

強震動の周期特性が残留変位比と必要強度に及ぼす影響

山下典彦¹・甲田啓太²・有野健太³・宮脇幸治郎⁴

¹正会員 博(工) 大阪産業大学教授 工学部都市創造工学科（〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1）

²学生会員 大阪産業大学 工学部都市創造工学科（〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1）

³株式会社ハンシン建設 土木事業部（元大阪産業大学学生）（〒555-0001 大阪府大阪市西淀川佃2-10-5）

⁴博(工) 大阪府立工業高等専門学校名誉教授（〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町26-12）

1. はじめに

兵庫県南部地震で多くの橋梁が甚大な被害を受けた経験から、変形性能による地震動エネルギー吸収能を高めた上で、構造物全体の崩壊及び再構築を阻止する性能照型設計の考え方が積極的に取り入れられるようになってきた。そのため、許容できる塑性率を検討することは構造物の耐震性を考える上で重要な要素となっている。

そこで、大規模地震を受けた場合に、非線形域に入る構造物の耐震設計における許容塑性率を、残留変位の観点から検討する手段として、平成6年に川島ら¹⁾によって残留変位比応答スペクトルが提案された。その後、平成7年兵庫県南部地震、平成23年東北地方太平洋沖地震などの地震が発生し、震度7の強震動記録が得られた。坂柳ら²⁾は前述の地震で得られた地震波を用いて、剛性比および応答塑性率が残留変位比に及ぼす影響について検討しており、両者が大きいほど残留変位比のばらつきが小さくなる傾向があることを結論づけている。

さらに、必要強度スペクトルについては、弾性強度と許容塑性率の組み合わせを検討する手法として平成7年に伊藤ら³⁾によって、1自由度系での提案がなされ、構造物の変形性能を高めることで降伏強度の低減が可能であることを指摘している。

残留変位比と必要強度に関する研究は多く存在しているが、両者とも許容塑性率を考える指標であり、残留変位比と必要強度の関係を検討したものは少ない。

そこで、本研究では構造物をバイリニア型の復元力特性を有する1自由度系でモデル化し、卓越周期の異なる地震動を用いて応答解析を行い、強震動の周期特性が残留変位比と必要強度に及ぼす影響につ

いて検討した。

2. 応答解析の概要

1自由度系の初期剛性 k_1 は固有周期 T_1 と単位質量 m によって算定し、仮想の構造物を設定する意味で目標塑性率 μ_0 を定め、それに達するように収束計算を行った。そして、目標塑性率 μ_0 に収束した時の降伏耐力 F_y から必要強度が得られ、図-1に示す可能最大残留変位 x_{rmax} （初期剛性と同じ傾きの直線状に存在する場合をパターン1、2次剛性と同じ傾きに存在する場合をパターン2とする。）と残留変位 x_r を用い、(1)式で定義されている残留変位比 r_r を算出した。

$$r_r = \frac{x_r}{x_{rmax}} \quad (1)$$

ここで、残留変位比とは、ある構造物に生じた残留変位をその構造物が取り得る最大の残留変位で除したものであり、固有周期 T_1 、塑性率 μ 、減衰定数 h 、剛性比 r などの他、地震動の特性により変化する。

応答解析は、減衰定数 h を0.05、剛性比 r を0.0、0.1、微小時間 Δt を1/1000(s)、目標塑性率 μ_0 を2、5、8とし、必要強度と残留変位比の関係を求めて行った。

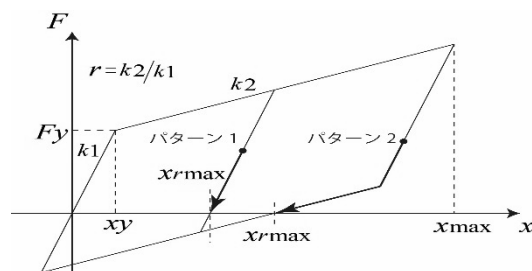


図-1 可能最大残留変位

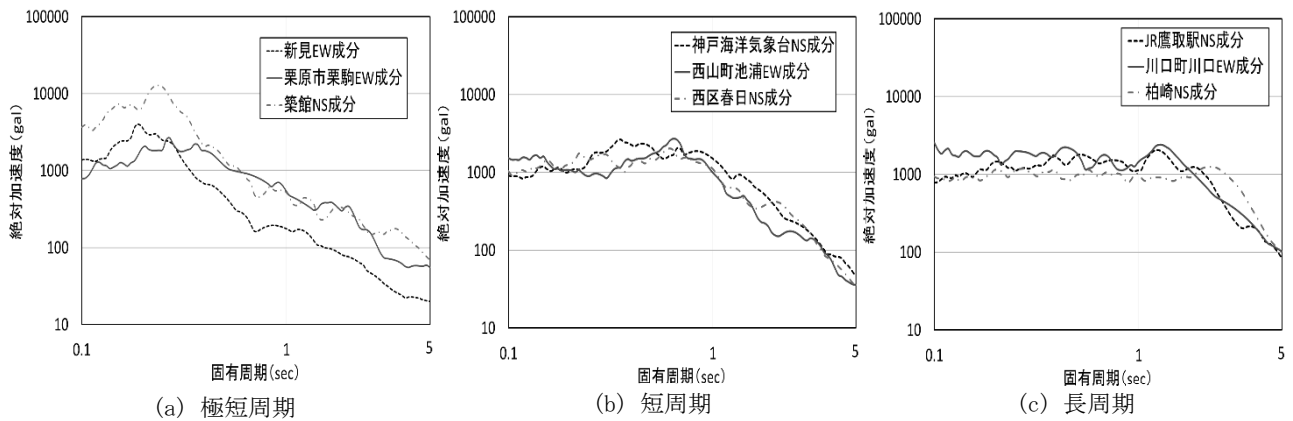


図-2 加速度応答スペクトル

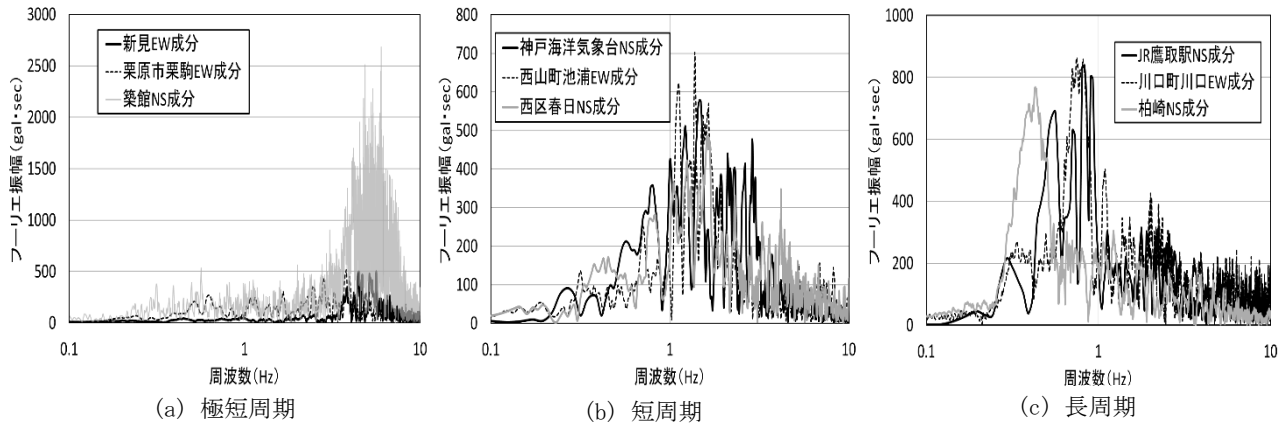


図-3 フーリエスペクトル

3. 解析に使用した地震波

表-1に示す地震波は、近年に発生した地震の中で、比較的強震動であるものを選定し、地震動の周期帯⁴⁾を参考にして、 $T < 0.5(\text{s})$ を極短周期、 $0.5(\text{s}) \leq T \leq 1.0(\text{s})$ を短周期、 $1.0(\text{s}) < T$ を長周期と定め、各周期帯ごとに卓越している3波を使用した。

表-1 解析に使用した地震波

平成7年兵庫県南部地震	神戸海洋気象台NS成分 JR鷹取駅NS成分
平成12年鳥取県西部地震	新見EW成分
平成16年新潟県中越地震	川口町川口EW成分
平成19年新潟県中越沖地震	西山町池浦EW成分 柏崎NS成分
平成20年岩手・宮城内陸地震	栗原市栗駒EW成分
平成23年東北地方太平洋地震	築館NS成分
平成28年熊本地震	西区春日NS成分

加速度応答スペクトルを図-2に、フーリエスペクトルを図-3に示す。図-2において、応答の最大値が築館は固有周期0.24秒、西山町池浦は固有周期0.64秒、川口市川口は固有周期1.25秒で得られており、

フーリエスペクトルについても同様である。ここで、柏崎と築館の地震波には諸報告^{5),6)}が存在しているが、本研究では残留変位比と必要強度の関係が、強震動の周期特性に影響を受けるのかについて着目しているため、地震波をそのまま使用した。

4. 解析結果

(1) 残留変位比応答スペクトル

図-4に剛性比 $r=0.1$ の残留変位比応答スペクトルを示す。上段が極短周期、中段が短周期、下段が長周期を示し、横線は細線が塑性率2、中線が塑性率5、太線が塑性率8の各周期帯の平均値を示している。これより、残留変位比は地震動の卓越周期によって明確な変化傾向が見られず、卓越周期の影響を受けているとは言えない。しかし、築館、西山町池浦及び柏崎では、地震動の卓越周期に反して残留変位比が他の周期帯と比較して小さくなっている。

また、塑性率に着目すると各周期の残留変位比の平均値は、塑性率が小さい場合ほど大きくなる傾向があるが、西山町池浦では長周期において、塑性率2から8にかけて順に、0.49、0.64、0.55であり、塑

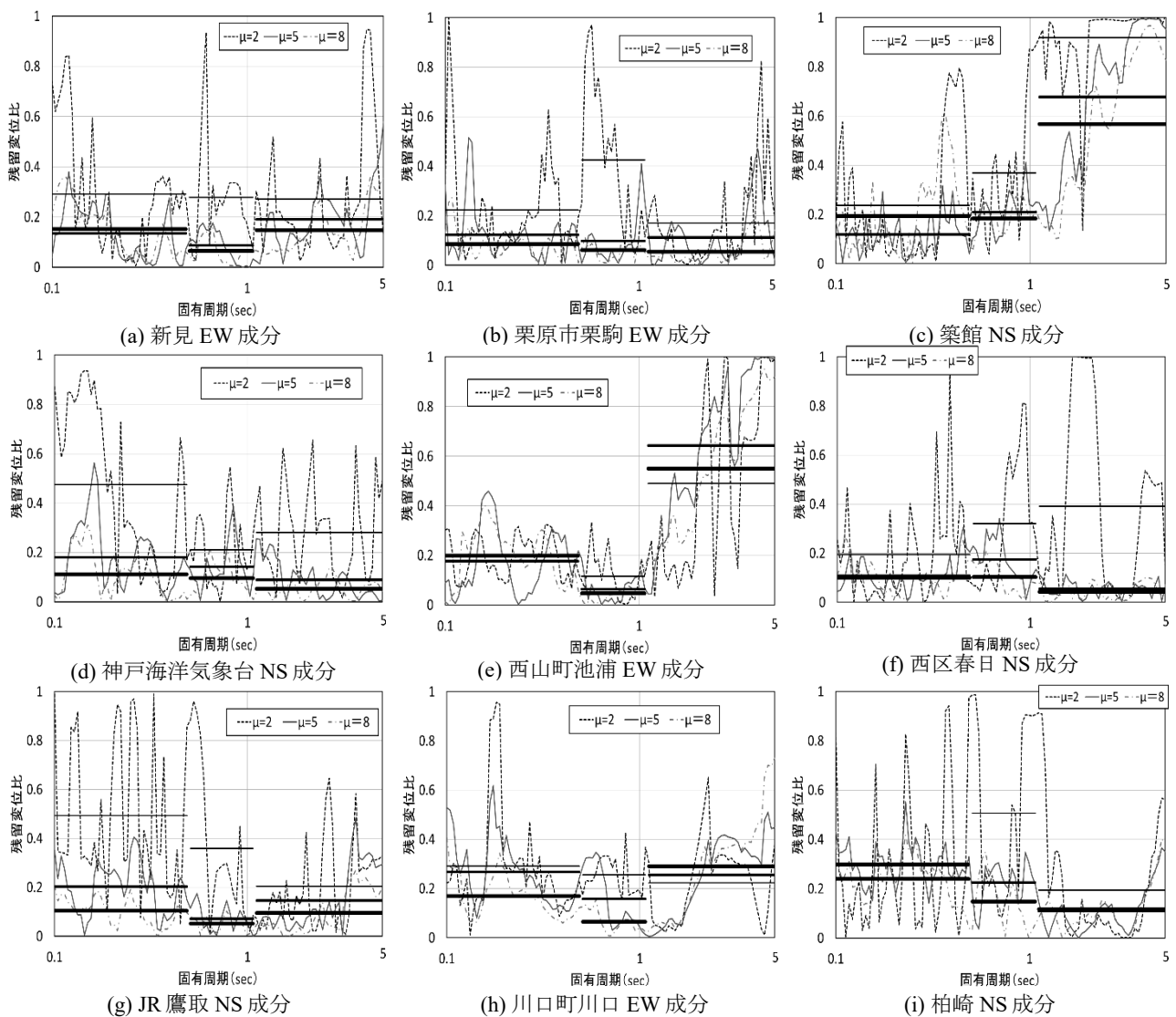


図-4 残留変位比応答スペクトル（剛性比 $r = 0.1$ ）

塑性率2が最小となる。川口町川口では長周期において、塑性率2から8にかけて順に、0.22, 0.26, 0.29であり、上記の傾向とは逆になっている。

(2) 残留変位比と必要強度の関係

図-5に必要強度と残留変位比の関係を地震動の周期ごとに上から築館（極短周期），神戸海洋気象台（短周期），柏崎（長周期），左から塑性率2,5,8の順に剛性比 $r=0.1$ の場合を示す。

図-5より、築館では極短周期において他の周期と比較して必要強度と残留変位比のばらつきが大きく、塑性率2に関しては、短周期において塑性率5,8の結果と比較すると必要強度と残留変位比がばらついていいる。神戸海洋気象台では、短周期と長周期に必要強度と残留変位比のばらつきが見られ、塑性率2に関しては極短周期と短周期の分布が似ており、塑性率5,8では、周期帯ごとに变化している。柏崎では、長周期に必要強度のばらつきが見られ、塑性率2に

関しては、極短周期と短周期の分布が似ており、塑性率5,8では周期帯ごとに变化している。以上のように塑性率ごとに分布特性が变化した原因としては、構造物が非線形域に入り固有周期が伸びることで、分布特性に影響を与えたと考えられる。また、築館は周期0.2秒付近に、神戸海洋気象台では周期0.7秒付近に、柏崎では周期2.0秒付近がそれぞれ卓越しており、その周期が含まれる周期帯において必要強度－残留変位比関係のばらつきが大きくなっているため、地震動の卓越周期の影響を受けていると考えられる。

5. 結論

本研究では、構造物をバイリニア型の復元力特性を有する1自由度系でモデル化を行い、周期特性の異なる地震波を3波ずつ用い、応答解析により残留変位比応答スペクトルと残留変位比と必要強度の関

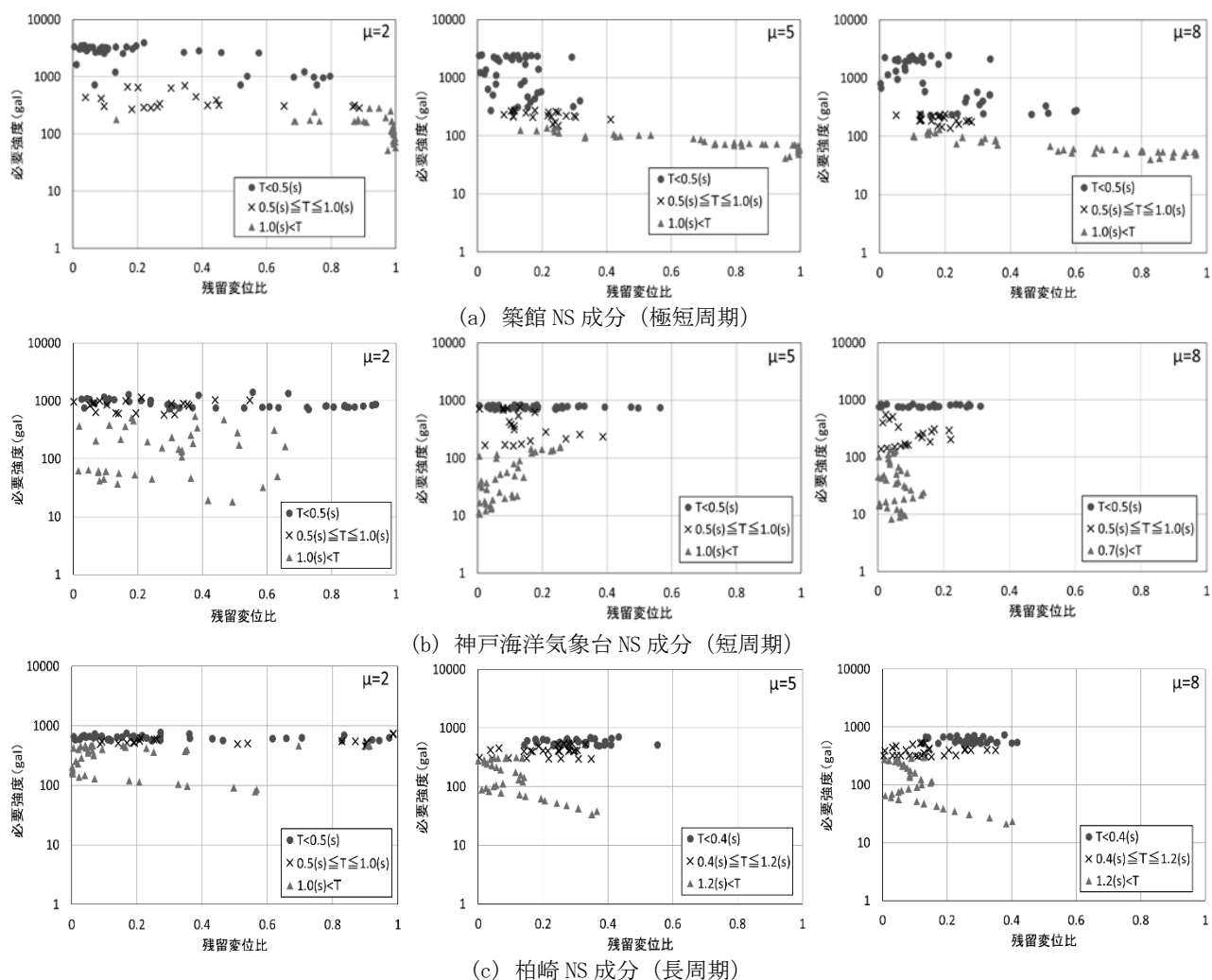


図-5 必要強度－残留変位比関係（剛性比 $r = 0.1$ ）

係を算出し、地震動の周期特性が両者に及ぼす影響について検討を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 残留変位比応答スペクトルは地震動の周期特性による影響を受けているとは言えないが、地震動によっては卓越する周期で残留変位比が低減する結果が得られた
- 2) 必要強度－残留変位比関係は構造物の非線形性の影響を受け両者の分布特性が変化し、両者の関係がばらつく周期帯は地震動の周期特性の影響を受けていると考えられる。

謝辞：本研究に際し、防災科学技術研究所、気象庁および西日本旅客鉄道株式会社の観測波形を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 川島一彦, Gregory A. MACRAE, 星隈順一, 長屋和宏：残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集 No.501/I-29, pp.183~192, 1994.

- 2) 坂柳皓文, 星隈順一, 堺順一：東北地方太平洋沖地震による地震動が構造物の非線形応答特性に及ぼす影響, 土木学会論文集A1（構造・地震工学）, Vol.68, No.4（地震工学論文集第31-b巻）, I_79-I_92, 2012.
- 3) 伊藤彰浩, 家村浩和, 五十嵐晃：必要強度スペクトルに基づく弾塑性耐震設計法について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部（B）, 51巻, pp.514-515, 1996.
- 4) 境有紀：長周期地震動と短周期地震動の違いを簡単な模型を使ってわかりやすく示したデモンストレーション<<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/dsn.htm>> (2016/6/15 アクセス)
- 5) 吉田望, 後藤浩之, 若松加寿江, 福元俊一, 三上武子：2007年新潟県中越沖地震における K-NET 柏崎の観測波形について, 防災科学技術研究所, pp.1-pp.3, 2007.
- 6) 山中浩明：観測された地震動の特性と余震観測, CUEE Newsletter 東京工業大学都市地震工学センターニューズレター, No.11, 2011.