

地震時における鉄道施設の要点検状態と鉄道の運行停止リスク評価

～京浜急行電鉄におけるケーススタディ～

Consideration about the Check State of Railway Facility in Case of Earthquake
and Risk Assessment of Railway Operation Limit

土木工学専攻 29号 三渡裕太

Yuta MIWATARI

1. 研究の背景と目的

2005年7月23日16時35分頃、千葉県北西部を震源とするマグニチュード6.0の地震が発生し、東京都区内では1992年以来13年ぶりに震度5を観測した。この地震でJRでは計30線区間、約1200本が運休となり、44万人の足に影響が出た¹⁾。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震においても、首都圏にて多くの帰宅困難者が発生したことは記憶に新しい。これらの事例において特に注目が集まった点は、中規模程度の地震であり、人的、物的被害が比較的少なかったにも関わらず、交通機関が機能しなくなり帰宅困難者を出すという事態を発生させてしまったことであり、地震に対する首都圏の交通機関の脆弱性が明らかとなった。このことから、鉄道施設においては、構造物が壊れるか否かのみでなく、電車の遅れや運休につながる構造物の「要点検状態」を「使用限界状態」として考慮する必要があると考えられる。また、鉄道路線における区間ごとの重要度を明らかにし、より効率的な点検、復旧を行うことが望まれる。

また、既往の研究^{2), 3)}では復旧時間が各区間で一律であり、対象構造物の違いについては考慮していない点、対象地震を東京湾北部地震としているために都心部での中小規模の地震を考える上では適切ではない点、対象路線内で利用者数に差があるために、リスクが利用者数の差に大きく左右される点などの課題があった。

そこで、本研究では、橋脚数の調査、復旧時間の設定の変更、対象地震の再設定などの対策を行う。そのうえで、鉄道路線内での地震時の点検作業による期待停止時間を算出する。また、地震が沿線の斜面補強構造に与える損傷についても区間ごとの損傷リスクのランク分けを行い、中小規模の地震に対する鉄道の運行停止リスク評価を行い、その結果から点検作業の効率化の必要性について考察することを目的とする。なお、本研究では、起こりうる事象を地震による高架橋橋脚、および後述の対象路線において斜面補強構造として用いられているグラウンドアンカーの損傷とした。

表-1 区間の設定

区間名	区間	橋脚本数(本)
(1)	泉岳寺駅-京急川崎駅間	1015
(2)	京急川崎駅-横浜駅間	236
(3)	横浜駅-上大岡駅間	436
(4)	上大岡駅-金沢八景駅間	44
(5)	空港線全区間	87

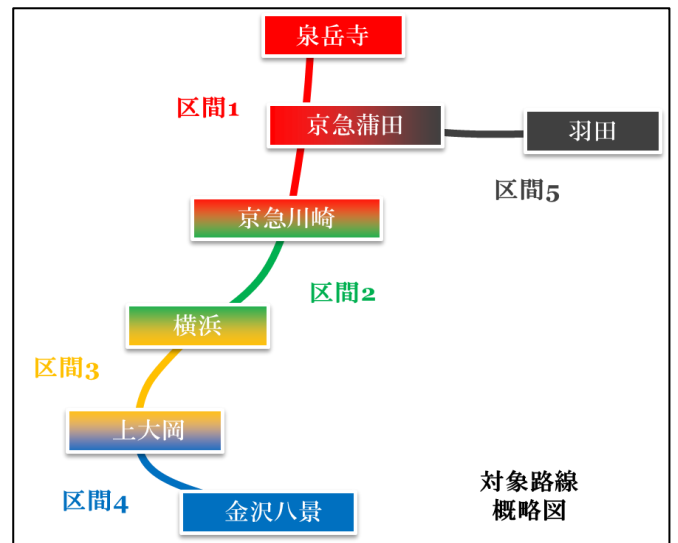


図-1 対象路線の概略

表-2 想定地震図

東海地震	東南海地震	南海地震	立川断層帯
神縄・国府津-松田断層帯	平井断層	鴨川低地断層帯	

2. 対象路線

2.1 対象路線および区間の区切り方

本研究では京浜急行電鉄を対象路線とし、本線の泉岳寺駅-金沢八景駅間と空港線全線を対象区間とする。

本研究では、対象路線内の高架化による構造的な特徴と、沿線斜面、車両基地の所在に加え、本線である区間1から区間4において利用者数の差が少なくなるよう、区間を表-1に示すように区切ることとする。

対象路線の概略図を図-1に示す。

2.2 想定地震の設定

想定する地震は、対象路線の位置する首都圏南部において中小規模の地震が発生する場合を想定し、短い再現期間の間に大規模な揺れを引き起こすものではなく、表-2に示した7つの地震に対して参考文献5)を参考にハザードカーブを作成し、各区間末端の7駅付近での加速度を入力加速度として使用した。

3. 高架橋の橋脚損傷に伴う期待停止時間の算出

3. 1 橋脚モデル・復旧時間の設定

想定する橋脚モデルは、平成 11 年鉄道構造物等設計標準⁴⁾に基づいたものとし、施工年度等のばらつきを考慮するため耐力を正規分布に従う確率変数とした。

次に、橋脚の損傷度ごとの復旧時間の設定を表-3 に示す。本研究は、構造物の破壊に至らない状態においても点検作業によって鉄道が停止してしまう状況を「要点検状態」として想定している。

そこで、損傷度が降伏限界の 60% の場合においては徐行運転を、80% の場合においては徒歩で橋脚の点検を行うこととした⁶⁾。また、損傷度は降伏限界以上となった場合についても、復旧作業に充てる時間として、損傷度ごとに 3 段階の復旧時間を設定している。

なお、復旧時間は表-1 で示した橋脚の本数によって変化するものとした。

表-3 復旧時間の設定

損傷度	対応	復旧時間(分)	
		損傷本数 - 20本以下	損傷本数 - 20本以上
降伏限界60%	徐行による点検	30	
降伏限界80%	徒歩による点検	30+(区間内の橋脚本数)×0.5	
降伏限界	小規模な復旧作業	4320	4320+(損傷本数-20)×20
終局限界90%	中規模な復旧作業	43200	43200+(損傷本数-20)×20
終局限界	大規模な復旧作業	86400	86400+(損傷本数-20)×20

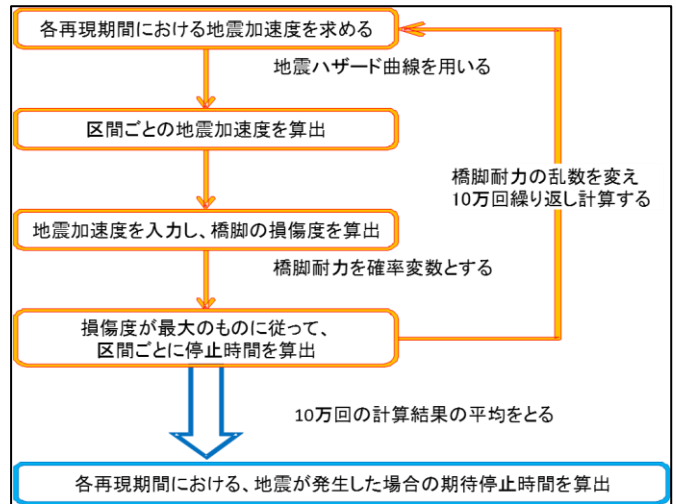


図-2 期待停止時間の計算フロー

3. 2 期待停止時間の算出手順

各再現期間における地震が発生した場合の期待停止時間の計算フローを図-2 に示す。なお、橋脚に与えられる地震加速度は、2. 2 節で述べた駅付近の加速度のうち、橋脚に最も近いものを用いている。

3. 3 期待停止時間の算出結果

(1) 再現期間と各区間の停止時間の変動について

期待停止時間の算出結果を図-3 に示す。この図より、各区間とも再現期間 14 年ほどの短い再現期間であっても期待停止時間が発生していることが分かる。また、区間 2 に関しては期待停止時間の増加が少なく、再現期間 30 年頃においても短い停止時間となる結果が得られた。

(2) 利用者数を考慮した運行停止リスクについて

図-4 は (1) で示した結果に、平成 17 年大都市交通センサスのデータより推計した各区間の利用者数を重みとして乗じた結果を示したものである。それぞれ、朝 7 時および、夕方 5 時に地震が発生した場合を想定している。

今回対象とした各区間のうち、区間 5 以外の 4 区間は利用者数に大きな差は見られないため、リスクの相対的な関係は図-3 で示したものと大きく異なった点は見られない。区間 5 に関しては、朝 7 時では他の区間に比べて利用者数が少なく、夕方の 5 時ではその差が小さくなるが、他の路線同様に時間によるリスクの差は小さい範囲に留まった。

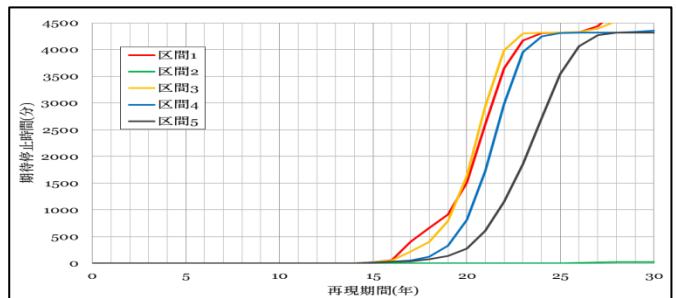


図-3 期待停止時間の算出結果

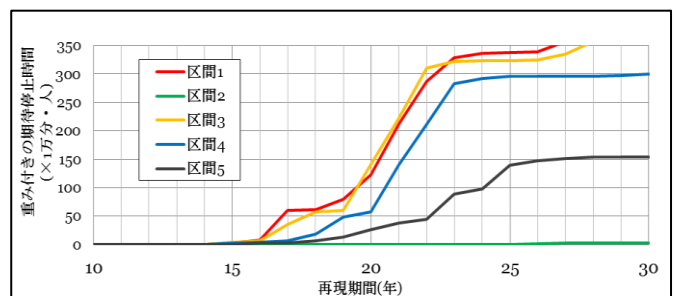
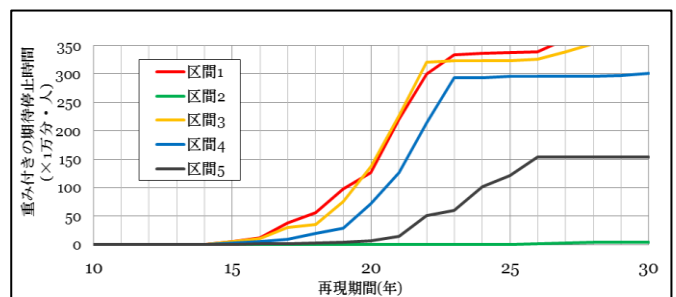


図-4 重み付き期待停止時間の算出結果

(i) 上 : 7 時発生の場合 (ii) 下 : 15 時発生の場合

4. 斜面補強構造の損傷

4. 1 斜面補強構造の損傷

本研究の対象路線沿線の斜面は、本線で対象とした南部の山間部に位置する区間 3、および区間 4 に集中しており、その殆どが傾斜角の大きな斜面で構成されている。そのため、殆どの斜面に対し、図-5（沿線の斜面補強構造の例）に示したようなグラウンドアンカーを用いた補強がなされている。

そこで、本研究では各斜面が未補強状態である場合の斜面安全率を算出し、これを 1.3 とするよう補強がなされているものとしてグラウンドアンカーの許容荷重および破壊荷重を推計した。その後、各地点の地震加速度から、再現期間ごとの地震荷重がグラウンドアンカーに与える損傷度の推計を試みた。

各再現期間における地震が発生した場合の損傷度の計算フローを図-6 に示す。今回は各斜面の詳細な情報が無かったため、滑り面を簡易ビショップ法により仮定し、それらの滑り面に対する斜面安定率を求めた。その後、斜面安定率が 1.3 に満たない場合、その斜面に対し、グラウンドアンカーを用いた補強を行うとし、必要とされるグラウンドアンカーの強度を算出した⁷⁾。

なお、斜面に与えられる地震加速度は、橋脚と同様に 2. 2 節で述べた駅付近の加速度のうち、斜面に最も近いものを用いている。

また、推計に用いる損傷度レベルの設定を表-4 に示す値とした。今回の設定値は、橋脚の損傷度を推計した場合の値に合わせたものとした。しかし、この表に示した損傷度レベルは、高架橋橋脚の損傷とは違い、斜面崩壊に対する損傷ではなく補強構造の損傷に対するものである。

4. 2 損傷度の推計結果

図-7 および図-8 に損傷度の推計結果を示す。

図-7 に示した区間 3 の損傷度に比べ、若干ではあるが、図-8 に示した区間 4 の損傷度が高く再現期間が短いことが分かる。これは、入力した加速度が、区間 4 の方が大きいことに由来すると考えられる。

また、どちらの区間においても、再現期間 10 数年ほどから損傷度が急激に高くなっていることが確認できる。今回の計算は斜面の崩壊ではなく、グラウンドアンカーの損傷を対象としているが、再現期間 15 年程度の地震で全体の半数ほどが許容荷重前後の荷重を受けるといった結果となった。



図-5 沿線の斜面補強構造の例

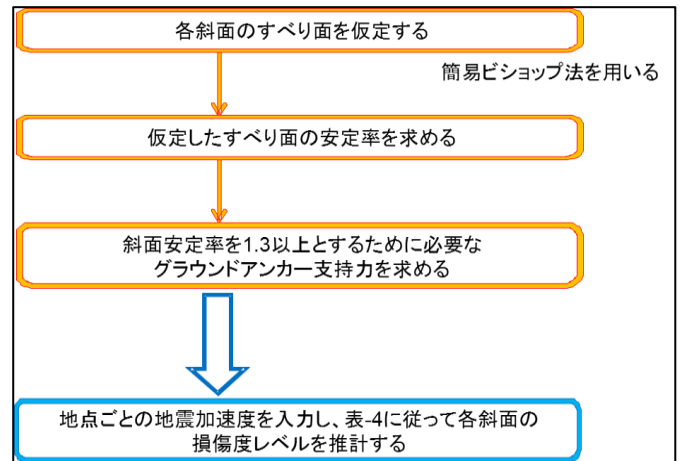


図-6 グラウンドアンカー損傷度の計算フロー

表-4 損傷度レベルの設定

損傷度レベル	耐力と地震荷重との関係
0	地震荷重 < 許容荷重60%
1	許容荷重60% ≤ 地震荷重 < 許容荷重80%
2	許容荷重80% ≤ 地震荷重 < 許容荷重
3	許容荷重 ≤ 地震荷重 < 引張破壊荷重90%
4	引張破壊荷重90% ≤ 地震荷重 < 引張破壊荷重
5	引張破壊荷重 ≤ 地震荷重

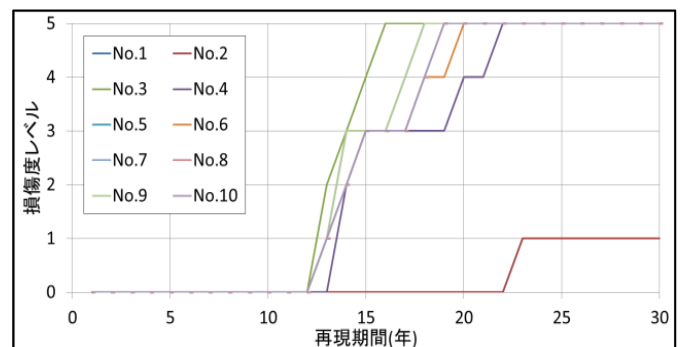


図-7 斜面補強構造の損傷度（区間 3）

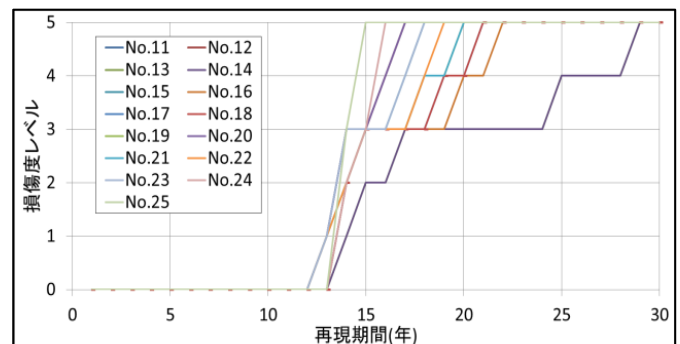


図-8 斜面補強構造の損傷度（区間 4）

5. 考察

5. 1 橋脚の損傷に対する考察

(a) 要点検状態について

3. 3 節で示した結果から、再現期間が 14 年ほどからの範囲においても数時間から 3 日程度の期待停止時間が発生しており、要点検状態による鉄道の運行停止リスクは高いことが分かる。このことから、構造物の破壊を防止する対策をとらずとも、点検作業の効率化などを通して、運行停止リスクを大幅に減少させることが可能であると思われる。また、区間の所在位置の違いにより、区間 2 では他の区間に比べ非常に小さい停止時間に留まっている。このことから、点検作業への対策は、各地点の地震の発生リスクについて考えたうえで行う必要がある。

(b) 利用者数を重みとして考慮した場合について

3. 3 節の結果から、利用者数を重みとした場合の各区間におけるリスクの大小関係は、図-3 で示したものと大きな差が見られなかった。これは区間 5 を除いた各区間の利用者数に大きな差のない区間を対象としたためであると考えられ、既往の研究^{2)、3)}から利用者数に大きな差のある路線ではリスクも利用者数に大きく左右されることは考えられる。

また、朝夕の 2 つの時間で地震が発生した場合のリスクの違いについては、再現期間 15 年前後の地震については多少の差異が見られた。これは、地震の規模が小さく、算出された期待停止時間が数時間と短かったためであり、それ以降の再現期間では、停止時間が 1 日を超えるために発生時間の違いが顕在化しなかったためであると考えられる。また (a) の内容と併せて、利用者数を重みとした場合においても、区間 2 の運行停止リスクは支線であり利用者数の少ない区間 5 に比べても小さいものとなった。これは、利用者数の数のみで耐震、点検の優先度が決まらないということが示せたと考えている。

5. 2 斜面補強構造の損傷に対する考察

本研究の対象路線沿線内において、斜面の存在する区間 3、区間 4 では、どちらの区間においても、再現期間 10 数年ほどから損傷度が急激に高くなっていることが確認できた。この結果は、高架橋橋脚の損傷に比べ、立ち上がりの再現期間はほぼ同じであるのに対し、破壊荷重以上の地震力を受ける再現期間は 5 年から 10 年小さい値となっている。しかしながら、斜面が

崩壊する状況は、今回の研究で設定した損傷度レベル 5 を更に上回る荷重を受けた場合である。したがって、要点検状態としては再現期間 12 年から 20 年程度の地震を受けた場合が点検を行う必要のある状態である。

また、今回は斜面の崩壊ではなく、斜面安全率を高めるためのグラウンドアンカーの耐力をもとに損傷度を推計しているため、今後、橋脚の損傷度との重要度の差についても調べる必要がある。

6. 結論

本研究では、地震発生時に鉄道構造物が壊れるか壊れないかだけでなく、鉄道施設の要点検状態を考慮することを通して、要点検状態のリスクとそれに対する対応の必要性を示すことを試みた。結論を以下に示す。

6. 1 橋脚の損傷について

(a) どの区間においても、15 年に 1 度程度の中小規模の地震によって、停止時間が発生する。

(b) 区間 2 では再現期間 50 年までの範囲では、橋脚の損傷を伴う停止時間は発生しなかった。

(c) 以上の結果から、橋脚の損傷のみでなく、点検による停車への対策も必要であることが確認できた。

6. 2 斜面補強構造の損傷について

(a) 区間 3、区間 4、どちらの区間においても、再現期間 10 数年ほどから損傷度が急激に高くなる。

(b) 想定する損傷状態が橋脚と異なるため、共通の指標を用いて比較する必要がある。

<参考文献>

- 1) 内閣府:千葉県北西部を震源とする地震について (第 6 報)
- 2) 太田浩輔:災害時の施設信頼性と鉄道利用者の時間リスク, 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻設計工学研究室 2005 年度修士論文
- 3) 先家圭吾:鉄道構造物の損傷又は日常リスクによる社会的損失費用の推計, 第 34 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2007
- 4) 鉄道総合技術研究所編:平成 11 年鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計
- 5) 中北英貴:地域ごとの地盤特性の違いが及ぼす加速度と SI 値への影響, 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻設計工学研究室 2011 年度修士論文
- 6) 高浜勉, 翠川三郎, 大堀道広:鉄道事業者の地震時対応の調査に基づいた地震発生後の鉄道輸送能力低下に関する検討, 地域安全学会論文集 NO. 8, 2006. 11
- 7) 斜面安定協会:最新版斜面安定工法設計施行指針 1995 年 7 月