数値震動台による CFT 柱の繰り返し曲げせん断解析の V&V

VERIFICATION AND VALIDATION OF CYCLIC SHEAR-BENDING ANALYSIS OF CFT-COLUMN USING E-SIMULATOR

藤原 淳 ——— * 1	大崎 純 ――― * 2
田川浩之 ——— *3	宮村倫司 ——— * 4
山下拓三 ——— * 5	

キーワード:

数値震動台,V&V,角形コンクリート充填鋼管, 繰り返し曲げせん断載荷,変動軸力,損傷モデル

Keywords:

E-Simulator, Verification and validation, Square concrete-filled-tube, Cyclic shear-bending loading, Variable axial load, Damage model

Jun FUJIWARA — * 1 Hiroyuki TAGAWA — * 3 Takuzo YAMASHITA — * 5

Makoto OHSAKI — * 2 Tomoshi MIYAMURA - * 4

In this paper, cyclic shear-bending analysis of concrete-filled-tube (CFT) column using E-Simulator, which is a large-scale detailed finite element analysis system developed by NIED, is verified and validated. The solid element mesh is verified by varying types and sizes of solid elements. The effects of element types and sizes on analytical results are discussed. Two cases of experiment under variable axial load are simulated for validation. By comparing analytical and experimental results, it is shown that, the cyclic shear-bending behaviors are reproduced by E-Simulator. The computed internal damage of filled concrete is visualized and discussed.

1. はじめに

防災科学技術研究所では,建築,土木構造物の地震による損傷,破 壊過程を再現するための詳細有限要素解析システムである数値震動 台(E-Simulator)を開発している¹⁾。数値震動台の開発では、E-ディフェンスで行われた実大破壊震動台実験等の再現解析を通じて 妥当性の確認を行っており²⁾, また, 角形鋼管柱のメッシュの詳細度 を変えたときの精度検証も行っている 3)。著者ら 4)は、数値震動台を 用いて、松本ら5の行った角形 CFT の繰返し曲げせん断実験の再現 解析を行った。CFT の耐力を数値解析によって評価する試みはこれ まで幾つかなされているが (文献 6)-8)等), 圧縮破壊によるコンクリ ートの軟化挙動,鋼管の局部座屈,鋼管とコンクリートの相互作用の 全てを考慮した上で CFT の繰り返し曲げ変形を再現した解析は,著 者らの知る限りこれまで報告されていなかった。既報 4)では, CFT 試験体の3次元形状を忠実に再現したソリッド要素メッシュモデル とコンクリートの圧縮軟化挙動を表す構成モデルを組み合わせるこ とで、CFT の繰り返し曲げ耐力の劣化挙動を再現し、鋼管と充填コ ンクリート相互の力のやり取りを確認した。しかし、変動軸力を作用 させた場合や対角線方向載荷での精度は検証されていない。

本論文では、最初にソリッド要素メッシュモデルを用いた解析の 精度検証結果を報告する。ここでは、詳細度や要素種別を変えたいく つかの解析を実施し、詳細度と要素種別が解析結果に与える影響に ついて論じる。次に、変動軸力下の角形 CFT 柱の繰り返し曲げせん 断試験 50の再現解析を2例(柱主軸方向載荷と柱断面の対角方向載 荷)実施する。解析と実験で得られた荷重一変位関係を比較し、数値

- ²² 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)
- ³ 武庫川女子大学建築学部建築学科 准教授・Ph.D. / 防災科学技術研究所 客員研究員
- ⁴ 日本大学工学部情報工学科 准教授・博士(工学)/防災科学技術研究所 客員研究員
- ^{*5} 防災科学技術研究所 主任研究員・博士 (工学)

震動台を用いた CFT の繰り返し曲げせん断解析の妥当性の更なる確 認を行う。さらに,解析で得られた充填コンクリートの損傷と進行を 内部も含めて可視化する。以上により,数値振動台を CFT の数値解 析ツールとして活用可能であることを示す。

表1 実験パラメーター覧

N-	鋼管断面	柱高さ	計中に	# 古 七 白	
INO	(mm)	(mm)	甲田ノノレム	戦 10 月10	
M-5	幅 240×		赤毛	柱主軸	
M-6	奥行 240× 厚さ 8	1440	发虭	柱断面対角	



Senior Research Fellow, National Research Institute for Earth Science and Disaster

- Resilience (NIED), Dr. Eng. ⁷² Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.
- ^{'3} Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Mukogawa Women's Univ., Ph.D. / Visiting Researcher, NIED
- ^{*4} Assoc. Prof., Dept. of Computer Science, College of Eng., Nihon Univ., Dr. Eng. / Visiting Researcher, NIED
- ^{*5} Chief Researcher, NIED, Dr. Eng.

*1

 ¹ 防災科学技術研究所 主幹研究員・博士(工学)
 (〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

2. 対象とする実験と試験体の概要

本論文では、文献 5)で実施された角形 CFT 柱の繰り返し曲げせん 断試験のうち、変動軸力を与えた実験(M-5 と M-6)を対象とした 再現解析を行う。実験パラメータと試験体を、それぞれ表1と図1に 示す。CFT 柱の断面は一辺240 mmの正方形であり、鋼管の厚さは 8 mm、内法高さは1440 mmである。また、M-5の加力方向は柱主 軸方向、M-6 では柱断面の対角線方向である。

3. 材料の構成モデルとパラメータ

充填コンクリートと鋼材の構成モデルおよび材料パラメータは, 文献 4)と同じとする。ここでは、論文の完結性のため、構成モデル の概要と材料パラメータの値を示す。

コンクリートは、呼び強度 150 N/mm²の超高強度コンクリートで ある。双曲線形式に拡張された拡張 Dracker-Prager モデル⁹⁾に損傷 モデル $^{0.10}$ を組み合わせた構成モデルでコンクリートをモデル化す る。相当応力、静水圧、内部摩擦角、双曲線パラメータ、初期降伏応 力を、それぞれq, p, ϕ_r , ε_F , σ_9^0 として、降伏関数 Fを

$$F = \sqrt{l_F^2 + q^2} - p \tan \phi_F - d'$$
(1)
$$l_F = \varepsilon_F \sigma_0^y \tan \phi_F$$
(2)

で定義する。d'は σ_0^y の定義と降伏応力 σ^y から定められ、 σ_0^y を圧縮強 度で与える場合は次式で与えられる。

$$d' = \sqrt{l_F^2 + (\sigma^y)^2} - \frac{\sigma^y}{2} \tan \phi_F \tag{3}$$

硬化則は等方硬化とする。降伏関数と塑性ポテンシャルが異なるた め非関連流れ則となるが、非対称の係数行列を対称化して解を得る。

損傷変数Dを,累積圧縮塑性ひずみ ε_c^p から次式のように定める。ここで, D_{\max} はDの上限値, e_0 と e_1 は材料定数である。

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon_{c}^{r} \le e_{0} \\ D_{max} \frac{\overline{\varepsilon}_{c}^{p} - e_{0}}{e_{1} - e_{0}} & e_{0} < \overline{\varepsilon}_{c}^{p} \le e_{1} \\ D_{max} & e_{1} < \overline{\varepsilon}_{c}^{p} \end{cases}$$
(4)

損傷変数Dを用いて,次式により初期弾性定数E₀を減じて損傷後の弾性定数Eを定め,圧縮破壊に伴う軟化挙動を表す。

$$E = (1 - D)E_0 (5)$$

鋼管,スタブのフランジとウェブ,スタブのリブに用いられる鋼材 は,それぞれ呼び強度 780 N/mm²の高強度鋼,SM490A,SS400 で ある。移動硬化をともなう von Mises モデルでこれらの鋼材をモデ ル化する。高強度鋼の硬化曲線はトリリニア型,SM490A とSS400 の硬化曲線はバイリニア型とする。

コンクリートと鋼材の材料定数を、それぞれ表2、表3に示す。

4. 解析条件

基礎スタブ底面の節点のX,Y,Z軸方向変位を拘束する。加力ス タブ上面の全ての節点を剛体梁要素で接続して一体的に変位させ,

初期弾性 定数 <i>E</i> 0 N/mm ²	ポアソン比	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	$\phi_{_F} \ \mathrm{deg}$
37500	0.25	160	8	50
\mathcal{E}_F	硬化係数 N/mm ²	D _{max}	e ₀	<i>e</i> ₁
0.8273	37.5	0.9	0.0001	0.0025

表 2 コンクリートの材料定数⁴⁾

表3 鋼材の材料定数4)

鋼種	弾性定数 N/mm ²	ポアソン 比	降伏応力 N/mm ²	硬化 N/n	係数 nm ²
高張力鋼	212000	0.3	744	2300^{*1}	212^{*_2}
SM490A	205000	0.3	325	14	50
SS400	205000	0.3	235	13	50
**1 $0 \le \bar{\varepsilon}^p \le 0.0735$, **2 $0.0735 < \bar{\varepsilon}^p$ 8,000 6,000 4,000 2,000 0 -600 -400 -200 0 200 400 600 Horizontal Load (kN) 図 2 水平荷重と圧縮軸力の関係					
Def Def Def Def Def Def Def Def					
	0	5	10	15	20
Loading Cycle					
図3 載荷パターン					

かつ回転を拘束し平行移動のみを許容する。図2に示すように水平 荷重に応じて変動する軸力を柱に作用させ、漸増繰り返し曲げせん 断変形を与える。軸力の最大値6688kNと、水平力が0のときの軸 力2688kNは、鋼管と充填コンクリートの断面積と降伏応力の積の 和のそれぞれ50%と20%となっている。曲げせん断の振幅(柱の変 形角)は、1/400から1/33まで漸増させる(図3)。軸力が一定の範 囲では変位制御、軸力が変動する範囲では荷重制御とする。変位制御 での変位増分は1mm、荷重制御での荷重増分は変位増分が約1mm となるように設定する。鋼管とコンクリートの境界面では、面外方向 には接触、面内方向には滑り条件を設定する。解析は静的解析とし、 幾何学的非線形性を考慮する。ソルバは、ADVENTURECluster Solver ver. 2014¹¹¹をベースとした数値震動台を用いる。

5. ソリッド要素メッシュモデルとその精度検証

既報4)と同様に、非適合モードを加えた6面体1次要素で鋼管と スタブを離散化する。山下ら³⁰の中空角形鋼管を対象とした検証から、 鋼管の厚さ方向と幅方向の分割数をそれぞれ2と約20とする。スタ ブフランジ面から360mmの範囲は長さ方向の要素辺長を12mmと して、柱中央に向けて長さ方向のサイズを漸増させる。充填コンクリ ートには、6面体1次要素を用いる。スタブフランジ面から上下240 mmの範囲の要素寸法は一辺15mmかつ辺長比が1程度として、端 部および中央に向けて長さ方向のメッシュ分割を段階的に粗くする。 M-5とM-6の全体概要、およびM-5の柱脚付近の鋼管と充填コンク リートのメッシュを、それぞれ図4(a)-(d)に示す。

M-5 のソリッド要素メッシュは既報 4)と同様である。既報ではメ ッシュの検証について報告していなかったので、ここに検証結果を 示す。検証のパラメータは、充填コンクリートのソリッド要素の種類 と要素寸法、および鋼管のメッシュ分割数である。検証のケースとパ



表4 充填コンクリートのソリッド要素メッシュの検証ケース

X		
記号	ソリッド要素	要素サイズ
Hexa-154)		15 mm
Hexa-10	6面体1次要素	10 mm
Hexa-7.5		7.5 mm
Tetra-15		15 mm
Tetra-10	4面体1次要素	10 mm
Tetra-7.5		7.5 mm

表5 鋼管のソリッド要素メッシュの検証ケース			
記号	幅方向の分割数	厚さ方向の分割数	
B20-T24)	20	2	
B20-T4	20	4	
B40-T2	40	2	



図5 水平荷重-水平変位関係 (M-4. 充填コンクリートの6面体要素サイズの検証)



(M-4. 充填コンクリートの4面体要素サイズの検証)

ラメータを表 4,表 5 に示す。ここで、Hexa-15 と B20-T2 は同一、 かつ既報 4)と同じソリッド要素メッシュモデルである。文献 5)で行









われた一定軸力下(4000 kN)での繰り返し曲げせん断試験(M-4) の再現解析を実施し、パラメータが解析結果に与える影響を検証す る。図 5,図 6,図 7 に、それぞれ充填コンクリートを 6 面体 1 次要 素で離散化した解析、充填コンクリートを 4 面体 1 次要素で離散化 した解析、鋼管の要素分割数を変化させた解析での水平荷重-水平 変位関係を示す。コンクリートに 6 面体 1 次要素を用いた解析では、 要素サイズが 7.5 mm から 15 mm の範囲では、要素サイズは解析結 果にほとんど影響を与えていない。4 面体 1 次要素を用いた解析で も、要素サイズの影響は小さいが、6 面体要素を用いた解析に比べて 荷重の値が高く、かつ要素サイズが小さくなると 6 面体要素を用い た結果に漸近していく。鋼管では、文献 3)と同様に、幅方向の分割 数が 20 かつ厚さ方向の分割数が 2 のメッシュより詳細なメッシュを 用いても、解析結果への影響はみられなかった。

6. 変動軸力を受ける CFT 柱の繰り返し曲げせん断解析

図4に示すメッシュ(表4のHexa-15,表5のB20-T2と同等) を用いる。M-5とM-6の水平荷重-水平変位関係を,それぞれ図8 と図9に示す。ここで,青色の実線が解析結果,灰色の破線が実験結 果である。変形角 1/100 までは両ケースで実験と解析の荷重-変位 関係は,ともにほぼ線形であり,よく一致している。



図 10 柱脚付近の変形と相当塑性ひずみ分布 (M-5,変形角 1/50,変位2倍表示)

M・5 試験体の解析と実験では、変形角が 1/100 を超えると顕著な 耐力劣化がみられる。解析での最大荷重とその際の水平変位はそれ ぞれ 667.3 kN と 18.6 mm であり、実験では 634.7 kN と 19.2 mm である。実験では変形角 1/50 時に鋼管の圧縮側フランジに局部座屈 が観察されており、解析でも同じタイミングで局部座屈が生じてい る (図 10)。実験では、変形角-1/50 時に鋼管に亀裂が生じており、 今回用いた鋼材構成則では破断を表現できないが、以降の解析の荷 重一変位関係は実験とよく対応している。

図 11 に,解析で得られた M-5 の柱脚付近の損傷変数分布の推移 を示す。図 11(a)にみられるように,スタブフランジ面より 50mm 程 度高い位置から損傷が生じている。図 11(a)の損傷が生じ始めた高さ の要素 a の X, Y, Z 軸方向応力(圧縮を負とする)と相応応力,静水 圧(圧縮が正)は、それぞれ-0.5、-15.4、-194.7、187.2、70.2 N/mm²、 スタブフランジ 高さの要素 b では、それぞれ-133.1、-59.7、-263.4、 197.6, 152.1 N/mm²である。要素bのZ軸方向の圧縮応力と相当応 力は要素 a に比べて高い一方, 鋼管との接触による X 軸方向応力が 生じ、これにより静水圧が高くなり、降伏や損傷が生じ難くなってい る(式(1)に示す降伏関数を参照)。以降,損傷は局所化せずに柱脚ま わりに広く進行している。図 11 (g)では、X軸方向負側で損傷が生じ ている。図 11 (g)の要素 c の X, Y, Z軸方向応力は, それぞれ-129.5, -41.2, 2.5 N/mm²であり, X軸方向の圧縮応力によって損傷が進行 している。図 12 に、図 11 (g)と同じタイミングでの充填コンクリー ト表面の接触応力分布を示す。要素 c 付近での接触がみられ, これに よって X 軸方向の圧縮応力が増大している。コンクリートの角以外 での接触は,解析を通じて確認されなかった。また,柱に同じ変形角 を与えた場合でも1回目に比べて2回目で損傷が進行した。充填コ ンクリート断面の損傷変数分布を図13に示す。損傷は角から発生し ているが、進行に伴って曲げにより生じる軸方向ひずみの分布に近 づいている。





図 12 コンクリート表面の接触応力分布 (M-5, 変形角+1/50, 2回目, 変形等倍表示)



(a): 変形角+1/100,1回目(b): 変形角+1/50,1回目図 13 充填コンクリートの損傷変数分布(M-5,柱脚まわり,断面,変形等倍表示)



図 14 柱脚付近の変形と相当塑性ひずみ分布 (M-6, 変形角 1/50, 変位 2 倍表示)

M-5 と同様に, M-6 でも変形角が 1/100 を超えると耐力劣化が生 じる (図 9)。解析での最大荷重とその際の水平変位はそれぞれ 624.0 kN と 20.6 mm, 実験では 629.5 kN と 20.6 mm であり, 最大荷重 とその際の水平変位は解析と実験でよく一致している。変形角 1/50 における柱脚まわりの変形と相当塑性ひずみ分布を、図 14 に示す。 実験と同様に、再現解析でも変形角 1/50 で鋼管に局部座屈が生じて いる。また、実験では変形角が-1/50となる過程で鋼管に亀裂が生じ ており、以降の実験と解析の荷重-変位関係の差は大きい。

図 15, 図 16, 図 17 に, M-6 の柱脚付近の損傷変数分布の推移と コンクリート表面の接触応力分布および断面の損傷変数分布をそれ ぞれ示す。M-5 と同様に、スタブフランジ面よりも高い位置で損傷 が始まり,以降局所化せずに柱脚まわりに広く進行している。一定振 幅の繰り返し載荷でも損傷が進行した。柱の変形角が2回目に1/50 になったときに以降は変形により生じた接触により X 軸正方向の載 荷でも X 軸方向負側で損傷が進行した。接触はコンクリートの角に のみ生じた。断面内の損傷変数分布は、曲げによる軸方向ひずみの分 布と対応している。

M-5 と M-6 の再現解析の結果から、角形 CFT 柱の変動軸力下で の繰り返し曲げせん断挙動における耐力劣化を、数値震動台を用い た解析により精度よく再現可能であることを示した。実験での最大 耐力に対する解析値の比は、M-5 で 1.051、M-6 で 0.991 であった。 加えて,解析で得られたコンクリートの損傷変数分布と,鋼管とコン クリートの接触応力を可視化,分析した。損傷がスタブフランジ面よ り高い位置から始まること、損傷が局所化せずに広い範囲に分布す ること、同振幅の曲げせん断でも繰り返しによって損傷が進行する こと、変形角が1/50を超える範囲で鋼管とコンクリートの接触によ るコンクリートの圧縮損傷が生じたこと、コンクリートの角にのみ 鋼管との接触がみられること、ならびに断面内の損傷変数の分布は 曲げによる軸方向ひずみの分布と対応することを確認した。





図 16 コンクリート表面の接触応力分布 (M-6, 変形角+1/50, 2回目, 変形等倍表示)



0.60 0.45 0.30 0.15 0.00





7. まとめ

本論文では,著者らの研究グループで開発している数値震動台^いを 用いたコンクリート充填鋼管 (CFT) 柱の繰り返し曲げせん断解析の 検証と妥当性確認を行った。

まず,一定軸力下での繰り返し曲げせん断実験 ⁵の再現解析を通じ て,ソリッド要素メッシュモデルを検証した結果を報告した。

- 充填コンクリートを6面体1次要素で離散化した場合は,要素サイズ 7.5 mm から15 mm の範囲では,要素サイズの計算結果への影響はみられなかった。
- 充填コンクリートを4面体1次要素で離散化した場合は,要素サイズ 7.5 mm から15 mm の範囲では,6面体要素に比べて荷重の値が大きく,要素サイズを小さくすると6面体1次要素の結果に漸近した。
- 中空角形鋼管のメッシュ詳細度検証結果 ³⁾と同様に,鋼管の 幅方向と厚さ方向の分割数をそれぞれ 20 と 2 としたソリッ ド要素メッシュモデルより詳細なモデルを用いても,解析結 果への影響はみられなかった。

次に, 既報 4)で未実施であった,変動軸力下で柱主軸方向に載荷 した実験,および変動軸力下で柱断面の対角線方向に繰り返し曲げ を与えた実験(ともに文献 5)で実施),の再現解析を行った。ここで, 柱の径高さ比は 6 で,軸力の変動範囲は 0 から鋼管と充填コンクリ ートの降伏軸力の和の 50%までである。また,材料定数や解析条件, メッシュの詳細度は既報 4)と同様である。

- ・ 両ケースで,変形角 1/100 までは,水平荷重と水平変位の関係は解析,実験ともにほぼ線形であった。
- 両ケースの実験で、変形角 1/50 で鋼管の圧縮側フランジで
 局部座屈を生じており、解析でもこの局部座屈を再現した。
- 実験で観察された耐力劣化挙動を,解析で精度よく再現できた。最大耐力およびそのときの水平変位の,実験値に対する 解析値の差は最大で 5.1%であった。
- ・ 以上の結果から、変動軸力下での角形 CFT 柱の繰り返し曲 げせん断挙動を、数値震動台を用いた解析によって既報 4)と 同程度の精度で再現可能であることが示された。

解析で得られたコンクリートの損傷変数と鋼管とコンクリートの 接触応力を可視化し、分析した。2 例共通で、以下が確認された。

- スタブフランジ高さ(材端)の鋼管との接触により充填コン クリートの静水圧が高まり、材端で塑性化が生じ難くなった ことにより、材端より高い位置で損傷の進行が始まった。
- 損傷が局所化せずにある程度の範囲で進行した。
- 同振幅の曲げせん断でも、繰り返しによって損傷が進行した。
- ・ 柱の変形角が 1/50 を超える範囲で、曲げせん断により軸方 向の引張応力が生じる側で、鋼管とコンクリートの接触によ ってコンクリートの圧縮損傷が進行した。
- コンクリートの角にのみ,鋼管との接触が確認された。
- 断面内の損傷変数は、曲げによる軸方向ひずみの分布と対応 した分布となった。

以上より、CFT 柱の繰返し曲げせん断載荷時の破壊挙動を高精度で 再現するための数値解析ツールを開発することができた。

鋼材の破断を表現する構成モデルを開発し、破断を伴う挙動を再 現することが、今後の課題の1つである。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学 研究センター・数値震動台研究開発分科会における成果である。大成 建設株式会社の安田聡氏に、本研究で用いた CFT 柱の実験データを 提供頂いた。また、本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤(B), No. 19H02286)の助成による。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 堀 宗朗,野口 裕久,井根 達比古: E-Defense と連動させた数値 震動台の開発計画,土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.1420-1425, 2007
- 2) Miyamura, T., Yamashita, T., Akiba, H. and Ohsaki, M.: Dynamic FE Simulation of Four-Story Steel Frame Modeled by Solid Elements and Its Validation Using Results of Full-Scale Shake-Table Test, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 44, No. 9, pp. 1449-1469, 2015.1
- 山下 拓三,宮村 倫司,秋葉 博,梶原 浩一:角形鋼管のソリッド要素による有限要素弾塑性座屈解析の精度検証,日本計算工 学会論文集,Vol. 2013, pp. 1-13, 2013.1
- 4)藤原 淳,大崎純,田川浩之,宮村倫司,山下拓三:コンクリートの圧縮破壊を考慮した角形コンクリート充填鋼管柱の繰り返し曲げせん断挙動の有限要素解析,日本建築学会構造系論文集,Vol. 84, No. 755, pp. 29-37, 2019.1
- 5) 松本 修一, 佐藤 英佑, 成原 弘之, 小室 努, 安田 聡: 超高強度 材料を用いた CFT 柱の構造性能その 2 曲げせん断実験, 日本 建築学会大会学術講演梗概集(東北), C-1, 構造Ⅲ, pp.1219-1220, 2009.7
- 6) 松村 寿男, 水野 英二:軸圧縮下で曲げ変形を受けるコンクリート充填鋼管柱の内部性状に関する三次元 FEM 解析, 構造工学論 文集, Vol. 53A, pp. 1057-1068, 2007.3
- 後藤 芳顯, G. P. Kumar, 川西 直樹: 充填コンクリートとの相互 作用を考慮した円形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動の FEM 解析, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2, pp. 487-504, 2009.5
- Hu, H.-T., Huang, C.-S., Chen, Z.-L.: Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending, J. Constructional Steel Research, Vol. 61, pp. 1692-1712, 2005
- 9) Hadjigeorgiou, J., Ghanmi, A. and Paraszczak, J.: 3-D numerical modelling of radial-axial rock splitting, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 16, Issue 1, pp. 45-57, 1998.3
- 10) Pal, M. K., Yamashita, T., Miyamura, T. and Ohsaki, M.: A comprehensive numerical simulation of steel-concrete composite beam incorporating compressive failure of concrete, Int. J. of Computational Methods, Vol. 16, No. 06, Paper No. 1840028, 2019.9
- 11) ADVENTURECluster ソルバ 2014R1.1 入力データリファレ ンスマニュアル,株式会社アライドエンジニアリング, 2014

[2019年10月1日原稿受理 2019年11月20日採用決定]