

複数の地震動を受ける構造物の残存耐力評価方法に関する研究

西村 隆義¹・室野 剛隆²

¹正会員 工修 (株)ジェイアール総研エンジニアリング
(〒185-0034 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 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震では、仙台においてマグニチュード7クラスの余震が発生し、これによる構造物の損傷も報告されている¹⁾。このように、構造物が巨大地震の影響を受ける場合には、再び大きな地震動を受ける可能性があるため、構造物を設計する際には複数の地震動に対しても安全性を確保することが重要である。しかし現状では最大の地震動のみを考慮した設計体系となっている。そこで本研究では、地震動を受けた後に構造物が保有している残存耐力を評価する指標として耐震性能残存率を導入し、試算により導入した指標が構造物の残存耐力を適切に評価できるかどうかを検証した。また、構造物の残存耐力の評価には、最大耐力点以降の評価が重要となるが、最大耐力点以降は地震動の繰返しの影響が大きいことが分かっている。そこで、試算には著者の一人が提案している繰返しによる耐力低下モデル²⁾を改良して用いており、その改良点に関しても本稿で示した。

2. 耐震性能残存率の考え方

耐震性能残存率 R の考え方を図-1に示す。耐震性能残存率 R は、「健全な構造物が1波で終局に至る時の加速度 (PGA_1)」と「1波目で損傷を受けた構造物が、その後2波目の地震を受けた際に終局に至る時の加速度 (PGA_2)」の比で定義したものであり、以下の式(1)の形で示すことができる。

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

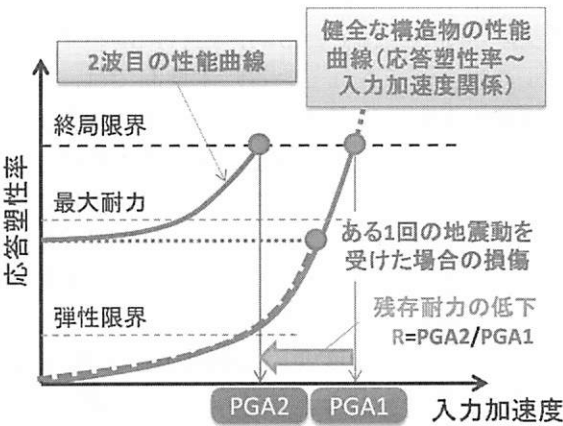


図-1 耐震性能残存率 R の考え方

PGA_1 は、1波の地震動の最大加速度を調整して徐々に大きくしたものを構造物モデルに入力した場合に、1波で構造物が終局限界に達する時の加速度に相当する。

PGA_2 は、図-2に示すようにある最大加速度を有する1波目の地震に引き続いて、2波目の地震動の最大加速度を徐々に大きくして入力した場合に、構造物が終局限界に達する時の加速度に相当する。

耐震性能残存率 R は、 PGA_1 は PGA_2 の比で定義しているが、構造物が1波目の地震を受けた場合に、2

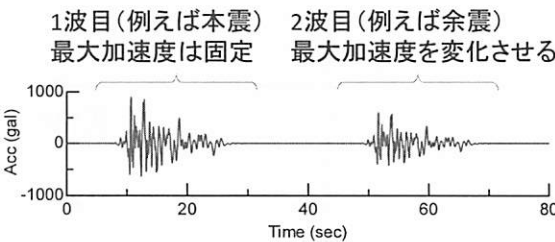


図-2 地震動の入力イメージ

波目の地震に対する構造物の状態を終局状態に対して照査したものである。 R が1以下の場合、1波目で受けた損傷により、2波目に対する限界加速度が小さくなっていることを示している。

3. 解析条件と繰返しによる耐力低下を考慮した履歴モデル

耐震性能残存率 R の試算は、1自由度系の動的解析により実施した。履歴モデルは、繰返しによる耐力低下を考慮したトリリニアモデルを用いた。これを用いたのは、地震動の繰返しが最大耐力点以降の挙動に強く影響を与えるためである。耐震性能残存率の評価が、終局限界の評価に基づくことに加えて複数の地震動を考慮することを勘案すると、繰返しの影響を適切に評価する必要がある。繰返しによる耐力低下モデルを図-3に示す。基本的な考え方は参考文献2)に示されているが、これにはバイリニアモデルの場合が示されている。本検討では、より実際の構造物挙動に近づけるため、骨格曲線をトリリニアモデルに変更した。履歴法則は基本的にバイリニアモデルと同様である。本モデルの特徴は、最大耐力点を超過すると、载荷の指向点が図-2に示す Δd だけ先を目指すことで、同一の変位に着目すると見かけ上の耐力低下を考慮できることである。なお、この耐力低下の度合いは剛性低下係数 χ_1 および χ_2 により与えられる。 χ_1 および χ_2 の違いは、変位の両振幅 ($d_{\max}-d_{\min}$) が最大耐力点に相当する変位の2倍を超過するかで設定されている。本検討では、 χ_1 および χ_2 はそれぞれ0.0、0.2を基本とした。

入力地震動は、耐震標準³⁾に示されるL2地震動のG3地盤用の波形とし、スペクトルⅠ（以下L2spcⅠ）とスペクトルⅡ（以下L2spcⅡ）の2種類を用いた。これらの波形を図-4に、またその加速度応答スペク

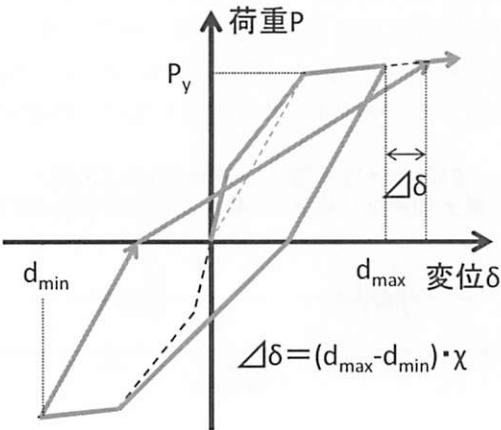


図-3 繰返しによる耐力低下の考え方

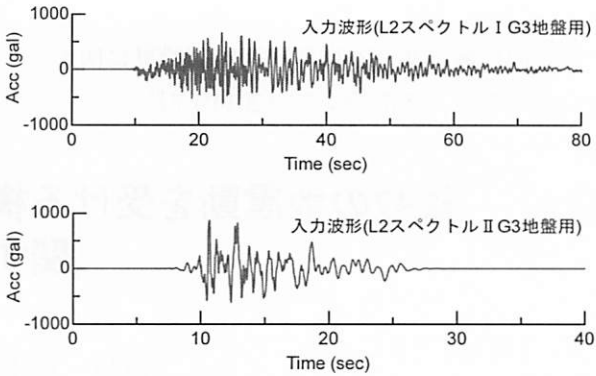


図-4 入力地震動（上:L2spcⅠ，下:L2spcⅡ）

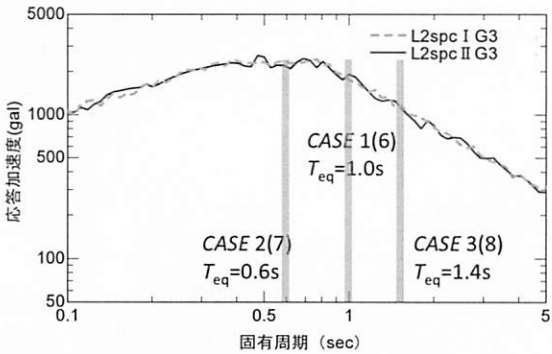


図-5 入力地震動の加速度応答スペクトル

トルを図-5に示す。これらの地震動は、加速度応答スペクトルを見ると同様であるが、継続時間に大きな違いがあり、L2spcⅠは長く、L2spcⅡは短い。したがって繰返し回数もL2spcⅠは多く、L2spcⅡは少ないことになる。なお本研究では、2波目の波形は1波目の波形の振幅のみ調整したものを用いた。

解析ケースを表-1に示す。パラメータとしたのは、固有周期（Y点を通る割線剛性相当）、じん性、剛性低下係数である。

その他の解析条件は、降伏震度0.3、ひび割れが発生する震度は降伏震度の1/3、ひび割れ後の剛性低下率は初期剛性の1/3、降伏後の剛性低下率は初期剛性の1/100、減衰定数は5%とした。

表-1 解析ケース

Case	概要	固有周期 T_{eq} sec	最大耐力 塑性率 μ_M	終局限界 塑性率 μ_N	剛性低下 係数 χ_2	入力 地震動
1	基本ケース	1.0	3	4.5	0.2	L2spcⅠ
2	短周期	0.6	3	4.5	0.2	
3	長周期	1.4	3	4.5	0.2	
4	高じん性	1.0	4	6	0.2	
5	繰返し効果を無視	1.0	3	4.5	0.0	
6	基本ケース	1.0	3	4.5	0.2	L2spcⅡ
7	短周期	0.6	3	4.5	0.2	
8	長周期	1.4	3	4.5	0.2	
9	高じん性	1.0	4	6	0.2	

4. 解析結果

(1) L2スペクトルⅠ入力の結果 (Case1~5)

(a) Case1

図-6にCase1(L2spcⅠ入力, $T_{eq}=1.0s$)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。図には、健全な構造物に対する性能曲線と、例として1波目を受けた後に2波目を受けた場合の性能曲線を3種類(1波目が300gal, 500gal, 700gal)示した。また点線は、最大耐力点と終局限界点の塑性率($\mu=3$ および 4.5)を示している。

健全な構造物に対する性能曲線を見ると、1波で終局限界($\mu=4.5$)を超える加速度 PGA_1 は638galで

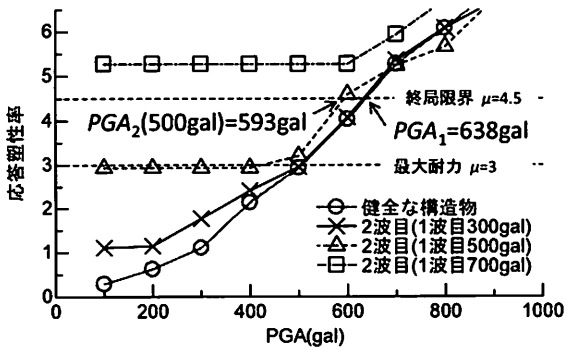


図-6 応答塑性率～入力加速度関係(Case1)

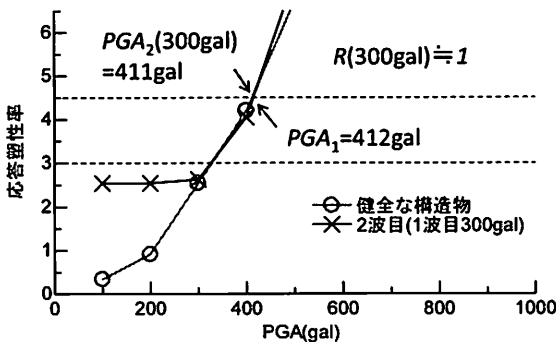


図-7 応答塑性率～入力加速度関係(Case2)

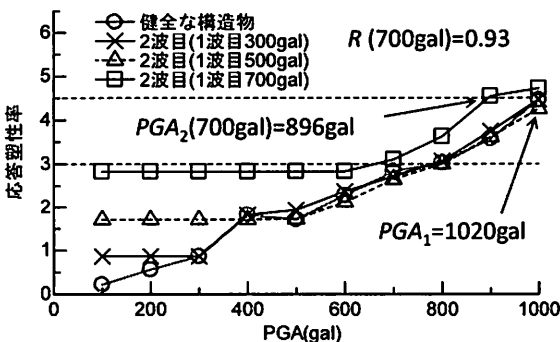


図-8 応答塑性率～入力加速度関係(Case3)

あった。

(i) 1波目が PGA_1 より小さい300galであった場合に着目する。1波目の損傷は、塑性率 $\mu=1$ 程度であることがわかる。この損傷状態から2波目が入力されるが、2波目に対する性能曲線は2波目の入力が入力が200galまでは損傷の程度は変化せず、300galを超えると損傷が増大する。また、入力が500galとなると健全な場合の性能曲線に漸近し、その後は同様の応答特性を示した。終局限界($\mu=4.5$)を超える加速度 PGA_2 は633galであった。この値から耐震性能残存率 R を算定すると $R \approx 1$ となった。

(ii) 1波目が500galの場合に着目すると、構造物は1波目を受けた段階で、最大耐力相当の塑性率に達していることがわかる。2波目に対する性能曲線は、入力が400galまでは損傷が増大していないが、500galを超えると損傷が増大している。2波目に対する性能曲線の形状は、概ね健全な場合の性能曲線に漸近している。終局限界を超える加速度 PGA_2 は593galであった。この値から耐震性能残存率 R を算定すると $R=0.93$ となり、1波目が300galの場合よりも低下していた。

上記の結果より、1波目の損傷が大きくなると耐震性能残存率 R が低下する傾向が確認できる。なお、 PGA_1 が638galであるため、1波目が700galであった場合の耐震性能残存率 R の算定は省略した。

(b) Case2

図-7にCase2(L2spcⅠ入力, $T_{eq}=0.6s$)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。健全な構造物に対する性能曲線を見ると、1波で終局限界を超える加速度 PGA_1 は412galであった。特徴は、Case1と比べて性能曲線の傾きが急なことである。

(i) 1波目が300galの場合に着目すると、1波目で塑性率 $\mu \approx 2.5$ に達していることがわかる。2波目に対する性能曲線をみると、入力が200galまでは損傷が増大せず、300galで健全な場合の性能曲線に漸近し、その後は同様に応答特性を示した。終局限界を超える加速度 PGA_2 は411galで、耐震性能残存率 R は概ね1となった。なお、 PGA_1 が412galであるため、1波目が500galおよび700galの場合の耐震性能残存率 R の算定は省略した。

(c) Case3

図-8にCase3(L2spcⅠ入力, $T_{eq}=1.4s$)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。健全な構造物に対する性能曲線を見ると、 PGA_1 は1020galであった。特徴は、Case1と比べると性能曲線の傾きが緩やかなことである。

(i) 1波目が300galの場合に着目すると、1波目にお

ける損傷は弾性範囲に収まっていることがわかる。性能曲線をみると、入力が200galまで損傷が増大していない。その後300galで健全な場合の性能曲線に漸近し、その後は同様の応答特性を示した。PGA₂は1011galで、耐震性能残存率Rは概ね1となった。

(ii) 1波目が500galの場合に着目すると、1波目における損傷は塑性率 $\mu=2$ 程度である。性能曲線をみると、入力500galまで損傷は増大せず、400gal相当で健全な場合の性能曲線に漸近し、その後は同様の応答特性を示した。1波目が300galの場合と500galの場合で応答の特性が同様の傾向を示したのは、1波目による損傷が小さいためと考えられる。なお、1波目が500galの場合のPGA₂は1020galで耐震性能残存率Rは概ね1であった。

(iii) 1波目が700galの場合は、1波目における損傷が塑性率 $\mu=3$ 程度であり、損傷の程度は1波目が300galおよび500galの場合と比べて大きい。性能曲線をみると、入力700galで損傷が増大するが、健全な場合の性能曲線とは差を生じている。PGA₂は896galであり、耐震性能残存率Rは0.88となった。この結果より、耐震性能残存率Rは、損傷が最大耐力程度になると、低下する可能性があることがわかる。

ここで、固有周期の違いで性能曲線に差が出たのは、図-5に示した入力地震動の特性と固有周期の関係の影響と考えられる。Case3のように初期の固有

周期が長い場合は、応答が小さくなると考えられるため、PGA₁は大きくなり性能曲線の傾きが緩くなる。一方、Case2のように初期の固有周期が短い場合は、応答が大きくなると考えられるため、PGA₁は小さくなり性能曲線の傾きが急になる。

耐震性能残存率Rについて整理すると、Case2は入力加速度の増加に伴って損傷が急激に増大しているが、耐震性能残存率Rも急激に失われている(300gal入力時PGA₂≒1, 500gal入力時PGA₂=0)。一方、Case3は、入力加速度が増加しても損傷が急激には増大しないが、耐震性能残存率Rも徐々に低下する結果となった(300gal入力時PGA₂≒1, 500gal入力時PGA₂≒1, 700gal入力時PGA₂=0.88)。このように、耐震性能残存率Rは、固有周期の影響なども考慮した結果が得られている。

(d) Case4

図-9に、じん性を増大させたCase4(その他の条件はCase1と同様)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。図には比較のため、Case1の結果を再掲した。また最大耐力と終局限界の塑性率を示す点線は、Case4のものを示している。

健全な構造物に対する性能曲線についてCase4とCase1を比較すると、Case4の性能曲線は最大耐力に相当する塑性率 $\mu=4$ の付近からCase1よりも右側にシフトしている。これは、Case4の損傷程度がCase1よりも低減していることを意味している。この結果は、構造物のじん性を向上させたことによる影響と考えられる。なお、PGA₁は873galであった。

(i) 1波目が700galの場合の性能曲線に着目してCase4とCase1を比較すると、健全な状態と同様にCase4の損傷程度は、Case1に比べて低減していることがわかる。なお、PGA₂は694galで、Case4における耐震性能残存率Rは0.79となった。

(e) Case5

図-10に繰返しによる耐力低下の影響を無視したCase5(その他の条件はCase1と同様)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。この図にも比較のためCase1の結果を再掲した。健全な構造物に対する性能曲線および1波目が700galの場合の性能曲線を見ると、Case4とCase1の関係と同様に、Case5の結果はCase1に対して損傷程度が低減していることがわかる。この結果より、繰返しによる耐力低下を考慮しない場合には、損傷を過小に評価する可能性があることがわかる。上記の結果から、余震など複数の地震動の影響を扱う場合には、繰返しの影響を考慮する必要があることが明らかとなった。

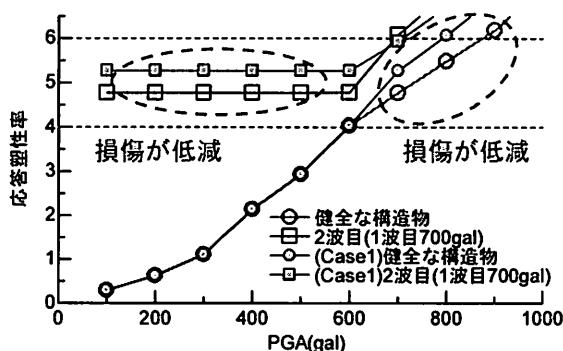


図-9 応答塑性率～入力加速度関係(Case4)

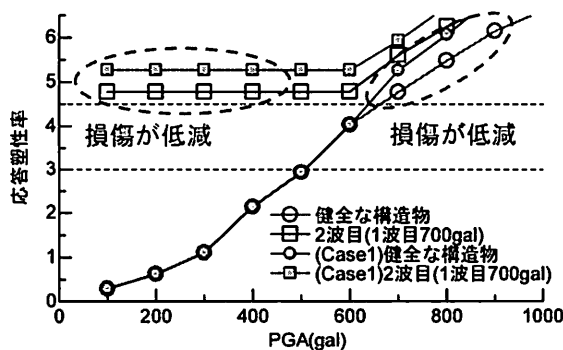


図-10 応答塑性率～入力加速度関係(Case5)

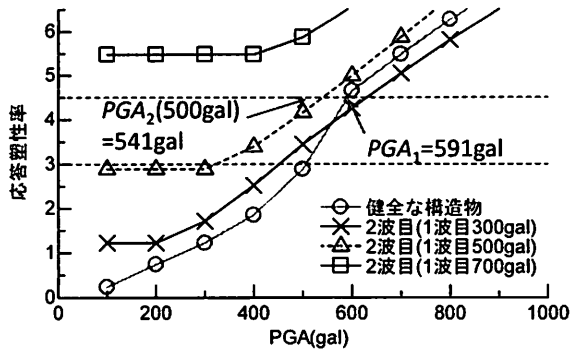


図-11 応答塑性率～入力加速度関係(Case6)

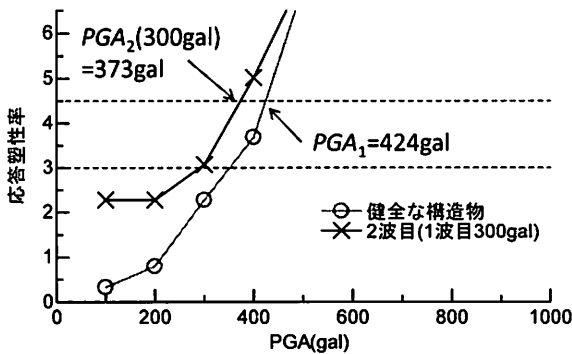


図-12 応答塑性率～入力加速度関係(Case7)

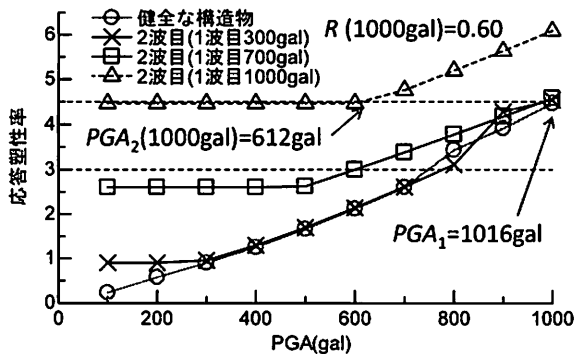


図-13 応答塑性率～入力加速度関係(Case8)

(2) L2スペクトルⅡ入力の結果 (Case6～9)

(a) Case6

図-11にCase6(L2spcⅡ入力, $T_{eq}=1.0s$)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。

健全な構造物に対する性能曲線を見ると、1波で終局限界 ($\mu=4.5$) を超える加速度 PGA_1 は591galであった。

(i) 1波目が300galであった場合に注目すると、1波目の損傷が概ね $\mu=1$ を超過した程度であった。損傷は、入力が200galを超えると増大するが、Case1に見られたような健全な構造物に対する性能曲線に漸近

せず、少し差を生じている。また、入力が600galを超えると健全な場合の性能曲線よりも損傷が低下している。これは、構造物の固有振動数が損傷に伴って長周期化し、これにより応答しにくくなった可能性が考えられる。なお、上記のために耐震性能残存率 R は1を超過している。

(ii) 2波目が500galの場合は、1波目で最大耐力相当の塑性率 ($\mu=3$) に達している。入力が300galまでは損傷が増大しないが、400galを超えると損傷が増大した。性能曲線の形状は、1波目が300galの場合の性能曲線と概ね平行である。終局限界を超える加速度 PGA_2 は541galであり、耐震性能残存率 R を算定すると $R=0.92$ となった。なお、 PGA_1 が591galであるため、1波目が700galであった場合の耐震性能残存率 R の算定は省略した。

(b) Case7

図-12にCase7(L2spcⅡ入力, $T_{eq}=0.6s$)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。健全な構造物に対する性能曲線に着目すると、 PGA_1 は424galであった。特徴は、Case6と比べて性能曲線の傾きが急なことである。これは、L2spcⅠの場合(Case2)にも見られた傾向である。

(i) 1波目が300galの場合における2波目の性能曲線は、入力が300galを超えると損傷が増大した。L2spcⅠの場合(Case2)は300galを超過した時点で性能曲線に漸近したが、Case7では顕著には見られなかった。 PGA_2 は373galであり、耐震性能残存率 R は0.88となった。なお、 PGA_1 が424galであるため、1波目が500galおよび700galであった場合の耐震性能残存率 R の算定は省略した。

(c) Case8

図-13にCase8(L2spcⅠ入力, $T_{eq}=1.4s$)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。なお、Case8は比較的大きな加速度が入力されるまで損傷が増大しないため、例示している2波目の性能曲線における1波目の入力加速度を300gal, 700gal, 1000galに変更して示した。

健全な構造物に対する性能曲線を見ると、 PGA_1 は1016galであった。特徴は、Case6と比べて性能曲線の傾きが緩やかなことである。これも、L2spcⅠの場合(Case3)に見られた傾向と同様である。

(i) 1波目が300galの場合における2波目の性能曲線は、300galで健全な場合の性能曲線に漸近し、その後は同様の性能曲線となった。 PGA_2 は986galで、耐震性能残存率 R は0.97となった。

(ii) 1波目が700galの場合における2波目の性能曲線は、入力が500galを超過した時点で損傷が増大し、

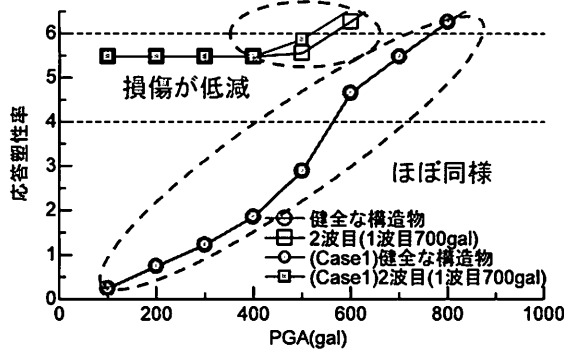


図-14 応答塑性率～入力加速度関係(Case9)

1000gal付近で健全な場合の性能曲線に漸近した。 PGA_2 は981galで、耐震性能残存率 R は0.97となった。

(iii) 1波目が1000galの場合は、1波目における塑性率が終局限界相当の塑性率($\mu=4.5$)あった。2波目の性能曲線は、600galを超過すると損傷が増大した。 PGA_2 は612galで、耐震性能残存率 R は0.60となった。

(d) Case9

図-14に、じん性を増大させたCase9(その他の条件はCase6と同様)の応答塑性率～入力加速度関係を示す。図には比較のため、Case6の結果を再掲した。なお、最大耐力と終局限界の塑性率を示す点線は、Case9に対応したものである。

健全な構造物に対する性能曲線についてCase9とCase6を比較すると、Case9の性能曲線はCase6とほぼ同等である。これは、L2spc I (Case4とCase1)に見られた傾向と異なっている。L2spc I とL2spc IIの傾向が異なったのは、地震動の繰返し回数の影響と考えられる。図-4に示すように、これらの地震動は、繰返し回数が大きく異なる。L2spc IIは、L2spc I と比べて主要動の長さは1/2～1/3程度であり、その分繰返し回数が少ない。Case9は、じん性が大きいため繰返しによる耐力低下の影響がCase6に比べて小さいが、繰返し回数が少ないために応答の特性が変化しなかったと考えられる。ただし、上記は応答の特性のみを議論しており、Case9の終局限界に対する安全裕度がCase6に比べて大きいことは明らかである。なお、 PGA_1 は766galであった。

(i) 1波目が700galの場合の性能曲線に着目してCase9とCase6を比較すると、健全な状態と同様に

Case9の損傷程度は、Case6と同等であることがわかる。ただし、損傷が増大し始める加速度の大きさはCase9の方がCase6より大きく、じん性を高めることが損傷の低減にもつながることが確認できる。なお、 PGA_2 は562galで、Case4における耐震性能残存率 R は0.73となった。

このように耐震性能残存率 R は、残存耐力の評価が可能であり、損傷に応じて R が低下していく傾向も確認できる。特に1波目で最大耐力を超過すると、 R が大きく低下している。この結果は、最大耐力点以降の応答が、地震動の繰返しの影響を受けていることを示唆するものであり、実際の応答とも整合していると考えられる。また地震動の違いにより R の値が異なっており、地震動の長さが R に影響を与えていることがわかった。

5. おわりに

本研究では、地震動を受けた後に構造物が保有している残存耐力を評価する指標として耐震性能残存率 R を導入し、これに対する試計算を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ・耐震性能残存率 R を用いることで構造物の残存耐力を評価可能である。
- ・1波目の地震動で最大耐力を超過するような損傷を受けた場合には残存耐力が大きく低下する。
- ・残存耐力の評価には地震動の繰返しの影響を考慮する必要がある。

今後は、この指標を用いて、複数の地震動の影響を考慮した耐震設計法に関しても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道株式会社ホームページ
<http://www.jreast.co.jp/pdf/restore02.pdf>.
- 2) 野上雄太, 室野剛隆, 佐藤勉: 繰返しによる耐力低下を考慮したRC部材の履歴モデルの開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.3, 2008.3.
- 3) (公財)鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 丸善, 2012.9.