

本震ならびに余震を含んだ 時系列地震動群の予測手法の開発

坂井公俊¹・室野剛隆²

¹正会員 工修 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード9.0という我が国史上最大規模の地震であった。この地震では3~4個の震源域が連動したと言われているが、このような巨大地震の発生はこれまで想定されていなかった。今回の地震を受け、南海トラフの巨大地震である東海・東南海・南海地震についても震源エリアが見直され、マグニチュード9.0程度の地震発生の可能性が指摘される¹⁾など、今後も東北地方太平洋沖地震と同規模の地震発生の可能性が危惧される。このような大規模地震に対する鉄道構造物の地震安全性を評価する場合には、まずその地域で想定される本震の地震動を高精度に評価する必要がある。

また本震発生後には、それよりも小さいか同程度の余震が発生する。そのため大規模地震が発生した場合には、余震における地震動も鉄道構造物にとって無視できない大きさとなることが予想される。さらに、本震において構造物に損傷が発生した場合、その後の余震において損傷が進展する可能性も考えられる。そのため大規模地震に対する構造物の安全性評価を行う際には、これらの余震群も評価の対象として含んでいることが望ましい。

余震の評価手法構築の試みとしては、Gutenberg-Richterの式²⁾と改良大森公式³⁾を組み合わせる手法等が提案されているものの、実際の構造物への余震を含んだ入力地震動の確定論的な設定手法に関する検討はほとんど例がない。これは余震発生が地震毎に大きくばらついており、事前予測が難しいことも一つの理由として考えられる。図-1には近年発生した比較的規模の大きな鳥取県西部地震と新潟県中越地震

震の本震経過後の余震発生状況を示しているが、2つの本震の規模は概ね同程度であるにもかかわらず、余震の発生状況が大きく異なっていることが確認できる。ただし、構造物の設計を念頭においた場合には、詳細な余震発生モデルが必要なのではなく、ある期間内に平均的にどの程度の規模の余震が何回発生するか、という大局的な値が必要となる。

そこで本研究では、過去の本震、余震データを整理し、統計処理することにより、構造物の性能照査時に考慮すべき余震の発生モデルを構築する。さらに得られた結果を用いて本震、余震の時刻歴波形評価の試算を行うとともに、余震が構造物の損傷に与える影響について基礎的な検討を行う。

2. 余震の評価手法

(1) 地震データの収集、整理手順

本震・余震データの抽出を行う。本震・余震の関連付けは、相互関連度付き震源リスト⁴⁾に基づいて

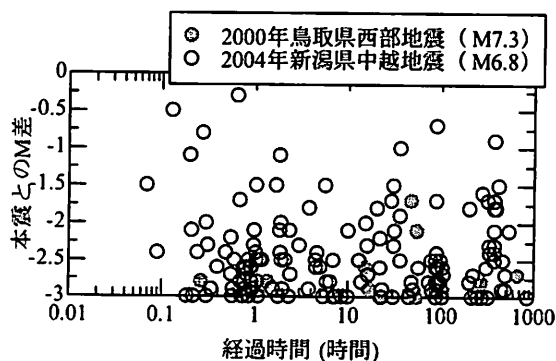


図-1 本震発生後の経過時間と発生した余震規模（本震とのマグニチュードM差）の関係
（2000年鳥取県西部地震と2004年新潟県中越地震）

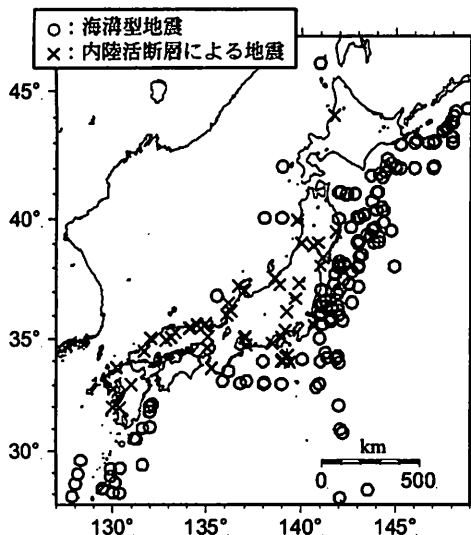


図-2 検討に用いた本震データの震央位置

実施した。ただし本震としてはM6.0以上、余震としては本震とのマグニチュードの差が3.0以内のデータを対象とした。さらに地震調査研究推進本部の地震力カテゴリー⁵⁾のうち、内陸地殻内の地震と海域の地震のみを対象とした。本検討では、前者を内陸活断層による地震、後者を海溝型地震と呼ぶこととする。また、構造物への影響評価を目的としているので、前震－本震－余震型の地震においては、最初に発生した前震を本震として扱い、この地震を上回る規模の地震に対しても余震として扱う。地震データとしては、1923年～2010年9月までの約180万個の記録⁶⁾を使用し、最終的に内陸活断層による地震として50地震、海溝型地震として211地震を本震として抽出した。抽出した本震データの震央位置を図-2に示す。

構造物の性能評価時の余震の表現方法としては、余震の規模と余震発生のタイミングが重要な情報となる。余震規模は、想定すべき地震作用の大きさを設定する際に必要であり、余震発生のタイミングは、地盤－構造物の本震後の復旧状態との関連を考える際に必要となる。例えば本震発生直後に大規模余震が発生する場合、地盤の水圧が消散する以前であれば液状化被害が拡大する恐れがある。また、構造物が本震で損傷を受けた場合において、補修前に大きな余震が発生した場合には、地震作用の繰り返し載荷によって損傷が進行する可能性がある。そこで本検討では、本震発生後の時間経過に伴う、余震の規模、発生個数に主眼をおいて考察を行うこととした。

(2) 余震発生のモデル化

a) 本震の地震規模と最大余震の地震規模の関係

まず最大余震の地震規模が本震の地震規模に対してどのような関係となっているかについて考察する。

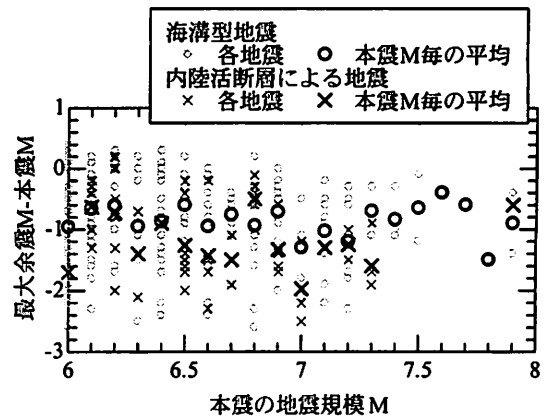


図-3 本震の地震規模と最大余震の地震規模の関係

横軸に本震の地震規模、縦軸に最大余震の本震とのマグニチュードMの差を取り、各地震毎にプロットした結果を図-3に示す。この図には本震規模毎の平均値もプロットしている。

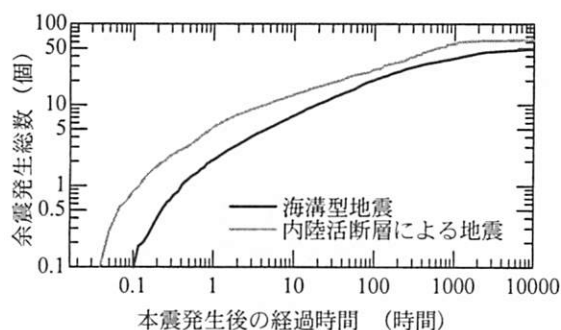
得られた結果を見ると、各地震毎のバラツキは大きいものの、平均値は本震の地震規模によらず概ね一定の値を示しているように見える。具体的には、海溝型地震では最大余震は本震よりもM1.0程度小さく、内陸活断層による地震ではそれと同程度か多少小さな規模となっている。この結果より、最大余震の本震との地震規模の差をパラメータとしてまとめることで、本震の規模に依存せず統一的な指標での議論が可能であると考えられる。

なお東北地方太平洋沖地震の最大余震はM7.6(2012年5月現在)であり本震とのM差は-1.4である。この結果は、図-3におけるバラツキの範囲内におさまっていると言える。

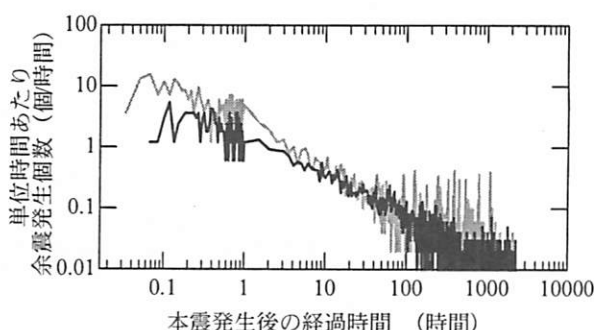
b) 本震発生後の時間経過に伴う余震の発生個数の推移

本震発生後の時間経過に伴う、余震発生個数の期待値の推移を図-4に示す。図-4(a)は余震の発生総数、図-4(b)は単位時間あたりの余震発生個数である。対象とする余震の数は前述したように本震とのマグニチュードの差が3.0以内の余震である。この図より、単位時間あたりの余震発生個数は、時間が経過するに従い減少していくことが分かる。また、最終的な余震発生個数は50個以上となっている。地震区分毎の比較を行うと、本震発生後10時間程度までは内陸活断層による地震の方が余震発生個数が多くなっているが、それ以降は概ね同程度の発生頻度となっている。

図-5は、図-4(a)の結果を本震とのマグニチュード



(a) 余震の発生総数



(b) 単位時間あたりの余震発生個数

図-4 本震発生後の経過時間と余震発生個数の関係 (本震との M 差が 3 以内の余震を対象)

差毎に分類した結果を示したものである。この図を見ると、当然ではあるがマグニチュードの大きな余震ほど発生個数が少ないことが分かる。また、時間経過に伴い余震発生数が減少するという全体的な傾向は図-4(a)と変わらないが、海溝型地震と内陸活断層による地震を比較すると、比較的規模の小さな余震 (M差-1.5以下) は内陸活断層による地震の方が発生個数が多く、M差-1.4以上の大きな余震では海溝型地震の方が多くなっていることが確認できる。

c) 本震発生後の時間経過に伴う最大余震規模の推移

本震発生後の時間経過に伴う最大余震規模の推移を図-6に示す。まず本震発生後100時間程度以内の比較的短期間においては、内陸活断層の地震の方が大きな余震発生の可能性が高い。一方で、本震発生後100時間以降を考えると、海溝型地震の方が大規模余震の発生確率が高くなっている。また最終的な最大余震としては、両地震ともに本震とマグニチュード差1.0程度となっている。さらに勾配に着目すると、本震発生後100時間 (約4日) 以降では勾配が緩やかになっていることから、本震発生後4日程度までに最大余震が発生する可能性が高いことを示唆している。また、その勾配が緩やかになる傾向は内陸活断層による地震の方が顕著である。

d) 本震発生後の余震発生のモデル化

これまでの検討に基づき、本震発生後の時間経過に伴って発生する余震のタイミングとその規模についてモデル化を行う。モデル化の方法としては、図-5から各時間ごと、各規模ごとに、地震発生個数の期待値を算定する。この期待値を離散化することによって、余震発生のタイミングを評価する。ここで、図-5の整理ではある幅を持った形で余震規模の整理

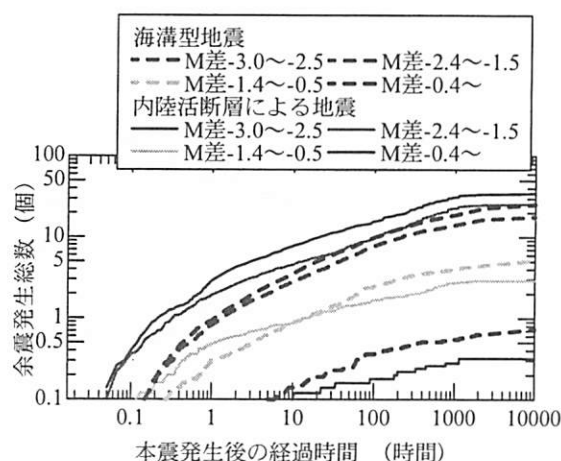


図-5 本震発生後の経過時間と余震の発生総数の関係 (本震との M 差毎に区分)

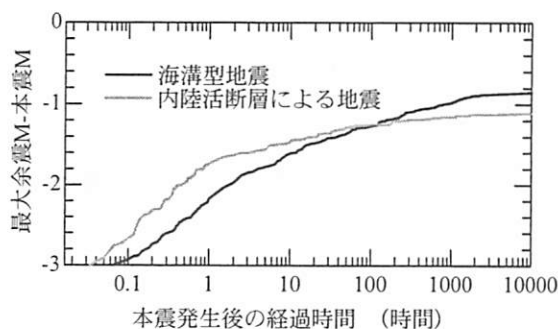
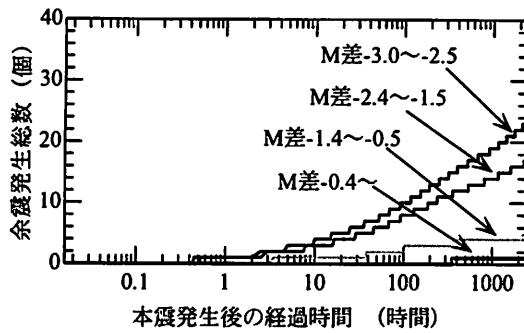


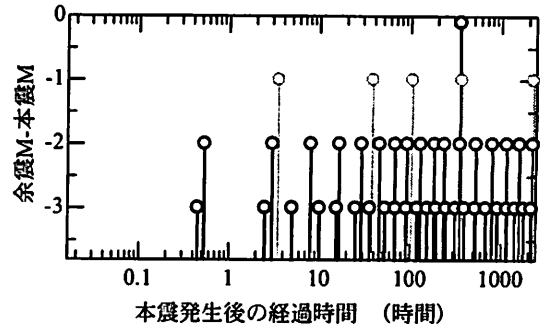
図-6 本震発生後の経過時間と最大余震規模の関係

を行っていたが、最終的な地震動評価時の簡便性に配慮し、各区分内の代表的な規模の余震が発生するとしてモデル化を行った (例えばM差-2.4~-1.5の余震は、モデル化時にM差-2.0の余震として定義する)。最終的に得られた本震後の経過時間-余震規模の関係を図-7 (海溝型地震)、図-8 (内陸活断層による地震) に示す。

この結果は、内陸活断層による地震では規模の小さな余震の発生数が多く、逆に海溝型地震では規模の大きな余震発生数が多くなっていることなどを適

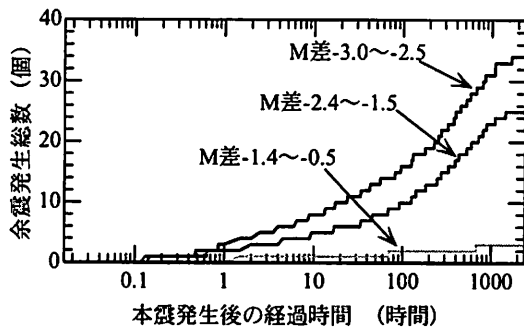


(a) 各規模毎の余震発生総数

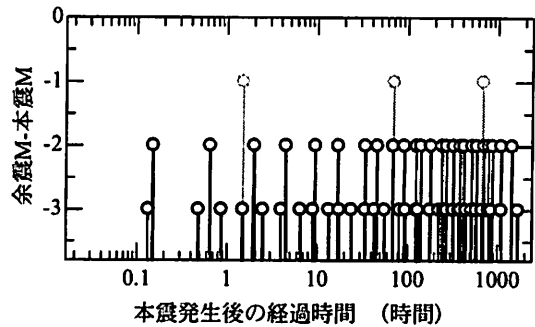


(b) 各規模毎の余震発生のタイミング

図-7 構築した余震発生モデル（海溝型地震）



(a) 各規模毎の余震発生総数



(b) 各規模毎の余震発生のタイミング

図-8 構築した余震発生モデル（内陸活断層による地震）

切に表現できている。また、例えば本震とのマグニチュード差が-1程度の余震は、本震発生後数時間（10時間以内）で1回程度発生し、その後100時間程度までの間に内陸活断層による地震ではもう1回、海溝型地震では2回程度の発生が想定される。このように本モデルで本震後の余震発生のタイミングと規模を大まかに評価することが可能となる。

3. 余震を含んだ地震動波形群の試算

(1) 計算条件

前章でモデル化した余震発生モデルを考慮して、大規模地震の発生を想定した場合の本震、余震の時系列地震動群の試算を行う。今回対象とした本震は、図-9に示すような長さ36km、幅24kmの内陸活断層における地震である。地震規模は $M=7.0$ 、傾斜角45度とした。巨視的震源特性および微視的震源特性については、過去の内陸活断層による地震をもとに提案されている手法^{7), 8)}に基づき設定した。対象とする余震は、本震とのマグニチュード差が2以内の地震とする。つまり、今回想定した本震（ $M=7.0$ ）においては、 $M=5.0, 6.0$ の余震に対して波形合成を実施する。余震の評価を行う期間としては、本震発生から100時間以内とした。これは本震において比較

的大きな損傷を受けた構造物の補修に要する日数が、概ね3~5日程度⁹⁾であると考えられるので、これを参考に設定した値である。以上の条件と図-8より、本震発生後100時間以内の余震発生数としては、 $M=6.0$ の地震が2回、 $M=5.0$ の余震が10回と評価された。そのため、本震・余震併せて計13個の地震に対してそれぞれ時刻歴波形を作成する。

波形合成手法としては、統計的グリーン関数法¹⁰⁾を用いることとした。ただし、振幅のサイト増幅特性としては、全国の地震観測点において評価された地震増幅率¹¹⁾を参考に設定した。また、要素地震の位相特性としては、震源・伝播経路・サイト特性を個別にモデル化して評価した。具体的には、震源特性としては断層の破壊過程に従ったインパルス列の重ね合わせ¹²⁾で表現し、伝播経路特性としては、既往の観測記録の回帰分析に基づき評価された値¹³⁾を用いる。さらにサイト特性は、伝達関数の群遅延時間が最小位相推移関数で表現出来ると仮定¹²⁾し、振幅のサイト特性から評価を行った。また、耐震設計上の基盤面以浅の地盤における地震増幅は無視した。

なお、余震波形の作成方法もこれと同様の手法で実施するが、 $M=5.0$ の余震については震源の広がりは無視して評価を行うこととした。 $M=6.0$ の余震は震源の広がりには考慮するが、破壊開始は中心から同

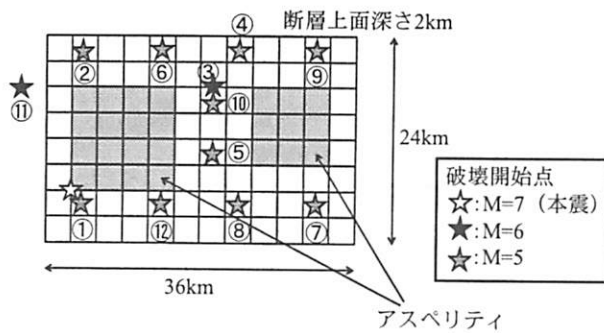


図-9 本震の震源モデル、本震・余震の破壊開始点

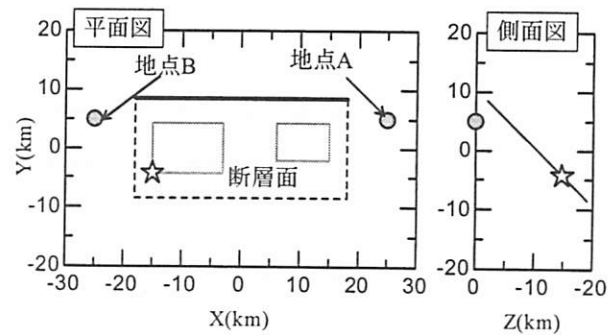
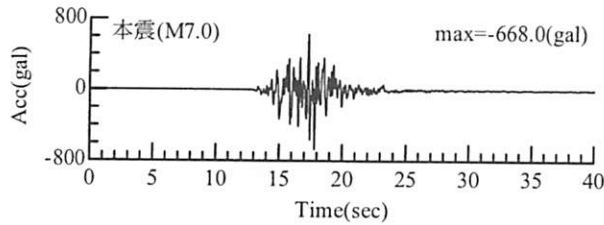
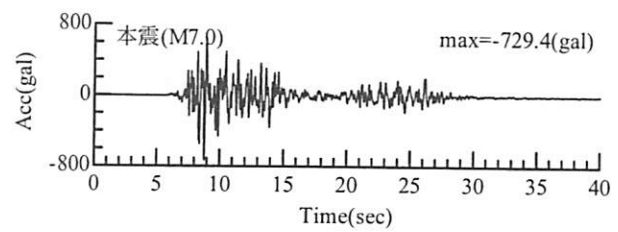


図-10 断層と地震動評価地点の位置関係



(a) 地点 A



(b) 地点 B

図-11 本震の時刻歴波形評価結果

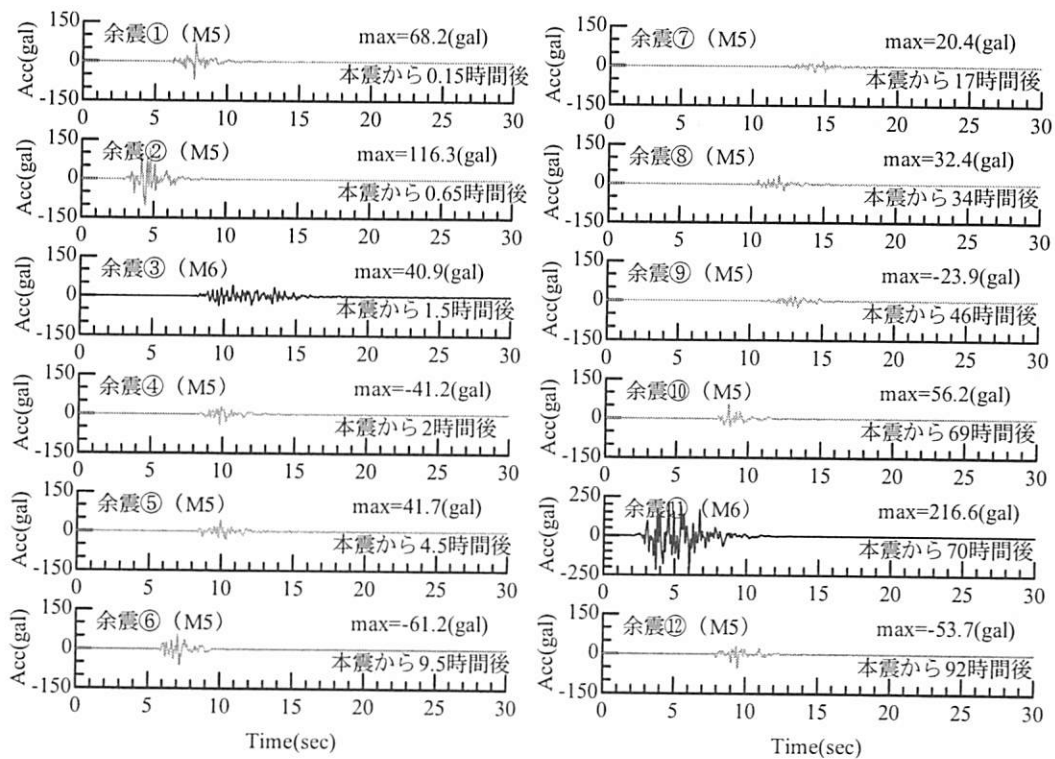


図-12 余震の地震動評価結果 (地点 B)

(本震発生後から 100 時間以内に発生した M5 以上の余震を対象)

心円状に進展するものとした。余震の発生位置は、震源断層近傍ですべりの小さい領域に多く発生するという傾向¹⁴⁾をもとに、図-9に示す位置に設定した。また、余震の発生順序については不確定要素が強いいため、同図に示す番号に従って発生するものと仮定した。時刻歴波形評価地点は図-10の地点A、Bの2箇

所とした。

(2) 本震・余震の地震動波形群評価結果

前節の計算条件に従って、本震の時刻歴波形を算出した。得られた結果を図-11に示す。地点A、Bは断層からの距離は等しいものの、地点Bは震源から

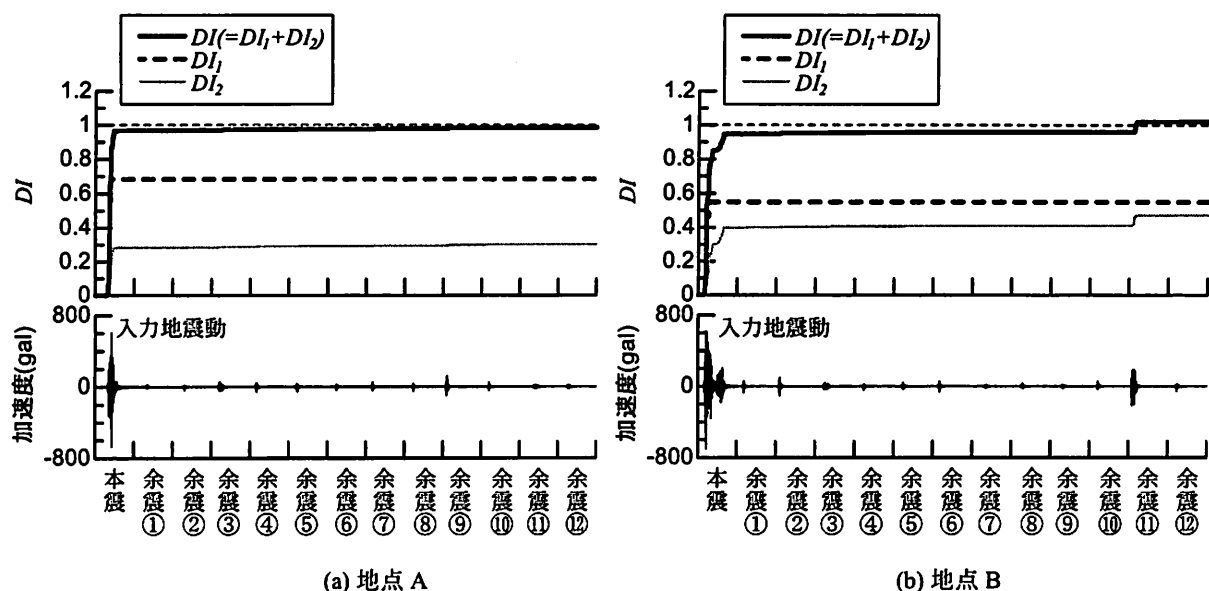


図-13 構造物の損傷度評価結果

破壊が遠ざかる方向に位置している。そのため、地点Bでは地震動の継続時間が長く、かつ2つのアスペリティに対応した波群が明瞭に見られる。一方で地点Aは破壊伝播方向に位置しているため、アスペリティの影響が同時に到達し、地震動の継続時間は短い。

続いて地点Bにおける余震の時刻歴波形評価結果を図-12に示す。これらの結果から、M=5.0の地震は破壊領域が小さいために、継続時間は非常に短くなっている。これに対してM6の地震では、多少継続時間が長くなるとともに、振幅レベルも大きくなっていることが分かる。また余震③と余震⑪では地震規模が等しいにもかかわらず、地震動の大きさは41galと217galとなっており、大きく異なっている。これは、余震の震源位置を図-9にあるように本震の震源断層付近でランダムに設定しているため、対象地点との距離が余震毎に異なる影響である。そのため余震の発生位置を設定する際には、得られる余震波形の使用目的等に応じて適切に評価する必要がある。

(3) 本震・余震の地震動波形群評価結果

前節で評価した本震・余震地震動群が構造物の損傷に与える影響について簡易な考察を行う。構造物の損傷程度は、次式で示されるDI値（Damage Index¹⁵⁾）に基づいて評価することとした。

$$DI = \frac{\delta_{\max}}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

$$= DI_1 + DI_2$$

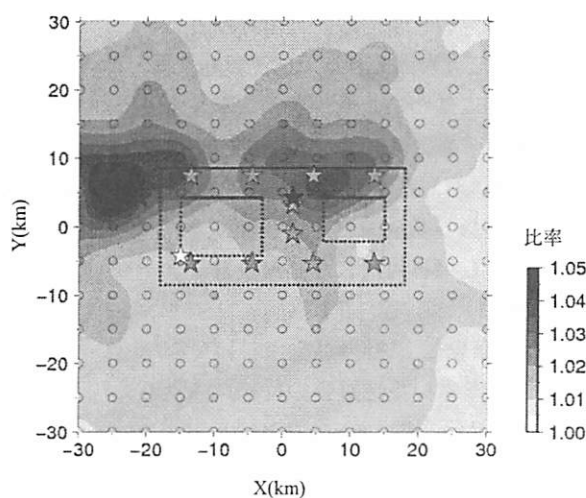
表-1 余震を考慮することによるDI値の変化

(a) 地点 A			
	本震のみ	本震+余震	比率
DI_1	0.68	0.68	1.00
DI_2	0.28	0.30	1.06
DI	0.97	0.99	1.02

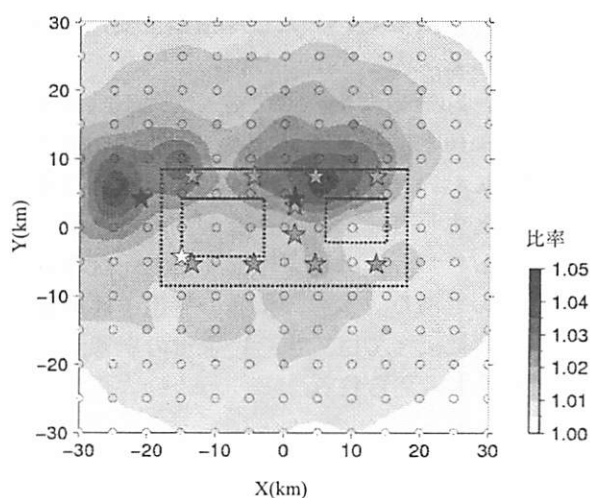
(b) 地点 B			
	本震のみ	本震+余震	比率
DI_1	0.55	0.55	1.00
DI_2	0.40	0.47	1.19
DI	0.95	1.02	1.08

ここで、 $\delta_{\max}$ は地震による最大応答変位、 δ_u は終局変位、 Q_y は降伏荷重、 dE は履歴エネルギーの絶対値の増分、 β は繰返し載荷が構造物の損傷に与える影響度を表す非負の定数、である。このDI値は最大変形による損傷を表す第1項 (DI_1 項) と、繰返しによる損傷を表す第2項 (DI_2 項) の和で構造物の損傷を表したものであり、DI値が1.0になった時を構造物の破壊と定義している。対象とした構造物の条件は、等価固有周期 $T_{eq}=0.5$ 秒、降伏震度 $K_h \gamma=0.3$ 、韌性率 $\mu_u (= \delta_u / \delta_y) = 6$ とし、式(1)の $\beta = 0.15$ ¹⁶⁾ とした。ここで δ_y は構造物の降伏変位である。

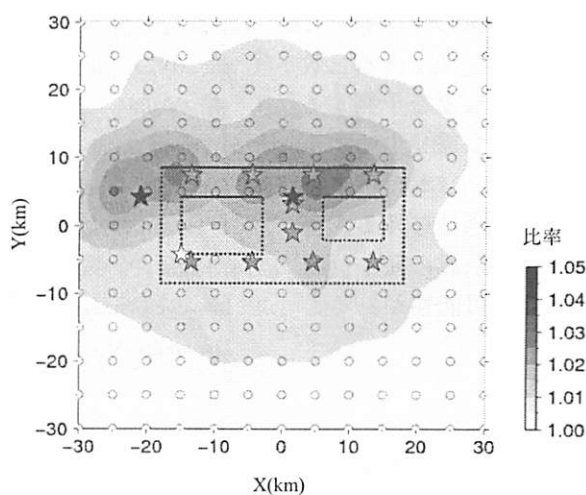
上記の条件に基づいて本震・余震に対する構造物のDI値を算定した結果を図-13に示す。また、本震のみを考慮してDI値を評価した場合と、余震も含んだDI値の比較を表-1に示す。これらの結果を見ると、地点A、Bともに本震において大きな損傷を受けており、 DI_1 項は本震において最大値を示している。つまり、余震において最大変形による損傷は進行して



(a) $Khy=0.3, Teq=0.5\text{sec}$ の場合



(b) $Khy=0.5, Teq=0.5\text{sec}$ の場合



(c) $Khy=0.5, Teq=0.7\text{sec}$ の場合

図-14 余震を考慮することによるDI値の変化

いない。一方で繰り返しによる損傷を表すDI2項は本震後の余震においても徐々に大きな値となっている。特に地点Bにおいては直下で発生した余震⑪においてDI₂項が大きく増加しており、結果的に余震を考慮することでDI値が1.0を上回っている。さらに表-1より、余震を考慮することによってDI値は、地点Aでは2%、地点Bでは8%程度大きくなっていることが分かる。

続いて、対象とする地点を変化させた場合について、同様の検討を実施した。その結果、余震を考慮することによるDI値の変化（余震を含んだDI値/本震のみのDI値）を図-14(a)に面的に示す。さらに、構造物の諸元を変化させた場合の結果を図-14(b) ($Khy=0.5, Teq=0.5$ 秒の場合)、図-14(c) ($Khy=0.5, Teq=0.7$ 秒の場合)に示す。各図において、靱性率等のその他条件は、前述した地点A、Bの条件と同様である。また、乱数セットの違いによる結果のバラ

ツキを低減させるため、地点毎に初期乱数を変化させた10パターンのDI値の比率を評価し、その平均値を表示している。

これらの結果を見ると、対象とする地点と本震、余震の位置関係により、余震の影響が大きく変化していることが分かる。つまり、本震において破壊伝播の影響が少なく、かつM6の余震が近傍で発生する余震⑪周辺では、余震を考慮することによるDI値の変化が最も大きくなっている。さらに、断層上面位置付近では、M5、M6の余震が近傍で発生するために、DIの変化が大きい。

また、構造物条件の変化がDI値の変化に及ぼす影響を見ると、降伏震度が低く、かつ周期の短い構造物の方が余震の影響が大きいことが分かる。これらの条件に当てはまる構造は、今回想定した本震において比較的大きな塑性変形を生じやすい。そのため、余震においても地震動の繰り返しの影響が大きくな

り、結果として損傷が進行したものと考えられる。これより、本震において大きな損傷を受けた構造ほど余震の影響が大きくなるといえる。

一方で、DI値の変化率は大きくても10%程度と極端に大きな値とはなっていない。これは、過去の大規模地震において、余震の発生に伴う大きな被害がそれほど発生していないことと調和的な結果である。しかしながら、今回の結果はあくまで試算結果を示したものであり、本震、余震の発生条件地盤条件、構造物条件によっては、さらに余震の影響が大きくなる可能性も考えられる。

4. まとめ

本検討では、過去の地震データを整理することで、構造物の性能照査時に考慮すべき余震の発生モデルの構築を行った。これにより本震発生後、ある日数以内に想定される余震の規模と回数などを予測することが可能となる。さらに提案した余震発生モデルを用いて、M7の地震を想定した場合の本震・余震の時刻歴波形を作成し、構造物の損傷に与える影響について検討を行った。その結果、余震の発生位置によっては構造物の損傷が進行する可能性があることを確認した。

参考文献

- 1) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会中間とりまとめ、2011。
- 2) Gutenberg, B. and C.F. Richter “Frequency of earthquakes in California,” *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.34, pp.185-188, 1944.
- 3) 宇津徳治：地震のマグニチュードと余震の起こりかた、地震第2輯, Vol.10, No.1, pp.35-45, 1957.
- 4) 干場充之, 清野政明, 岡田正実, 伊藤秀美：相互関連度付き震源リストの制作とその応用, 気象研究所研究報告, 第44巻, pp.83-90, 1993.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：余震の確率評価手法について, 1998.
- 6) 気象庁：地震・火山月報（カタログ編）平成22年9月, 2010.
- 7) 入倉孝次郎：強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法ー, 京都大学防災研究所年報, 47A, 2004.
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）, http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.pdf, 2008.
- 9) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉：ライフサイクルコストを用いた鉄道施設の耐震対策優先度判定法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, 2011.
- 10) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長：地震のスケールング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, pp.1-9, 1991.
- 11) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行：スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号, pp.215-234, 2007.
- 12) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦：震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.201-213, 1999.
- 13) 室野剛隆, 川西智浩, 坂井公俊：位相のインバージョンに基づく地震波形合成法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.12, pp.5-10, 2009.
- 14) 浜田信生, 吉川一光, 西脇誠, 阿部正雄, 草野富二雄：1923年関東地震の余震活動の総合的調査, 地震第2輯, Vol.54, pp.251-265, 2001.
- 15) Young Ji Park and Alfredo H. S. Ang “Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete,” *J. Struct. Eng.*, 111:4, pp.722-739, 1985.
- 16) Fajfar, P. “Equivalent ductility factors taking into account low-cycle fatigue,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.21, No.10 pp.837-848, 1992.