

論文 バサルト製メッシュを接着した RC 梁のせん断補強効果に関する実験

盛岡 諒平*¹, 角掛 久雄*², 田村 悟士*³

Experimental Study on Reinforcement Effect of RC Beam Bonding Basalt Fiber Mesh

Ryohei MORIOKA*¹, Hisao TSUNOKAKE*² and Satoshi TAMURA*³

要旨： バサルト繊維をネット状に加工したバサルト製メッシュは、現在、剥落防止を目的としてコンクリート橋に接着して使用されている。しかし、その補強効果については考慮されていないため、本研究では2種類の接着剤を使用し、RC梁にバサルト繊維を接着した時のせん断補強効果について、荷重試験により検討を行った。その結果、せん断補強効果が認められたが、使用する接着剤の性質によりバサルト製メッシュの作用が異なった。また、既存の連続繊維シートのせん断耐力算定式を用いてバサルト製メッシュに対する適用性について検討した。

キーワード： バサルト製メッシュ, RC梁, 接着剤, 補強効果, 曲げせん断荷重

1. はじめに

バサルト繊維は天然由来の玄武岩を熔融することで製造され、高い引張強度と優れた耐火性を持つ繊維である。様々な形で土木分野への適用が検討されており、プレートに加工してトンネル覆工を補強した事例¹⁾や、著者らはバサルト短繊維をモルタルに混入しFRCCとする研究²⁾を行ってきた。このバサルト繊維をネット状に加工し成形したものがバサルト製メッシュである。現在、バサルト製メッシュはコンクリート橋に接着することで剥落防止を目的とした使用実績があり、図-1に剥落防止を目的にバサルトメッシュを接着した施工例を示す。ただし、実設計においては、剥落防止ネットによる補強効果は考慮されていない。バサルト繊維は引張強度が高いため、バサルト製メッシュは補強材として使用できる可能性がある。また、ネット状であるため透明な接着剤を適用することで連続繊維シートと比べ、ひび割れの目視確認が可能であるという利点もある。しかし、バサルト製メッシュによる補強効果につい

ては、モルタル中に埋め込むことにより補強した研究例³⁾がある程度で、接着することによる補強効果に関する研究例はない。

そこで、本研究では成形状態の異なる2種類の剥落防止に用いるバサルト製メッシュを接着したRC梁のせん断補強効果を検討するため、2種類の接着剤を用いて、RC梁の荷重試験を行った。

2. 実験概要

図-2に作製した供試体の概要を示す。また、供試体作製に使用したコンクリートの配合を表-1に、コンクリート（呼び強度21MPa, 最大骨材径15mm,



図-1 バサルト製メッシュの施工例

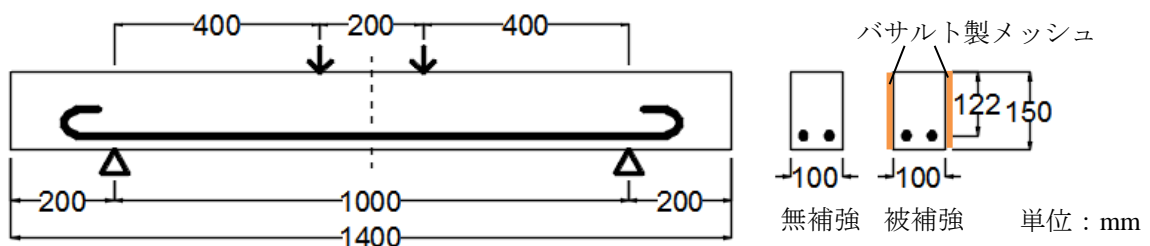


図-2 供試体概要

*1 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 修士課程

*2 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 准教授

*3 (株)アイゾールテクニカ

表-1 コンクリート配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
15	58	50.6	180	310	899	895	2.79

表-2 コンクリートと鉄筋の材料特性

コンクリート	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂引張強度 (MPa)
	21.9	18.3	1.90
鉄筋 D16	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強さ (MPa)
	575	194	763

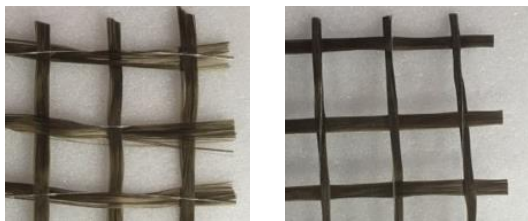
表-3 メッシュの物性値

	バサルトメッシュa	バサルトメッシュb
断面積(mm ²)	0.31	0.32
目付量(g/m ²)	1.30	1.35
引張強度(MPa)	773 (sd : 120)	1402 (sd : 96)
弾性係数(GPa)	80.5 (sd : 6.8)	77.9 (sd : 5.6)
破断ひずみ(μ)	9474 (sd : 776)	18000 (sd : 384)

注 : (sd :) は標準偏差

表-4 実験パラメータ

供試体名	接着剤	メッシュ種類
無補強	—	—
エポキシ-a	エポキシ樹脂	バサルトメッシュa
アクリル-a	アクリル エマルジョン樹脂	バサルトメッシュa
エポキシ-b	エポキシ樹脂	バサルトメッシュb



(a) バサルトメッシュ a (b) バサルトメッシュ b

図-3 バサルト製メッシュ

スランブ 21.7cm) と鉄筋 (D16 : SD490) の材料特性を表-2 に示す. この供試体を 4 体作製し, 1 体は無補強とし, 残りの 3 体にバサルト製メッシュを接着することで被補強供試体とした. なお, せん断補強効果を検討するため, 側面のみに接着している. バサルト製メッシュの接着は, 側面の支点間とその外側 100mm までの計 1200mm の区間の全高さについて行った. 接着剤には, 剥落防止用途として使用実績のあるアクリルエマルジョン樹脂 (コンクリート表面の目視可) と従来から FRP 用樹脂として使用されているエポキシ樹脂 (コンクリート表面の目視不可) を使用した. エポキシ樹脂は引張強度が規格値 30MPa 以上と大きく, アクリルエマルジョン樹脂は規格値としては明確にされていないが, エポキシ樹脂より強度が低いと想定され, それぞれ硬質型, 軟質型の接着剤と呼ぶ. バサルト製メッシュ接着時の接着剤の塗布量は, それぞれの剥落防止用途での規定量を採用し, アクリルエマルジョン樹脂は下塗り 0.15kg/m², 中・上塗りで 0.70kg/m², エポキシ樹脂は下塗り 0.15kg/m², 中・上塗りで 1.0kg/m² とし



図-4 メッシュを接着した供試体 (アクリル-a)

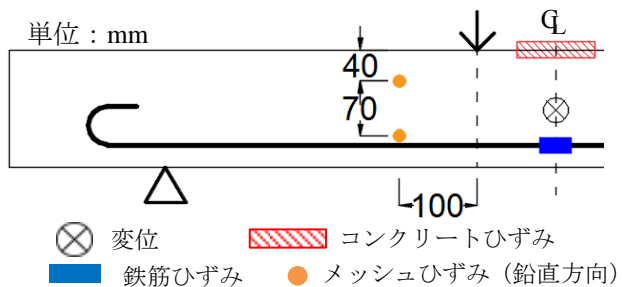


図-5 計測位置

た. また, 補強するバサルト製メッシュに関しては成形状態の異なる 2 種類を使用した. 糊付けによるサイジング処理のみを行い, 成形後に折り曲げ可能なものをバサルトメッシュ a, サイジング処理の後, エポキシ樹脂で樹脂含浸することにより折り曲げが不可能なものをバサルトメッシュ b とした. それぞれのバサルト製メッシュを図-3 に, 物性値を表-3 に示す. バサルト製メッシュの物性値については, それぞれのバサルト製メッシュ 1 束分について 5 体ずつ引張試験を行った値の平均値とした. 2 種類のバサルト製メッシュの違いは樹脂含浸の有無のみであるが, バサルトメッシュ a の引張強度や破断ひずみは, バサルトメッシュ b の半分程度であった. これは, バサルトメッシュ b は樹脂含浸により繊維 1 束分が一体化しているため, 引張試験時にそれを均一に引っ張ることができたのに対し, バサルトメッシュ a は樹脂含浸をしておらず, 繊維同士が結束していないことから, 均一に引っ張ることができなかったため, 一部の繊維が先行して破断したことが原因であると考えられる. このことにより, バサルト

メッシュ a の引張強度および破断ひずみは小さくなった可能性があり、バサルトメッシュ a の引張強度や破断ひずみは、バサルトメッシュ b のそれらに比べ標準偏差（ばらつき）が大きくなった。また、バサルト製メッシュ接着後の供試体の一例（アクリルエマルジョン樹脂、バサルトメッシュ a 使用）を図-4 に示す。

表-4 に実験パラメータをまとめたものを示す。無補強供試体と被補強供試体を比較し補強効果を評価する。また、エポキシ-a とエポキシ-b の比較より、バサルト製メッシュの成形状態による補強効果の違いを、エポキシ-a とアクリル-a の比較より、接着剤による補強効果の違いを評価する。試験は 4 点載荷試験とし、計測は荷重、中央たわみ、スパン中央のコンクリート、鉄筋ひずみおよびバサルト製メッシュひずみ 4 箇所について行った。計測位置については図-5 の通りであるが、メッシュのひずみに関しては、鉛直方向の繊維を計測しており、供試体の左側のみに対角になるようにひずみゲージを配置した。

3. 実験結果と考察

表-5 に実験耐力（実験時最大荷重）、目視確認時の斜めひび割れ発生荷重およびそれらの増分を、図-6 に荷重-中央変位関係を示す。図-7 には終局時のひびわれ分布状況を示す。なお、どの供試体についても主鉄筋は降伏せず、せん断破壊した。

3.1 成形状態の違い

バサルト製メッシュの成形状態による補強効果の違いを評価する。エポキシ-a とエポキシ-b を比較すると、表-5 より無補強からの実験耐力増分や斜めひび割れ発生荷重は同程度であり、図-6 より荷重-中央変位関係も類似していることがわかる。また、破壊形式に関しても斜めひび割れをバサルト製メッシュが抑制することで、ともに下面において鉄筋に沿ったせん断付着破壊となった。さらに、図-7 より終局時のひびわれ分布状況を比較してもひびわれ性状に明確な差異は見られない。これらのことから、エポキシ-a とエポキシ-b はメッシュの引張強度が 2 倍程度異なるにも関わらず、補強効果は同様であると言える。これは、バサルトメッシュ b の成形のため

の樹脂含浸にエポキシ系の樹脂を使用していることが一つの要因と考えられる。一般的なシート系の補強においては樹脂含浸されたシートを用いるため、接着剤（樹脂）の耐力への寄与は小さい。そのため、バサルトメッシュ b でも接着剤の寄与は小さいと考えられる。しかし、バサルトメッシュ a は、樹脂含浸されていない。つまり、バサルトメッシュ a を接着する際に用いるエポキシ樹脂がメッシュの中まで入り込むことで、バサルトメッシュ b と同様に硬質型のメッシュのような状態となり、結果的に補強効果も類似したものになったと考えられる。

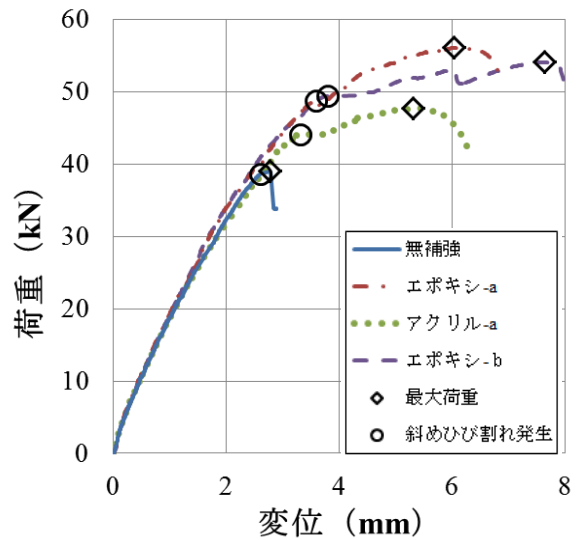


図-6 荷重-中央変位関係

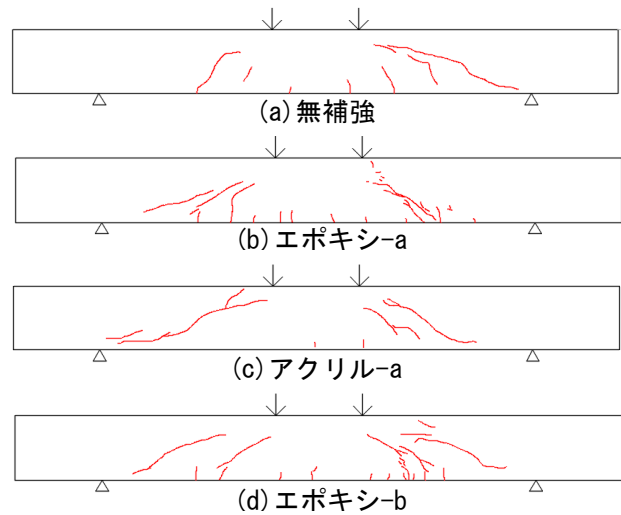


図-7 終局時ひび割れ分布状況

表-5 実験耐力と斜めひび割れ発生荷重およびそれらの増分

供試体名	実験耐力 (kN)	実験耐力増分 (kN)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	斜めひび割れ発生荷重増分 (kN)	破壊形式
無補強	39.0	—	38.7	—	斜め引張破壊
エポキシ-a	56.1	17.0	48.8	10.1	せん断付着破壊
アクリル-a	47.7	8.7	44.1	5.4	斜め引張破壊
エポキシ-b	54.1	15.1	49.4	10.7	せん断付着破壊

3.2 接着剤の違い

バサルト製メッシュの接着に用いた樹脂による補強効果の違いを評価する。エポキシ-a とアクリル-a を比較すると、ともにせん断補強効果がある結果となったが、その効果の大きさや特性は大きく異なることがわかる。表-5 よりエポキシ-a の無補強と比較したときの実験耐力増分および斜めひび割れ発生荷重増分は、アクリル-a のそれらに比べて2倍程度大きくなっている。また、破壊形式についても、アクリル-a は斜め引張破壊であったのに対し、エポキシ-a は補強効果が大きく、斜めひび割れの拡大が抑えられ供試体下面のせん断付着破壊となった。これらの違いは接着剤の性状によってバサルト製メッシュの作用が異なるためであると考えられる。

そこで、バサルト製メッシュの挙動を検討するために、図-8 に荷重-バサルト製メッシュひずみ（供試体表側の左上）関係を示す。斜めひび割れ発生により、ひずみが大きく伸びていることから、バサルト製メッシュがせん断補強筋の様に抵抗していることがわかる。ただし、接着剤の違いで特性が大きく異なっている。エポキシ樹脂を用いた供試体に関してはどちらも斜めひび割れの発生とともに急激にバサルト製メッシュのひずみが伸びているのに対して、アクリル-a では、荷重が 40kN 程度から徐々にひずみが伸びはじめ、目視レベルでの斜めひび割れ発生付近で、より急激にバサルト製メッシュのひずみが伸びていた。この違いが生じるのは、接着剤の硬化特性が硬質型か、軟質型かの違いによる影響であると考えられる。硬質型のエポキシ樹脂はバサルト製メッシュと一体化し擬似的に FRP 化し、面的効果を発揮していると考えられる。それに対して、軟質型のアクリルエマルジョン樹脂で接着した場合は、ほぼ繊維のみで抵抗していると考えられる。その例として、図-9 に終局時の斜めひび割れ位置でのバサルト製メッシュの状況を示す。エポキシ-b では、コンクリートの斜めひび割れとメッシュの破断面が一致していることから、バサルト製メッシュとエポキシ樹脂が一体となり破断していることが推測される。一方、アクリル-a ではバサルト製メッシュがほとんど破断せず、それぞれの束が伸びている（除荷後は部分的に浮いている）ことがわかる。この接着剤の硬質型か軟質型かによるバサルト製メッシュの作用の違いが、せん断補強効果や斜めひび割れ発生荷重、破壊形式に影響を与えたと考えられる。

また、図-7 より、接着剤の違いは終局時のひび割れ分布状況にも影響していることがわかる。エポキシ樹脂でバサルト製メッシュを接着したエポキシ-a とエポキシ-b は、無補強やアクリル-a より曲げひび

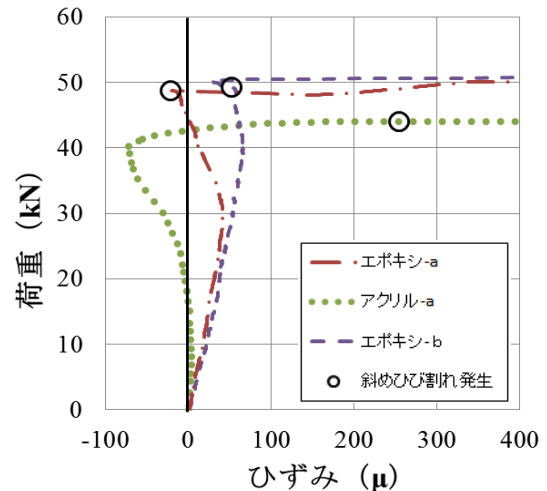


図-8 荷重-メッシュひずみ関係



(a) エポキシ-b

(b) アクリル-a

図-9 終局時のバサルト製メッシュの状況

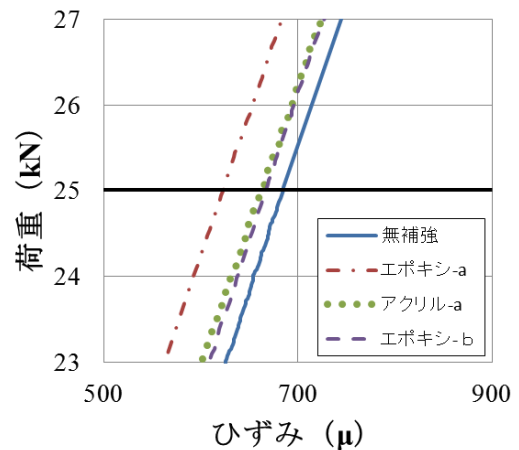


図-10 荷重-鉄筋ひずみ関係

割れや斜めひび割れが分散していることがわかる。これは、無補強やアクリル-a はひび割れが局所化するのに対し、エポキシ樹脂で接着した供試体は、樹脂とバサルト製メッシュが一体となり抵抗することで、ひび割れ幅の拡大が抑制された結果、ひび割れが分散したと考えられる。エポキシ樹脂で接着した供試体については、曲げひび割れのひび割れ幅抑制に、水平方向に配置されたバサルト製メッシュが効果を発揮していると言える。これらのことは、図-6 の荷重 28kN 程度からの剛性（傾き）の違いにも影響していると考えられる。

3.3 使用状態のバサルト製メッシュの効果

前節で曲げひび割れへの影響が見られたことから、使用状態におけるバサルト製メッシュの曲げ挙動への効果についても検討してみる。そのために、**図-10**に荷重-鉄筋ひずみ関係を示す。なお、この鉄筋のひずみは、スパン中央における2本の主鉄筋の平均値である。ただし、使用状態で比較することとして、鉄筋の許容応力度 140MPa のとき、つまり鉄筋ひずみは 700μ であるため、**図-10**には、 700μ 前後のひずみの範囲のみ示した。ひずみが 700μ 程度に到達する荷重 25kN の点に着目すると、無補強の供試体に比べ、被補強供試体ではひずみが小さくなっている。これは、供試体と水平方向に配置されたバサルト製メッシュが鉄筋の負担する引張力の一部を受け持っているからであると考えられる。ただし、鉄筋ひずみは局所的な値であり、ひび割れの影響を受ける。中央付近に曲げひび割れが発生しているアクリル-a、エポキシ-b と発生していない無補強、エポキシ-a での相異があるのは当然である。そのことも踏まえてみると、中央付近に曲げひび割れが発生しているアクリル-a とエポキシ-b は類似しているが、ひび割れの発生していない無補強よりもひずみは小さい。また、中央付近に曲げひび割れの生じていないエポキシ-a は、より小さなひずみとなっていた。ひび割れの発生に伴い、接着剤は破断することにより、水平方向のメッシュのみで抵抗するため、アクリル-a とエポキシ-b は相似なひずみとなっていると考えられる。エポキシ-a のひずみが小さくなっているのは、ひび割れが発生していないため、エポキシ樹脂とバサルト製メッシュが一体となって水平方向に抵抗しているものと考えられる。**図-6**の荷重-変位関係より曲げ剛性としての寄与はほとんどないものの、引張抵抗もバサルト製メッシュが受け持つことになり、幾分か鉄筋の作用応力を低減できることが確認された。

3.4 耐力算定

次に、せん断耐力算定式について考察する。**表-6**の算定耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に規定された棒部材の設計せん断耐力の設計式(安全率:1.0)を用いて計算した。特に、バサルト製メ

ッシュ補強によるせん断耐力増分 V_{cb} については、バサルト製メッシュをせん断補強筋と見立てて、供試体の鉛直方向に配置されたバサルト製メッシュがせん断に抵抗すると仮定して、式(1)で算定した。

$$V_{cb} = A_b \cdot f_{bu} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot z/s \quad (1)$$

ただし、

A_b : 区間sの鉛直方向バサルト製メッシュ断面積

f_{bu} : バサルト製メッシュ引張強度

α : バサルト製メッシュと部材軸とのなす角度

z : 圧縮応力の合力の作用位置からの距離

s : バサルト製メッシュのピッチ

表-6をみると、式(1)より算定したバサルト製メッシュ補強によるせん断耐力増分 V_{cb} は、アクリル-a やエポキシ-b では概ね評価できているが、エポキシ-a では実験によるバサルト製メッシュ補強によるせん断耐力増分 V_{pb} が、算定したバサルト製メッシュ補強によるせん断耐力増分 V_{cb} の2倍程度となった。また、エポキシ-b と同程度の耐力増分となった。これは、3.2節で述べたように硬質型のエポキシ樹脂により接着したことで、バサルトメッシュ a の b 化および面的に抵抗していることが要因と考えられる。

また、アクリル-a についてはひび割れ付近で、部分的にメッシュの接着剤が剥がれ、メッシュの破断には至っていない。そのため、鉛直方向のメッシュの引張強度までせん断抵抗に対して機能していない。つまり、どのパターンにおいても水平方向のメッシュもせん断耐力に多少は寄与していると考えられる。そこで、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⁵⁾の連続繊維シートにより補修補強された棒部材の設計せん断耐力の適用を検討する。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における、連続繊維シート補強によるせん断耐力増分式 V_{fd} を式(2)に示す。

$$V_{fd} = K \cdot [A_f \cdot f_{fud} \cdot (\sin \phi + \cos \phi) \cdot z/sf] \quad (2)$$

ただし、

K : 連続繊維シートのせん断補強効率

A_f : 区間sfにおける連続繊維シート総断面積

f_{fud} : 連続繊維シートの設計引張強度

ϕ : 連続繊維シートが部材軸とのなす角度

sf : 連続繊維シートの配置間隔

表-6 コンクリート標準示方書設計式による算定耐力および実験耐力

供試体名	算定耐力 (kN)			実験耐力 (kN)			メッシュ耐力比
	V_{cc}	V_{cb}	V_c	V_{pc}	V_{pb}	V_p	V_{pb}/V_{cb}
無補強	30.3	-	30.3	39.0	-	39.0	-
エポキシ-a	30.3	8.1	38.4	39.0	17.0	56.1	2.10
アクリル-a	30.3	8.1	38.4	39.0	8.7	47.7	1.07
エポキシ-b	30.3	15.3	45.6	39.0	15.1	54.1	0.98

※注

V_{cc} : RC 梁が受け持つ算定せん断耐力

V_{cb} : メッシュ補強の算定せん断耐力増分
(コンクリート標準示方書準用)

V_c : 補強後の算定せん断耐力

V_{pc} : 無補強供試体実験せん断耐力

V_{pb} : メッシュ補強の実験せん断耐力増分

V_p : 補強後の実験せん断耐力

表-7 実験耐力と一致するせん断補強効率

供試体名	実験耐力増分	算定耐力増分(K=1)	せん断補強効率
	V_{pb}	$A_{ba} \cdot f_{bu} \cdot z/s$	K
エポキシ-a	17.0	16.2	1.05
アクリル-a	8.7	16.2	0.53
エポキシ-b	15.1	30.6	0.49

ここで、 K は、連続繊維シートの強度や弾性係数、コンクリートの圧縮強度などより求められる実験式であり、0.4~0.8となる。

式(2)は炭素繊維やアラミド繊維を対象としたものであり、バサルト繊維に適用された式ではない。そのため、適用に関してもせん断補強効率 K と鉛直と水平の2方向のバサルト製メッシュの断面積を考慮して検討することとした。今回の実験で使用したバサルト製メッシュは直交タイプで、水平方向に配置されたバサルト製メッシュが部材軸と平行であることを踏まえて、式(2)を以下の式(3)のように変更して K の値を検討する。

$$V_{fb} = K \cdot [A_{ba} \cdot f_{bu} \cdot z/s] \quad (3)$$

ただし、

K : せん断補強効率

A_{ba} : $s \times s$ におけるバサルト製メッシュ総断面積

$s \times s$ におけるバサルト製メッシュ総断面積 A_{ba} は供試体に鉛直方向と水平方向のバサルト製メッシュの断面積を両方考慮した断面積となっている。つまり、 $K=1$ とすれば、鉛直方向と水平方向のバサルト製メッシュ両方の全強度分のせん断補強効果があり、 $K=0.5$ とすれば、鉛直方向と水平方向の効果は強度に対して半分しかないということであり、算定時は $K=1$ と考えると、式(1)および表-6の算定値のように、鉛直方向のバサルト製メッシュのみ考慮すれば良いと簡易化することも出来る。式(3)を適用し、バサルト製メッシュ補強によるせん断耐力増分を実験耐力増分と一致させる K の値を算出し、表-7に示す。エポキシ-aは $K=1.05$ 、アクリル-aでは $K=0.53$ 、エポキシ-bでは $K=0.49$ となった。アクリル-aとエポキシ-bでは式(2)での K の適用範囲内であり、エポキシ-aは適用範囲以上の値となった。つまり、既存の式に準拠した場合、2方向の繊維を考慮することが妥当であると考えられる。

また、バサルトメッシュaとbで目付量がほぼ等しいことから、同一接着剤で接着した場合は、繊維量で耐力増分が決定されることも考えられる。さらに、斜めひび割れの発生角度により、鉛直と水平方向のメッシュが分担する引張応力の割合が変わってくると考えられる。ただし、供試体数が少なく、エポキシ樹脂で接着した供試体は破壊形式がせん断付

着破壊であったため、斜め引張破壊に対しては実際のせん断補強効果は更に高いことも想定される。そのため、斜め引張破壊になるような供試体で更なる実験を行うことで、せん断補強効率 K の値を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、バサルト製メッシュを側面に補強したRC梁の載荷試験を実施し、その補強効果について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) バサルト製メッシュを側面に接着することで、RC梁のせん断耐力および斜めひび割れ発生荷重が向上した。
- (2) 本研究で使用したバサルト製メッシュでは、接着剤が硬質型か軟質型かで、メッシュの作用は大きく影響され、耐力向上効果や破壊時の特性に違いが生じた。
- (3) 使用時における水平方向のバサルト製メッシュは曲げ引張抵抗を受け持ち、幾分か鉄筋の作用応力を低減していることが確認された。
- (4) 連続繊維シートの設計式を参考に、せん断補強効率 K を用いることで、バサルト製メッシュの受け持つせん断耐力を概ね評価できるが、その効率については、更なる検討が必要である。

謝辞

(株)JCKの稲垣廣人様および榎屋ティスコ(株)の高見肇様には、試験の実施に際しましてご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田中徹, 岡野法之, 小島芳之: バサルト繊維補強プレート帯板接着工法の開発と現場適用, 土木学会第67回年次学術講演会, VI-333, pp. 665-666, 2012
- 2) 盛岡諒平, 藤原資也, 角掛久雄, 鬼頭宏明: バサルト繊維を用いたFRCCの基本特性に関する基礎的研究, 土木学会第70回年次学術講演会, V-632, pp. 1263-1264, 2015
- 3) 佐藤大地, 岩下健太郎, 稲垣廣人, 高見肇: エポキシ樹脂で付着確保したBFRPメッシュ補強モルタルの曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 307-312, 2013
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2012
- 5) 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 第101号, pp. 307-312, 2000