

# 論文 地震動の継続時間がRC橋脚の耐震挙動に及ぼす影響

岩本 政巳<sup>\*1</sup>・正木 智弘<sup>\*2</sup>・杉戸 真太<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究では、RC 橋脚を対象にさまざまな地震動波形を入力波とする地震応答解析を行い、計測震度ごとの耐震挙動、地震動の継続時間がその耐震挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、地震動の継続時間と構造物の損傷度に明瞭な相関は見られなかったものの、継続時間の長い地震動のグループの破壊確率は短いグループより高くなることが分かった。また、耐力（剛性）低下を考慮した復元力モデルを用いることで、応答塑性率や破壊確率はやや上昇するものの、履歴エネルギーは減少する傾向にあることが分かった。

**キーワード**：耐震、地震動、継続時間、耐力低下、RC 橋脚

## 1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、宮城県栗原市で震度 7 を記録するなど各地で強い揺れが観測された。また、この地震により発生した津波は、東北、関東地方の太平洋岸に甚大な被害をもたらした。この地震の震源断層は、長さ 500km、幅 200km に及ぶ巨大なものとして推定されており<sup>1)</sup>、観測された地震動は継続時間が 3 分程度と非常に長いという特徴を持っていた。近い将来発生するとされる東海、東南海地震は想定震源域が広く、また連動して発生する可能性も高いため、その継続時間はかなり長いものになると予想されている。

一般に、地震による被害予想は計測震度をもとに行われることが多い。しかし、計測震度は地震動の最大振幅に大きく依存し継続時間の影響を受けにくい指標のため、計測震度に基づく被害予想は継続時間が長い地震動に対する被害を過小評価する可能性がある。

そのため、地震動の継続時間が構造物の損傷の程度に及ぼす影響を明確にすることは、地震被害推定の精度を高める上で重要と考えられる。著者らは過去、RC 建物を対象にさまざまな地震動波形を入力波とする地震応答解析を行い、地震動の周期特性や継続時間がその耐震挙動に及ぼす影響について検討した<sup>2)</sup>。本研究では、試設計した RC 橋脚を対象にした解析を行い、地震動の継続時間の影響について検討する。

また、正負交番繰り返し荷重を受ける RC 部材は、変形の進展とともに耐力低下を起こすことが知られている。地震動の継続時間が非常に長い場合、この耐力低下により RC 構造物の損傷が増加する可能性がある。地震応答解析等 RC 構造物の耐震性検討においては、復元力モデルとして Takeda モデル<sup>3)</sup>などの最大点指向型モデルがよく用いられているが、こうした復元力モデルでは繰り返し荷重による耐力低下の影響を考慮できない。その

ため、載荷時の指向点を移動させることにより、耐力低下を再現する復元力モデルも提案されている<sup>4)</sup>。そこで、本研究では最大点指向型のモデルに加え、耐力低下を考慮した復元力モデルによる解析を行い、地震動の継続時間との関連性についても検討する。

## 2. 解析対象

解析対象としたのは、上下 4 車線、スパン長 30m の 3 径間連続箱桁橋を想定して試設計した、長方形断面の単柱式 RC 橋脚である。文献 5) にしたがって、表 1 に示す橋脚高さを変化させた 4 ケースの設計を行った。コンクリートの設計基準強度は 24N/mm<sup>2</sup>、鉄筋は SD345 とした。なお、すべて曲げ降伏先行型である。

設計諸元にしたがって、材料非線形性を考慮した平面骨組モデルによるプッシュオーバー解析を行った。得られた荷重-変位関係をテトラリニア型スケルトンカーブとしてまとめたものを図 1 に示す。図中の点はひび割れ、鉄筋降伏、終局、破壊の限界状態を示している。

地震応答解析は、この荷重-変位関係を復元力特性とする、等価 1 自由度系モデルを用いて行った。曲げ破壊時の塑性率は表 2 のとおりである。また、各モデルの等価質量および初期剛性、降伏時割線剛性より算定した固有周期を表 3 に示す。

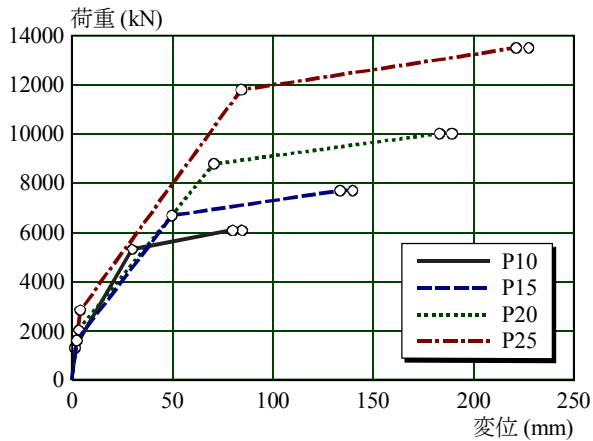
表 1 解析対象とした RC 橋脚の概要

モデル	橋脚高さ (m)	断面幅 (m)	断面高さ (m)	引張主鉄筋比
P10	10	8.15	2.45	0.00285
P15	15	9.5	3.2	0.00255
P20	20	11	3.95	0.00250
P25	25	11	5.075	0.00225

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科創成シミュレーション工学専攻准教授 工博 (正会員)

\*2 研究当時 名古屋工業大学大学院 工学研究科創成シミュレーション工学専攻 工修 (非会員)

\*3 岐阜大学 流域圏科学研究センター教授 工博 (非会員)



図一 等価1自由度系のスケルトンカーブ

表一 等価1自由度系における曲げ破壊時の塑性率

モデル	破壊時塑性率
P10	2.82
P15	2.81
P20	2.68
P25	2.70

表一 等価1自由度系の基本特性

モデル	等価質量 (ton)	固有周期 (初期剛性) (s)	固有周期 (降伏時) (s)
P10	863	0.20	0.44
P15	1062	0.25	0.56
P20	1343	0.30	0.65
P25	1747	0.32	0.70

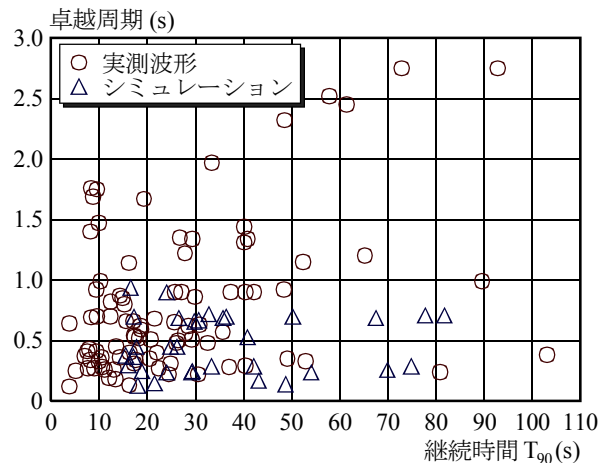
### 3. 入力地震動

入力地震動波形として、国内の実測波形 91 成分およびシミュレーション波形 33 成分の計 124 成分の加速度波形（水平 1 方向）を用いることとした。実測波形は、防災科学技術研究所 K-Net のほか、旧運輸省港湾技術研究所、旧建設省土木研究所、気象庁等により観測された、表一 4 に示す地震の観測記録である。シミュレーション波形は、既往強震記録に基づく統計的地震動予測モデル EMPR とひずみの周波数依存性を考慮した地盤震動解析法 FDEL<sup>6)</sup>により作成された、想定東海地震、想定東南海地震およびそれらの複合地震の波形である。

124 波形の卓越周期および継続時間の指標  $T_{90}$  を図一 2 に示す。卓越周期は MEM 法により算定したパワースペクトルの最大ピークより求めた。また、継続時間の指標  $T_{90}$  は地震動パワーの累積値が 5%~95%となる時間である。地震応答解析にあたっては、これらの地震動波形に対して振幅調整を行い、計測震度 5.0 から 7.0 まで 0.1 刻みで入力地震動波形を作成した。なお、計測震度は成

表一 4 解析に用いた地震動波形（観測波形）

発生年	地震名称	波形内訳
1962	広尾沖地震	1 地点 2 成分
1968	十勝沖地震	3 地点 6 成分
1968	愛媛県西方沖地震	1 地点 2 成分
1970	宮城県沖地震	1 地点 1 成分
1973	根室半島沖地震	2 地点 3 成分
1978	宮城県沖地震	2 地点 4 成分
1982	浦河沖地震	1 地点 2 成分
1983	日本海中部地震	2 地点 4 成分
1995	兵庫県南部地震	4 地点 5 成分
1997	鹿児島県北西部地震	3 地点 5 成分
1997	第 2 鹿児島県北西部地震	3 地点 5 成分
2000	鳥取県西部地震	5 地点 6 成分
2001	芸予地震	4 地点 5 成分
2003	十勝沖地震	5 地点 6 成分
2003	十勝沖地震（余震）	4 地点 5 成分
2003	三陸南地震	4 地点 4 成分
2003	宮城県北部地震	3 地点 5 成分
2004	釧路沖地震	4 地点 5 成分
2004	根室半島南東沖地震	5 地点 5 成分
2004	新潟県中越地震	5 地点 6 成分
2011	東北地方太平洋沖地震	5 地点 5 成分



図一 2 入力地震動波形の卓越周期と継続時間  $T_{90}$

分ごとに算定している。

### 4. 解析方法

図一 1 に示したスケルトンカーブをもとに等価 1 自由度系の弾塑性地震応答解析を行った。運動方程式は増分型とし、数値解法として Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を用いた。減衰定数は 0.02 とした。地震動データの時間刻みは 0.01s あるいは 0.02s であったが、地震応答解析は

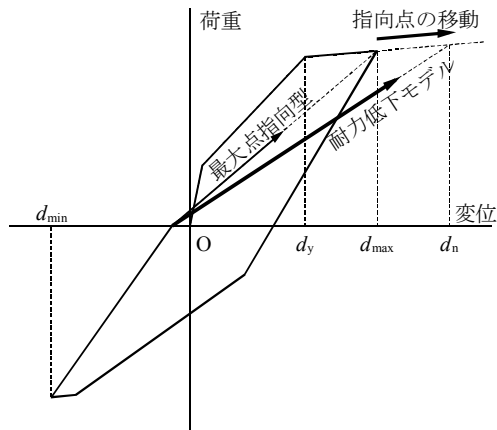


図-3 耐力低下モデルの概要

原則として 0.0005s の時間刻みで行った。

復元力モデルには、図-1に示したテトラリニア型のスケルトンカーブによる最大点指向型のモデルを用いた。その履歴挙動は Takeda モデルに準じている。

耐力低下を考慮した復元力モデルでは、図-3に示すとおり、載荷時の指向点を既往の最大変位点から移動させることで耐力低下を再現する。正確には剛性を低下させているわけだが、耐力低下の再現を目的としているので、ここでは便宜的に耐力低下モデルと呼ぶ。新しい指向点の変位  $d_n$  は次式で表される<sup>4)</sup>。

$$d_n = d_p + (d_{\max} - d_{\min}) \times \chi \quad (1)$$

ここに、 $d_p$  は前回の同方向の指向点、 $d_{\max}$  は前回の同方向の最大変位、 $d_{\min}$  は前回の反対方向の最大変位、 $\chi$  は剛性低下係数である。本研究では、文献4)に示された回帰式に、試設計した橋脚の諸元を代入して得られた平均値より、 $\chi = 0.049$  とした。

## 5. 解析結果

### 5.1 計測震度ごとの損傷状況

地震応答解析結果の一例として、P10 に計測震度 6.6 の東北地方太平洋沖地震（築館 NS 波）を作用させたときの時刻歴応答、履歴曲線を図-4、図-5にそれぞれ示す。このケースでは、時刻約 85 秒で最大変位約 80mm が発生している。このときの応答塑性率は 2.7 前後であるが、曲げ破壊には至っていない。また、履歴曲線より算定した履歴エネルギーを図-6に示す。応答振幅の大きい 45 秒、85 秒あたりで履歴エネルギーが急激に増大していることが分かる。

耐力低下モデルによる結果に着目すると、図-5より繰り返し載荷によって耐力及び剛性が小さくなる様子が分かる。剛性の低下により、3mm 程度増加し、逆に累積エネルギーは 200kJ 程度低下している。

解析結果から算定した、応答塑性率と計測震度との関

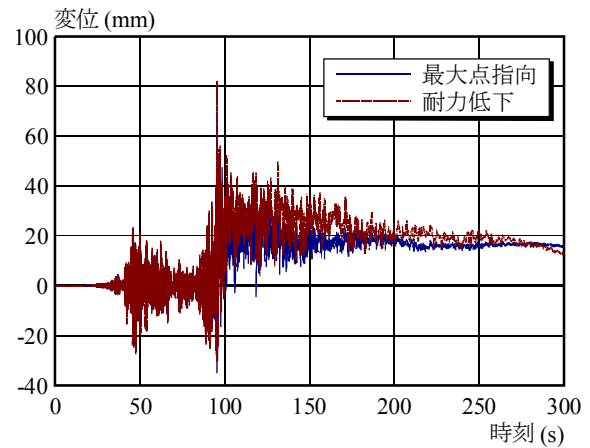


図-4 時刻歴応答の例

(P10, 東北地方太平洋沖地震, 計測震度 6.6)

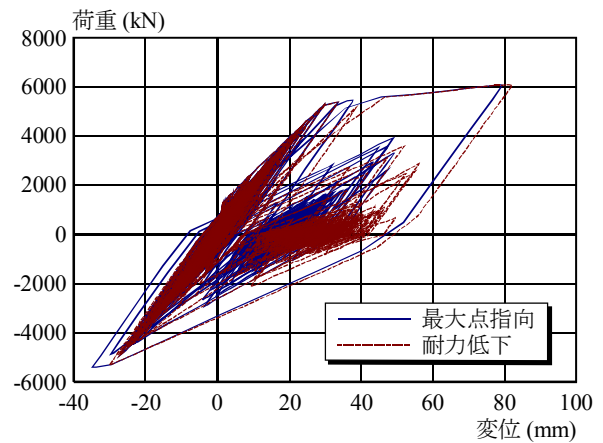


図-5 履歴曲線の例

(P10, 東北地方太平洋沖地震, 計測震度 6.6)

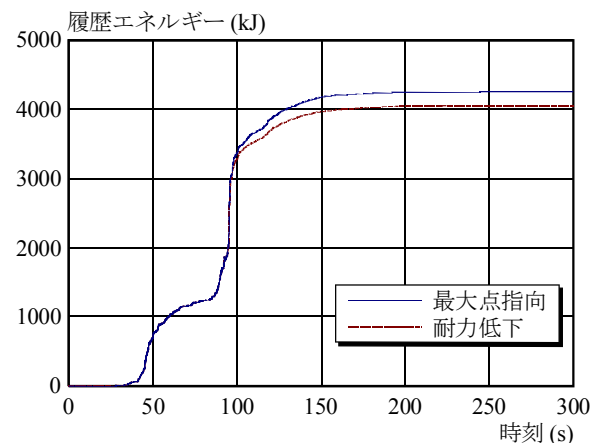
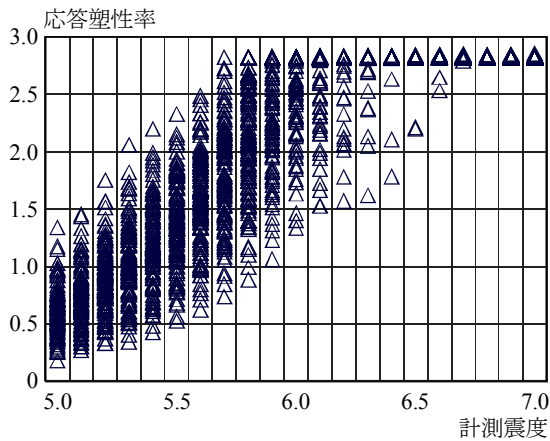


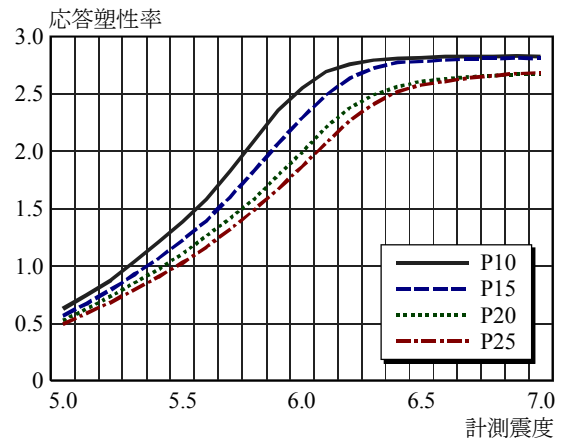
図-6 履歴エネルギーの例

(P10, 東北地方太平洋沖地震, 計測震度 6.6)

係の一例を図-7に示す。計測震度ごとに振幅調整した 124 波形による解析を行っているが、同じ計測震度であっても応答塑性率には大きなばらつきがあることが分かる。特に、計測震度が高くなるほどその傾向が高いように見受けられる。ただし、解析は曲げ破壊が発生した



図一七 計測震度と応答塑性率の関係の例  
(P10, 最大点指向型モデル)

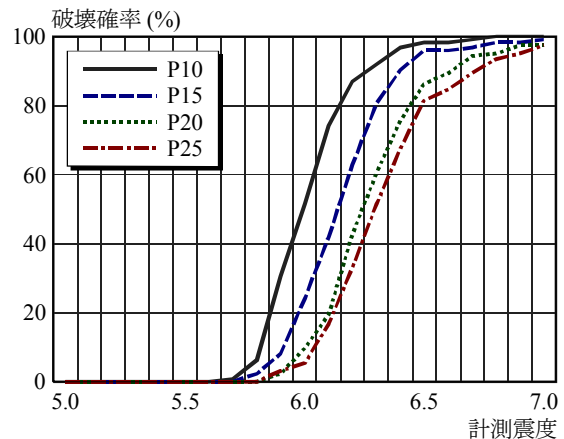


図一八 計測震度と応答塑性率の関係  
(最大点指向型モデル, 平均)

時点で終了させているため、応答塑性率は表一に示した破壊時塑性率の値で飽和している。

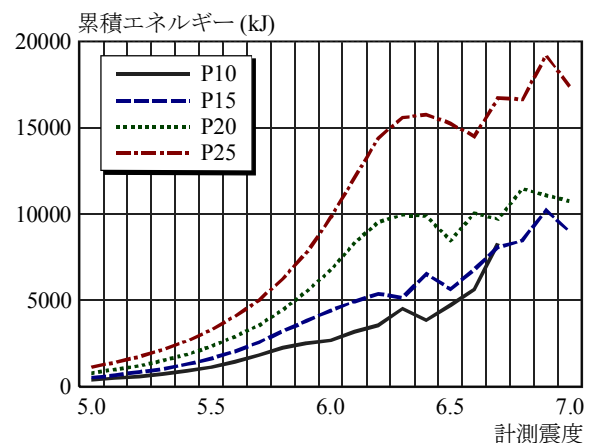
応答塑性率の傾向を見るため、計測震度ごとの応答塑性率の値 124 個の平均をとったものを図一八に示す。この図に示しているのは、最大点指向型モデルによる解析結果である。どの橋脚においても計測震度とともに応答塑性率が滑らかに増加していることが分かる。モデルごとの傾向を見ると、橋脚高さが大きくなるにしたがい応答塑性率は低下している。

最大点指向型モデルによる解析結果から、計測震度と破壊確率との関係を図一九に示す。破壊確率は、各計測震度で行った 124 波形の解析において曲げ破壊が生じた割合と定義した。応答塑性率と同様、破壊確率も橋脚高さが大きくなるとともに低下する傾向にある。破壊確率が 50%に達する震度は、P10 で 6.0 程度、P25 で 6.3 程度であった。



図一九 計測震度と破壊確率の関係  
(最大点指向型モデル)

累積エネルギー（地震動作用終了時の履歴エネルギー値）について、図一八と同様、計測震度ごとの 124 の値の平均をとったもの（最大点指向型モデル）を図一〇に示す。ただし、解析途中で曲げ破壊が発生したものは除外している。そのため、破壊確率が高い高震度の領域では曲げ破壊しなかった地震波に限定して平均値を求めていることとなり、累積エネルギーの上昇はやや不規則となる。橋脚高さとともに累積エネルギーは増加するが、同じく損傷の指標である塑性率とは逆の傾向を示している。



図一〇 計測震度と累積エネルギーの関係  
(最大点指向型モデル, 平均)

## 5.2 耐力（剛性）低下の影響

続いて、耐力低下モデルによる解析結果を示す。計測震度ごとの応答塑性率の平均値、破壊確率および累積エネルギーを、図一〇一～図一〇三にそれぞれ示す。図中には、最大点指向型モデルによる結果も薄色の線で示してある。

平均的な傾向としては、耐力低下モデルによる解析で

は繰り返し载荷による剛性低下により変位はやや大きくなる。これにより、応答塑性率（図一〇一）も最大点指向型モデルに比べ増加する。その増加幅は最大で 0.03 程度、増加の割合は最大 7%程度である。

変位の増加に伴い、破壊確率（図一〇二）も上昇する。

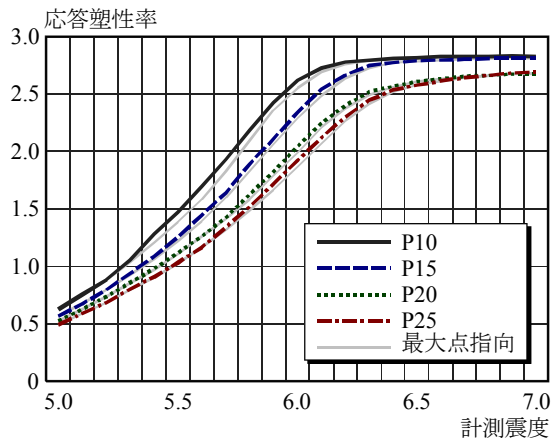


図-1-1 計測震度と応答塑性率の関係  
(耐力低下モデル, 平均)

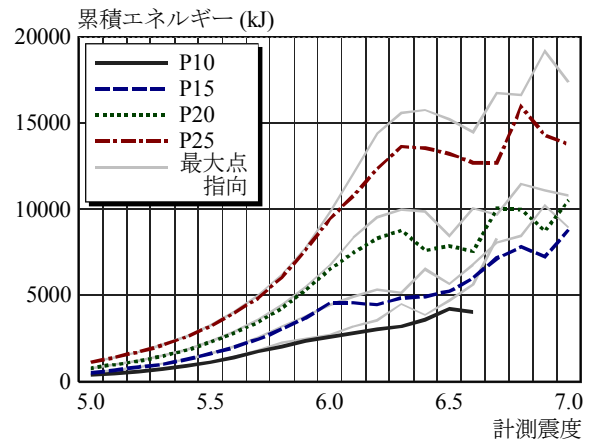


図-1-3 計測震度と累積エネルギーの関係  
(耐力低下モデル, 平均)

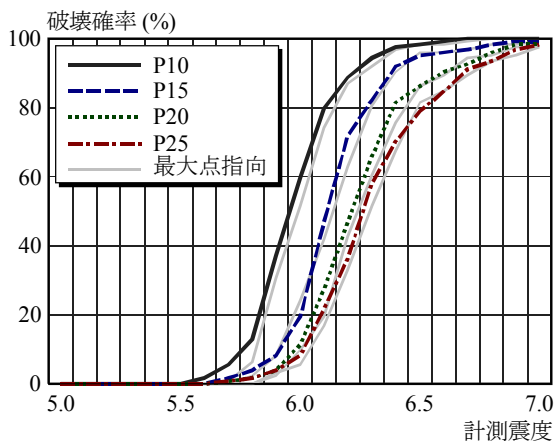


図-1-2 計測震度と破壊確率の関係  
(耐力低下モデル)

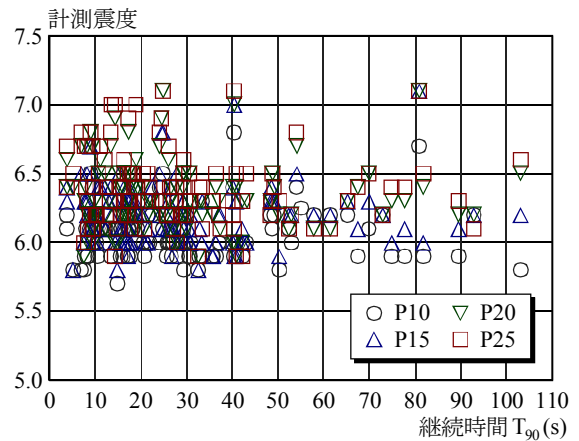


図-1-4 地震動継続時間と破壊時計測震度の関係  
(最大点指向型モデル)

どの橋脚においても、破壊確率は最大点指向型モデルに比べ6ポイント程度上昇している。破壊確率が50%となる計測震度の値を比べると、耐力低下モデルでは最大点指向型モデルより0.03程度低くなる。

累積エネルギー(図-1-3)については、最大点指向型モデルに比べ、高震度領域では減少する傾向にある。これは、図-5、図-6で示した剛性の低下による影響と考えられる。ただし、耐力低下モデルでは最大点指向型モデルに比べ若干低い計測震度で曲げ破壊に達する傾向にあるため、高震度領域での地震波の組み合わせは必ずしも同一ではない。高震度領域での累積エネルギーの減少幅は高い橋脚ほど大きい。減少の割合はどの橋脚も15%前後であった。

### 5.3 地震動継続時間の影響

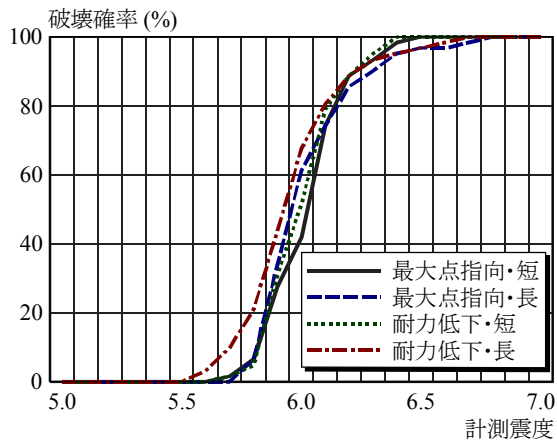
続いて、図-2に示した地震動波形の継続時間  $T_{90}$  の影響を見る。124の地震動ごとに求めた、曲げ破壊が生じた最小の計測震度と、地震動継続時間  $T_{90}$  との関係を図-1-4に示す。計測震度7.0でも破壊しなかった場合

は便宜的に7.1とした。

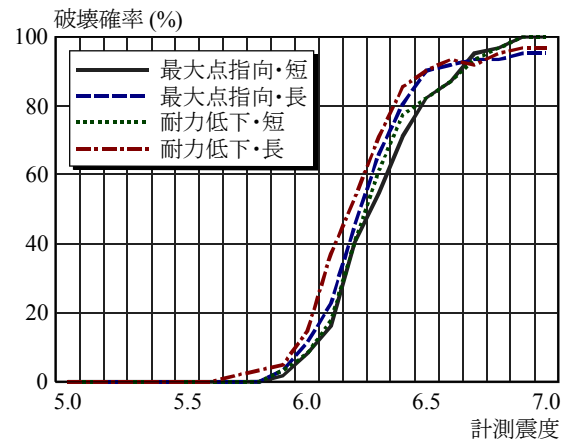
継続時間の短い地震波で破壊時計測震度が高くなる例が散見されるものの、両者の間に明瞭な傾向は見受けられない。また、ばらつきが大きく、両者の相関も低かった(相関係数の2乗  $R^2$  値で0.01のオーダー)。耐力低下モデルによる解析においても、破壊時計測震度が若干下がる傾向にあるものの、ほぼ同様の結果が得られた。

そこで、 $T_{90}$ の中央値24.3sを境界として、124波の地震波を継続時間の短いグループと長いグループとに分け、それぞれグループで破壊確率を算定することとした。その結果を図-1-5に示す。図中には、2種類の復元力モデル、継続時間の長短の組み合わせにより、4種類のプロットが示してある。

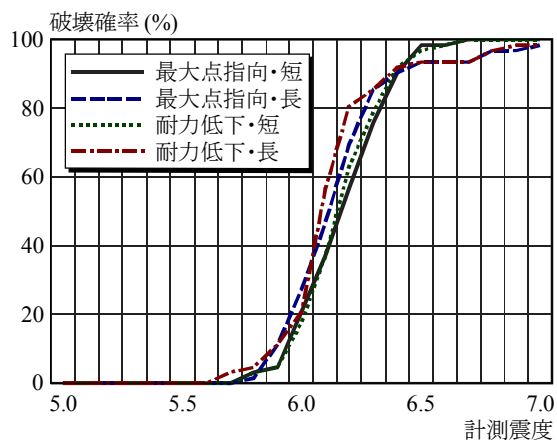
いずれの橋脚においても、耐力低下モデル・長い継続時間の組み合わせによって、破壊確率が高くなる傾向にあることが分かる。次いで、最大点指向型モデル・長い継続震度、耐力低下モデル・短い継続時間、最大点指向型モデル・短い継続時間の順となっている。したがって、地震動の継続時間の影響は復元力モデルの差異による



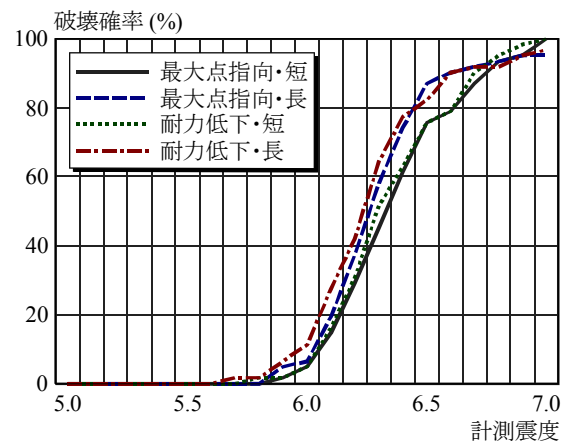
図一 1 5 a) 継続時間の長短と破壊時計測震度 (P10)



図一 1 5 c) 継続時間の長短と破壊時計測震度 (P20)



図一 1 5 b) 継続時間の長短と破壊時計測震度 (P15)



図一 1 5 d) 継続時間の長短と破壊時計測震度 (P25)

ものよりも大きい。なお、P15、P20、P25において、長い継続時間グループによる破壊確率が、震度の高い領域で頭打ちを受けている。これは、東北地方太平洋沖地震の築館 NS 波など、震度 7.0 でも破壊が生じない地震動がいくつかあったためである。

## 6. まとめ

本研究では、RC 橋脚を対象として地震応答解析を行い、地震動の継続時間がその耐震挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、地震動の継続時間と構造物の損傷度に明瞭な相関は見られなかったものの、継続時間の長い地震動のグループの破壊確率は短いグループより高くなることが分かった。したがって、RC 構造物の地震被害分析や被害予想においては、破壊確率などの指標を援用しながら、地震動の継続時間を考慮することが望ましいと考えられる。

また、耐力（剛性）低下を考慮した復元力モデルを用いることで、応答塑性率や破壊確率はやや上昇するものの、履歴エネルギーは減少する傾向にある。ただし、復元力モデルの差異による影響は、地震動の継続時間による影響に比べ小さいことが分かった。

## 参考文献

- 1) 神山眞：3.11 巨大地震 -Duration 再考-，強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム，pp.3-14，2012
- 2) 岩本政巳，清水藤太，杉戸真太：地震動の周期特性，継続時間が RC 建物の耐震挙動に及ぼす影響に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.805-810，2010
- 3) Takeda, T., Sozen, M. A., and Nielsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.12, pp.2557-2573, 1970
- 4) 梅村恒，市之瀬敏勝，大橋一仁，前川純一：剛性低下を考慮した RC 部材の復元力特性モデルの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，2002
- 5) 和田克哉，谷和弘，矢野勉：改訂版 道路橋示方書 IV 下部構造編による橋梁下部構造の設計法と設計例，近代図書，2004
- 6) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤震動解析法に関する一考察，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58，1994