論文　パルス性地震動による瞬間最大入力エネルギーに着目した中低層 RC 造建物の損傷評価に関する基礎的研究

本村　一成[*1]・徳光　亮一[*2]・内山　泰生[*3]

要旨：パルス性地震動による瞬間最大入力エネルギーに着目し，中低層 RC 造建物損傷指標を提示するとともに，瞬間最大入力エネルギーの概念を用い，国内外の内陸地殻内地震の震源近傍の観測記録から抽出したパルス性地震動の周期や速度振幅について既往の経験式との比較・検討を実施した上で，1995 年兵庫県南部地震程度の地震を対象に地震規模及び断層最短距離から想定したパルス性地震動の特性を基に作成した正弦波を入力地震動とし，算出した瞬間最大入力エネルギーに基づき，中低層 RC 造建物の損傷を評価する方法を例示した。

キーワード：パルス性地震動，瞬間最大入力エネルギー，中低層 RC 造建物，建物損傷指標，正弦波

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震などの内陸地殻内地震の震源近傍では, 周期 1 秒程度以上のパルス性地震動が見られ, 建物被害に大きな影響を与えると指摘されている [1)など]。

近年，パルス性地震動の生成要因 [2)など]，その特性（パルス周期やパルス速度振幅）[3)など]，その地震動に対する建物応答特性及びこれらを考慮した設計用応答スペクトル [4)など]に関する研究など，パルス性地震動に関する研究が盛んに実施されている。

また，地震動の建物へのエネルギー入力の激しさを定量的に評価する指標として，ある単位時間における瞬間最大入力エネルギー[5)]という概念がある。瞬間最大入力エネルギーは，建物の履歴特性と直接対応させることにより，応答変形を推定することが可能である。運動エネルギー（応答速度）の値が零から再び零になるまでの時間に建物が消費したエネルギーの増分で定義される瞬間最大入力エネルギーは，地震動の速度時刻歴波形の零から再び零になるまでの時間で表現される [3)など]こともあるパルス性地震動と同様の物理現象を捉えており，パルス性地震動が建物へ与える影響を把握するには理解し易い概念であると考えられる。

以上より，仮に，パルス性地震動の特性により瞬間最大入力エネルギーを想定できれば，それに応じて建物の応答変形や損傷を推定できる可能性がある。

そこで，本研究では，中低層鉄筋コンクリート造建物（以下,「RC 造建物」とする。）を対象とし，まず，国内外の内陸地殻内地震の震源近傍の代表的な観測記録を用い，パルス性地震動による瞬間最大入力エネルギーに着目した建物損傷指標を提示する。次に，瞬間最大入力エネルギーの概念を用い，国内外の内陸地殻内地震を対象に震源近傍における観測記録のパルス性地震動の特性を抽出し，地震規模及び断層最短距離との関係について既往の経験式 [3)]と比較・検討を実施する。また，パルス性地震動の特性を基に作成した正弦波を入力地震動とし，算出した瞬間最大入力エネルギーと，観測記録によるそれとの整合を確認する。最後に，1995 年兵庫県南部地震程度の地震規模の内陸地殻内地震を対象に，地震規模及び断層最短距離から想定したパルス性地震動の特性を基に作成した正弦波を入力地震動とし，算出した瞬間最大入力エネルギーと前述の中低層 RC 造建物を対象とした損傷指標を比較することにより，想定した応答最大塑性率との大小関係を評価する方法を例示する。

2. 瞬間最大入力エネルギーの定義

地震動の建物へのエネルギー入力の激しさを定量的に評価する指標として，ある単位時間Δt における瞬間入力エネルギーがあり，中村ほか(1998)[5)]は，単位時間Δt を建物の履歴ループ 1/2 サイクルの時間で定義している。中村ほか(1998)による瞬間入力エネルギーの算出方法を以下に示す。

1 自由度系の運動方程式の各項に微小変形 $dx = \dot{x}dt$ を乗じて継続時間 T で積分すると，以下のエネルギーの釣り合い式(1)が得られる。

$$\int_0^T m\ddot{x}\dot{x}dt + \int_0^T D(\dot{x})\dot{x}dt + \int_0^T F(x)\dot{x}dt = -\int_0^T m\ddot{x}_0\dot{x}dt \quad (1)$$

ここで，m は質点の質量，x は質点の相対変位，$D(\dot{x})$ は減衰力，$F(x)$は復元力，$\ddot{x}_0$ は地動加速度である。左辺の各項を順に，運動エネルギーE_V，減衰消費エネルギーE_D，履歴消費エネルギーE_H，右辺は地震動入力エネルギーE_I と定義する。

地震動の建物へのエネルギー入力の激しさを表現する瞬間入力エネルギーΔE は，以下の式(2)で定義される。

*1 九州電力（株）　テクニカルソリューション統括本部 土木建築本部　修士（工学）　(正会員)
*2 大成建設（株）　技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室　修士（工学）
*3 大成建設（株）　技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室　博士（工学）

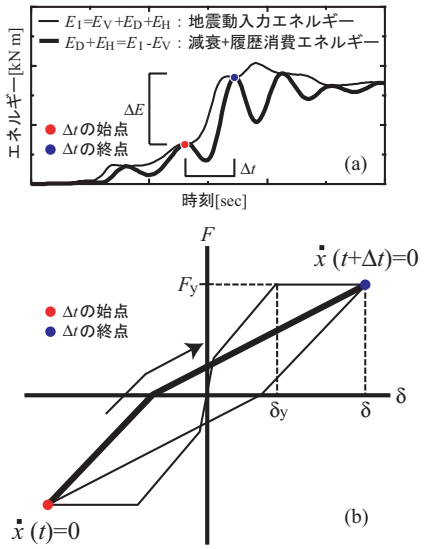
$$\Delta E = \int_t^{t+\Delta t} D(\dot{x})\dot{x}dt + \int_t^{t+\Delta t} F(x)\dot{x}dt = -\int_t^{t+\Delta t} m\ddot{x}_0\dot{x}dt \quad (2)$$

ここで，Δt は中村ほか(1998)に基づき，**図－1**(a)に示す地震動入力エネルギーE_Iの時刻歴において，運動エネルギーE_Vの値が零（●）から再び零（●）になるまでの時間とする。このΔtにおいて建物が消費したエネルギー(E_D+E_H)を考え，これに対応する E_I の増分を瞬間入力エネルギーΔE と定義する。また，瞬間入力エネルギーΔEの最大値を瞬間最大入力エネルギーΔE_{max} と定義する。この定義によると，**図－1**(b)のとおり，Δt は履歴ループ1/2 サイクルの時間に対応しており，各サイクルによって異なる値をとる。なお，瞬間最大入力エネルギーΔE_{max}を等価速度 $V_{\Delta E}$ に換算すると，以下の式(3)で表される。

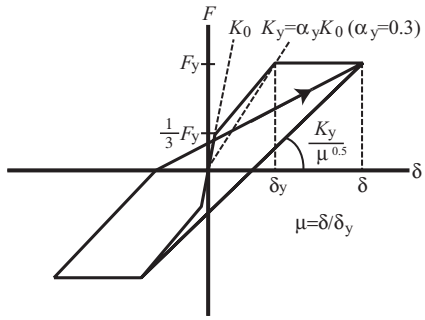
$$V_{\Delta E} = \sqrt{2\Delta E_{max}/m} \quad (3)$$

3. 中低層 RC 造建物損傷指標

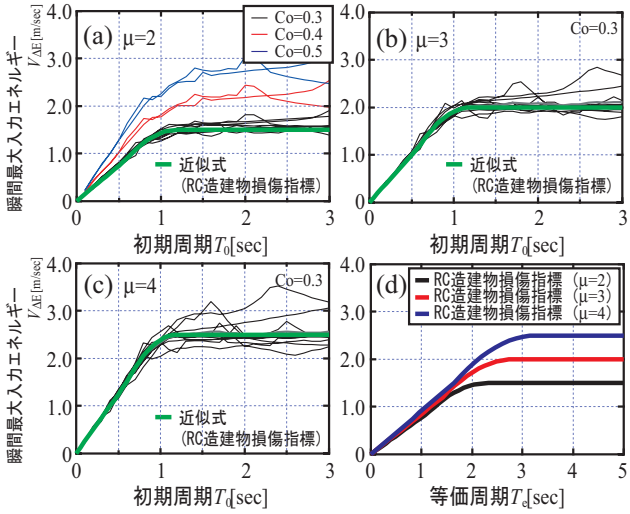
中村ほか(1998)によると，観測記録の加速度波形が相違しても，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ が同じならば，建物に同じ程度の損傷を与えることとなり，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ は建物の損傷を評価するのに良い尺度であるとされている。これに倣い，RC 造建物を 1 自由度系質点モデルと見なし，初期周期 T_0 に応じて降伏ベースシア係数を C_B=R_tC_0（振動特性係数 R_t は第 2 種地盤を想定し算出，標準せん断力係数 C_0=0.3）と仮定して定め，応答最大塑性率μ=2，3，4 となるように，それぞれの観測記録の加速度波形の大きさを規準化して弾塑性地震応答解析を行い，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ を算出した。弾塑性地震応答解析は RC 造建物を対象とし，復元力特性は**図－2**に示す Takeda モデルを用いた。初期剛性は K_0，降伏時剛性は K_y=α_yK_0(α_y=0.3)とし，降伏後の接線剛性は K_0/100 とした。ここで，質点の質量は m=1[ton]とする。粘性減衰は初期剛性比例とし，減衰定数 h は 0.03 とする。解析には，国内外の内陸地殻内地震の震源近傍の代表的な観測記録である 1979 年 Imperial Valley 地震の EC Meloland Overpass，1992 年 Landers 地震の Lucerne ，1994 年 Northridge 地震の Rinaldi，1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸，1999 年 Chi-Chi 地震の TCU068 のそれぞれ水平 2 方向の計 10 観測記録を用いた。応答最大塑性率μ=2～4 の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ と初期周期 T_0 の関係とその平均値に基づく近似式を**図－3**(a)～(c)にそれぞれ示す。**図－3**(a)～(c)によると，応答最大塑性率μが大きいほど，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ は大きい。また，どの応答最大塑性率μにおいても初期周期 T_0 が 0.6 秒程度以下の短周期帯では瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$のばらつきが小さく概ね一定値となっている。この周期帯は高さ 30m 程度以下の中低層 RC 造建物の周期帯であり，これらの建物を対象とした建物損傷を評価するのに，



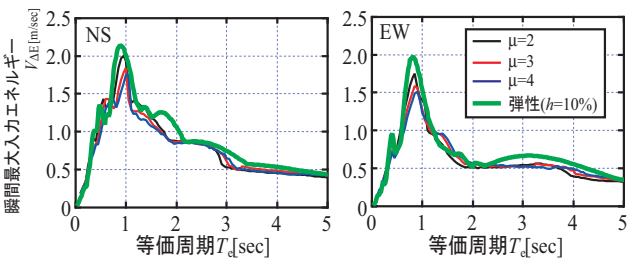
図－1　瞬間最大入力エネルギーの定義



図－2　復元力特性



図－3　観測記録に基づく瞬間最大入力エネルギー



図－4　弾性及び弾塑性時の瞬間最大入力エネルギー

瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$は，非常に安定した指標（以下，「RC 造建物損傷指標」とする。）であると考えられる。RC 造建物損傷指標は，応答最大塑性率μごとの瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$の平均値を基に設定した近似式を採用した。近似式は，第 2 種地盤における振動特性係数 R_t の周期条件（T_0<0.6[sec]，0.6[sec]≦T_0<1.2[sec]，1.2[sec]≦T_0）に応じて設定するものとし，応答最大塑性率μが 2，3，4 の順で T_0<0.6[sec]では 1.5T_0[m/sec]，2.0 T_0[m/sec]，2.5T_0 [m/sec]，1.2[sec] ≦T_0 では 1.5[m/sec]，2.0[m/sec]，2.5 [m/sec]とし，0.6[sec]<T_0≦1.2[sec]では初期周期 T_0 の 2 次曲線で両者を結んだ。なお，初期周期 T_0 が 1.2[sec]以上を一定としたのは，この周期帯の振動特性係数 R_t は初期周期の逆数(1/T_0)に比例することから降伏耐力 f_y も 1/T_0 に比例すると考えられること，また，中村ほか(1998)によると，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$は履歴消費エネルギーE_H（∝f_y・d_y）と概ね対応し，降伏耐力 f_y (∝1/T_0)と降伏変位 d_y(∝T_0)の積に比例するため，履歴消費エネルギーE_H は初期周期 T_0 に依存しないと判断したためである。この近似式に弾塑性時の周期を反映させるため，中村ほか(1998)による以下の式(4)に示す等価周期 T_e を横軸にして**図－３**(d)に示す。なお，**図－３**(a)に，1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸の観測記録の標準層せん断力係数 C_0=0.4 及び 0.5 とした応答最大塑性率μ=2 の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ と初期周期 T_0 の関係も示しているが，C_0=0.3 の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$からの増分は概ね C_0 の比率に応じていることが分かる。

$$T_e = 0.75 \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\alpha_y}} \cdot T_0 \qquad (4)$$

また，中村ほか(1998)によると，観測記録の加速度波形をそのままの大きさで入力し，応答最大塑性率μが 2～4 となるように，建物の降伏ベースシア係数 C_B を変化させて弾塑性地震応答解析を行い，算出した瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ は，式(4)の等価周期 T_e を用いれば，塑性率μが変わってもあまり変化せず，また，弾性時の減衰定数 h が 10%の値に近いとされており，弾性時の減衰定数 h が 10%の値を求めておけば，弾塑性時の値を概ね推定することができるとされている。これに倣い，1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸の水平 2 方向の観測記録を用いて算出した応答最大塑性率μ=2～4 の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ と等価周期 T_e の関係及び弾性時の減衰定数 h が 10%の同関係を**図－４**に示す。**図－４**によると，弾性時の減衰定数 h が 10%の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ は，μ=2～4 の弾塑性時の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$を概ね包絡しており，弾性時の値から弾塑性時の値を推定するには，保守性を有していることが確認される。

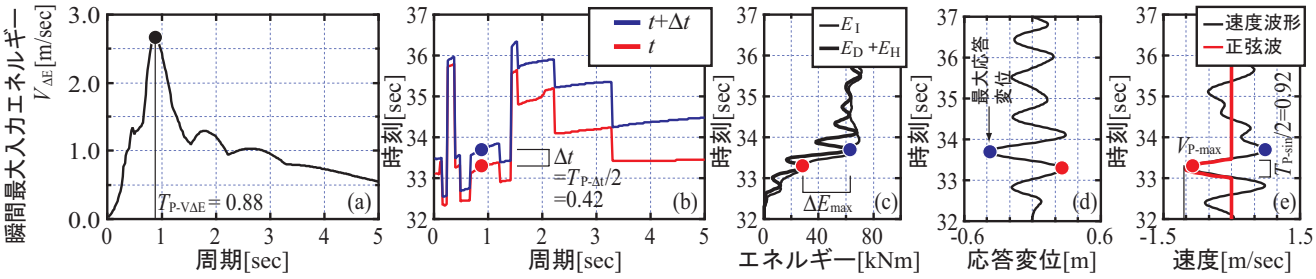
以上より，中村ほか(1998)も踏まえ，弾性時の減衰定数 h が 10%の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ を算定し，等価周期 T_e を用いれば，弾塑性時の応答最大塑性率μ=2～4 のそれを保守的に推定でき，**図－３**(d)に示す，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$による中低層 RC 造建物を対象とした建物損傷指標と比較することによって，建物の損傷の有無や程度が把握できることとなる。

表－１　対象とする国内外の震源近傍の観測記録

No.	西暦	地震名	M_w	観測点名
1	1979	Imperial Valley	6.5	EC Meloland Overpass FF
2	2000	鳥取県西部	6.6	KiK-net 日野
3	2004	新潟県中越	6.6	JMA 川口
				K-NET 小千谷
4	2007	新潟県中越沖	6.6	K-NET 柏崎
5	1994	Northridge	6.7	Sylmar_hosp_p_lot
				Rinaldi
				Sylmar_valve_grp7
				Sylmar_valve_hall
6	2007	能登半島	6.7	JMA 輪島
7	1989	Loma Prieta	6.9	LGPC
8	1995	兵庫県南部	6.9	葺合(FKA)
				JMA 神戸(KBJ)
				神戸大学(KBU)
				鷹取(TKT)
9	1992	Landers	7.3	Lucerne
10	1999	Kocaeli	7.4	Yarimca
				Gebze
11	1999	Chi-Chi	7.6	TCU052
				TCU068

4. パルス性地震動の特性の抽出

国内外の内陸地殻内地震の震源近傍の観測記録を収集し，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ の概念を用い，パルス性地震動の特性（パルス周期やパルス速度振幅）の抽



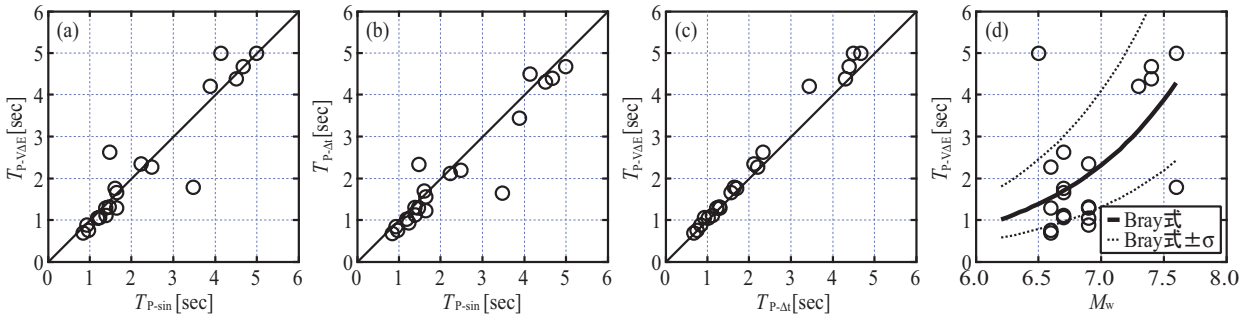
図－５　パルス性地震動の特性の抽出方法

出を試みる。収集した観測記録を**表－1**に示す。まず，収集した観測記録の加速度波形を速度波形に変換する。次に，観測記録の速度波形を 1°から 360°まで回転させ，各回転角に対する振幅エネルギーを速度振幅の 2 乗を波形全体で時間積分することにより算出し，振幅エネルギーが最大となる回転角で方位変換した波形をパルス性地震動の特性の抽出対象の観測記録とした。1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸の観測記録を例として，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ の概念を用いたパルス性地震動の特性の抽出方法を**図－5**に示す。**図－5**(a)は各周期における弾性時の減衰定数 h が 10%の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$, (b)は各周期におけるΔE_{max} が発生するΔt の発生時刻，(c)は瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ の卓越周期におけるエネルギー応答，(d)は同応答変位，(e)は観測記録の速度波形と瞬間最大入力エネルギーΔE_{max} が入力される直前の 1/2 周期速度波形を近似した正弦波を示す。なお，図中の●及び●はΔt の始点と終点を示す。**図－5**(b)では周期によってΔt の発生時刻及び幅が異なり，周期が長くなるにつれ，Δt も長くなっている。 (d)では瞬間最大入力エネルギーΔE_{max} が入力された直後に最大応答変位が発生していることが分かる。(e)における瞬間最大入力エネルギーΔE_{max} が入力される直前の観測記録の速度波形を近似した正弦波の周期 $T_{P\text{-}sin}$(=0.92 [sec])は，(a)における瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ の卓越周期から算出される周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}$(=0.88[sec])及び(b)における瞬間最大入力エネルギーΔE_{max} が発生するΔt から算出される周期 $T_{P\text{-}\Delta t}$(=0.84[sec])と概ね同等となっている。

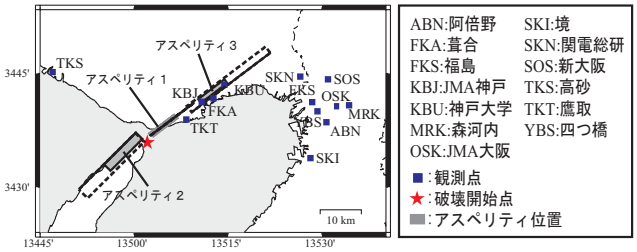
4.1 パルス周期

パルス周期の抽出にあたり，まず，**図－5**(a)における $T_{P\text{-}V\Delta E}$, (b)における $T_{P\text{-}\Delta t}$ を(e)における $T_{P\text{-}sin}$ と比較することにより，適切なパルス周期の抽出方法を採用する。国内外の観測記録を用いた比較結果を**図－6**(a)～(c)に示す。(a)及び(b)では $T_{P\text{-}V\Delta E}$ 及び $T_{P\text{-}\Delta t}$ とも $T_{P\text{-}sin}$ と概ね同等であるが，観測記録の速度波形が複雑な場合はパルス周期 $T_{p\text{-}sin}$ を適切に抽出できず，$T_{P\text{-}V\Delta E}$ 及び $T_{P\text{-}\Delta t}$ と整合しない場合も見られる。また，$T_{P\text{-}V\Delta E}$ と $T_{P\text{-}\Delta t}$ を直接比較した(c)では非常に良い相関であるが，$T_{P\text{-}\Delta t}$ のほうが若干短い。これは，建物特性より入力地震動の特性が強く現れた[6]ものと考えられる。以上より，本研究のパルス周期は瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ の卓越周期から算出される周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}$ を採用することとした。

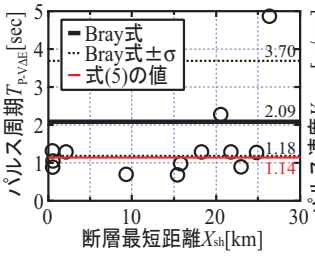
国内外の観測記録から得られた地震規模 M_w とパルス周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}$ の関係を**図－6**(d)に示す。Bray et al.(2004)[3]による経験式（以下，「Bray 式」とする。）及びそのばら



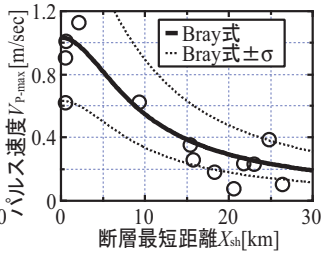
図－6　パルス周期の比較及び地震規模とパルス周期の関係



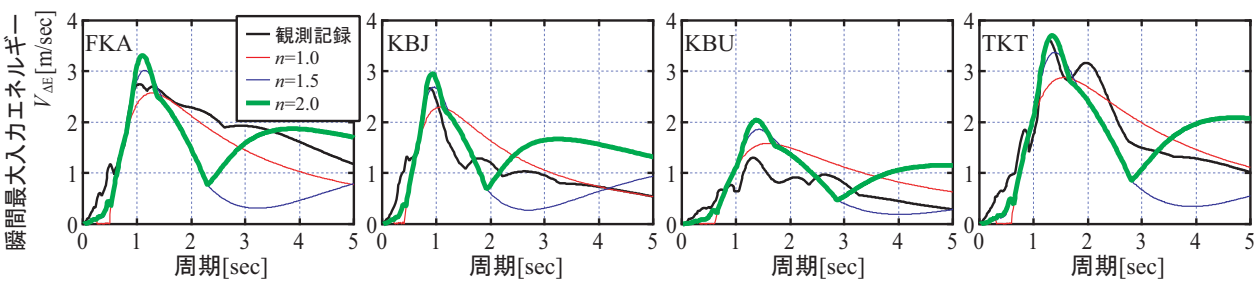
図－7　震源断層と観測点位置関係



図－8　X_{sh}-$T_{P\text{-}V\Delta E}$ 関係



図－9　X_{sh}-$V_{P\text{-}max}$ 関係



図－10　観測記録の再現結果

つきも同図に示す。(d)によると，Bray 式及びそのばらつきの範囲内に概ね含まれるが, Imperial Valley 地震が外れており，地盤が堆積層であったことや地震時に地表に永久変位を伴ったことにより地震規模のわりに $T_{p\text{-}V\Delta E}$ が長くなったのではないかと推測される。また，断層最短距離 X_{sh} とパルス周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}$ の関係を調べるために，1995 年兵庫県南部地震で得られた**表－1** に示す観測記録に**図－7** に示す観測記録を加え，算出した同関係を**図－8** に示す。なお，**図－7** には釜江・入倉(1997)[7]による 1995 年兵庫県南部地震の震源モデルも示す。また，**図－8** に Bray 式及びそのばらつきも示す。**図－8** によると，パルス周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}$ の断層最短距離 X_{sh} との関係は明確には見られないが，Bray 式により算出された周期より短い傾向にある。パルス周期はアスペリティの面積と関係する [8] ため，釜江・入倉(1997)のアスペリティのうち各観測点に最も近いアスペリティ 3（S=8km×8km=64km^2）を対象に，以下の宮武(1998)[2]による式(5)にて算出する。

$$T_{P\text{-}V\Delta E}=l\,(1/v - 1/\beta)\times 2 \qquad (5)$$

ここで，l は断層面上で破壊開始点と観測点を結んだ線分の長さ，v は破壊伝播速度，βは S 波速度である。式(5)によれば，パルス周期は破壊開始点と観測点の位置関係によって変動するが，ここでは，アスペリティの下端から破壊が開始し，上端付近に観測点が位置している場合，すなわち $l=S^{0.5}$ の場合を考え，v, βは釜江・入倉(1997)による 2.8[km/sec], 3.5[km/sec]とすると，1.14[sec]となり，各観測点のパルス周期と概ね一致することとなる。

4.2 パルス速度振幅

図－5 (e)に示す，瞬間最大入力エネルギーΔE_{max} が入力される直前の観測記録の速度波形を近似した正弦波の最大値をパルス速度振幅の最大値 $V_{P\text{-}max}$ とし，断層最短距離 X_{sh} との関係を**図－9** に示す。また，Bray 式によるパルス速度振幅の最大値とそのばらつきも同図に示す。**図－9** によると，Bray 式とそのばらつきの範囲内に概ね含まれる結果となった。

4.3 正弦波と観測記録による瞬間最大入力エネルギー

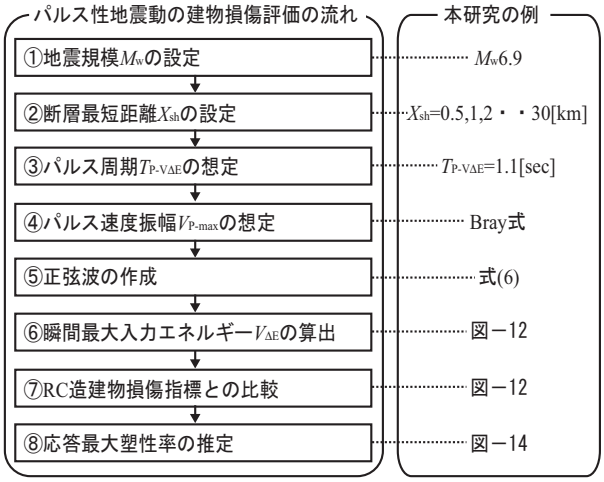
既往研究 [4), 9)など]では，地震動を正弦波 1 波で単純化する方法 [9)]やパルス性地震動を正弦波 n 波（正弦波パルス）で理想化し，設計用加速度応答スペクトルを設定する方法 [4)]などが提案されている。本研究では，これらの知見を参考に，前節までに抽出したパルス周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}$ 及びパルス速度振幅 $V_{P\text{-}max}$ を基に地動加速度 $Acc.$を以下の式(6)に示す，加速度振幅 $V_{P\text{-}max}\cdot\omega_{P\text{-}V\Delta E}$，周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}(=2\pi/\omega_{P\text{-}V\Delta E})$ の正弦波 n 波で与え，瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ を算出し，**表－1** に示す，1995 年兵庫県南部地震で得られた震源近傍の観測記録のそれとの整合を確認する。

$$Acc.=\begin{cases} V_{P-\max}\cdot\omega_{P-V\Delta E}\cdot\sin(\omega_{P-V\Delta E}\cdot t) & (0\le t<nT_{P-V\Delta E}) \\ 0 & (nT_{P-V\Delta E}\le t) \end{cases} \qquad (6)$$

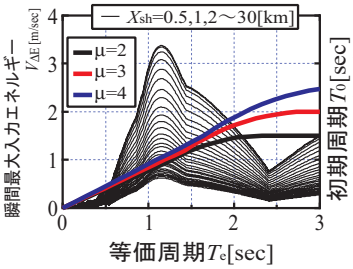
正弦波 n 波と観測記録による瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ を**図－10** に示す。**図－10** によると，入力地震動の正弦波 n 波の n を 1，1.5，2 と増やすにつれ，観測記録の瞬間最大入力エネルギー$V_{\Delta E}$ の卓越周期及びそのピーク値に近づき，n=2 では，観測記録よりそのピーク値が大きく，保守的な場合もあるが，観測記録の卓越周期とそのピーク値は概ね対応することが分かる。

5.パルス性地震動に対する中低層 RC 造建物損傷評価

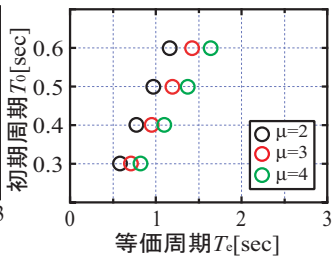
これまでの検討結果を踏まえ，パルス性地震動による中低層 RC 造建物の損傷評価の例を**図－11** に示す。本研究では，1995 年兵庫県南部地震程度の地震規模の内陸地



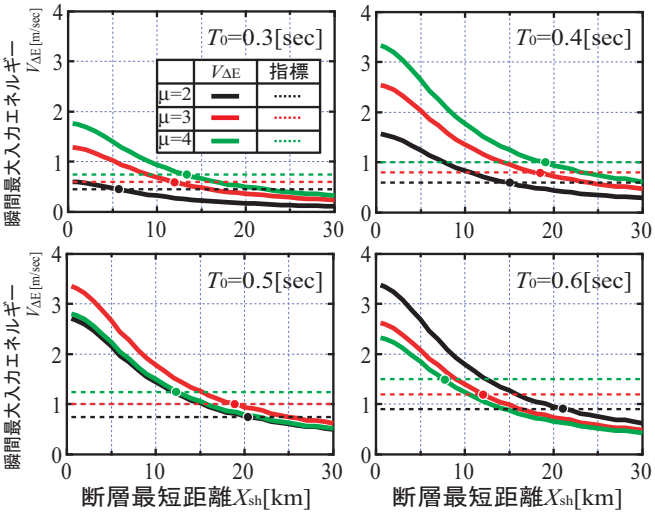
図－11　中低層 RC 造建物損傷評価の流れと本研究の例



図－12 $V_{\Delta E}$ と建物損傷指標



図－13 初期周期と等価周期



図－14　瞬間最大入力エネルギーと断層最短距離の関係

殻内地震を想定し，地震規模として M_w6.9，断層最短距離 X_{sh} は 0.5,1,2～30km と設定する。パルス周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}$ は兵庫県南部地震のアスペリティ３の面積から式(5)により算出された 1.14[sec]を基に 1.1[sec]と設定する。パルス速度振幅 $V_{P\text{-}max}$ は Bray 式に基づき設定する。これらパルス周期 $T_{P\text{-}V\Delta E}$ 及びパルス速度振幅 $V_{P\text{-}max}$ に基づき，式(6)により n=2 の正弦波 2 波を作成し，これを入力地震動とした弾性地震応答解析により瞬間最大入力エネルギー $V_{\Delta E}$ を算出する。算出した瞬間最大入力エネルギー $V_{\Delta E}$ と**図－３**(d)に示した RC 造建物損傷指標との比較から想定した応答最大塑性率との大小関係を評価する。瞬間最大入力エネルギー $V_{\Delta E}$ と RC 造建物損傷指標の比較を**図－12** に示す。また，本研究で想定している中低層 RC 造建物の初期周期 T_0 は概ね 0.3～0.6[sec]であり，応答最大塑性率μ=2～4 に応じた等価周期 Te は，**図－13** に示すとおり，0.6～1.6[sec]程度であるため，この周期帯で瞬間最大入力エネルギー $V_{\Delta E}$ と RC 造建物損傷指標を比較することにより，想定している応答最大塑性率μとの大小関係を評価できる。中低層 RC 造建物を対象とし，初期周期 T_0=0.3，0.4，0.5，0.6[sec]の断層最短距離 X_{sh} と瞬間最大入力エネルギー $V_{\Delta E}$ の関係を**図－14** に示す。また，同図に建物損傷指標も併せて示す。図中の瞬間入力エネルギー $V_{\Delta E}$ と損傷指標の交点（●●●）は所定の応答最大塑性率μとなる断層最短距離 X_{sh} がどの程度かを示している。これによると，初期周期 T_0 や応答最大塑性率μにもよるが，断層最短距離 X_{sh} が 6～20[km]程度より短くなると想定している応答最大塑性率μを超える可能性がある。ただし，本研究における中低層 RC 造建物の降伏ベースシア係数 C_B は現行設計基準程度の 0.3 を想定しており，実際の中低層RC造建物の降伏ベースシア係数 C_B は設計基準の 3.1～3.8 倍とする既往の知見 [10), 11)]もあるため，当該断層最短距離 X_{sh} を下回る場合であっても実際の RC 造建物が即座に倒壊等に至るとは考えにくい。今後，震源近傍におけるパルス性地震動の建物への影響を考慮する際は，建物の実耐力を適切かつ忠実に評価していくことも必要である。

6. 結論

本研究では，パルス性地震動の瞬間最大入力エネルギーに着目した中低層 RC 造建物損傷指標を提示するとともに，1995 年兵庫県南部地震程度の地震を想定し，そのパルス性地震動の特性を反映した正弦波による中低層 RC 造建物の損傷評価を実施した。結論を以下に示す。

(1) 瞬間最大入力エネルギーは，特に中低層 RC 造建物など初期周期 0.6 秒以下の短周期帯で，建物損傷評価にあたり非常に安定した指標であり，本研究では応答最大塑性率に応じて建物損傷指標を提示した。

(2) 瞬間最大入力エネルギーの概念により抽出したパルス周期・速度振幅は，既往の経験式及びそのばらつきの範囲内に概ね含まれることが確認された。

(3) 抽出したパルス周期・速度振幅による正弦波 2 波を入力地震動とした弾性地震応答解析により算出した瞬間最大入力エネルギーは，観測記録の卓越周期及びそのピーク値と概ね整合することが確認された。

(4) 1995 年兵庫県南部地震程度の地震を想定し，地震規模及び断層最短距離を基に設定したパルス周期・速度振幅を用いて作成した正弦波 2 波を入力地震動とした弾性地震応答解析による瞬間最大入力エネルギーと中低層 RC 造建物損傷指標を比較することによって，想定した応答最大塑性率との大小関係を評価する方法を例示した。

謝辞

本研究では，気象庁，新潟県，防災科学技術研究所，関西地震観測研究協議会，鉄道総合技術研究所，大阪ガス，COSMOS，PEER NGA Database の強震観測記録を使用させて戴きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 久田嘉章，山本俊六：ノースリッジ地震の地震動－類似点と相違点，第 23 回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.93-100，1995
2) 宮武隆：断層近傍の強震動パルスの成因，地震，第 2 輯，第 51 巻，pp.161-170，1998
3) J.D.Bray and A.Rodriguez-Marek：Characterization of forward- directivity ground motions in the near-fault region, Soil Dyana- mics and Earthquake Engineering, 24, pp.815 -828，2004
4) 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
5) 中村孝也，堀則男，井上範夫：瞬間入力エネルギーによる地震動の破壊特性評価と応答変形の推定，日本建築学会構造系論文集，第 513 号，pp.65-72，1998.11
6) 井上範夫，堀則男，中村孝也：RC 構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.531-536, 1997
7) 釜江克宏，入倉孝次郎：1995 年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 500 号, pp.29-36, 1997.10
8) 松島信一，川瀬博：1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第 534 号，pp.33-40.2000.8
9) 境有紀，壁谷澤寿海：地震動の単純化および距離減衰式を用いて基盤動をサイン波 1 波で与える方法，構造工学論文集，Vol.46B，pp.81-86，2000.3
10) 長戸健一郎，川瀬博：建物被害データと再現強震動による RC 造建物群の被害予測モデル，日本建築学会構造系論文集，第 544 号，pp.31-37，2001.6
11) 日本建築学会：建築物の耐震性能評価手法の現状と課題－限界耐力計算・エネルギー法・時刻歴応答解析－，pp.91-94，2009.2