

メキシコ・プエブラ地震 M7.1 (2017 年 9 月 19 日 13 時 14 分 40 秒発生：現地時間)

関連情報

中村 豊 (SDR)

はじめに

メキシコで地震が相次ぎ、甚大な被害が出ていることに対して、被災者の皆様にお見舞い申し上げます。犠牲者のご冥福をお祈りするとともに、一日も早い復興を祈念しています。

さて、表記の地震について、メキシコシティでの強震波形を入手しましたので、簡単な解析を行いました。観測地点はメキシコ国立自治大学 (UNAM) 構内の堅固な地盤で、いわゆる Hill zone に位置しています。観測波形を半分にして堆積地盤での入射波形とみなして、いくつかの地盤特性を想定して地表面応答を算定してみました。さらに応答波形を入射して、地盤と建物が共振した状況もシミュレートしています。今更ながら地盤と建物が共振する怖さを感じました。

リアルタイム震度 (RI) の変動と早期警報

図 1 は観測地点 UNM の記録波形を用いて算定したリアルタイム震度の変動を示したものです。これによると、地震波は 13 時 14 分 58.4 秒に到着し、15 分 00.2 秒に P 波警報、15 分 13.4 秒に S 波到着、15 分 19 秒あたりから警報レベルである震度 4 を超え、15 分 31 秒に最大のリアルタイム震度 4.2 に達した後、多少の増減を繰り返しながら、徐々に収束に向かっていきます。震度 4 程度の地震動がほぼ 10 秒程度継続したことがわかります。また、15 分 4 秒付近でややステップ的に大きくなり、震度 2.7 程度 (震度階 3) に達しています。この辺りで多くの人々は地震に気付いて、退避行動をとりはじめたと推測されます。

セントラルカセードラルのあるソカロ広場を写した防犯カメラの映像によれば、現地の警報サイレンは 15 分 7 秒前後から鳴動し始めており、その前の 15 分 4 秒あたりからキーキーという異音が記録され揺れも確認できます。人々は警報サイレンの後、広場の中心に移動し始めています。つまり、揺れに気付きながらも訝っていた人々の退避行動を警報サイレンが後押しているようにもみえますが、警報サイレンには関係なく揺れが大きくなったので退避行動をとったとも考えられます。いずれにしても、警報は人々が気付く前に出するか、遅くとも同時に出されなければ、あまり意味はありません。遅いという点では、日本の気象庁の緊急地震速報も名ばかりで、被害が出るような震央近くでは大きく揺れた後にしか警報できません。こうした事実があまり周知されていないのは問題だと思います。

この地震は、メキシコシティから 120km 以上離れた内陸部で 13 時 14 分 40 秒頃に発生したとされており、震源の深さ 57km を考慮しても、観測ネットワークの情報が適切に処

理されていれば、13 時 14 分 50 秒頃にはメキシコシティに対して警報できるはずだと思います。UNM 観測点でのオンサイト P 波警報は前述のように、13 時 15 分 00.2 秒に発信されると推測されますが、現在弊社で試験中の新しい警報システムによると、13 時 14 分 58.5 秒には発信できると期待されます。こうしたメキシコ地震の例に鑑みても、ネットワーク警報のみに頼るのではなく、多くの人が集まる施設などには、独自に早期警報できることが確かなオンサイト警報を備えるのがよいと思います。

昨日（10 月 4 日）、メキシコの警報機関 CIRES（ほぼ民間）の 9 月 28 日付レポートを入手しました。それによると、メキシコシティには 13 時 15 分 04.2 秒に SASMEX センターから公衆警報が出されたということです。公衆警報から S 波到着までに 11 秒の時間があつたが、警報時点でメキシコシティは 20Gal の揺れであつたことも述べています。そして、現在試験中の新しいアルゴリズムによる警報であれば、13 時 14 分 53 秒に警報できたとしています。先の防犯カメラ映像の時間と考え合わせると、防犯カメラの時計はほぼ正しく、警報発信から警報サイレン鳴動まで 3 から 4 秒の時間を要するものと推測されます。

振動数スペクトル解析

図 2 は UNM 地点の S 波部分を含む 40.96 秒間の記録波形を周波数分析したもので、フーリエスペクトルを示しています。これによると、概ね 0.6Hz（1.6 秒）の成分が卓越しています。S 波到着以後のコーダ部分の 40.96 秒間の分析結果などを併せて考えると、時間の経過とともに 2.5 秒近くまで地震動の周期がシフトしていることが窺えます。この 2 秒前後の振動に共振する地盤や建物に対して影響が大きい地震動であつたものと推測されます。

積分による速度波形と変位波形

図 3 は、加速度波形を積分した速度波形、さらに積分した変位波形を示したものです。また図 4 には水平面内での変位軌跡を示します。これによると、UNM 地点ではほぼ直交する二つの方向への変位が認められ、最終的な永久変位はほぼゼロとなっています。UNM 地点は 120km 以上離れた地点なので、永久変位ゼロは妥当な結果です。

算定された速度の最大値は 10cm/s 程度であり、観測点付近の波動伝播速度を 600m/s としても、観測点の地盤にはかなり小さなせん断歪しか生じなかったと想像されます。これが軟弱地盤に入射され、30cm/s 程度に増幅されたとして、堆積層の S 波速度を 100m/s 程度と考えると、地盤は多少非線形化したと推測されます。一方、これが建物で 100cm/s に増幅されたとすると、メキシコシティの建物中を伝播する平均的な波動伝播速度は 100m/s 程度（日本などでは約 200m/s）と考えられますので、1/100 程度ないしこれを大きく上回る層間変形角に達したものも少なくないと推測されます。これはメキシコシティで多くの建物が倒壊した事実と矛盾しません。かろうじて倒壊せずにすんだ建物も少なくないと想像されますが、早急に何らかの対応策が必要であることは言うまでもありません。

堆積地盤表面と建物の応答例

UNM 地点の観測記録を半分の振幅にして、堆積層への入射波形とみなして地表面応答波形を算定したものを、さらに建物への入力として、いくつかの建物の応答波形を算定しました。**図 5** は、算定された応答波形群に基づいてリアルタイム震度を計算し、その時刻歴変化を示したものです。堆積層の振動特性としては、固有周期 2 秒、減衰定数 10% を仮定し、入射効率や反射効率は 100% を仮定しました。また、建物としては、減衰定数は 5% とし、固有周期 0.52 秒、1 秒、2 秒、3.秒の 4 種類を想定しています。

図 5 をみると、堅固な地盤で RI4.2 (5HzPGA 51Gal) であった地震動が固有周期 2 秒、減衰定数 10% の堆積地盤で RI4.4 (同 68Gal) に増幅されています。さらに、建物では、共振周期が 2 秒でないものは、RI4.8-5.0 (同 100-130Gal) と地盤表面の概ね 2 倍に増幅され、震度 4 以上の継続時間は 30-40 秒とかなり長くなっています。共振周期 2 秒になると、RI5.9 (同 255Gal) とさらに 2 倍以上に増幅されていますし、継続時間も震度 5 以上が 40 秒以上、震度 4 以上では 100 秒以上と、極めて長くなっています。ここでは非線形化は考慮されていませんが、実際には途中で損傷や崩壊に至ることになると考えられます。

おわりに

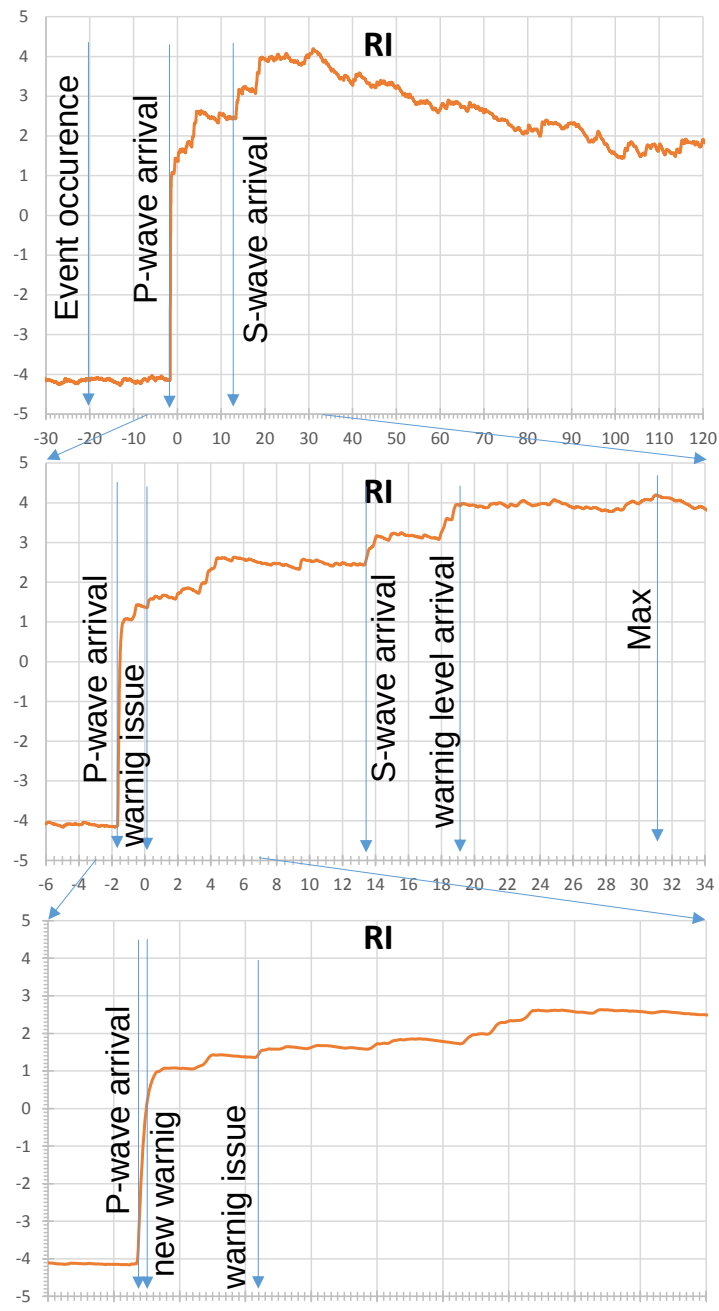
1999 年から 2002 年にかけて実施したメキシコシティでの地盤や建物の調査結果については、すでに弊社 HP 上に公開しておりますが、その後の追加など、改訂版も近日中に公開します。NASA が公開している画像分析に基づく推定被害建物を衛星写真上で赤や黄色にマーキングしている図がありますが。その範囲内に我々が調査した建物は 11 棟あり、そのうち 2 棟が、黄色と赤にマーキングされています (**図 6** 参照)。赤色にマーキングされた建物は中学校の校舎ですが、当時の我々の調査では耐震性が低いとは思われませんでした。そのほかの結果も併せて考えると、今回公表された NASA の画像解析に基づく建物被害推定はあまり信頼性が高くないのかもしれませんが。**図 7** は CENAPRED (国立防災センター) の調査結果を New York Times がまとめた被災建物の分布図です。いずれにしても写真など現地の情報を基にした正確な建物被害状況が判明するのを待つしかないのはもどかしい限りです。被害者の早期救出、早期復興、などに資する情報把握を的確かつ迅速に行うにはどうしたらいいのか、取り組むべき多くの課題があらためて浮き彫りになりました。

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

Realtime Seismic Intensity RI



Lapse time in seconds from 19 Sep. 2017, 13:15:00 (local time)

図 1 UNM 地点のリアルタイム震度変動状況と警報ほかのタイミング

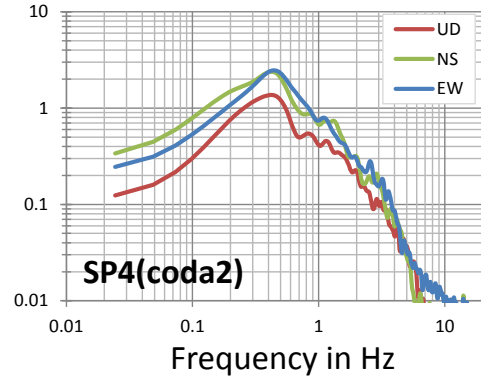
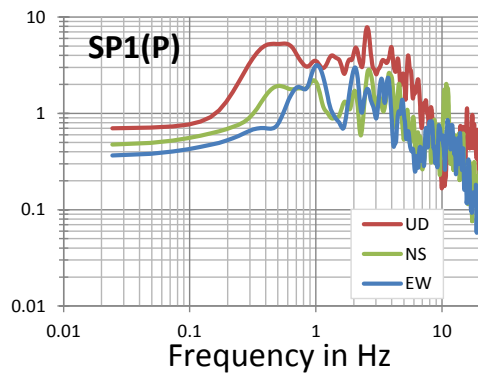
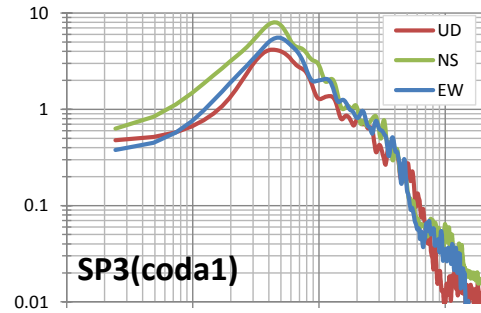
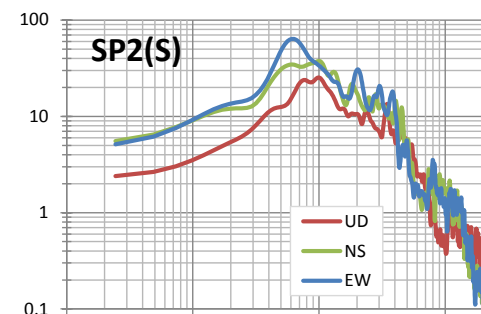
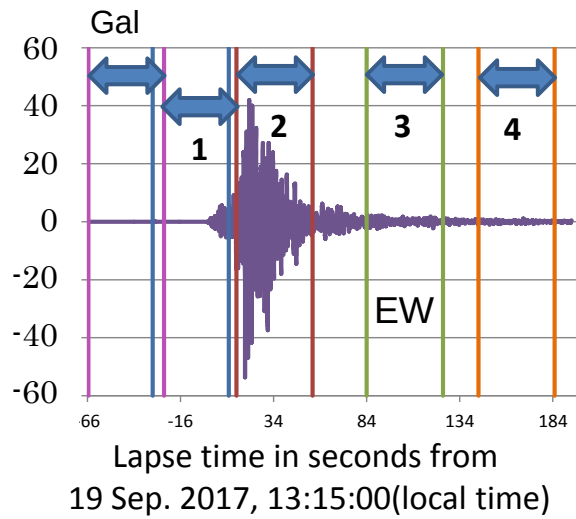
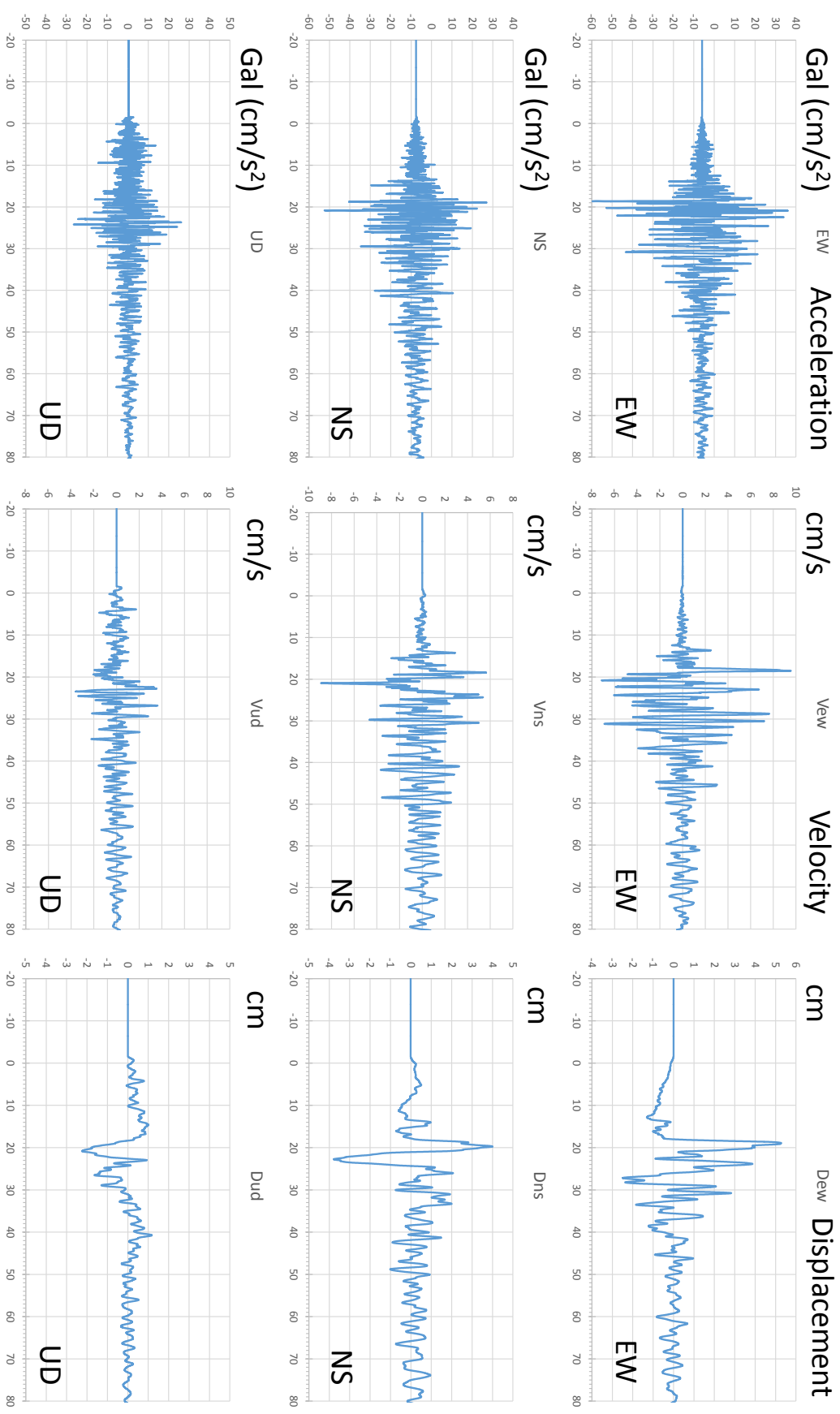


図 2 フーリエスペクトル図



Lapse time in seconds from 19 Sep. 2017, 13:15:00 (local time)

図 3 UNM 地点の加速度記録波形と積分による速度波形および変位波形

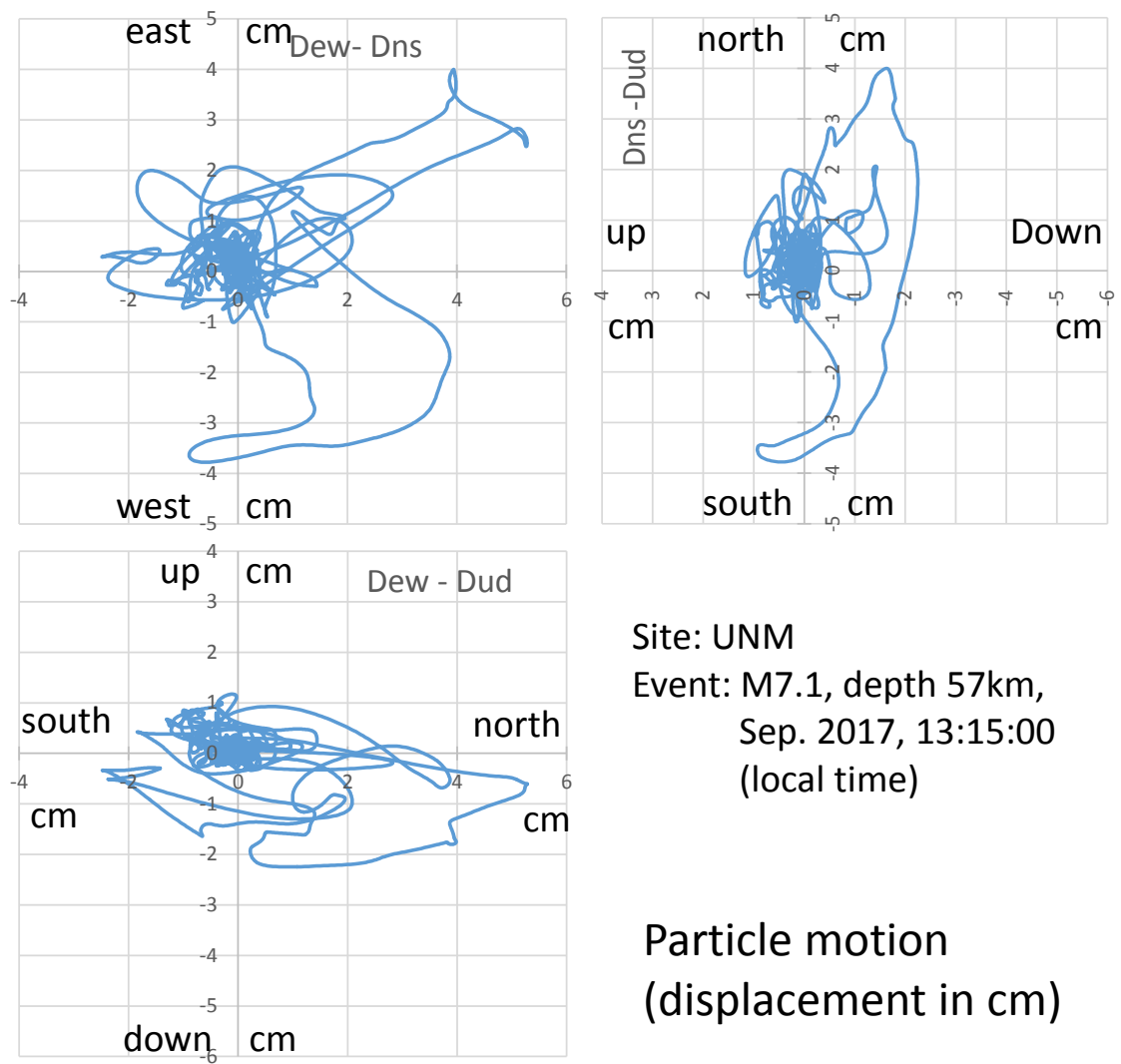


図 4 UNM 地点の粒子変位軌跡

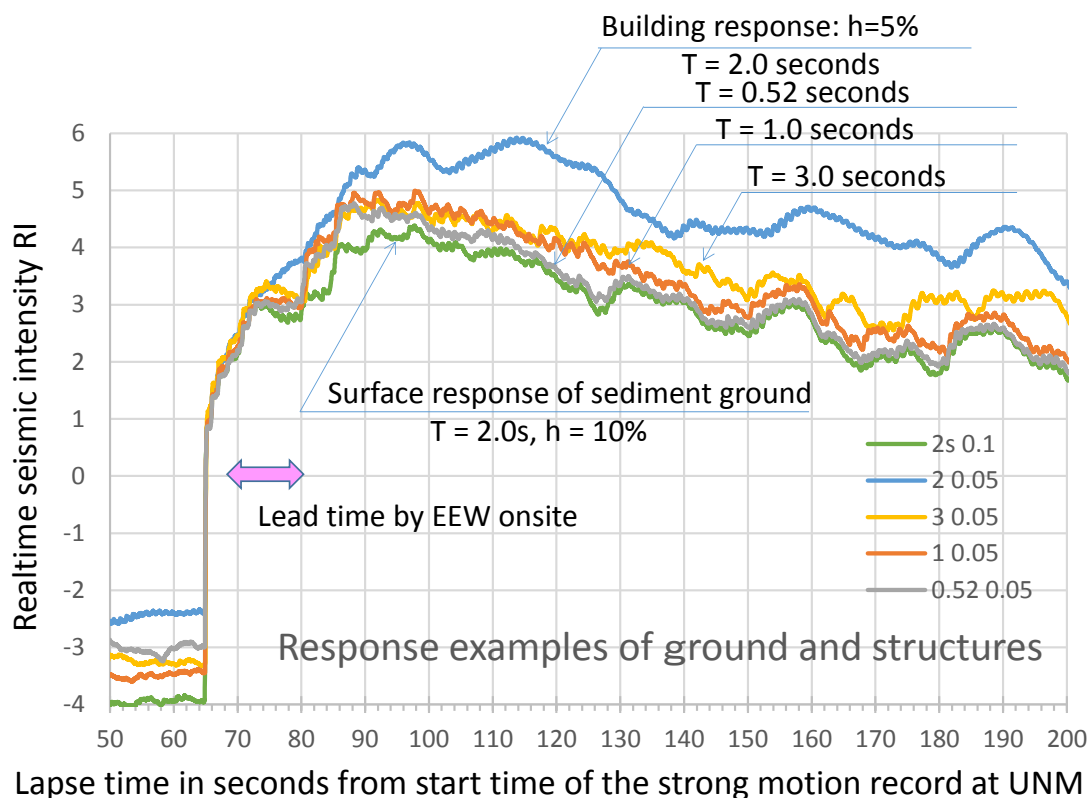
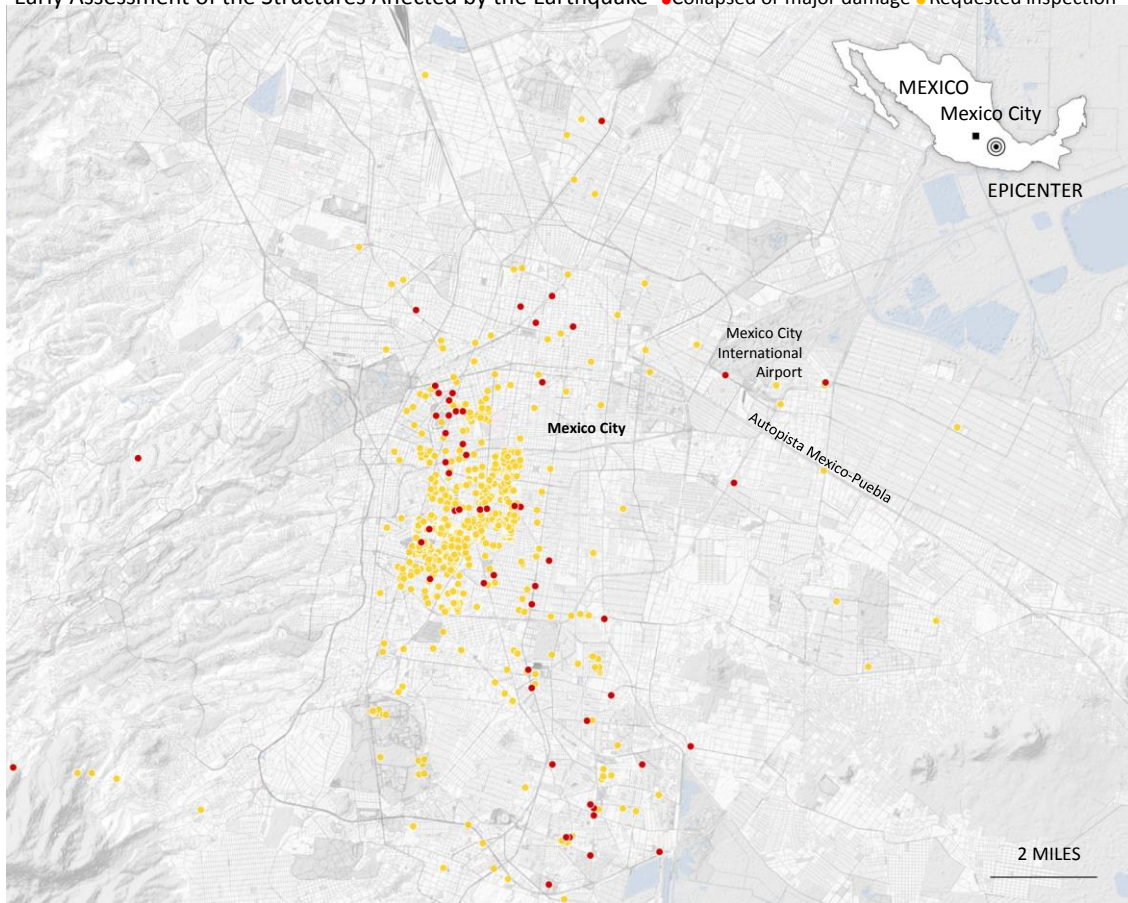


図 5 堆積地盤表面と建物の応答例： リアルタイム震度変動比較



図 6 NASA ジェット推進研究所の画像解析による推定被害建物と微動調査建物(○印)

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 7 メキシコシティの被災建物の分布

ニューヨークタイムズがまとめた CENAPRED の調査結果

● 倒壊または重大被害 ● 要検査建物