

論文 高靱性セメント複合材料を用いた鉄骨間柱の中央部接合に関する研究

梁 一承^{*1}・西山 功^{*2}・白井 一義^{*3}・上田 宣人^{*4}

要旨：耐震補強等の目的で既存フレームに鉄骨造の間柱を設置する際、寸法精度等の施工精度確保が重要となる。間柱の中央部に高靱性セメント複合材料による接合部を設けることにより、このような鉄骨部材の製作精度の問題が解決できる。本研究では、間柱の中央接合部の構造性能を把握するために間柱のせん断曲げ実験を行い、繰り返し載荷に伴う接合部分の剛性低下や損傷の蓄積などを検討した。

キーワード：間柱，高靱性セメント複合材料，ネジ鉄筋，鉄骨接合

1. はじめに

既存フレームに間柱を設置する場合は、新設する間柱を既存フレームに精度良く設置することが不可欠であり、この点が施工上最も難しい。新設する間柱を上下に二分割し、上下の間柱部分をそれぞれ既存フレームに接合した後、上下の間柱の隙間の部分を高靱性セメント複合材料（以下、高靱性セメントと呼ぶ）により現場充填すれば、鉄骨部材の製作誤差を吸収することができる。鉄骨部材相互の現場溶接も不要となる。このような接合部の構造性能を確認するために、間柱の接合部部分試験体（以下、間柱部分試験体と呼ぶ）に繰り返し曲げせん断力を作用させ、比較的小振幅での繰り返しによる接合要素の剛性低下や損傷の蓄積のほか、大振幅での繰り返しによる耐力や変形能力を把握した。

この実験の結果より、高靱性部に大きなエネルギー吸収が期待できないことが後述のとおり明らかとなったので、次に、接合要素には鉄骨部材の製作誤差を吸収する役割のみを付与し、間柱によるエネルギー吸収は間柱材端の鉄骨部分に塑性ヒンジを形成することにより確保することを目標とした試験体（以下、間柱試験体と呼ぶ）の実験を実施した。なお、実験に先立ち、

間柱試験体の試験フレームへの設置時に施工手順など施工性についての検討も行った。

2. 実験概要

2.1 間柱部分試験体の実験

図 - 1 に間柱部分試験体を示す。間柱部分試験体の主なパラメータは H/B（H は高靱性セメントを充填した接合部の高さ、B は接合部の幅）と繊維種類である。主筋には D13 のネジ鉄筋を使用し、帯筋は使用していない。鉄骨部は実験中に弾性域にとどまるように十分強く設計した。表 - 1 に試験体一覧を示す。高靱性セメントとしては HPRC¹⁾ 及び RPC²⁾ を用いた。No. A1 ~ No. A4 ではポリエチレン繊維（PE）と鋼繊維（SC）を各 1% ずつ混入した HPRC とし、H/B を変化させた。No. A5 は No. A1 にガラス繊維シート³⁾ を 3 重に巻き付けせん断補強した。No. A6 ~ No. A9 は高靱性セメントの種類を変化させた。高靱性セメントは試験体を横にした状態で打設し、気中養生した。表 - 2 及び表 - 3 に使用材料の材料特性（高靱性セメントの引張試験は実施していない）を示す。加力は建研式加力装置を用いた正負交番繰返し載荷とした。繰返しせん断力が作用した時の接合要素の剛性低下や損傷の蓄積

*1 日本学術振興会 科学技術特別研究員 博士（工）（正会員）

*2 独立行政法人 建築研究所 建築生産研究グループ 工博（正会員）

*3 太平洋セメント（株） 中央研究所 博士（工）（正会員）

*4 太平洋セメント（株） 中央研究所 工修

などを把握する目的で、まず小振幅での繰り返し実験を行い、その後はアスペクト比が小さい高靱性セメントを充填した接合部の靱性に期待した設計⁴⁾(デバイス)の可能性を探るために大振幅での繰り返し実験を行った。なお、軸力は $0.1N_0$ ($N_0=Fc \times B \times D$:接合要素部分の降伏耐力)となるようにジャッキで制御した。

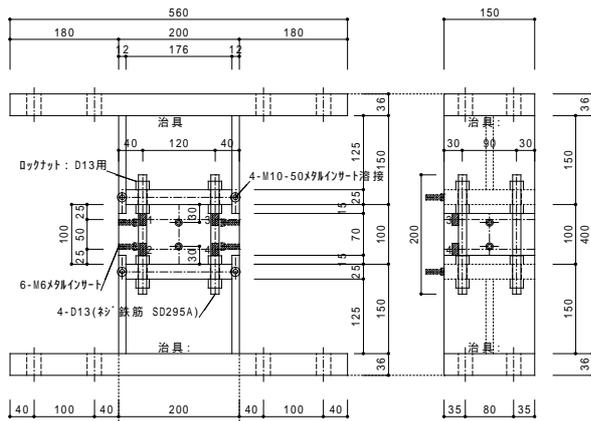


図 - 1 間柱部分試験体

表 - 1 間柱部分試験体の一覧

No.	H (mm)	H/B	材料
A1 (PESC200)	200	1.0	PESC-HPFRCC
A2 (PESC250)	250	1.25	
A3 (PESC150)	150	0.75	
A4 (PESC100)	100	0.5	
A5 (PESC200S)	200	1.0	PESC-HPFRCC (シート巻付け)
A6 (PVA200)			PVA-HPFRCC
A7 (PE200)			PE-HPFRCC
A8 (MOR200)			MORTAR
A9 (RPC200)			RPC

表 - 2 高靱性セメント等の材料特性

材料	繊維種類 (混入率 %)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
MORTAR		58.14	19.6
PVA-HPFRCC	PVA(1.7)	48.31	18.2
PE-HPFRCC	PE(1.0)	50.53	18.3
PESC-HPFRCC	PE(1.0)+SC(1.0)	50.81	20.3
RPC	SC(2.0)	134.17	50.7

表 - 3 鋼材の材料特性

材料	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
鉄筋	356	515	191

2.2 間柱試験体の実験

図 - 2 には間柱試験体の詳細を示す。試験体の断面 ($B \times D$) は $200 \times 150\text{mm}$ であり、試験体の高さ中央の接合部分には主筋として D16 のネジ鉄筋 4 本を設置し、帯筋は使用していない。高靱性セメントはパン型ミキサーにより練混ぜ、現場施工を再現する意味も含めて試験体を加力装置に設置した後、縦位置で打設を行い、脱型後気中養生した。但し、No.B4 (RPC100) のみは横位置状態で打設した。

一方、鉄骨部分には H-200x150x12x12 (mm) を使い、高靱性セメントよりなる接合部分 (高靱性部) より材端鉄骨部分の耐力が小さくなるように設計した。No.B1, No.B2, No.B4 は部材の長さが 1.69m であるが、No.B3 は当初の計画では高靱性部を 300mm としていたものを 100mm に変更したため、部材の長さが 1.49m となった。

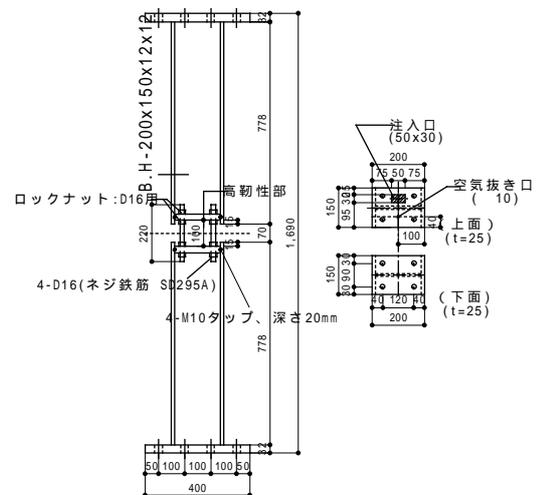


図 - 2 間柱試験体

間柱試験体の主なパラメータは表 - 4 に示すようにアスペクト比 (H/B) と繊維種類である。No.B1 (PVA200) では、 H/B が 1.0 であり、ポリビニルアルコール繊維 (PVA: Poly-Vinyl Alcohol) を 1.7% 投入した。No.B2 (RPC200) は、 H/B が 1.0 であり、高靱性部に超高強度コンクリート (RPC: Reactive Powder Concrete) を用いた。No.B3 (PVA100) と No.B4 (RPC100) は、 H/B が 0.5 であり、高靱性部にはそれぞれ PVA と RPC

を使用した。PVA を投入した高靱性セメントは、先に実施した間柱部分試験体実験の結果よりモルタル性能に改善が見られ、安価というメリットがあった。また、施工性においても接合部分には帯筋がないため無理なく打設ができた。

一方、RPC は単価は高いが、強度、耐久性、施工性などの点で優れている。表 - 5 及び表 - 6 に使用材料の材料特性を示す。

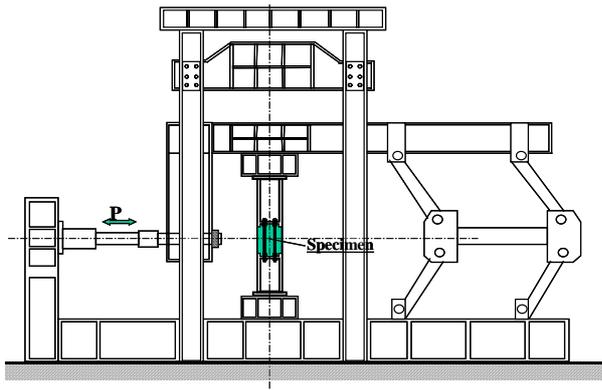


図 - 3 間柱のセットアップ図

表 - 4 間柱試験体の一覧

No.	L (mm)	H (mm)	H/B	高靱性部の材料
B1 (PVA200)	1,690	200	1.0	PVA-HPFRCC
B2 (RPC200)	1,690	200	1.0	RPC
B3 (PVA100)	1,490	100	0.5	PVA-HPFRCC
B4 (RPC100)	1,690	100	0.5	RPC

表 - 5 高靱性セメント等の材料特性

No.	繊維種類 (混入率 %)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
B1	PVA(1.7)	46.0	18.2
B2	RPC	124.0	48.1
B3	PVA(1.7)	40.5	18.5
B4	RPC	128.6	48.2

表 - 6 鋼材の材料特性

材料	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	材質
鋼材	285.8	422.4	210.8	SN400B
鉄筋	369.0	545.7	207.1	SD295A

図 - 3 に示すように加力には間柱部分試験体と同様、建研式加力装置を用いた。軸力は既存フレームへの新設間柱を想定し、加えていない。

試験体の全体変形、接合要素部分の相対変形、軸変位、及びせん断変形などを測定するために変位計を取り付けた。また、主筋には歪ゲージを貼り、鉄筋の降伏状況を計測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 間柱部分試験体

間柱部分試験体のせん断力と接合要素の変形角との関係を図 - 4 に示す。ここで、せん断力は水平荷重を全断面で除したものである。また、実験結果を表 - 7 にまとめて示す。



(a) A4 (PESC100)



(b) A5 (PESC200S)



(c) A8 (MOR200)



(d) A9 (RPC200)

写真 - 1 破壊形状 (間柱部分試験体)

繊維を混入した試験体は、小振幅では接合要素の剛性低下や損傷の蓄積などは見られなかった。このことより、接合部の強度を間柱の材端に形成される塑性ヒンジの耐力よりも十分大きく設定することにより、繰り返し荷重が作用しても間柱の材端でのエネルギー吸収が十分可能であることが示唆された。大振幅での繰り返し実験の結果、接合要素の部分での塑性エネルギー吸収はそれ程大きくなく、フープ筋などによる補強を行わない限り接合要素に大きな塑性エネルギー吸収を期待するのは困難であることがわかった。

表 - 7 間柱部分試験体の実験結果

試験体	正側最大耐力 (負側) (kN)	正側最大耐力 時の部材角 (負側) ($\times 10E-3$)	初期剛性 (kN/mm)	計算値 (kN)				破壊モード
				Qmy	Qsu	Qpu	Qsteel	
A1 (PESC200)	251.79 (-256.69)	33.93 (-30.53)	179.69	277.7	215.7	343.0	616.4	圧縮破壊
A2 (PESC250)	241.24 (-238.30)	23.32 (-30.58)	170.04	222.1	181.6	343.0		せん断
A3 (PESC150)	305.23 (-292.48)	31.97 (-27.93)	295.54	370.2	266.9	343.0		せん断
A4 (PESC100)	407.22 (-387.85)	58.56 (-33.34)	297.84	555.3	352.7	343.0		パンチング シヤー
A5 (PESC200S)	298.40 (-315.28)	91.56 (-31.31)	236.18	277.7	310.3	343.0		曲げ (端部圧壊)
A6 (PVA200)	242.72 (-237.57)	17.83 (-10.10)	226.04	276.9	208.3	326.1		せん断
A7 (PE200)	256.20 (-239.77)	11.97 (-10.32)	227.41	277.6	214.8	341.1		せん断
A8 (MOR200)	147.84 (-143.91)	7.95 (-5.27)	157.38	279.5	237.3	392.5		せん断
A9 (RPC200)	311.36 (-325.58)	28.68 (-19.61)	344.26	286.5	461.3	905.7		曲げ (端部圧壊)

ここで、Qmy：曲げ耐力⁵⁾、Qsu：せん断耐力⁶⁾、Qpu：パンチングシヤー、Qsteel：鉄骨耐力

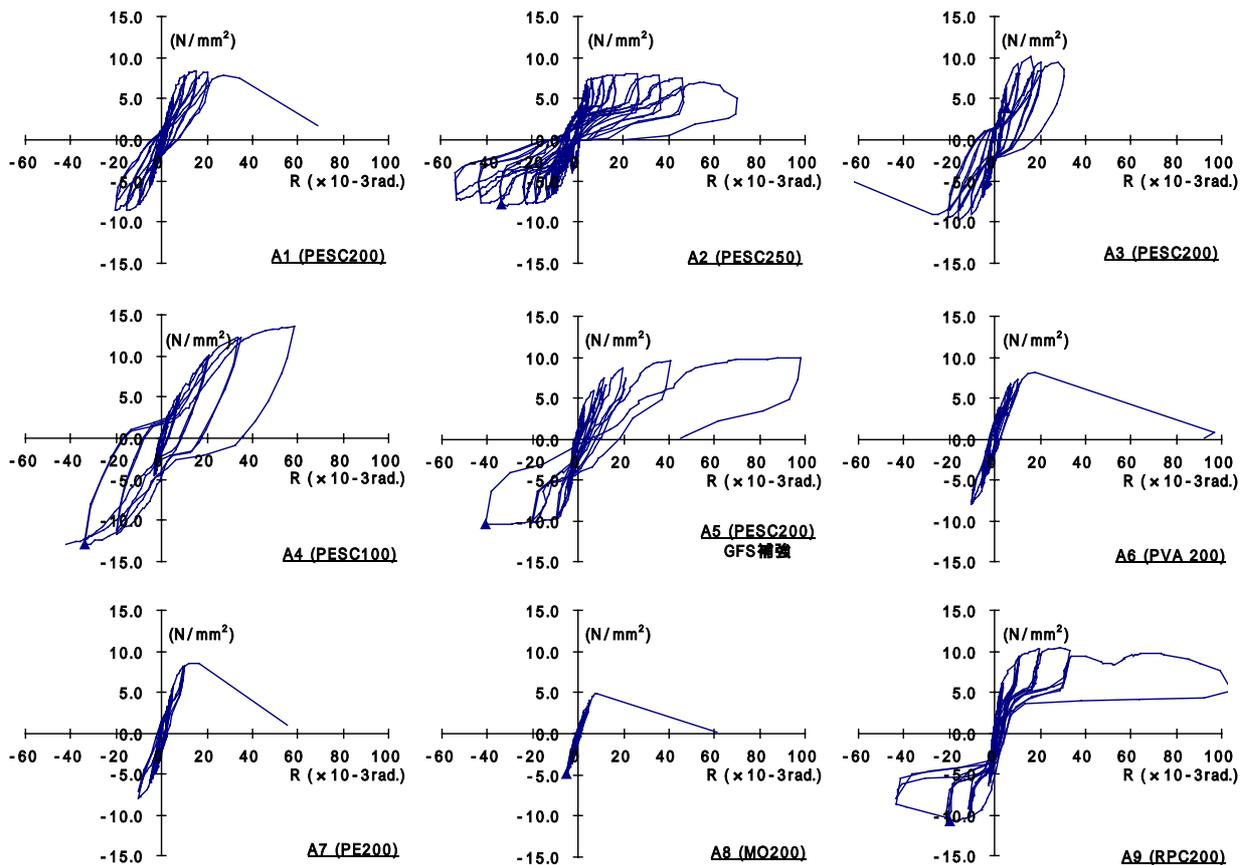


図 - 4 せん断力と変形角との関係 (間柱部分試験体)

一方、繊維無混入の No.A8 は耐力及び剛性が他の試験体に比べて 6 割程度であり、+1/125 rad. でせん断破壊した。破壊形状はせん断補強を使用していないため、ほとんどがせん断破壊

であったが、B/H が小さい No.A4 では写真 - 1 に示すように鉄骨部との接続部からずれ変形を生じるような破壊パターンのパンチングシヤー形式で破壊した。また、ガラス繊維 3 重巻きで補

強した No.A5 と高強度・高剛性の高靱性セメントを使用した。

No.A9 では曲げ降伏後、接合要素の端部でセメントの圧壊で耐力が低下した。

3.2 間柱試験体

間柱試験体の平均せん断力 変形角関係を図 - 5 に示す。細い線は高靱性部での変位を高靱性部の高さ(H)で割った値と一緒に描いている。また、高靱性部でひび割れなどによる剛性低下が起こらない耐力の参照値として $F_c/20$ を示した。実験結果は表 - 8 にまとめて示す。

No.B1 (PVA200) は、最大耐力 165.24kN で全体部材角が 0.0175rad. に達し、高靱性部での変形角は 0.0283 と大きく、せん断破壊で耐力が低下した。なお、鉄骨の端部でのひずみ度は 3000

マイクロ程度で塑性化し始めている段階であった。No.B2 (RPC200) は、最大耐力 244.43kN であり、安定した履歴特性を示した。高靱性部が若干塑性化したが、狙い通りに鉄骨の端部で塑性化が進み、最終的には鉄骨の座屈と破断により耐力が低下した。No.B3 (PVA100) は、最大耐力 205.2kN で、No.B1 (PVA200) より耐力が若干高いが高靱性部での塑性化が急激に進み 0.0176rad. でせん断破壊した。鉄骨端部でのひずみ度は 5000 マイクロ程度であるが、高靱性部の変形角は 0.094 であった。

No.B4 (RPC100) は、+1/30 rad. を終え、1/25 rad. の加力を加える途中で試験体の両端のスタブに相当する部分と実験装置のフレームとを締め付けていたボルトが切断し、その時点で加力を中止した。+1/30 rad. までを考察すると高靱

表 - 8 間柱試験体の実験結果

試験体	正側最大耐力 (負側) (kN)	正側最大耐力 時の部材角 (負側) ($\times 10E-3$)	初期剛性 (kN/mm)	計算値 (kN)				破壊モード
				Q _{my}	Q _{su}	Q _{pu}	Q _{steel}	
No. B1 (PVA200)	165.24 (-157.15)	17.50 (-15.02)	8.26	235.0	188.6	310.5	151.6	せん断
No. B2 (RPC200)	238.79 (-244.43)	67.30 (-60.19)	9.08	235.0	418.5	837.0	151.6	鉄骨破壊 ・局部座屈
No. B3 (PVA100)	205.20 (-200.55)	17.58 (-14.79)	12.95	470.0	288.9	273.4	172.9	せん断
No. B4 (RPC100)	205.69 (-208.64)	29.67 (-29.70)	7.57	470.0	724.0	868.1	151.6	1/30Rad. で BOLT 破断

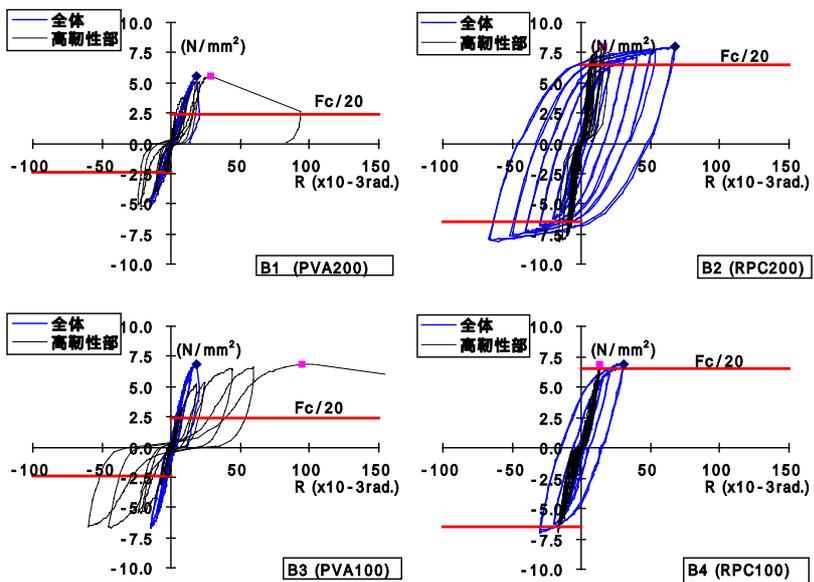


図 - 5 せん断力と変形角との関係 (間柱試験体)



(a) B1 (PVA200)



(b) B2 (RPC200)

写真 - 2 破壊形状 (間柱試験体)

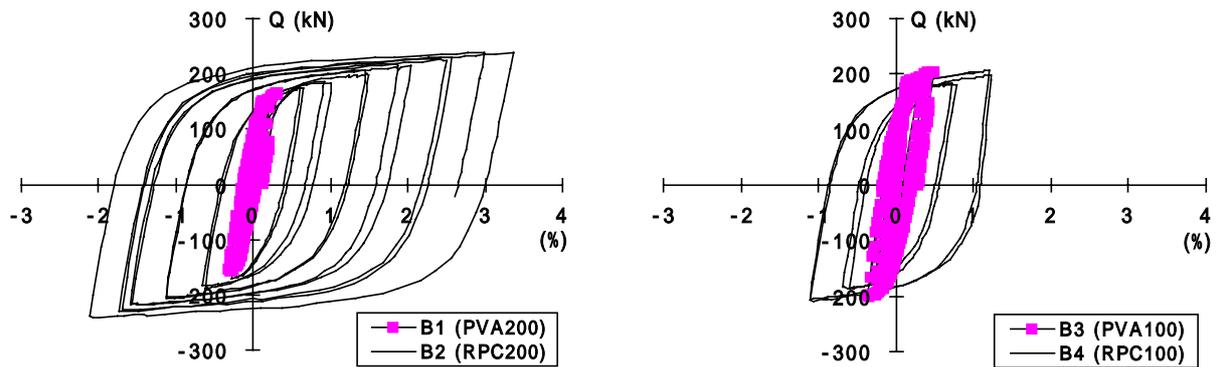


図 - 6 せん断力とひずみ度との関係（間柱試験体）

性部にはひび割れが観察されず，せん断変形角も弾性の範囲であった。従って締め付けボルトの破断がなければ No. B2 (RPC200) と同等以上の性能が期待できたものと思われる。

また，図 - 6 には鉄骨端部でのひずみ度を示した。高靱性部に RPC を用いた試験体は鉄骨端部で十分な塑性変形を生じたが，PVA を用いた試験体は鉄骨端部で塑性域に入っているものの最終的には高靱性部でせん断破壊した。

4. 結論

間柱の中央に設けた高靱性セメントによる接合部の構造性能を間柱部分試験体（9 体）および間柱試験体（4 体）により検討した。

間柱部分実験では小振幅での繰り返しによる高靱性セメントの剛性低下や損傷の蓄積などは見られなかった。

また，間柱実験では接合部にせん断補強筋など配置しなくても接合部に生じるせん断力を $F_c/20$ 以下程度に制御すれば繰り返しによる接合部の損傷累積が見られないことがわかった。実際に，高靱性部に RPC を用いた試験体では，間柱端部の鉄骨部分の変形により十分大きな塑性変形を確保できた。

参考文献

- 1) 諏訪田晴彦，福山洋，磯雅人：構造物の高靱性化に向けた高靱性繊維補強セメント複合材料の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.133-138，2001
- 2) 小幡一博，菅野俊介ほか：超高強度コンクリートの圧縮特性に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.13-14，2002
- 3) 高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，日本コンクリート工学協会，pp.11-13，2002
- 4) 諏訪田晴彦，福山洋，梁 一承：セメント系部材の履歴特性コントロールに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.1597-1602，2002
- 5) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度計算法-，日本建築学会，pp. 139，1999
- 6) 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説，日本建築防災協会，pp. 166，2001 年