

地震随件事象に関する対策の研究開発動向

室野 剛隆*

Research and Development Trend for Countermeasures against “Events Accompanying Earthquake”

Yoshitaka MURONO

It is well known that the countermeasures against shaking caused by strong ground motion is the most important one against the earthquake, and therefore the Center for Railway Earthquake Engineering Research conducts many research and development including early earthquake warning, seismic reinforcement and earthquake information provision. Recently, however, damages caused by fault induced surface deformation, tsunami and multiple earthquakes including aftershocks have been reported. These phenomena are said to be “events accompanying earthquake”. Since characteristics of many “events accompanying earthquake” are still unknown, the seismic design method has not been established yet, and it is required to minimize the damage by seismic structural planning. Therefore, in this paper, our efforts to minimize seismic damage due to events accompanying earthquake are introduced together with recent achievements.

キーワード：地震随件事象，地表断層変位，余震，残存耐力，再液状化

1. はじめに

近年、いわゆる強震動（揺れ）に起因する被害形態とは異なる被害が顕在化している。例えば、(i) 地表断層変位による被害、(ii) 津波による桁流出や橋脚の倒壊、(iii) 余震を含めた複数地震による被害進展、などが挙げられる。(i) については、岩盤内に生じた断層のズレが、堆積層を突き抜けて地表に現れることがあり（これを、地表断層変位と言う）、これが直接の原因となる構造物の被害も報告されている。1999年台湾集集地震では道路橋やダム、トルコ・コジャエリ地震では鉄道軌道の座屈など有名である。わが国でも、1930年北伊豆地震による丹那トンネルの被害や、直接的な被害はなかったが、2016年熊本地震でも地表断層変位の痕跡が見られた。(ii) については、2011年東北地方太平洋沖地震で甚大な被害が発生したことは記憶に新しい。(iii) については、東北地方太平洋沖地震では本震のモーメントマグニチュードが9であったため、M7クラスの余震が本震発生から1ヵ月の間に5回発生し、電車線柱やRC柱などの被害が拡大した。また2016年熊本地震では、前震・本震という震度7クラスの地震が2回発生し、住宅や建築物の倒壊被害が拡大した。これらの事象は、鉄道構造物設計標準耐震設計（以下、耐震標準）¹⁾ では「地震随件事象」と定義されている。

地震随件事象は、ハザードとしての可能性は認識されているにもかかわらず、被害に関する知見が少なく、現在の技術水準を勘案すると、性能を設定して照査することが難しい。このため、耐震標準では直接調査する対象

* 鉄道地震工学研究センター 研究センター長

としていないものの、耐震構造計画の段階で、その影響を極力小さくするような配慮が求められている¹⁾。

そこで、本論文では、地震随件事象のうち地表断層変位と複数回地震について最新の研究動向について、その概要を報告する。

2. 地表断層変位に対する研究

2.1 地表断層変位量

地震対策を行う上で、地表でどの程度の地表断層変位量が、どの範囲で想定されるのか知りたい。そこで、過去の内陸活断層地震における地表断層変位の大きさを調査したところ、モーメントマグニチュード Mw7.0 程度の場合には平均で 1m 前後、Mw7.5 程度になると 3m を超える場合があることが分かった。

一方、鉄道総研では、食い違い弾性論による地殻変動評価に堆積層を考慮できるよう拡張した評価手法を開発した。本手法を用いると、過去の記録と概ね調和的な傾向が得られることが分かった。また、地震規模は同一でも、断層深さが浅いほど最大の変位量が大きくなる一方で、影響範囲は狭くなることが分かった。本手法を2016年4月14日に発生した熊本地震前震に適用した結果を図1に示す。得られた地表断層変位の分布は、GPSによって得られた傾向を適切に表現しており、提案手法による地表断層変位評価の有効性を確認した。ただし、現在の解析技術では、性能照査に必要とされる精度で地表断層変位量等を予測するのは困難である。そこで、断層の位置とズレの方向（これはある程度特定できる）を最大限活用して地震対策を行うのがよい。

特集：地震対策技術

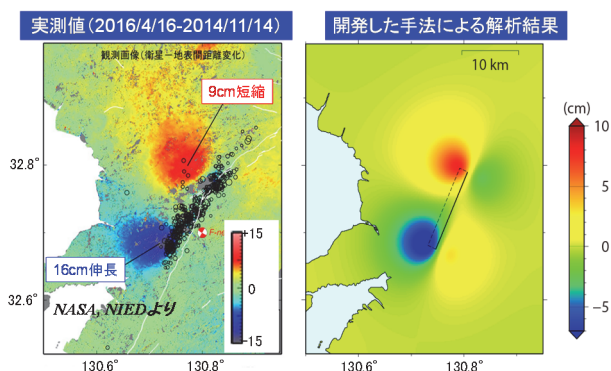


図1 鉛直地表断層変位の算定結果（熊本地震前震）

2.2 縦ずれ断層を対象にした構造物の挙動と対応

縦ずれ断層に対するラーメン高架橋の挙動を検討した。ここでは、従来構造として、地中梁なしの4径間ラーメン高架橋（従来構造①）、地中梁有の4径間ラーメン高架橋（従来構造②）、そして、鉄道総研が提案する単径間ラーメン高架橋を解析対象とした²⁾。

例として、図2に従来構造①と単径間ラーメン高架橋の全体変形図、図3に上層梁の曲げモーメントを示す。断層変位はラーメン高架橋の端部に作用（図2の矢印部分）させた。従来構造ではねじれる挙動を示し、梁に大きな力が作用していることが図2から分かる。この傾向は、地中梁が無いラーメン高架橋ほど顕著（不利）になる。一方、提案構造では、剛体的に変形するため、梁にも大きな力は作用しないことが分かる。

このように、ラーメン高架橋の場合、地中梁の存在の

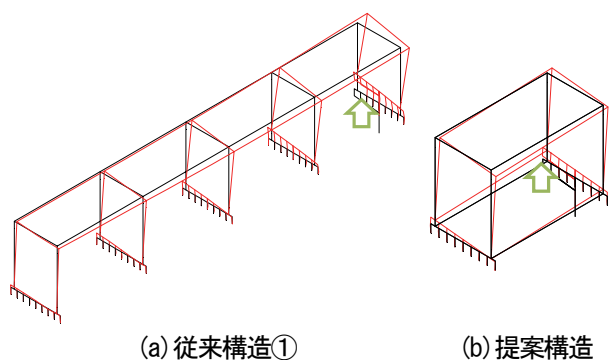


図2 地表断層変位を受ける構造の変形モード

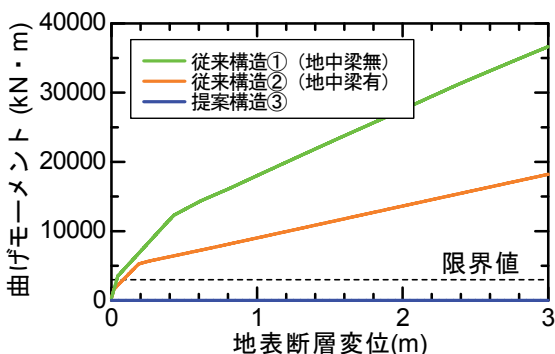


図3 上層梁の曲げモーメント

影響が大きく、地中梁がないと小さな断層変位でも上層梁に大きなダメージを受けてしまうため、地中梁を設置することが望ましい。また、落橋リスクをなくすという観点からは、桁の無い張り出し式が有効である。また、複数スパンを有するラーメン高架橋よりも、単径間ラーメン高架橋が圧倒的に有利であることが分かった。これらのことから、縦ずれ断層においてラーメン高架橋を採用する場合には、単径間の張り出し式高架橋が最も有利な構造形式であると言える。ただし、これは断層変位に特化した選択であり、維持管理の観点や強震動に対する性能としてはこの限りではない。

2.3 横ずれ断層を対象にした対応

横ずれ断層の場合には、上記に加えて、断層との交差角度により、構造物の挙動が大きく異なることが、実験および数値解析により分かった³⁾。耐震構造計画ではその点に配慮を行うことが重要である。

図4に示すように、交差角度が90度以下の場合には、活断層の横ずれにより、断層を境として橋軸方向に離れる変形が生じる。この場合には、断層を跨ぐ桁は他の隣接する桁には接触することがなく、変形は断層を跨ぐスパンのみに集中する。断層のずれに対する対策が必要な範囲は、断層を跨ぐ数スパン程度を考えればよい。交差角度が90度よりも大きい場合には、断層を境として橋軸方向に圧縮される変形が生じる。この場合には、断層を跨ぐ桁が隣接する桁に接触するために、断層を跨ぐ構造物の挙動が次々に隣接橋梁に伝播し、被害が多スパンに波及する。よって、断層のずれによる構造物への影響が広い範囲に及ぶので、断層のずれに対する対策が必要な範囲は広くなる。線形計画の段階でなるべく交差角度を90°以内とすること、さらに、構造計画の段階で角度と対策範囲を絞り込むことでリスクを大幅に低減できる。

3. 余震

巨大地震を考えた場合には、本震に対して被害を免れたとしても、その後の余震により被害が拡大する可能性

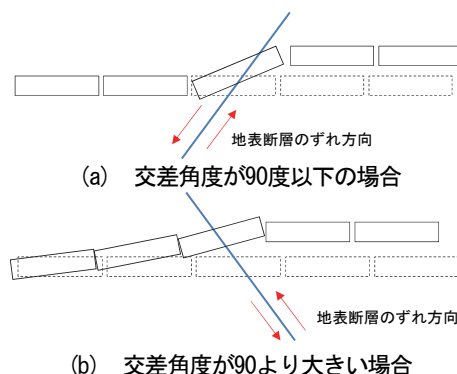


図4 断層の横ずれにより想定される被害モード

が十分にあり、巨大地震に対する鉄道施設の地震対策を進める上では、このことを念頭に置いておく必要がある。そこで、鉄道総研では、余震の発生モデルや地盤・構造物の挙動評価の観点から検討を進めている。

3.1 余震の発生モデル

構造物の耐震設計においては、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。既往の地震データを用いて、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規模について統計的にモデル化を行った⁴⁾。その結果、海溝型地震では最大余震は本震よりもマグニチュードが1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ることが分かった。

次に、時間ごと、規模ごとに、地震発生個数の期待値を算定した。例として、内陸活断層の本震後の経過時間—余震規模の関係を図5に示す。この結果より、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（4日程度）までの間に内陸活断層による地震ではもう1回の余震発生が想定される。この余震発生間隔のモデルを用いることで、本震・余震の時系列地震動群を模擬することが可能である。図6に一例を示す。なお、個々の地震動のシミュレーションには統計的グリーン関数法を適用した。

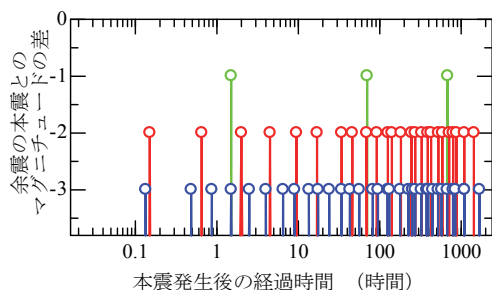


図5 余震発生モデル（内陸活断層）

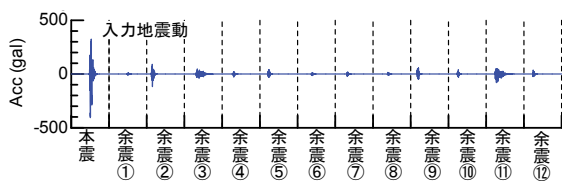


図6 本震～余震の地震動群の評価事例

3.2 余震に対する残存耐力

余震に対する構造物の残存耐力を評価する。図5のうち、本震と最大余震を対象とする。残存耐力を評価する指標として、耐震性能残存率 R を提案する。これは、式(1)のように「健全な構造物が本震1波で終局に至る時の本震の加速度 PGA_1 」と「本震で損傷を受けた構造物が、その後の2波目の余震で終局に至る時の余震の加速度 PGA_2 」の比として定義されるものである。

$$R = \frac{PGA_1}{PGA_2} \quad (1)$$

R が1以下の場合、本震で受けた損傷により、余震に対する限界加速度が小さくなっていることを示す。

ある地震波に対して、様々な周期を有する構造物の耐震性能残存率 R を計算し、『性能残存率スペクトル』を作成した。兵庫県南部地震（神戸海洋気象台波）に対する例を図7に示す。同図は、本震に対する応答塑性率 μ 毎に示している。なお構造物条件は、M点（最大耐力点）塑性率 $\mu_M=4$ 、N点（終局点）塑性率 $\mu_N=6$ とした。本震でM点に至っていない場合は、 $R \approx 1.0$ であり、余震により損傷が進行する可能性がほとんどないことを表わしている。しかし、本震によりM点を超えた損傷 ($\mu > 4$) を受けた場合には、余震により損傷が進行する可能性が高いことが分かった。なお、等価固有周期が1秒以上の構造物で残存率が大きくなることがあるが、これは本震による損傷で構造物が長周期化し、余震に対して鈍感（免震効果）になったためである。

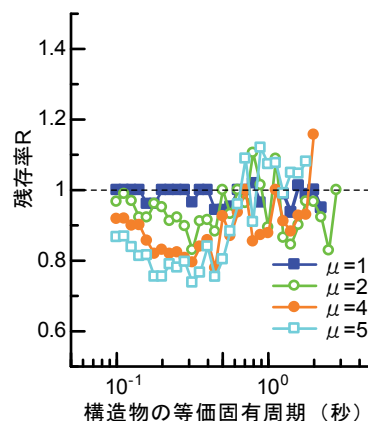


図7 耐震性能残存率スペクトル
(図中の μ は本震による応答塑性率)

3.3 余震に対する安全性評価

耐震性能残存率 R は本震前後の「限界加速度」の比を示したものであり、 R が小さいと本震によりダメージを受けて残存性能が小さくなったことは分かるが、最大余震に対して安全かどうかの確認はできない。そこで、高架橋等の構造物の耐震設計や耐震診断への方法を新た

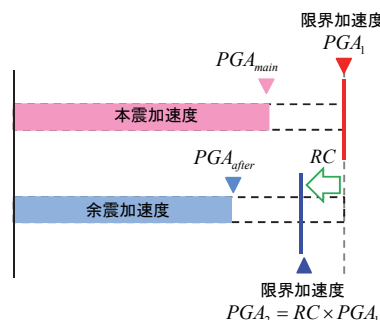


図8 余震に対する安全性の確認

特集：地震対策技術

に提案する。それを概念的に示したのが図8である。限界加速度が PGA_1 の構造物に最大加速度が PGA_{main} の本震が作用した場合、耐震性能残存率 R だったとすると、余震に対する限界加速度は $PGA_2 = R \times PGA_1$ となる。余震の加速度が $PGA_{after} < PGA_2$ ならば余震に対しても十分安全であることを示し、 $PGA_{after} \geq PGA_2$ の場合には余震により安全性を損なうことを意味している。

4. 余震による地盤の再液状化

余震による影響は構造物の損傷の進展以外に、液状化にも大きな影響を与え得る。2011年東北地方太平洋沖地震では、浦安市入船中学校の防犯カメラの映像によると、本震時に液状化に伴う噴水・噴砂が発生し、さらに本震の約30分後に発生した余震において再び液状化が生じることで（再液状化）、噴水・噴砂の範囲が拡大する様子も確認された。

鉄道総研では、上記のような問題に対して検討を行うために、地盤はひずみ空間多重せん断モデル⁵⁾を用いてモデル化し、運動方程式および水流の収支バランス式として **u-p formulation**⁶⁾を採用することで間隙水の透水性を考慮した手法を開発した⁷⁾。

本手法を用いて、実際に液状化が生じた浦安市高洲地区の地盤情報を参考に地盤モデルを構築し、その地盤に東北地方太平洋沖地震の際の浦安地区での推定基盤波を入力した解析を行った。最大加速度が約100gal程度の小さな値であるが、継続時間が数百秒と長いのが特徴である。本震の約30分後に発生した余震の最大加速度は約45galで、本震よりもさらに小さい。

解析により得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を図9に示す。いずれの深度においても本震時に過剰間隙水圧が上昇し、特にG.L.-6.4mでは水圧比がほぼ1.0となり顕著な液状化の発生が示唆される。本震後は間隙水が地表面に向かい次第に排水されるため、時間の経過とともに過剰間隙水圧比が減少する傾向にあることがわかる。しかし、余震の発生までに水圧は完全には消散せず、余震時に水圧比が再び大きく上昇し、再液状化の傾向を示している。この結果は、冒頭に述べた入船中学校の実事例とも定性的に合致するものである。

ここで、本震を考慮せずに“余震のみ”を作用させた場合の結果を図9に併せて示すが、余震の最大加速度が約45galと非常に小さいために過剰間隙水圧比の上昇はほとんど見られない。以上より、本震を経ずに余震のみが作用した場合には液状化が発生しないのに対し、本震後において0.5程度の過剰間隙水圧比が残っている状態で余震が作用した場合には、再液状化が発生する可能性が高くなることが確認された。

仮に同じせん断応力が作用した場合でも本震前よりも

大きな塑性せん断仕事が増える。このことが、本震後の余震の際に過剰間隙水圧比が再び大きく上昇する結果につながったものと考えられる。この結果、本震+余震による最終的な沈下量（約0.76m）は、本震のみの場合（約0.55m）よりも、38%大きくなった。

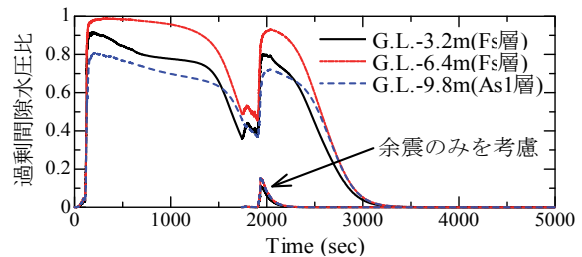


図9 過剰間隙水圧比の時刻歴

5. おわりに

本稿では、地震随件事象として、地表断層変位と複数回地震の影響について、最新の取組み事例も含めて紹介した。耐震標準では、現状の評価精度の水準や技術的制約を考慮して、照査する体系とせず、耐震構造計画で配慮することが明記されている。従来の本震を想定した「揺れ」に対してのみならず、このような随件事象に対して、積極的に配慮をすることが、発生が危惧されている巨大地震に対しては、尚更、重要であると言える。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012
- 2) 日野篤志，室野剛隆：縦ずれ断層の影響を受けにくい新しいラーメン高架橋形式の提案，鉄道総研報告 Vol.31, No.7, 2017
- 3) 室野剛隆，弥勒綾子，紺野克昭：断層交差角度に着目した橋梁の挙動特性に関する基礎的研究，地震工学研究発表会梗概集 Vol. 27, 論文番号 80, 2003
- 4) 坂井公俊，室野剛隆：本震ならびに余震の時系列地震動群の予測手法，鉄道総研報告，Vol.26, No.9, pp.11-16, 2012
- 5) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35(3), pp. 360-392, 2011.
- 6) Zienkiewicz, O. C. and Bettess, P.: Soil and other saturated media under transient, dynamic conditions, Soil Mechanics -Transient and Cyclic Loads, John Wiley&Sons, pp. 1-16, 1982.
- 7) 上田恭平，井澤淳，室野剛隆，井合進：余震の発生が地盤の液状化挙動に及ぼす影響に関する解析的検討，第33回地震工学研究発表会，2013