

入力地震動の特性と積層ゴム系支承の地震応答の 繰り返し回数に関する研究

横川英彰¹・堺淳一²・星隈順一³

- ¹正会員 博士（工学） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ 交流研究員
²正会員 博士（工学） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ 主任研究員
³正会員 博士（工学） 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

1. はじめに

支承部は、地震時に上部構造の慣性力を下部構造に伝達する非常に重要な部材であり、橋の耐震性能を確保するためには、地震による繰り返し作用に対して安定して挙動することが求められる。このような支承の特性は、適切な手法に基づく実験により検証する必要がある。安定した挙動を評価するための実験においては、その実験で考慮すべき繰り返し回数を橋の地震時の応答特性を踏まえて適切に設定する必要がある。

橋の部材の性能検証法として実験における繰り返し回数の検討を行った既往の研究では、鉄筋コンクリート橋脚を対象に解析的検討が行われた研究¹⁾がある。この研究では、解析結果と鉄筋コンクリート橋脚の正負交番繰り返し実験結果を比較した上で、地震動のタイプに応じて正負交番繰り返し実験において考慮すべき繰り返し回数の検討を行っている。その結果、降伏変位に相当する変位ごとに载荷変位を漸増させてゆく一般的な正負交番载荷実験における各载荷ステップの繰り返し回数は、エネルギー吸収量の観点からタイプⅠ地震動では3回相当、タイプⅡ地震動では1回の繰り返し回数相当に該当すると報告されている。

一方、免震支承に対する繰り返し载荷実験では考慮すべき繰り返し回数として、従来からタイプⅠの地震動に対しては50回、タイプⅡの地震動に対しては15回とされている²⁾³⁾。これは、地盤面上の加速度

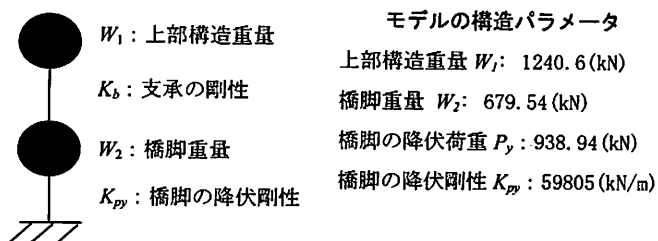


図-1 解析モデル

波形の主要動の繰り返し回数をもとに設定されたものであるが、地震応答時に実際に支承に作用する力は橋の地震応答によるため、文献1)と同様なアプローチにより橋の地震応答の繰り返し回数から設定する方が合理的と考えられる。また、平成23年東北地方太平洋沖地震では、従来と比べて継続時間が非常に長い地震動が観測されており、こうした地震動の場合における支承に生じる応答の繰り返し回数についても検討しておく必要がある。

以上のことから、本研究では、免震支承又は弾性支承で支持された橋を対象として、橋の地震応答時における積層ゴム系支承の繰り返し回数に着目した解析的な検討を行った。

2. 解析方法と結果の評価方法

(1) 解析条件

a) 解析モデル

本研究では、積層ゴム系支承に生じる地震応答の繰り返し特性を把握することを目的としていることから、解析モデルは複雑にせず図-1に示すような上

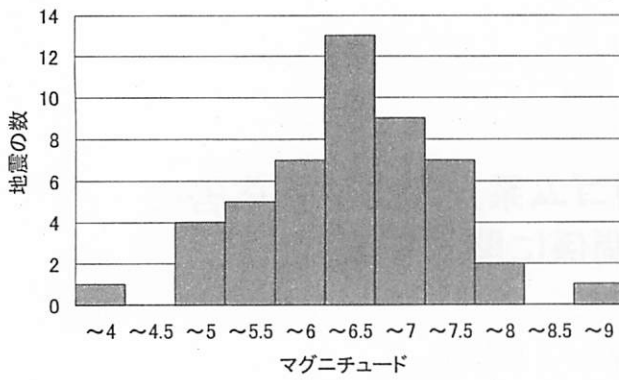


図-2 解析対象とした49の地震のマグニチュードの分布

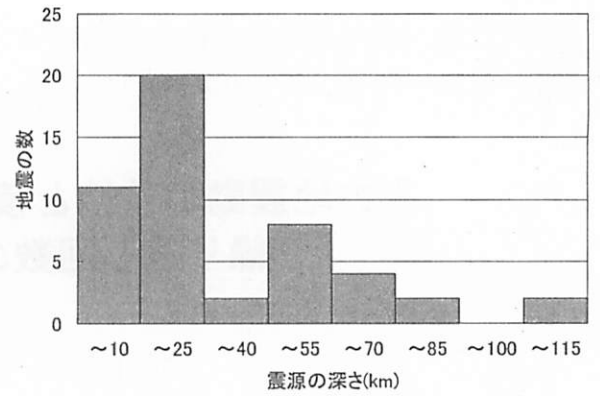


図-3 解析対象とした49の地震の震源の深さの分布

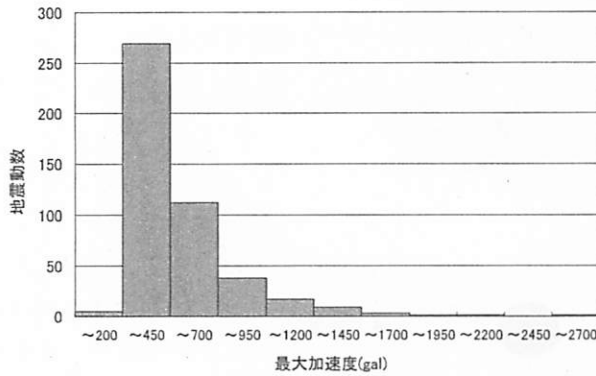


図-4 強震記録 456 成分の最大加速度の分布

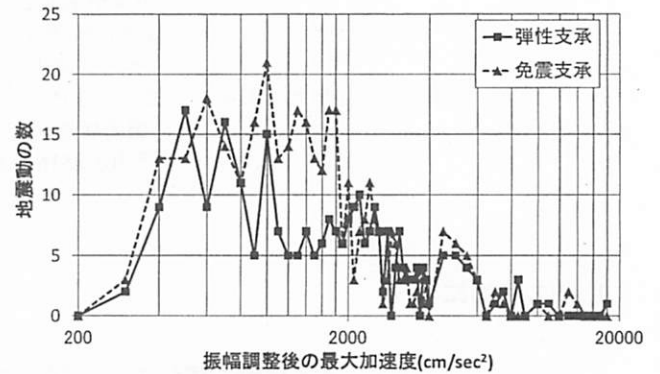


図-5 振幅調整した地震動の最大加速度と地震動の数（振幅倍率が10以下の結果）

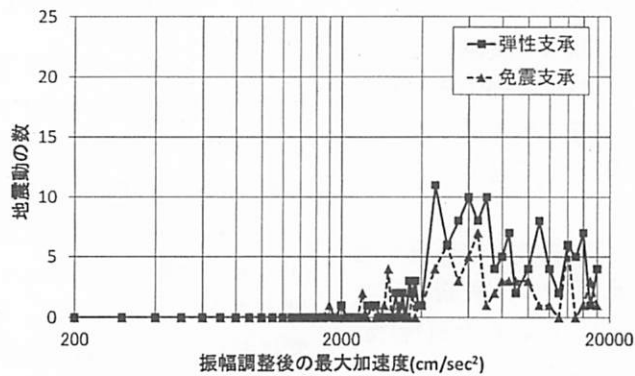


図-6 振幅調整した地震動の最大加速度と地震動の数（振幅倍率が10以上の結果）

部構造-支承-橋脚を模した2質点系モデルとし、基礎は固定条件とした。また、都市高架橋を想定し、支承を固定条件とした場合の下部構造の降伏剛性に基づく周期が0.33秒となるような系とし、下部構造の非線形性は武田型バイリニアモデルによりモデル化した。また、一般的な橋梁を考慮し、下部構造の降伏震度は支承を固定条件としたときの設計震度として0.58程度となるように設定した。弾性支承は線形モデルとし、免震支承はバイリニアモデルとした。免震支承のモデル化は設計式²⁾に基づいて切片荷重、1次剛性、2次剛性を設定した。ここで、免震支承の

モデル化を行う際のせん断ひずみは250%としている。支承の形状寸法は、レベル2地震動のタイプI、タイプII⁴⁾⁵⁾を入力した時刻歴応答解析によって支承に生じるせん断ひずみが、220%~250%程度となるように地盤種別ごと3種類設定した。このとき、積層ゴム系支承の2次形状係数は、一般に用いられる支承を考慮し5程度としている。時刻歴応答解析に用いる粘性減衰には、基本的にRayleigh型減衰モデルを用いたが、免震支承については当該部分の減衰マトリックスの値を0とした。ここで、Rayleigh型減衰モデルを設定する際には、橋脚に5%、弾性支承には

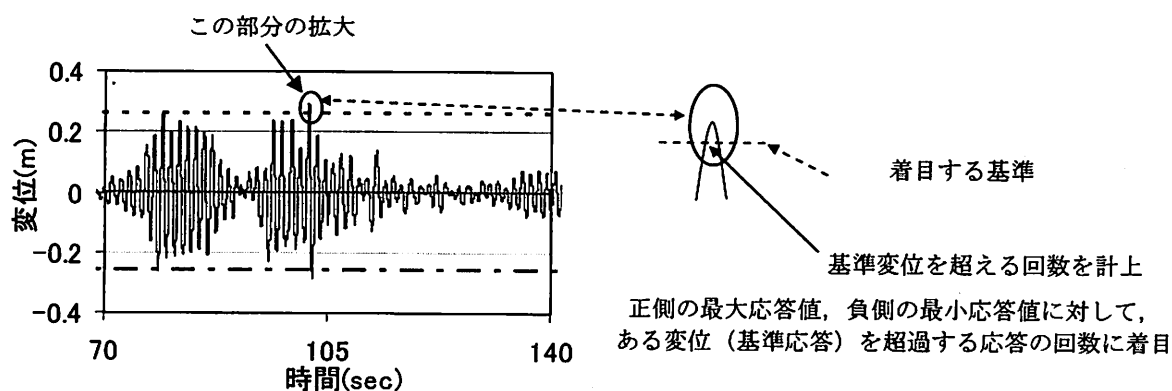


図-7 繰り返し回数を計上する方法

3%の減衰定数を考慮している。このように設定した解析モデルでは、支承の変形が卓越する1次モードの周期は、弾性支承では1.2秒～1.3秒であり、免震支承ではせん断ひずみ250%に相当する等価剛性に基づく設定した場合で1.3秒～1.7秒となる。

なお、レベル2地震動以外の地震動を入力する時解析では、ここで設定した支承の3種類のモデルのうち、I種地盤の地震動に対して設定したモデルを用いた。これは、これらの3種類の支承の中では一般に、I種地盤の地震動に対して設計された支承の形状が比較的小さく、耐力も小さいためである。

b) 入力地震動

本解析では、過去に我が国で実際に観測された456成分の強震記録に対して、これを振幅調整した地震動を入力することとした。さらに、設計照査に用いられる地震動における繰り返し特性の比較をするために、平成24年に改定された道路橋示方書・同解説に示される標準加速度応答スペクトルにスペクトル特性が合うように振幅調整された地震動を入力地震動とした解析も行った。

強震記録456成分は、1995年1月～2012年4月までに観測され、計測震度が5以上となった地点の地震動⁶⁾を選択した。これらの強震記録の中には兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震で観測された地震動も含まれている。これらの地震動の基になった地震は、図-2に示すように、マグニチュードが9から3.9までの範囲であり、震源の深さは図-3に示すような4kmから108kmの分布で、地震のタイプとしてはプレート境界型地震と直下型地震の双方が含まれている。また、456成分の地震動における最大水平加速度の分布は図-4に示すとおりであり、200～2700galの分布となっている。この地震動の中には、東北地方太平洋沖地震において観測された継続時間が非常に長い地震動も含まれている。

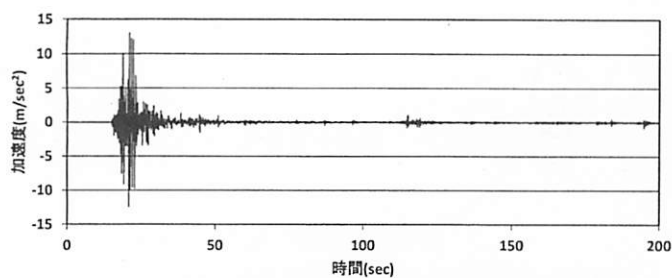
なお、456成分の地震動のうち、K-NETで観測され

た地震動を用いて時刻歴応答解析を行う際には、最初の14秒間の時系列の平均値に基づいて基線補正を行っている。

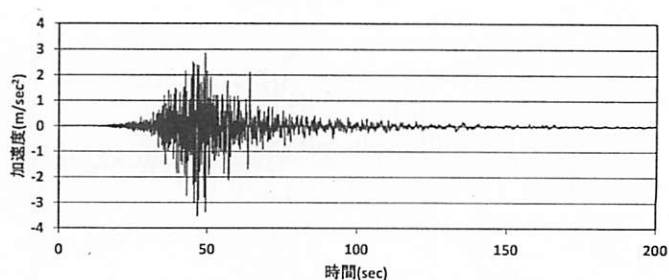
これらの456成分の地震動を用いた解析では、実際の地表による様々な地震動の特性が支承に生じる応答の繰り返し回数に及ぼす影響の検討を行うために、支承に生じる最大せん断ひずみが250%程度になるように地震動の振幅調整を行った。地震動の振幅倍率を456成分の地震動の最大加速度に乗じた値に対する地震動数の分布のうち、振幅倍率が10以下となった結果を図-5に、振幅倍率が10以上となった結果を図-6に示す。ここで本検討結果の整理では、入力地震動の振幅倍率が10倍以上となった成分（成分数：免震支承85，弾性支承177）は除外して繰り返し回数の評価を行った。これは、比較的振幅が小さい地震動に対して大きな倍率を乗じることは本研究の目的に照らして合理的な入力地震動の設定になっているとは言い難いためである。

そこで、ここでは、振幅倍率が10以下となった地震動（成分数：免震支承371，弾性支承279）を対象として、その度数分布を免震支承を用いた場合と、弾性支承を用いた場合とで比較した。免震支承を用いた場合の度数分布は、弾性支承を用いた場合の度数分布よりも大きな加速度の領域で度数が多くなっている。これは、免震支承の応答は履歴減衰により弾性支承の応答と比較して応答が小さくなるため、免震支承の応答において、せん断ひずみが250%程度の応答を得るためには、弾性支承に入力された加速度よりも大きな振幅倍率が必要となるためであると考えられる。

また、平成24年に改訂された道路橋示方書・同解説に示される標準加速度応答スペクトルにスペクトル特性が合うように振幅調整された地震動⁵⁾を入力地震動とした解析では、地震波の数は、タイプI，タイプIIともに、全ての地盤種別でそれぞれ3波とした。この場合は、設計で用いた地震動と同じであ

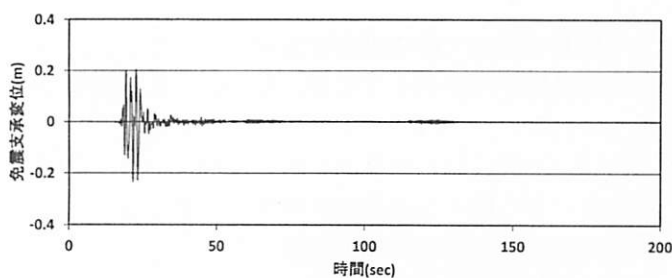


(a) K-NET 小千谷観測点 EW 記録 (2004 年新潟県中越地震)

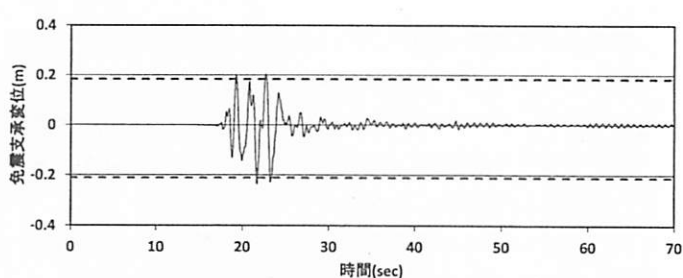


(b) K-NET 阿寒観測点 NS 記録 (2003 年十勝沖地震)

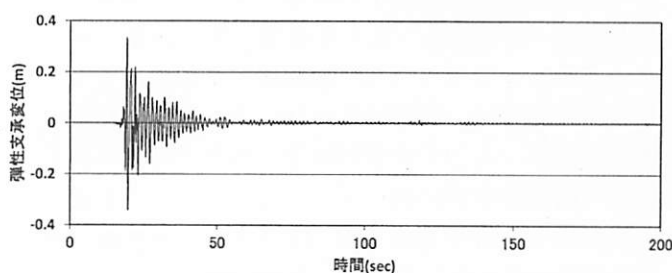
図-8 解析で用いた地震動の代表例



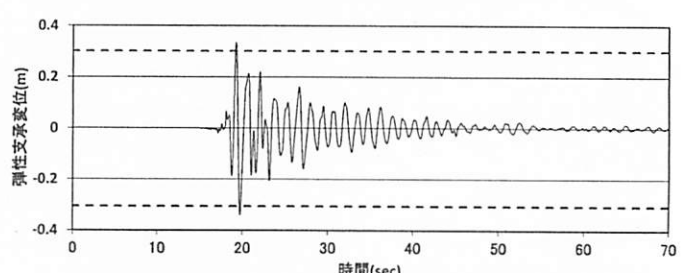
(a) 免震支承・地震動全体



(b) 免震支承・最大応答部分拡大

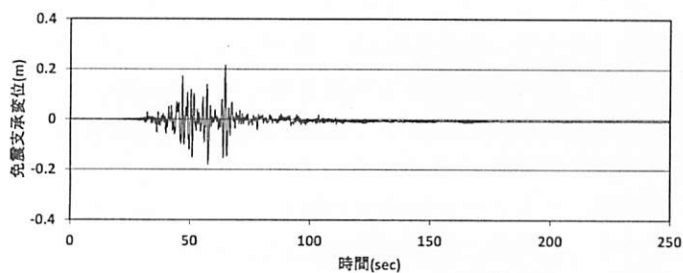


(c) 弾性支承・地震動全体

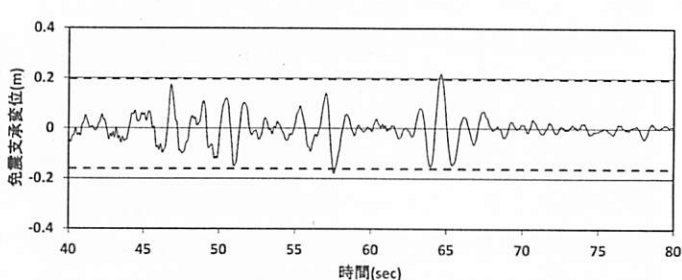


(d) 弾性支承・最大応答部分拡大

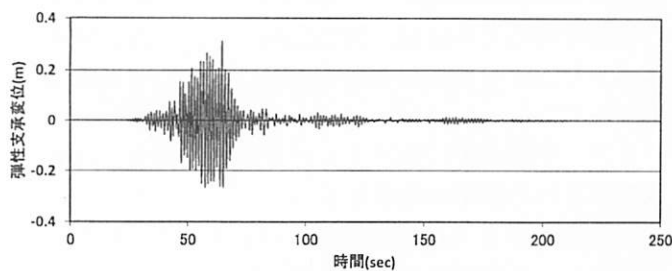
図-9 直下型地震動に対する積層ゴム系支承の応答変位の一例
(K-NET 小千谷観測点 EW 記録 2004 年新潟県中越地震)



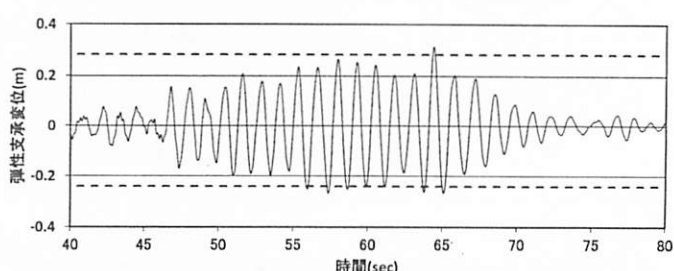
(a) 免震支承・地震動全体



(b) 免震支承・最大応答部分拡大

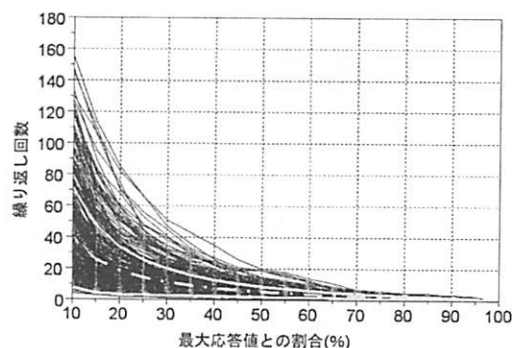


(c) 弾性支承・地震動全体

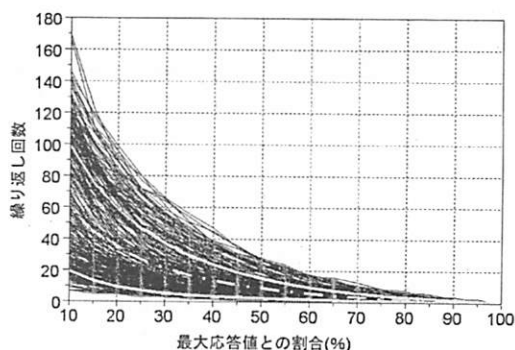


(d) 弾性支承・最大応答部分拡大

図-10 プレート境界型地震動に対する積層ゴム系支承の応答変位の一例
(K-NET 阿寒観測点 NS 記録・2003 年十勝沖地震)

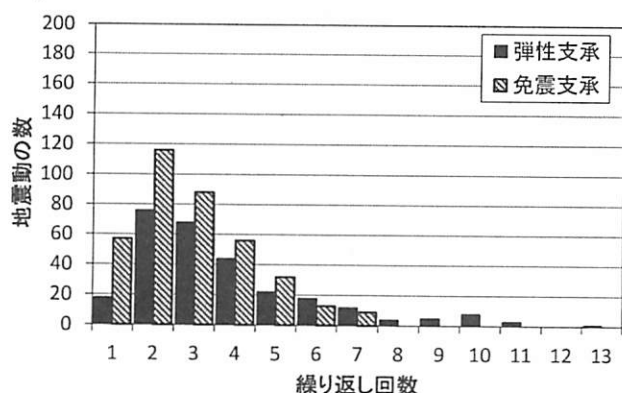


(a) 免震支承

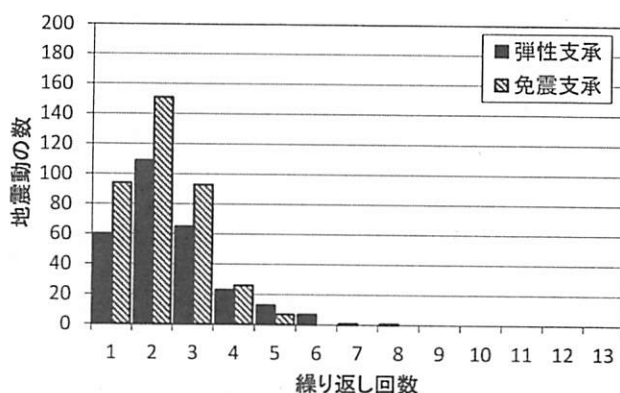


(b) 弾性支承

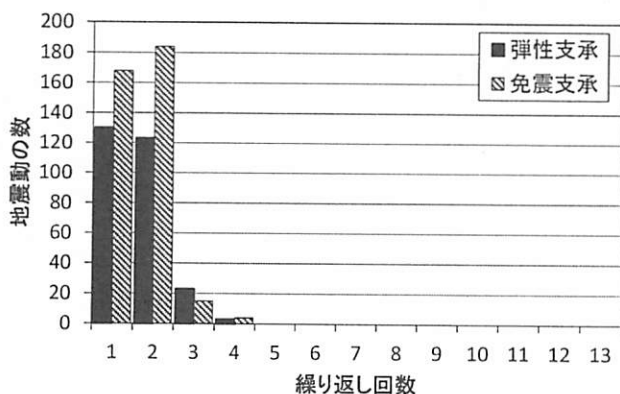
図-11 地震動における繰り返し回数の分布と平均値と平均値 $\pm 1\sigma$ の幅



(a) 最大応答の70%に相当する変位を超えた場合の分布



(b) 最大応答の80%に相当する変位を超えた場合の分布



(c) 最大応答の90%に相当する変位を超えた場合の分布

図-12 繰り返し回数を計数した値ごとの地震動の数の度数分布

り、支承に生じるせん断ひずみは220%~250%程度となるため、地震動の振幅倍率の変更はしていない。

(2) 時刻歴応答解析結果に基づく応答の繰り返し回数の計上方法

図-7は、時刻歴応答解析によって得られた支承の応答変位をもとに、応答の繰り返し回数を計上する方法を示したものである。すなわち、正側、負側それぞれである基準変位を設定し、その基準変位以上の応答が生じた回数を正側と負側で、それぞれで計上し、その平均値に対して小数点以下1桁を切り上げて回数を計上することにした。この計上方法によ

れば、一般的な積層ゴム系支承に対する繰り返し载荷実験において、正負交番に1回载荷することは繰り返し回数が1回と計上することになる。

なお、地震応答における支承の安定した挙動という観点から、支承の形状寸法を決定した時のせん断ひずみ相当の変位（最大応答）を基準変位として回数を計上するのがよいが、その変位に達するのは一般には1回だけとなるため、最大応答の90%に相当する変位を基準変位の例として検討した。さらに、参考のために最大応答の70%と80%の検討も行った。

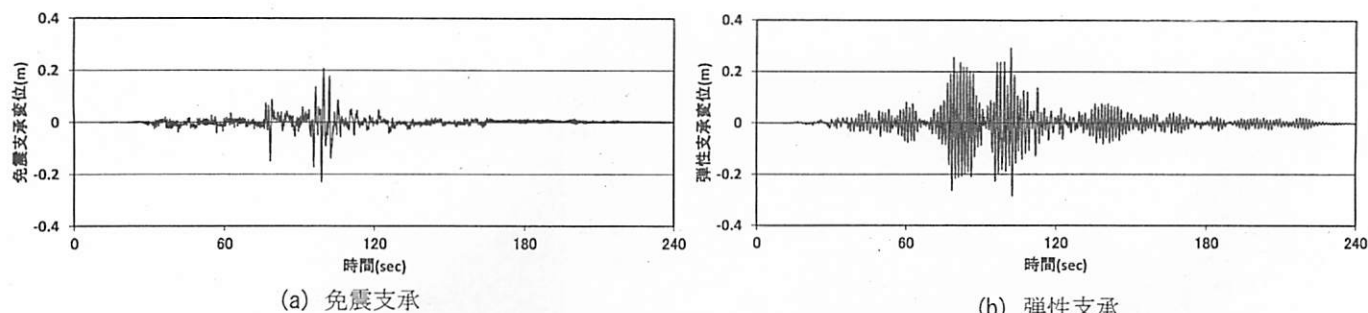


図-13 タイプⅠの地震動（Ⅰ種地盤 3 波目）に対する積層ゴム系支承の応答変位

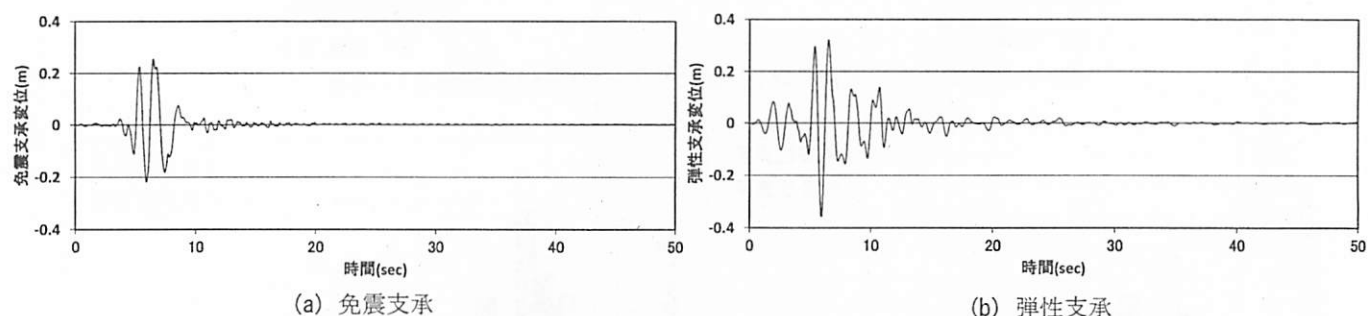


図-14 タイプⅡの地震動（Ⅲ種地盤 2 波目）に対する積層ゴム系支承の応答変位

表-1 最大応答の 90%に相当する変位を超える繰り返し回数

(a) 最大応答の 90%に相当する変位を超えた場合

地震動タイプ	地盤種別	1 波目		2 波目		3 波目	
		免震	弾性	免震	弾性	免震	弾性
タイプⅠ	Ⅰ種	1	2	2	1	1	2
	Ⅱ種	1	1	2	2	1	3
	Ⅲ種	2	2	1	2	2	1
タイプⅡ	Ⅰ種	1	1	2	1	1	2
	Ⅱ種	1	1	2	1	1	1
	Ⅲ種	1	1	1	2	1	1

(b) 最大応答の 70%に相当する変位を超えた場合

地震動タイプ	地盤種別	1 波目		2 波目		3 波目	
		免震	弾性	免震	弾性	免震	弾性
タイプⅠ	Ⅰ種	2	3	2	2	2	8
	Ⅱ種	2	3	4	7	2	6
	Ⅲ種	2	4	2	2	3	3
タイプⅡ	Ⅰ種	2	3	5	2	2	2
	Ⅱ種	1	2	2	3	1	2
	Ⅲ種	1	1	2	2	1	2

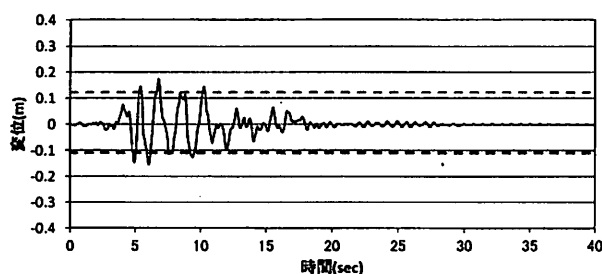
3. 解析結果

(1) 実際に観測された地震動による解析結果

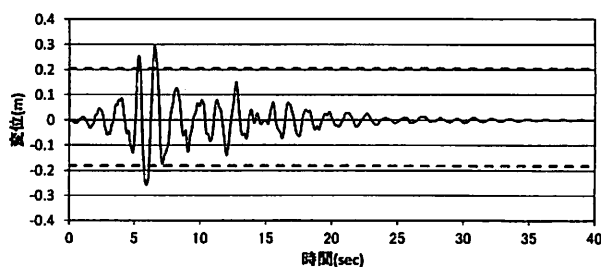
a) 代表的な時刻歴応答解析結果

図-8(a)は解析で用いた内陸直下型地震の例として 2004 年新潟県中越地震の K-NET 小千谷観測点 EW 記録, 図-8(b)はプレート境界型地震の例として 2003 年十勝沖地震の K-NET 阿寒観測点 NS 記録を示したものである. また, 図-9 に内陸直下型地震である 2004 年新潟県中越地震で, K-NET 小千谷観測点で観測された地震動の振幅倍率を調整した入力地震動に対して解析を行った結果を示す. 図-9(a), (c)に示す地震動全体の時刻歴応答から, 弾性支承と免震支承を比較すると, 免震支承は履歴減衰の効果により繰り返し回数は少ないが, 弾性支承は振動している時間が長く繰り返し回数が多い挙動となっていることが分かる. 図-9(b), (d)に最大応答が生じる時刻付近の拡大図を示す. この中で点線は, 繰

り返し回数の計上のために設定した最大応答の 90%に相当する基準変位を示している. ここから, 基準変位を越える回数は弾性支承では正負とも 1 回, 免震支承では正負ともに 2 回であり, 最大応答レベルの応答の繰り返し回数については弾性支承と免震支承では顕著な差が生じていない. 図-10 にプレート境界型地震である 2003 年十勝沖地震で, K-NET 阿寒観測点で観測された地震動の振幅倍率を調整した入力に対して解析を行った結果を示す. 図-10(a), (c)を見ると免震支承では, 弾性支承よりも繰り返し回数は少なくなっている. 図-10(b), (d)に示す拡大図から, 免震支承では基準変位を越えるのは正負で 1 回であるが, 弾性支承では基準変位を超えるのは負側の振幅で 7 回, 正側の振幅で 1 回である. この正負の回数を本研究での方法で計数すると繰り返し回数は 4 回となる. この結果から, K-NET 阿寒観測点での地震動を入力地震動とした場合には, 免震支承と弾性支承の繰り返し回数の差は 3 回となる.



(a) 免震支承の変位時刻歴



(b) 弾性支承の変位時刻歴

図-15 免震支承の繰り返し回数が弾性支承の繰り返し回数より多くなる変位時刻歴例

b) 繰り返し回数の度数分布

図-11 に 456 成分のうち、振幅倍率が 10 倍以下の地震動を解析した結果から得た支承の繰り返し回数の度数分布と、繰り返し回数の平均値と分散(平均値 $\pm 1\sigma$)を示す。ここで一点鎖線は平均値を示し、その上下に配置されている実線は平均値 $\pm 1\sigma$ を示している。図-11(a), (b)を比較すると、最大応答の 10%から 70%までの分布状況から、免震支承は弾性支承と比較して繰り返し回数の分布の幅は小さい。しかし、基準変位を最大応答の 80%以上とした場合の繰り返し回数は少なくなり、免震支承も弾性支承も類似した分布となっている。図-12(a), (b), (c)に最大応答の 70%~90%に相当する変位を超える繰り返し回数の値ごとの地震動の数の度数分布として示した結果を示す。最大応答の 70%に相当する変位を超える応答に着目し、免震支承の分布と弾性支承の分布と比較すると、免震支承は最大で 7 回程度の繰り返し、弾性支承は最大で 11 回の繰り返しが生じるケースがあり、弾性支承はその分布の幅が大きいことが分かる。また、最大応答の 80%に相当する変位を超える応答では、弾性支承では最大で 6 回程度の繰り返し、免震支承では 5 回程度の繰り返しである。両者ともに、最大応答の 70%に相当する変位を超える応答の分布幅と比較して小さくなり、免震支承も弾性支承も類似した分布となっている。そして、最大応答の 90%に相当する変位を超える応答で評価すると、免震支承、弾性支承ともに最大 4 回の繰り返しであり、両者ともほぼ同じような分布であることが分かる。

最大応答の 70%及び 80%に相当する変位を超える場合でみると、地震動の度数が最も多くなる繰り返し回数は 2 回であるが、そのばらつきは大きい。一方、最大応答の 90%に相当する変位を超える応答では、1~2 回の繰り返し回数が多く、またそのばらつきも小さくなっている。最大応答の 90%に相当する変位では、全体の地震動の数のうち、弾性支承では約 91%、免震支承では約 95%が繰り返し回数が 1~2 回であった。

(2) 道路橋示方書の標準加速度応答スペクトルにより振幅調整された地震動による繰り返し回数

図-13, 14にタイプⅠの地震動(Ⅰ種地盤3波目)とタイプⅡの地震動(Ⅲ種地盤2波目)に対する支承の応答変位の例をそれぞれ示す。タイプⅠの地震動は地震動の継続時間が長く、弾性支承では最大応答変位レベルの応答振幅が生じている時間も長い。一方、タイプⅡの地震動では、そのような弾性支承と免震支承の違いによる応答特性の差は顕著ではない。これは、タイプⅡ地震動の主要動はパルス的な地震動で、継続時間が短いと考えられる。

本研究で対象とした検討ケースに対する解析結果を図-7に基づいて支承に生じた応答の繰り返し回数を計数した結果を表-1に示す。最大応答の90%に相当する変位を超える繰り返し回数としては、タイプⅠの地震動が、継続時間が長いこと、タイプⅡの地震動を入力する場合よりも繰り返し回数は多い傾向にあるが、いずれのタイプの地震動であっても最大で3回であった。また、免震支承と弾性支承の最大応答の90%に相当する変位を超える繰り返し回数を比較すると、弾性支承の方がタイプⅠの地震動の場合において、1~2回程度、繰り返し回数が多い場合があるが顕著な差ではない。すなわち、支承部における履歴減衰の有無は、支承の性能に影響する最大せん断ひずみのレベルでは繰り返し回数に大きな影響を及ぼさないことを示しており、このことが、弾性支承と免震支承では繰り返し回数に顕著な差が生じない理由となっている。

一方、最大応答の70%を基準変位として着目し、支承に生じる応答の繰り返し回数を見ると、タイプⅠの地震動においては弾性支承と免震支承での繰り返し回数の違いが明確となり、弾性支承の方が、繰り返し回数が多く最大で8回となっていることがわかる。着目する基準変位を最大応答の70%に設定すると、弾性支承と免震支承の履歴減衰の有無による

応答の繰り返し特性の違いが分かる。ただし、タイプⅡ地震動のⅠ種地盤(2波目)では、免震支承で繰り返し回数が5回、弾性支承では繰り返し回数が2回となっており、免震支承の方が、繰り返し回数が多くなっている。この計算ケースの免震支承と弾性支承の変位時刻歴を図-15(a)、(b)に示す。ここで、図-15に示した点線は最大応答の70%の基準変位である。ここから、弾性支承の応答は最初の1波目で大きくなりその後の応答振幅は小さくなる挙動となっているのに対して、同一の入力地震動でも免震支承の応答は、ほぼ等しい振幅が数回繰り返した挙動となっている。このように、入力される地震動によっては、免震支承の場合の繰り返し回数が、弾性支承の場合の繰り返し回数よりも多くなることがある。

4. 結論

本研究では上部構造-支承-橋脚を模した2質点系モデルを用いて、様々な地震動に対する積層ゴム系支承の地震応答の繰り返し回数の関係を検討した。ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) これまで我が国で観測された様々な地震動を用いて支承の応答せん断ひずみが250%程度になるように振幅倍率を調整して解析を行った。その結果、最大応答の70%に相当する変位を超える繰り返し回数の地震動の度数分布は、弾性支承では繰り返し回数のばらつき免震支承と比較して大きい結果となった。一方、弾性支承と免震支承の最大応答の90%に相当する変位を超える繰り返し回数の地震動の度数分布を比較すると、両者ともほぼ同じ

であり地震動の数の最頻値は繰り返し回数にして1~2回であった。

- 2) 道路橋示方書の標準加速度応答スペクトルにより振幅調整された地震動に対して積層ゴム系支承に生じる応答の繰り返し回数を検討した。最大応答に達する繰り返し回数は、タイプⅠの地震動で弾性支承の方が免震支承と比較して多くなる傾向があるが、その差は顕著ではなく、1~2回程度であった。

謝辞：本報告で用いた456成分の地震動のうち444成分は、独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)で観測された波形を用いました。

参考文献

- 1) 星隈順一，運上茂樹：入力地震動の特性とRC橋脚に生じる塑性応答回数，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1243-1248，日本コンクリート工学会，2001。
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp.339-342，2002.3。
- 3) (財) 土木研究センター：道路橋の免震設計法マニュアル(案)，1992.12。
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2012.3。
- 5) (社) 日本道路協会ホームページ：
<http://www.road.or.jp/dl/waveform.html>。
- 6) 防災科学技術研究所強震観測網(K-NET)ホームページ：
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake>。