

論文 破面解析によるポリマーセメントモルタルとコンクリートとの付着力学特性値向上の検討

佐藤 美穂*1・佐藤 あゆみ*2・山田 寛次*3

要旨：補修においては補修材と基盤コンクリートとの付着が極めて重要である。著者らは、付着の強度と破壊エネルギーを向上させるために、破壊靱性試験と破面解析により実験的な考察を行った。用いたのはポリマーセメントモルタル系材料で補修した梁型のコンクリート試験体である。ここでは補修材の曲げ強度と破壊エネルギーを様々に変えるために、市販の補修材の調合を変えた。実験の結果、付着に関する破壊エネルギーは一体打ちコンクリートを越えるものがあつたが、強度は半分であつた。ただし、破面の複雑さを向上させることで一体打ちを超える強度が出せる可能性があることを、モデルによって考察した。

キーワード：破壊力学、界面、強度、靱性、破壊エネルギー、引張軟化曲線

1. はじめに

コンクリート構造物は国土の基盤をなす重要なインフラであるが、これまでに蓄積された多くが経年に伴い、補修や補強の対象になっている。

それら工事の増大に伴い、土木建築材料分野でも補修に関する研究が増加している。しかし、その多くがコンクリートの耐久性向上に関するもので、中性化や鉄筋の錆に関連した研究、劣化のメカニズムを論じるもの、劣化メカニズムごとの補修の方法やその性能回復の程度を論じるものがほとんどである。新しい補修材料を適用する場合でも、超高強度繊維補強モルタルなどの無機系材料を用いたものが公表される以外、メーカーや建設会社独自の調合による補修材が開発されて、企業内の紀要²⁾に載せられるに留まる例が多い。

補修の際、補修部位の力学特性値が基盤コンクリートと同程度あると一体性の点から好ましい。しかし、コンクリートに補修材を塗布する時、界面または界面近傍のコンクリートの付着が弱いため、最終的な補修部位の力学特性値は低下してしまう。

著者らは、「ひび割れ誘導」というアイデアを基に、補修材側へひび割れ誘導を行うことで強度・靱性を自由にコントロールしつつその向上を図る、という新しい着想により研究を開始した³⁾。つまり、補修材を界面や基盤コンクリートよりも弱くしてひび割れを誘導し、かつそのパスを複雑に分岐させることで、エネルギー吸収を図るとともに、その効果で当該断面の耐力を向上させるのである。その着想については既に断面内応力分布モデルを用いた説明⁴⁾、FEM解析を用いた説明⁵⁾により公表している。ここで重要なのは、補修材料の強度を下げて、

さらにそのパスを複雑にするための材料設計を行うことである。その基本の材料には、補修材として使用量が多いポリマーセメントモルタルを用いた。

本研究は「ひび割れ誘導」に関する基礎的な知見を得るために、市販のポリマーセメント系補修材を変性してそれらの曲げ強度と破壊エネルギーを様々に変えた新しい補修材を作り、コンクリート試験体に適用して、実験を基に考察を行ったものである。考察に当たって、破面解析結果をもとに論じたことに特徴がある。

2. 実験概要

2.1 補修材試験体

本研究では、市販のアクリル粉末樹脂系プレミックスタイプのポリマーセメントモルタル(S社製、AFaと略記)をベースとして補修材の調合を変えた。Table 1に元のAFaの調合表を示す。AFaは既調合モルタルであるため変えるに当たり目安を得るために、0.15mmのふるいで粉体部をふるい分けして結合材(C)であると仮定し、残りを細骨材(S)であると仮定した。この仮定で計算すると用いたAFa調合は水セメント比(W/C)が50%、砂セメント比(S/C)が157%となる。

このAFaを基準とし、調合条件や養生方法を変化させ、計18水準設けた。試験体一覧をTable 2にまとめる。これらの中には、低強度化を狙ったもの、逆に高強度化、高靱性化を狙ったもの、その両方を狙ったものがある。同表でVFは体積含有率を示す。PP繊維、PVA繊維はいずれも直径100 μ mで、切断して長さ3mmとした。鋼繊維は0.31 $\times$ 0.50mmの断面のもので、直線タイプは長さ3mm、L形状タイプは辺長がそれぞれ3mmである。

*1 秋田県立大学 システム科学技術学部建築環境システム学科 (学生会員)

*2 熊本大学 自然科学研究科環境共生工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 秋田県立大学 システム科学技術学部建築環境システム学科 教授 (正会員)

Table 1 Mix proportion of original AFa

Name	W/C	S/C	W	Polymer mortar C	S
	(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	
AFa	50	157	342	684	1074

Table 2 AFa and its derivatives for repairing

Type	Name	Cure	Detail
Plain	AFa	W28	
	AFaS	S28	
Organic fiber	A3P	W28	PP fiber (VF=1.14%)
	A3PS	S28	
	A3VS	S28	PVA fiber (VF=1.14%)
Steel fiber	ASPW	W28	Straight fiber (VF=1.14%)
	ASPS	S28	
	ASPLS	S28	L-shaped fiber (VF=1.14%)
	ASPL2S	S28	L-shaped fiber (VF=1.5%)
Ca(OH) ₂	AFC	W28	(VF=7%)
	AFC2	W28	(VF=14%)
	AFC3S	S28	(VF=25%)
Sand	A5S	W28	Silica sand #5 (VF=20%)
	A5SS	S28	
	ASS	W28	Standard sand (VF=20%)
Combi- ned	APC3S	S28	PP fiber (VF=1.14%) Ca(OH) ₂ (VF=25%)
	AL5SS	S28	Steel fiber (VF=1.14%) Silica sand #5 (VF=20%)
	AP5SS	S28	PP fiber (VF=1.14%) Silica sand #5 (VF=20%)

養生は28日間20℃の水中(W28)または封緘(S28)にて行った。試験体寸法は全て4×4×16cmとし、試験体中央部に20mmの切り欠きを設け、3体ずつ準備した。

2.2 補修後試験体

補修後試験体の特徴を **Table 3** に示す。試験体寸法は10×10×40cm であり、あらかじめ打設して標準水中養生を終えた母材コンクリートの間に **Table 2** 中の補修材を挟みこむように打設して付着させた。また母材コンクリートには **Table 4** に示す調合を使用した。水セメント比は 50%，細骨材率(S/a)は 43%で、圧縮強度は W28 で 42.0MPa，割裂引張強度が 3.76MPa である。

試験体の形状は **Fig.1** に示す。中央部に補修材の付着層があり、粘着テープによって切欠を設けている。またリガメント部に対して H4c は打設後 1 日目に、H4d は打設後 8 時間で脱型してワイヤブラシで 1 分を目安に目荒らしを行うことで、目荒らしの程度を変えた。その結果、H4c は表面に細骨材が現れる程度(約 2mm)，H4d は粗骨材が現れる程度(約 5mm)の深さをもつ状態となった。

なお補修後の試験体は、実施工を考慮して S28 の養生を行って破壊靱性試験をした。このため基盤コンクリートは W28 と S28 の養生を受け、その時点では圧縮強度は 47.3MPa，割裂引張強度が 3.76MPa であった。

Table 3 Repaired concrete specimens

Name	Repair material	Roughening
H4cAFa	AFaS	
H4cA3P	A3PS	Shallow
H4cA5S	A5SS	
H4dAFa	AFaS	
H4dA3P	A3PS	
H4dASP	ASPS	Deep
H4dAFC2	AFC2	
H4dASPL2	ASPL2S	
H4dAP5S	AP5S	

Table 4 Mix proportion of substrate concrete for repair

W/C	S/a	W	C	S	G	Ad.
(%)	(%)	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
50	43	178	356	802	1083	1.78

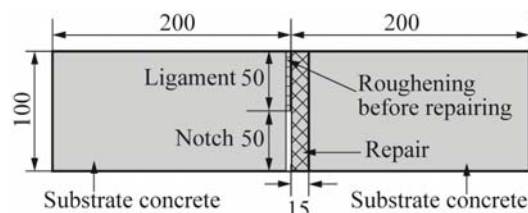


Fig. 1 Detail of repaired concrete specimen

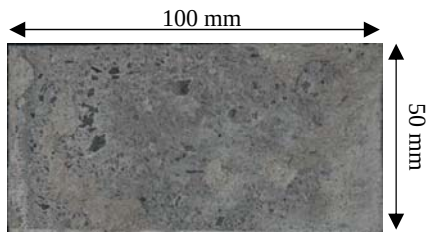
2.3 破壊靱性試験

補修材試験体、補修後試験体ともに油圧サーボ型試験機を用いて、試験体中央部に载荷した 3 点曲げによる破壊靱性試験を行った。この試験から荷重-変位曲線(P-CMOD 曲線)を求め引張軟化曲線(TSD)を導出し、材料の強度、破壊エネルギーについて評価した。

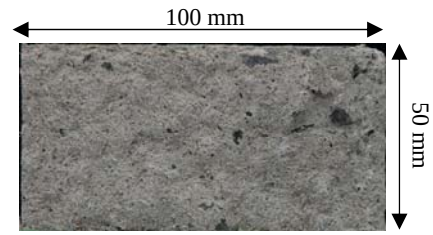
2.4 破面解析

破壊後の補修面について、目視により破面の分類を行った。このとき基盤コンクリートでは破壊しなかったので、界面剥離部、ボイド部、補修材破壊部と 3 つに分類した。本研究では補修材へのひび割れ誘導を目的にしているので、破面に占める補修材の割合(破壊面積率 ϕ)が評価項目となる。あわせて破面の高さ分布を非接触式レーザー三次元測定機により 20 μ m 間隔で測定した。その後間引きをして 200 μ m 間隔で三角メッシュを構成して、画像解析を行い、Rr1⁵⁾を測定した。Rr1 とは局所の曲率半径が 1mm 以下の部分が占める面積比であり、細骨材やセメントペーストの角張った部分が表面に現れている度合いのパラメータである。さらに破面の高さ分布を確率密度関数に表して、その標準偏差(Sd)⁵⁾を計算した。この値は破面の高さ分布のばらつき具合を表しており、小さいほど平滑な面を表すパラメータである。

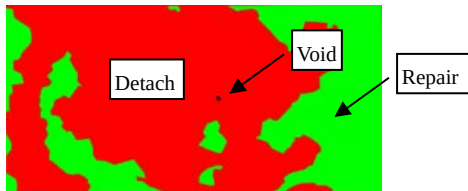
H4cA3P と H4dAP5S とを例に、以上の破面解析結果を、それらの基盤面の結果とともに、**Fig.2** に示す。



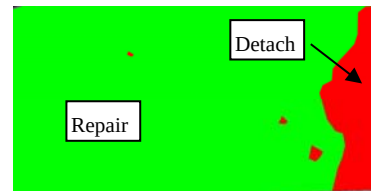
(a-1) Original photo of fractured surface (H4cA3P-1)



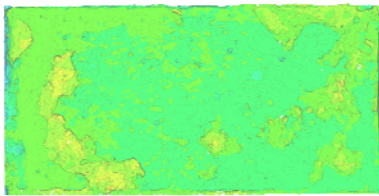
(b-1) Original photo of fractured surface (H4dAP5S-2)



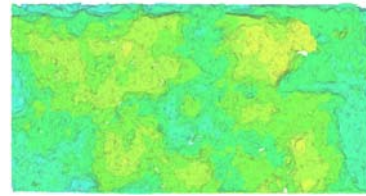
(a-2) Classified display to 3 parts (H4cA3P-1)



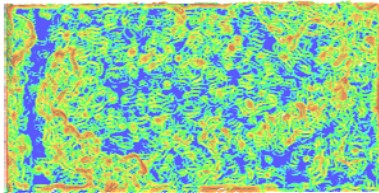
(b-2) Classified display to 3 parts (H4dAP5S-2)



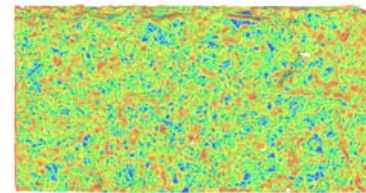
(a-3) Height distribution (H4cA3P-1)



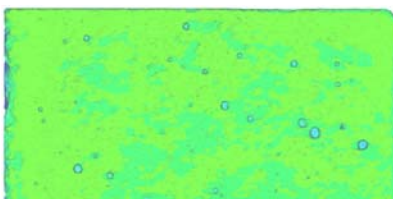
(b-3) Height distribution (H4dAP5S-2)



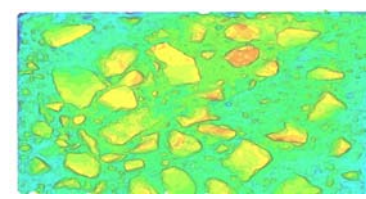
(a-4) Curvature distribution (H4cA3P-1)



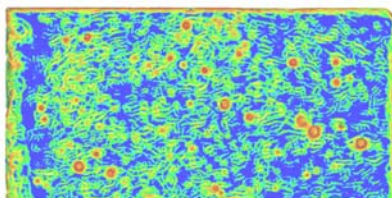
(b-4) Curvature distribution (H4dAP5S-2)



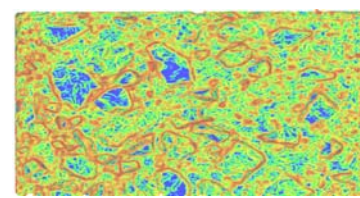
(a-5) Height distribution of substrate (H4cB4)



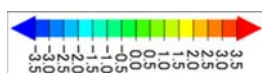
(b-5) Height distribution of substrate (H4dB17)



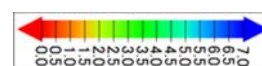
(a-6) Curvature distribution of substrate (H4cB4)



(b-6) Curvature distribution of substrate (H4dB17)



(c) Legend of height distribution



(d) Legend of Curvature distribution

Fig. 2 Height and curvature distributions of H4cA3P-1 and H4dAP5S-2, with the results of substrates for repairing

3. 実験結果

3.1 補修材試験体の力学特性値

Fig. 3(a)に, AFaを基準とした曲げ強度(Fb)と破壊エネルギー(GF)との向上の割合を示す。ここではそれぞれの水準の3体の平均値を示す。繊維を加えた水準ではGFの向上が大きいがFbの向上は少ない。骨材を加えた水準はほとんど効果がなく、水酸化カルシウム(CH)を加えた水準は想定通りFbが低下した。繊維と骨材またはCHとの複合効果を狙ったものはそれらの中間的な性能を示し、特別な複合効果は得られなかった。試験した中ではA3PSが最も良い性能を示した。

3.2 補修後試験体の力学特性値

Fig. 3(b)に, 補修材と同様にH4cAFaを基準として曲げ強度(Fb)と破壊エネルギー(GF)との向上の割合を示す。試験したすべての水準が基準のH4cAFaを上回った。

注目されるのは, 補修材では目立たなかった水準(H4dAFC2, H4dAP5S)で性能が向上している点である。

4. 考察

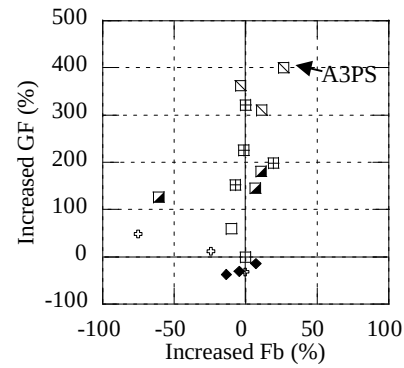
4.1 補修材の性能と補修後試験体の力学特性値との関係

Fig. 4に補修材の性能とそれで補修されたコンクリート試験体の性能との関係を示す。図から分かるように補修材の性能が高くなっても補修後試験体の性能には直結していないことが分かる。補修材の性能の61%を越える性能を発揮している補修後試験体はわずかである。特にFbとGFが高い領域で性能は頭打ちになっている。

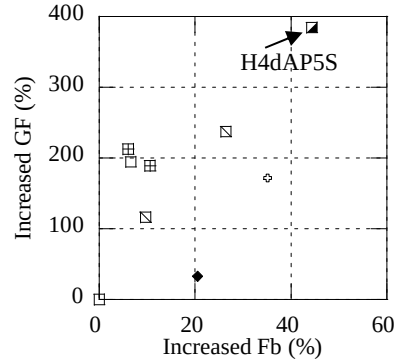
Fig. 5にAFaS, AP5SSおよびそれらで補修された補修後試験体の0.05mmまでの引張軟化曲線を示す。図から分かるように補修後試験体は補修材よりも結合応力は低いが発動が似ている。このことがFig. 4に示すように補修後試験体で61%程度の性能を表していることと符合する。また目荒らしの深いH4dAFaは, 浅いH4cAFaよりも結合応力が高くなっていることが分かる。

4.2 基盤面の凹凸と破面の凹凸との違い

Fig. 2(a-5,6)を観察すると, 基盤面での浅い目荒らしの場合, 細骨材レベルの凹凸が認められるが, Fig. 2(b-5,6)の深い目荒らしの場合, 粗骨材が現れている。これらと最終破面であるFig. 2(a-3,4), (b-3,4)とを比較すると, 高さでも曲率半径でも両者の間に関係は認められない。補修後試験体の性能を, 補修前の基盤コンクリートの破面解析パラメータ(白抜き)および最終破面のパラメータ(塗りつぶし)でプロットしたのがFig. 6である。Sdでは両者にあまり差がないのに対し, Rr1は基盤面よりも最終破面の方が低下しており, 全体的に滑らかになっていることが分かる。つまり目荒らし面の細かな凹凸に補修材が貫入して, それが残ったまま最終破面を形成したことが分かる。



(a) Increased Fb and GF from those of repair AFa



(b) Increased Fb and GF from those of repaired H4cAFa

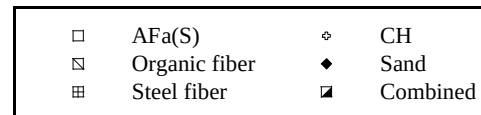


Fig. 3 Performance of repair and repaired interface

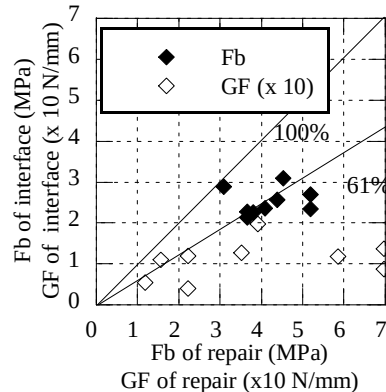


Fig. 4 Relation between properties of repair and interface

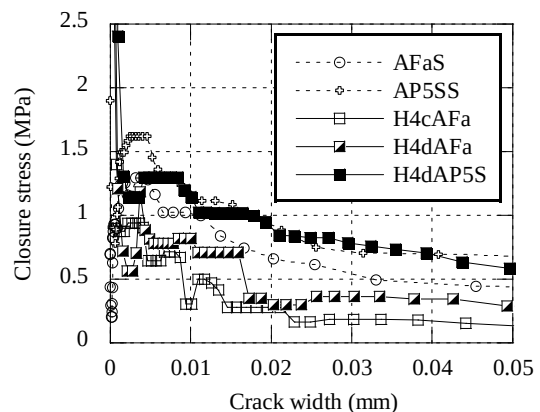


Fig. 5 Tension softening diagram of typical specimens

破面解析パラメータと性能との全体的な関係を見ると、**Fig.6(a, b)**から Fb では基盤面、最終破面とも一定の関係は見られない。しかし **Fig.6(c, d)**から GF では多少の関係があることが分かる。その相関係数は **Fig.6(c)**において Sd と GF との相関で基盤面に対して 0.66, 最終破面に対して 0.76 と差が出たが、**Fig.6(d)**において Rr1 と GF との相関で基盤面に対し 0.68, 最終破面に対し 0.69 と大差なかった。

以上は全体的傾向であるが、材料ごとに観察すると Fb でも破面解析パラメータとの相関関係は存在している。例えば、**Fig.6(a, b)**に赤で示す H4dASP は図に示すような傾向にある。これらの傾向が材料ごとに異なるため、全体的には無秩序な印象を与えているのである。それに対して、GF では強度ほどには材料ごとの差を受けないため、全体を通して一定傾向が見られたと考えられる。

なお既往の研究では、基盤面の凹凸に着目した研究⁶⁾と著者らのように最終破面に着目した研究⁵⁾があるが、本研究のような様々な調査を対象にする場合、最終破面と力学特性値との相関関係の方が強いといえる。

4.3 破壊面積率と補修後試験体の性能

Fig. 7 は、補修後試験体の破面で補修材の破壊部分が占める割合(破壊面積率 Φ)と、補修後試験体の性能との関係を見たものである。多くの試験体で Φ は80%以上となっており、ひび割れを補修材側に導入していることが分かる。しかし Fb においても GF においても Φ との相関関係は見られない。これは Φ が界面剥離か材料の破壊かを平面上で区別する指標に過ぎないため、高さやその変化の度合いを含んだ Sd, Rr1 などよりも相関関係が成り立ちにくいと考えられる。

Fig.7(a)に点線で示しているのが一体打ちの補修材 AFa, 実線で示しているのが基盤の一体打ちコンクリート H494 の物性値である。Fb においては、本研究では H494 と AFa の値を超えることができなかった。しかし GF においては H4dASP, H4dA3P, H4dAP5S で一体打ちコンクリートの値を上回る結果となった。

4.4 補修後試験体の付着強度向上方策

Fig.7(a)で注目したいのは、もともと基盤コンクリート H494 の Fb が 6.11MPa であるのに対し補修材 AFa の Fb が 4.09MPa と、補修材が弱くなっている点である。これだけの違いがあったことで、界面剥離はわずかで、しかも基盤コンクリート側を壊さなかった結果、平均的に H4cAFa で ϕ が 89.1%, H4dAFa で ϕ が 94.4%になったと考えられる。ただ補修材が弱くなればひび割れを誘導できないが、弱過ぎると界面強度もそれに伴って弱くなるため、そのバランスが重要であろう。

そのバランスを考える際に基礎となるのは局所的な引張強度であるが、Sd や Rr1 が大きい複雑な破面を形成

することで、投影面積当たりで評価した強度は大きくできると考えられる。

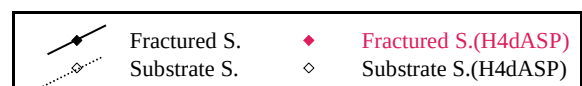
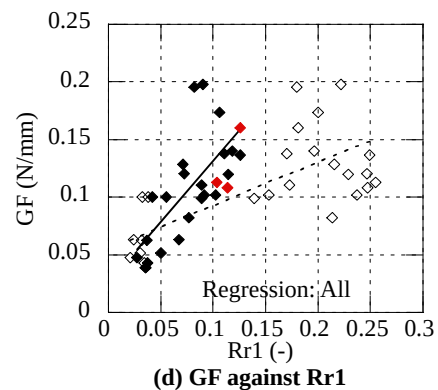
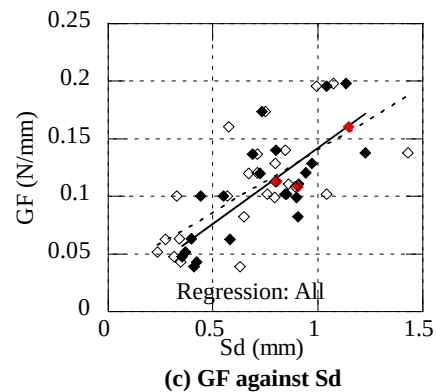
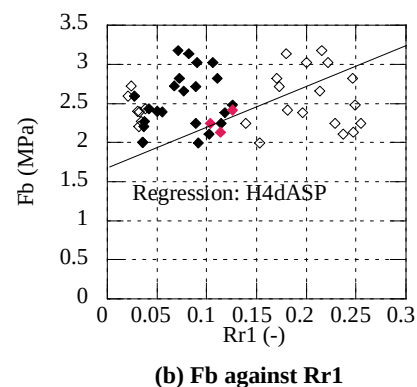
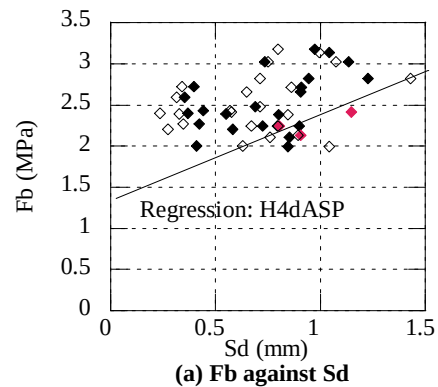
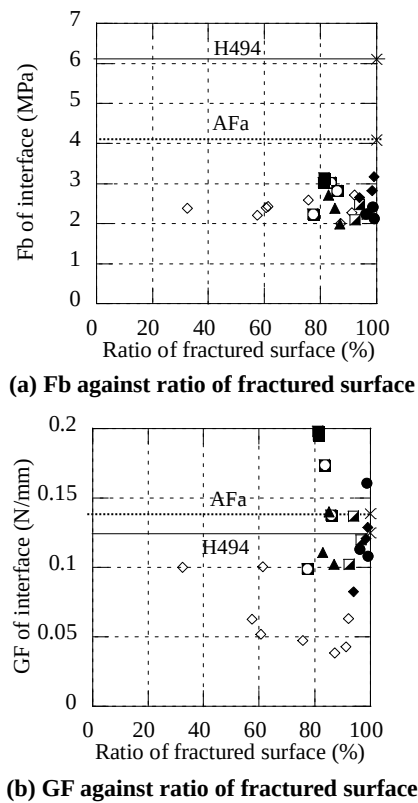


Fig. 6 Performance against fractographic parameters



◇	H4c series	◆	H4dAFC2
■	H4dAFa	▲	H4dASPL2
□	H4dA3P	■	H4dAP5S
●	H4dASP	×	Reference

Fig. 7 Mechanical properties as a function of ϕ

以上述べたバランスの取り方についてまとめたのが Fig.8 である。Fig.8(a)には試験体リガメントの界面近傍で投影面積 S をもつ局部を示す。これを引張部材にモデル化したのが Fig.8(b)で、界面は目荒らしにより実面積が増加し S_I になり、補修材は複雑なひび割れにより実面積が増加して S_R になっていることを表している。このとき、引張強度のバランスが式(1)のようでも、実面積によっては式(2)のように、ほぼ基盤コンクリートと同様の力に耐えられると考えられる。その際に鍵になるのは、破面解析パラメータのうち、投影面積と実破面面積との比(面積割増率 R_s)⁷⁾であるが、本研究の S_d , R_{r1} は R_s と密接に関連している⁵⁾。従ってこれらと材料との関係を解明することで式(2)の条件を見出すことが出来よう。

$$\sigma_S \geq \sigma_I \geq \sigma_R \quad (1)$$

$$S \cdot \sigma_S \cong S_I \cdot \sigma_I \cong S_R \cdot \sigma_R \quad (2)$$

5. まとめ

市販のポリマーセメントモルタルを変性した補修材を用いて界面付着の力学特性値向上の検討を行った。5号珪砂と PP 繊維を調合した水準で補修したとき、最も

高い力学性能を示し、GF は一体打ちコンクリートの 1.6 倍程度(200N/m)であるが、Fb は半分程度(3MPa)である。

このような界面を持つ材料の強度は破壊面積率と破面の複雑さなどで決まると考えられる。本研究の結果、破壊面積率は 100%に近いが、破面の複雑さは、まだ向上の余地があり、この面の検討で一体打ちに迫る強度が出せる可能性があると考えられる。

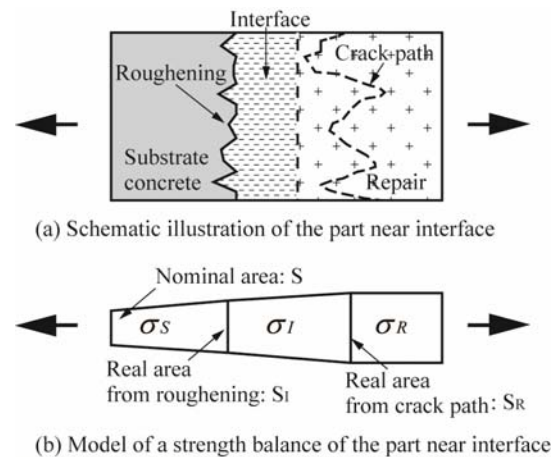


Fig.8 Schematic illustration of strength balance concept

参考文献

- 例えば、国枝稔, 上田尚史, 中村光, Seung-Chan L. : 超高強度ひずみ硬化型モルタルを用いた表面保護工の補修効果, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.12, pp.31-38, 2012.11
- 例えば、神谷雄三, 福島祐一, 徳永健二, 木元大輔 : 断面修復材「アーマ・シリーズ」の諸性能(その 2), 三菱マテリアルセメント研究所研究報告, No.14, pp.81-90, 2013.01
- 山田寛次, 石山智, 佐藤あゆみ: ポリマーセメントモルタルによるコンクリート補修部位の力学特性値向上に関する考察, 日本建築学会東北支部研究報告集構造系第 76 号, pp.159-162, 2013.6
- 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: 鉛直打継ぎ面をもつコンクリート梁の断面内応力分布モデルの提案, コンクリート工学年次論文報告集, vol.30, No.1, pp.399-404, 2008.7
- 佐藤あゆみ: 非均質性を考慮したコンクリートの破面解析の提案, 博士論文, 2012.3
- Zhang, D. W., Furuichi, H. and Ueda, T.: Optimum treatment of PCM-concrete interfaces, Proceedings of FraMCoS-7, pp.1227-1232, May 2010
- 三橋博三: 骨材粒径を変えたコンクリートの破面解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 453 号, pp.1-7, 1993.11