

論文 強震動生成領域の幾何学的特性を考慮したパルス性地震動による鉄筋コンクリート造建物の損傷評価に関する研究

本村 一成^{*1}・徳光 亮一^{*2}・内山 泰生^{*3}

要旨: $M_w6.5$ 程度の内陸地殻内地震を想定し, 強震動生成領域の幾何学的特性を変数として, 震源近傍のパルス性地震動のパルス周期を簡便的に評価した。また, 評価したパルス周期と既往の経験式に基づくパルス速度振幅により作成した正弦波を入力地震動とし, 簡便的に周期ごとの瞬間最大入力エネルギーを評価し, 建物損傷指標との比較・検討を実施した。その結果, $16 \sim 36[\text{km}^2]$ 程度の強震動生成領域が存在する場合, 実耐力と設計耐力にあまり差がない中高層 RC 造建物の等価周期 $1 \sim 2$ 秒と同程度のパルス周期を有するパルス性地震動が発生し, 中高層 RC 造建物に大きな損傷を与える可能性がある。

キーワード: パルス性地震動, 瞬間最大入力エネルギー, 強震動生成領域, 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, パルス性地震動が見られ, 建物の被害に大きな影響を与えると指摘されている¹⁾など。

著者らは, 国内外の内陸地殻内地震の震源近傍の観測記録の速度波形のパルス周期は, 建物に入力される地震動の瞬間最大入力エネルギー²⁾の卓越周期と概ね一致することを示した³⁾。また, 瞬間最大入力エネルギーに着目した鉄筋コンクリート造(以下, 「RC 造」とする。)建物の損傷指標を提示した³⁾。震源近傍のパルス性地震動のパルス周期及びパルス速度振幅を推定し, それを基に作成した正弦波の入力により瞬間最大入力エネルギーを簡便的に算出し, 震源近傍の観測記録のそれとの整合性を確認した³⁾。さらに, 震源近傍の強震動の試算結果⁴⁾を用い, 震源近傍におけるパルス性地震動のパルス周期及び瞬間最大入力エネルギーの平面的な分布等について検討を実施した結果, 周期によっては瞬間最大入力エネルギーが建物損傷指標を上回る場合もあり, 実耐力と設計耐力に差がない中高層 RC 造建物の等価周期が, 震源断層における強震動生成領域(以下, 「SMGA」とする。)の面積によっては, それに伴い発生するパルス周期と一致し, 大きな損傷を与える可能性を示唆した⁵⁾。

以上を踏まえ, 本研究では, まず, 近年日本国内で発生した内陸地殻内地震の SMGA の幾何学的特性(面積及び形状等)に関する既往の知見⁶⁾などを収集し, 地震規模との関係について整理する。次に, $M_w6.5$ 程度の内陸地殻内地震を想定し, SMGA の面積, 位置及び形状を変数として, 震源近傍のパルス性地震動のパルス周期を簡便的に評価する。最後に, 評価したパルス周期と既往の経験式に基づくパルス速度振幅により作成した正弦波を入力地震動とし, 簡便的に周期ごとの瞬間最大入力エネ

ルギーを評価し, 建物損傷指標と比較・検討を実施する。

2. 強震動生成領域の幾何学的特性

2.1 既往の知見の収集・整理

宮腰ほか(2015)⁶⁾では, 国内の内陸地殻内地震の震源パラメータのスケーリング則の検討において, 経験的グリーン関数法による強震動評価によって推定された SMGA の諸特性が整理されている。本研究では, 宮腰ほか(2015)により収集されている 16 の地震・20 の SMGA モデルに加え, 既往の知見⁷⁾などによる 18 の地震(宮腰ほか(2015)と 6 つの地震は重複)・25 の SMGA モデルを収集し, 計 28 の地震・45 の SMGA モデルに示される SMGA の諸特性を整理する。

2.2 地震規模と強震動生成領域の幾何学的特性の関係

前節で収集・整理した既往の知見に基づき, 地震モーメント M_0 と SMGA の幾何学的特性との関係を図 - 1 に示す。各地震の M_0 は F-net⁸⁾の値を参照した。なお, Somerville et al.(1999)⁹⁾による経験式も図 - 1 (b)に示す。各地震において, 複数の文献で SMGA の幾何学的特性が示されている場合は, 対数軸上で平均値を算出した。

図 - 1 (a)に示す, M_0 と 1 つのセグメントあたりの SMGA 数 $N_{\text{SMGA}}/N_{\text{seg}}$ の関係によると, $M_w6.5$ 相当の M_0 が $7.5 \times 10^{18}[\text{Nm}]$ 以下では, $N_{\text{SMGA}}/N_{\text{seg}}$ は概ね $1 \sim 2$ 個である。これ以降, $M_w6.5$ 相当の M_0 が $7.5 \times 10^{18}[\text{Nm}]$ を想定し, SMGA が 1 個の場合(14 の地震・17 の SMGA モデル)と 2 個の場合(10 の地震・14 の SMGA モデル)に着目して検討を行う。SMGA が 1 個の場合の SMGA を SMGA1-1, 2 個の場合のそれぞれの SMGA を SMGA2-1・SMGA2-2(SMGA2-1 の面積 > SMGA 2-2 の面積)とする。

図 - 1 (b)に示す, M_0 と SMGA の面積 S_{SMGA} の関係によると, M_0 が大きくなると, S_{SMGA} も大きくなり, 地震

*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)

規模依存性が見られる。SMGA1-1 は式(1)の Somerville et al.(1999)⁹⁾による SMGA の総面積に関する経験式, SMGA 2-1 は式(2)の Somerville et al.(1999)⁹⁾による最も大きな SMGA の面積に関する経験式, SMGA2-2 は式(1)と式(2)の差をとった式(3)と整合している。また, M_0 が 7.5×10^{18} [Nm]程度では, S_{SMGA} は 16 ~ 100[km²]である。

$$S_{SMGA1-1}[\text{km}^2] = 5.00 \times 10^{-16} \times (M_0[\text{Nm}] \times 10^{-7})^{2/3} \quad (1)$$

$$S_{SMGA2-1}[\text{km}^2] = 3.64 \times 10^{-16} \times (M_0[\text{Nm}] \times 10^{-7})^{2/3} \quad (2)$$

$$S_{SMGA2-2}[\text{km}^2] = 1.36 \times 10^{-16} \times (M_0[\text{Nm}] \times 10^{-7})^{2/3} \quad (3)$$

図 - 1 (c)に示す M_0 と SMGA の長さ L_{SMGA} と幅 W_{SMGA} の比 L_{SMGA}/W_{SMGA} の関係によると, 地震規模依存性は見られず, L_{SMGA}/W_{SMGA} は 0.5 ~ 1.5 程度である。

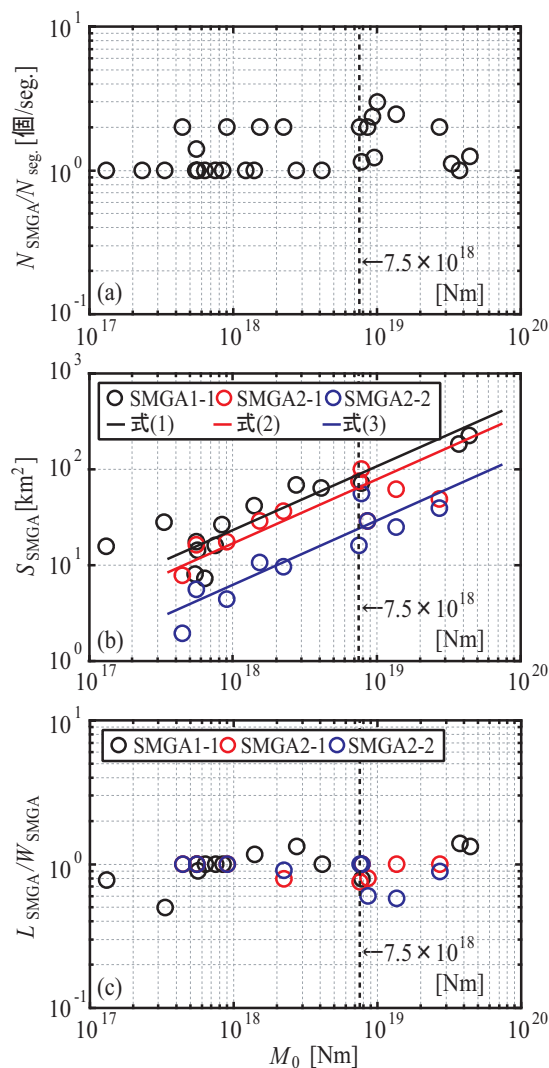


図 - 1 M_0 と SMGA の幾何学的特性の関係

3. パルス周期の簡便的な評価

著者らは, 既往の研究^{10), 11)}などに基づき, RC 造建物の実耐力を考慮した降伏ベースシア係数 C_{yr} と現行設計基準に基づく降伏ベースシア係数 C_{yd} を整理・比較している^{5), 12)}。両者の比較を図 - 2 (a)に示す。図 - 2 (a)によ

ると, 0.3 秒以下の低層 RC 造建物では C_{yd} に対し, C_{yr} は非常に大きくなっているが, 0.4 秒以上の中高層 RC 造建物では, 徐々に C_{yd} と C_{yr} の差が小さくなっていることが分かる。また, 著者らは, パルス性地震動に対して, 瞬間最大入力エネルギーに着目し, 周期ごとに RC 造建物損傷指標を提示している³⁾。RC 造建物損傷指標は, 降伏ベースシア係数 C_y を 0.3 程度, 許容塑性率 μ を 2 ~ 4 と想定した RC 造建物を対象としている。上記 RC 造建物の初期周期 T_0 と等価周期 T_e の関係を図 - 2 (b)に示す。等価周期 T_e は, 中村ほか(1998)²⁾による式(4)に基づき, 最大塑性率時の周期 T_u の 0.75 倍とし, 降伏時剛性低下率 α_y は 0.3 とし算出した。図 - 2 (b)によると, T_0 が 0.4 ~ 1.0 秒の中高層 RC 造建物の T_e は, μ が 2 ~ 4 と想定すると, 1 ~ 2 秒程度に対応することが分かる。

$$T_e = 0.75 \cdot T_u = 0.75 \cdot \sqrt{\mu / \alpha_y} \cdot T_0 \quad (4)$$

これらを踏まえ, C_{yd} と C_{yr} の差があまりない T_0 が 0.4 秒以上の中高層 RC 造建物の T_e が 1 ~ 2 秒であり, パルス性地震動のパルス周期がこの周期帯と一致した場合, 大きな損傷を与える可能性があることから, 本研究では, 周期 1 ~ 2 秒のパルス性地震動に着目する。

3.1 評価方法

震源近傍のパルス性地震動のパルス周期 T_p の簡便的な評価を実施するため, 前章で示した S_{SMGA} や L_{SMGA}/W_{SMGA} の傾向等を踏まえ, SMGA を含む震源断層モデルを設定する。地震規模は $M_w 6.5$ 相当の M_0 が 7.5×10^{18} [Nm]を想定し, 震源断層は, 壇ほか(2010)⁴⁾の横ずれ断層の震源モデルに基づき, 長さは 25[km], 傾斜角は鉛直, 地震発生層の上端深さと下端深さはそれぞれ 3[km]と 15[km]とし, 幅は 12[km]と設定する。SMGA は震源断層の中央に, 破壊開始点は, 文献⁴⁾を参考に, 破壊進行方向に破壊伝播効果の影響が大きくなるように, SMGA の左下端(西下端)に設定する。パルス周期 T_p の簡便的な評価方法の概念を図 - 3 に示す。 T_p の評価は, 宮武(1998)¹³⁾に基づき, SMGA から放出される地震波を対象に, 以下の式(5)で評価する。

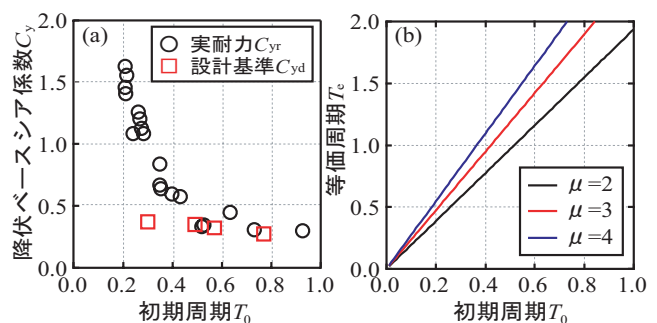


図 - 2 T_0 と C_y 及び T_0 と T_e

$$T_p[\text{sec}] = 2 \times (L[\text{km}] / V_r[\text{km/s}] + (L_2[\text{km}] - L_1[\text{km}]) / \beta[\text{km/s}]) \quad (5)$$

ここで、 L 、 L_1 、 L_2 は図-3に示す距離で、 β はせん断波速度で3.5[km/s]と設定し、 V_r は破壊伝播速度でGeller(1976)¹⁴の式(6)に基づき、2.52[km/s]と設定する。

$$V_r[\text{km/s}] = 0.72 \times \beta[\text{km/s}] \quad (6)$$

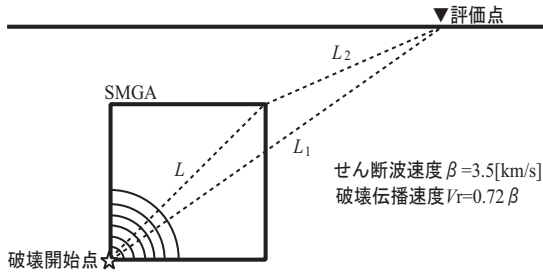


図-3 T_p の簡便な評価方法

表-1 SMGAの幾何学的特性に関する検討ケース

| Case | $S_{SMGA}[\text{km}^2]$ | 位置 | L_{SMGA}/W_{SMGA} |
|------|-------------------------|------|---------------------|
| 1 | 16,25,36,49,64,81,100 | 中央 | 1.0 |
| 2-1 | 16,25,36 | 中央上端 | 1.0 |
| 2-2 | 16,25,36 | 中央下端 | 1.0 |
| 3-1 | 16,25,36 | 中央 | 0.5 |
| 3-2 | 16,25,36 | 中央 | 1.5 |

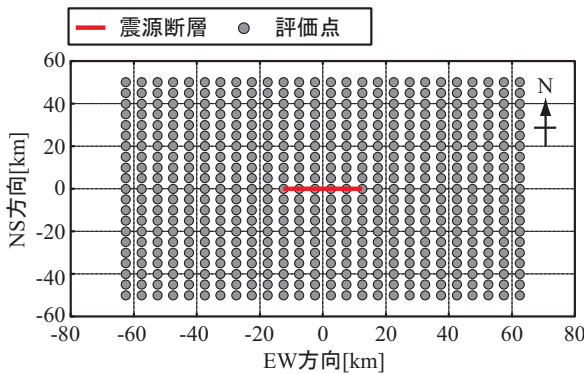


図-4 T_p の簡便な評価点

T_p の簡便な評価は、 S_{SMGA} 、SMGAの位置及び L_{SMGA}/W_{SMGA} を変数とし、設定した震源断層モデルを用いて実施する。本研究における検討ケースを表-1に示し、詳細は各節にて説明する。また、 T_p の評価点は図-4に示すNS方向及びEW方向ともに、5km間隔の格子状とする。

3.2 強震動生成領域の面積(Case1)

2.2節によると、 $M_w 6.5$ 相当の内陸地殻内地震の S_{SMGA} は16~100[km²]であるため、本節では、図-5に示すように、SMGAの位置は震源断層の中央、 L_{SMGA}/W_{SMGA} は1.0として、SMGAの一边を4~10[km]の1[km]刻みで7ケースを検討対象とし、 T_p を評価する。

各ケースで評価したパルス周期の最小値 $T_{p-\min}$ を図-

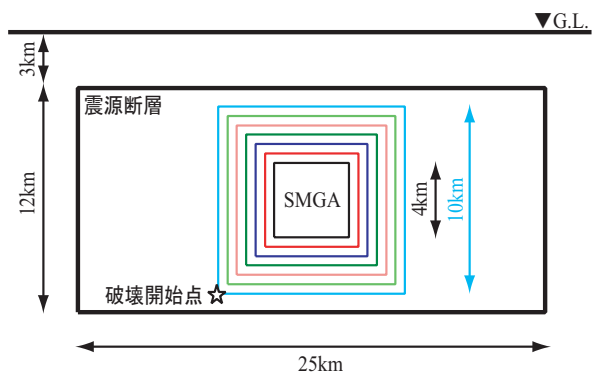


図-5 S_{SMGA} を変数としたSMGAモデル

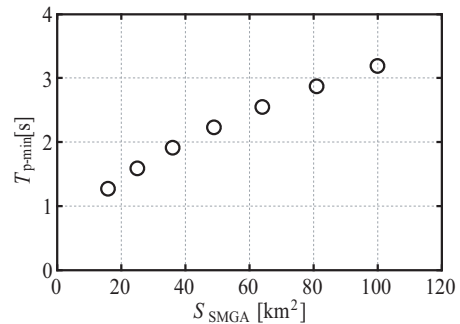


図-6 S_{SMGA} と $T_{p-\min}$ の関係

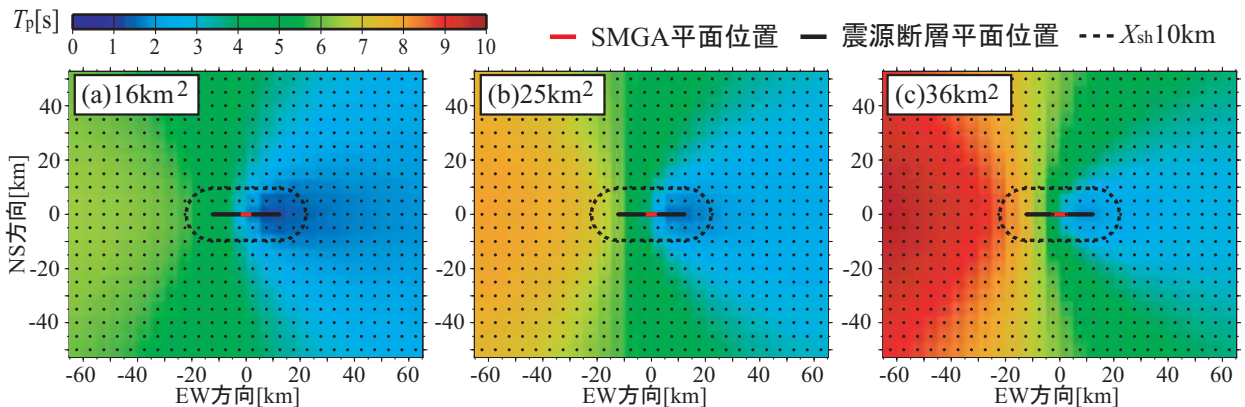


図-7 S_{SMGA} を変数とした T_p の平面分布

6に示す。図-6によると、 S_{SMGA} が小さくなるほど、 T_{p-min} が短くなる事が分かる。 S_{SMGA} が16, 25, 36[km²]の T_{p-min} は、中高層RC造建物の等価周期 T_e の1秒~2秒と概ね同等である。

S_{SMGA} が16, 25, 36[km²]の T_p の平面分布をそれぞれ図-7(a)~(c)に示す。図-7によると、図-6と同様に、 S_{SMGA} が小さいほど、 T_{p-min} は短い傾向がある。周期1~2秒の T_p の分布は、SMGA近傍の破壊進行方向に見られ、 S_{SMGA} が小さいほど広範囲に分布している事が分かる。



図-8 SMGA位置及び L_{SMGA}/W_{SMGA} を変数としたSMGAモデル

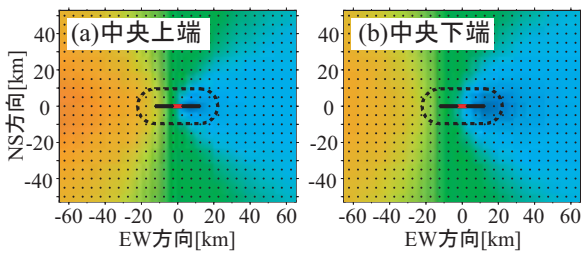


図-9 SMGA位置を変数とした T_p の平面分布

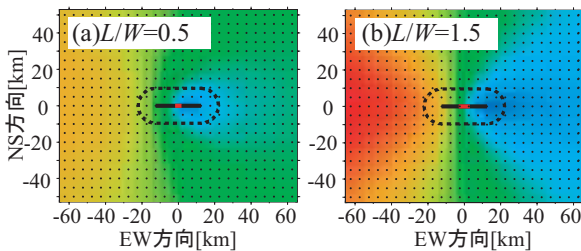


図-10 L_{SMGA}/W_{SMGA} を変数とした T_p の平面分布

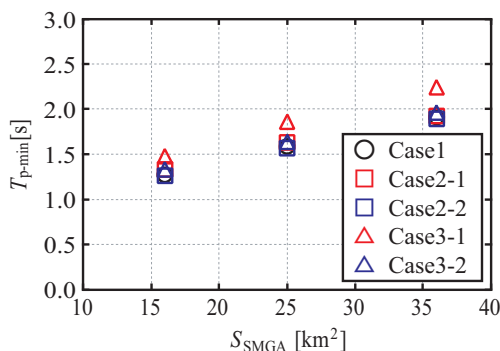


図-11 SMGAの諸特性と T_{p-min} の関係

3.3 強震動生成領域の位置(Case2-1, Case2-2)

本節では、図-8(a)に示すように、SMGAの位置を震源断層の中央上端及び下端に設定し、 T_p を評価する。なお、 L_{SMGA}/W_{SMGA} は1.0とする。 S_{SMGA} を25[km²]、SMGAの位置を中央上端及び下端に設定した場合の T_p の平面分布をそれぞれ図-9(a)及び(b)に示す。

図-9によると、中央上端及び下端ともに T_{p-min} は変わらないが、周期1~2秒の T_p の分布は、中央下端のほうが広範囲に分布している事が分かる。

3.4 強震動生成領域の長さとの幅の比(Case3-1, Case3-2)

本節では、図-8(b)に示すように、 L_{SMGA}/W_{SMGA} を0.5と1.5に設定し、 T_p を評価する。なお、SMGAの位置は中央とする。 S_{SMGA} を25[km²]、 L_{SMGA}/W_{SMGA} を0.5と1.5に設定した場合の T_p の平面分布をそれぞれ図-10(a)及び(b)に示す。

図-10によると、 L_{SMGA}/W_{SMGA} を1.5とした場合のほうが、 T_{p-min} は短い傾向にあり、周期1~2秒の T_p の分布が広範囲に分布している事が分かる。

3.5 強震動生成領域の諸特性のまとめ

本節では、前節までに実施したSMGAの幾何学的特性と T_p の関係について纏める。各検討ケースにおける T_{p-min} を図-11に示す。

図-11によると、各検討ケースの T_{p-min} はCase3-1を除き、Case1と概ね同等である。Case3-1のみ T_{p-min} が長いのは、SMGAの破壊開始点から破壊終了点の距離(対角線の長さ)が他の4ケースでは変わらないが、Case3-1では他の4ケースより長く、結果的にSMGAの破壊時間が長くなったためと考えられる。

4. 入力地震動の作成

本章では、震源近傍のパルス性地震動の瞬間最大入力エネルギーを簡便的に算出するための入力地震動として採用する正弦波を作成する。著者らは、正弦波 n 波入力と観測記録による瞬間最大入力エネルギーの比較・検討を実施し、 $n=2$ とした正弦波入力において、観測記録の瞬間最大入力エネルギーの卓越周期及びそのピーク値を概ね再現できることを確認している³⁾。これを踏まえ、正弦波作成にあたっては、著者らの文献³⁾に示す式(7)に基づくこととする。 T_p の設定については、前章において評価した T_p を採用する。パルス速度振幅 V_p の設定については、既往のBray et al.(2004)¹⁵⁾による経験式を採用する。

$$Acc. = \begin{cases} V_p \cdot 2\pi/T_p \cdot \sin(2\pi/T_p \cdot t) & (0 \leq t < 2T_p) \\ 0 & (2T_p \leq t) \end{cases} \quad (7)$$

4.1 パルス速度振幅の設定

本節では、正弦波を作成するために必要な V_p について

設定する。Bray et al.(2004)¹⁵⁾は、 M_w 及び断層最短距離 X_{sh} を変数としたパルス速度振幅の経験式(以下、「Bray 式」とする。)を提案している。 X_{sh} は評価点と震源断層面との最短距離である。図 - 12 に、Bray 式に基づくパルス速度振幅の平面分布を示す。Bray 式による V_p は最大で 0.8[m/s]程度である。

4.2 正弦波の作成

正弦波の作成に際し、 T_p の設定においては、中高層 RC 造建物の等価周期 T_e が 1~2 秒であることを着目し、周期 1~2 秒の T_p が広範囲に分布している、表 - 1 における Case1($S_{SMGA}=16\text{km}^2$)、Case2-2($S_{SMGA}=25\text{km}^2$)、Case3-2($S_{SMGA}=25\text{km}^2$) の評価結果を採用する。一方、 V_p については、前節で示した Bray 式による評価結果を採用することとし、どのケースも V_p は同じとなる。

5. 正弦波入力による瞬間最大入力エネルギーの算出

正弦波入力による瞬間最大入力エネルギー $V_{\Delta E}$ の算出は、中高層 RC 造建物の T_e と概ね一致する 1~2 秒の T_p の分布が震源近傍の破壊進行方向に見られることや横ずれ断層を想定していることで T_p の分布が X 軸に線対称となっていることから、図 - 4 に示す評価点のうち X 軸上・Y 軸上を含む第一象限に位置する評価点を対象とする。 $V_{\Delta E}$ は、地震動から構造物への入力エネルギーの激しさを定量的に指標であり、具体的には、地震動から構造物へ入力されたエネルギー時刻歴において、運動エネルギーが零から再び零になるまでの時間に構造物が消費したエネルギーの増分の最大値である^{2),3)}。

各評価点における正弦波入力による $V_{\Delta E}$ の算出結果(灰色線、緑線)と文献³⁾による RC 造建物損傷指標(黒線、赤線、青線)を図 - 13 に示す。灰色線は全周期帯で RC 造建物損傷指標($\mu=4$:青線)以下のもの、緑線は一部周期帯で超過するものを示している。また、黒線、赤線、青線はそれぞれ $\mu=2\sim 4$ の RC 造建物損傷指標を表している。図 - 13 によると、いずれのケースも周期 1.7 から 1.8 秒に $V_{\Delta E}$ の卓越周期が見られ、 $V_{\Delta E}$ が RC 造建物損傷指標($\mu=4$:青線)を超過する評価点が見られる。また、Case1 の S_{SMGA} が 16km^2 のケースでは、前述の周期 1.7~1.8 秒の卓越周期以外に 1.3 秒付近にも $V_{\Delta E}$ の卓越周期も見られ、 T_e が 1~2 秒の範囲で、他のケースに比べ、RC 造建物損傷指標に対する $V_{\Delta E}$ の超過度合いが大きくなっている。これらの $V_{\Delta E}$ が RC 造建物損傷指標を超過する評価点は、図 - 7 などに示す、断層最短距離 X_{sh} が 10km 以内で SMGA の破壊進行方向に位置する評価点である。

図 - 13 において、 $V_{\Delta E}$ が建物損傷指標を超過する 1~2 秒程度の周期帯は、 C_{yd} と C_{yr} の差があまりない T_0 が 0.4 秒以上の中高層 RC 造建物の T_e と一致しており、所定の塑性率を上回ることが想定され、大きな損傷を与える可

能性がある。

本研究で想定した M_w 6.5 相当の地震においては、震源断層において、 S_{SMGA} が $16\sim 36\text{km}^2$ 程度のやや小さめの SMGA が存在する場合、上記の 1~2 秒程度の周期帯のパルス性地震動が発生する可能性がある。また、SMGA が震源断層の下端付近に存在する場合や L_{SMGA}/W_{SMGA} が

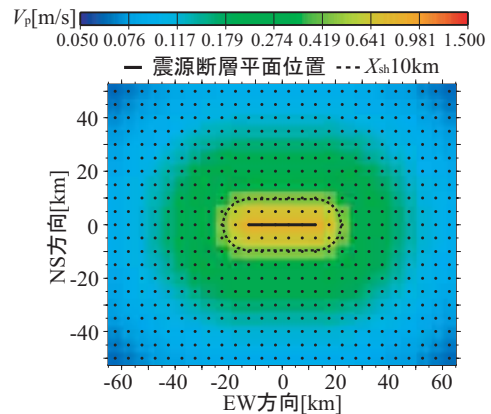


図 - 12 Bray 式による V_p の平面分布

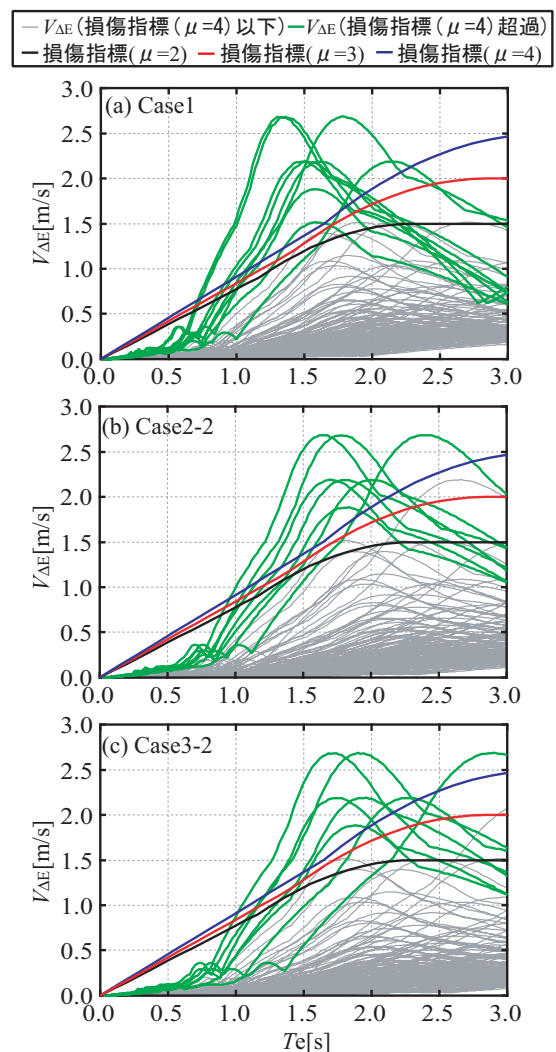


図 - 13 正弦波入力結果と建物損傷指標

1より大きい場合,上記の1~2秒程度の周期帯のパルス性地震動が発生する範囲が広範囲に分布する可能性がある。これらのパルス性地震動は,断層最短距離10km以内の破壊進行方向の領域に分布する。

本研究では,簡便的にSMGAの幾何学的特性のみを考慮して T_p や V_p を算出した。SMGAの特性には,応力降下量などのその他の微視的特性もあり,これらの特性について,今後,断層モデルを用いた手法により,震源近傍の地震動を詳細に評価し, T_p や V_p のパルス性地震動の特性を精緻に評価するとともに,中高層RC造建物の損傷評価も実施していく予定である。

6. 結論

本研究では, $M_w6.5$ 程度の内陸地殻内地震を想定し,SMGAの面積,位置及び形状を変数として,震源近傍のパルス性地震動のパルス周期を簡便的に評価した。また,評価したパルス周期と既往の経験式に基づくパルス速度振幅により作成した正弦波を入力地震動とし,簡便的に周期ごとの瞬間最大入力エネルギーを評価し,建物損傷指標との比較・検討を実施した。結論を以下に示す。

- (1) $M_w6.5$ 相当の地震で,16~36[km²]程度のやや小さめの強震動生成領域が存在する場合,1~2秒程度の周期帯のパルス性地震動が発生する可能性がある。
- (2) $M_w6.5$ 相当の地震で,強震動生成領域が震源断層の下端に存在する場合や強震動生成領域の長さが幅に比べ長い場合,1~2秒程度の周期帯のパルス性地震動が発生する範囲が広範囲に分布する可能性がある。
- (3) 断層最短距離10km以内の強震動生成領域の破壊進行方向に位置する評価点において,1~2秒程度の周期帯で瞬間最大入力エネルギーが建物損傷指標を超過した。
- (4) 超過した1~2秒程度の周期帯は実耐力と設計耐力にあまり差がない中高層RC造建物も等価周期と一致しており,所定の塑性率を上回ることが想定され,大きな損傷を与える可能性がある。

今後,強震動生成領域の幾何学的特性だけでなく,応力降下量などのその他の微視的特性も考慮した詳細な断層モデルによる地震動評価やそれを用いた中高層RC造建物の損傷評価も実施し,本研究の検討結果との整合性を確認していく予定である。

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) 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

- 3) 本村一成,徳光亮一,内山泰生: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,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.41, No.2, pp.865-870,2019.7
- 4) 壇一男,具典淑,武藤真菜美:地表の短い活断層から想定される地中の震源断層のモデル化と強震動の試算,日本建築学会構造系論文集,第75巻,第648号,pp.279-288,2010.2
- 5) 本村一成,徳光亮一,内山泰生:震源近傍におけるパルス性地震動のパルス周期及び瞬間最大入力エネルギーに関する研究,日本建築学会大会学術梗概集(北陸),21178,pp.355-356,2019.9
- 6) 宮腰研,入倉孝次郎,釜江克宏:強震動記録を用いた震源インバージョンに基づく国内の内陸地殻内地震の震源パラメータのスケーリング則の再検討,日本地震工学会論文集,第15巻,第7号(特集号),pp.141-156,2015.12
- 7) 佐藤智美:強震観測記録に基づく2016年熊本地震の広帯域震源特性,日本建築学会構造系論文集,第82巻,第741号,pp.1707-1717,2017.11
- 8) 防災科学技術研究所:広帯域地震観測網F-net, www.fnet.bosai.go.jp(閲覧日:2020.1.6)
- 9) Somerville,P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, Seism. Res. Lett., Vol.70, No.1, pp.59-80, 1999
- 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
- 12) 本村一成:震源近傍の地震動による鉄筋コンクリート造建物の地震応答特性に関する基礎的研究,日本建築学会研究報告九州支部第58号,pp.257-260,2019.3
- 13) 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
- 14) Geller. R. J.: Scaling relations for earthquake source parameter and magnitudes, Bulletin of the Seismological Society of America, 66, 1501-1523, 1976
- 15) J.D.Bray and A.Rodriguez-Marek: Characterization of forward directivity ground motions in the near-fault region, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, pp.815-828, 2004