

メキシコシティの建物被害に関する検討

中村 豊 (SDR)

崩壊の様子が映像に記録された二棟の五階建てビル A と B を中心に、建物被害について強震記録を利用しながら検討した。

図 1 に崩壊建物 A と B の地震前の外観状況を Google Earth の Street view から示す。また、ソカロのセントラルカセードラルを正面からみた外観も示した。

建物 A は録画開始時から揺れていることが明らかで、開始から 15 秒ほどしてから崩壊している。この建物の所在は、北緯 19.387865 度、西経 99.146332 度で、我々が 1999 年 8 月に常時微動を測定した EW1 測線と EW3 測線の間にある。我々の測定結果と堆積層厚の状況を併せて考えると、建物 A 付近の地盤の固有周期は、1.3 秒から 1.6 秒程度と推定され、増幅倍率は 3 倍程度と推定される。建物 A は、ほぼ東西南北に走る道路の交差点の北西コーナーに位置しており、南北に 15m 程度、東西は北側約 9m 南側約 5m で南北に長い変則的な 5 階建てである。建物は南北に二分されているように見えるが、西側の壁はほぼ煉瓦充填壁となっている。北側の建物とは 1-2m の空間があり、北側壁面も概ね煉瓦充填壁と思われる。なお西側は駐車場となっている。

建物 B は録画が始まってから 40 秒以上も経ってから崩壊している。この建物の所在は、北緯 19.422732 度、西経 99.139741 度であり、EW2 測線の第 14 地点付近であった。隣接する測点を含めた推定固有周期は 3 秒から 5 秒で、第 14 地点では 5 秒であった。第 14 地点と建物 B は GPS のデータに基づけば 100m から 200m の距離である。建物 B は、ほぼ南北に走る道路に面しており、約 17m×35m の平面を持つ東西に長い 5 階建てである。建物前面の 2 階以上は全面ガラス張り、1 階はシャッター等で閉じられており、車庫か倉庫のようである。背面は各階 3 つの窓を持つが、1 階の様子は不明。南サイドはほぼ全面煉瓦充填壁、北面サイドは各階中央 2/3 の幅にわたって四つの細い窓が開けられている煉瓦充填の壁である。屋上には南側に約 6m×9m のペントハウスがある。また、北側には学校の二階建て校舎が接しており、南側には駐車場が広がっている。

これらの崩壊映像には時間が記録されていないが、録画当初から CIRES による地震警報サイレンが鳴動し、途中でサイレンに連動していると思われるアナウンス音が記録されている。地震発生時のソカロの状況を映した動画が公開されているが、これは web カメラから

とられたもので、正確な時間が記録されていると期待される。この動画には、サイレンが鳴動する前の、時間的には地震が発生する前からの映像が記録されており、地震発生時の人々の行動や周囲の状況が、警報サイレンの鳴動時間などとともに把握できるものとなっている。ソカロの動画には警報に伴うと考えられるアナウンス音も記録されているので、これを基準にして、建物 A と B の動画の時間を推定した。地震発生後のソカロ、建物 A、および建物 B の事象を時系列的にまとめて表 1 に示す。

建物 A は、記録開始後 15 秒してから 5 秒ほどで完全に崩壊している。建物 A は記録開始後から揺れているのが、南側 1 階の車庫と思われる観音開き扉の合わせ部分が左右の揺れに伴って上下にずれていることわかる。アナウンス音の比較から、記録開始時間は現地時間の 13 時 15 分 6.1 秒と推測される。崩壊開始は 22.4 秒で、顕著に揺れ始めてから 12 秒程度であった。

建物 B の崩壊は、録画開始 42 秒後からであり、南側の 1 階が最初に破壊されてやや南側に傾斜した後、パンケーキ状に一気に落下崩壊している。崩壊開始から完全に崩壊するまで 3 秒程度の時間しか経過していない。この南側への崩壊は一階の柱が北側に偏在していることと、北側には二階建て校舎が接していたことによるものと思われる。録画開始時から警報サイレンが鳴動しており、録画開始時間は 13 時 15 分 7 秒付近より後であると推測される。アナウンス音の比較から、記録開始は現地時間で 13 時 15 分 6.7 秒と推測された。また、この動画撮影者は地震後周囲を見回しながら撮影しており、大きな揺れや被害が発生している場所を撮影しようとしていることが窺える。そして、13 時 15 分 30 秒頃から建物 B に視点を固定している。これは、この時点から建物 B が顕著に揺れ始めたことを示唆している。崩壊開始は 49.4 秒であり、揺れ始めてから 20 秒近く経過している。

UNM 地点の記録（13 時 15 分の 66 秒前から 260 秒間の記録、図 2）を用いて、周期 5.04 秒、減衰 10% の表層地盤の地表面応答を算定してみた。UNM の記録を半分にして表層地盤への入射波形としている。他に固有周期 1 秒、1.68 秒、2 秒、3 秒のものも算定した。減衰はいずれも 10% とした。これらの表層地盤表面の応答を入力として、建物の屋上応答を算定した。減衰は、5% と 10% である。

図 3 に示すように、UNM 地点の記録をみると、今回の地震動には 1.68 秒の成分が含まれている。これに建物が共振した場合、併せて地盤も共振した場合、いずれも共振していない場合を検討した。特に地盤の固有周期が 1.68 秒の場合とその 3 倍である 5.04 秒の場合に建物の固有周期を種々変化させて応答変位がどのように変化するか検討した。

建物の固有周期を、0.52 秒、1.04 秒、1.2 秒、1.4 秒、1.56 秒、1.68 秒、2.0 秒、2.4 秒、

3.2 秒、4.0 秒に変化させたが、地盤の固有周期が 5.04 秒の場合でも、1.68 秒の場合でも、概ね 1.4 秒～2 秒の固有周期で危険な状況になると推測された。つまり、建物が入力地震動に共振することで危険な状況に陥ることが示唆される。

地盤と建物の固有周期がともに 1.68 秒の場合、建物(減衰 5%)の相対変位は EW で 30cm、NS で 15cm 程度と見積もられる。EW 方向の相対変位が大きく、EW に伸びる道路に面した建物に影響が大きいと推測される。この相対変位が 1 階に集中すれば、ほぼ確実に崩壊に至ると推測される。相対変位が各階に分散されるとすると、1 階の高さを 300cm として、概ね 1 階当たり 3cm の変形が限界と考えられるので、10 階程度までの建物が危険と判断される。

地盤の固有周期が 5.04 秒で、建物の固有周期が 1.68 秒の場合、建物の相対変位は EW で 15cm 程度、NS で 8cm 程度とも積もられる。したがって、5 階程度までの建物が危険と考えられる。1 階にこの変位が集中する場合には、ほぼ確実に崩壊に至ると推測される。EW 方向と NS 方向では最大の相対変位に至る時間がかかなり異なり、NS の方が 10 秒程度以上遅く発現する。

崩壊した建物 A や B の状況をみても想像できるように、加振方向によってかなり剛性が異なる場合がある。図 4 に水平 2 方向の固有周期を比較してみた。2 倍以上の相違があるものがある。建物 A についてみると、南北は相対的に強く、東西の変形に弱いことが推測される。建物 B についていえば、道路方向すなわち南北方向の剛性は東西方向よりかなり低いと思われる。微動調査建物(建物 A や B は対象ではない)の階数と固有周期の関係(図 5)をみると、概ね周期 $T=0.06N\sim 0.1N$ 、(N は階数)の範囲に入っているが、これより短いもの(剛性の高いもの)も長いもの(剛性が低いもの)も少なくない。調査建物のうち階数に対して固有周期が特に長いものは 12 階前後のもので 3 秒前後の固有周期であったが、これを 5 階に換算すると、固有周期 1.4 秒前後となる。調査建物は今回の地震ではいずれも被災していないと思われ、被災した建物はさらに剛性が低かった、つまり固有周期が長かったと推測される。つまり、5 階建でありながら今回の地震動に共振するような低い剛性のため、被災したと考えられるのである。

そこで、建物 A の固有周期を 1.3 秒と 1.6 秒とし、その地盤の固有周期を 1.6 秒、減衰定数は 10% (5 倍相当) と 17% (3 倍相当) を仮定して応答を算定してみた。建物 B については EW を 0.52 秒(減衰は 5% と 10% の 2 種)に固定、NS については 1.3 秒(減衰定数 5%)、1.6 秒および 1.68 秒(いずれも減衰定数は 5% と 10%) の 3 種とし、地盤の固有周期を 5 秒(減衰定数 10%) として応答を算定した。また、微動計測結果に基づいて、ソカロの地盤の固有周期と減衰定数を 3 秒と 17% (倍率 3 倍相当) とし、セントラルカセードラルの

東塔と西塔の固有周期と減衰定数を、それぞれ、0.68 秒、2%および 0.76 秒、2.5%として応答を算定した。

算定結果を図 6~図 8 に示す。図 6 (1) は地盤固有周期 1.6 秒減衰定数 10%で、建物周期 1.3 秒減衰定数は 5%と 10%の場合、図 6 (2) は地盤固有周期 1.6 秒減衰定数 17%で、建物周期 1.6 秒減衰定数は 5%と 10%の場合である。いずれも EW 方向で、20 秒以後、圧倒的に大きな相対変位を示している。地盤の増幅倍率が多少小さくても、建物が共振すると、相対変位は急激に大きくなることが窺われる。建物 A が 20 秒以後急激に崩壊しているのと整合している。

建物 B を想定した図 7 の結果は、共振しない EW 方向では相対変位はほとんど生じず、NS 方向は地震動入力 of 1.68 秒に鋭敏に反応して 30 秒以後急激に大きな相対変位を生じること示している。建物 B が 30 秒以後大きく揺れたと思われることと整合しており、崩壊開始までに 10 回以上の揺れを受けたことが推定される。つまり、建物 B の 1 階の層変形は破壊まで一気に生じたのではなく、徐々に累積していったものと推測される。途中映像では、揺れが小さくなったようにも見受けられるが、共振による損傷のため固有周期がずれて振幅が小さくなったとも解釈できる。共振周期とはわずかに異なる固有周期 1.3 秒であったならば、相対変形はそれほど大きくなく崩壊には至らなかったであろうと判断され、わずかな強度不足が大きな惨事に繋がったと推測される。

セントラルカセードラルの東西の塔構造についていえば、図 8 に示すように、NS 方向成分の相対変位が 20 秒以降最大 2cm 程度と比較的大きくなっているが、層厚に相当する階高はかなり大きく、せん断変形量としては小さなものであったと推測される。

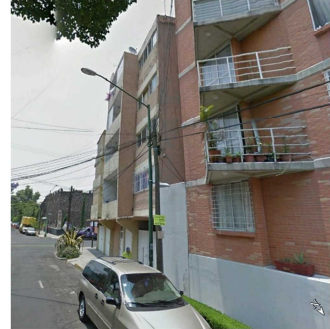
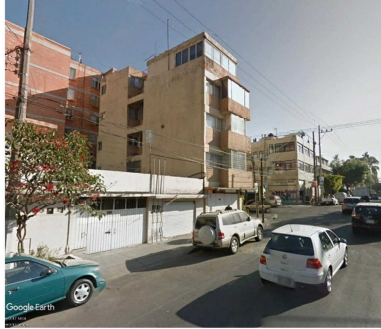
以上、簡単な応答解析の結果、地震動に共振しないような周期帯域では、大きな相対変位に成長することはなかった。固有周期が 3 秒~5 秒の地点近傍で崩壊した建物 A や地震動に共振する帯域の地盤であった建物 B の例をみても、今回の建物被災は、建物が地震動に共振したためであることは明らかであり、図 9 から図 10 に示すように、崩壊建物または重大被害建物の分布が概ね地盤の固有周期が 1 秒~2 秒の地域に広がっていることは、建物だけでなく地盤も地震動に共振すると、相対的に被災率が上がることを示していると考えられる。

謝辞：

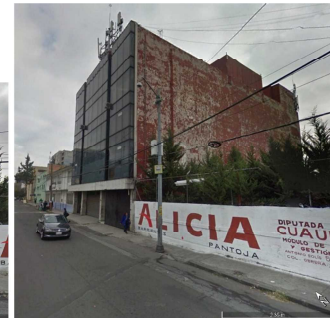
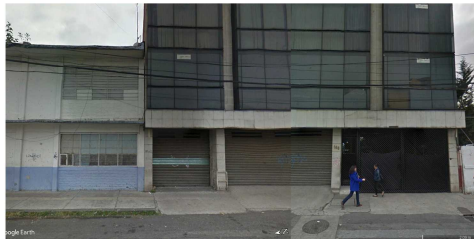
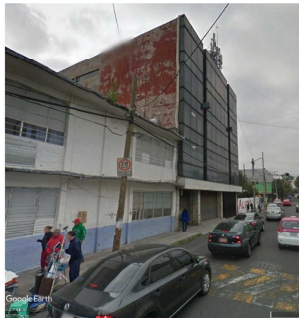
ここでは CESMID データセンターから入手した記録を使っています。関係者に感謝します。

以上

崩壊前の外観: 建物A



崩壊前の外観: 建物B



ソカロ・セントラルカセードラル

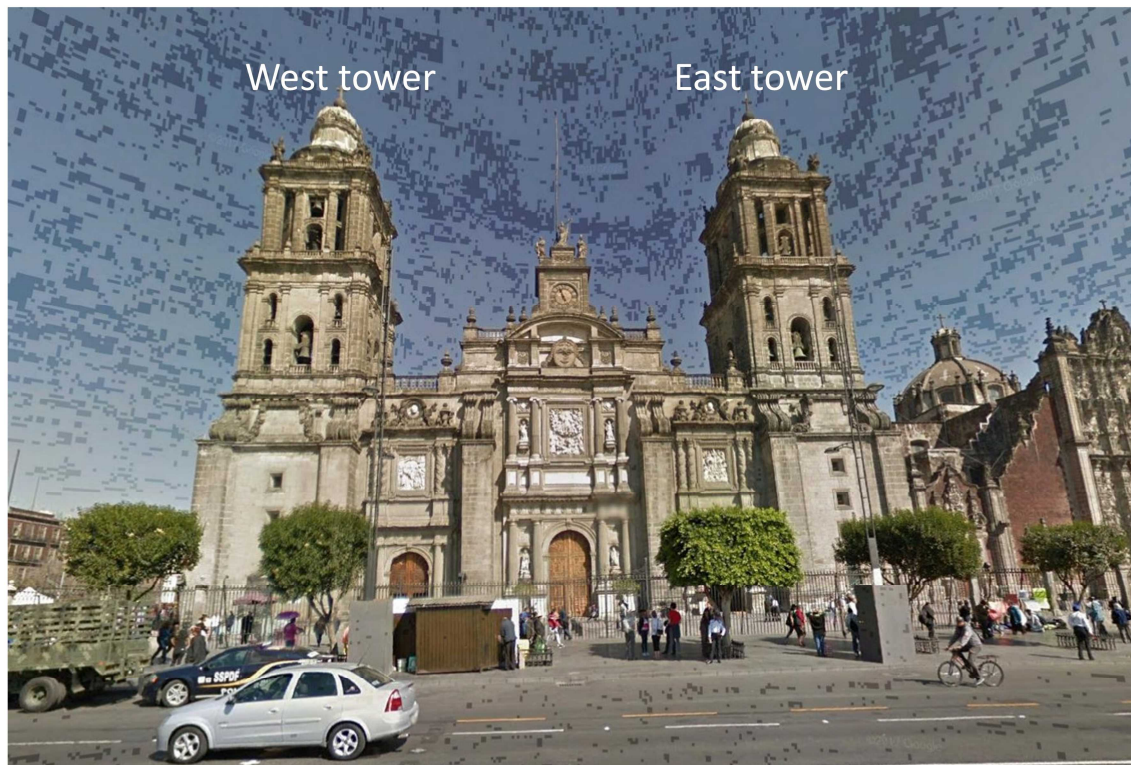


図1 検討した建物の外観

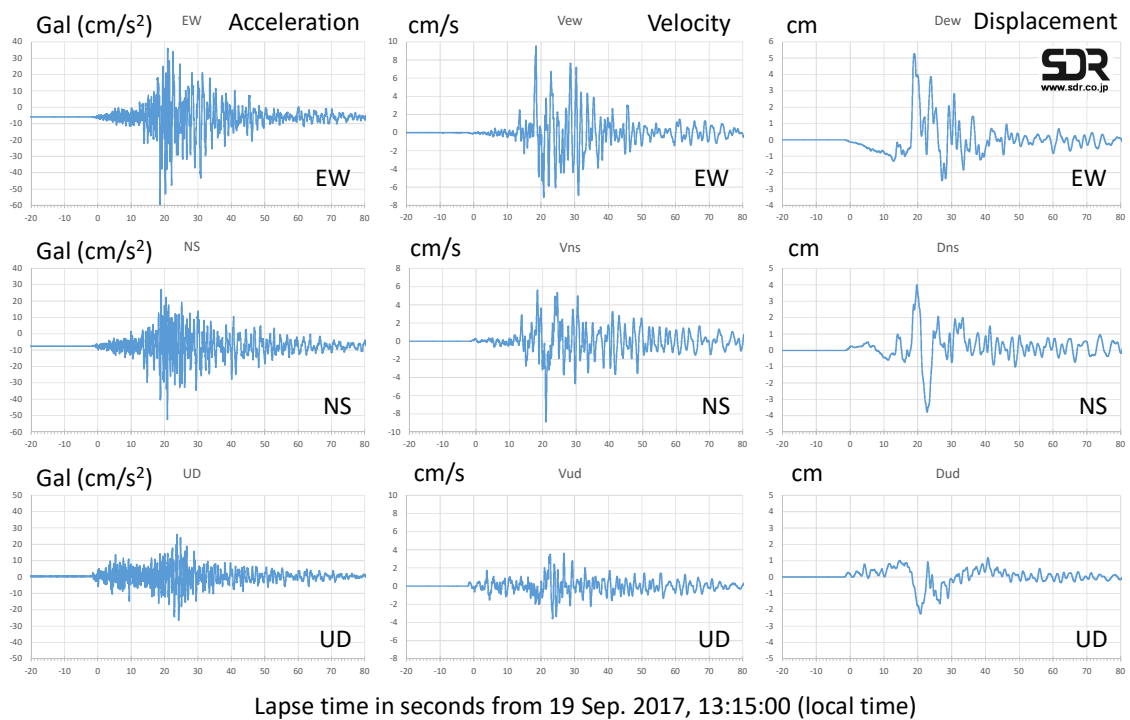


図 2 UNM 観測点での 20170919 強震記録波形（加速度）とその積分波形（速度と範囲）

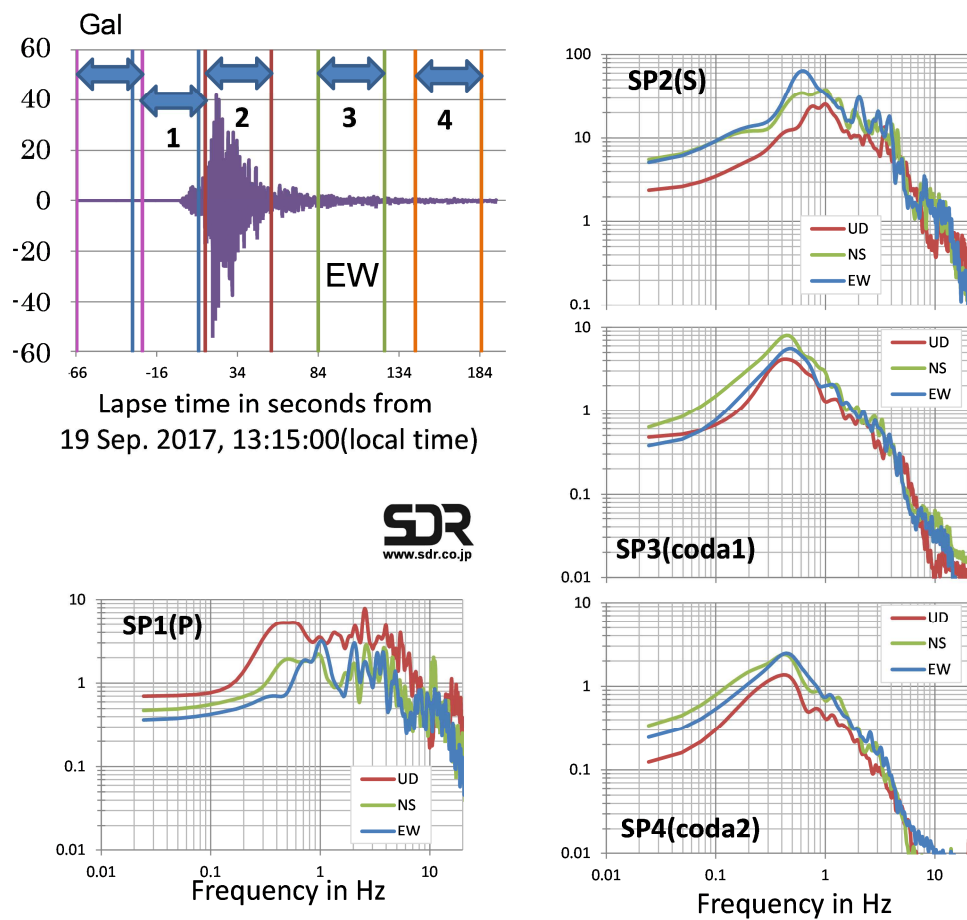


図 3 UNM 観測点での 20170919 強震記録波形（加速度）とその積分波形（速度と範囲）

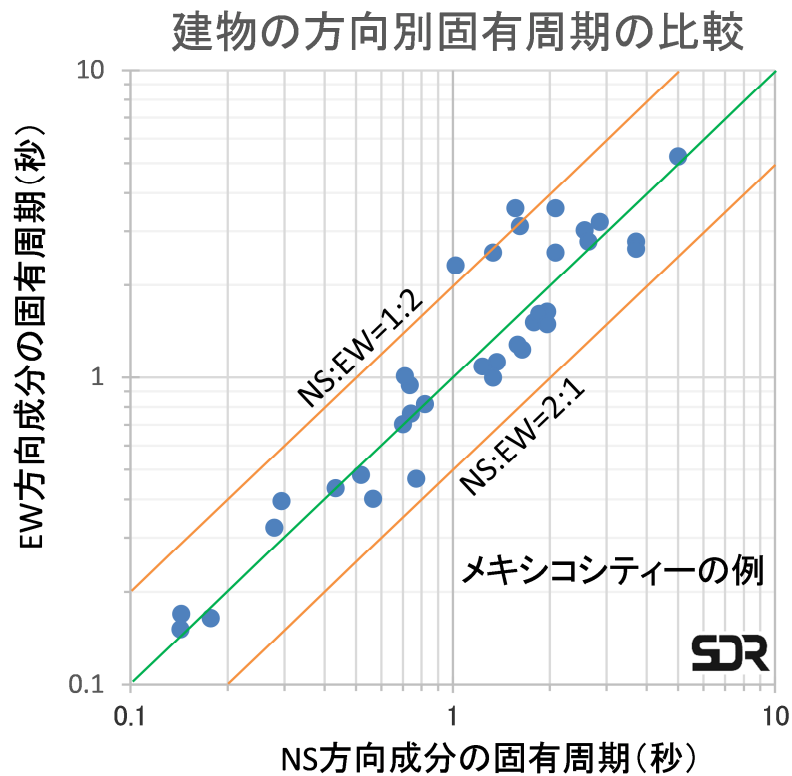


図4 メキシコシティの建物の方向別固有周期の比較例

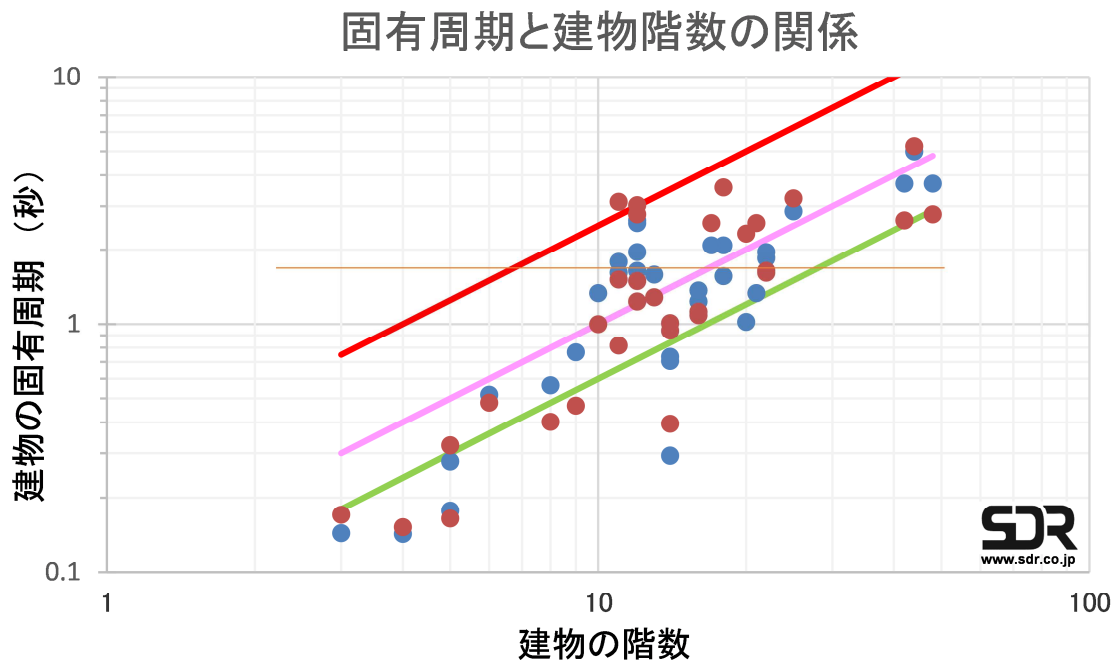
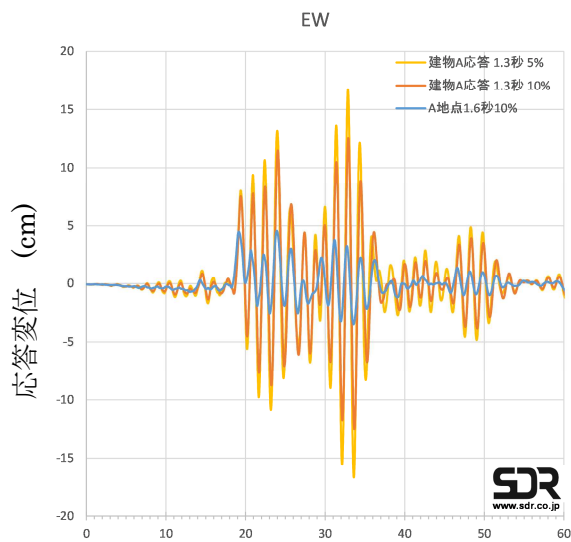
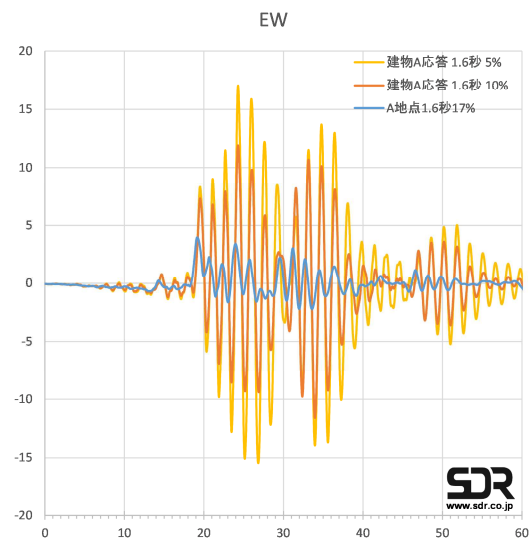


図5 メキシコシティの建物の階数と固有周期の関係例



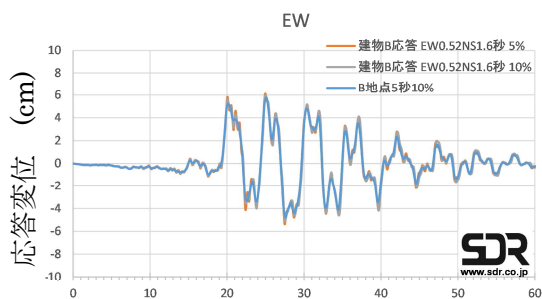
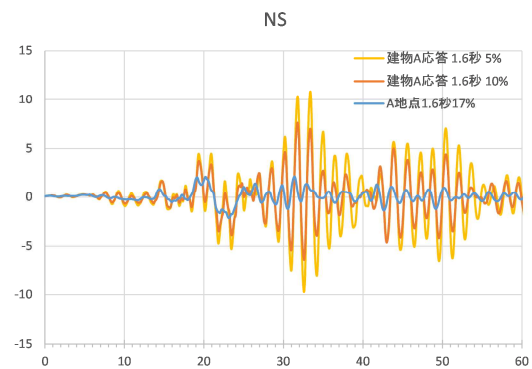
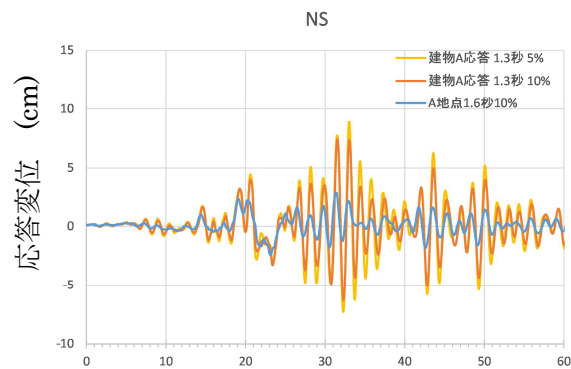
13 : 15 : 00 からの経過時間

図 6 (1) 建物 A の応答波形



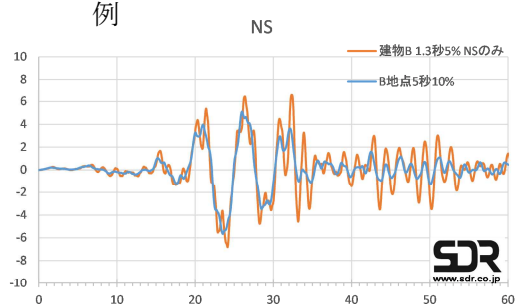
13 : 15 : 00 からの経過時間

図 6 (2) 建物 A の応答波形
例

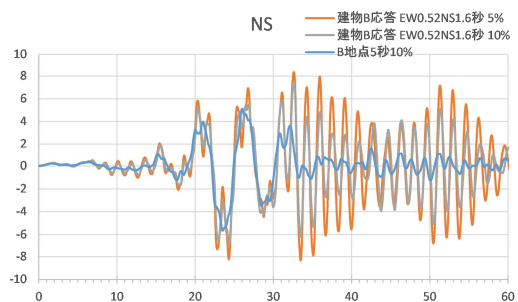


13 : 15 : 00 からの経過時間

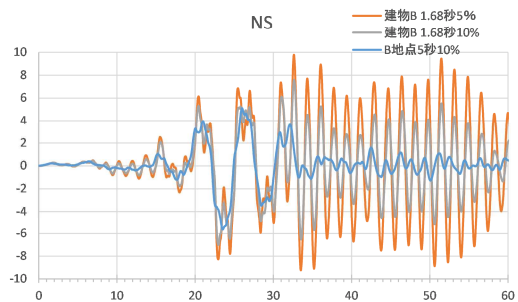
図 7 建物 B の応答波形例



応答変位 (cm)



応答変位 (cm)



13 : 15 : 00 からの経過時間

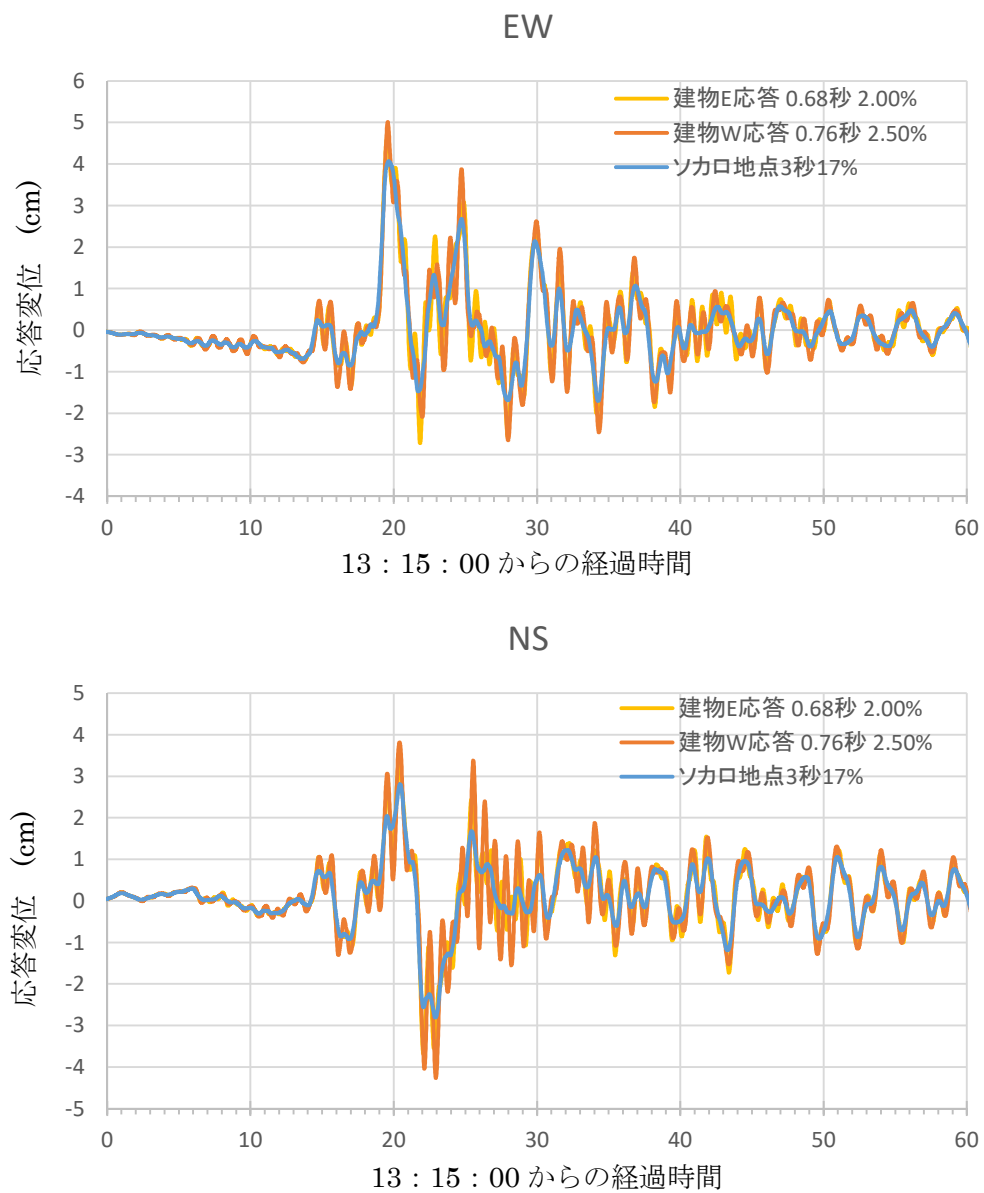


図 8 セントラルカセードラルの東西塔と地盤の応答変位波形例

Early Assessment of the Structures Affected by the Earthquake

● Collapsed or major damage ● Requested inspection

MEXICO
Mexico City
EPICENTER

0.4s 1.0s 5.0s
0.7s 2.0s
Predominant Period

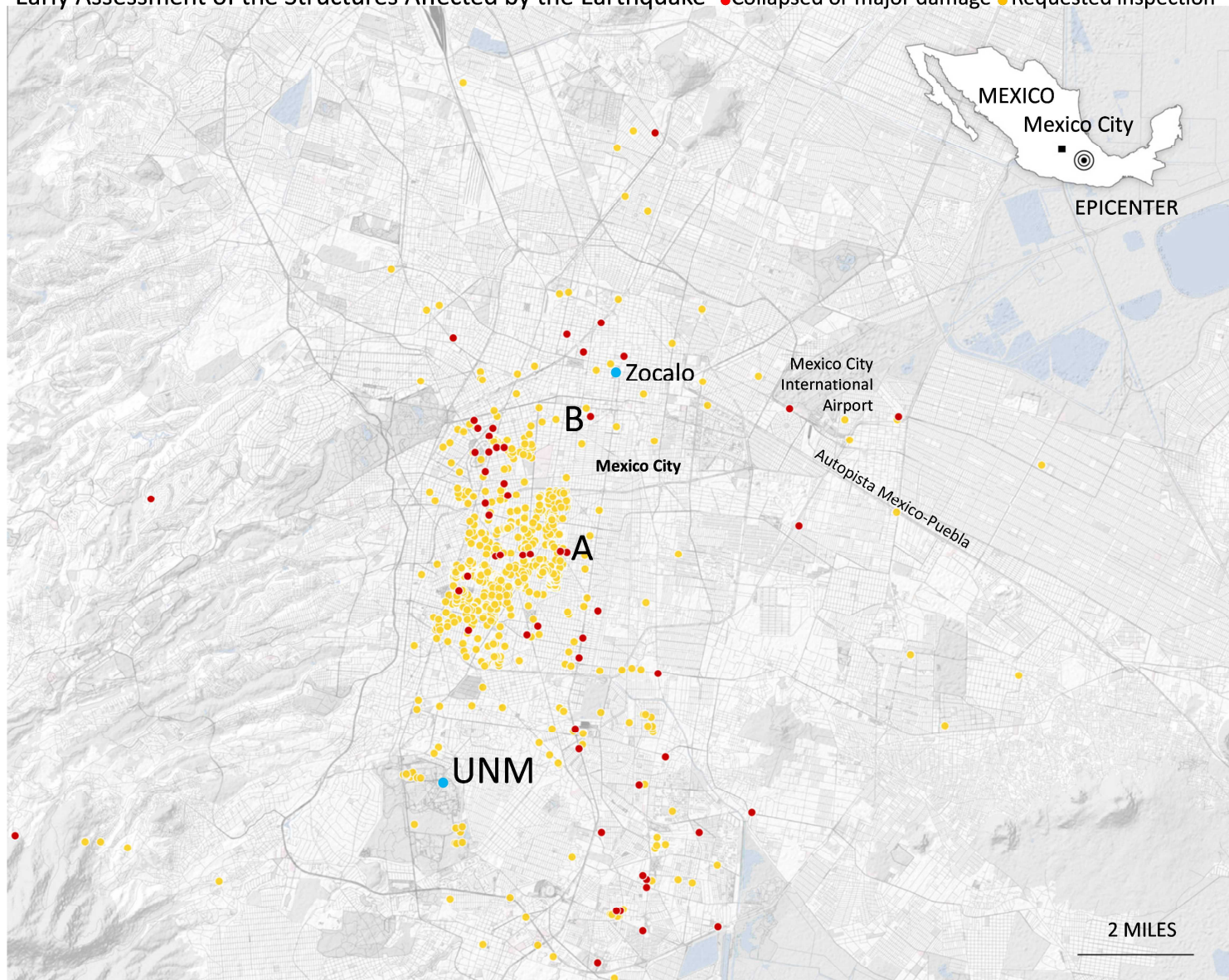
UNM

Google Earth

2 MILES

図 9 堆積層厚と常時微動を用いた固有周期と増幅倍率の推定

Early Assessment of the Structures Affected by the Earthquake ● Collapsed or major damage ● Requested inspection



By The New York Times | Source: Cenapred; Atlas Nacional de Riesgos

図 10 メキシコシティの建物被災状況 (CENAPRED 調べ、New York Times まとめ)