

論文 BFRP シート接着により補強した遠心力鉄筋コンクリート管の耐荷性能に関する解析的研究

岩下 健太郎*1

要旨： バサルト繊維シート（以後、BFRP シートと呼称）を接着補強した遠心力鉄筋コンクリート管（以後、RC ヒューム管と呼称）の耐荷性能が青山の研究³⁾において実験的に検証された。本研究では、耐荷性能に及ぼす BFRP シートの補強量、接着材の有無、そして RC ヒューム管に用いられたコンクリートの圧縮強度の影響について明らかにすることを目的として、これらをパラメータとした FEM による耐荷力解析を行った。その結果、これらのパラメータを考慮した BFRP シート補強による剛性や耐荷力の向上効果に関する解析結果は、概ね実験結果と同様の傾向にあった。

キーワード： BFRP シート, RC ヒューム管, 耐荷性能, FEM, 補強量, 接着材

1. はじめに

FRP シート接着補強技術は、長期供用により老朽化し、損傷が生じた橋梁や橋脚等を中心に、広く採用されるに至っている^{1), 2)}。そして、遠心力鉄筋コンクリート管（以後、RC ヒューム管と呼称）に対しても、高伸度性に優れたアラミド繊維シートによる補強に関して多くの施工実績がある。しかし、その補強効果に関する研究はほとんど行われていない。そこで、青山³⁾は高伸度性に優れた耐荷性能等に関する研究が進められているバサルト繊維シート（以後、BFRP シートと呼称）に着目し、その接着による RC ヒューム管に対する耐荷性能について実験的に検証した。この研究において、補強量や接着材の有無といった要素の影響を考慮されつつ実験的に検証され、従来の RC ヒューム管の耐荷力に関する簡易算定式による評価も行われた。その結果、算定結果と概ね同様の補強効果が得られることや補強量に応じて補強効果が高まること、そして接着材を一部分にしか使用せず、BFRP 補強面の 70% 程度の面積が接着されていない状況でも補強効果は同程度に得られる傾向が示された。

本研究では、この青山の研究³⁾を参照し、BFRP シートを接着することによる RC ヒューム管の耐荷性能を FEM による耐荷力解析により検証することで、補強量や接着材の有無、そして管に用いられたコンクリートの圧縮強度が FRP シート接着 RC ヒューム管の耐荷力に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。

2. BFRP シート補強 RC ヒューム管の耐荷性能に関する実験の概要³⁾

2.1 実験方法

青山の研究³⁾において実施された実験の概要について述べる。本体径 $\phi 200\text{mm}$ 、壁厚 40mm 、全長 2000mm の中空円筒形状の RC ヒューム管が使用された。図-1 に

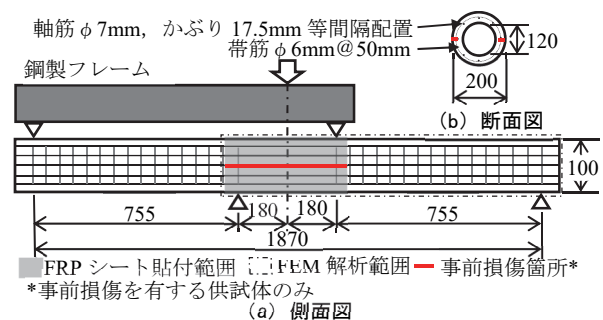


図-1 RC ヒューム管供試体の詳細

表-1 鉄筋の物性値一覧

特性	軸筋	帯筋
直径 (mm)	7	6
引張降伏強度 σ_s (N/mm ²)	1275	440
引張強度 σ_s (N/mm ²)	1420	540
ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	200	200

示すように、軸方向鉄筋には直径 7mm の鉄筋 8 本がかぶり厚 17.5mm の位置に配置され、最大せん断応力が作用する箇所に BFRP シートが巻き付け接着された。また、せん断破壊をコントロールするために BFRP シート補強部以外の箇所には直径 6mm の帯筋を 50mm 間隔で配置された。このように使用された鉄筋は RC ヒューム管製品に使用されるものであり、物性値を表-1 に示す。コンクリートについては遠心締固めにより中空円筒形状に成形され、最高温度 70℃を 4 時間保持する蒸気養生が行われた。その設計圧縮強度は 45.0N/mm²、載荷試験時における圧縮強度の測定値は平均 50.2 N/mm²、ヤング係数は 35.9kN/mm² であった。本研究で使用された BFRP シートは、現場でバサルト繊維シートにエポキシ樹脂を含浸させ、コンクリートと接着させるものと、事前含浸され予め成形されたプリプレグ BFRP シートであった。繊維方向は RC 管の軸方向を 0° として BFRP シートは全

*1 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科准教授 工博 (正会員)

表-2 BFRP シートの物性値一覧

特性	現場含浸 BFRP シート	プリプレグ BFRP シート
ヤング係数 E_f (N/mm ²)	90,000	90,000
引張強度 σ_f (N/mm ²)	1,900	1,900
ポアソン比	0.2	0.2
目付量 (g/m ²)	300	600
1 層あたり換算厚 t_f (mm)	0.114	0.228
繊維方向	1 方向	2 方向* (0° /90°)

*目付量：0° 方向 300 g/m²，90° 方向 300 g/m²

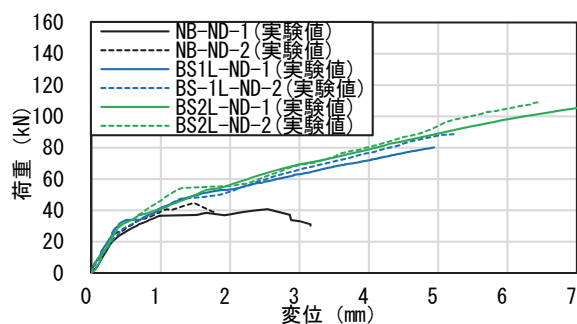
表-3 RC 供試体一覧

供試体 No.	BFRP		損傷 有無	補修 有無	接着範囲 (接着箇所)	N 数
	層数	種類*				
NB-ND-1,2	0	—	無	—	—	2
NB-D	0	—	有	—	—	1
BS1L-ND-1,2	1	S	無	—	全面	2
BS2L-ND-1,2	2	S	無	—	全面	2
BS1L-D	1	S	有	無	全面	1
BS1L-DR	1	S	有	有	全面	1
BP-ND-1,2	1	P	無	—	全面	2
BP-DR	1	P	有	有	全面	1
BP-PBV	1	P	無	—	一部(上下)	1
BP-PBH	1	P	無	—	一部(両側面)	1

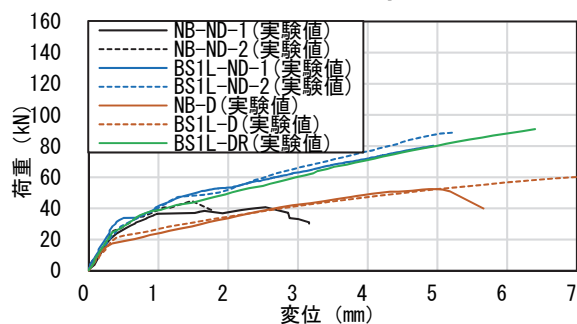
*S：BFRP シート，P：BFRP プリプレグシート

て 0° 方向に配向され，BFRP プリプレグシートは 0° と 90° の方向に等繊維量を配向された。BFRP シートの物性値一覧を表-2 に示す。

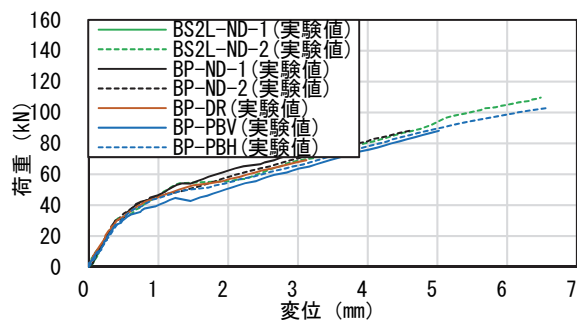
以下に示す 4 つのパラメータを考慮して載荷試験が行われた。考慮されたパラメータは 1) BFRP シートの補強量（現場含浸接着 BFRP シート 1 層，2 層），2) BFRP シートの種類（現場含浸接着 BFRP，プリプレグ BFRP），3) 電柱として使用した際の切削損傷を模した事前損傷（RC 管両側面，長手方向に 1mm 幅，20mm 深さ，400mm 長さ）の有無，その補修の有無，4) 接着範囲（プリプレグ BFRP シート全面接着，一部分のみ（ラップ部のみ）接着，一部分のみ接着では接着箇所の位置（上下端，両側面），事前損傷無しのみ）である。なお，1 ケース 1～2 体の実験が行われ，表-3 に示すように本研究では，事前損傷の無い現場含浸 BFRP シート 1 層，2 層接着供試体をそれぞれ BS1L-ND-1,2，BS2L-ND-1,2，事前損傷を有する供試体を BS1L-D，事前損傷を有するがエポキシパテにより補修した供試体を BS1L-DR，事前損傷の無いプリプレグ BFRP シート接着供試体を BP-ND-1,2，事前損傷を有するが補修されたプリプレグ BFRP シート接着供試体を BP-DR，接着範囲が一部分のみの供試体は接着部



(a) BFRP シート補強量



(b) 事前損傷の有無



(c) プリプレグ BFRP シート補強と接着範囲

※変位測定終了まで掲載，荷重はその後測定

図-2 荷重－変位関係

が上下端のものが BP-PBV，両側面のものが BP-PBH，そして比較対象として無補強供試体は NB-ND-1,2，損傷を有するものは NB-D とそれぞれ呼称した。

供試体の表面処理手順としては，サンドペーパーでコンクリート表面を擦り，メチルエチルケトン（MEK）を含ませた布で削りくずを拭き取った上で 0.2kg/m² 相当量のエポキシプライマーを塗布する手順によりコンクリートの表面処理が行われた。その後，1.2kg/m² 相当量の常温硬化型のエポキシ樹脂を用いて BFRP シートが接着された。プリプレグ BFRP シートは事前に半円形上に熱加工で成形されたものであり，有効付着長を考慮して両端 100mm のラップ長を確保して接着された。前記の一部分のみ接着のケースでは，このラップ箇所のみがコンクリートと接着された。

2.2 実験結果

実験結果より荷重－変位曲線を図-2 に示す。なお，本研究では載荷点位置における変位を掲載する。いずれ

の供試体でも供試体中央付近の荷重点と支点の間のせん断ひび割れと BFRP シート破断が生じて実験が終了された。ただし、両者の発生の前後は明確ではなかった。

BFRP シート補強の有無と補強量に関する図-2 (a) において、BFRP シートによるせん断耐力に対する補強効果について、BS1L-ND 供試体では NB-ND 供試体に対して 117%の補強効果が見られ、補強量が 2 倍の BS2L-ND 供試体では 198%の向上が見られた。

RC 供試体に対する事前損傷の有無に関する図-2 (b) において、NB-D, BS1L-D 供試体ではそれぞれ NB-ND, BS1L-ND 供試体に対して 15%のひび割れ発生荷重の低下が見られたが、その後の挙動やせん断耐力は同程度であった。また、事前損傷部を補修した上で BFRP シート補強した BS1L-DR 供試体のせん断耐力は損傷の無い BS1L-ND 供試体と同程度であった。

BFRP の種類に関する図-2 (c) において、BFRP の配向角が BS2L-ND 供試体と BP-ND 供試体で異なるが、せん断耐力は同程度であった。これは、ひび割れ角度が RC 供試体の長手方向、高さ方向の双方に対して 45° 程度であり、両供試体の BFRP 配向角に対しても 45° 程度となるためであると考えられる。また、BFRP シートの破断ひずみの測定値は BFRP シート自身の破断ひずみの $1/\sqrt{2}$ 程度にあたる $14,000\mu\sim 17,000\mu$ 程度であった。

プリプレグ BFRP の両側面のラップ部のみとコンクリートを接着した BP-PBH 供試体では他の供試体に比べ、せん断ひび割れ発生以降の荷重が 5kN 程度小さい傾向が見られるが、ラップ位置の異なる BP-PBV 供試体ではこのような傾向は見られず、BP-ND 供試体と同程度の補強効果が得られる傾向が見られた。

3. 耐力解析による実験結果の検証

3.1 使用した解析コードの概要

前述の実験における RC 供試体に関して、日本コンクリート工学会の解析プログラム JCMAC3-U を用いて 3 次元 FEM モデルを作成し、解析的検討を行った。JCMAC3-U については著者らの既報^{4), 5)}において参照しており、ここでは概要についてのみ述べる。JCMAC3-U は FEM 温度解析、FEM 湿気移動解析、FEM 応力解析コードの 3 つで構成されている⁶⁾。まず FEM 温度解析が行われ、計算された温度履歴や既知外力・変位履歴を基に FEM 応力解析が実施され、変位、ひずみ、応力などが計算される流れで解析が行われる⁷⁾。

3.2 実験結果に対する解析的検討：解析モデル

前述の実験に用いられた RC ヒューム管供試体を模した解析モデルを作成した。モデル化した箇所は前出の図-1 に示した。全体形状を図-3 (a) に、配筋状況と境界条件を図-3 (b) に、BFRP シートと接着層の状況を

表-4 解析に用いた物性値一覧

材料特性	解析で用いた値
圧縮強度 f_c (N/mm ²)	$44.66(t-0.37)/(3.447+0.875(t-0.37))$ (コンクリート, W/C=47.5%)*
ヤング係数 (N/mm ²)	$6300f_c^{0.555}$ (コンクリート) 200,000 (鉄筋), 1,667 (接着層) 10,275 (BFRP シート 1 層あたり)
引張強度(N/mm ²)	$0.177f_c^{0.85}$ (コンクリート) 1,900(BFRP), 50(接着層)
破壊エネルギー (N/mm)	0.084 (コンクリート)
圧縮強度時のひずみ	0.002 (コンクリート)
引張降伏強度 (N/mm ²)	1,275 (鉄筋)
ポアソン比	0.2 (コンクリート, 鉄筋, BFRP, 接着層)

* t は経過日数

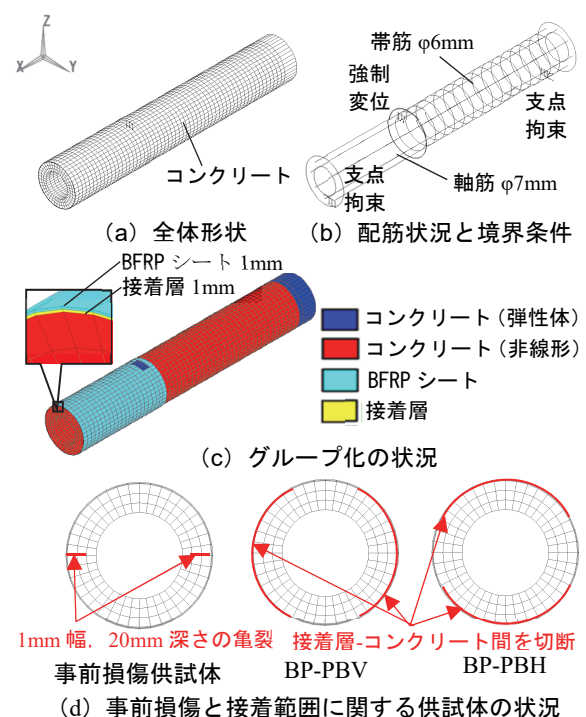
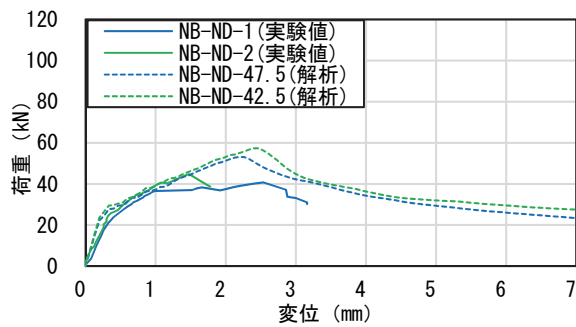
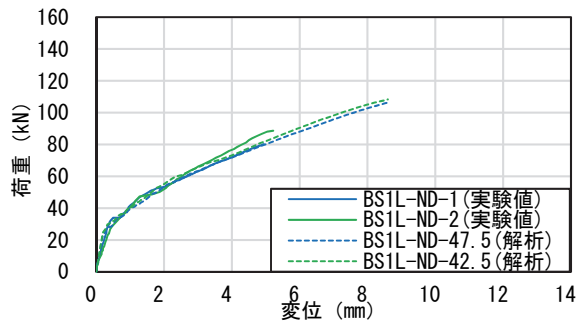


図-3 解析モデル概要

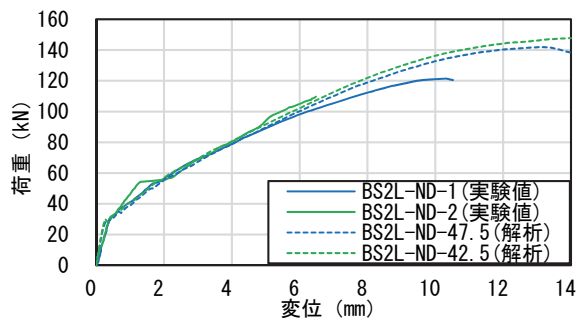
図-3 (c) に、そして事前損傷と接着範囲に関する供試体の状況を図-3 (d) にそれぞれ示す。RC ヒューム管については x 軸方向に 20mm メッシュ、y, z 軸方向には 15mm 程度のメッシュとした。BFRP シートと接着層の厚みは 1mm と設定し、実際の厚みを解析モデルにおける厚み (1mm) で除した値をヤング係数に乘じ、低減することとした。BFRP シートの実際の厚みは前掲の換算厚みとし、接着材の実際の厚みは使用した接着材量と比重から算出した値 (0.926mm) とした。なお、節点数は 12550 となった。なお、コンクリートと鉄筋の材料モデルは 2012 年度制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕⁹⁾によるものを用いた。主鉄筋については埋め込み鉄筋要素を用いた。BFRP シートと接着層については青山の実験³⁾において BFRP シートの剥離は確認されず、



(a) NB-ND 供試体



(b) BS1L-ND 供試体



(c) BS2L-ND 供試体

図-4 荷重－変位関係（水セメント比考慮）

破断に至ったため、弾性体としてモデル化した。コンクリートについては支点、載荷点周辺には応力集中の可能性があるので弾性構成則を用い、それ以外の箇所については非線形構成則を用いてモデル化した。

各種材料の物性値については表-4 に示す。コンクリートの物性値について、本研究で用いた解析コードには遠心力締固めや蒸気養生を考慮することができないため、水セメント比やヤング係数、引張強度に対するこれらの影響を考慮する必要がある。実験における水セメント比は 0.475 であり、同示方書⁹⁾ に従い普通コンクリートとして圧縮強度を算出すると、打ち込みから 28 日経過時に 45 N/mm² 程度であるが、この実験において打ち込みから平均 20 日程度後に行われた載荷時の実測値は平均 50.2 N/mm² であり、遠心力締固めと蒸気養生の影響により圧縮強度が高まっていると思われる。ここで、福沢らの研究⁸⁾ において、蒸気養生したコンクリートは水和反応が活性化され水中養生したものより圧縮強度が高まる傾向にあることが示され、本研究で対象とした 50N/mm²

級のコンクリートでは 5%程度小さい水セメント比のコンクリートと同程度に圧縮強度が高められる可能性を示唆している。そこで、この知見を参考に、NB-ND 供試体、BS1L-ND 供試体、そして BS2L-ND 供試体については、水セメント比について実験同様の 0.475 のケースと、5% 小さい 0.425 のケースについて解析を行い、圧縮強度に関する検討を行うこととした。ヤング係数と引張強度についても遠心力締固めと蒸気養生の影響で普通コンクリートより高い設計値となっているため、同示方書に掲載されているヤング係数および引張強度と圧縮強度の関係式における係数を、実測値に基づき修正して使用した。なお、セメントの種類と単位量は実験同様に普通セメント、324kg/m³ とした。熱膨張係数および破壊エネルギーについても同示方書に基づき 10μ/°C および 0.084N/mm とした。鉄筋については降伏強度の値を採用した。

コンクリート打ち込み時を解析開始時間とし、強制変位を与える直前までは一定温度 (20°C) とした。前述のように遠心力締固めと蒸気養生を解析ツールにおいて考慮できないため、実験では締固め、養生開始から平均 20 日経過後に載荷試験を行っているが、解析においては 28 日養生後に強制変位を与える設定とし、遠心力締固めと蒸気養生がコンクリートの物性に与える影響については、別途、水セメント比が 5% 小さいケースについて検討することにした。強制変位は 1/15mm 毎に 14mm まで加えた。応力解析および耐力解析の収束判定におけるノルムの閾値は 0.001、反復回数は 500 回とした。耐力解析における誤差、すなわち全等価節点力のノルムに対する不平衡力のノルムの割合を検討したところ、2% 以内であった。紙面の都合上、図は割愛する。

3.3 実験結果に対する解析的検討：解析結果

まず、NB-ND 供試体、BS1L-ND 供試体、そして BS2L-ND 供試体の解析結果から荷重－変位関係を図-4 (a) ～ (c) にそれぞれ示す。なお、水セメント比を 47.5、42.5 とした供試体について、それぞれの供試体名に付記する。また、実験における BFRP 破断ひずみの最小値にあたる 14,000μ のひずみが生じた時点で荷重－変位関係を打ち切ることとした。水セメント比 47.5 の各供試体において、ひび割れ発生、剛性勾配、せん断ひび割れの発生、その後の剛性勾配に関する解析値がいずれも実験値と概ね類似した傾向にある。また、水セメント比 42.5 の各供試体でも 47.5 の各供試体の解析値と同様の挙動が見られるが、荷重の解析値が 3kN 程度高い値となっており、実験値の内やや高めのもののはこれらの解析値と類似した傾向となっている。以上から、水セメント比 5% 程度の向上を考慮することにより、遠心力締固めと蒸気養生による圧縮強度、そして RC 供試体の耐力力への影響が考慮される可能性を示唆した。

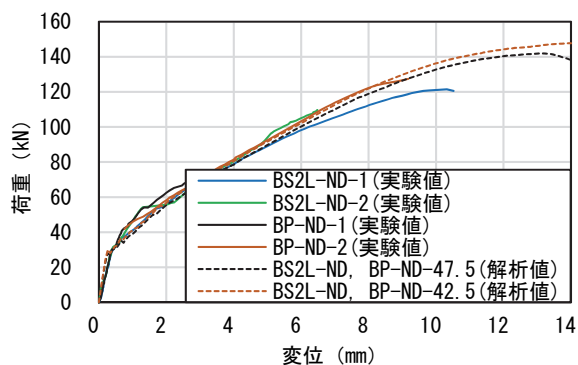


図-5 荷重-変位関係 (BFRP の種類)

表-5 最大荷重一覧 (W/C=47.5%)

供試体 No.	実験値	解析値	破壊形態(解析)
BS1L-ND	88.5	106.4	BFRP 破断
BS2L-ND	121.4	141.9	せん断破壊
BP-ND	127.4	141.9	せん断破壊

※BS1L-ND は BFRP ひずみが 14,000 μ に到達, 打ち切り

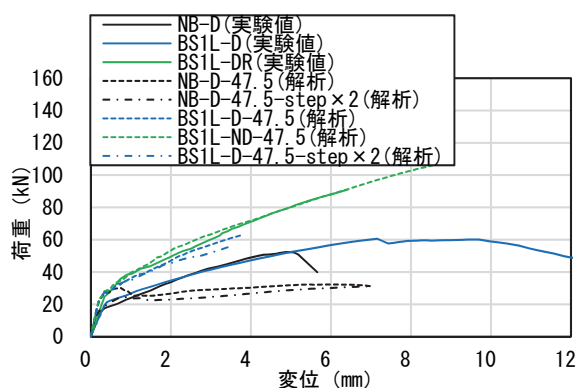


図-6 荷重-変位関係 (事前損傷, その補修の有無)

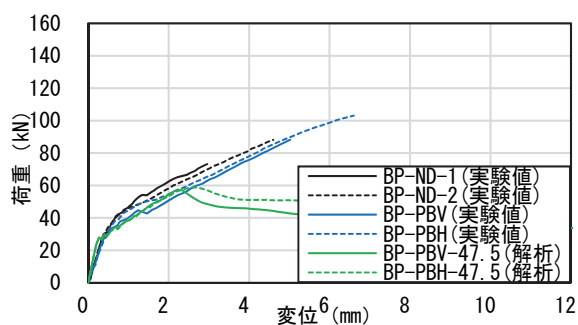


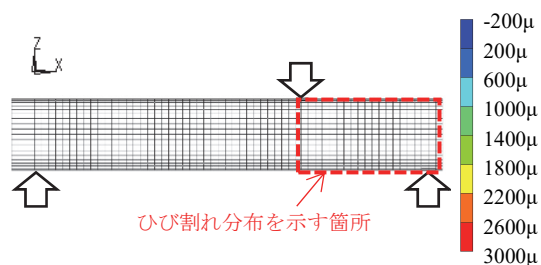
図-7 荷重-変位関係 (BFRP の接着範囲)

次に, BS2L-ND 供試体と BP-ND 供試体の解析結果から荷重-変位関係を図-5に, 最大荷重の一覧を表-5にそれぞれ示す。なお, これらの供試体における BFRP 補強量は配向の方向が異なるのみで同じのため, 解析値についてはまとめて示す。実験値と解析値は概ね同様の傾向にあり, 補強量が同じ BFRP シートと BFRP プリプレグシートでは実験と同程度の補強効果が得られた。なお, せん断破壊直前におけるせん断ひび割れ周辺に生じる二

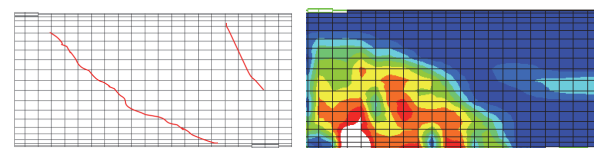
表-6 最大荷重一覧 (W/C=47.5%)

供試体 No.	実験値	解析値	破壊形態(解析)
BS1L-DR	90.9	106.4	BFRP 破断
BS1L-D	60.1	63.1	BFRP 破断
BS1L-D-step $\times$ 2	60.1	55.4	BFRP 破断
BP-PBV	108.5	57.1	せん断破壊
BP-PBH	108.5	58.8	せん断破壊

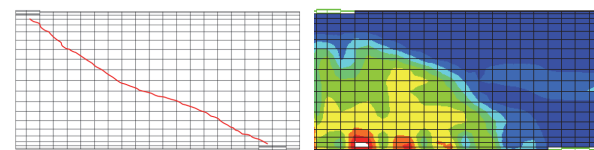
※全供試体で BFRP ひずみが 14,000 μ に到達で打ち切り



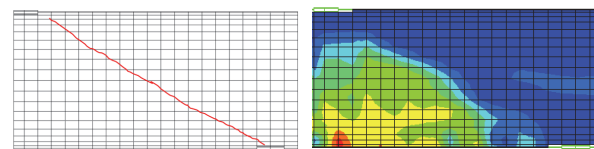
(a) クラック相当ひずみレベルと分布図の該当箇所



(b) NB-ND 供試体



(c) BS1L-ND 供試体

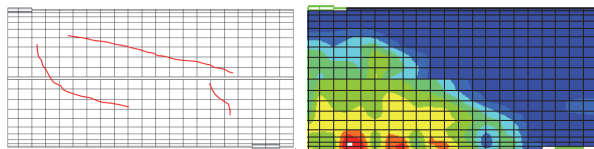


(d) BS2L-ND 供試体

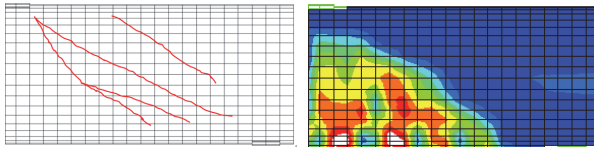
図-8 ひび割れ分布 (左: 実験, 右: 解析)

次応力の影響と思われるが, いずれの供試体でも実験値より解析値の方がやや大きい値となっている。

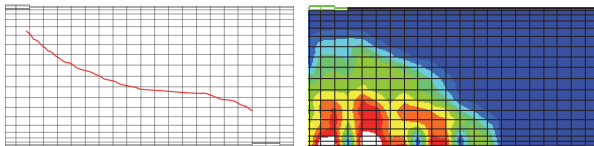
さらに, NB 供試体と BS1L 供試体の事前損傷と補修の有無に関する解析結果から, 荷重-変位関係を図-6に, 最大荷重の一覧を表-6にそれぞれ示す。BS1L-DR 供試体と BS1L-ND 供試体に関する実験値と解析値は概ね同様の傾向にあり, 実験同様に事前損傷を補修することで, 事前損傷の無い供試体と同程度の補強効果が得られる傾向が見られた。NB-D, BS1L-D 供試体について, 実験において見られた事前損傷による荷重低下は明確にならなかったため, 強制変位の間隔 (1/15mm 毎) を半分 (1/30mm) に縮めてその影響を検証した。供試体 No.は BS1L-D-47.5-step $\times$ 2 である。その結果, 強制変位の間隔を半分に縮めることで, 事前損傷による荷重低下がより



(e) BS1L-D 供試体



(f) BP-PBV 供試体



(g) BP-PBH 供試体

図-9 ひび割れ分布 その2 (左：実験，右：解析)

明確になる傾向にあった。

そして、BP-ND 供試体、BP-PBV 供試体、そして BP-PBH 供試体に関する解析結果から、荷重－変位関係を図-7 に、最大荷重の一覧を表-6 にそれぞれ示す。せん断ひび割れ発生や最大荷重までにおける剛性について、実験値と解析値は概ね類似しているが、解析値においては実験より早期にせん断ひび割れが卓越し、荷重低下している。解析における BFRP シートのひずみはせん断ひび割れ発生時点で最大 2000μ 程度であり、発生直後に一時的に 500μ 程度減少し、その後は最大 5500μ 程度まで漸増した。これは、実験ではせん断ひび割れ発生後も BFRP シートの側圧によりせん断ひび割れが抑えられるが、解析ではこの側圧を考慮できないため、せん断ひび割れが卓越して補強効果が失われるためであると考えている。

実験におけるひび割れ分布と解析結果より荷重－変位関係でのせん断ひび割れ発生に関する変曲点の変位 2.2mm におけるクラック相当ひずみ分布を図-8 と図-9 に示す。クラック相当ひずみ分布において、いずれの供試体においても載荷点から支点方向 45° 程度の角度にせん断ひび割れが集中しており、実験におけるひび割れ分布と概ね類似した傾向が見られた。

4. 結言

本研究では BFRP シート補強 RC ヒューム管供試体に関する耐力解析を BFRP の種類や補強量、事前損傷とその補修の有無、そして接着範囲を考慮して行った。得られた知見を以下に纏める。

- 1) 水セメント比 5%程度の向上を考慮することにより、遠心力締固めと蒸気養生による圧縮強度、そして RC

供試体の耐力への影響が考慮される可能性が示唆された。

- 2) 補強量が同じ BFRP シートとプリプレグシートでは解析でも同様の補強効果が得られた。
- 3) 実験同様に事前損傷を補修することで、事前損傷の無い供試体と同程度の補強効果が得られる傾向が見られた。また、実験において見られた強制変位の間隔を半分に縮めることで、事前損傷による荷重低下がより明確になる傾向にあった。
- 4) 接着範囲を一部に限定したケースについて、ひび割れ発生とその後の剛性については実験同様に全面接着のケースと同程度の補強効果が得られる傾向が解析でも見られた。しかし、解析値においては実験より早期にせん断ひび割れが卓越し、荷重低下した。これは、実験ではせん断ひび割れ発生後も BFRP シートの側圧が働くのに対し、解析では考慮できていないためであると考えている。

謝辞：本研究の実施にあたり、日本コンクリート工業株式会社の青山裕之氏より実験データ等の提供と貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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，2000.7
- 2) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09，2018
- 3) 青山裕之：バサルト繊維プリプレグシートによるコンクリート柱のせん断補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.2，pp.1093-1098，2020
- 4) 岩下健太郎，石川靖晃：環境温度変化による初期応力と高温環境が FRP シート補強 RC 梁に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1619-1624，2019
- 5) 岩下健太郎，張逸馨：BFRP，AFRP シート接着補強 RC 梁の曲げ挙動に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1414-1419，2020
- 6) 土木学会：コンクリートにおける水の挙動研究小委員会（349 委員会）委員会報告書，コンクリート技術シリーズ 112，2017
- 7) 田辺忠顕ほか：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム，技法堂出版，pp.201-314，2004
- 8) 福沢公夫，沼尾達弥，石井義章，山田悟：ヒューム管における管体コンクリートの圧縮強度管理用供試体の選定実験，コンクリート工学年次論文報告集，9-1，pp.527-530，1987
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2012