

論文 CFRP 矩形材の重ね継手を有する RC 梁の曲げ挙動

椎名 貴快*¹, 伊藤 忠彦*², 湊 康裕*³, 近藤 尚之*⁴

要旨: コンクリートの場所打ちにより現場構築するシールド発進・到達立坑において、シールド貫通開口部補強材に連続炭素繊維補強材を適用し、シールド・カッタービットで直接切削する工法がある。本研究では、開発した矩形状連続炭素繊維補強材の同工法への適用を検討するため、短期許容応力度設計法による基本定着長を重ね継手長とする RC 梁試験体を製作し、継手性能を実験により確認した。その結果、継手補強材の組み合わせによって変形やひずみの特性に違いがみられたが、耐力的に矩形状連続炭素繊維補強材の保証引張強度相当荷重を満足することが確認された。

キーワード: シールド直接発進・到達工法, CFRP 矩形材, 重ね継手

1. はじめに

シールド発進・到達立坑壁には大きな土圧・水圧が作用するため、一般的に RC や鋼製部材構造となる。また、地盤強度や掘削時の止水性等を考慮し、立坑背面地盤を葉液注入工法や高圧噴射攪拌工法、凍結工法等で改良して自立させる必要がある。しかし、改良地盤に所要品質を確保させることが難しく、掘削前に地山の開放を伴う等、施工上、安全面、工期・工費等での問題があった。そこで、従来工法に替わるものとして「シールド直接発進・到達工法^{1) 2)}」が開発された。

同工法は、発進・到達立坑のシールド貫通開口部に、鉄筋代替品として高強度・高弾性の連続炭素繊維補強材 (以下、CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) を採用し、粗骨材に易切削性の石灰碎石を用いた新素材コンクリートとすることで、シールド・カッタービットで直接立坑壁を切削する工法である。現在、同工法で使用される CFRP 形状として、撚り線・ロッド材・格子材があるが、新たに矩形材の開発検討^{3) 4) 5)}を行っている。

例えば、立坑壁体をコンクリートの場所打ちにより構築するケーソン立坑躯体壁での工事の場合、CFRP 主筋材と貫通開口部周囲の鉄筋との重ね継手、ならびにコンクリートの段打ちに伴う CFRP 主筋材同士の重ね継手が必要となる。

本研究では、CFRP 矩形材と異形鉄筋の重ね継手および CFRP 矩形材同士の重ね継手を軸方向引張部曲げ区間に配置した RC 梁試験体の曲げ載荷実験を実施し、同材の重ね継手性能に関して検討した。但し、試験体の軸方向 CFRP 筋比は、既往の設計指針⁶⁾ 及び通常のシールド立坑鉛直方向補強筋比との整合性を考慮し、0.20%程度になるように設計した。

2. 曲げ載荷実験

2.1 使用材料

CFRP 矩形材は、熱可塑性樹脂被覆 FRP 引抜成形法により製造される矩形断面製品である。これは、熱硬化性樹脂 URA を含浸成形した PAN 系炭素繊維ロッドに、熱可塑性樹脂 PSF を被覆した矩形複合材である (写真-1 参照)。同材の特徴として、エンボス (高さ 1mm, 間隔 2.5mm)

*1 西松建設(株)技術研究所技術研究部土木技術研究課 材料・施工グループ 工修 (正会員)

*2 西松建設(株)技術研究所技術研究部土木技術研究課 材料・施工グループ副課長 工博 (正会員)

*3 西松建設(株)技術研究所技術研究部土木技術研究課 材料・施工グループ係長 工修

*4 宇部日東化成(株)機能製品事業部 FRP 事業推進グループ

表-1 CFRP 矩形材の仕様諸元

呼称	断面形状	断面寸法 (mm)	単位重量 (g/m)	公称断面積 (mm ²)	熱硬化性樹脂	被覆樹脂	使用繊維	繊維体積混入率(%)
FTC15	矩形	5.5×20.5	162	76.0	URA 樹脂	PSF 樹脂	PAN 系炭素繊維 トレバ T700SC 24K*	55

* 比重 1.8, 1600tex, 引張強度 500kg/mm², 引張弾性率 23,500kg/mm²

表-2 コンクリート配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ 範囲 (cm)	空気量 範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材*1 S	粗骨材*2 G	AE 減水剤*3 A
20	8±2.5	4.5±1.5	53	42	156	294	764	1104	C×0.25%

*1 千葉県富津産(陸砂) *2 栃木県葛生産(碎石) *3 ポソリス No.70

表-3 材料試験結果

(a) CFRP 矩形材

呼称	最大引張荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	終局ひずみ (%)	付着応力度* (N/mm ²)	
FTC15	166	2180	147	1.6	10.0	23.0

* 鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法 (JSCE-G503-1999) を参考にして, CFRP 矩形材のすべり量が 0.002D (=0.033) の時の付着応力度および最大付着応力度の値を示す。但し, 実験は JSCE-E539-1995 に準拠している。

(b) 異形鉄筋

呼称	規格	単位重量 (kg/m)	公称断面積 (mm ²)	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D10	SD345	0.56	71.33	379	521	20.4	186
D22	SD345	3.04	387.1	376	564	21.5	193

* 土木学会規準 JSCE-E531-1995 に準じて実施した結果である。

(c) コンクリート

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
35.6	2.90	29.4

* 圧縮/引張強度試験: JIS A 1108-1993 / JIS A 1113-1993

加工を施した表面被覆樹脂によって CFRP 層が覆われており, 10N/mm² (すべり量 0.002D) 程度のコンクリートとの付着応力が期待できる。

本実験で使用した CFRP 矩形材の仕様諸元及びコンクリート配合を各々表-1 及び表-2 に示す。コンクリートは, 普通ポルトランドセメント使用, 設計基準強度 24N/mm² である。使用材料の材料試験結果を表-3 にまとめて示す。なお, 重ね継手を有するコンクリート梁が継手部以外で曲げ引張破壊する場合, CFRP の破断または異形鉄筋の降伏によって曲げ耐力が決まる。従って, 重ね継手を構成する CFRP の保証引張耐力と異形鉄筋の降伏耐力を合わせる必要がある。そこで, FTC15 の保証耐力とほぼ等しい降伏耐力 (規格値) を有する異形鉄筋 D22 (SD345) を使用した。

2.2 試験体

検討対象が仮設構造物のため, 短期割増 1.5, 安全率 2.0 を考慮した短期許容応力度法による

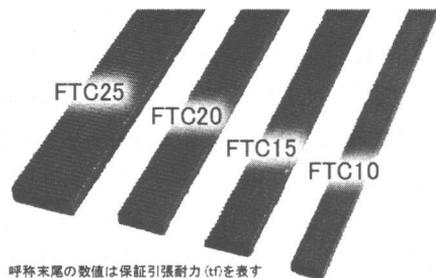


写真-1 CFRP 矩形材

仮設設計とした。試験体の諸元および配筋をそれぞれ表-4 および図-1 に示す。

全ての試験体は, 全長 4.1m, 幅 0.25m×高さ 0.35m の長方形断面を有する載荷スパン長 0.9m の RC 梁であり, せん断支間長有効高さ比 a/d は 4.3 とした。

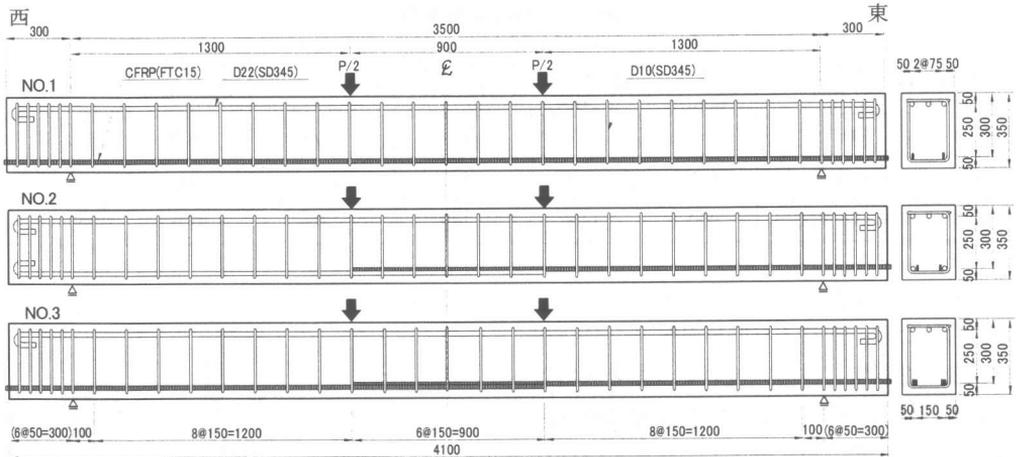


図-1 試験体の配筋図

試験体 NO.1 は、継手のない基準試験体である。試験体 NO.2 は、CFRP 矩形材と異形鉄筋との重ね継手を有する試験体、試験体 NO.3 は、CFRP 矩形材同士の重ね継手を有する試験体である。NO.2 及び NO.3 の継手長さは、短期許容応力度設計法により、土木学会制定コンクリート標準示方書 [設計編]⁷⁾ に定義された基本定着長算定式を参考に 900mm とし、梁中央部曲げ区間引張側に配置した。ここで特に NO.3 に関しては、CFRP 矩形材の幅広面を密着させて重ね継ぐため、円形断面の CFRP を重ね継ぐ場合と比較して、継手部でのコンクリートとの付着面積低減率が高く、条件的には NO.2 よりも厳しくなるものと思われる。

本実験では、設計上の梁の最終破壊形態が曲げ破壊(曲げ破壊先行型)となるように、全試験体ともせん断補強筋として異形鉄筋 D10 (SD345) を梁試験区間に 150mm 間隔(せん断補強筋量 0.38%) で配置した。これにより、せん断耐力は、設計上、CFRP 矩形材の応力度が保証引張強度に達する時の耐力(保証終局曲げ耐力)に対しておおよそ 2.4 倍となり、脆性的なせん断破壊の発生防止に寄与する。なお、土木学会制定コンクリート標準示方書 [設計編]⁷⁾ では、最小補強筋量 0.15% 以上のせん断補強筋を部材全長に渡って配置することが構造細目に規定されているが、本実験ではこの規定値の 2.5 倍以上

表-4 試験体の諸元

項目		試験体		
		NO.1	NO.2	NO.3
軸方向	引張筋	2-FTC15 (0.20%)	2-FTC15 (0.20%) 2-D22 (1.03%)	4-FTC15 (0.41%)
	圧縮筋		3-D22 (1.55%)	
せん断補強筋		D10@150 (0.38%)		
継手**		—	S-C	C-C
継手長	(mm)	—	900	
断面 $b \times h$	(mm)	250 × 350		
有効高さ d	(mm)	300		
載荷点間	(mm)	900		
スパン長	(mm)	3500		

* ()内の数値は、軸方向鉄筋比、軸方向 FRP 筋比、腹鉄筋比
** S: 鉄筋, C: CFRP

の補強筋量が配置されている。

既往の指針⁶⁾によると、曲げモーメントの影響が支配的な棒部材の最小軸方向引張補強筋比は、 $(35 f_t / f_u)$ (%) か 0.2% 以上のいずれか大きい方以上とすることを原則としている。ここに、 f_t はコンクリートの引張強度である。一般に、CFRP は $f_u = 2000 \text{N/mm}^2$ 程度であるため、本指針による CFRP の最小補強筋比は 0.2% 以上ということになる。そのため、本実験の試験体は 0.20% としている(表-4 参照)。但し参考までに、開発した CFRP 矩形材の場合、通常のコンクリート強度の範囲内ならば、曲げひび割れ発生モーメントの 2 倍程度の量を配置すれば、最小鉄筋比の RC 部材と同程度の部材変形率 (δ_u / δ_c)

表-5 曲げ実験結果

試験体	軸方向引張筋	重ね継手長 (mm)	曲げひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN)	破壊荷重 P_u (kN)	破壊荷重の計算値との比 P_u / P_{cal}	最大変位 δ_{max} (mm)	破壊形式
NO.1	FTC15	—	14.6	141	1.00	96.0	圧壊
NO.2	D22-FTC15	900	147	1.04	95.0	CFRP 破断	
NO.3	FTC15-FTC15	900	14.8	149	1.05	87.0	圧壊

が確保できることを確認している⁴⁾。ここで、 δ_u 及び δ_c とは、それぞれ終局変位及びひび割れ発生変位を表す。円形立坑のような変形量の少ない構造物の壁面鉄筋量は、最小補強筋量によって決まるため、施工上、どの程度まで小さくできるのか把握しておく必要がある。

試験体の養生管理として、コンクリートの打設後、試験体は屋内で1週間散水養生を実施した。さらにその1週間後、シートや湿布等を取り外し、現場養生とした。これにより、水和熱による温度ひび割れや乾燥収縮による表面での微細なひび割れの発生は最小限に抑えられた。

2.3 実験方法

荷重方法は、2000kN 万能試験機の荷重装置を用いて、図-2 に示すようにスパン 3500mm、等曲げモーメント区間 900mm の単純ばり対称2点荷重とした。実験では、保証引張強度相当荷重の 50%及び75%でそれぞれ一旦除荷し、その後は破壊に至るまで単調荷重を実施した。また実験では同時に、荷重、変位、コンクリートおよび補強材 (CFRP 矩形材、異形鉄筋) のひずみ、ひび割れ幅をそれぞれ測定した。

2.4 実験結果及び考察

各試験体の曲げひび割れ発生荷重、破壊荷重、最大変位、破壊形態を表-5 にまとめて示す。

(1) ひび割れ及び破壊状況

各試験体のひび割れ発生状況を図-3 に示す。また、NO.2 及び NO.3 の破壊状況をそれぞれ写真-2 及び写真-3 に示す。

NO.1 と比較して NO.2 及び NO.3 の方が、曲げひび割れ発生荷重が若干大きく、曲げ区間でのひび割れ発生本数は若干少なかった。これは、梁引張部の剛性の違いによるものと思われる。

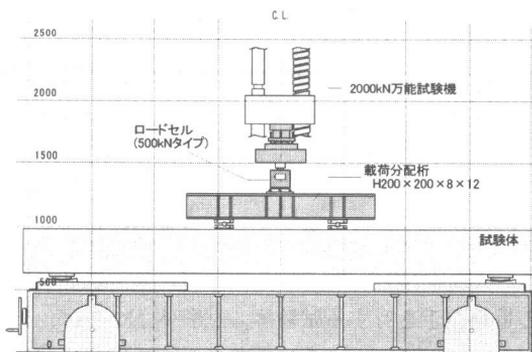


図-2 荷重方法

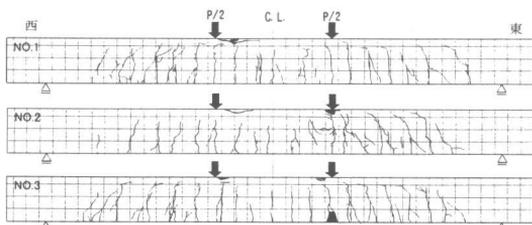


図-3 ひび割れ発生状況

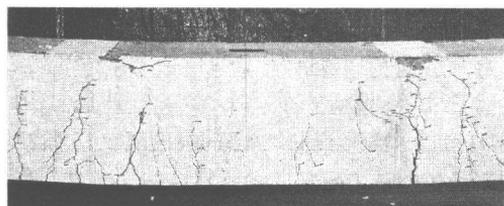


写真-2 破壊状況 (NO. 2)

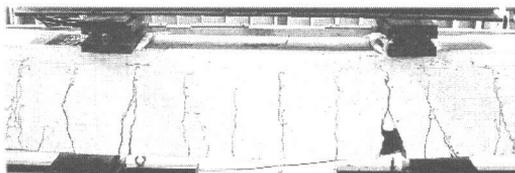


写真-3 破壊状況 (NO. 3)

NO.1は、比較的ひび割れが分散して発生していることが分かる。NO.2は、CFRPと異形鉄筋とを軸方向引張側で重ね継いでいる。そのため、引張剛性の小さいCFRP側にひび割れが多く発生している。梁の剛性が変化する継手端部CRFP側のひび割れが大きく開き、その進展により、上端部に当る荷重点近傍のコンクリートで圧壊が引き起こされた。NO.3は、殆ど左右対称のひび割れ発生状況となり、補強材に沿った付着ひび割れの発生も確認されなかった。

(2) 荷重と中央変位の関係

各試験体の荷重と中央変位の関係を図-4に示す。NO.1は、中央変位が96mmの時、荷重点近傍のコンクリートが圧壊し、CFRPのひずみが15000 μ 程度まで伸びたが、荷重が若干抜けた程度であり、破断には至らなかった。NO.2は、曲げひび割れ発生後の剛性がNO.1と比較しておよそ2.3倍であった。保証引張強度相当荷重付近で鉄筋降伏後、剛性がおよそ75%低下したが、その後も粘りのある靱性挙動を示した。NO.3は、曲げひび割れ発生後の剛性がNO.1の約1.2倍であった。当初、継手部でのCFRPの付着力低下に伴う脆性的破壊が懸念されたが、特に付着ひび割れの発生もなく、NO.1同様に良好な結果を得られた。

(3) ひずみ挙動

図-5, 6に、NO.2, 3における各荷重段階における継手部のCFRPと鉄筋のひずみ分布を表す。NO.2において、CFRPは凹型、鉄筋は凸型の傾向がある。これは、鉄筋の引張剛性がCFRPよりも大きいため、CFRPの変形が拘束され、継手中央部で鉄筋の張力分担率がCFRPのそれを大きく上回るためと思われる。NO.3は、左右のひずみ傾向に大きな差異は見られず、順調に伸びていった。材料試験の結果(表-3(a)参照)、CFRPの終局ひずみが1.6%であることから、NO.3はCFRPの破断には至らず、付着も終局時近くまで比較的健全な状態であったと思われる。

(4) ひび割れ幅

図-7, 8に、各試験体における中央変位とひ

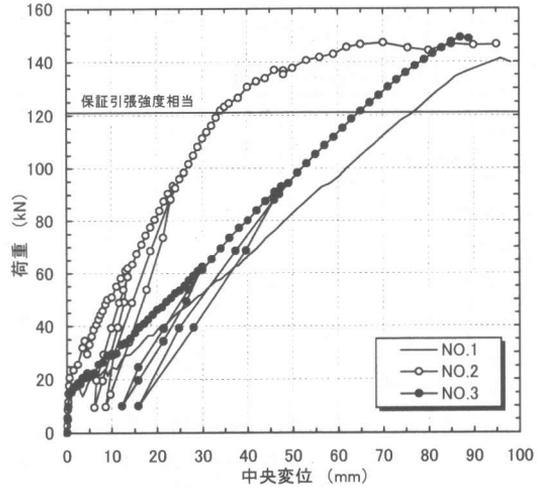


図-4 荷重と変位の関係

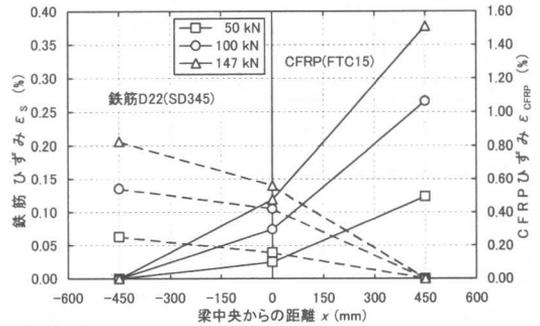


図-5 継手部のひずみ分布 (NO. 2)

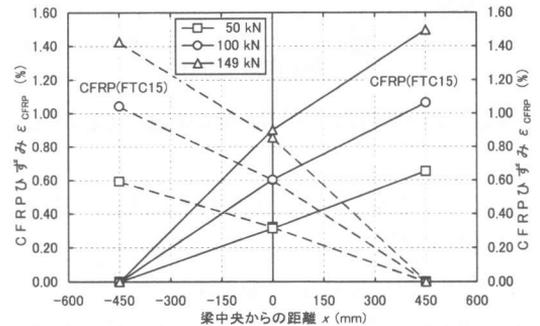


図-6 継手部のひずみ分布 (NO. 3)

び割れ幅の関係を示す。但し、ひび割れ幅の計測位置は、試験体中央部を①、西側荷重点下(継手端部鉄筋側)を②、東側荷重点下(継手端部CFRP側)を③とする。NO.2は、梁の剛性が変わる③の位置のひび割れ幅が、②よりも大きく

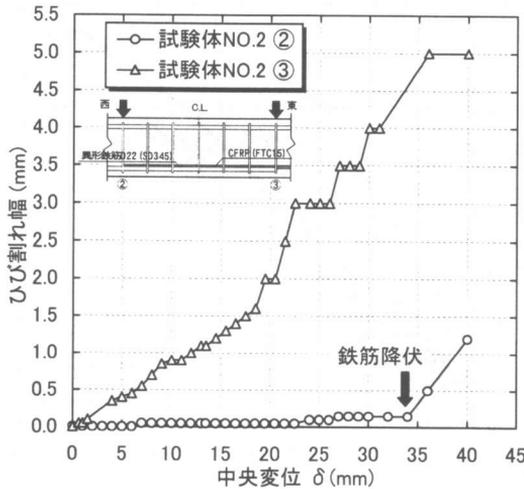


図-7 中央変位とひび割れ幅の関係 (NO. 2)

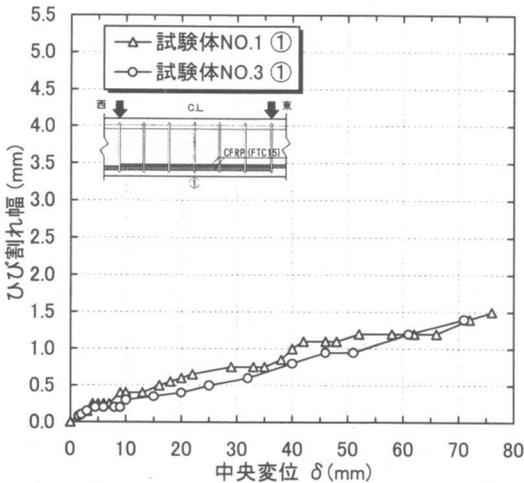


図-8 中央変位とひび割れ幅の関係 (NO. 1, 3)

開いている事がわかり、変形が③に集中していることがわかる。但し、②のひび割れ幅も、鉄筋降伏後、伸びている。NO.3は、局所的なひび割れ開口部もなく、比較的良好な変形特性が見られた。そのため、中央部のひび割れ幅は、NO.1同様の傾向を示している。

3. まとめ

CFRP 矩形材の重ね継手性能を実験により確認した。その結果、以下の事が確認できた。

① CFRP 矩形材と鉄筋との重ね継手では、引張

剛性の小さい CFRP 側に多くのひび割れが発生したが、終局耐力は保証引張強度相当の荷重を満足する結果であった。

- ② CFRP 矩形材同士の重ね継手は、付着力の低下による引抜け等の現象は見られず、良好な結果を得られた。
- ③ シールド直接発進・到達工法に CFRP 矩形材 (FTC15) を用いる場合、短期許容応力度設計法による基本定着長を重ね継手長としても、構造部材として十分な性能を発揮できることを確認した。

参考文献

- 1) 園田徹士, 中村稔, 新井時夫, 宮田弘之介, 栗原和夫: NOMST の開発, 土木学会論文集, NO.522/VI-28, pp.31-34, 1995.9.
- 2) 藤田守正, 近藤悦吉, 山根淳, 伊藤忠彦: 大深度円形立坑から NOMST シールド発進, トンネルと地下, Vol.29, NO.3, pp.33-39, 1998.3.
- 3) 椎名貴快, 伊藤忠彦, 潮田和司, 松野繁宏: 鉄筋との重ね継手を有する CFRP コンクリートはりの曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.253-258, 2000.6.
- 4) 伊藤忠彦, 椎名貴快, 松浦誠司, 小野寺章夫: 引張補強筋比の小さい CFRP コンクリートはりの曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.259-264, 2000.6.
- 5) 椎名貴快, 伊藤忠彦, 西 保: 鉄筋と CFRP 矩形材との重ね継手を有するコンクリートはり部材の曲げ挙動, 土木学会第 55 回年次学術講演会, V-179, pp.358-359, 2000.9.
- 6) 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), 土木学会コンクリートライブラリー88, 1996.9.
- 7) コンクリート標準示方書 [平成 8 年版] 設計編, 土木学会