パルス性地震動入力時の超高層集合住宅における負傷予測に向けた人体応答評価

EVALUATION OF HUMAN RESPONSES TOWARD INJURY PREDICTION IN SUPER HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS EXCITED BY PULSE-LIKE GROUND MOTIONS

唐津啓樹^{*1}, 肥田剛典^{*2}, 永野正行^{*3}

Hiroki KARATSU, Takenori HIDA and Masayuki NAGANO

When a large pulse-like ground motion strikes in urban areas, significant structural damages may occur to super-high-rise residential buildings along with human injuries or fatalities. Herein, to evaluate human injury, human responses were investigated in super-high-rise residential buildings using the Ricker wavelet as the pulse-like ground motion. Using nonlinear seismic response analysis models of super-high-rise RC buildings and those of the human body, the variation in the maximum displacement of the center of pressure (CoP) and head velocity was examined based on the predominant periods and amplitude level of the input seismic waves.

Keywords : Human model, Super high-rise residential building, Pulse-like ground motion, Ricker-wavelet, Human response

人体モデル, 超高層集合住宅, パルス性地震動, リッカー波, 人体応答

1. はじめに

我が国では 1995 年兵庫県南部地震, 2016 年熊本地震などの内陸地殻内の地震が発生し, 断層近傍では大振幅パルスをもつ地震動(以降, パルス性地震動)が観測されている。特に, 2016 年熊本地震では, 震源のごく近傍で周期 3 秒前後の長周期パルスをもつ地震動も観測された。現在国内では多数の超高層集合住宅が建設されており²⁰⁾, 仮にこのようなパルス性地震動が建物に入力した場合, 構造被害とともに人的被害を含む室内被害を与えることが懸念される。過去の被害地震では, 建物被害だけでなく, 多くの人的被害が報告されている(例えば 2)-6)。地震時のけがの要因として, 割れたガラスや食器による切傷等の他, 家具の転倒による打撲, 人間の転倒や物への衝突による打撲や骨折等が報告されている。超高層建物の建物応答特性の把握とともに, 超高層建物に居住する人体の応答特性を把握することは, 室内の人的被害を予測し, 居住者の安全性や震災後の生活継続性を評価する上で重要となる。

パルス性地震動に対する建物応答に関しては, 過去に多数の検討(例えば 7)-10)が行われている。小山・永野¹¹⁾はパルス性地震動として Ricker 波を速度波とし, その擬似速度応答スペクトルを利用して RC 造建物の非線形応答特性を整理した。小山ら¹²⁾はこの Ricker 波と 3 次元立体フレームモデルを用い, 入力波の擬似速度応答スペクトルの変化と最大層間変形角の関係性を示した。村田ら¹³⁾はパルス性地震動の応答スペクトルの卓越周期, 最大値に着目して応答結果を基準化し, 観測記録の応答スペクトルから最大建物応答を予測するこ

とが可能な形で結果を取りまとめた。ただし, これらの研究は構造躯体の応答評価把握に着目しており, 建物内での負傷などの人的被害の評価は対象外となる。

これまでに, 地震時における人的被害を評価した研究が行われている(例えば 14-17)が, それらの研究では地震時における人体の挙動が考慮されていない。これに対し, 肥田ら^{18), 19)}は地震時の人的被害評価に向けた人体の地震応答解析モデル(以降, 人体モデル)を構築した。伊東ら²⁰⁾はこの人体モデルを用いて被災時の人体の応答(以降, 人体応答)と床応答の関係を明らかにし, 人間の地震時負傷評価手法を提案した。肥田ら²¹⁾はさらに, 超高層建物の地震応答解析により得られる各階の床応答を人体モデルに入力し, 同建物内において人体の頭部が周囲の壁等に衝突した際の負傷評価法を提案した。

これらの研究で提案された負傷評価法では, 建物の床応答が与えられていることが前提となる。しかし, 建物の地震応答解析モデルが得られていない場合や, 建物内に強震計が設置されていない場合には, 地震時の床応答を得ることは困難となる。そのため, 地震発生後に迅速に建物内の人的被害を推定するためには, 建物の地震応答解析を介さず, 地表面もしくは建物基部で得られた強震記録のみから直接建物内の人間の負傷を評価できることが望ましい。

以上の背景を踏まえ, 本研究では, パルス性地震動として振幅レベルおよび卓越周期を簡便に調整できる Ricker 波を利用する。平均的な動的特性を反映した超高層建物モデル²²⁾の地震応答解析から得られた各階の床応答を人体モデルに入力し, 超高層建物内にお

¹⁾ JFE シビル(株) (元東京理科大学)

²⁾ 茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻 准教授・博士 (工学)

³⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)

JFE Civil Engineering & Construction Corp. (Former, Tokyo University of Science)
Assoc. Prof., Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University,
Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr.Eng.

人間の負傷予測に向けた人体応答を評価する。この際、パルス性地震動の応答スペクトルの卓越周期に着目して応答結果を基準化し、応答スペクトルの最大値から建物モデルを介さず最大人体応答および負傷可能性を評価する形で結果をまとめる。次に、超高層集合住宅居住者を対象とした実地震時の揺れの体感に関するアンケート調査結果や、過去の地震で観測されたパルス性地震動を入力したときの人体応答の検討を通じ、Ricker 波入力時の応答による最大人体応答結果を検証する。

2. 人体の非線形地震応答解析モデルと負傷評価法

2.1 人体の非線形地震応答解析モデルの概要

本研究で用いる人体モデルを Fig. 1 に示す。本解析モデルは台車型二重倒立振り子²¹⁾に基づいており、人体の立位時における足の踏み出しを考慮した前後方向の地震時挙動を求めるものである。

このモデルの非線形運動方程式は次式で得られる²¹⁾。

$$d_1 \left\{ \ddot{\xi}(t) + \ddot{\xi}_0(t) \right\} + d_2 \ddot{\theta}_1(t) \cos \theta_1(t) + d_3 \ddot{\theta}_2(t) \cos \theta_2(t) + \mu_c \dot{\xi}(t) = d_2 \left\{ \dot{\theta}_1(t) \right\}^2 \sin \theta_1(t) + d_3 \left\{ \dot{\theta}_2(t) \right\}^2 \sin \theta_2(t) + f_c(t) \quad (1)$$

$$d_2 \cos \theta_1(t) \left\{ \ddot{\xi}(t) + \ddot{\xi}_0(t) \right\} + d_4 \ddot{\theta}_1(t) + d_5 \cos \left\{ \theta_1(t) - \theta_2(t) \right\} \ddot{\theta}_2(t) = d_7 \sin \theta_1(t) - d_5 \left\{ \dot{\theta}_2(t) \right\}^2 \sin \left\{ \theta_1(t) - \theta_2(t) \right\} - \tau(t) \quad (2)$$

$$d_3 \cos \theta_2(t) \left\{ \ddot{\xi}(t) + \ddot{\xi}_0(t) \right\} + d_5 \cos \left\{ \theta_1(t) - \theta_2(t) \right\} \ddot{\theta}_1(t) + d_6 \ddot{\theta}_2(t) = d_5 \left\{ \dot{\theta}_1(t) \right\}^2 \sin \left\{ \theta_1(t) - \theta_2(t) \right\} + d_8 \sin \theta_2(t) + \tau(t) \quad (3)$$

ここに、 $\xi(t)$ は時刻 t における床に対する台車の相対変位、 $\xi_0(t)$ は床の絶対変位、 $\theta_1(t)$ および $\theta_2(t)$ は下および上の振子の鉛直線に対する角度、 $f_c(t)$ は台車に加える制御力、 $\tau(t)$ は上下の振子を繋ぐヒンジ(腰部)に加えるトルク、 μ_c は台車の粘性減衰係数である。式(1)~(3)の $d_1 \sim d_8$ は次式で表される²³⁾。

$$\begin{aligned} d_1 &= m_1 + m_2 + m_c & d_2 &= m_1 l_1 + m_2 L_1 \\ d_3 &= m_2 l_2 & d_4 &= J_1 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 \\ d_5 &= m_2 l_2 L_1 & d_6 &= J_2 + m_2 l_2^2 \\ d_7 &= (m_1 l_1 + m_2 L_1) g & d_8 &= m_2 l_2 g \end{aligned} \quad (4)$$

m_1, m_2 および m_c はそれぞれ下の振子、上の振子および台車の質量であり、 J_1 および J_2 は下および上の振子の慣性モーメントである。また、 l_1 および l_2 は下および上の振子の下端から質量中心までの長さ、 L_1 および L_2 は下および上の振子の全長、 g は重力加速度である。人体モデルのパラメータを Table 1 に、フィードバックゲインを Table 2 に示す。

人間の立位時のバランス制御のために重要な床反力中心(Center

of Pressure, CoP)の変位(以下、CoP 変位)は $\xi(t)$ に対応する。

2.2 頭部速度と頭部傷害基準値による負傷可能性評価

地震時の人的被害として人間の転倒・転落、家具との衝突が挙げられ、人体頭部の障害物への衝突が致命的な負傷に繋がりと考えられる。このことから、本研究では自動車や事故衝撃からの保護基準としても用いられている頭部障害基準 (Head Injury Criterion, HIC^{24), 25)}より人間の負傷予測に向けた人体応答を評価することとする。文献 20)によれば、HIC は人体頭部の衝突直前の速度 V_{head} を用いて、次式で表すことが出来る。

$$HIC = (t_2 - t_1) \left\{ \frac{V_{\text{head}}}{g \Delta t} (1 + e) \right\}^{2.5} \quad (5)$$

反発係数 e および衝突時間 Δt は文献 20)と同様に設定した。また、文献 20)に基づき、本研究では V_{head} に人体モデルから求められる頭部の最大速度(cm/s)を用いる。頭部速度 V_{head} は、式(1)~(3)に示した人体モデルにより算出した $\dot{\xi}(t)$ 、 $\dot{\theta}_1(t)$ 、 $\theta_1(t)$ 、 $\dot{\theta}_2(t)$ および $\theta_2(t)$ を用いて次式で求められる。

$$V_{\text{head}}(t) = \dot{\xi}(t) + \dot{\theta}_1(t) L_1 \cos \theta_1(t) + \dot{\theta}_2(t) L_2 \cos \theta_2(t) \quad (6)$$

50%の確率で起こる頭部の負傷度と HIC 値、最大頭部速度の対応関係²⁰⁾を Table 3 に示す。本研究ではこれを参考に、人体の最大頭部速度を用いて人間の負傷可能性を評価することとする。この設定は人体の頭部が最大速度で剛体の面に衝突した場合のものであり、実地震時における実際の挙動に比して過大評価となる可能性があることに注意が必要である。

Fig. 1 Seismic response analysis model of human body based on cart-type double inverted pendulum²¹⁾

Table 1 Parameter of cart-type double inverted pendulum model²⁰⁾

m_1 (kg)	m_2 (kg)	m_c (kg)	L_1 (m)	L_2 (m)	l_1 (m)	l_2 (m)	J_1 (kgm ²)	J_2 (kgm ²)	μ_c (Ns/m)	L (s)	g (m/s ²)
16.7	38.6	1.68	0.82	0.785	0.453	0.301	5.55	3.50	10000	0.1	9.8

Table 2 Feedback gain²⁰⁾

k_{θ_1} (N/m)	k_{θ_1} (N/rad)	k_{θ_2} (N/rad)	k_{θ_1} (Ns/m)	k_{θ_1} (Ns/rad)	k_{θ_2} (Ns/rad)
175	-39700	-24000	-12900	-12300	-4530
k_{θ_1} (N/m)	k_{θ_1} (Nm/rad)	k_{θ_2} (Nm/rad)	k_{θ_1} (Ns)	k_{θ_1} (Nms/rad)	k_{θ_2} (Ns/rad)
-12.8	-66.5	186	-14.3	-22.6	24.8

Table 3 HIC and head velocity corresponding to head injury level²⁰⁾

Head injury level	HIC ($p=50\%$)	Head velocity (cm/s)
Minor(head injury without disturbance of consciousness)	331	205
Moderate (skull fracture)	593	259
Critical (cerebral contusion)	1848	408
Fatal (death)	2175	435

3 パルス性地震動に対する人体応答の基本特性

3.1 Ricker 波の卓越周期, 振幅の設定

パルス性地震動に対する人体応答の基本特性を検討するために人体モデルにパルス波を入力する。本研究ではパルス波として Ricker 波を速度波として用いる¹¹⁾。卓越周期及び振幅レベルによる変化を検討するため、以下の2パターンのパルス波群を用意した。

- ① 擬似変位応答スペクトル pSd ($h=5\%$) の最大値 pSd_{max} を 10cm, 20cm, 30cm に設定し, 卓越周期 T_p を 0.1s ずつ変化した Ricker 波。
- ② 擬似速度応答スペクトル pSv ($h=5\%$) の最大値 pSv_{max} を 50cm/s, 100cm/s, 150cm/s に設定し, 卓越周期 T_p を 0.1s ずつ変化した Ricker 波。

入力波の継続時間は 40s とし, 最大速度の発生時刻は 10s とした。速度波である Ricker 波を時間に関して微分し, それを加速度波形として人体モデルに入力した。 pSd_{max} が 20cm となる速度及び加速度の時刻歴波形と pSd ($h=5\%$) を Fig. 2 に示す。Fig. 3 に $pSd_{max}=20$ (cm) の $T_p=1.0$ (s), 2.0(s), 3.0(s) のときの人体モデルの時刻歴応答波形及び振幅レベル pSd_{max} を変化した最大 CoP 変位, 最大頭部速度を示す。入力波の pSd_{max} が一定の場合, 最大頭部速度は卓越周期 0.1(s) から単調減少する。一方, 最大 CoP 変位は卓越周期 $T_p=0.5$ (s) 以上の周期帯で同振幅レベルとなる。最大 CoP 変位及び最大頭部速度ともに, pSd_{max} が変化しても概ね同様の変化を見せる。

また, Fig. 4 に pSv_{max} が 100cm/s となる速度及び加速度の時刻歴波形と pSv ($h=5\%$), Fig. 5 に $pSv_{max}=100$ (cm/s) の $T_p=1.0$ (s), 2.0(s), 3.0(s) のときの人体モデルの時刻歴応答波形及び振幅レベル pSv_{max}

Fig. 2 Waveforms of Ricker wavelets with constant pSd_{max}

を変化させた最大 CoP 変位, 最大頭部速度を示す。入力波の pSv_{max} が一定の場合, 最大 CoP 変位は卓越周期が大きくなるほど大きくなる。一方, 最大頭部速度は $T_p=1.0$ (s) 以上の周期帯で同振幅レベルとなる。最大 CoP 変位及び最大頭部速度ともに, pSv_{max} が変化しても概ね同様の変化を見せる。

後述するように, 本研究で対象とする超高層建物の固有周期が 1 秒以上であることと各応答の整理のしやすさを鑑み, 次節以降, CoP 変位に着目する際には pSd_{max} を一定にした Ricker 波を用い, 頭部速度に着目する際には pSv_{max} を一定にした Ricker 波を用いた。

3.2 超高層 RC 造建物のモデル化

パルス性地震動に対する建物応答の基本特性を検討するために卓越周期を変化させた Ricker 波を建物モデルに入力した時の建物の非線形応答を検討する。建物は超高層 RC 造建物とする。本研究では文献 22) の建物解析モデルを使用する。解析モデルはせん断型多質点系モデルで, 各層の復元力特性は剛性低減型トリリニアモデルである。層剛性, 耐力等の骨格特性は, 20 階もしくは軒高 60m 以上の既存の超高層 RC 造建物 39 棟の構造特性の平均的な特性に基づき構築した。文献 22) を参考に, 階高を 3m, 建物の階数を N として, 建物の 1 次固有周期 $T_0=0.06N$ (s) とする。基準階床面積 $A_0=900$ (m^2), 第三剛性は初期剛性の 0.1 倍とする。減衰は瞬間剛性比例型とし, 2016 年熊本地震時のシミュレーション解析²²⁾を参考に 1 次固有周期に対し減衰定数 $h=0.02$ とする。

$pSd_{max}=20$ (cm) における $T_p=1.0, 2.0, 3.0$ (s) のときの Ricker 波入力時における建物各階の床応答の最大絶対変位 (Peak floor displacement, PFD), 最大絶対速度 (Peak floor velocity, PFV) および最

Fig. 4 Waveforms of Ricker wavelets with constant pSv_{max}

Fig. 3 Human responses by Ricker wavelet with constant pSd_{max}

Fig. 5 Human responses by Ricker wavelet with constant pSv_{max}

Fig. 6 Height-wise distribution of seismic responses of buildings by Ricker wavelet ($pSd_{max}=20(\text{cm})$)

Fig. 7 Height-wise distribution of seismic responses of buildings by Ricker wavelet ($pSv_{max}=100(\text{cm/s})$)

大層間変形角 (peak inter-story drift angle, PIDA) の高さ分布を Fig. 6 に示す。また、 $pSv_{max}=100(\text{cm/s})$ における同様の解析結果を Fig. 7 に示す。なお、建物階数は $N=20, 30, 40$ とし、各層の高さを建物高さで除した基準化高さ (norm.H) を縦軸とした。いずれのケースでも PFD および PFV は低層階から高層階へ向けて大きくなる傾向にある。 pSd_{max} が $20(\text{cm})$ 、 $T_p=1.0(\text{s})$ のケースの高層階の一部で PIDA が $1/100 \text{ rad}$ を上回るが、全体的に $1/300 \sim 1/100 \text{ rad}$ の最大層間変形角となっている。

3.3 超高層 RC 造建物の床応答による人体応答

次にパルス性地震動に対する超高層建物内の人体応答を評価するために前節の建物モデルの地震応答解析により各階の床応答を求め、これらを人体モデルに入力する。

$pSd_{max}=20(\text{cm})$ 、 $T_p=1.0(\text{s})$ 、 $N=20$ における各階の床応答加速度波形を Fig. 8 に、 $pSd_{max}=20(\text{cm})$ 、 $T_p=1.0(\text{s})$ 、 $N=20$ における Ricker 波入力時の基準化高さ $0.25, 0.5, 0.75$ および 1.0 の人体モデルの snapshots を Fig. 9 に示す。Ricker 波の最大速度発生時刻の 10s 付近から CoP と頭部が左右に大きく変位し、頭部—腰部—CoP の位置関係が「く」の字型となりバランスを保っている。また、CoP 変位および頭部変位は建物応答の PFD および PFV と同様に低層階よりも高層階で大きくなる。

パルス性地震動に対する超高層建物内の人間の応答と挙動の全体的な傾向を検討するため、Ricker 波入力時の超高層建物内における人体モデルの最大 CoP 変位および最大頭部速度と、Ricker 波の卓越周期 T_p の関係を Fig. 10 に示す。なお、ここでは $pSv_{max}=100(\text{cm/s})$ および $pSd_{max}=20(\text{cm})$ とし、基準化高さ $0.5, 1.0$ における結果を示す。建物への入力波の卓越周期 T_p は 0.1s ずつ $0.1\text{s} \sim 5.0\text{s}$ の範囲で変化させ、建物階数 $N=20, 30, 40$ とした。また、Ricker 波との比較のため建築性能基準推進協会²⁰⁾により提供されている El Centro NS, Taft EW, Hachinohe NS を既往波として、 $pSv_{max}=100(\text{cm/s})$ および $pSd_{max}=20(\text{cm})$ とした超高層建物内における人体モデルの最大 CoP 変位および最大頭部速度も図中に併記した。さらに、建物の弾性時

Fig. 8 Floor response acceleration ($pSd_{max}=20(\text{cm})$, $T_p=1.0(\text{s})$, $N=20$)

Fig. 9 Snapshots of human model ($pSd_{max}=20(\text{cm})$, $T_p=1.0(\text{s})$, $N=20$)

Fig. 10 Maximum Human responses in three types of buildings

Fig. 11 Floor response acceleration Spectra (norm.H=1.00)

1 次固有周期 T_0 も図中に併記した。最大 CoP 変位および最大頭部速度は、建物の PFD および PFV と同様に低層階よりも高層階で大きい。人体の応答がピークとなる T_p は建物階数ごとに異なるものの、建物の弾性時 1 次固有周期 T_0 より若干長い T_p で極大となり、その

Fig. 12 Relationship between T_p/T_0 and human responses

後単調減少する。その傾向は建物階数 N によらず共通して見られる。また、既往波入力時の最大 CoP 変位および最大頭部速度は、Ricker 波による最大ピークに対しややばらつきが見られる。後述するパルス性地震動の観測記録入力時との比較ではある程度の整合性が見られることから、以降は Ricker 波を利用した検討を進める。

$pSd_{max}=20(\text{cm})$ および $pSv_{max}=100(\text{cm/s})$ における $T_p=1.0, 2.0, 3.0(\text{s})$ 、建物階数 $N=20, 30, 40$ の床応答加速度の $pSd(h=5\%)$ および $pSv(h=5\%)$ を Fig. 11 に示す。建物の弾性時 1 次固有周期 T_0 より若干長い T_p で極大となり、Fig. 10 の人体の応答がピークとなる T_p に対応している。

そこで、Fig. 10 で得られた最大 CoP 変位および最大頭部速度を統一的に扱うため、建物への入力波の卓越周期 T_p を建物の 1 次固有周期 T_0 で基準化する。 T_p/T_0 と人体の最大応答の関係を Fig. 12 に示す。 T_p/T_0 の範囲は $0 \sim 3$ とし、 T_p は最大で 7.2s まで計算した。 T_p/T_0 で整理することで最大 CoP 変位及び最大頭部速度の傾向は建物階数 N によらず概ね整合する。

次に、振幅レベルによる変化を検討するため、 pSd_{max} を $10\text{cm}, 30\text{cm}$ とした場合の T_p/T_0 と最大 CoP 変位の関係および pSv_{max} を $50\text{cm/s}, 150\text{cm/s}$ とした場合の T_p/T_0 と最大頭部速度の関係を Fig. 13 に示す。建物の基準化高さは 1.0 とした。振幅レベルが大きくなるほど、建物固有周期の長周期化に伴いピークを生じさせる周期がやや長くなる。 $pSd_{max}=30(\text{cm})$ 、 $pSv_{max}=150(\text{cm/s})$ の $T_p/T_0 > 1.0$ の範囲でややばらつきが大きくなるものの、この範囲の応答レベルであれば、建物階数 N によらず人体の最大応答が整合し、平均的な特性を概ね捉えることができる。

Fig. 12 および 13 で検討した結果をさらに統一的に扱うため、 T_p/T_0 を横軸に、 pSd_{max} 、 pSv_{max} を縦軸とし、最大 CoP 変位および最大頭部速度をコンタとして表示した結果を Fig. 14 に示す。ここでは、Fig. 12 および 13 に示した $N=20, 30, 40$ の 3 ケースの結果を平均している。なお、 pSd_{max} は 2cm 間隔で $2 \sim 40\text{cm}$ とし、 pSv_{max} は 10cm/s 間隔で $10 \sim 150\text{cm/s}$ とした入力波に対して計算を行った。振幅レベルが大きくなるほど最大 CoP 変位および最大頭部速度は

Fig. 13 Relationship between T_p/T_0 and human responses (norm.H=1.00)

Fig. 14 Human response evaluation diagram in super-high-rise RC building excited by pulse-like ground motions

大きくなり、ピークを生じる T_p/T_0 が大きくなる傾向が見られる。Fig. 14 (c), (d)には、Table 3 に示した頭部負傷度を最大頭部速度の図中に併記した。パルス波の卓越周期が建物の非線形応答時の固有周期と一致した場合、建物頂部では $pSv_{max}=80(\text{cm/s})$ 辺りから軽度の頭部負傷(Minor)が発生し、 $pSv_{max}=130(\text{cm/s})$ 以上で致命的な負傷(Critical)に至る可能性もある。

Fig. 14 を用いることで、建物への入力地震動 pSd_{max} 、 pSv_{max} 及び卓越周期 T_p 、超高層建物の 1 次固有周期 T_0 から、超高層 RC 造建物の人体の最大応答の傾向を把握することが可能となる。Fig. 14 を「パルス性地震動に対する超高層建物内の人体応答評価ダイアグラム」(以降、単に「人体応答評価ダイアグラム」)として提案し、これ以降超高層建物内での人体応答を検討する際にこれを用いる。

4. 実地震記録による人体応答と揺れの体感のアンケート調査結果を用いた検証

本章では、過去の実地震時に観測されたパルス性地震動を用いて、前章で示した Ricker 波入力時の超高層集合住宅における人体応

Fig. 15 Location of buildings in this study and strong motion observation in Kyusyu region

Fig. 17 Pseudo-displacement response spectra at each site

答の評価結果を検証する。まず、2016 年熊本地震本震や 2018 年大阪府北部の地震時等の地表での強震記録を超高層建物モデルに入力し、得られた各階の床応答を人体モデルに入力して人体の応答を求める。そして、上記の地震時における超高層集合住宅居住者を対象に実施した揺れの体感に関するアンケート調査と人体応答の評価結果を比較し、人体応答の妥当性を検討する。さらに、Fig. 14 に示したパルス性地震動に対する超高層建物の人体応答評価ダイアグラムで評価される結果と人体モデルにより求めた人体応答を比較し、人体応答評価ダイアグラムの妥当性を検証する。

4.1 2016 年熊本地震の強震記録を用いた検証

2016 年熊本地震本震時には、地表地震断層が広範囲で確認され、益城町と西原村で大振幅のパルス性地震動が観測された。その強震記録を用いて、九州に建つ超高層集合住宅 5 棟の地震応答解析を行う。使用する建物モデルは前章と同様にせん断型多質点系モデルであり、減衰定数等の条件も同じ設定とした。

Table 4 Profile of buildings in Kyusyu region^{27), 28)}

Building name	Location	Structure	Number of stories	Year of completion	Corresponding floors	Number of respondents
EA	Kumamoto City, Kumamoto	SRC	20	2003	Upper 15~20	12
					Middle 8~14	17
					Lower 1~7	27
EB	Kumamoto City, Kumamoto	RC	25	2006	Upper 18~25	11
					Middle 10~17	25
					Lower 2~9	24
ED	Kurume City, Fukuoka	RC	19	2012	Upper 14~19	21
					Middle 8~13	22
					Lower 2~7	20
EF	Fukuoka City, Fukuoka	RC	20	1995	Upper 15~19	12
					Middle 8~14	15
					Lower 1~7	16
EG	Fukuoka City, Fukuoka	RC	27	2004	Upper 19~27	17
					Middle 10~18	36
					Lower 2~9	33

Fig. 16 Acceleration time histories at each site

Fig. 18 Pseudo-velocity response spectra at each site

Fig. 19 Height-wise distribution of human responses

Table 5 Answer items about action difficulty and corresponding scores^{26), 27)}

Answer items	Action difficulty
Could not act on my own will because of being swayed by shaking	4
Could not hold my standing posture	3
There was a slight hindrance to walking and moving	2
Felt a clear shaking, but there was no hindrance to action	1
Felt a slight shaking, but there was no hindrance to action	0

Fig. 20 Relationship between maximum human response and action difficulty

検討対象建物の建設位置と強震記録の観測点位置を Fig. 15 に示す。また、各建物の概要を Table 4 に示す。各建物の地震応答解析に用いる入力波は、各建物位置から最も近くに位置する K-NET または地方公共団体震度計の強震観測点の記録である。建物 EA, EB および ED には KMM006, 93012(大江)および FKO011 の記録を入力し、建物 EF と EG には双方とも FKO006 の記録を入力する。本震時に観測されたそれぞれの観測点位置の NS, EW 方向の時刻歴加速度波形を Fig.16 に示し、 $pSd(h=5\%)$ および $pSv(h=5\%)$ を Fig. 17 および 18 に示す。同図には、人体応答の推定で用いる各地震波の T_p を併記している。なお、 $pSd(h=5\%)$ は T_p とともに漸増する傾向にあるが、ここでは超高層建物の固有周期に対応させるため、 pSd_{max} の評価に用いる T_p をとる範囲を 0~3s とした。建物 EA の $pSd(h=5\%)$ の EW 方向、 $pSv(h=5\%)$ の NS・EW 方向のように pSd_{max} が 40cm、 pSv_{max} が 150cm/s を超える場合は、Fig. 14 に示した人体応答評価ダイアグラムの適用範囲外として除外した。次節以降も同様に扱った。

各建物における人体の最大応答の高さ分布 Fig. 19 に示す。いずれのケースも最大 CoP 変位及び最大頭部速度は下層階から上層階に向かって増大している。震源に近い建物 EA, EB では最上階付近の人間は揺れに大きく翻弄され、立位姿勢を保持するために確保できる床面積が小さい場合には踏み外しや転倒・転落の危険性が高かったと予想される。最大頭部速度も Moderate に対応している。

日野浦ら²⁶⁾、渡辺ら²⁸⁾は、20 階建てもしくは軒高 60m 以上の九州に建つ超高層集合住宅の居住者に対し、2016 年熊本地震本震時の建物内における室内被害や揺れの体感に関するアンケート調査を行った。本研究では、そのアンケート調査結果を用いて人体応答の評価結果の妥当性を検証する。本研究で検討対象とする建物は、文献 27), 28)に示されている建物のうち、制震および免震構造を除く 5 棟とする。

揺れの最中の行動難度に関するアンケート内容を Table 5 に示す。

アンケートは選択式で、「あなたの感じた地震の揺れの大きさは、どのくらいでしたか。」との質問に、「揺れに翻弄され、自分の意志で何も行動できなかった」、「立っていることができなかった」、「歩いたり動いたりすることに、やや支障があった」、「はっきりした揺れを感じたが、行動には支障がなかった」および「わずかに揺れを感じたが、行動には支障がなかった」のいずれかから回答を選択する形式である。各回答項目に対し、4~0 の数値を割り当てて行動難度を数値化し、各建物、高さレベル(高層、中層、低層)ごとに平均値を求めた。

ここで、アンケート調査は水平・鉛直三方向に揺れる実地震を経験した超高層集合住宅の居住者に対して実施したものである。一方、本研究で用いる人体モデルは水平一方向入力に対する人間の前後方向のみの応答を求めるものである。ここでは水平二方向入力の影響を考慮するため、検討対象建物における熊本地震時の観測記録に対して、15°毎に各方角の床応答加速度波形を求めて人体モデルに入力し、各方角の最大 CoP 変位の平均値を用いて検討を行う。

最大 CoP 変位とアンケート調査による行動難度の関係を Fig. 20 に示す。アンケート調査において建物 EA,EB で行動難度が 3 (立っていることができない) ~4 (揺れに翻弄され、自分の意志で何も行動ができない) 程度であり、最大 CoP 変位は下層階から上層階に向かって約 50cm 以上で推移している。熊本地震時の観測記録に対する人体の最大応答の高さ分布はアンケート調査の行動難度からその妥当性が示される。

Fig. 14 に示した人体応答評価ダイアグラムの妥当性を検証するため、同ダイアグラムによる人体応答の評価結果を Fig. 19 に併記した。これ以降、人体応答評価ダイアグラムによる推定結果を「推定値」と呼び、床応答を人体モデルに入力して求めた結果を「精解値」と呼ぶこととする。人体の最大応答の推定値は、精解値と若干差異が見られる部分はあるものの、両者は概ね対応している。このこと

Fig. 21 Location of target buildings (●) and strong motion observation sites (□) in Osaka

Table 6 Target buildings in Kansai region

Building name	Location	Structure	Number of stories	Year of completion	Corresponding floors	Number of respondents
FA	Osaka City, Osaka	RC	28	2005	Upper 19~28	40
					Middle 10~18	37
					Lower 6~9	15
FC	Takatsuki City, Osaka	RC	20	1994	Upper 15~20	8
					Middle 7~14	11
					Lower 2~6	9

Fig. 22 Acceleration time histories at each site

Fig. 23 Pseudo-displacement response spectra at each site

Fig. 24 Pseudo-velocity response spectra at each site

Fig. 25 Height-wise distribution of human responses

から、人体応答評価ダイアグラムが妥当であることが分かる。

4.2 2018 年大阪府北部の地震の強震記録を用いた検証

次に、2018 年大阪府北部の地震の観測記録を用いて人体応答評価ダイアグラムの妥当性を検討する。

2018 年 6 月 18 日に発生した大阪府北部を震源とする地震では、大阪府北摂地域において、震度 6 弱を伴う強い揺れとなり、周期 1 秒以下で卓越する地震動が多く観測された。

検討対象建物の建設位置および強震記録の観測点位置を Fig.21 に示す。対象建物 2 棟をそれぞれ建物 FA、建物 FC とし、これらの建物概要を Table 6 に示す。

検討対象建物の地震応答解析を行う。各建物の地震応答解析に用いる入力波は、各建物位置から最も近くに位置する K-NET または KiK-net の強震観測点の記録である。建物 FA および FC には OSKH05 および OSK002 の記録を入力する。使用する建物モデルは前節と同

様にせん断型多質点系モデルとする。本震時に観測されたそれぞれの観測点位置の NS, EW 方向の時刻歴加速度波形を Fig. 22 に示す。また、 $pSd(h=5\%)$, $pSv(h=5\%)$ を Fig. 23, Fig. 24 に示す。同図には、人体応答の推定で用いる各地震波の T_p を併記している。建物 FA の $pSv(h=5\%)$ では 2 つのピークが見られるため、それぞれの T_p を示した。

建物の地震応答解析により得られた各階の床応答を人体モデルに入力し、人体の応答を求めた。各建物における人体応答の高さ分布を Fig. 25 に示す。いずれのケースも最大 CoP 変位及び最大頭部速度は下層階から上層階に向かって増大する。建物 FA より震源に近い建物 FC の方が、最大 CoP 変位及び最大頭部速度は大きい。建物 FA、建物 FC の最大 CoP 変位は熊本地震と比べ小さかった。最大頭部速度も Minor にも満たず、頭部負傷の可能性は低かったと言える。

前節と同様に、人体応答の評価結果の妥当性を検討するため、検

Fig. 26 Relationship between max. CoP dis. of human and action difficulty

Fig. 27 Acceleration time histories at each site

討対象建物の居住者に対して実施した揺れの体感に関するアンケート調査²⁹⁾の結果と人体応答を比較する。揺れの最中の行動難度に関するアンケート内容は前節で示した Table 5 と同様である。

最大 CoP 変位とアンケート調査による行動難度の関係を Fig.26 に示す。アンケート調査においても大半の建物での行動難度は 3 未満であったが、最も震源に近い建物 FC の下層階・上層階では行動難度が 3 以上で最大 CoP 変位は約 20cm 程度であり、Fig.20 に示した行動難度よりも大きい傾向にあった。建物 FC の入力波に使用した OSK002 の $pSv(h=5\%)$ は 0.5s 付近で卓越し最大加速度は 800cm/s^2 程度と短周期成分が卓越しており、それにより行動難度が大きくなった可能性もある。一方、最大 CoP 変位が大きい場合に行動難度が大きくなる傾向は共通であり大阪府北部の地震時の観測記録に対する人体の最大応答とアンケート調査の行動難度には、対応関係が確認される。

人体応答評価ダイアグラムの妥当性を検証するため、同ダイアグラムから求めた基準化高さ 0.5, 1.0 における人体の最大応答推定値を Fig. 25 に併記した。人体応答評価ダイアグラムによる人体の最大応答推定値は、精解値の最大応答の傾向と概ね整合する。ただし、建物 FA の NS 方向の $pSv(h=5\%)$ では短周期側と長周期側に 2 つのピークが見られ (Fig. 24), 短周期側の T_p を用いて評価した最大頭部速度は精解値に比べ過小評価となる。一方、0.8~1.5s のやや長周期側の T_p を用いた場合には、人体応答の推定値が精解値と良好に対応する。

応答スペクトルのピークが複数見られる地震波の評価については

Table 7 Earthquake records used in this study

Earthquake	Point	Direction	Symbol		
			N=20	N=30	N=40
The 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake	JR-Takatori	NS	●	●	●
		EW	○	○	○
The Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007	Kawaguchi-cho	NS	■	■	■
		EW	□	□	□
The Hokkaido Eastern Iburi Earthquake in 2018	HKD126	NS	▲	▲	▲
		EW	△	△	△

Fig. 28 Pseudo-displacement response spectra at each site

Fig. 29 Pseudo-velocity response spectra at each site

Fig. 30 Comparison between estimation by Ricker wavelet and analysis by observed waves

今後の課題となるが、人体応答評価ダイアグラムによる人体の最大応答推定値により実地震時の人間応答をある程度評価できるものと考えられる。

4.3 その他のパルス性地震動

さらに、過去に発生した地震時に観測されたパルス性地震動を利用して、人体応答評価ダイアグラムの妥当性を検討する。

対象とする観測地震波の概要を Table 7 に示す。 pSd_{max} を 20cm に基準化したもの及び pSv_{max} を 100cm/s に基準化した NS, EW 方向の

時刻歴加速度波形を Fig. 27 に示し、 $pSd(h=5\%)$ 、 $pSv(h=5\%)$ を Fig. 28、Fig. 29 に示す。

これらの地震波を用いた建物の地震応答解析を行い、その各階の床応答を人体モデルに入力して得られた人体の最大応答を Fig. 30 に示す。建物モデルの建物階数 N は 20, 30, 40 の 3 パターンとした。なお、同図のプロットのシンボルは Table 7 の“シンボル”欄に示したものと対応している。また、前章で得られた人体応答評価ダイアグラムによる推定値も併記した。人体応答の推定値は精解値と比べて過大評価となるものもあるが、推定値を大きく超えるものはない。

以上から、人体応答評価ダイアグラムによる人体の最大応答の推定値は、地震時における人体応答の上限値を評価可能であることが示された。

5. まとめ

本研究では、超高層集合住宅の居住者を対象とし、パルス性地震動入力時の多質点せん断モデル及び台車型二重倒立振子による人体の地震応答解析モデルを用い、超高層集合住宅における負傷予測に向けた人体応答の評価を検討した。パルス性地震動として Ricker 波を利用し、パルス性地震動に対する超高層建物内の人体応答評価ダイアグラムを提案し、過去に得られた実地震時のパルス性地震動を用いてその妥当性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) Ricker 波入力時の超高層建物内での人体の最大 CoP 変位および最大頭部速度は、低層階から高層階に向けて大きくなった。
- 2) 超高層集合住宅への入力波となるパルス波の擬似変位応答スペクトルの最大値 pSd_{max} 、擬似速度応答スペクトルの最大値 pSv_{max} およびそれらの卓越周期と建物の 1 次固有周期の比 T_p/T_0 を用いた、建物内における人体の最大応答の評価法（パルス性地震動に対する超高層建物内の人体応答評価ダイアグラム）を構築した。
- 3) 建物への入力となるパルス波の卓越周期が建物の非線形応答時の固有周期と一致した場合、建物頂部では $pSv_{max}=80(\text{cm/s})$ 辺りから軽度の負傷が発生し、 $pSv_{max}=130(\text{cm/s})$ 以上で致命的な負傷に至る可能性がある。
- 4) 人体モデルにより算定された床反力中心(CoP)の最大変位が大きくなるほど、実地震時の超高層集合住宅居住者を対象とした地震時の揺れの体感に関するアンケート調査による行動難度が大きくなる傾向にあった。
- 5) 人体モデルにより求めた人体の最大 CoP 変位および最大頭部速度と、人体応答評価ダイアグラムを用いて評価したそれらを比較し、両者が概ね対応することを確認した。

謝辞

本検討では防災科学技術研究所:強震観測網(K-NET・KiK-net)、気象庁、鉄道総合技術研究所の各強震記録を利用させていただきました。アンケートに回答していただいた超高層集合住宅の居住者の皆様には大変貴重なご意見をいただきました。本論文の作成には GMT を利用させていただきました。また、本研究は令和元年度科学研究費補助金基盤研究(B) No. 19H02399 (代表: 肥田剛典)、令和 2 年度科学研究費補助金基盤研究(C) No. 20K04668 (代表: 永野正行)

の助成を受けて遂行しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Narushima, K., Nagano, M., Suzuki, K., Uebayashi, H., Tanuma, T. and Oda, S.: Estimation and simplified evaluation of peak inter-story drift angle during massive earthquake for RC super high-rise residential buildings in Japan, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 96-108, 2017.11 (in Japanese)
成島慶, 永野正行, 鈴木賢人, 上林宏敏, 田沼毅彦, 小田聡: 国内に建つ超高層集合住宅の大地震時における最大平均層間変形角の推定と簡易評価, 日本地震工学会論文集, 第 17 巻, 第 5 号, pp. 96-108, 2017.11
- 2) Okada, S. and Tamura, A.: Casualty Reduction Measures based on Microanalysis of Human Behaviors in Seismic Damage Buildings, Report of Tono Research Institute of Earthquake Science, No. 15, pp. 88-120, 2005. 4 (in Japanese)
岡田成幸, 田村篤: 被震下建物内で発生する人的被害の軽減化対策規範構築を目的とした被災事例マイクロ解析, 東濃地震科学研究所報告, No. 15, pp. 88-120, 2005. 4
- 3) Okada, S., Nachi, N., Tamori, S., Watanabe, C., and Sawada, M.: An Intensive Hearing Investigation to Households Damaged in the 2004 Niigata-Ken Chuetsu Earthquake, Report of Tono Research Institute of Earthquake Science, No. 18, pp. 65-157, 2006. 3 (in Japanese)
岡田成幸, 名知典之, 田守伸一郎, 渡辺千明, 澤田雅浩: 2004 年新潟県中越地震における室内人的被害調査, 東濃地震科学研究所報告, No. 18, pp. 65-157, 2006. 3
- 4) Tanaka, A., Nakamura, I., Udagawa, S., Nakamori, H., Sekiya, N., Magoshi, N., and Hiroi O.: Some Problems of the Information Dissemination and Behaviors of the Inhabitants at the Miyagi-ken Oki Earthquake, 2003.5, The Research Bulletin of the Institute of Socio-Information and Communication Studies, The University of Tokyo, No. 21, pp. 1-106, 2004. 3 (in Japanese)
田中淳, 中村功, 宇田川真之, 中森広道, 関谷直也, 馬越直子, 廣井脩: 2003 年 5 月 宮城県沖の地震等における住民の行動に関する調査, 東京大学社会情報研究所調査研究紀要, No. 21, pp. 1-106, 2004. 3
- 5) Tokyo Fire Department: Result of Research on the Actual Situation about Indoor Damage due to the 2016 Kumamoto Earthquake, <https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/hp-bousaika/report/2018/03/index.html>, (accessed 2020.1.27), (in Japanese)
東京消防庁: 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震に伴う室内被害の実態調査結果, <https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/hp-bousaika/report/2018/03/index.html> (参照 2020. 1. 27)
- 6) Shizuoka Prefecture: Outline of Damage due to 2009.8.11 Suruga Bay Earthquake and Disaster Prevention Measures, 2011. 3, <http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/e-quakes/shiraberu/higai/surugawanjishin/index.html>, (accessed 2020.1.27), (in Japanese)
静岡県: 平成 21 年 8 月 11 日の駿河湾を震源とする地震被害及び防災対応の概要, 2011. 3, <http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/e-quakes/shiraberu/higai/surugawanjishin/index.html>, (参照 2020. 1. 27)
- 7) Suzuki, K., Kawabe, H., Yamada, M. and Hayashi, Y.: Design Response Spectra for Pulse-Like Ground Motion, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 75, No. 647, pp. 49-56, 2010. 1 (in Japanese)
鈴木恭平, 川辺秀憲, 山田真澄, 林康裕: 断層近傍のパルス性地震動特性を考慮した設計用応答スペクトル, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 647 号, pp. 49-56, 2010. 1
- 8) Kamei, I., Satou, K. and Hayashi, Y.: Evaluation Based on Model Analysis of Response Drift in MDOF Systems Subjected to Pulse Wave Ground Motions, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 75, No. 649, pp. 567-575, 2013. 3 (in Japanese)
亀井功, 佐藤浩太郎, 林康裕: モーダル解析によるパルス性地震動に対する多自由度系の層間変形角応答特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 649 号, pp. 567-575, 2013. 3
- 9) Yasui, M., Nishikage, T., Mikami, T., Kamei, I., Suzuki, K. and Hayashi, Y.: Theoretical Solutions and Response Properties of Maximum Response of a Single-Degree-of-Freedom System for Pulse-Wave Ground Motions, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 75, No. 650, pp. 731-739, 2010. 4 (in Japanese)
安井雅明, 西影武知, 三上知広, 亀井功, 鈴木恭平, 林康裕: パルス性地震動に対する 1 自由度系最大応答理論と応答特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 650 号, pp. 731-739, 2010. 4
- 10) Minami, H. and Hayashi, Y.: Response Characteristics Evaluation of Elastic

- Shear Beam for Pulse Waves, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 78, No. 685, pp. 453-460, 2013. 3 (in Japanese)
- 南博之, 林康裕: パルス波地動を受けるせん断棒の応答特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 685 号, pp. 453-460, 2013.3
- 11) Koyama, T., and Nagano, M.: Basic Research on Simplification of Pulsed Seismic Waves and Elasto-Plastic Response Characteristics, Proceeding of the Architectural Research Meetings I, Kanto Chapter, Architectural Institute of Japan, pp. 253-256, 2011. 3 (in Japanese)

小山哲夫, 永野正行: パルス状の地震波の単純化と弾塑性応答特性に関する基礎的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp. 253-256, 2011. 3

 - 12) Koyama, T., Hida, T. and Nagano, M.: Prediction of Elasto-Plastic Responses of Super High-Rise RC Building for Pulse-Wave Ground Motions, Proceeding of the Architectural Research Meetings I, Kanto Chapter, Architectural Institute of Japan, pp. 289-292, 2012. 3 (in Japanese)

小山哲夫, 肥田剛典, 永野正行: パルス波に対する超高層 RC 建造物の弾塑性応答予測, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp. 289-292, 2012. 3

 - 13) Vibration Analysis Models of Super High-rise RC Buildings Based on Database for Structural Design and Study on Nonlinear Response Characteristics to Pulse-like Ground Motions, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 26, No. 64, pp. 881-886, 2020. 10 (in Japanese)

村田将一, 永野正行, 田沼毅彦, 小田聡: 超高層 RC 建造物の設計データベースに基づく振動解析モデルの構築とパルス性地震動入力に対する非線形応答特性の分析, 日本建築学会技術報告集, 第 26 巻, 第 64 号, pp. 881-886, 2020. 10

 - 14) Shigeyuki Okada: Study of the Evaluation of Seismic Casualty Risk Potential in Dwellings, Part1 Indoor-zoning map on dwelling space safety, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), No. 454, pp. 39-49, 1993. 12 (in Japanese)

岡田成幸: 地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究—その 1 居住空間危険度マイクロゾーニングの提案—, 日本建築学会構造系論文集, 第 454 号, pp.39-49,1993. 12

 - 15) Shigeyuki Okada: Study of the Evaluation of Seismic Casualty Risk Potential in Dwellings, Part2 Human behavior to evaluate during the 1993 Kushiro-oki earthquake, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), No. 481, pp. 27-36, 1996. 3 (in Japanese)

岡田成幸: 地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究—その 2 1993 年釧路沖地震にみる揺れている最中の災害回避行動—, 日本建築学会構造系論文集, 第 481 号, pp.27-36,1996. 3

 - 16) Shigeyuki Okada and Nobuhiro Kuroda: Study of the Evaluation of Seismic Casualty Risk Potential in Dwellings, Part3 Diagnosis method for refuge route safety to outdoors, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), No. 563, pp. 83-89, 2003. 1 (in Japanese)

岡田成幸: 地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究—その 3 室内への避難脱出経路の危険度評価法の提案—, 日本建築学会構造系論文集, 第 563 号, pp. 83-89, 2003. 1

 - 17) Saburo Midorikawa and Takuma Saeki: Evaluation of Earthquake Injuries in Office Buildings, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), No. 476, pp. 49-56, 1995. 10 (in Japanese)

翠川三郎, 佐伯琢磨: オフィスビル群における地震時の室内負傷者発生予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 476 号, pp. 49-56, 1995. 10

 - 18) Hida, T., Ohno, A., Itoi, T., and Takada, T.: Construction of Seismic Response Analysis model of Human Body for Predicting Human Damage during Earthquake –Simulation Analysis Based on Shaking Table Test and Cart-type Inverted Pendulum model–, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 84, No. 755, pp. 17-27, 2019. 1 (in Japanese)

肥田剛典, 大野敦史, 糸井達哉, 高田毅士: 地震時人的被害予測に向けた人体の地震応答解析モデルの構築 振動台搭乗実験に基づく台車型倒立振子モデルによるシミュレーション解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 84 巻, 第 755 号, pp. 17-27, 2019. 1

 - 19) Hida, T., Ohno, A., Itoi, T. and Takada, T.: Development of Seismic Response Analysis Model of Human Body by Cart-Type Double Inverted Pendulum Model for Prediction of Human Injury during Earthquake, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 84, No. 765, pp. 1377-1387, 2019. 11 (in Japanese)

肥田剛典, 大野敦史, 糸井達哉, 高田毅士: 地震時人的被害予測に向けた台車型二重倒立振子による人体の地震応答解析モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, 第 84 巻, 第 765 号, pp.1377-1387,2019.11

 - 20) Ito, K., Hida, T., Itoi, T., and Takada, T.: Development of Evaluation Methodology of Human Injury During Earthquake Based on Seismic Response Analysis Model of Human Body, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 85, No. 767, pp. 159-168, 2020. 1 (in Japanese)

伊東一輝, 肥田剛典, 糸井達哉, 高田毅士: 人体の地震応答解析モデルに基づく被災人間負傷評価法の構築, 日本建築学会構造系論文集, 第 85 巻, 第 767 号, pp. 159-168, 2020. 1

 - 21) Hida, T., Karatsu, H., Nagano, M., Itoi, T. and Takada, T.: Evaluation of Injury in Super High-rise Building During Earthquake Based on Nonlinear Seismic Response Analysis Model of Human Body, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 85, No. 776, pp. 1263-1273, 2020. 10 (in Japanese)

肥田剛典, 唐津啓樹, 永野正行, 糸井達哉, 高田毅士: 人体の非線形地震応答解析モデルに基づく超高層建物における地震時負傷評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 85 巻, 第 776 号, pp. 1263-1273, 2020. 10

 - 22) Hinoura, Y., Nagano, M., Suzuki, K., Hida, T., Kitahori, T., Tanuma, T., and Oda, S.: Construction of Nonlinear Multi-degree-of-freedom System Models for Super High-rise Residential Buildings and Estimation of Seismic Responses During the 2016 Kumamoto Earthquake, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 83, No. 749, pp. 963-973, 2018. 7 (in Japanese)

日野浦雄高, 永野正行, 鈴木賢人, 肥田剛典, 北堀隆司, 田沼毅彦, 小田聡: 超高層集合住宅を対象とした非線形多質点系モデルの構築と 2016 年熊本地震時の地震応答推定, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 巻, 第 749 号, pp. 963-973, 2018. 7

 - 23) Zhong, W. and Röck, H.: Energy and Passivity Based Control of the Double Inverted Pendulum on a Cart, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference in Control Applications, pp. 896-901, 2001.
 - 24) National Highway Traffic Safety Administration: Development of improved injury criteria for the assessment of advanced restraint systems-II, 1999.
 - 25) Nakano, M., Matsumura, H., Tamagawa, M., Yamanaka, M., Yukimasa, T., and Kubota, M.: Theoretical Analysis of Head Injury Criterion (HIC), Journal of Biomedical Fuzzy Systems Association, Vol. 12, No. 2, pp. 57-63, 2010. (In Japanese)

中野正博, 松浦弘幸, 玉川雅章, 山中真, 行正徹: 頭部損傷基準値 (HIC) の理論的分析, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 12, No. 2, pp. 57-63, 2010.

 - 26) Building Performance Standardization Association: Typical observed seismic waves, <http://www.seinokyo.jp/jsh/top/> (accessed 2021.1.28) (in Japanese)

建築性能基準推進協会: 代表的な観測地震波 (加速度データ), <http://www.seinokyo.jp/jsh/top/> (2021 年 1 月 28 日閲覧)

 - 27) Hinoura, Y., Watanabe, S., Okano, K., Suzuki, K. and Nagano, M.: Indoor Damages of Super High-Rise Residential RC Buildings during the 2016 Kumamoto Earthquake (Part1 Comparison with Indoor Damages in Tokyo Metropolitan Area during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake), Proceedings of the 12th Annual Meeting of Japan Association for earthquake Engineering, P3-11, 2016.9 (in Japanese)

日野浦雄高, 渡辺眞伍, 岡野一樹, 鈴木賢人, 永野正行: 2016 年熊本地震を対象としたアンケート調査に基づく超高層 RC 造集合住宅の室内被害(その 1 3.11 本震時の首都圏との比較), 日本地震工学会第 12 回年次大会梗概集, P3-11, 2016.9

 - 28) Watanabe, S., Hinoura, Y., Okano, K., Suzuki, K. and Nagano, M.: Indoor Damages of Super High-Rise Residential RC Buildings during the 2016 Kumamoto Earthquake (Part1 Comparison between Kumamoto City, Kurume City and Fukuoka City), Proceedings of the 12th Annual Meeting of Japan Association for earthquake Engineering, P3-12, 2016.9 (in Japanese)

渡辺眞伍, 日野浦雄高, 岡野一樹, 鈴木賢人, 永野正行: 2016 年熊本地震を対象としたアンケート調査に基づく超高層 RC 造集合住宅の室内被害(その 1 熊本, 久留米, 福岡の室内被害の比較), 日本地震工学会第 12 回年次大会梗概集, P3-12, 2016.9

 - 29) Nagano, M., Tokunaga, D., Murata, M., Tamura, A., Kataoka, T. and Wang, X.: Shaking and Indoor Damages during the 2018 Osaka North Earthquake Based on Questionnaire Survey in Super High-Rise Residential Buildings, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp. 555-556, 2019. 7 (in Japanese)

永野正行, 徳永大地, 村田正一, 田村彩女, 片岡卓也, 王欣: アンケート調査に基づく 2018 年大阪府北部地震時の超高層集合住宅の揺れと室内被害, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp. 555-556, 2019. 7

EVALUATION OF HUMAN RESPONSES TOWARD INJURY PREDICTION IN SUPER HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS EXCITED BY PULSE-LIKE GROUND MOTIONS

Hiroki KARATSU^{*1}, *Takenori HIDA*^{*2} and *Masayuki NAGANO*^{*3}

^{*1} JFE Civil Engineering & Construction Corp. (Former, Tokyo University of Science)

^{*2} Assoc. Prof., Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, Dr.Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr.Eng.

When a large pulse-like ground motion strikes in urban areas, significant structural damages may occur to super-high-rise residential buildings along with human injuries or fatalities. Herein, to evaluate human injury, human responses were investigated in super-high-rise residential buildings using the Ricker wavelet as the pulse-like ground motion. Using nonlinear seismic response analysis models of super-high-rise RC buildings and those of the human body, the variation in the maximum displacement of the center of pressure (CoP) and head velocity was examined based on the predominant periods and amplitude level of the input seismic waves. The following conclusions were drawn.

- 1) The maximum CoP displacement and head velocity of the human body in super-high-rise buildings excited using the Ricker wavelet tended to increase from the lower to the upper floors.
- 2) Diagrams were proposed for evaluating the maximum responses of the human body in super-high-rise buildings. The Diagrams evaluated human responses using the maximum value of the pseudo-displacement response spectrum (pSd_{max}), maximum value of the pseudo-velocity response spectrum (pSv_{max}), and ratio of the predominant period of the input motion to the primary natural period of the building (T_p/T_0).
- 3) If the predominant period of the input motion matched the natural period of the building, humans can suffer a minor injury when $pSv_{max}=80$ (cm/s) and a fatal injury when $pSv_{max}=130$ (cm/s) at the building top floor.
- 4) As the maximum CoP displacement calculated using the human model was larger, the action difficulty became greater based on the questionnaire survey for the residents of super-high-rise residential buildings during an earthquake.
- 5) The maximum CoP displacement and head velocity of the human body obtained using the human model were compared with those obtained using the human body response evaluation diagram. The results obtained using the human model roughly corresponded to the evaluated values, thus confirming the validity of the human body response evaluation diagram.

(2020年11月9日原稿受理, 2021年4月5日採用決定)