

1. 背景と目的

2003 年に発生した十勝沖地震は長周期の波動を多く含んでおり、典型的な海溝型巨大地震であった。その時、苫小牧市では石油タンクの火災が発生し、その原因としてこの地震動の長周期成分のためにスロッシングが起こったと見られている。一方、近年における発生が危惧されている東南海地震もまた海溝型巨大地震であり、長周期成分が卓越するものと考えられる。従って、名古屋などの大都市における固有周期が比較的長い構造物は大きな被害が出ると予想される。

そこで、本研究では地震動の周期特性が RC 構造物に与える影響を検証するために、固有周期の異なる鉄筋コンクリート造の土木構造物、建築構造物に対して長周期地震動と短周期地震動を入力し、地震応答解析を行った。

2. 土木構造物に対する解析

2-1 解析内容

本解析では解析対象とする構造物を橋梁とし、これに周期特性の異なる地震動を入力することで、地震動の周期特性の違いが土木構造物の耐震性に与える影響を検証する。また、この際に対象構造物の支承条件を替え、固有周期を変化させることで地震動の周期特性と構造物の固有周期との関連性も検証する。

2-2 解析方法

本解析では対象とする構造物を節点とはりから成る一方向の平面モデルとし、地震動加速度を入力加速度として一方向に入力し、離散型運動方程式を解くことにより地震応答解析を行った。数値解析には Newmark β 法を用いた。構造物の減衰定数に関してはレイリー減衰を用い、減衰定数は 2%とした。非線形要素の復元力モデルにはひび割れ限界、降伏限界、終局限界から成るトリリニアモデルを採用した。

解析対象のモデル化は径間が連続する部分全体を対象とする。それを桁、橋脚、支承から成るものとして簡略化し、桁には剛体要素、橋脚には横ばり部に剛体要素、柱部に非線形要素、免震分散支承には水平ばねを用いた。さらに、橋脚とフーチングの境界で起こる軸方向鉄筋の抜け出しによる変位の増加現象を非線形の回転ばねにより表現した。水平ばねに関して、免震支承では一次剛性と二次剛性を考慮した水平力-水平変位関係のバイリニアモデル、分散支承では線形ばねとした。

2-3 解析対象とする構造物

解析対象とする橋梁は図 1 に示すような 4 径間連続桁橋である。5 本の橋脚は全て鉄筋コンクリートであり、桁部は支承により支持されている。この支承を本解析ではピン支承、分散支承、ピン支承と変化させることにより、構造物の固有周期の変化が耐震性に与える影響も検証する。

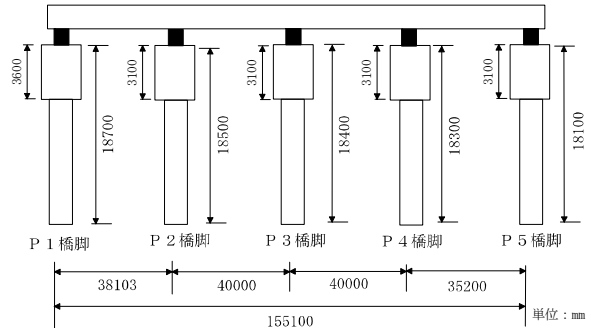


図 1 対象構造物の概要

2-4 入力地震動

入力地震動は長周期地震動として日本海中部地震、十勝沖地震（青森）、東海地震、東南海地震、兵庫県南部地震、想定東海東南海複合型地震（静岡）、短周期地震動として根室半島沖地震、鹿児島県北西部地震（大口）、十勝沖地震（室蘭）、鹿児島県北西部地震

（宮ノ城）、愛媛県西方沖地震、濃尾地震の加速度を用いた。ここで、本研究では地震動の周期特性による影響を検証することが目的であることから、地震動の最大加速度は同程度で卓越周期成分が長い地震動と短い地震動の組合せを考え、その解析結果を比較する。その組合せ、及び各地震動の概要を表 1 に示す。

表 1 入力地震動の概要

	地震波名	最大加速度 (gal)	卓越振動数 (Hz)	周期特性
ケース 1	a : 根室半島沖地震	150.52	4.4	短周期
	b : 日本海中部地震	143.83	0.667	長周期
ケース 2	c : 鹿児島県北西部地震 (大口)	192.73	4~6	短周期
	d : 十勝沖地震 (青森)	191.86	0.44	長周期
ケース 3	e : 十勝沖地震 (室蘭)	245.24	3.5~4.2	短周期
	f : 東海地震	238.03	1.22	長周期
ケース 4	g : 鹿児島県北西部地震 (宮ノ城)	391.91	1.7~2.1, 4.5	短周期
	h : 東南海地震	396.35	1.05	長周期
ケース 5	i : 愛媛県西方沖地震	529.85	4.12	短周期
	j : 兵庫県南部地震	541.58	1.5~2.3	長周期
ケース 6	k : 濃尾地震	767.87	5.1~5.3	短周期
	l : 想定東海東南海複合型地震 (静岡)	745.50	1.2~1.4	長周期

※地震波名の括弧内は観測地点名

2-5 被害の面から見た解析結果と考察

本節では、各支承使用時における構造物の被害に対して地震動の周期特性が与える影響について検証する。

まず、各支承使用時の固有値解析結果を表2に示す。続いて、解析結果の例として免震支承使用時のケース6における時刻歴塑性率図を図2に、地震応答解析結果を表3に示す。表3では各支承使用時の最大変位とP1橋脚における作用力のみ解析例として示した。図2からも確認できるように、免震

支承、分散支承使用時において、ほとんどのケースで最大変位、Mmax、塑性率、Smaxが短周期地震動のときより長周期地震動のときのほうが大きな値となった。しかし、ピン支承使用時では明確なそのような傾向が見られない。これは、免震支承、分散支承使用時のような比較的固有周期の長い免震橋と長周期成分が卓越した地震動との共振が原因であると考えられる。

表2 各支承使用時の固有値

支承条件	固有振動数(Hz)	固有周期(s)
免震	0.467	2.142
分散	0.668	1.497
ピン	3.108	0.322

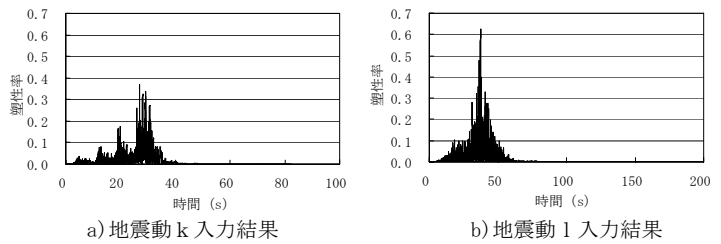


図2 免震支承使用時におけるケース7の時刻歴塑性率

表3 各支承使用時の地震応答解析結果

地震波	ケース1		ケース2		ケース3		ケース4		ケース5		ケース6	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
支承条件	免震支承											
変位(cm)	3.01	5.85	1.82	8.18	3.24	4.13	3.64	6.61	4.99	9.20	5.31	15.90
Mmax(tf・m)	3062	3638	4686	4882	3958	6342	9706	11520	10580	12540	12140	16140
Smax(tf)	254	281	327	368	340	473	814	748	868	1183	1337	1131
塑性率	0.050	0.060	0.076	0.080	0.062	0.092	0.153	0.184	0.226	0.300	0.298	0.292
支承条件	分散支承											
変位(cm)	10.60	27.98	3.80	28.67	14.08	10.90	4.12	19.45	8.38	15.80	11.80	43.40
Mmax(tf・m)	6592	16320	5988	16300	9016	28100	14100	24800	14040	21652	22120	22180
Smax(tf)	423	1021	465	979	576	868	953	909	1181	1362	1532	1129
塑性率	0.110	0.522	0.100	0.524	0.172	1.302	0.942	1.312	0.406	0.560	0.298	0.752
支承条件	ピン支承											
変位(cm)	1.90	1.04	1.83	1.94	1.88	3.17	4.12	4.28	6.11	5.91	6.43	6.22
Mmax(tf・m)	18300	13080	17560	18400	18120	24700	28140	28140	28260	28260	28360	28200
Smax(tf)	1164	844	1112	1164	1193	1442	1734	1803	2079	2283	1909	2329
塑性率	0.534	0.302	0.508	0.542	0.626	0.744	1.302	1.402	3.518	3.106	3.824	4.184

2-6 橋脚への負担低減効果からみた解析結果と考察

本節では、各支承使用時における地震時の下部工の負担低減効果に対して地震動の周期特性が与える影響について検証する。そこで、橋脚下端部でのMmax、塑性率、Smax値に関するそれぞれの免震支承使用時、分散支承使用時の値とピン支承時の値の比を変化率とし、これを用いる。この変化率が小さいほど免震支承による効果が大きいということになる。例としてケース1,2の解析結果を表4に示す。

解析結果より、短周期地震動の時よりも長周期地震動の時の方がほとんどのケースで低減効果が小さくなっている。これは、免震支承使用時、分散支承使用時の固有周期が比較的長く、長周期地震動と共振して変位が増大し、その分橋脚にかかる作用力も大きくなるのが原因の一つであると考えられる。また、免震支承使用時、分散支承使用時の変化率を比較すると、前者よりも後者の方が低減効果が少なくなっており、中には1.0を超えたものも見られる。これは他のケース3~4でも同様なことが言えた。これは、支承条件をピンから免震、分散にすることによる固有値の長周期化の度合いが分散より免震の方が大きいことが関係していると考えられる。すなわち適度な長周期化が橋脚にかかる負担の低減にとって重要であると考えられる。

2-7 免震支承の働きからみた解析結果と考察

本節では免震支承の働きそのものに着目して検討してみる。免震橋は、上部構造と下部構造間の相対変位が生じやすくすることにより橋に作用する地震力の低減を図るものであることから、上部工と下部工の変位量の比を見つめる。ここで、上部工変位は免震支承上端部、下部工変位は免震支承下端部の変位を用いる。検証には、地震時の上部工、下部工の最大変位の絶対値をそれぞれX、Yとし、その比Y/Xを用いる。この値が小さいほど免震支承の働きがよく、免震支承における地震時の変位集中度は大きいこととなり、免震効果は大きいといえる。その結果を表5に示す。

表5より、ケース4つの内3ケースが長周期地震動の時の方が短周期地震動の時よりY/Xが大きく、免震支承の効果は小さくなっている。全ケースを見た場合

表4 ケース1,2の変化率一覧

a) 免震支承使用時とピン支承使用時の比

ケース	1		2	
	a	b	c	d
Mの変化率	0.106	0.185	0.168	0.192
Sの変化率	0.167	0.261	0.226	0.232
Φの変化率	0.112	0.218	0.170	0.164

b) 分散支承使用時とピン支承使用時の比

ケース	1		2	
	a	b	c	d
Mの変化率	0.231	0.893	0.225	0.597
Sの変化率	0.291	0.993	0.324	0.647
Φの変化率	0.244	2.291	0.238	1.324

表5 ケース1,2のY/X,最大変形量一覧

a) 免震支承使用時の結果

ケース	ケース1		ケース2	
	a	b	c	d
Y/X	0.273	0.382	0.597	0.354
最大変形量(cm)	2.189	3.619	0.732	5.283

b) 分散支承使用時の結果

ケース	ケース1		ケース2	
	a	b	c	d
Y/X	0.203	0.467	0.416	0.456
最大変形量(cm)	8.436	14.900	2.217	15.586

でも多くのケースが同様の結果になって、免震橋に期待される地震時の免震支承における変位集中度に関して小さくなっていった。一方、最大変形量は免震支承使用時では長周期地震動時のほうが短周期地震動時より大きな値となっており、他のケースでも同様であった。これは、共振によって上部工の変位が増大する分免震支承の変形も大きくなるのが原因であると考えられるが、このことから、上部工の変位を免震支承で吸収し下部工に伝わる変位を抑えるという点に関しては、長周期地震動時であっても免震支承によるメリットはあるといえる。

3. 建築構造物に対する解析

3-1 解析内容

本解析では様々な周期特性の地震動に対するRC造の建築構造物の挙動を捉えることで地震動の周期特性が建築構造物の耐震性に与える影響を検証する。そこで、本解析のように数多くの地震波や復元力特性に対する応答を比較する場合、2節のように多自由度のモデル化は不向きであるため、まず、構造物を一自由度系に縮約することを考え、それを用いて地震応答解析を行う。なお、地震応答解析における計算は2節と同様の方法を用いる。

3-2 一自由度系の定式化

構造物について図3(a)のようなシンプルなモデルを考え、これと等価な質点2つ、要素1つからなる一自由度系の図3(b)についてモデルの定式化をする。復元力特性は文献[2]を参考に図4のようなトリリニアモデルを採用する。ここで、地震加速度が作用する際、運動方程式において理論上質量が全てキャンセルされるので、本解析では簡単のため、建物の質量を1(t)として解析を行う。よって、構造物のパラメータは建物の高さによる剛性、荷重-変位曲線により決定するものとする。

図4の荷重-変位曲線について、建築基準法や日本建築学会で示されているRC造建築物の建物高さ h と固有周期 T の推定式 $T=0.020h$ と比較すると図5のようになった。①が $T=0.02h$ 、②が図4の採用復元力特性より得られた曲線である。これより、図4の採用復元力特性を用いることは建物高さが低層から中層と言え $0m$ から $40m$ 辺りまでは精度の高い固有周期が得られるが、 $40m$ 以上の高層の解析になってくると固有周期の誤差は広がり、正確な解析が困難になると言える。

よって、本解析ではこの誤差を解消するために周期を $T_a=0.02h$ より求め、それにより構造物のパラメータである初期剛性、荷重-変位関係を導き使用することとする。

3-3 一自由度系定式化についての解析試験

本節では以上による定式化によって地震応答解析を行い正確な値が得られるかの確認をする。方法は対象とする建築構造物に対して、上記の一自由度系として解析する方法と2節のように多自由度系としてモデル化して解析する方法でそれぞれ地震応答解析を行い、両者が等しくなるか否かで確認する。

対象構造物はRC造の地上2階建ての建築構造物を用いる。入力地震動は最大加速度 $536.8(ga)$ 、卓越振動数 $4.5\sim 4.8(Hz)$ である濃尾地震動をそれぞれに入力する。

この条件の下行った地震応答解析より得た一自由度系、多自由度系の時刻歴変位図を図6に示す。図6の波形より両者が近い挙動を示していることがわかる。さらに履歴曲線、応答スペクトルを確認したところ、これらはほぼ一致していた。これは

同様に他2種類の地震動を入力した場合でも同じことが言えた。よって、3-2で示した一自由度系の定式化、地震応答解析によって信憑性の高い結果が得られることが言える。

3-4 地震動の周期成分と構造物の固有周期の関係の検証

(解析内容)

本節では構造物を以上で示した方法により構造物を一自由度系としてモデル化し、地震動の周期成分と構造物の固有周期の関係を検証する。

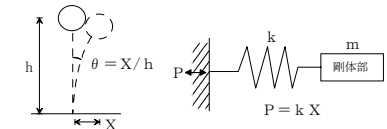


図3 対象構造物の概念図

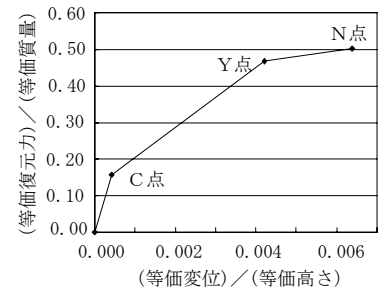


図4 各限界状態点

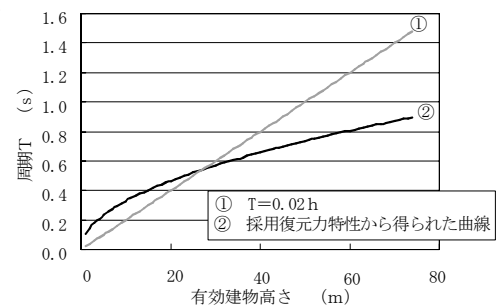
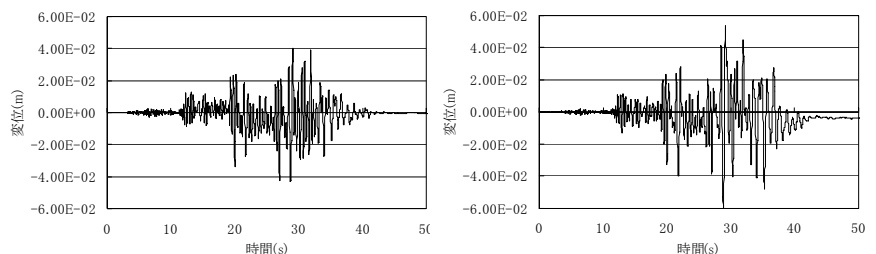


図5 建物高さ h と固有周期 T の関係式の比較



a) 一自由度系

b) 多自由度系

図6 時刻歴変位図

(解析対象)

構造物は固有周期 0.2,0.6,1.0,1.4(s)の4タイプを採用する。4-2 で述べた通り推定式 $T=0.02h$ より建物高さを決め、そこから各限界状態点を決定する。よって、建物高さは 10,30,50,70(m)の4タイプということになる。地震波は 119 成分の地震動を用い、卓越周期が 1.0 を越えるものを長周期地震動、越えないものを短周期地震動と呼ぶこととする。内訳は長周期地震動 42 成分、短周期地震動 77 成分であった。また、地震動それぞれの強さを排除するために計測震度を揃える。

(解析方法)

解析方法は上記のように計測震度ごと異なる固有周期を持つ4タイプの建築構造物に対して長周期地震動、短周期地震動を与えることで検証する。即ち、固有周期 0.2,0.6,1.0,1.4(s)の構造物に対してそれぞれ計測震度を 4.0 から 7.0 まで 0.1 刻みで変換した長周期地震波 49 成分、短周期地震波 70 成分を与え、建物4タイプ×計測震度 31 タイプ×地震波 119 成分の計 14756 ケースの地震応答解析を行う。これより得られた最大変位より破壊割合を算出し、この破壊割合を用いて地震動の周期特性の違いが構造物の被害に与える影響を検証する。ここで、破壊割合は最大応答変位を変形限界で除して 1.0 を上回った(破壊した)個数を、全体の個数で除した値である。

(解析結果と考察)

解析結果として固有周期 0.2,0.6,1.0,1.4(s)の構造物に、長周期地震動 42 成分、短周期地震動 77 成分をそれぞれ入力した時の計測震度と

破壊割合の比較図を図 8 に示す。その中から例として、計測震度 5.5 の長周期地震動、短周期地震動を $T=1.0(s)$ の構造物に与えた時の履歴曲線を図 7 に示す。図 7 より短周期地震動の時より長周期地震動の時の方が被害が大きく出ていることがわかる。続いて図 8 を見てみると、固有

周期 $T=0.2(s)$ では長周期地震動入力時より短周期地震動入力時の方が破壊しているケースが多く見られるが、 $T=0.6, 1.0, 1.4(s)$ と固有周期が長くなるに連れて短周期地震動入力時より長周期地震動入力時の方が相対的には破壊割合が大きくなっていることがわかる。これは長周期地震動入力時には構造物が地震動と共振することで被害が大きくなり破壊するケースが増えたことに起因すると考えられる。また、長周期地震動入力時、短周期地震動入力時ともに固有周期が長くなることで破壊割合が小さくなっているが、これは構造物が柔構造化したためと考えられる。

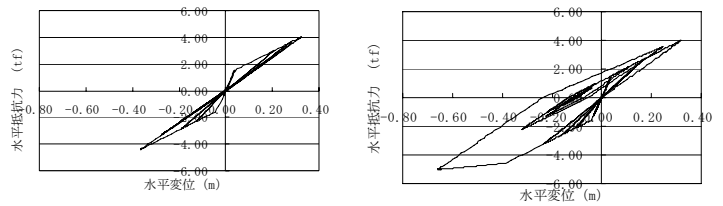
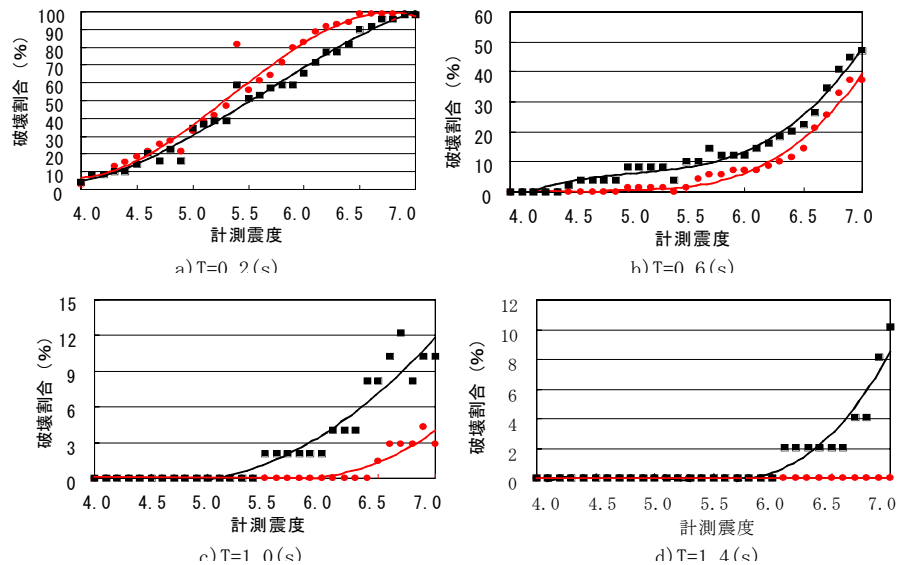


図 7 計測震度 5.5 におけるの $T=1.0(s)$ の構造物の履歴曲線



● 短周期地震動 — 短周期地震動の近似曲線
■ 長周期地震動 — 長周期地震動の近似曲線

図 7 計測震度と破壊率の関係図

4. まとめ

本研究では地震動の周期特性が RC 造の土木、建築構造物の耐震性に与える影響を検証した。それにより、土木構造物について、免震効果のある支承を用いた橋梁のように比較的固有周期の長い構造物では、短周期地震動の時より長周期地震動の時の方が橋脚に働く作用力が大きくなり被害が大きくなる傾向があることや支承自体の免震効果、変位集中度が小さくなる傾向が見られた。建築構造物についても、高層ビルのように比較的固有周期の長い構造物では、短周期地震動の時より長周期地震動の時の方が破壊に至るケースが大きくなる傾向が見られた。以上のことは土木構造物、建築構造物いずれの解析においても、比較的固有周期の長い構造物が長周期地震動と共振し、変位が増大することで被害が大きくなり、免震効果を低減させたと考えられる。

参考文献

- [1] 社団法人日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、社団法人日本道路協会、2002.2
- [2] 青山博之著：鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計法、技報堂出版、1990