

1 はじめに

東北地方太平洋沖地震のような大規模な海溝型地震は海溝型及び内陸直下型の多数の余震や継続時間の長い余震が発生する。地震被害予測は主に計測震度をもとに行われているが、地震動継続時間やそれに伴う繰り返し载荷の影響は計測震度にあまり考慮されていない。さらに、RC部材は载荷回数に応じて徐々に耐力が低下することが報告されている。このような状況では、本震を上回る規模の強い余震や継続時間の長い余震が続けて起こる場合、構造物によっては予測を上回る被害になる可能性がある。そこで、本研究では、本震によって受けた被害(履歴状態)をそのまま保持した状態から余震の地震応答解析を行い、本震である程度の被害を受けた場合に起こる構造物の剛性低下が本震を上回る余震の地震応答にどのような影響を与えるのかを検証する。

2 解析対象構造物

解析対象とする構造物は道路橋として一本柱形式の α 橋、鉄道橋として2層ラーメン橋橋脚の下食満高架橋 R5 である。表 1 に各モデルの概要をまとめる。

表 1 各モデルの概要

モデル名称	橋脚の高さ(m)	固有振動数(Hz)
α	24.5	2.23
R5	11	6.02

3 入力地震波

入力地震波としてそれぞれ地震の種類、周期特性、継続時間の異なる特徴の持つ 8 つの地震に着目し、波形番号 1~8 と設定する。入力地震波の特徴を表 2 に示す。解析には本震と余震で同じ 8 つの地震波を使用し、全 64 ケースの組み合わせで解析を行う。なお、各モデルの被害具合を考慮し、本震の計測震度 5.7、余震の計測震度 6.0 とした。

表 2 入力地震波の特徴

波形番号	地震波	観測地点	地震の種類	周期特性	継続時間
1	十勝沖地震	白糠	海溝型	長	長
2	宮城県沖地震	塩釜工場	海溝型	短	短
3	芸予地震	松山	海溝型	長	短
4	東海地震	浜松	海溝型	短	長
5	宮城県北部地震	古川	内陸直下型	長	長
6	兵庫県南部地震	神戸(E)	内陸直下型	短	短
7	鳥取県西部地震	広瀬	内陸直下型	長	短
8	新潟県中越地震	長岡支所	内陸直下型	短	長

4 解析方法

解析モデルは橋脚部分の材料非線形性を考慮した多数の節点とはり要素からなる平面骨組みモデルで、橋桁とフーチングは剛体とする。解析対象部分として変位については橋脚上端で検証する。また、曲率及び曲げモーメントについては α 橋では橋脚下端で検証し、下食満高架橋 R5 では中層端部で検証する。解析結果から、本震+余震の塑性率、履歴エネルギーと余震のみの塑性率、履歴エネルギーの比較を行う。数値解析にはニューマーク β 法を用い、構造物の減衰に関してはレイリー減衰(減衰定数 0.02)を用いる。履歴エネルギーは部材の履歴応答により算出する。

5 解析結果

解析結果の一例として、 α 橋に本震 1 から本震を上回る余震の地震応答解析を行った場合と余震のみで解析を行った場合の履歴エネルギーの推移を比較したグラフを図 1 に示す。図 1 より本震 1+余震 5 の履歴エネルギーは余震 5 の履歴エネルギーに比べて大きく増加していることが分かる。このケースについて詳しくみるため、履歴曲線を比較したグラフを図 2 に示す。図 2 より本震 1+余震 5 のケースでは余震 5 に比べて最大変位が増加していることが分かるが、これは本震により初期状態から剛性が低下して塑性化が進行しており、同一の水平抵抗力に対する変位が増加するように履歴曲線が大きく描かれ、その変位の増分が約 1.3 倍の塑性率の増加や約 2.1 倍の履歴エネルギーの増加につながる。このことから本震による剛性低下が余震の被害を増大させるといえる。

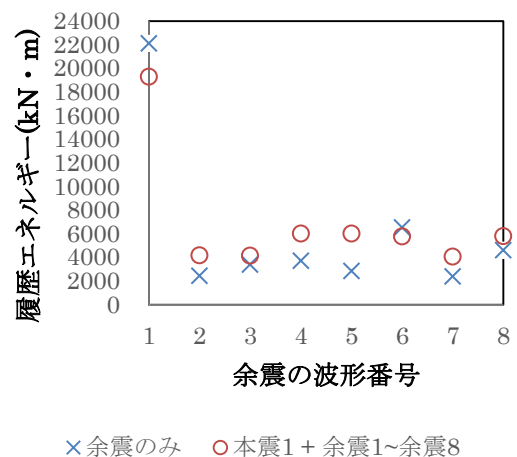


図 1 α 橋 本震 1+余震の履歴エネルギーの推移

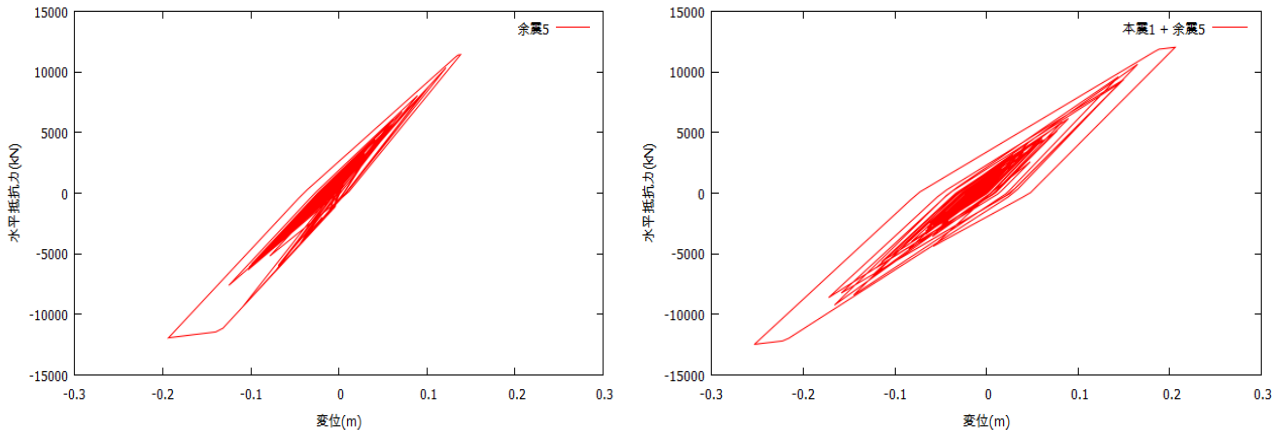


図2 α橋 余震5の履歴曲線(左)と本震1+余震5の履歴曲線(右)

次に、α橋において本震の被害が大きい場合(本震6)と本震の被害が小さい場合(本震4)の本震+余震の塑性率の推移、下食満高架橋 R5 において本震の被害が大きい場合(本震5)と本震の被害が小さい場合(本震3)の本震+余震の塑性率の推移をそれぞれ図3,図4に示す。図3,図4より、本震の被害が大きい場合、本震+余震の塑性率は余震のみの塑性率に比べて大きく変化していることが分かる。特に、余震の塑性率が小さい場合、本震+余震の塑性率は余震のみの塑性率と比較してα橋では約1.1~1.7倍、下食満高架橋 R5 では約1.0倍~2.1倍の範囲で全てのケースで増加している。この傾向は本震+余震の履歴エネルギーの推移についても同様であり、α橋では約1.6~2.4倍、下食満高架橋 R5 では約1.2倍~4.1倍の範囲で増加している。本震の被害が小さい場合、本震+余震の塑性率は余震のみの塑性率に収束していることが分かる。一部収束しない例外として、α橋では余震4,下食満高架橋 R5 では余震1により塑性率が増加する。これは余震1,4の継続時間がそれぞれ40.12秒、24.8秒と比較的長いことが影響しているといえる。これは継続時間が長いとその分載荷回数も増えるため、剛性低下が進むからであると思われる。

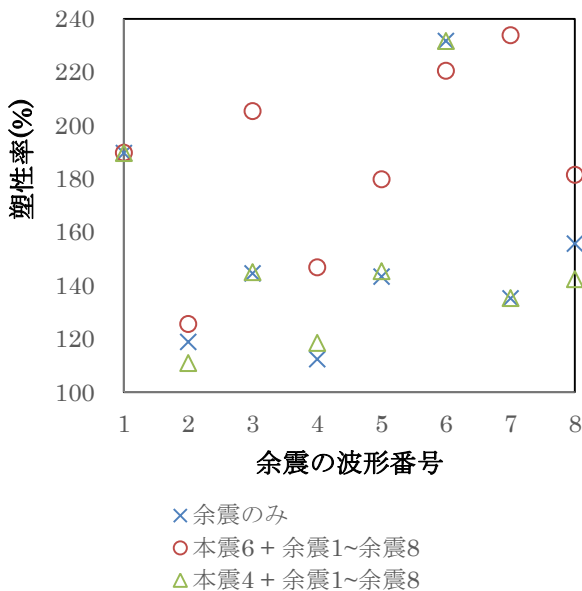


図3 α橋 本震+余震の塑性率推移

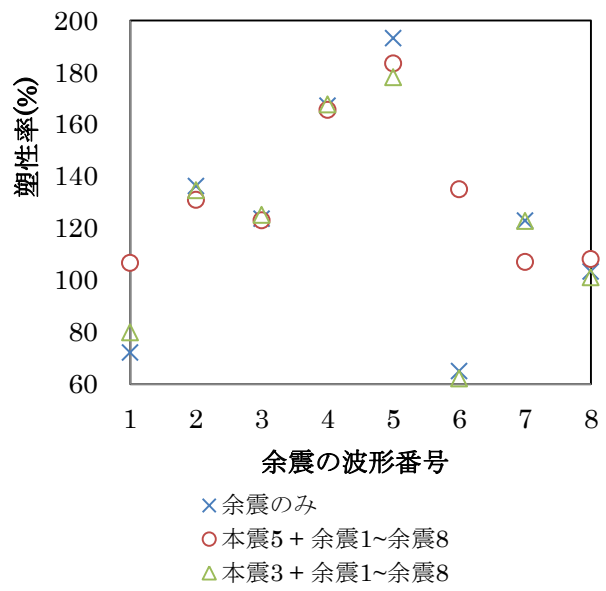


図4 下食満高架橋 R5 本震+余震の履歴エネルギー推移

6 まとめ

本震によって剛性が低下した場合、その後起こる余震の被害が拡大される。本震+余震の場合と余震のみの場合を比較した解析結果から、本震による被害が大きい構造物はそれを上回る余震の発生により、α橋では最大約2.4倍、下食満高架橋 R5 では最大約4.1倍まで被害が拡大された。特に余震による被害が小さい場合は全てのケースで被害の規模が拡大する。つまり、余震だからといって被害を軽く考えるべきではない。そして、たとえ本震の規模が小さい場合であっても、継続時間の長い余震は被害を拡大させる傾向にあるため、余震活動には十分な注意を払うことが必要であるといえる。