

津波と余震の重畳現象の発生確率の検討

中央大学 学生会員 ○志賀典親, 正会員 佐藤尚次

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の影響で、より多様な地震被害に注目されるようになった。その被害には、津波や液状化現象、原子力発電所事故等の二次災害、もしくは複合災害が挙げられる。その中でも、岡田らは津波の波力と地震力が同時刻に構造物に作用する、津波と地震の重畳現象(以下、重畳現象)の危険性を主張している。¹⁾しかし、重畳現象がどの程度の頻度で発生するかについての研究がなされておらず、どれ程のコストをかけて注意すべき課題であるか明確でない。また、地震断層と対象地域の位置関係によって発生確率が異なることが予想されるため、本研究では本震発生後の条件付確率として重畳現象の発生確率を地域別に検討する。

2. 検討手法

重畳現象は構造物に想定外の力を作用させるため、破壊により被害の拡大が予想される、防波堤や防潮堤、原子力発電所への被害が懸念されている。よって、本研究では防波堤を対象構造物に設定する。

対象構造物は下記に位置する防波堤である。

- (1)釜石湾港
- (2)女川湾口
- (3)相馬港沖
- (4)高知湾三里地区

対象地震には津波を発生させやすい海溝型地震を設定する。(1)~(3)には東北地方太平洋沖地震の再現地震、(4)には南海トラフ巨大地震を想定する。

重畳現象は、津波水位と加速度、どちらもあるしきい値を超えた際に、重畳現象が発生したと定義する。これらは荷重組み合わせの問題として扱う。

3. 余震発生モデル

本震からの経過時間 $T_1 \sim T_2$ [日]において、ある地点の地表面加速度 Y が y を超える余震確率 $P(Y > y|T_1, T_2)$ は、ポアソン過程より以下の式となる。

$$P(Y > y|T_1, T_2) = 1 - \exp\{-[N(Y > y|T_2) - N(Y > y|T_1)]\}$$

$N(Y > y|T)$ は、本震発生 $\sim T$ [日]において Y が y を超える平均余震発生回数で、防災科学技術研究所の資料²⁾を参考に次式で求めることができる。

$$N(Y > y|T) = N(T, M_{min}, M_{max}) \sum_i \sum_j P(Y > y|m_i, r_j) P(r_j) P(m_i|T)$$

$N(T, M_{min}, M_{max})$ は規模 $M_{min} \sim M_{max}$ の平均余震発生回数で、 $P(Y > y|m_i, r_j)$ は規模 m_i 、震源最短距離 r_j の余震発生時において Y が y を超える確率、 $P(r_j)$ は余震と対象箇所の距離が r_j となる確率、 $P(m_i|T)$ は本震発生 $\sim T$ [日]において規模 m_i の余震が発生する確率を表している。以下に詳細を示す。

(1) 平均余震発生回数(非定常)

$T_1 \sim T_2$ における M 以上の平均余震発生回数 n の算出には、大森・宇津公式とGR式を組み合わせた以下のモデル³⁾を用いる。

$$n(T_1, T_2, M) = K \exp\{-b \ln 10 (M - M_{th})\} \frac{(T_2 + c)^{1-p} - (T_1 + c)^{1-p}}{1 - p} \quad (p \neq 1)$$

上式の定数は表-1に示す、東北地方太平洋沖地震について最尤法によって求められた地震調査研究推進本部のデータ³⁾を用いる。南海トラフ巨大地震の地震パラメータについても本データを適用する。ここで、 M_{max} は余震の最大 M を表している。

表-1 東北地方太平洋沖地震のパラメータ

| Mmax | b | Mth | K | c | p |
|------|-------|-----|-------|-------|-------|
| 7.6 | 0.814 | 5.0 | 91.75 | 0.036 | 1.148 |

上式を用いて、規模 $M_{min} \sim M_{max}$ の平均余震発生回数 N は以下通りに求める。

$$N(T, M_{min}, M_{max}) = n(0, T, M_{min}) - n(0, T, M_{max})$$

(2) 設定加速度の超過確率

距離減衰には司ら⁴⁾の最大加速度算出式を用いる。

$$\log_{10} A = b - \log_{10}(X + c) - 0.003X$$

$$b = 0.50M_w + 0.0043D + 0.62$$

$$c = 0.0055 \cdot 10^{0.50M_w}$$

ここで、 A は最大加速度[gal]、 D は震源深さ[km]である。余震の震源深さは、全て本震と同じ24kmとする。また、地表面加速度の地盤増幅率は一律で1.4とする。断層最短距離 X は、 M により断層長 L [km]を算出し、 $1/2L$ [km]を半径とする球を設定し、その球面から対象箇所までの距離とする。⁵⁾

$$\log_{10} L = 0.5M_w - 1.85$$

(3) 余震と対象箇所の距離が r_j となる確率

余震域は、崔ら⁶⁾の拡幅断層面 A_{after} の考え方を採用し、 $M_w = 8.9$ の東北地方太平洋沖地震の断層面を相似的に拡幅し、図-1の通り余震域を設定する。

$$A_{after} = 10^{0.778M_w - 1.60}$$

GR 則が本震直後であっても適用可能であるか、東北地方太平洋沖地震において上記の余震域内での地震記録⁷⁾を用いて確かめたのが図-2である。どの時間帯であっても $M_{min} = 5.9$ 付近までが適用範囲であるため、この場合は $M_{min} = 5.9$ と設定する。

確率計算では、余震域において 5km 間隔で格子状に震源点を設定し、余震はそれらの点から発生するものとする。その際、余震は余震域において一様に発生するとする。

(4) 規模 m_i の余震発生確率

刻み幅 $\Delta m = 0.1$ を設定し、 m_i の余震発生確率は以下の通り算出する。

$$P(m_i|T) = P(m_i - \Delta m/2 \leq M \leq m_i + \Delta m/2 | T) \\ = \frac{N(T, m_i - \Delta m/2, m_i + \Delta m/2)}{N(T, M_{min} - \Delta m/2, M_{max} + \Delta m/2)}$$

(5) 手法の妥当性の検討

(2) と (3) より特定の M の地震が発生した際に加速度 200gal を超える確率を算出したのが図-3である。どちらも K-NET の観測点の座標に設定した。(a), (b) それぞれの震央距離は 143km と 249km である。より震央の近くに位置している石巻市の方が、超過確率が格段に高いことが確認できる。また、これらの場所であれば $M6.0$ まで超過確率は 0 であり、 $M_{min} = 5.9$ と設定しても問題が無いことがわかる。

4. 津波と余震の荷重組み合わせの手法

河合⁸⁾は、東北地方太平洋沖地震による津波の第一波は、岩手中部沖において約 30 分間潮位の上昇をもたらしたことを報告している。これを参考にし、本震からの経過時間 ($t_1 \sim (t_1 + 30min)$) の間に津波が防波堤に作用するとし、 t_1 を 15 分、30 分、45 分と変化させたときの発生確率の変化を確認する。

5. おわりに

今後は、地域別の重畳現象の発生確率を算出し、目標信頼性を用いた評価を行う。

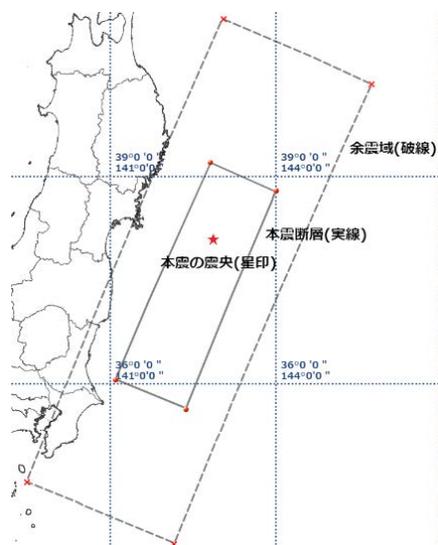


図-1 本震断層と余震域

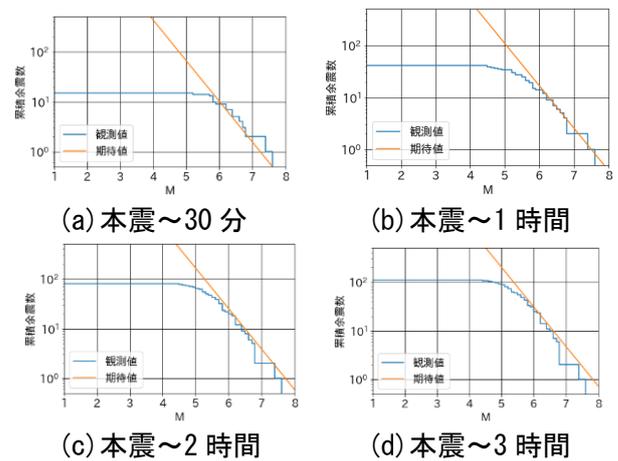
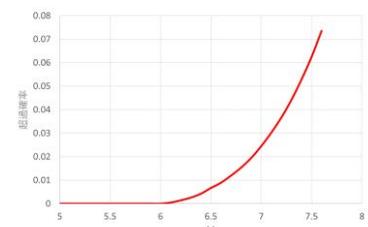
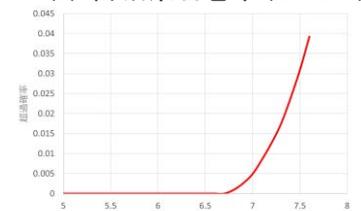


図-2 時間毎の余震期待数



(a) 宮城県石巻市 (MYG010)



(b) 岩手県久慈市 (IWT002)

図-3 地表面加速度 200gal の超過確率

参考文献

- 岡田克寛, 地震と津波の重畳時における防波堤の安定性検討手法の構築, 博士課程学位論文, 2018.
- 防災科学技術研究所研究資料, 全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討, 第 275 号
- 地震調査研究推進本部, 大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方, pp.12-14, 2016.
- 司宏俊, 翠川三郎, 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 1999.
- 気象庁地震火山部, 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術参考資料, 2016.
- 崔炳賢, 地震後復旧活動計画のための確率論的余震発生モデルと余震ハザード評価の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 690 号, 2013.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0003.
- 河合弘康, 佐藤真, 川口浩二, 関克己. GPS 波浪計で捉えた平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67.