

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 18 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289186

研究課題名(和文) 津波漂流物を対象としたCFT構造の耐衝撃性能の解明と評価法の開発

研究課題名(英文) The elucidation of the impact-resistant capacity of CFT structures for tsunami flotsams and development of the evaluation method

研究代表者

河野 昭彦 (kawano, akihiko)

九州大学・人間・環境学研究科(研究院)・教授

研究者番号：60136520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：近年大津波による甚大な被害があり、安全な津波避難ビル等が求められている。津波漂流物は衝撃荷重であるが、コンクリート充填鋼管(CFT)は優れた耐衝撃性能を持つので津波避難ビル等には相応しい構造である。しかし、評価法が確立されていないので、その解明を行った。衝撃実験と衝撃解析を行った結果、次の成果が得られた。CFTの耐衝撃性能は、エネルギーを指標として、二つの終局限界状態で決定される。これらは(a)鋼管破断と(b)鉛直荷重支持能力の喪失である。(a)は曲げ引張側歪が破断歪に達するかで判定できる。(b)は塑性ヒンジモデルから算定式を導出した。骨組の耐衝撃性能も塑性ヒンジモデルから導出できる。

研究成果の概要(英文)：In late years, there were the serious damage caused by Tsunami, so that Tsunami evacuation buildings or towers are required. Tsunami flotsams are the impact loads for buildings. With respect to those, the concrete filled steel tubular (CFT) structures are suitable, because CFTs have superior impact-resistant capacities. However, evaluation method of the capacities has not been developed. As a result of the impact loading test and analysis, the followings were provided. The impact-resistant capacity of CFT can be evaluated by a comparison between input and dissipation of energy in the ultimate limit state. There are two events which are (a) the steel tube breaking and (b) the loss of the ability for supporting vertical load. As for event (a), it is predicted whether the tensile strains in the tube exceeds the limit. As for event (b), it can be predicted by the plastic hinge model. The impact-resistant capacity of the framework can be predicted by the plastic hinge model, as well.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：津波 衝撃荷重 コンクリート充填鋼管 津波避難ビル 津波漂流物

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震は、津波による甚大な被害をもたらした。中央防災会議は、2012年8月に南海トラフの3連動巨大地震の発生確率は高く、最悪の場合の死者を23万人と推定している。人命の保全を考えるならば、人々を避難させる津波避難ビル等の設置が喫緊の課題である。

津波被害は、津波荷重(波圧、波力、浮力)と、漂流物の衝突がある。津波荷重の研究では、被害予測が概ね評価可能な段階にある。一方、津波漂流物の遡上・衝突、それによる建築物の損傷の推定は遅れている。

国内の津波漂流物の研究は土木工学が先行し、丸太、船舶、貨物コンテナ等の衝突の水理実験や解析が行われている。衝撃問題自体は船舶の護岸衝突等に関して古くからある。米国では、連邦危機管理局(FEMA)が2004年スマトラ島沖地震を契機にガイドラインを発表し、漂流物についても考慮としている。一方、国内の建築物の津波設計指針は、内閣府から2005年6月に発表された後、東北地震を踏まえて2011年11月に国土交通省から「津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針(以下暫定指針)」が発表された。それは、その後、告示化された。

「暫定指針」の津波避難ビル等の要件の解説の10階建て鉄骨建築物の設計例では、浸水部分の柱をCFTとして漂流物への耐衝撃性能が期待されているが、定量評価はされていない。CFTの衝撃問題については米国の肖岩(Xiao Yan)らの研究があるが、津波流速をはるかに超えた衝突速度であり、津波設計としては必ずしも十分でない。

2. 研究の目的

津波漂流物は、建築物に衝突することによって損傷を与える衝撃荷重となる。外面を鋼材で保護されており、内部はコンクリートが充填されているコンクリート充填鋼管(CFT)は、優れた耐衝撃性能を有している。

本研究は、津波漂流物を対象としたCFT部材の耐衝撃性能の解明を行う。そこでは、鉄筋や鉄骨を内蔵させる等による耐衝撃性能向上技術の開発も盛り込む。これを基にCFT部材の耐衝撃性能の定量的評価法の開発を行う。これらから、CFT構造の津波避難ビル等の津波漂流物設計法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 衝撃実験：単純梁のCFT部材の中央に重錘を落下する実験を行う。比較のための静的横力載荷実験を行う。また、残存鉛直支持能力を調べる静的軸力載荷実験も行う。

(2) 衝撃応答解析：CFT部材の衝撃応答の数値解析を行う。精度は実験結果で検証し、実験範囲を超えた部分を補完する。

(3) 実験結果、文献調査、並びに衝撃応答解析に基づいて、津波漂流物に対するCFT構造の設計法の確立を図る。

4. 研究成果

4.1 CFT部材の耐衝撃性能の定量的評価法の開発

4.1.1 単純梁形式の衝撃実験の概要

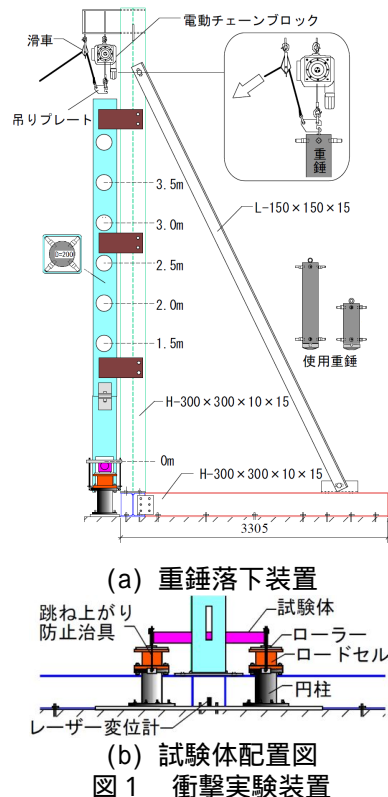
(1) 試験体と実験変数

基準試験体は外径100mm、全長1000mmのCFTと中空鋼管であり、充填コンクリートはFc60、鋼材質は角形：STKR400、円形：STK400である。実験変数は、断面(円形、角形、菱形=角形を45度回転)、CFTと中空、径厚比、幅厚比、せん断スパン比、内蔵鉄筋の有無(菱形CFTのみにSD390のD13を8本配置、またはPC棒鋼9.2を8本配置)、重錘質量(125kg~375kg)、重錘落下高さ(1.25m、2.5m)、重錘ヘッド形状(半球形で曲率半径が90mm~360mm)とした。

(2) 加力方法と測定方法

衝撃実験は、図1(a)に示すように、重錘を試験体に落下させる。重錘の質量と落下高さ、回数は、試験体が十分塑性変形するまでとした。図1(b)は試験体の設置状況を示したもので、試験体の両端は、エンドプレート下端をエッジ上に加工し、それをグリースを塗布した磨き鋼板の上に載せている。磨き鋼板は1000kN能力のロードセルに取り付けてあり、両端のロードセルの荷重値の合計を衝撃荷重として測定している。中央たわみはレーザー変位計によりサンプリング周期330μsecで測定している。

比較のために、単純梁形式の静的実験も行った。試験体は衝撃実験と同様である。実験変数は、鋼管断面(円形、角形、菱形)、CFTと中空、径厚比、幅厚比である。



(a) 重錘落下装置

(b) 試験体配置図

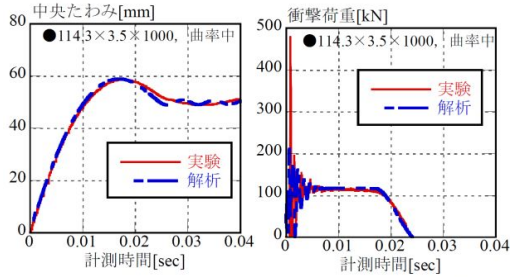
図1 衝撃実験装置

(3) 実験結果

図2に衝撃実験から得られた円形 CFT の中央たわみと衝撃荷重の時刻歴の例を示す。

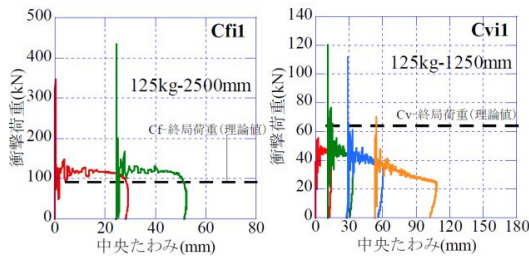
これらから、図3の衝撃荷重 - 中央たわみ関係を導出する。図(a)、(b)はそれぞれ円形 CFT と円形中空鋼管の例を示しており、前者では衝撃荷重を繰返し受けても耐力を保持するが、後者では荷重が低下する。これは加力点の局部変形のためである。

写真1は、変形後の様子である。



(a) 中央たわみ - 時間関係 (b) 荷重 - 時間関係

図2 中央たわみと荷重の時刻歴



(a) 円形 CFT (b) 円形中空鋼管

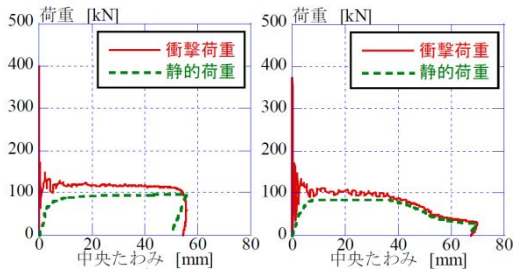
図3 衝撃荷重 - 中央たわみ関係



(a) 円形 CFT (b) 円形中空鋼管

写真1 衝撃荷重による変形

衝撃荷重と静的荷重の比較を図4に示す。図(a)は円形 CFT であり、衝撃荷重の安定した応答値と静的荷重の応答値を比較すると、前者の方が、耐力が高い。これは歪速度による材料強度上昇によるものである。図(b)は菱形 CFT であり、耐力が下がっているのは鋼管の曲げ引張側の亀裂発生による。破断時の中央たわみはあまり変わらないが、衝撃荷重の方がエネルギー吸収は大きい。



(a) 円形 CFT (b) 菱形 CFT

図4 衝撃荷重と静的荷重の比較

(4) 実験結果のまとめ

衝突体(重錘)の運動量と試験体で計測された力積はほぼ等しく、衝撃実験装置が正しく機能したことを確認した。

CFT の終局耐力(塑性化が十分進んだ時の耐力)は、幅厚比、せん断スパン比、内蔵鉄筋、重錘ヘッド形状によらず、全塑性モーメントで評価できる。中空鋼管試験体は、全塑性モーメントの計算値に達せず、各種変数に影響を受ける。

CFT の終局耐力は、衝撃実験の方が静的実験より 10%程度高い。

CFT 試験体の崩壊形式は全体曲げが卓越し、鋼管の曲げ引張側歪が 5%程度に達すると亀裂が発生する。中空鋼管は、全体曲げと加力点の局部変形、その後の局部座屈である。

CFT のエネルギー吸収率(=吸収エネルギー/重錘のポテンシャルエネルギー)は、幅厚比、せん断スパン比、内蔵鉄筋、重錘ヘッド形状によらず、80%~90%程度であった。

衝撃実験での CFT の吸収エネルギーは静的実験に対して 1.24 倍以上増大する。中空鋼管試験体についても吸収エネルギーは増大するが割合は低い。

破断時の CFT の吸収エネルギーは、衝撃実験の方が静的実験より大きく、中央たわみも大きい。ただし、菱形 CFT では、破断時中央たわみがやや小さくなる場合がある。これは衝撃実験では塑性域が広がらず歪レベルが高くなるためである。

内蔵鉄筋は、破断時の塑性変形倍率を格段に高めるので(主筋比 4.5%、主筋と鋼管断面積比 19%で、塑性変形倍率を 2.6 倍増大)破断抑制効果が高い。

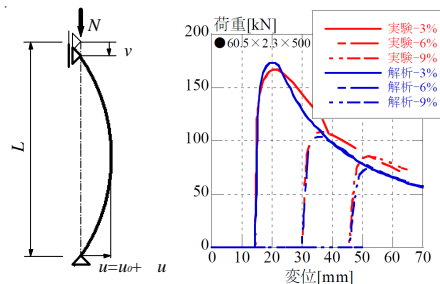
4.1.2 軸力載荷実験の実験概要

(1) 試験体と実験変数

試験体は初期たわみを与えた CFT である。実験変数は断面()、径厚比、幅厚比、初期たわみ(材長の 3%~9%)、せん断スパン比である。

(2) 実験方法

図5(a)に示すように、初期たわみ u_0 を与えた CFT 試験体に軸力 N を作用し、最大軸力時の中央たわみ u を測定する。これは、CFT 柱が衝撃荷重を受けて軸力支持能力を失う時の中央たわみ u_{cr} に相当する。図(b)に軸力 - 中央たわみ関係を示す。図には後述の解析結果も示している。



(a) 荷重条件 (b) 軸力 N-中央たわみ u 関係

図5 CFT の軸力 - 中央たわみ挙動

(3) 実験結果

図 5(b) に示すように、初期たわみが大きいと耐力は下がり、中央たわみは増大する。

初期たわみが大きいと初期たわみを加えた時点で局部座屈した。

4.1.3 衝撃応答解析の概要

(1) ファイバーモデルによる解析

衝撃解析はファイバーモデルを用いた骨組解析であり、幾何学的非線形も考慮している。図 6 の解析モデルは二分の一モデルであり、CFT 部材の質量は分散配置し、重錘が所定の速度で梁中央に衝突する。一定軸力を作用する場合は、ピンローラー支点到軸力 N を作用する。

図 7 は断面分割の様子で各面積要素が応力ファイバーとなる。鋼管とコンクリートの応力 - ひずみ関係は材料試験結果に基づくが、衝撃解析では歪速度を考慮してそれぞれ応力を 10% 割り増している。

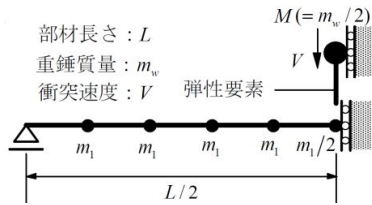


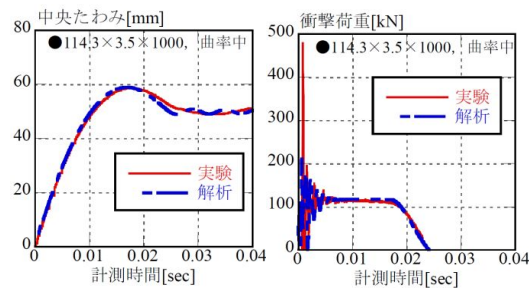
図 6 衝撃解析モデル



図 7 断面分割 (ファイバーモデル)

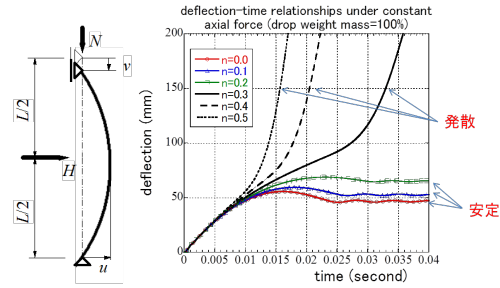
(2) ファイバーモデルの解析結果

図 8(a)、(b) は衝撃実験と衝撃解析の比較である。両者は良く一致していることから、ファイバーモデルを用いた骨組解析モデルが精度良く実験挙動を予測できることが確認できた。



(a) 中央たわみ時刻歴 (b) 衝撃荷重時刻歴
図 8 衝撃実験と衝撃解析の比較 (円形 CFT)

さて、CFT が柱の場合、軸力が作用しているわけであるが、軸力下の衝撃実験は難しい。そこで、解析でこれを再現する。図 9(a) が荷重条件である。図(b)は、軸力比を変化させた場合の中央たわみの時刻歴である。軸力比が低いと、中央たわみは一定値に収束するが、高いと発散する。つまり、その場合、CFT は軸力を支持する能力を喪失し、崩壊することを表している。



(a) 荷重条件 (b) 軸力比による応答の変化
図 9 一定軸力を受ける CFT の衝撃応答

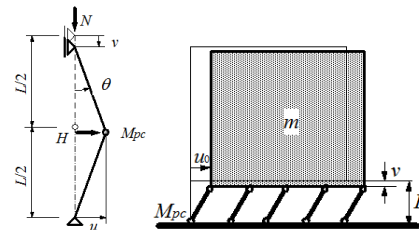
(3) 塑性ヒンジモデルによる解析

図 9(a) に対する簡易解を求めるため、図 10(a) の塑性ヒンジモデルを考える。CFT の中央に塑性ヒンジが発生し全塑性モーメント M_{pc} が生じている。中央たわみの安定限界 u_{cr} は、荷重 H に対する見かけの剛性が 0 となるときであり、その条件から次式が得られる。

$$u_{cr} = \frac{M_{pc}}{N} \quad (1)$$

u_{cr} は軸力載荷実験の図 5(b) とほぼ一致した。衝撃荷重 H はエネルギーで評価できる。これは実験から裏付けられている。中央たわみが u_{cr} に達するまでの衝撃荷重によるエネルギー吸収を E_{Hmax} とすると、次式となる。

$$E_{Hmax} = \frac{1}{2} \left(M_{pc} \cdot \frac{4u_{cr}}{L} \right) \quad (2)$$



(a) CFT 部材 (b) CFT 骨組
図 10 塑性ヒンジモデル

式(1)、(2)が軸力支持能力に対する CFT の耐衝撃性能である。同様な議論が図 10(b) の骨組に対しても成立する。

4.2 津波漂流物に対する CFT 構造の設計法の確立

4.1 の CFT 部材と CFT 骨組の耐衝撃性能の評価法から設計法が以下の通り導出された。

CFT 部材の耐衝撃性能は、エネルギーを指標として、終局限界状態で決定される。終局限界状態は、(a) 鋼管破断と (b) 鉛直荷重支持能力の喪失がある。

終局限界状態の評価法：(a) 鋼管破断は曲げ引張側歪で判定、(b) 鉛直荷重支持能力の限界は塑性ヒンジモデルから導出した。

骨組の終局限界も塑性ヒンジモデルから導出できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Mahmud Kori EFFENDI, Shuhei ZAITSU, Shintaro MATSUO and Akihiko KAWANO, A Preliminary Test on Response Characteristics of Concrete Filled Tubular Specimens under Impact Loads Corresponding to Tsunami Flotsam, Journal of Architecture and Urban Design Kyushu University, 査読あり, No.24, 2013, pp.97-106.

財津 周平, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 松尾 真太郎, 窪寺 弘顕, 津波漂流物の衝突を対象とした CFT 部材の耐衝撃性能に関する実験的研究, 第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 査読あり, 2013, pp.43-1~43-8,

Mahmud Kori EFFENDI, Hiromitsu KAWAGUCHI, Akihiko KAWANO, Shintaro MATSUO, Keigo TSUDA and Masae KIDO, An Analytical Study on the Effect of Local Deformation at Loading Point on Overall Flexural Deformation Behavior in Steel Tubular Member Subjected to Concentrated Lateral Load, Journal of Architecture and Urban Design Kyushu University, 査読あり, No.26, 2014, pp.79-90.

Mahmud Kori EFFENDI, Hiromitsu KAWAGUCHI, Kosho MINAMI and Akihiko KAWANO, An Analytical Study on Effect of Loading Tip Shapes on Flexural Behavior of Vacant and Concrete-Filled Steel Tubular Members Subjected to Concentrated Transverse Loads, Journal of Steel Construction Engineering, 査読あり, Vol.22, No.86, 2015, pp.33-45.

Mahmud Kori EFFENDI, Hiromitsu KAWAGUCHI, Kosho MINAMI, Akihiko KAWANO, Toshihiko NINAKAWA, Shintaro MATSUO, Keigo TSUDA and Masae KIDO, Impact Response Analysis of Concrete Filled Steel Tubular Member for Collision of Tsunami Flotsam, Journal of Architecture and Urban Design Kyushu University, 査読あり, No.28, 2015, pp.65-77.

河野昭彦、河口弘光: 津波漂流物の衝突を対象としたコンクリート充填鋼管部材の耐衝撃性能評価法の開発, 日本建築学会構造系論文集, 査読あり, 第 80 巻, 第 715

号, 2015, pp.1497-1503.

Mahmud Kori EFFENDI, Hiromitsu KAWAGUCHI, Kosho MINAMI and Akihiko KAWANO, Experimental Investigation on Dynamic Responses of Concrete-Filled Steel Tubular Members Subjected to Transverse Impact Loads, Journal of Steel Construction Engineering, 査読あり, Vol.22, No.87, 2015, pp.9-21

[学会発表](計16件)

佐伯淳, 河野昭彦, 松尾真太郎, 耐津波避難ビルの衝突後の耐津波性に関するケーススタディ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, pp.255-256.

財津周平, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 松尾真太郎, 窪寺弘顕, 津波漂流物の衝突を対象とした CFT 部材の耐衝撃性能に関する実験的研究(その1. 実験計画), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, pp.1549-1550.

河口弘光, 財津周平, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田恵吾, 城戸將江, 窪寺弘顕, 津波漂流物の衝突を対象とした CFT 部材の挙動に関する実験的研究(その1. 研究計画および実験概要), 日本建築学会九州支部研究報告, 第 53 号, 2014, pp.553-556.

財津周平, 河口弘光, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田恵吾, 城戸將江, 窪寺弘顕, 津波漂流物の衝突を対象とした CFT 部材の挙動に関する実験的研究(その2. 実験結果と考察), 日本建築学会九州支部研究報告, 第 53 号, 2014, pp.557-560.

Mahmud Kori EFFENDI, Shuhei ZAITSU, Hiromitsu KAWAGUCHI, Akihiko KAWANO, Toshihiko NINAKAWA, Shintaro MATSUO, Keigo TSUDA, Masae KIDO and Hiroaki KUBOTERA, An Experimental Study on the Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Members under Tsunami Debris Impact Load Part 3 FEM Analysis on Static Loading of Vacant Tubular Members, Research Report, Kyushu Branch of Architectural Institute of Japan, No.53, 2014, pp. 561-564.

南幸翔, 河口弘光, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田恵吾, 城戸將江, 津波漂流物の衝突を対象とした CFT 部材の耐衝撃性能に関する研究(その1. 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014, pp.1447-1448.

河口弘光, 南幸翔, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田惠吾, 城戸將江, 津波漂流物の衝突を対象とした CFT 部材の耐衝撃性能に関する研究((その2, 実験結果と考察)), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014, pp.1449-1450.

Mahmud Kori EFFENDI, Hiromitsu KAWAGUCHI, Akihiko KAWANO, Toshihiko NINAKAWA, Shintaro MATSUO, Keigo TSUDA and Masae KIDO, Summaries of technical papers of annual meeting Architectural Institute of Japan, 2014, pp.1451-1452.

南幸翔, 河口弘光, 今滝翔太, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田惠吾, 城戸將江, 武田良太, CFT 部材の衝撃挙動に与える影響因子の実験的解明および衝撃解析モデルの提案(その1. 実験概要および静的載荷実験結果), 日本建築学会九州支部研究報告, 第54号, 2015, pp.581-584.

今滝翔太, 南幸翔, 河口弘光, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田惠吾, 城戸將江, 武田良太, CFT 部材の衝撃挙動に与える影響因子の実験的解明および衝撃応答解析モデルの提案(その2. 衝撃実験結果と考察), 日本建築学会九州支部研究報告, 第54号, 2015, pp.585-588.

Mahmud Kori EFFENDI, Hiromitsu KAWAGUCHI, Kosho MINAMI, Shota IMATAKI, Akihiko KAWANO, Toshihiko NINAKAWA, Shintaro MATSUO, Keigo TSUDA, Masae KIDO and Ryota TAKEDA, Experimental Investigation of the Influence Factors on the Behavior of CFT Members under Impact Load and Proposal for the Analysis Model (Part 3 FEM Analysis on Static Loading of Vacant Steel Tubular and CFT Members), Research Report, Kyushu Branch of Architectural Institute of Japan, No.54, 2015, pp.589-592.

河口弘光, 南幸翔, 今滝翔太, EFFENDI Mahmud Kori, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田惠吾, 城戸將江, 武田良太, CFT 部材の衝撃挙動に与える影響因子の実験的解明および衝撃応答解析モデルの提案(その4. CFT 部材の衝撃応答解析), 日本建築学会九州支部研究報告, 第54号, 2015, pp.593-596.

今滝翔太, 南幸翔, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田惠吾, 城戸將江, CFT 部

材の耐衝撃性能評価法の開発に関する研究(その1 実験概要と実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015, pp.1397-1398.

南幸翔, 今滝翔太, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田惠吾, 城戸將江, CFT 部材の耐衝撃性能評価法の開発に関する研究(その2 衝撃応答解析および評価法の提案), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015, pp.1399-1400.

今滝翔太, 南幸翔, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田惠吾, 城戸將江, 武田良太, CFT 部材の耐衝撃性能評価法の開発およびその妥当性の検証(その1. 実験概要と実験結果), 日本建築学会九州支部研究報告, 第55号, 2016, pp.585-588.

南幸翔, 今滝翔太, 河野昭彦, 蛭川利彦, 松尾真太郎, 津田惠吾, 城戸將江, 武田良太, CFT 部材の耐衝撃性能評価法の開発およびその妥当性の検証(その2. 解析による検証及び評価法の提案), 日本建築学会九州支部研究報告, 第55号, 2016, pp.589-592.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕出願状況(計0件)

〔その他〕なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 昭彦(KAWANO, Akihiko)

九州大学・大学院人間環境学研究院(研究院)・教授

研究者番号: 60136520

(2) 研究分担者

蛭川 利彦(NINAGAWA, Toshihiko)

九州大学・大学院人間環境学研究院(研究院)・教授

研究者番号: 90237769

松尾 真太郎(MATSUO, Shintaro)

九州大学・大学院人間環境学研究院(研究院)・准教授

研究者番号: 40583159

津田 惠吾(TSUDA, Keigo)

北九州市立大学・工学部・教授

研究者番号: 50112305

(3) 連携研究者

城戸 將江(KIDO, Masae)

北九州市立大学・工学部・准教授

研究者番号: 10453226