

既存 RC 造建築物の扁平梁外付けフレームによる耐震補強工法の研究
その1 扁平梁外付けフレームの十字形接合部の梁曲げ破壊実験

耐震補強 外付けフレーム ポリマーセメントモルタル
柱梁接合部 梁曲げ破壊

準会員 ○渡邊彩奈*1 正会員 稲井栄一*2
正会員 秋田知芳*3 非会員 北原敬佑*4
正会員 夏目実穂*4 正会員 尾崎純二*5
正会員 河本孝紀*5

1. はじめに

著者らは既存 RC 造建築物の外付けフレームによる耐震補強工法の開発研究を行ってきた^{1)~3)}。本工法の特徴は柱梁接合部に高強度のプレミックスタイプのポリマーセメントモルタル (PCM) を用いることにより、高強度コンクリートが容易に調達できることにある。

本研究は、既存の RC 造建築物のフレームに扁平梁外付けフレームを直付けして補強を行うものである。扁平梁は、従来の梁より薄いので開口部の邪魔にならないという特徴がある。本報 (その 1) では、十字形柱梁接合部の梁曲げ破壊実験について報告する。

表 1 試験体一覧

試験体	柱			梁		
	断面(mm)	主筋	帯筋	断面(mm)	主筋	あばら筋
J-9	300×400	14-D16(SD390)	3-U7.1@50 (SBPD1275) (pw=0.9%)	600×250	18-D16(SD490)	4-U7.1@50 (SBPD1275) (pw=0.53%)
J-1	320×350	8-D19(SD490)	2-D13@50 (pw=1.59%)	320×400	6-D19(SD490)	2-D10@100

表 2 セメント系材料試験結果

試験体	使用部位	材料	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
J-9	下側柱および梁部材	普通コンクリート	43.7	34.4
	上側柱部材	普通コンクリート	38.7	35.9
	柱梁接合部	PCM	94.7	28.9
J-1	柱梁	普通コンクリート	35.0	26.1
	柱梁接合部	PCM	95.1	28.7

表 3 鉄筋の材料試験結果

試験体	使用部位	材種	降伏強度 (N/mm ²)	降伏時ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
J-9	柱主筋	D16 (SD390)	517	2244	693	194
	梁主筋	D16 (SD490)	586	2631	785	188
	柱梁補強筋	U7.1 (SBPD1275)	1515	7807	1539	193
	コの字型補強筋	D13 (SD345)	413	2046	592	200
	柱主筋	D19 (SD490)	553	3149	723	175
J-1	梁主筋	D13 (SD345)	407	2155	556	189
	あばら筋	D10 (SD295)	375	2037	504	184

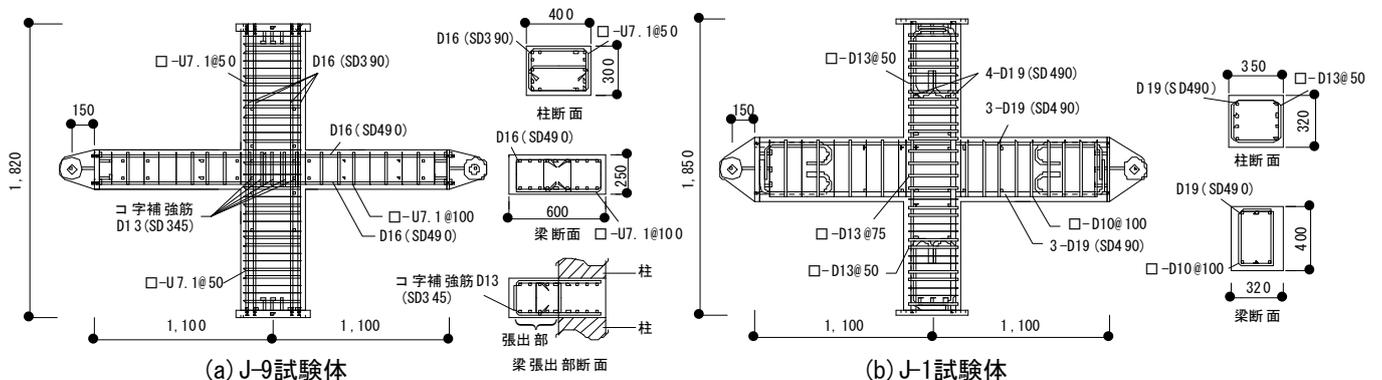


図 1 試験体形状

Study on the Seismic Retrofitting Method of Existing Reinforced Concrete Buildings by External Frames with flat beam

Part.1 Tests of Beam-column-joint in Wide Beam-Column

WATANABE Ayana, INAI Eiichi, AKITA Tomofusa, KITAHARA Keisuke, NATSUME Miho, OSAKI Junji. and KAWAMOTO Takanori

を打設し、柱梁接合部は設計基準強度 $F_m=60\text{N/mm}^2$ の PCM を打設している。

J-1 試験体は 1/2 縮尺であり、柱梁部は $F_c=33\text{N/mm}^2$ のコンクリートを、柱梁接合部は $F_m=60\text{N/mm}^2$ の PCM を打設している。施工上の観点から接合部近傍の梁の一部にも PCM を使用している。両試験体は、破壊形式が梁主筋の曲げ降伏を想定した試験体とする。また、柱梁接合部のせん断強度は十分余裕があるものになっている。

3. 加力方法

図 2 に加力装置を示す。反力ビーム上に設置したピンに柱脚を、左右梁両端のピンにロードセルを接続し、柱頭に水平加力ジャッキ、パンタグラフ形式の面外拘束装置を接続する。また、梁端部片側にもパンタグラフ形式の面外拘束装置を接続する。加力は、水平ジャッキにより正負繰り返しの水平力を载荷する。なお、試験体は外付けフレーム

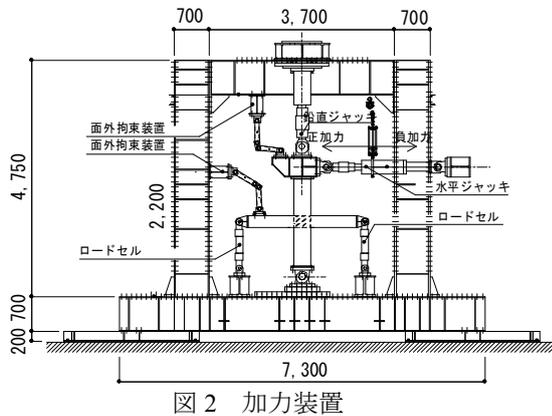
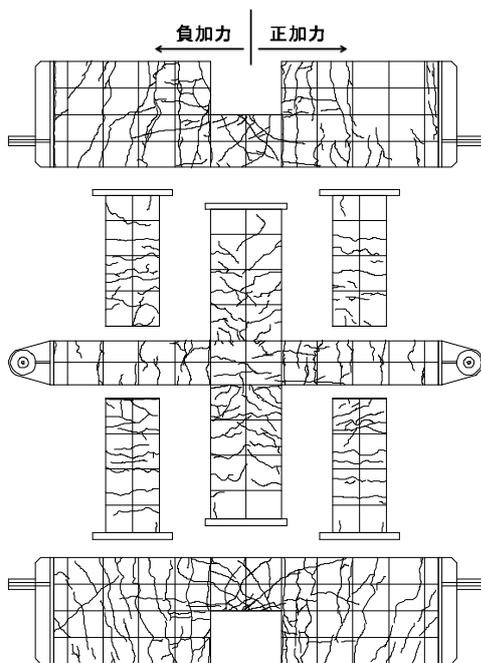


図 2 加力装置



(a) J-9 試験体

の柱梁接合部の部分架構を取り出したものであるため、軸力はゼロとした。

制御は、試験体に設置した十字形の計測治具（上端と下端を加力治具にピン接合）により求められる層間変形角 R による変位制御とする。層間変形角は、梁両先端部と計測治具の左右端部との鉛直変位の差 ($R\delta_y - L\delta_y$) を梁スパン ($L=2500\text{mm}$) で除して求める。加力スケジュールは $R=\pm 0.125 \times 10^{-2}\text{rad}$ を 1 サイクル、 $R=\pm 0.20 \times 10^{-2}\text{rad}$ 、 $R=\pm 0.40 \times 10^{-2}\text{rad}$ 、 $R=\pm 0.67 \times 10^{-2}\text{rad}$ 、 $R=\pm 1.00 \times 10^{-2}\text{rad}$ 、 $R=\pm 1.50 \times 10^{-2}\text{rad}$ 、 $R=\pm 2.00 \times 10^{-2}\text{rad}$ 、 $R=\pm 3.00 \times 10^{-2}\text{rad}$ 、 $R=\pm 4.00 \times 10^{-2}\text{rad}$ を目安として各々 2 サイクルずつ加力を行った。

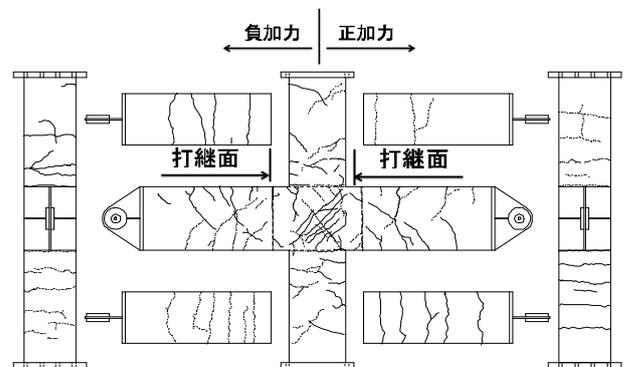
4. 実験結果

図 3 に最終ひび割れ状況を、図 4 に柱水平力 Q —層間変形角 R の関係を、図 5 に柱主筋および梁主筋のひずみ分布を示す。 Q は柱に作用する水平力で水平ジャッキの荷重値である。

4.1 J-9 試験体

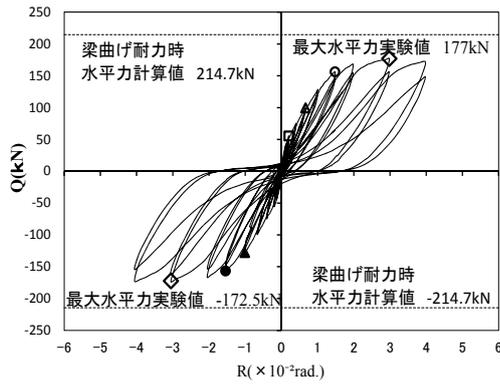
1 回目の $R=\pm 0.20 \times 10^{-2}\text{rad}$ の加力サイクル時に梁のコンクリートに曲げひび割れが発生した。なお、梁のコンクリートに曲げひび割れが発生した加力サイクルのピーク時の水平力は、正側で 55.2kN 、負側で -55.2kN であった。2 回目の $R=-0.20 \times 10^{-2}\text{rad}$ の加力サイクル時および 1 回目の $R=+0.40 \times 10^{-2}\text{rad}$ の加力サイクル時に柱梁接合部の PCM に斜めひび割れが発生した。その後、1 回目の $R=\pm 0.40 \times 10^{-2}\text{rad}$ の加力サイクル時に梁のコンクリートと PCM の境界および柱コンクリートにそれぞれ曲げひび割れが発生した。

2 回目の $R=-0.40 \times 10^{-2}\text{rad}$ の加力サイクル時および 1 回目の $R=+0.67 \times 10^{-2}\text{rad}$ の加力サイクル時に柱梁接合部の張出部上下面に斜めひび割れが発生し、左梁の下端筋の柱内を通る主筋のうち 1 本の主筋ひずみが降伏ひずみに達した。その後、1 回目の $R=\pm 1.50 \times 10^{-2}\text{rad}$ の加力サイクル時に柱内を通る梁主筋のひずみがそれぞれ降伏ひずみに達した。また、このとき柱梁接合部の境界面における柱主筋のうち、張出側における主筋のひずみが降伏ひずみに達した。その

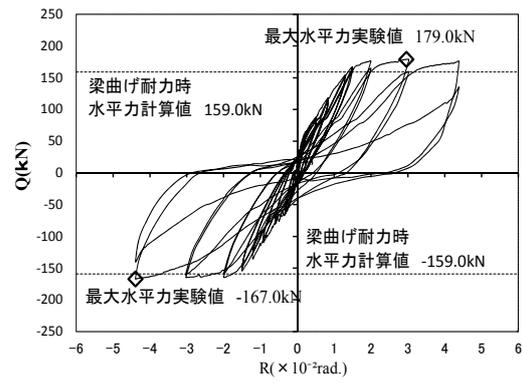


(b) J-1 試験体

図 3 試験体の最終ひび割れ状況

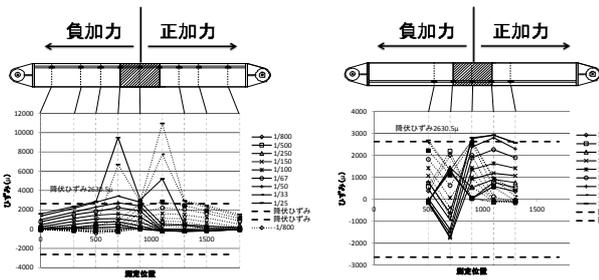


(a) J-9 試験体



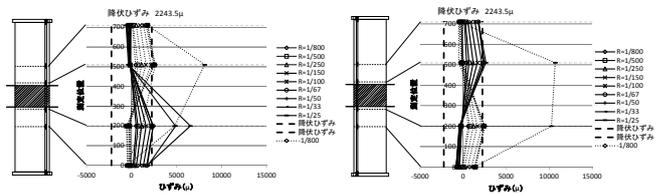
(b) J-1 試験体

図4 柱水平力 Q—層間変形角 R 関係



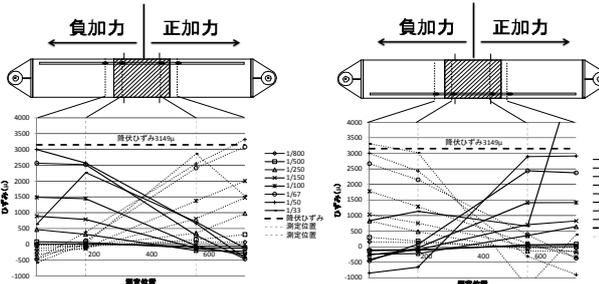
(a) 上端梁主筋 5 (J-9)

(b) 下端梁主筋 5 (J-9)



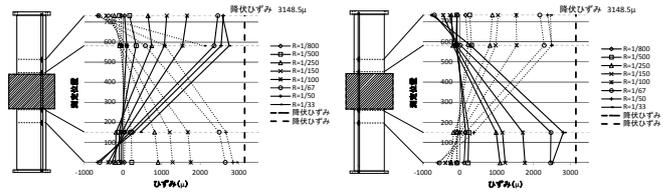
(e) 柱右側主筋 (J-9)

(f) 柱左側主筋 (J-9)



(c) 上端梁主筋 (J-1)

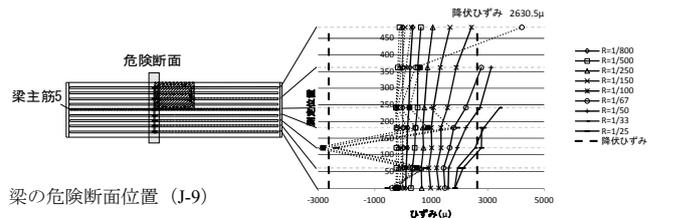
(d) 下端梁主筋 (J-1)



(g) 柱右側主筋 (J-1)

(h) 柱左側主筋 (J-1)

図5 柱主筋および梁主筋のひずみ分布



(i) 梁の危険断面位置 (J-9)

後、柱梁部材の曲げひび割れおよび柱梁接合部および張出部上下面の斜めひび割れが発生または伸展し、1回目の $R=\pm 3.00 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の加力サイクルのピーク時に正負ともに最大耐力を迎え、その時の水平力は正側で 177.0kN、負側で -172.5kN であった。なお、最大耐力を迎えた $R=\pm 3.00 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の加力サイクル時には柱外に配置した梁主筋のひずみも降伏ひずみに達した。

最大耐力後の水平力は、ほぼ低下せず、1回目の $R=\pm 4.00 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の加力サイクル時に柱梁接合部の斜めひび割れが大きく開き、PCMの外側がはらみ出しおよび剥落した。なお、同サイクルピーク時の水平力は正側で 171.5kN、負側で -172.5kN であった。その後、2回目の $R=\pm 4.00 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の加力サイクル時に梁の長手方向に張出部境界に沿った段差が生じ、同サイクルピーク時の水平力が低下した。その時の水平力は正側で 147.4kN、負側で -154.0kN であり、

最大耐力の 80% ($0.8_e Q_u$) 程度を保持していた。水平力が最大耐力の 80% ($0.8_e Q_u$) まで保持した時の層間変形角と安全限界変形角を考えると、正負とも $R=\pm 3.00 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の繰返し時であり、J-9 試験体は $F=3.09$ 程度の变形性能を有していると判断する。J-9 試験体の破壊形式は、柱梁接合部に位置する主筋が降伏した後に試験体の剛性が低下したこと、またその時の柱主筋における引張有効鉄筋の一部および柱梁接合部のせん断補強鉄筋が降伏ひずみに達していなかったことより、梁曲げ破壊であると判断する。

4.2 J-1 試験体

1回目の $R=\pm 0.20 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の加力サイクルで梁のコンクリートと PCM の打継部に曲げひび割れが発生した。1回目の $R=\pm 0.67 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の加力サイクルにおいて柱梁接合部にせん断ひび割れが発生した。その後、柱梁部材の曲げひび

表 4 各部材の終局耐力計算値と実験値

試験体	計算値					破壊形式	実験値		実験値/計算値
	cQsu kN*1	cQmu kN*2	bQsu kN*3	bQmu kN*4	jQu kN*5		cQu kN*6	eQu kN*7	
J-9	370.4(上柱)	236.4(上柱)	356.4	214.7	219.3	梁曲げ破壊	214.7	177.0	0.82
	361.8(下柱)	236.4(下柱)							
J-1	350	194.4	297	159	358.9	梁曲げ破壊	159	179.0	0.92

*1 cQsu : 柱せん断耐力時水平力 *2 cQmu : 柱曲げ耐力時水平力 *3 bQsu : 梁せん断耐力時水平力 *4 bQmu : 梁曲げ耐力時水平力
*5 jQu : 柱梁接合部せん断耐力時水平力 *6 cQu : 水平耐力計算値 *7 eQu : 水平耐力実験値

割れおよび柱梁接合部のせん断ひび割れが発生及び進展し、1 回目の $R=\pm 2.0 \times 10^{-2}$ rad. の加力サイクルの $R=\pm 1.59 \times 10^{-2}$ rad. で右梁の下端主筋がコンクリートとPCMの打継部付近で引張降伏ひずみに達し、剛性が低下した。梁主筋の降伏以降は水平力の増大はほとんどみられなくなり、1 回目の $R=\pm 3.0 \times 10^{-2}$ rad. の加力サイクルの正側ピーク時に正側での最大耐力 179.0 kN に達した。また、左梁の上端主筋がコンクリートとPCMの打継部付近で引張降伏した。1 回目の $R=\pm 4.39 \times 10^{-2}$ rad. の加力サイクルの負側ピーク時に負側での最大耐力167.0kN に達した。

なお、 $R=\pm 4.39 \times 10^{-2}$ rad. サイクルまで柱梁接合部のせん断破壊、鉄筋の定着破壊、部材のせん断破壊は見られなかった。柱主筋は降伏ひずみをこえていないことから、試験体の最大耐力は、梁主筋の降伏で決まったと考えられ、試験体の破壊形式は梁曲げ破壊であると判断される。水平力が最大耐力の80%である-133.6kNまで低下した時の層間変形角を安全限界変形角と考えると、正負とも $R=3.0 \times 10^{-2}$ rad.となる。

4.3 J-9 試験体と J-1 試験体の比較

図 5 (i) のひずみ分布から分かるように、J-9 試験体の梁主筋について、梁の張出部端から 2 本の鉄筋を除いて、全ての鉄筋が降伏した。J-9 試験体の柱主筋については、内側 2 本（張出部反対側）を除き、全ての鉄筋が降伏する結果となった。J-1 試験体の柱主筋については、全ての主筋が降伏しなかった。また、J-9 試験体の方が J-1 試験体に比べ、早い時期に柱梁接合部にひび割れが入った。J-9 試験体は J-1 試験体に比べ、柱側面に曲げひび割れが多く生じていた。

5. 各部材の終局耐力の検討

両試験体の柱、梁、柱梁接合部の終局耐力の計算値と実験値を比較して表 4 に示す。算定に用いた各部材の耐力式を (1)式~(5)式に示す。

柱の曲げ耐力⁴⁾

$${}_cM_u = 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \left(1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot \sigma_B} \right) \quad (1)$$

柱のせん断耐力⁴⁾

$${}_cQ_{su} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_t^{0.23} (18 + \sigma_B)}{M / (Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \cdot \sigma_0 \right\} b_j \quad (2)$$

梁の曲げ耐力⁴⁾

$${}_bM_u = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (3)$$

梁のせん断耐力⁴⁾

$${}_cQ_{su} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_t^{0.23} (18 + \sigma_B)}{M / (Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b_j \quad (4)$$

柱梁接合部のせん断耐力⁴⁾

$$jQ_u = \kappa \cdot \varphi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j \quad (5)$$

$$F_j = 0.8 \cdot \sigma_B^{0.7} \quad (6)$$

$\kappa=1.0$ (十字形)、 $\varphi=0.85$

σ_B : PCM あるいは高強度コンクリートの圧縮強度

表 4 の J-9 試験体の ${}_bQ_{mu}$ の値は、梁主筋が全て降伏したと仮定して計算したものである。実験時の梁主筋の降伏状況に基づいて計算すると、 ${}_bQ_{mu}$ の値は 202.9kN となった。

6. まとめ

十字形柱梁接合部の梁曲げ破壊実験を行い、得られた主要な知見について以下に記す。

- ① J-9 試験体は J-1 試験体と同等の良好な変形性能を有している。
- ② J-9 試験体では梁主筋は全て降伏するのではなく、梁張出部端から 2 本の梁主筋は降伏しなかった。
- ③ 両試験体の破壊形式は梁の主筋降伏による曲げ破壊であったが、J-9 試験体では柱主筋の大部分が降伏していた。

参考文献

- 1) 清水隆行、稲井栄一、柿原巧弥、原山賢、河本孝紀:既存 RC 造建築物の外付けフレームによる耐震補強工法の研究 (その 1) 補強架構の柱梁接合部実験 日本建築学会中国支部研究報告集 37, pp.153 - 156, 2014.3
- 2) 徳田麻理子、岩崎敬正、川端康平、稲井栄一、柿原巧弥、原山賢、河本孝紀:既存 RC 造建築物の外付けフレームによる耐震補強工法の研究 (その 2)~(その 4) 日本建築学会中国支部研究報告集 37, pp.157 - 168, 2014.3
- 3) 脇田知英、田染賢二、稲井栄一、柿原巧弥、原山賢、河本孝紀:RC 造建築物の外付けフレームによる耐震補強工法の研究 (その 5) ~ (その 6) 日本建築学会中国支部研究報告書 38, pp.209 - 216, 2015.3
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課、国土交通省国土技術政策総合研究他監修: 2007 年度版建築物の構造関係技術基準解説書 2007.8

*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学生

*2 山口大学大学院創成科学研究科 教授・博士(工学)

*3 山口大学大学院創成科学研究科 講師・博士(工学)

*4 宇部興産(株) 建材資材カンパニー

*5 宇部興産(株) 建材資材カンパニー・博士(工学)

Student, Dept. of Perceptual Sciences and Design Eng., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ.

Prof, Graduate School of Sci. and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Lecturer, Graduate School of Sci. and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Construction Materials Div., Ube Industries .LTD.

Construction Materials Div., Ube Industries .LTD., Dr. Eng.