

論文 コンクリートに接着した FRP シートの終局剥離ひずみの予測

尾崎 允彦*1・佐藤 靖彦*2

要旨：コンクリート表層を強層とした有限要素解析によって、FRP シートを積層化し、シート剛性が大きい場合の付着試験の再現解析とシート剛性を順次大きくした場合のパラメトリック解析を行った。その結果、シート剛性によらず付着挙動を概ね再現可能であった。また、シート剛性が 250 kN/mm 程度以上では、最大荷重のシート剛性による増加度合いが小さくなることも明らかとなった。さらに、既往の実験データと解析結果を用いて、シート剛性が大きい範囲にも適用可能な終局剥離ひずみの予測式を提案した。

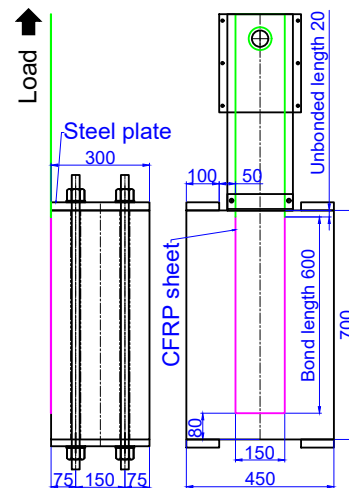
キーワード：FRP シート、有限要素解析、終局剥離ひずみ、積層化、シート剛性

1. はじめに

FRP シートによるコンクリート構造物の補強では、FRP シートの剥離により破壊に至ることが多い。そのため、剥離荷重を予測する研究が多く行われてきた¹⁾。著者らの過去の研究²⁾で示したように、ほとんどの剥離荷重の予測式は、シート剛性（FRP シートの弾性係数×厚さ×積層数）が 100 kN/mm 程度までと小さい範囲の実験結果から作られており、シート剛性が大きな範囲には適用できない。これは、実験ではシート剛性を大きくする、つまり積層数を大幅に増やした場合には実験の規模が大きくなり、土木学会の規定するような標準試験体では検討困難なためである。この問題を解決する手段として、著者らは解析的な研究を進め、剥離現象の解析的な再現が可能となった³⁾。

そこで、本研究ではシート剛性を変化させた場合にも提案した解析手法が適用可能かを確認した上で、10 層までのシート剛性が大きな範囲の解析を行う。そして、その解析結果と既往の実験結果をもとに、終局剥離ひずみの予測を行う。既往の研究においては、剥離時の最大荷

重を予測するモデルが多く検討されてきたが、実際の補強設計では、剥離時の FRP シートの応力やひずみが用いられる。また、シート剛性やシート幅の異なるシートを一樣に扱う目的から、本研究では剥離ひずみの予測を行う。なお、本研究で用いる終局剥離ひずみとは、最大荷重時の FRP シートの剥離ひずみである。



図－1 付着試験の供試体寸法（単位：mm）

表－1 供試体の概要

供試体名	CFRP シート				付着幅 (mm)	付着長 (mm)	最大荷重 (kN)
	弾性係数 (kN/mm ²)	1 層の厚さ (mm)	積層数	シート剛性 (kN/mm)			
CM1	473.3	0.163	1	77.15	150	600	53.93
CM2			2	154.30			62.77
CM3			3	231.44			76.73
CM5			5	385.74			93.58
CL1	261.1	0.167	1	43.60			30.31
CL5			5	218.02		67.00	
CM1-500	473.3	0.163	1	77.15		500	45.81
CM1-400						400	46.64
CM1-150						150	41.35

*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 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)

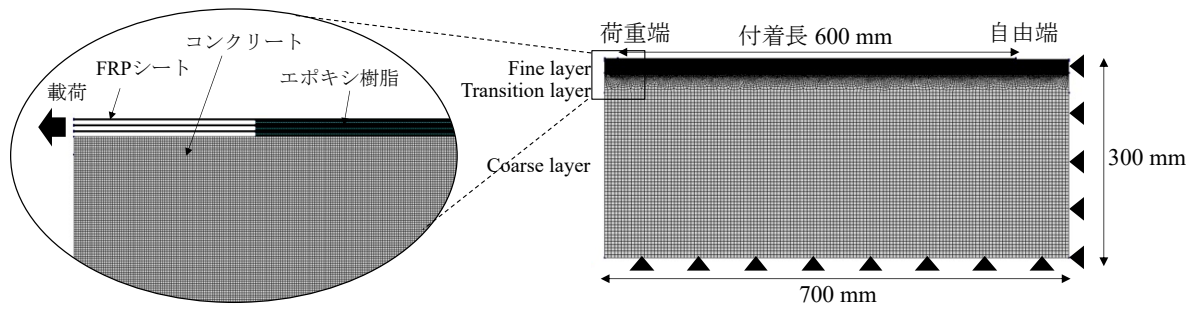


図-2 CM3 供試体の解析モデル

2. 再現解析

2.1 解析概要

著者らが過去に行った実験²⁾の再現解析を行い、異なるシート剛性での解析手法の適用性を確認する。対象とする供試体の概要は表-1の通りである。ここで、供試体名はCM, CLがそれぞれ中弾性CFRPシート、高強度CFRPシートとなっており、その後の数字が積層数、「-」後の数字が付着長を変化させた場合の付着長の値となっている。付着長が600 mmの場合の供試体の寸法を図-1に示す。また、新たに追加で行った5層接着した場合の試験結果についても表-1に追記している。

本研究の非線形有限要素解析では、DIANA10.5を用いた。解析モデル、構成則と解析手法は過去の著者らの解析³⁾と同様にし、コンクリート表層を母材コンクリートに対して引張強度が約1.3倍、引張破壊エネルギーが約2.2倍となるように強層として設定した。CFRPシートとコンクリートの材料特性、供試体寸法のみ実験に合わせて変更した。ここで、コンクリートの圧縮強度は30.2 N/mm²、弾性係数は21600 N/mm²、割裂引張強度は2.38 N/mm²であった。なお、CL5供試体のみ打設日が異なり、その圧縮強度は28.9 N/mm²、弾性係数は20980 N/mm²、割裂引張強度は2.19 N/mm²であった。一例としてCM3供試体の解析モデルを図-2に示す。CFRPシートを3層に積層化し、全てのシートを一様に変位制御により荷重を与えた。また、収束ノルムはエネルギーを用い、許容値は0.0001とした。

2.2 解析結果と考察

各供試体における実験結果と解析結果の最大荷重の比較を図-3に示す。CM1供試体とCM1-150供試体を除き、実験値と解析値の比Rが0.84から1.16に収まっており、シート剛性や付着長に関わらず解析値と実験値の最大荷重がよく一致している。解析値と実験値の差が比較的大きかったCM1供試体では実験値の方が1.2倍、CM1-150供試体では1.3倍程度大きい結果となった。

次に、CM3, CM5, CL1供試体の荷重-すべり関係を図-4に示す。ここで、すべりは荷重端のすべりを用いて

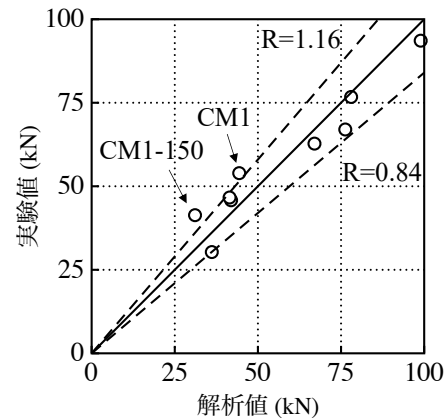


図-3 実験と解析の最大荷重

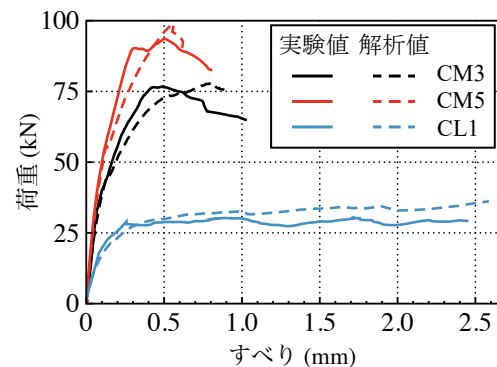


図-4 3供試体の荷重-すべり関係の比較

いる。シートを多積層とした場合にも実験と解析で荷重-すべり関係の挙動が一致している。さらに、シート剛性が変化した場合の荷重-すべり関係の剛性やすべり量の変化も実験と解析で一致した。なお、CM3供試体とCM5供試体におけるピーク付近の剛性は、解析の方が若干緩やかであるが、これは実験の局所的な剥離性状を解析では平均的に扱っているため、ひずみ勾配が解析の方が緩やかになったためだと考えられる。

また、多層の場合の一例としてCM3供試体のひずみ分布と付着応力-すべり関係の比較を図-5および図-6にそれぞれ示す。図-5のひずみ分布は各荷重ステップにおけるCFRPシートのひずみ分布の変化を表しているが、いずれのステップにおいても剥離ひずみや剥離の進行過程が実験と解析で類似している。図-6の付着応力-

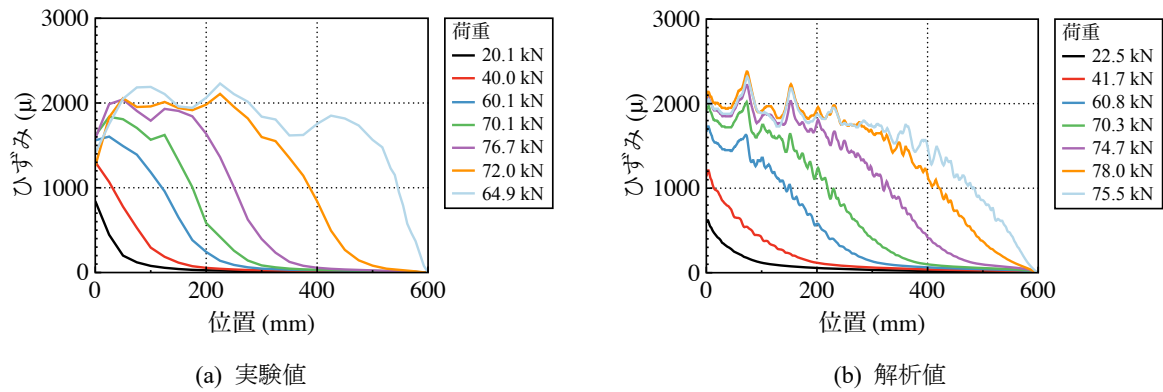


図-5 CM3 供試体のひずみ分布の比較

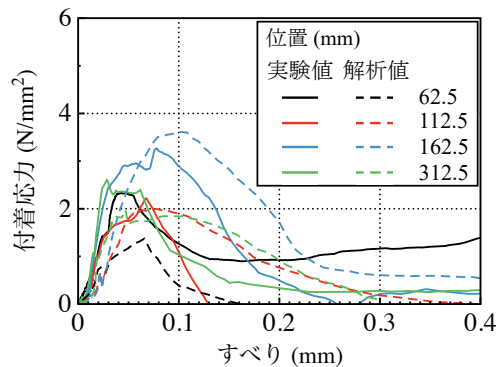


図-6 CM3 供試体の付着応力-すべり関係の比較

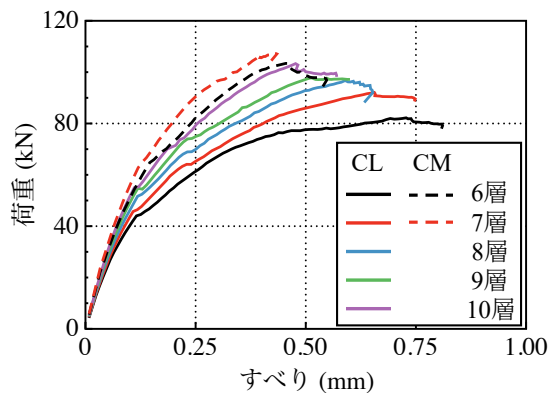


図-7 6 層以上の荷重-すべり関係の比較

すべり関係は、荷重端を 0 とした時の各位置における CFRP シートの付着応力-すべり関係を表しており、実験と解析で概ね挙動が一致している。また、破壊形式については、実験では表層のコンクリートが破壊していたのに対し、解析でも表層から 1.5 mm 程度の深さのコンクリートが破壊していた。CM1, CM1-150 供試体を除くその他の供試体でも同様に荷重-すべり関係、ひずみ分布、付着応力-すべり関係、ひび割れ性状が概ね一致していた。前述したように、CM1, CM1-150 供試体では最大荷重の差が生じたように、荷重-すべり関係、ひずみ分布、付着応力-すべり関係についても同様に差異が見られた。このうち、CM1-150 供試体はコンクリートブロックによる破

壊であった。CM1 供試体は他の供試体と明確な差は見られなかったが、同じシート剛性の CM1-500, CM1-400 供試体よりも実験値自体が大きいため、実験上のばらつきと推察される。これより、破壊形式がコンクリート表層での剥離破壊となる場合においては、シート剛性や付着長が変化した場合にも本解析手法が十分に適用できることが明らかとなった。

3. パラメトリック解析

3.1 解析概要

実験では 5 層まで積層化した CFRP シートの付着試験を行った。しかし、実構造物の補強設計においてはさらにシート剛性を高めなければならない場合も想定される。そこで、さらに CFRP シートを積層し、シート剛性を大きくした場合の剥離荷重の変化についてパラメトリック解析によって検討する。

本解析では、図-1 の供試体を用いて弾性係数 473.3 kN/mm² の中弾性 CFRP シート (CM シリーズ) と 261.1 kN/mm² の高強度 CFRP シート (CL シリーズ) をそれぞれ 1 層から 10 層まで順次積層していく。具体的には、前章で示した解析モデルでシートを 1 層ずつ積層する。なお、その他の解析条件や材料特性は変更していない。

3.2 解析結果と考察

パラメトリック解析の結果として、6 層以上の荷重-すべり関係を図-7 に示す。なお、中弾性 CFRP シートを用いた CM シリーズでは、6 層付近から有効付着長と付着長が同程度となった。さらに、図-7 に示すように 7 層ではピーク後にすべりが増加することなく終了している。これは、7 層まで積層した場合にはコンクリートブロックによる破壊となったのである。このため、CM シリーズは 7 層までの解析とした。また、シート剛性が大きいほど有効付着長は長くなるが、付着長 600 mm の本試験体では、シート剛性が 450 kN/mm 程度が有効付着長を確保できる限界値であることが解析上明らかとなった。

シート剛性による最大荷重の変化を図-8 に示す。実

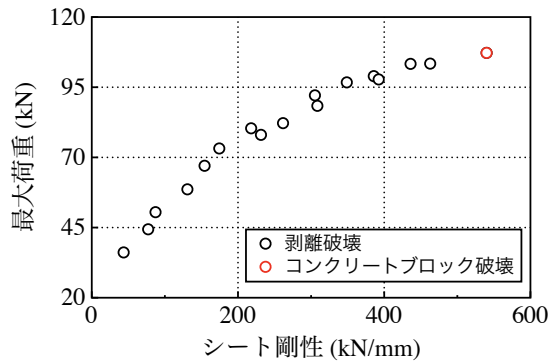


図-8 シート剛性による最大荷重の変化

験と同様にシート剛性が増加するほど最大荷重が増加している。しかし、その増加度合いはシート剛性が 250 kN/mm 程度から小さくなっている。このため、シート剛性が大きな範囲の予測法を、小さな範囲の実験結果より検討することはできない。

4. 終局剥離ひずみの予測

4.1 定式化の概要

シート剛性が大きな範囲にも適用可能な予測式を作成する。具体的には、既往の FRP シート付着試験の実験データ^{1), 2), 4) - 37)}を収集し、既往の実験データとパラメトリック解析結果より予測式の作成を行う。本モデルでは、炭素、アラミド、ガラス、バサルト、PBO 繊維を含む通常の FRP シート接着を対象とするため、特殊なケースを除いた 386 体の実験データを活用した。ここで、除外した特殊なケースは、(1) FRP プレートを用いたもの、(2) 破壊形式がコンクリート表層の剥離破壊でないもの、(3) 有効付着長より付着長が短いもの、(4) 特殊なコンクリート表面の加工をしているもしくは無加工のもの、(5) 高浸透性のプライマーを用いているもの、(6) 特殊な定着を施しているもの、(7) 2 方向シートを用いているもの、(8) 弾性係数が 1000 N/mm² 以下もしくは 4000 N/mm² 以上の柔および剛な接着剤を用いているもの、(9) 母材がモルタルのもの、(10) FRP シートが斜めに引っ張られているもの、(11) 荷重速度が 0.1 m/sec 以上と極めて速いものである。解析では付着長が十分に確保できていた範囲として、シート剛性が 450 kN/mm までの結果を用いた。

本研究では終局剥離ひずみの予測式の作成を行うが、各データの終局剥離ひずみは式(1)によって求めた。

$$\varepsilon_{fu} = \frac{P_{\max}}{b_f \cdot n_f t_f E_f} \times 10^6 \quad (1)$$

ここで、 ε_{fu} は FRP シートの終局剥離ひずみ (μ)、 $P_{\max}$ は最大荷重 (kN)、 b_f は FRP シートの幅 (mm)、 n_f は FRP シートの積層数、 t_f は FRP シート 1 層あたりの厚さ (mm)、 E_f は FRP シートの弾性係数 (kN/mm²) である。なお、両面接着型付着試験で剥離したシートが負担していた荷重

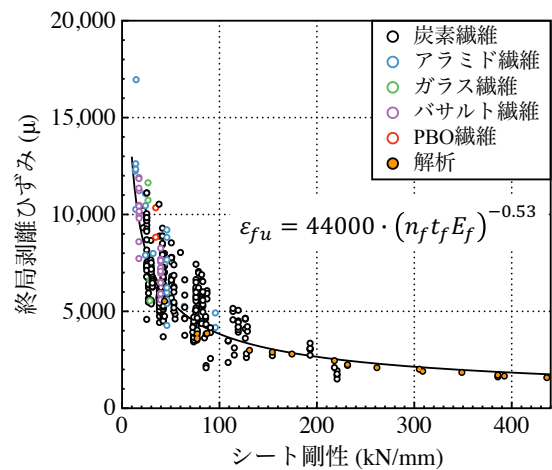


図-9 シート剛性による終局剥離ひずみの変化

値が示されていないものは、両面で同じ分担量であると仮定し、 $P_{\max}$ は両面分の荷重の 1/2 として算出している。

また、局所的には FRP シート剥離時のひずみはシートの長さ方向および幅方向の両方にばらつきが存在している。このため、本研究で用いる終局剥離ひずみはマクロな値の予測であることに留意されたい。

4.2 終局剥離ひずみ予測式の定式化

シート剛性による終局剥離ひずみの変化を図-9 に示す。図-9 では繊維ごと、および解析結果を色分けして示している。特に繊維や解析による差異は見られないため、これらを区別せずに定式化する。また、現在までの FRP シートの剥離荷重の予測式のパラメータには、シート剛性やコンクリート圧縮強度 f'_c 、FRP シート幅 b_f とコンクリート幅 b_c の幅比 b_f/b_c 、接着剤の材料特性などが用いられてきた。本研究では、柔および剛な接着剤を除外しているため、接着剤以外をパラメータとして検討する。

図-9 より終局剥離ひずみをシート剛性によってフィッティングさせた場合、式(2)のようになる。

$$\varepsilon_{fu} = 44000 \cdot (n_f t_f E_f)^{-0.53} \quad (2)$$

次に、 $\varepsilon_{fu}/(n_f t_f E_f)^{-0.53}$ に対するコンクリート圧縮強度による変化は図-10 のようになる。また、近似曲線は式(3)となる。

$$\varepsilon_{fu}/(n_f t_f E_f)^{-0.53} = 25200 \cdot f'_c{}^{0.17} \quad (3)$$

式(3)ではコンクリート圧縮強度の 0.17 乗に比例する形となった。コンクリート圧縮強度が剥離荷重に及ぼす影響は小さいとの既往の研究が多く、例えば佐藤ら¹⁾は $f'_c{}^{0.2}$ に比例するとしており、式(3)は過去のモデルと同様の傾向と言える。

また、図-10 では幅比ごとに色を区別し、2 次元解析結果は赤色で示している。例えば Wu and Jiang²⁸⁾ のように幅比をパラメータとして導入している研究もあり、図-10 でも幅比が大きい場合に縦軸の値が若干小さくなっている。一方で、Dai et al. の研究¹⁸⁾ のようにシート幅

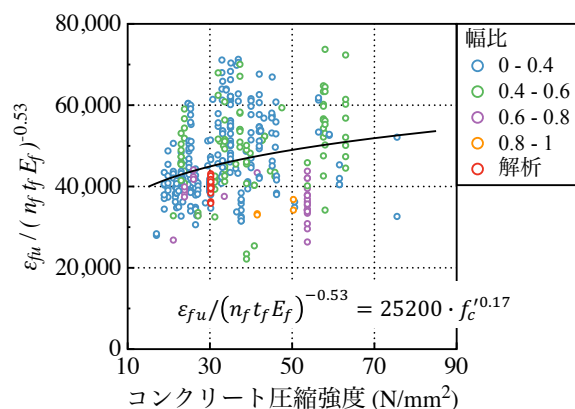


図-10 コンクリート圧縮強度による変化

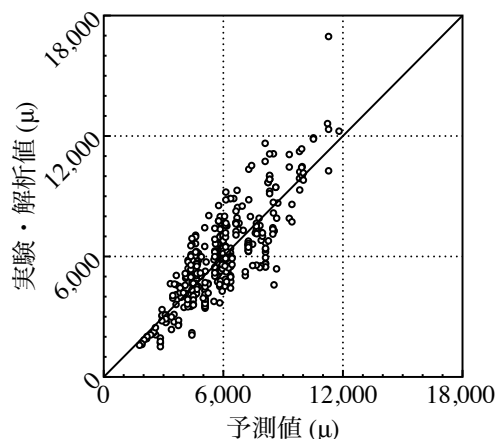


図-11 実験・解析値と予測値の比較

から 3.7 mm 程度外側までしか影響しないとの見解もある。本研究では幅比が 0.6 以上の供試体は 35 体しか存在せず、この影響度合いを議論することは難しいため、考慮しないこととした。これより、本研究によって定式化した終局剥離ひずみの予測式は式(4)になる。

$$\varepsilon_{fu} = 25200 \cdot (n_f t_f E_f)^{-0.53} \cdot f_c'^{0.17} \quad (4)$$

4.3 提案した終局剥離ひずみ予測式の評価

図-11 に実験・解析値と式(4)による予測値の終局剥離ひずみの比較を示す。実験値そのものが極めて大きかった 1 点を除き、ひずみの大小によらず概ね評価できており、シート剛性が大きい範囲も対象としたモデルとなった。また、実験・解析値と予測値の比の平均は 1.01、標準偏差は 0.20 であった。

5. 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) コンクリート表層を強層とした有限要素解析手法によって、積層化した場合においてもシート剛性に関わらず、剥離現象が概ね再現可能であった。ただし、シート剛性が大きい場合、荷重-すべり関係のピーク付近での剛性が解析値の方が緩やかになった。

- (2) パラメトリック解析結果より、シート剛性が 250 kN/mm 程度以上から最大荷重の増加度合いが小さくなった。
- (3) 既往の実験結果およびパラメトリック解析結果よりシート剛性が大きい範囲にも適用可能な終局剥離ひずみの予測式を提案した。

参考文献

- 1) 佐藤靖彦, 浅野靖幸, 上田多門: 炭素繊維シートの付着機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.47, No.646, pp.71-87, 2000.5
- 2) Ozaki, M. et al.: Interface Bond Behaviour between Multi-ply CFRP Sheets and Concrete, Proceedings for the 6th fib International Congress 2022, Oslo, pp.2268-2275, Jun.2022
- 3) 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
- 4) 佐藤裕一, 木村耕三, 小島克朗: CFRP シートとコンクリートの付着挙動 (その 1), 日本建築学会構造系論文集, No.500, pp.75-82, 1997.10
- 5) Maeda, T. et al.: A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet, Proceedings of the 3rd international symposium on Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Vol.1, pp.279-286, Oct.1997
- 6) 岳尾弘洋, 松下博通, 牧角龍憲, 長島玄太郎: CFRP 接着工法における炭素繊維シートの付着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.1599-1604, 1997.7
- 7) 佐藤裕一, 木村耕三, 小島克朗: CFRP シートとコンクリートの付着挙動 (その 2) -面外拘束による付着耐力の改善-, 日本建築学会構造系論文集, No.509, pp.127-134, 1998.7
- 8) 岳尾弘洋, 松下博通, 矢原輝政, 佐川康貴: CFRP 接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.1, pp.431-436, 1998.7
- 9) 西田浩之, 上原子晶久, 下村匠, 丸山久一: 連続繊維シートとコンクリートとの付着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.1507-1512, 1999.7
- 10) 上原子晶久, 下村匠, 丸山久一, 西田浩之: 連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.197-208, 1999.11
- 11) 三井雅一, 福澤公夫, 沼尾達弥, 布田郁雄: CFRP シート・コンクリート間の付着強度と各種表面粗さ指標との関係, 材料, Vol.46, No.6, pp.685-691, 2000.6
- 12) 森脇渉, 佐藤靖彦, 上田多門, 角田史雄: 炭素繊維

- 維シートの付着疲労性状, コンクリート工学年次論文
文集, Vol.22, No.3, pp.271-276, 2000.7
- 13) 吉澤弘之, 吳智深, 袁鴻, 金久保利之: 連続繊維シートとコンクリートの付着挙動に関する検討, 土木学会論文集, No.662/V-49, pp.105-119, 2000.11
 - 14) Nakaba, K. et al.: Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete, *ACI Structural Journal*, V98, No.3, pp.359-367, May/Jun.2001
 - 15) 金久保利之, 中場和正, 吉田智基, 吉澤弘之: 連続繊維シートとコンクリートの局所付着応力-すべり量関係の提案, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.1, pp.33-43, 2001.1
 - 16) 上原子晶久, 下村匠, 丸山久一: 連続繊維シートの付着性状に及ぼす母材表層の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1735-1740, 2003.7
 - 17) Yao, J., Teng, J.G. and Chen, J.F.: Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints, *Composites: Part B*, Vol.36, pp.99-113, Aug.2005
 - 18) Dai, J., Ueda, T. and Sato, Y.: Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method, *Journal of Composites for Construction*, Vol.9, No.1, pp.52-62, Jan/Feb.2005
 - 19) Dai, J., Sato, Y. and Ueda, T.: Improving the Load Transfer and Effective Bond Length for FRP Composites Bonded to Concrete, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.24, No.2, pp.1423-1428, 2002.7
 - 20) Dai, J., Ueda, T. and Sato, Y.: Unified Analytical Approaches for Determining Shear Bond Characteristics of FRP-Concrete Interfaces through Pullout Tests, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.4, No.1, pp.133-145, Feb.2006
 - 21) Dai, J.: Interfacial Models for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Sheets Externally Bonded to Concrete, Doctoral Thesis, Hokkaido University, Aug.2003
 - 22) Pham, H.B. and Al-Mahaidi, R.: Modelling of CFRP-concrete shear-lap tests, *Construction and Building Materials*, Vol.21, pp.727-735, 2007
 - 23) Toutanji, H. et al.: Prediction of Interfacial Bond Failure of FRP-Concrete Surface, *Journal of Composites for Construction*, Vol.11, No.4, pp.427-436, Aug.2007
 - 24) 小林朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕, 立石晶洋: FRP スtrandシートと材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1561-1566, 2008.7
 - 25) Pellegrino, C., Tinazzi, D. and Modena, C.: Experimental Study on Bond Behavior between Concrete and FRP Reinforcement, *Journal of Composites for Construction*, Vol.12, No.2, pp.180-189, Mar/Apr.2008
 - 26) Billotta, A., Di Ludovico, M. and Nigro, E.: FRP-to-Concrete Interface Debonding: Experimental Calibration of a Capacity Model, *Composites: Part B*, Vol.42, pp.1539-1553, Apr.2011
 - 27) Yun, Y. and Wu, Y.F.: Durability of CFRP-Concrete Joints under Freeze-thaw Cycling, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.65, pp.401-412, 2011
 - 28) Wu, Y.F. and Jiang, C.: Quantification of Bond-Slip Relationship for Externally Bonded FRP-to-Concrete Joints, *Journal of Composites for Construction*, Vol.17, No.5, pp.673-686, Oct.2013
 - 29) Hosseini, A. and Mostofinejad, D.: Effective Bond Length of FRP-to-Concrete Adhesively-Bonded Joints: Experimental Evaluation of Existing Models, *International Journal of Adhesives*, Vol.48, pp.150-158, 2014
 - 30) 新井崇裕, 山野辺慎一, 荒添正棋, 佐藤靖彦: ポリウレア樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法の高湿時における付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, 2014.7
 - 31) 岩下健太郎, 佐藤大地, 馬場進, 松本信行: バサル繊維シートとコンクリートの付着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1912-1917, 2014.7
 - 32) 小川泰成: ポリウレア樹脂を用いた CFRP スtrandシート補強部材の低音時力学特性に関する研究, 修士論文, 北海道大学, 2015.2
 - 33) Shi, J.W., Cao, W.H. and Wu, Z.S.: Effect of Adhesive Properties on the Bond Behavior of Externally Bonded FRP-to-Concrete Joints, *Composites Part B*, Vol.177, 107365, Aug.2019
 - 34) Yuan, C. et al.: Effect of Aggregate Size on the Dynamic Interfacial Bond Behaviour between Basalt Fiber Reinforced Polymer Sheets and Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.227, 116584, Aug.2019
 - 35) 小林朗ほか: 高伸度弾性樹脂を用いて接着した FRPシートとコンクリートの付着挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.855-867, 2020.3
 - 36) Yuan, C. et al.: Influence of Concrete Strength on Dynamic Interfacial Fracture Behaviour between Fiber Reinforced Polymer Sheets and Concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 229, 106934, Feb.2020
 - 37) 後藤慶次, 山上大智, 佐藤靖彦: 傾斜型コンクリート供試体を用いた連続繊維シートの付着性状について, 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.22, pp.371-374, 2022.10