

論文 一層および積層した CFRP シートの材料特性のばらつきに関する検討

竹内 彩^{*1}・吉田 英二^{*2}・佐藤 靖彦^{*3}・松井 孝洋^{*4}

要旨：道示に規定されていない CFRP シートを道路橋に適用する場合を想定し、道示の検証方法に従い設計の前提となる材料特性を明らかにするため、CFRP シートの引張強度と弾性係数のばらつきを評価した。この評価に際しては、CFRP シートを積層した場合の影響も把握するため、標準的な引張試験法がない積層した CFRP シートの引張試験法を検討した上で、その試験から得られた引張強度と弾性係数のばらつきも併せて評価した。その結果、CFRP シート 1 層の引張強度の変動係数は 11%程度、弾性係数の変動係数は 8%程度であることがわかった。また、CFRP シート 5 層の場合も 1 層と概ね同程度のばらつきを示すことわかった。

キーワード：CFRP シート, 引張試験, 引張強度, 弾性係数, 多積層

1. はじめに

平成 29 年に改定された道路橋示方書¹⁾ (以下、道示) では、信頼性の概念に基づく部分係数法を導入するにあたり、材料強度のばらつきが再評価され、その結果に基づき一定水準の信頼性が得られるための特性値や部分係数が設定されている。たとえば、コンクリートの圧縮強度の特性値は、材齢 28 日における試験強度に基づき、試験値がその値を下回る確率が 5%となる値 (5%フラクタイル値) を基本に設定されている。なお、本論文で用いる特性値とは、道示で定義されている設計計算において材料の性質を最も適切に代表できるものとした指標値のことである。

一方、道示では設計の前提となる材料の条件として、その材料が置かれている環境、施工、維持管理等の条件との関係において、設計の前提として求められる材料の特性が明らかであるとともに、必要とされる品質が確保できるものでなければならないとされている。また、使用する材料は、材料特性が明らかであるだけでなく、部材として構成された場合に部材として求められる強度や変形性能及び耐久性などの特性も満足する必要がある。このことは、コンクリート構造物の補修・補強材料として広く用いられている炭素繊維強化プラスチックシート (以下、CFRP シート) をはじめとする道示に規定されていない材料を道路橋に適用する場合においても準拠する必要がある。

そこで、本検討では道路橋に CFRP シートを使用する場合において、道示に従い設計が可能となることを目的に、まずは CFRP シートの材料特性を明らかにするため、引張強度と弾性係数のばらつきに着目し、評価した。一方、CFRP シートを用いて実構造物を補修・補強する場合、必要な補強量を確保するために複数の CFRP シート

を積層して使用される場合があるものの、標準的な引張試験法がないのが現状である。そのため、積層した CFRP シートの引張試験法を検討し、その試験から得られた引張強度と弾性係数のばらつきについても上記と併せて評価した。

なお、本検討で評価された CFRP シートの材料特性は、最終的に材料特性のばらつきも見込んだ部材耐力のばらつきとして評価し、部分係数を算出する際の根拠として使用することを想定している。

表-1 引張試験データの概要

CFRP シートの タイプ	目付量 (g/m ²)	特性値		データ数				
		引張 強度 ※1 (MPa)	弾性 係数 ※2 (GPa)	A 社	B 社	C 社	D 社	計
高強度	200	3400	245	25	25	25	25	100
	300			25	25	25	25	100
	400			25	25	25	25	100
	450			25	25	20	25	95
	600			25	25	25	25	100
中弾性 A	300	2400	440	25	—	25	—	50
	340			20	—	20	—	40
	400			—	—	25	—	25
中弾性 B	300	2900	390	25	25	—	—	50
	450			25	—	—	—	25
高弾性 A	300	1900	540	25	—	—	—	25
高弾性 B	300	1900	640	25	25	—	—	50
	400			25	25	—	—	50
	600			—	25	—	—	25
計	—	—	—	295	225	190	125	835

※1：0.1%フラクタイル値 ($x - 3\sigma_n$)

※2：平均値

*1 (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター交流研究員 (正会員)

*2 (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター研究員 博士 (工学)

*3 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)

*4 炭素繊維補修・補強工法技術研究会

2. CFRP シート 1 層の材料特性のばらつき

2.1 引張試験データの概要

表-1 に引張試験データの概要を示す。本検討は、高強度・中弾性・高弾性の 1 方向 CFRP シートについて、国内の炭素繊維シートメーカー4 社が材料の品質確認のために実施した引張試験の結果を用いた。よって、引張試験の結果には、試験の実施者や試験機が異なる影響によるばらつきも含まれている。

表-1 において、各 CFRP シートでデータ数の偏りがあるのは、各社で製造している CFRP シートのタイプが異なるためである。具体的には、高強度は調査したメーカー全社で製造しているためデータ量が多く、中弾性および高弾性は製造しているメーカーが限られているため、高強度に比べてデータ数が少ない。なお、引張試験は、CFRP シート 1 層に対して実施した結果であり、試験法は JIS A 1191 : 2021²⁾ (以下、JIS) による。

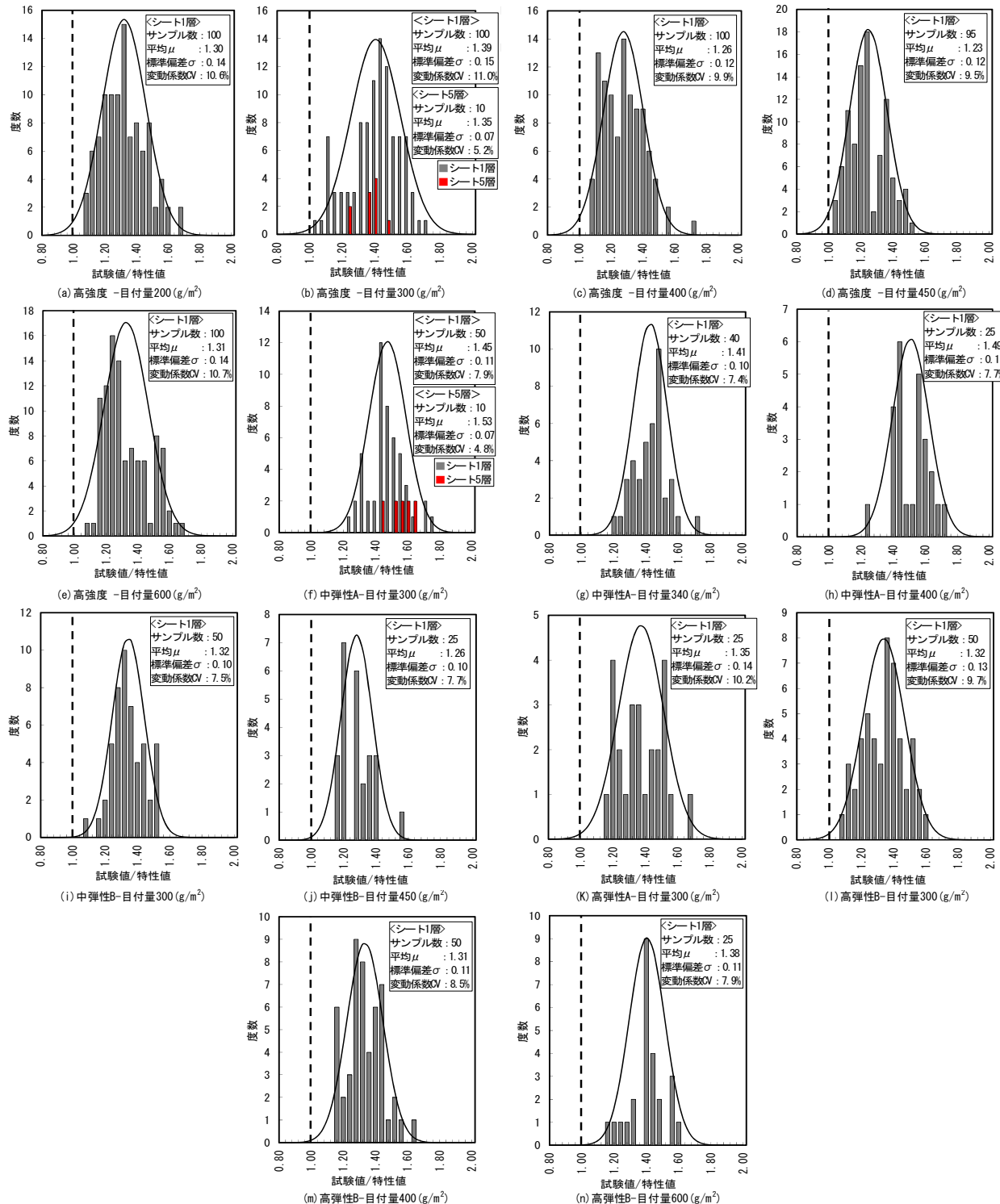


図-1 引張強度のばらつき

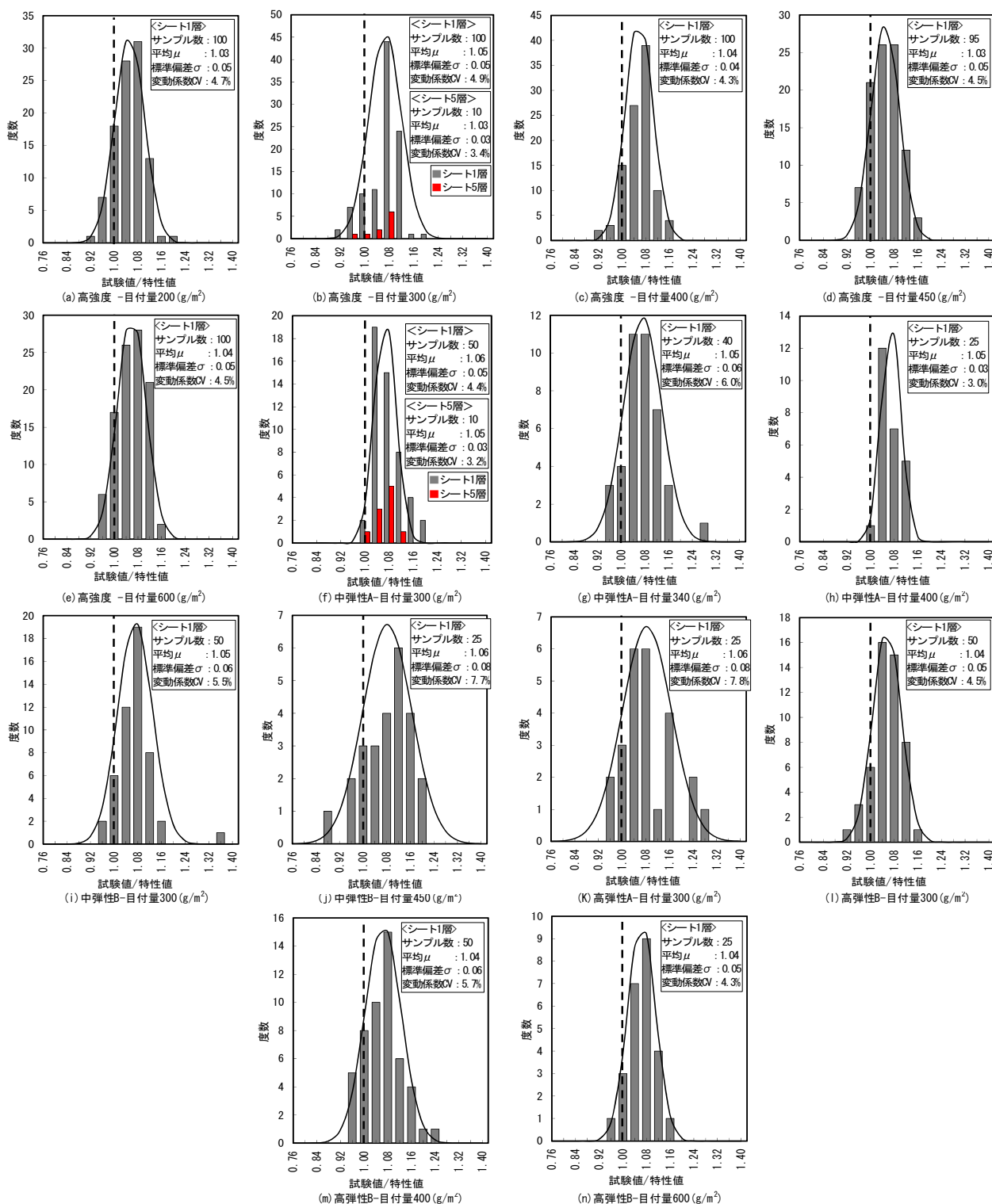


図-2 弾性係数のばらつき

2.2 引張強度と弾性係数のばらつき

CFRP シートの引張強度と弾性係数のばらつきの結果について、図-1, 2 にそれぞれ示す。図に示している5層に関するデータについては、3章で後述する。

図-1 より、引張強度の平均値は特性値の1.2~1.5 倍程度、変動係数は7%~11%程度であった。一般に、標準養生した供試体より確認したコンクリートの圧縮強度の

変動係数は7%程度、鉄筋の降伏強度の変動係数は4%程度であり³⁾、それに比べて CFRP シートの引張強度の変動係数は若干大きいことがわかる。

図-2 より、弾性係数の平均値は特性値とほぼ同等であり、変動係数は3~8%程度あった。一般に、コンクリートの弾性係数の変動係数は10%程度であり³⁾、それに比べて CFRP シートの弾性係数の変動係数は小さいこと

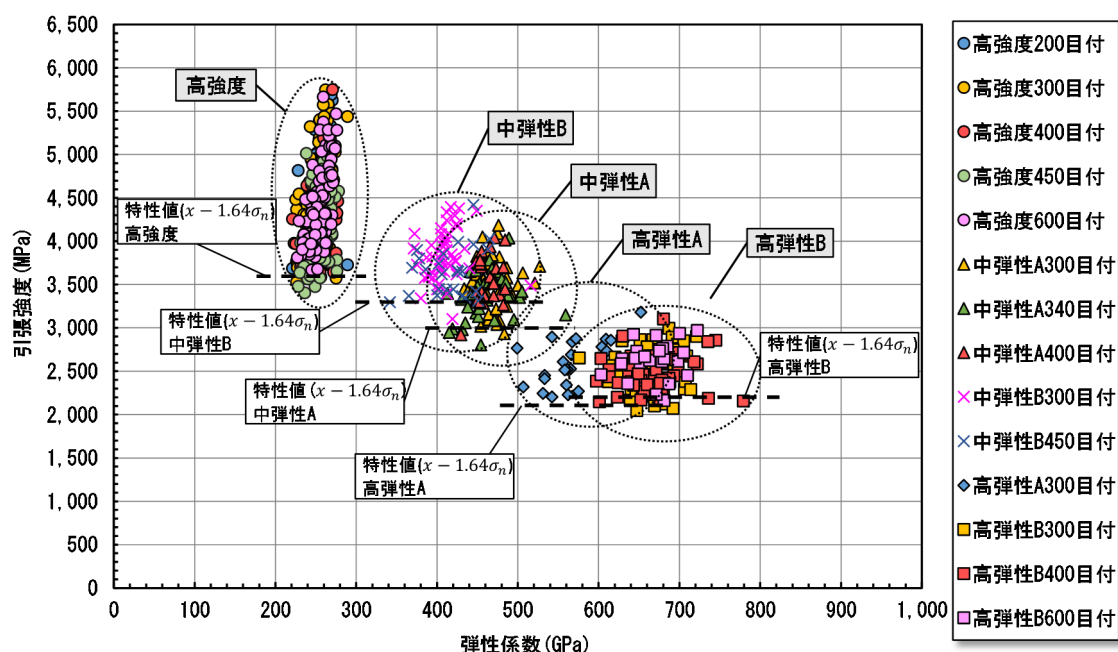


図-3 引張強度と弾性係数の関係

がわかる。CFRP シートのタイプおよび目付量に着目すると、高強度の弾性係数の変動係数は、どの目付量の場合も 4%程度であったが、中弾性と高弾性の弾性係数の変動係数は、目付量毎に 3～8%の間で差がみられた。また、図-3 の横軸に示す弾性係数の分布に着目すると、高強度の弾性係数のばらつきは、中弾性・高弾性の弾性係数のばらつきに比べて小さいことがより明確に表れている。

前述した引張強度および弾性係数のばらつきの傾向について、その理由は明確ではないが、CFRP シートそれぞれの原料や製造方法による違いなどが影響しているものと考えられる。

2.3 引張強度の特性値

試験より得られた引張強度の平均値を x 、標準偏差を σ_n とし、図-3 に CFRP シートの引張強度の特性値を 5% フラクタイル値 ($x - 1.64\sigma_n$) となるように定めた結果を示す。補修・補強設計で使用されている CFRP シートの特性値は、土木研究所の実験結果⁴⁾より整理された値であり、引張強度は 0.1%フラクタイル値 ($x - 3\sigma_n$) が用いられている。ここで、道示でコンクリートの圧縮強度の特性値として設定されている 5%フラクタイル値を CFRP シートの引張強度の特性値と仮定した。その結果、高弾性 A シート以外の引張強度は、一部それを下回った。試験より得られた高弾性 A シートの引張強度のみ、5%フラクタイル値を満足した理由については明確ではない。

道示では、道示に規定されていない材料の特性値の設定について現時点で明確な考え方はないが、いずれにしても CFRP シートを道路橋の補修・補強材料として適用していく際は、特性値の設定を道示の体系に適合させて

いくことが必要とされる。

3. 積層した CFRP シートの引張試験法に関する検討および材料特性のばらつき

CFRP シートを用いて実構造物を補修・補強する場合、必要な補強量を確保するために複数の CFRP シートを積層する場合がある。そのような場合でも、施工品質の確認は CFRP シート 1 層での引張試験の確認にとどまっている。単純に CFRP シートを積層する場合であっても、確実に引張強度が発揮される保証はなく、施工品質の確認のために、積層した CFRP シートについても引張試験を実施する必要があると考えられる。JIS による引張試験は、対象とする積層数について記載されていないが、あくまで CFRP シート 1 層を対象とした試験法であると推測され、積層した CFRP シートの引張試験法に関しては標準的な試験法がないのが現状である。

そこで、積層した CFRP シートの引張強度と弾性係数を適切に評価するための標準的な引張試験法を検討する。まずは従来の JIS 試験法に基づき、積層した CFRP シートの引張試験を実施したうえで、その課題点を示す。

3.1 JIS に基づく引張試験 (試験 1)

図-4 に試験片の形状寸法を示す。シートは、高強度 (引張強度 3400MPa、弾性係数 245GPa) と中弾性 A (引張強度 2400MPa、弾性係数 440GPa) の 2 タイプを使用し、目付量は 300g/m²とした。シートの積層数は、1・3・5・7・8 層とし、それぞれ 5 体ずつ引張試験を実施した。

図-5 に JIS 引張試験から得られた引張強度と積層数の関係を示す。図に示す試験 2 の引張試験の結果については、3.2 節で後述する。JIS 引張試験の結果、CFRP シ

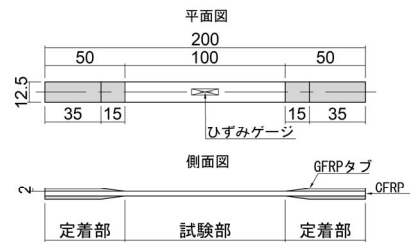
トのタイプによらず積層数が1層と3層の場合は、引張強度の平均値は特性値以上の値が確認された。しかし、積層数が5層以上の場合は、特性値よりも小さい引張強度が確認された。また、高強度および中弾性 A とともに1層の場合は、概ね試験部でCFRPシートが破断しているのに対し、5層以上の場合は、定着部でタブが剥離していた（写真－1）。これは、CFRPシートの積層数が増加することで引張荷重が増加したため、接着剤の強度が不足し、タブとCFRPシートの接着層がせん断破壊した影響と考えられる。したがって、本試験結果から、CFRPシート5層以上では定着部の破壊が先行し、本来の引張強度が得られていない。

3.2 積層したCFRPシートの引張試験（試験2）

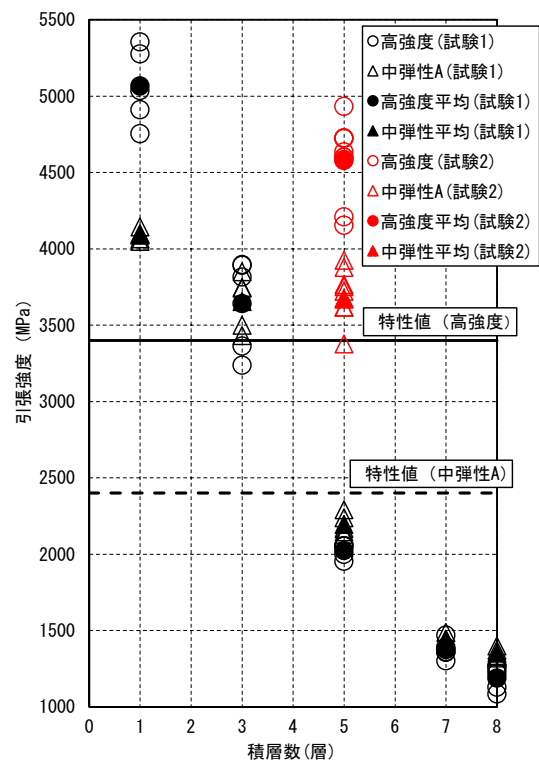
連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）⁹⁾によると、定着部を工夫した連続繊維補強材の引張試験では信頼性のある引張強度が得られているとしている。それを、積層したCFRPシートの引張試験にも応用した事例がある⁹⁾。具体的には、試験片の定着部には従来のGFRPタブやアルミニウムタブではなく、鋼管をとりつけ、その鋼管とCFRPシートの隙間に膨張セメントを充填し、その膨張圧によって鋼管とシートの一体化を図るというものである。その結果では、積層されたCFRPシートの引張強度は、CFRPシート1層の引張強度と概ね同等であったとしている。しかしながら、この試験は試験片作製の手間や定着部形状の大型化により試験機に制約が生じるため、試験規模が大きくなる傾向にある。そのため、このような試験を従来のJIS試験と同じような感覚で施工品質試験として実施するのは困難であるといえる。したがって、積層したCFRPシートに対して、従来のJIS試験のように簡易な試験を基本としながら、安定した結果が得られるような引張試験法が必要である。

(1) 試験片の形状寸法

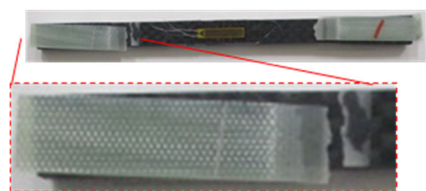
図－6に試験片の形状寸法を示す。試験片の形状は、前述の試験結果を踏まえ、定着部の長さやCFRPシートとタブを接着させる接着剤、タブのテーパーに着目した。定着部の長さについては、試験機のつかみによる応力を分散させるために十分な長さをとる必要がある。そのため、使用した試験機が最大限つかめる長さに設定した。また、CFRPシートとタブを接着させる接着剤については、JISによれば試験片が破壊する前に接着層がせん断破壊しないような接着剤を使用するというだけで、明確な接着強度の規定はない。前述の試験では、それが要因となる破壊が生じたことから、一般にJIS試験で使用する接着剤の約2倍程度の引張せん断接着強度を有する接着剤を用いた。タブのテーパーについては、一般には応力集中を緩和する目的で設置されるが、前述の試験にお



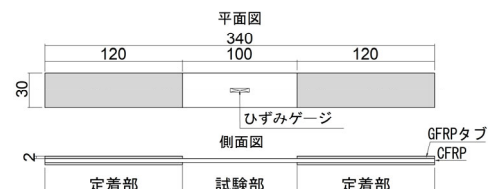
図－4 JIS試験片の形状寸法



図－5 引張強度と積層数の関係



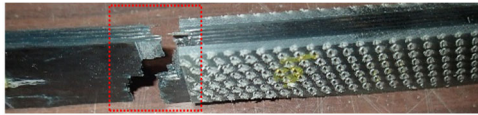
写真－1 JIS試験後の試験片の例



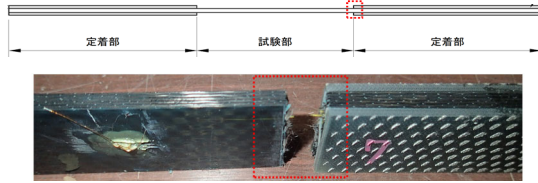
図－6 シートを積層した試験片の形状寸法

表－2 試験ケース一覧

CFRPシートのタイプ	積層数	試験片
高強度	5層	10体
中弾性 A	5層	10体



(a) 高強度シート



(b) 中弾性 A シート

写真-2 積層したシートの試験後の試験片の例

いては試験部と定着部の境界付近で破断することもみられ、テーパーによる効果が必ずしも明確でない。そのため、今回の試験では、タブはテーパーがない形状とした。試験片幅は、JIS 試験片と同様な縦横比を採用し、定着部の長さの 1/4 とした。

表-2 に試験ケース一覧を示す。CFRP シートの積層数は 5 層とし、それぞれ 10 体ずつ引張試験を実施した。

(2) 試験結果

図-5 に引張試験から得られた積層数と 1 層あたりの引張強度の関係を示す。本試験では、高強度も中弾性 A も 5 層の場合、1 層の試験値に比べて若干値の減少が見られるが、特性値以上の引張強度が確認された。写真-2 には、試験後の試験片の状態を示している。試験片は試験部で破断する場合があったが、その多くは、試験部と定着部の境界付近で破断する傾向がみられた。ただし、前述の JIS 試験で確認されたような定着部でタブが剥離する傾向はみられなかった。このことから、検討した試験法は、積層した CFRP シートの引張強度を検証できる手法であるといえる。一方、今回の試験は高強度および中弾性 A を 5 層に積層した CFRP シートのみの検証であるため、今後 CFRP シートのタイプや積層数が多い場合など、より広範囲な条件での検証が必要である。

3.3 引張強度と弾性係数のばらつき

図-1 中の (b) (f) および図-2 中の (b) (f) に積層した CFRP シートの引張強度と弾性係数のばらつきの結果を示す。試験片のサンプルが少ないものの、図-1 より、引張強度の平均値は特性値の 1.5 倍程度、変動係数は 5%程度であった。また、図-2 より、弾性係数の平均値は特性値とほぼ同等であり、変動係数は 3%程度であった。

4. まとめ

本検討では、CFRP シートの引張強度と弾性係数のばらつきの評価について検討した。また、積層した CFRP シートの引張試験について、従来の JIS 試験法では適切

に評価ができないことを踏まえ、標準的な試験法の検討を行った上で、その試験から得られた引張強度と弾性係数のばらつきについても上記を併せて評価した。本検討で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) CFRP シート 1 層の引張強度の変動係数は 11%程度であり、コンクリートの圧縮強度の変動係数や鉄筋の降伏強度の変動係数に比べて若干大きな値を示すことがわかった。また、CFRP シート 1 層の弾性係数の変動係数は 8%程度であり、コンクリートの弾性係数の変動係数に比べて小さな値を示すことがわかった。
- (2) 5 層に積層した CFRP シートの引張試験について、従来の JIS 試験法の改善を図り、試験を実施した結果、CFRP シート 1 層の引張強度に比べて若干値の減少がみられるが、特性値以上の値が得られることが確認された。また、試験片のサンプルは少ないものの、引張強度の変動係数は 5%程度、弾性係数の変動係数は 3%程度であり、CFRP シート 1 層の場合のばらつきと概ね同程度のばらつきを示すことがわかった。

謝辞

本検討は、土木研究所、早稲田大学、弘前大学、日本大学との共同研究における成果の一部である。また、炭素繊維補修・補強工法技術研究会および前田工繊から引張試験結果を提供頂いた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編，2017.11
- 2) 日本規格協会：JIS A 1191，2021
- 3) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート道路橋の性能規定及び部分係数設計法に関する調査研究，土木研究所資料第 4401 号，2020.5
- 4) 建設省土木研究所，炭素繊維補修・補強工法技術研究会：コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ)-炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)-，共同研究報告書第 235 号，1999.12.
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)，1996
- 6) 緒方紀夫，安藤博文，松田哲夫，小畠克朗，大野 了：炭素繊維による段落し部を有する既存 RC 橋脚の耐震補強に関する研究，土木学会論文集，No.540/VI-31，pp.85-104，1996.6.