特性に影響を及ぼすと考えられる。実際の FRP シート接着時を想定し、プライマーの有無と種類をパラメータとしてその強度特性を検討する。

表-1 に示すように A シリーズの供試体にエポキシプライマーとウレタンプライマーの 2 種類の性質の異なるプライマーを塗布したケースを用意した。ここで、供試体名はプライマーを塗布していないものを「-N」、エポキシプライマーを塗布したものを「-EP」、ウレタンプライマーを塗布したものを「-UP」としている。湿度 45-65% 程度の室内で保管したモルタル薄片供試体のケレン後、FRP シート接着時の標準塗布量 (0.2 kg/m²) のプライマーを片面に塗布し、1 週間の養生を行った。プライマー塗布後の状況を図-5 に示す。水セメント比によって含浸度合いが異なることが予測されるため、水セメント比

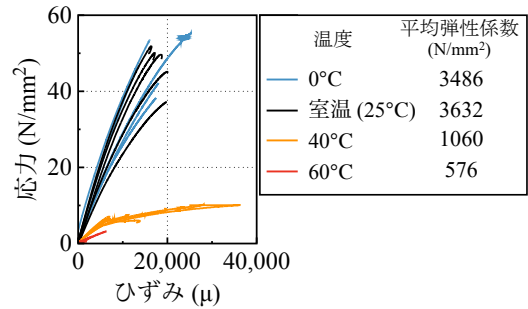


図-7 温度によるプライマーの応力-ひずみ関係の変化

もパラメータとした。

JIS K 7161 に基づき、使用したプライマーの引張試験を 5 体ずつ行った。応力-ひずみ関係は図-6 となり、エポキシプライマーの平均弾性係数は 3632 N/mm²、ウレタンプライマーの平均弾性係数は 3172 N/mm² であった。

(3) 温度を変化させた実験

樹脂は温度によって物性が大きく変化する。また、エポキシ樹脂の線膨張係数は約 $4.5-6.5 \times 10^{-5}$ (°C) であるが、コンクリートの線膨張係数は約 1.0×10^{-5} (°C) であり、その差によって界面に温度による応力が発生する。補強後の供用期間中にも温度変化が起こるため、本項では温度が変化した場合のプライマー塗布モルタルスキンの強度特性について検討する。

本研究では表-1 の通り、A シリーズのモルタル単体とエポキシプライマーを塗布したモルタルのそれぞれについて室温以外で 0°C、40°C、60°C と温度を変化させた実験を行った。また、プライマー塗布時の温度は室温 (20-23°C 程度) である。実験は恒温槽を用いて温度の制御を行い、供試体の設置後 30-60 分経過後に試験を開始した。ここで、供試体名は温度を変化させた場合は末尾に「-温度」と示している。

使用材料の温度特性を把握するために、温度を変化させた場合のエポキシプライマー単体の引張試験を各 5 体ずつ行った。応力-ひずみ関係と各温度での平均弾性係数を図-7 に示す。高温時に物性が大きく変化し、弾性係数の大幅な低下が見られた。なお、ガラス転移温度は完全硬化状態で 58°C、7 日後で 48°C である。

2.2 曲げ試験条件

表-1 の全 32 ケースのモルタル薄片供試体について、数 mm オーダーの特性を把握するメゾスケール 3 点曲げ試験を行った。供試体は打設時の底面が試験時に側面となるように 90 度回転させてセットし、図-8 のようにスパン 100 mm として設置した。ばらつきを考慮するため各ケース 6 体ずつ試験を行った。載荷速度 0.05 mm/min の変位制御により破壊まで試験し、載荷点直下と支点の変位を LVDT により測定した。

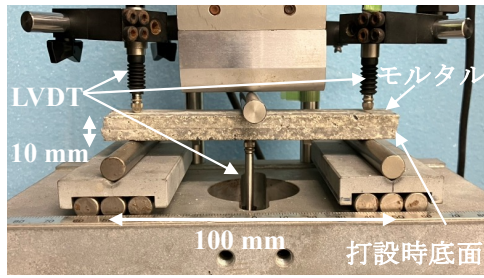


図-8 薄片供試体の3点曲げ試験状況

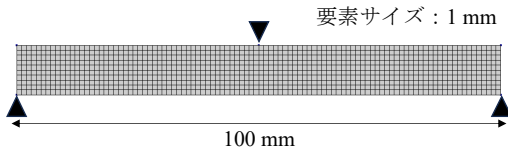


図-9 有限要素解析によるモデル

2.3 引張構成則の同定

実験から得られた曲げ応力-変位関係に一致するように汎用有限要素解析ソフト DIANA10.6 を用いて逆解析を行うことで、各ケースの引張構成則を同定する。図-9のように要素サイズ1 mmで薄片供試体のモデル化を行い、実験と同様に変位制御で載荷した。この際、引張構成則は Hordjik モデル⁷⁾を用いて、曲げ応力-変位関係が実験結果と一致するように、引張強度と引張破壊エネルギーを求める。これによって、モルタルスキンの引張応力-ひずみ曲線を同定することができる。ただし、各ケース6体ずつの平均を用いて引張軟化曲線を同定するが、ひび割れ発生位置は供試体によって異なる。そのため、本引張軟化曲線はひび割れ発生位置によるばらつきを含めた平均引張軟化曲線である。なお、本試験では骨材寸法に対して供試体寸法が十分に大きくない。さらに、要素サイズも小さく設定している。このため、本逆解析で得られる構成則はコンクリート表層の薄い層の局所的な破壊挙動に対するメソスケール解析用の引張軟化曲線を求めていると理解できる。

3. 実験結果と考察

3.1 曲げ試験結果と考察

寸法誤差を考慮するために、3点曲げ試験で得られた荷重より式(1)を用いて中央部の曲げ応力 σ (N/mm²)を算出した。

$$\sigma = (3PL)/(2bh^2) \quad (1)$$

ここで、 P は荷重(N)、 L はスパン(mm)、 b は実測幅(mm)、 h は実測高さ(mm)である。

(1) 表層深さの影響

シリーズ A と B の曲げ強度を図-10 に示す。黒点が6体の実験値、赤点はその平均値を表す。図-10 よりシリーズ A は B より曲げ強度が高く、W/C の増加によっ

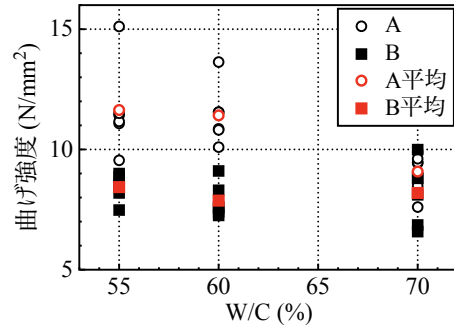


図-10 A・Bシリーズの曲げ強度の比較

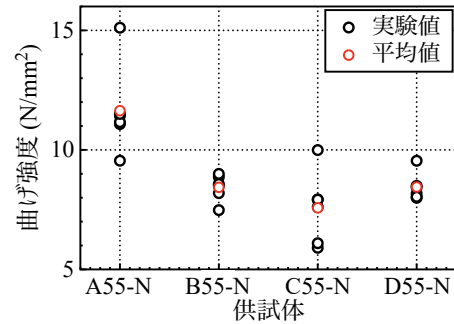


図-11 A~Dシリーズの曲げ強度の比較

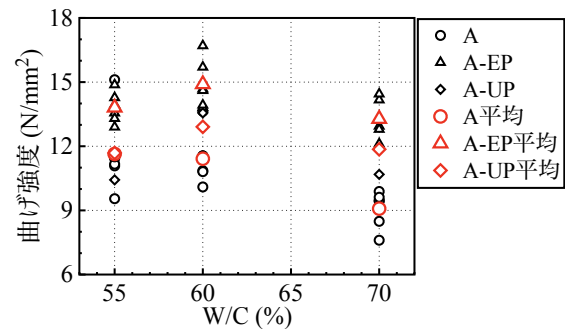


図-12 プライマー塗布による曲げ強度の変化

て曲げ強度が低下している。一方、シリーズ B ではほとんど変化がなかった。川上⁸⁾は粗骨材粒径が大きいほど引張強度は低下し、また W/C が大きいほどその低下割合は小さくなることを示している。本実験の曲げ強度でも同様に W/C が 70% と高い場合にはシリーズ A と B の差が小さく、55, 60% では骨材分布と a/c の違いによる差が見られた。W/C が 55% 時の A~D シリーズの曲げ強度を図-11 に示す。B55-N 供試体と主に a/c が異なる C55-N と D55-N 供試体は曲げ強度を比較しても大きな差はなかった。以上の結果より、コンクリート中心部分に近い表層 2-4 や 3-5 mm より表層 0-2 mm の方が曲げ強度が高いため、表層部分は中心部分と比べて表層となっていると考えられる。

(2) プライマーの影響

プライマーを塗布した場合の曲げ強度の実験値とその平均値の変化を図-12 に示す。エポキシプライマーを塗

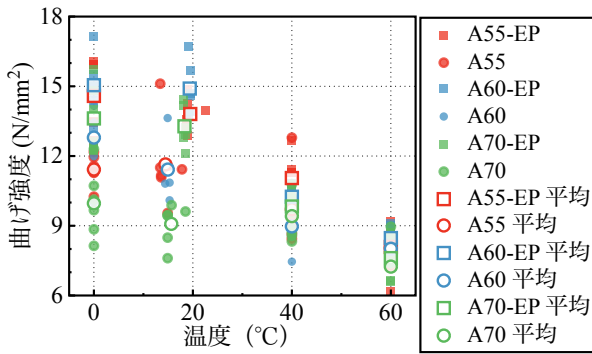


図-13 温度による曲げ強度の変化

布した場合には W/C にかかわらず曲げ強度の大幅な増加が見られた。一方、ウレタンプライマーを塗布した場合にはエポキシプライマーよりも曲げ強度の増加は小さいものの、W/C が 55 %以外では若干の強度の増加が見られた。施工時の粘性がエポキシプライマーよりもウレタンプライマーの方が高かったため、ウレタンプライマーの方が含浸度合いが低く、曲げ強度の増加量が小さくなったと考えられる。また、W/C による差に着目すると、W/C が大きいほどプライマーを塗布した場合の強度の増加量が大きくなる傾向にある。これは W/C が大きいほどモルタルの緻密性が低くなり、プライマーが含浸しやすかったとためだと推察される。

(3) 温度の影響

プライマーを塗布した供試体と無塗布の供試体の温度を変化させた場合の曲げ強度の実験値とその平均値の変化を図-13 に示す。無塗布のモルタル単体でも高温時に曲げ強度の低下が見られる。松沢⁹⁾は本実験と同程度的高温状態でコンクリートの圧縮強度が低下することを示しており、本実験でも同様の傾向が得られた。

プライマーを塗布した供試体に着目すると、0°Cの低温時には曲げ強度は変化しなかったが、高温になるにつれて曲げ強度が低下している。室温（20°C程度）から高温になると、モルタル単体に対するプライマーを塗布した場合の曲げ強度の増加量が小さくなっており、60度ではモルタル単体の場合と同程度の曲げ強度となった。つまり、高温下ではプライマー塗布による強度増加の効果は見込むことができない。これは図-7 に示したように高温ではプライマーの弾性係数が大幅に低下することに起因していると考えられる。

また、式(2)を用いて樹脂とモルタルの線膨張係数差によってモルタル表面に発生する温度応力を計算すると図-14 のようになる。

$$\sigma_m = \frac{A_r E_r E_m}{A_r E_r + A_m E_m} (\alpha_r - \alpha_m) (T - T_0) \quad (2)$$

ここで、 σ_m : モルタルに発生する温度応力(N/mm²)、 A_r : プライマーの断面積(mm²)、 A_m : モルタルの断面積(mm²)、

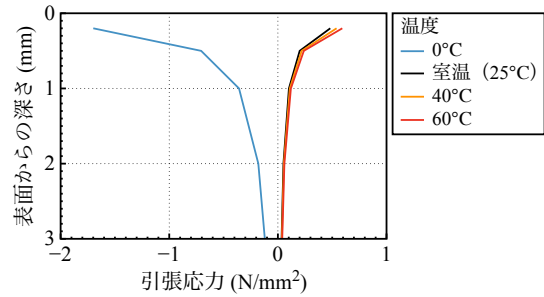


図-14 モルタル表面に働く温度応力

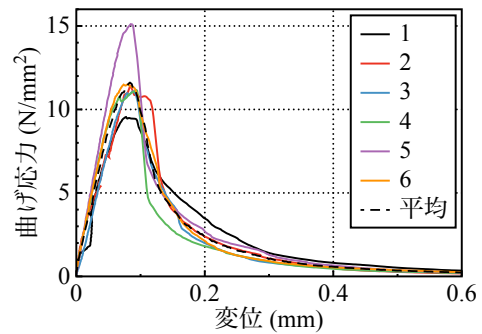


図-15 A55-N 供試体の曲げ応力-変位関係

E_r : プライマーの弾性係数(N/mm²)、 E_m : モルタルの弾性係数(N/mm²)、 α_r : プライマーの線膨張係数(°C)、 α_m : モルタルの線膨張係数(°C)、 T : 温度(°C)、 T_0 : 基準温度(施工時の 20°Cを使用)である。

図-14 より低温時には圧縮応力、高温時には引張応力がモルタルに導入される。前述したように高温時には弾性係数が低下するため引張応力も計算上小さくなっており、温度応力による強度の低下はほとんどない。このため、60°Cの実験においてプライマー塗布モルタルに引張応力が発生するもののその影響は小さく、モルタル単体の強度を下回ることにはなかった。一方、低温時には表面付近で 1 N/mm²程度の圧縮応力が発生するが、実験結果よりその影響は小さいと言える。

3.2 引張特性

有限要素解析を用いた逆解析により各ケースの引張強度と引張破壊エネルギーを同定した。なお、各ケース 6 体ずつ試験を行っているため、図-15 の A55-N 供試体のようにばらつきが存在する。このため、6 体の実験結果を Loess 曲線(図-15 の破線)によって平均化した曲げ応力-変位関係を算出し、この平均化曲線に対して逆解析を行う。

表層深さとプライマーによる引張強度の変化を図-16、温度による引張強度の変化を図-17 にそれぞれ示す。どのケースでも曲げ強度と同様の傾向を示している。図-18 に表層深さとプライマー、図-19 に温度による引張破壊エネルギーの変化をそれぞれ示す。図-18 より

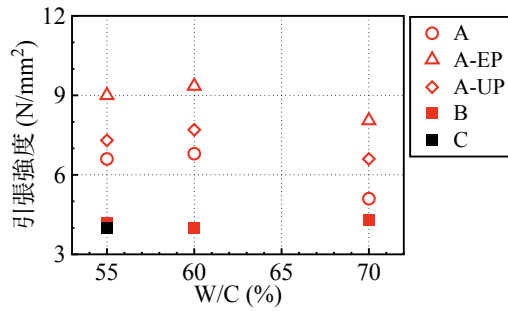


図-16 表層深さとプライマーによる引張強度の変化

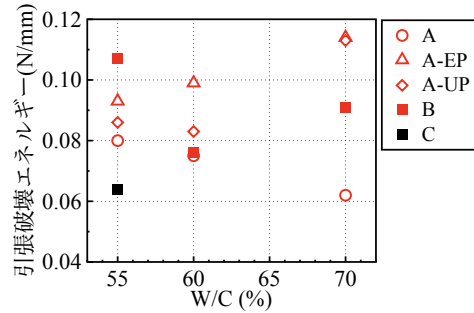


図-18 表層深さとプライマーによる引張破壊エネルギーの変化

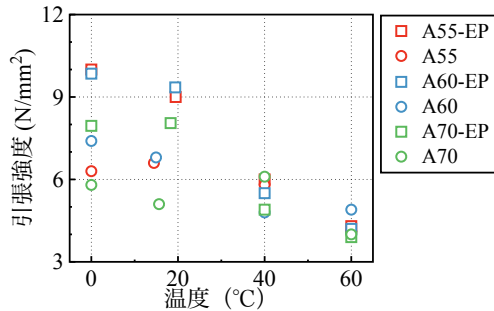


図-17 温度による引張強度の変化

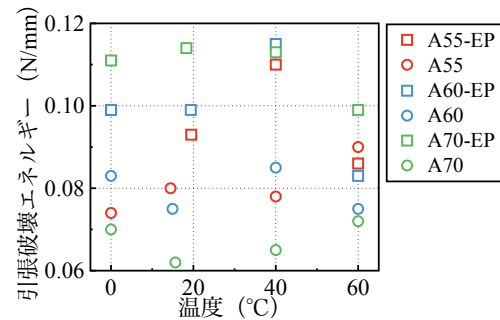


図-19 温度による引張破壊エネルギーの変化

プライマーを塗布した場合には W/C にかかわらず引張破壊エネルギーが増加した。表層深さによる差については明確な傾向は得られなかった。また、図-19 に示すように強度においては温度による大きな変化が見られたが、引張破壊エネルギーでは 60℃でプライマー塗布供試体のエネルギーが若干低下するものの、全体として温度による大きな差は見られなかった。

4. まとめ

本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) モルタルスキンは表層深さにより強度が異なり表面に近いほど曲げ強度は大きく強層となるが、水セメント比が 70%では深さの影響は小さい。
- (2) モルタルにプライマーを塗布することで曲げ強度と破壊エネルギーが増加した。また、W/C が大きいほど曲げ強度の増加幅も大きくなった。
- (3) 高温時はプライマーの弾性係数が低下することにより、プライマーによるモルタルの強度増加の効果も小さくなる。一方、温度が低下した場合は強度の変化は見られなかった。
- (4) FRP シートの剥離現象の解析に必要なモルタルスキンの引張構成則が得られた。

謝辞

実験へご助言いただいた名古屋大学三浦泰人准教授、川口貴之氏にお礼申し上げます。本研究は JSPS 科研費 JP23KJ2027 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 尾崎允彦, 佐藤靖彦, 吉田英二, 竹内彩, 山田雄太, 永島史晟: シート剛性に着目した CFRP シートとコンクリート間の付着耐力の評価, 土木学会論文集, Vol.79, No.6, 22-00289, 2023.6
- 2) Kreijger, P. C.: The skin of concrete composition and properties, *Materiaux et Constructions*, Vol.17, pp.275-283, 1984
- 3) Czarnecki, S., Sadowski, L.: Morphological properties of the cement skin: Understanding the effect of contact with formwork, *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01007, Mar.2022
- 4) 尾崎允彦, 佐藤靖彦: コンクリート表層破壊に着目した FRP シート剥離現象の再現解析, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.44, No.2, pp.817-822, 2022.7
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 2023
- 6) 菅原隆, 庄谷征美, 佐伯昇: コンクリートの表層強度に及ぼす各種要因の影響について, *コンクリート工学年次論文報告集*, 12-1, pp.245-250, 1990
- 7) Hordjik, D. A.: Local approach to fatigue of concrete, *Doctoral Thesis*, Delft University of Technology, 1991
- 8) 川上英男: コンクリートの引張強度に及ぼす粗骨材の影響, *福井大学工学部研究報告*, Vol.20, No.1, pp.31-38, 1972
- 9) 松沢晃一: コンクリートの強度特性に及ぼす温度環境の影響, *建築研究所年報*, 第 52 号, pp.9-10, 2017