

山口県で観測された地震波の特性に関する検討

麻生稔彦 (社会建設工学科) 重村和成 (環境共生工学専攻)

A Study on Characteristics of Seismic Wave Observed in Yamaguchi Prefecture

Toshihiko ASO (Department of civil engineering)

Kazunari SHIGEMURA (Division of symbiotic environmental system engineering)

In recent years, large earthquakes such as Tottoriken seibu earthquake and Geiyo earthquake occurred in Chugoku area. The characteristics of seismic wave are different in every area. In order to carry out the rational seismic design of structures, it is necessary to clarify the characteristics of seismic wave in each area. This paper aims to clarify the characteristics of the seismic wave in Yamaguchi Prefecture using the acceleration response spectrum. From the results of this investigation, simulated seismic wave was made. From the comparison of earthquake response analysis of the bridge using simulated wave and standard wave, the necessity of the setting of the seismic wave considering regional characteristics was shown.

Key Words: seismic wave, acceleration response spectrum, simulated seismic wave, earthquake response analysis

1. はじめに

地震が多発する我が国においては、土木構造物の耐震安全性を確保することは非常に重要な問題である。耐震設計で用いる地震動の特性は地域により異なると考えられるものの、道路橋示方書¹⁾では標準地震波に地域別補正係数を乗じることで地域性を考慮するにとどまっている。合理的な耐震設計を行うには各地域ごとの地震動の特性に配慮することが望ましく、適切な地震波の選定を行うことが重要であると考えられる。さらには、今後の耐震設計が性能照査型設計に移行していくことも考えられる。これに対応するためには、構造物を建設する地域についてあらかじめ地震動の特性を明らかにし、目標とすべき地震動を設定する必要がある。

また、兵庫県南部地震や鳥取県西部地震を契機として住民の地震に対する安全・防災意識も非常に高まっている。そのため、自治体は住民へ居住地域での既往地震および主要構造物の耐震安全性等を説明する必要性が増大するものと考えられる。

このような現状を背景として、本研究では合理的な地震防災計画および構造物の耐震設計を行う上での基礎資料を得るために、山口県の地震動の特性を明らかにする

ことを目的とする。地震動の特性は加速度応答スペクトルで評価することとし、道路橋示方書の加速度応答スペクトルと比較・検討する。これにより、現在は全国一律に用いられている道路橋示方書による加速度応答スペクトルの適用性を検討する。また、今回明らかにする山口県の地域特性を考慮した加速度応答スペクトルを目標スペクトルとして山口県での耐震設計用模擬地震波を作成し、橋梁の地震応答解析を実施した。この地震応答解析結果より、現行の標準地震波を用いた場合との差を明らかにする。

地震動の特性は地震の規模にも大きく依存すると考えられる。そこで、今回は地震規模によりマグニチュード3.0~7.0の地震により観測された地震波と、マグニチュード7.0以上の地震による地震波をそれぞれ用いて、地震波の特性を検討する。なお、本研究で用いる地震波は防災科学研究所による強震ネット(k-net)および基盤強震ネット(kik-net)による観測記録を使用する。

2. 地震記録

(1) 地震観測点

本研究に使用する地震波データは、防災科学技術

Table 1 k-net sites in Yamaguchi prefecture

	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Ground type
YMG001 Susa	34.6141N	131.6044E	5.5	II
YMG002 Hagi	34.4041N	131.4011E	2.0	I
YMG003 Ikumonaka	34.3797N	131.6027E	286.0	I
YMG004 Nagato	34.3677N	131.1844E	6.3	I
YMG005 Hohhoku	34.2872N	130.9508E	58.2	I
YMG006 Toyoura	34.1458N	130.9322E	5.3	II
YMG007 Mine	34.1625N	131.2088E	90.0	I
YMG008 Yamaguchi	34.0088N	131.4066E	4.0	I
YMG009 Kano	34.2286N	131.8194E	375.0	I
YMG010 Mikawa	34.2272N	131.9847E	65.0	I
YMG011 Shimonoseki	34.0661N	131.0238E	24.5	I
YMG012 Ube	33.9908N	131.2205E	2.1	II
YMG013 Hohfu	34.0277N	131.5372E	3.0	II
YMG014 Tokuyama	34.0511N	131.8102E	15.0	II
YMG015 Kuga	34.0933N	132.0783E	63.5	I
YMG016 Iwakuni	34.1666N	132.1791E	7.0	II
YMG017 Yanai	33.9616N	132.1036E	2.0	III
YMG018 Tohwa	33.9058N	132.3586E	2.0	II
YMG019 Kaminoseki	33.8355N	132.1230E	90.0	I

Table 2 kik-net sites in Yamaguchi prefecture

	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Depth (m)	Ground type
YMGH01 Houfu	34.0245N	131.3351E	34.0	200	I
YMGH02 Mine	34.0628N	131.0845E	65.0	200	II
YMGH03 Iwakuni	34.1108N	132.0743E	90.0	200	I
YMGH04 Syuutou	34.0123N	132.0355E	170.0	100	I
YMGH05 Mikawa	34.1140N	131.5948E	66.0	200	I
YMGH06 Ube	33.5907N	131.1811E	93.0	200	I
YMGH07 Kikugawa	34.0643N	131.0308E	10.0	200	II
YMGH08 Toyoura	34.0752N	130.5606E	47.0	201	II
YMGH09 Tamagawa	34.3723N	131.4010E	15.0	100	II
YMGH10 Mutsumi	34.2850N	131.3806E	365.0	200	I
YMGH11 Tokuji	34.1221N	131.4118E	120.0	200	I
YMGH12 Mitou	34.1252N	131.2143E	150.0	102	-
YMGH13 Nagato	34.2017N	131.1048E	47.0	200	-

研究所の強震ネット(k-net)および基盤強震ネット(kik-net)のホームページ上で公開されているものを用いた。k-net は地震工学および地震学の発展に必要な強震記録を得るために全国展開されたもので、25km メッシュごとに1地点を全国均等に配置することを基本としており、全国1000ヶ所に自由地盤上の強震観測点を建設、ネットワーク化したものである。観測記録は一般電話回線を通じて観測センターに送られる。送られた記録はインターネットを通じて公開されており、各観測点の地盤情報、波形記録、最大加速度分布、地震計の特性などが容易に取り出すことができる。また、k-net が地表面でのみの観測であるのに対し、kik-net では地下100~200mの地中においても地震波を観測している。k-net は山口県内に19観測点があり、観測点の位置はTable 1の通りである。一方、kik-net はTable 2に示す13観測点が山口県内に設置されている。なお、これらの表にある各観測点の地盤種別は、道路橋示方書による方法に従って区分した。Table 1よりk-netの観測点はI種地盤が11カ所、II種地盤が7カ所、III種地盤が1ヶ所である。またTable 2よりkik-netではI種地盤が7カ所、II種地盤が4ヶ所となっている。なお、kik-netのYMGH12とYMGH13では地盤状況が公開されていないため地盤種別は不明である。III種地盤での地震記録数が少ないため、本研究ではI種地盤およびII種地盤のみを検討対象とする。

(2) 観測地震波記録

地震波記録は、k-net および kik-net の地表地震計により観測されたものを用いる。今回はこれらの観測点にお

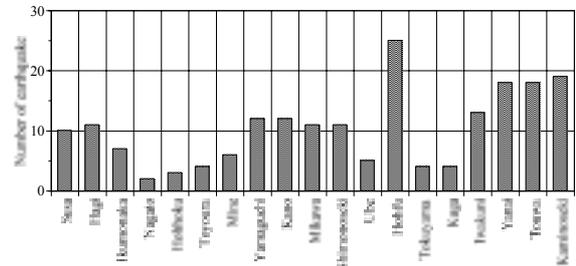


Fig.1 Number of observed earthquake

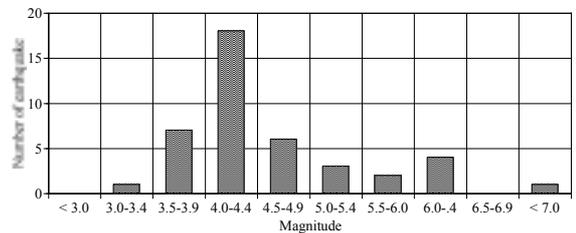


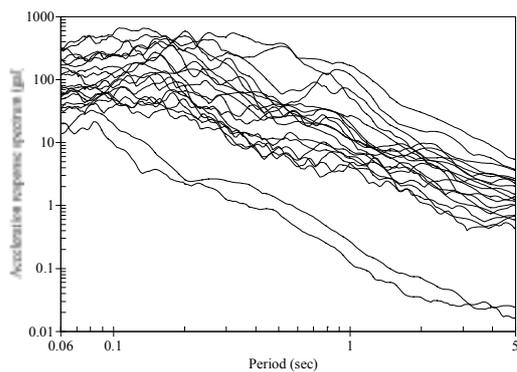
Fig.2 Relationships between number of observed earthquake and magnitude

いて1997年1月~2000年10月までに観測された地震波を対象とする。Fig. 1はk-netの各観測点において観測された地震の個数を示したものである。防府において観測された地震が最も多く、全体的には山口県南部の瀬戸内海沿岸で多く観測されている。また、Fig. 2にマグニチュード別に地震波の個数を表すと過去4年間ではマグニチュード5以上は少なく3.5~5.0の範囲に多いことがわかる。

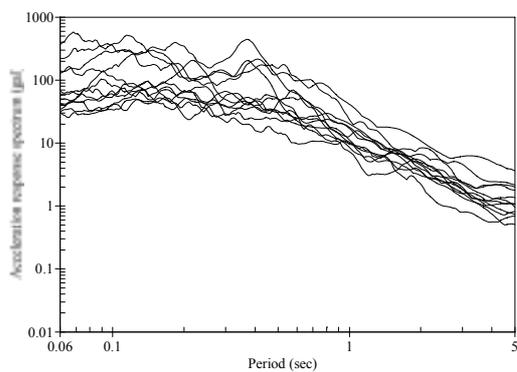
3. 加速度応答スペクトル

山口県の地震動の特性を加速度応答スペクトルより検討する。

地震波の周波数成分は地震規模により異なると考えられる。山口県で観測された地震波は多くがマグニチュー



(a) Ground Type I



(b) Ground Type II

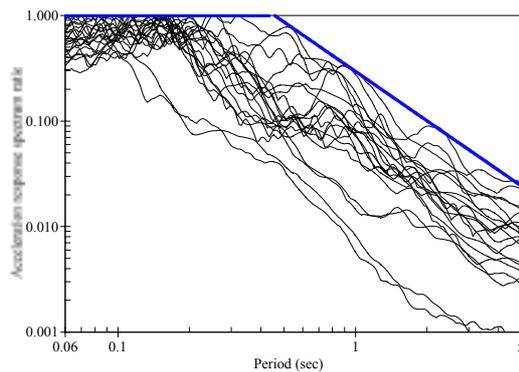
Fig.3 Acceleration response spectrum ($3.0 < M_j < 7.0$)

ド6.5未満であり、2000年10月に発生した鳥取県西部地震のみがマグニチュード7.0を超えている。そこで、加速度応答スペクトルについてもマグニチュード7.0を境として、地震規模ごとに検討を行う。

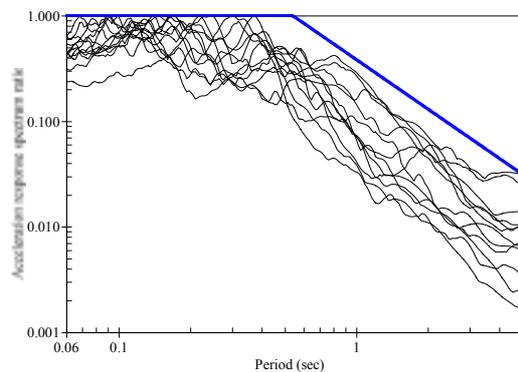
(1) マグニチュード3.0~7.0の場合

Fig.3はマグニチュード3.0以上7.0未満の地震について地盤種別ごとに各観測点で観測された上位2つの加速度時刻歴より得られた加速度応答スペクトルを重ねて示したものである。重ねて示しただけでは地震強度にばらつきがあるので、加速度応答スペクトルの大きさが異なり、この状態では地震動の特性を検討することは困難である。

そこで、各地震波の加速度応答スペクトルの最大値でそれぞれのスペクトル値を除すことによりスペクトルの縦距を基準化する正規化を行う。この正規化により、スペクトルの形状比較が可能となる。Fig.4に正規化後の加速度応答スペクトル比を地盤種別ごとに示す。これらの図より、加速度応答スペクトル比はある周期を境に減少



(a) Ground Type I



(b) Ground Type II

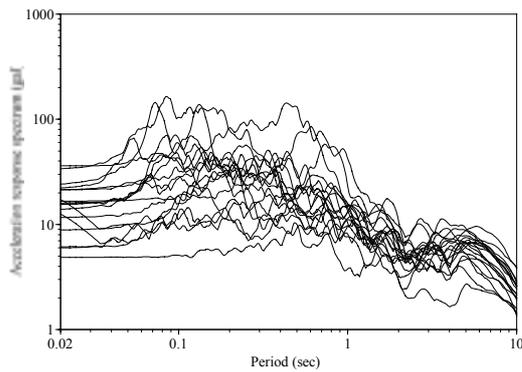
Fig.4 Acceleration response spectrum ratio ($3.0 < M_j < 7.0$)

していく傾向を示していることがわかる。構造物の設計を考える場合、その設計条件は常に危険側に想定すべきと考えられるので、全周期での最大スペクトル比を網羅するように包絡線を引くことが望ましい。I種地盤、II種地盤についての包絡線の結果をFig.4に示している。この包絡線が耐震設計を行う上で考慮すべき加速度応答スペクトルの形状となる。

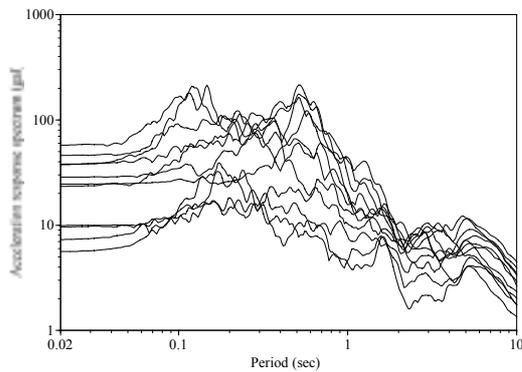
(2) マグニチュード7.0以上の場合

Fig.5はマグニチュード7.0以上の地震について地盤種別ごとに得られた加速度応答スペクトルを重ねて示したものである。なお、本研究で対象とした過去4年間に発生したマグニチュード7.0以上の地震は、2000年10月6日の鳥取県西部地震のみである。

マグニチュードが7.0未満の場合に比べ、加速度応答スペクトルの形状はばらつきが少ないものの、観測地点ごとに最大加速度が異なるため、前回と同様に比較のための正規化を行う。Fig.6は正規化後の応答スペクトルである。さらに、これらの加速度応答スペクトルを包絡す

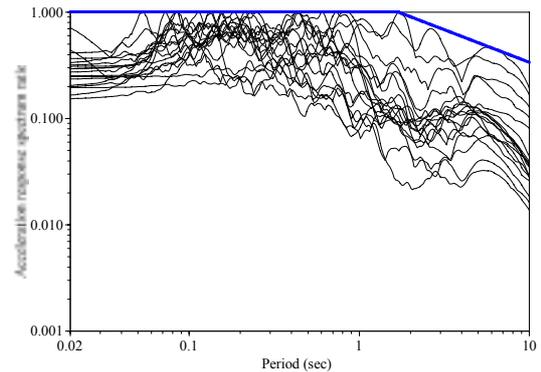


(a) Ground Type I

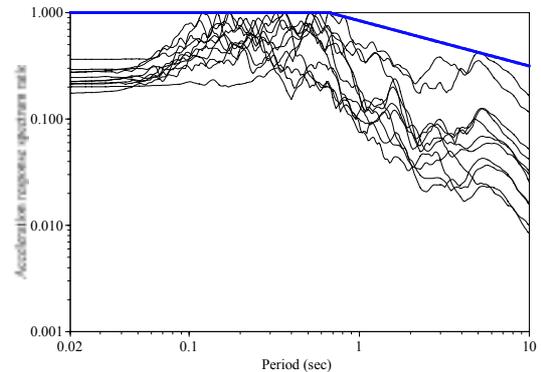


(b) Ground Type II

Fig.5 Acceleration response spectrum ($7.0 < M_j$)



(a) Ground Type I



(b) Ground Type II

Fig.6 Acceleration response spectrum ratio ($7.0 < M_j$)

Table 3 Acceleration response spectrum ratio

(a) $3.0 < M_j < 7.0$

Ground type	Acceleration response spectrum ratio	S/S_{max}
I	$T < 0.44$	$0.44 \leq T$ $S/S_{max} = 0.295T^{-1.486}$
	$S/S_{max} = 1.0$	
II	$T < 0.54$	$0.54 \leq T$ $S/S_{max} = 0.384T^{-1.554}$
	$S/S_{max} = 1.0$	

(b) $7.0 < M_j$

Ground type	Acceleration response spectrum ratio	S/S_{max}
I	$T < 1.8$	$1.8 \leq T$ $S/S_{max} = 1.389T^{-0.614}$
	$S/S_{max} = 1.0$	
II	$T < 0.68$	$0.68 \leq T$ $S/S_{max} = 0.843T^{-0.427}$
	$S/S_{max} = 1.0$	

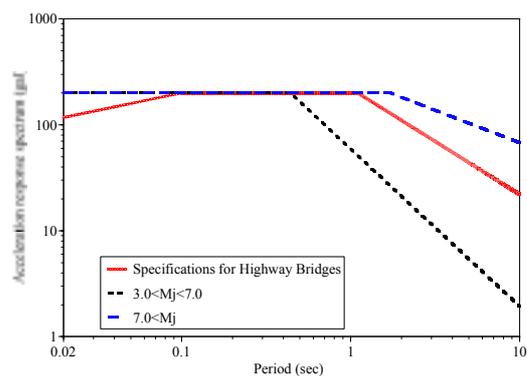
る線を求めると Fig. 6 となる。

今回の検討により得られた包絡線の式を Table 3 に示す。なお、ここで示す式は加速度応答スペクトル比について求めた包絡線であるため、無次元である。したがって、目的に応じ最大加速度応答スペクトルの最大値を乗じる必要がある。Fig. 7 は今回求めた地震規模別の山口県における標準の加速度応答スペクトルと、道路橋示方書にある標準加速度応答スペクトルを比較したものである。

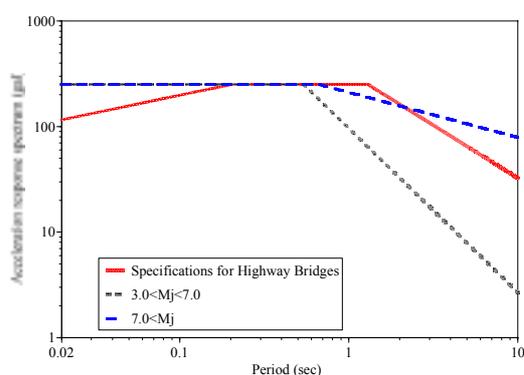
これらの図を比較すると、地震規模が大きいほど長周期成分が多く含まれる傾向が認められる。特に I 種地盤においてこの傾向が著しい。I 種地盤については道路橋示方書よりも山口県では長い周期まで含まれている。一方、II 種地盤では山口県の加速度応答スペクトルは長周期成分が少ない。このように、現在の耐震設計で用いられている標準加速度応答スペクトルと差があることから、合理的な耐震設計のためにはこのような地震波の地域特性を考慮する必要がある。

4 動的応答解析

前章により山口県における地震動の特性が明らかとなった。しかし、地震に対する安全性を評価するためには、今回明らかとなった特性を持つ地震波による地震応答を検討する必要がある。そこで、ここでは橋梁の動的応答解析を行い、既往の設計用地震波による応答との比較・検討を行う。動的解析を行うにあたり、今回得られた山口県の地震動の特性を反映した模擬地震波を作成し、これを入力波とする。この結果を道路協会による標準地震波を用いて動的応答解析を行った場合の結果と比較を行



(a) Ground Type I



(b) Ground Type II

Fig.7 Comparison of Acceleration response spectrum

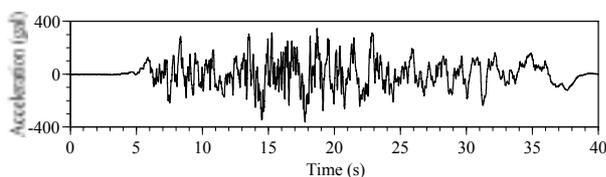


Fig.8 Standard seismic wave

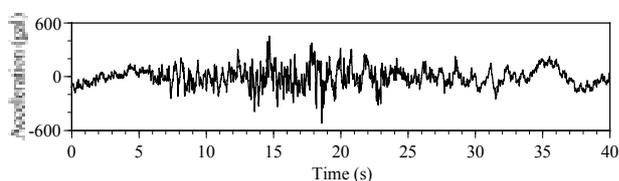


Fig.9 Simulated seismic wave

う。入力波としては、Ⅱ種地盤 Type I 相当の地震動を用いる。

(1) 山口県模擬地震波の作成

動的解析を行うにあたり、今回得られた山口県の地震動の特性を反映した模擬地震波を作成しこれを入力波とする。この結果を Fig. 8 に示す道路協会による標準地震波を用いて動的応答解析を行った場合の結果と比較する。入力波としては、Ⅱ種地盤 Type I 相当の地震動を用いることとし、道路協会による標準地震波の位相特性および前章で示した山口県での加速度応答スペクトルにより模擬地震波を作成する。模擬地震波の作成には模擬地震波作成プログラム ARTEQ を用い、調和関数型の方法を用いた。以上により求められた模擬地震波形を Fig. 9 に示す。ここで、Fig. 9 は位相特性として KAIHOKU BRG. LG を用いている。

(2) 橋梁概要

今回の動的解析では3径間連続PCラーメン橋を対象とする。本橋は日本道路協会による「道路橋の耐震設計に関する資料」²⁾に記載されているものであり、橋長166.8m、橋脚高さ28.0mである。Fig. 10に本橋の側面図を示す。本橋のモデル化にあたっては、上部構造は線形と考え、上部構造全部材にコンクリート全断面を有効と見なす剛性を用いる。下部構造は非線形性を考慮し、ひび割れ、降伏、終局にそれぞれ対応する曲げモーメントと曲率を求め、トリリニア型の骨格曲線を定義し、履歴特性は武田型とする。減衰定数は道路橋示方書を参考に上部構造では0.03、下部構造は0.02、基礎構造を0.10とした。解析にはTDAPⅢを用い、橋軸方向に地震波を入力して行う。Table 4は固有値解析により得られた本橋の固有周期と刺激係数である。

(3) 解析結果

動的応答解析はTDAPⅢにより時間領域における直接積分により行う。直接積分にはニューマークの β 法($\beta=0.25$)を用い、積分時間間隔は0.0005秒とした。なお、地震応答解析ではあらかじめ自重による静解析を行い、この結果を各要素の初期応力値として与える。また、減衰は全体Rayleigh減衰を用い、第1基準振動数および第2基準振動数には固有値解析で得られた1次および3次の固有値を使用する。

動的応答解析結果は、橋脚上端における水平方向変位および橋脚基部における断面力(軸力、せん断力、曲げモーメント)および橋脚基部における曲げモーメント-曲率関係について比較検討する。ここで、本解析で使用するPCラーメン橋はほぼ対称であるので、解析結果の出力はP1橋脚側のみとした。

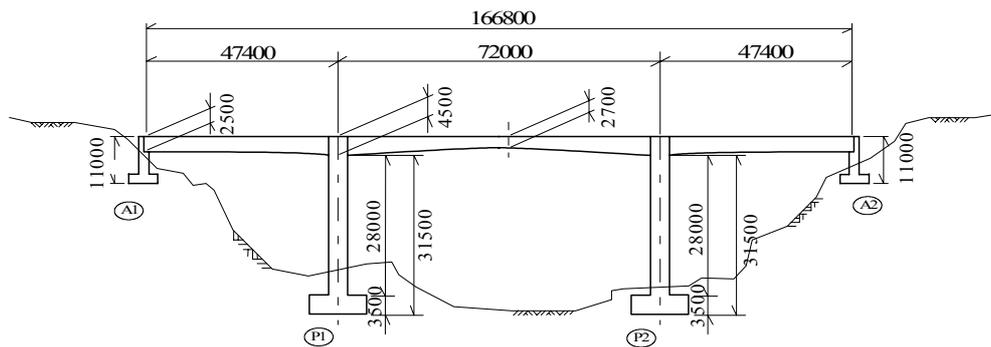


Fig.10 Sideview of PC bridge

Table 4 Natural period and participation factor

Mode	Natural period (sec)	Participation factor	
		Horizontal	Vertical
1	0.775	0.990	0.000
2	0.464	0.001	1.046
3	0.285	0.005	1.485
4	0.284	0.906	-0.007
5	0.200	-0.442	0.000
6	0.123	0.000	0.045
7	0.114	0.001	-0.145
8	0.108	0.442	0.000

橋脚上端における水平方向変位の応答時刻歴を Fig. 11 に示す。最大応答変位は標準地震波入力時が 0.233m、模擬地震波入力時が 0.183m となっている。また、橋脚下端における応答断面力の時刻例を Fig. 12 に示す。橋脚基部における応答軸力は標準地震波と異なり、入力波の違いによる差はあまりない。最大応答軸力は標準地震波で 33.69MN、模擬地震波で 33.33MN となっている。このように差が現れないのは、本橋梁の地震応答が主として橋脚の曲げ変形によるためと考えられる。また、応答変位に比べて、非常に高い周波数であることがわかる。橋脚基部における応答せん断力の最大値は標準地震波が 13.90MN、模擬地震波が 12.64MN であり、標準地震波の方が 10%程度大きくなっている。橋脚基部における最大応答曲げモーメントは標準地震波が 181.6MN・m、模擬地震波が 177.1MN・m であり、応答曲げモーメントも応答せん断力と同様に標準地震波の場合に大きな応答値が得られている。また、この要素の曲げモーメントと曲率の関係を Fig. 13 に示す。今回用いた地震波は設計時に想定した地震よりも大きいため、いずれの場合も終局曲げモーメントに近い応答曲げモーメントが発生している。また、応答曲げモーメントの差は少ないものの、応答曲率は標準地震波を用いた場合に 50%程度大きくなっている。

今回用いた入力地震波の最大加速度は標準地震波が 363gal であり、模擬地震波は 521gal である。動的応答解析の結果より、模擬地震波を用いた場合には最大入力加

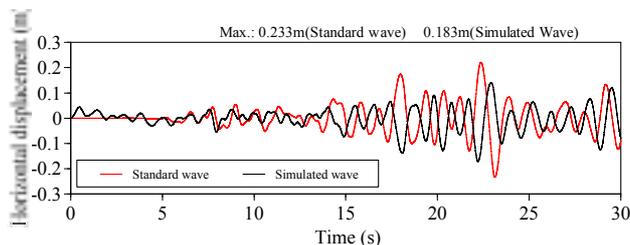


Fig.11 Response displacement

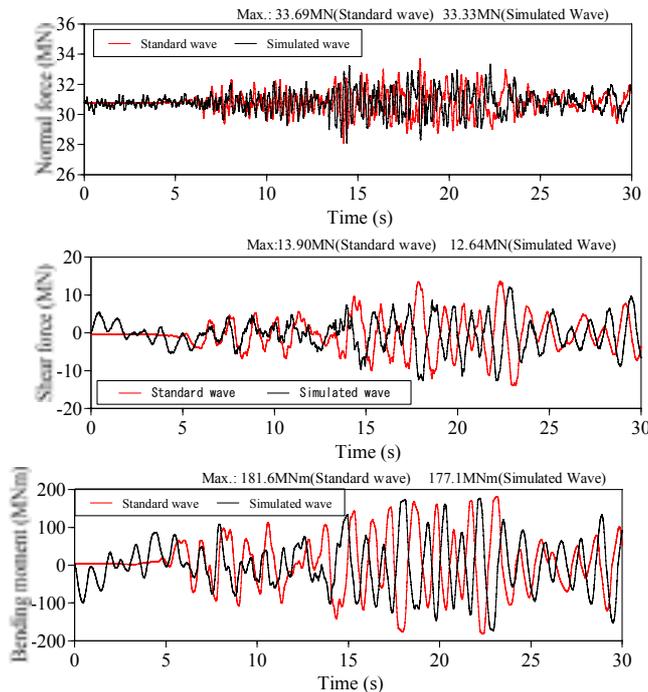


Fig.12 Response forces

速度が大きいかも関わらず応答値が標準地震波を用いた場合よりやや低下する傾向が見られた。この傾向は入力地震波の周波数特性に依存していると考えられる。橋梁の地震応答は 1 次モードの影響が強いことに着目し、1 次モードの固有振動数と標準地震波、模擬地震波の卓越

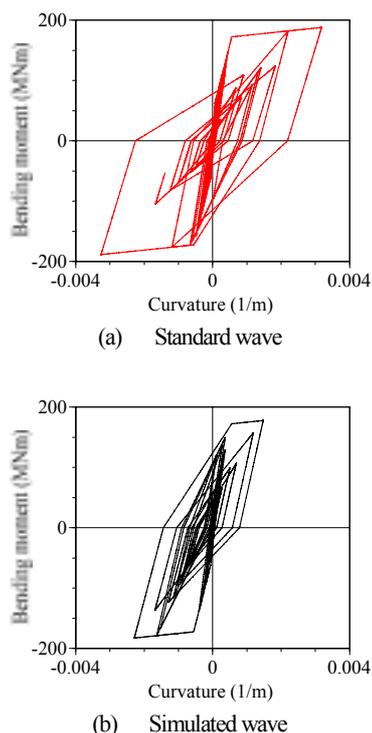


Fig.13 Relationships between curvature and bending moment

振動数を比較する。橋梁モデルの1次モードの固有周期は0.775秒である。これに対して、山口県の加速度応答スペクトルにおける折点周期は0.68秒、道路橋示方書では1.60秒である。固有周期0.775秒における加速度応答スペクトルをみると、山口県においては加速度応答スペクトルが減少を始めており、橋梁の地震応答性状に与える地震波の周期特性の影響が明瞭である。

5 まとめ

本研究では、山口県下において観測されている過去4年間の地震記録を地震規模、観測地盤種別ごとに整理・解析することにより、山口県における地震動の特性を明らかにした。標準加速度応答スペクトルと得られた応答スペクトルを比較した結果、比較的発生頻度が高いマグニチュード7.0未満の地震では長周期成分が少ないことが明らかとなった。一方、マグニチュード7.0を超える地震として鳥取県西部地震について検討した結果、大規模地震では長周期成分が含まれることが明らかとなった。これらの結果を整理することにより、山口県において考慮すべき標準的な加速度応答スペクトルを示した。

さらに、今回得られた山口県の地震特性を反映した加速度応答スペクトルより模擬地震波を作成し、これを用いた橋梁の動的応答解析を行った。この結果と道路協会による標準地震波を用いた場合の結果との比較より、標

準地震波を入力したときの応答値に対して山口県の模擬地震波を入力したときの応答値はやや小さくなる傾向にあった。ここで、入力波の最大加速度は標準地震波より模擬地震波が大きいことから、この応答値の差は周波数特性に依存していると考えられる。

応答値は入力地震波の周波数特性に依存すると考えられるので、入力波の選定が重要であり、地震動の特性を反映した模擬地震波を用いることで合理的な耐震設計が望める場合があると考えられる。

謝辞

本研究における地震波データの整理および解析には山口大学4年生吉田貴保氏（現在、壺山建設（株））のご助力を得た。記して感謝します。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編、日本道路協会、1996.
- 2) 道路橋の耐震設計に関する資料、日本道路協会、1997.
(平成13年8月31日 受理)