

斜張橋の地震応答に及ぼす多点入力の影響評価

Evaluation of the Influence of Multi-Support Excitation for the Response of a Cable-Stayed Bridge

大 保 直 人 山野辺 慎 一
上 野 健 治¹⁾ 南 浩 郎

要 約

長大PC斜張橋である青森ベイブリッジでの地震観測波形を入力として、多点入力模型実験を行った。その結果、多点入力によって、一様入力と比較して逆対称モードの応答が低減し、逆に、一様入力では励起されない対称モードの応答が生じることが確認された。次に、この斜張橋模型の振動特性をよく再現した解析モデルを作成し、時刻歴応答解析によって、多点入力の影響評価を行った。過去5年間の地震観測データを入力として解析を行った結果、一様入力に対する多点入力の値は、構造物の加速度応答で、0.7～1.3倍程度、曲げモーメントで0.7～1.1倍程度の値となることが確認された。また、これらの結果は、構造物の各振動モードの卓越振動数における入力地震動の位相ずれの大きさを説明できることも確認された。

目 次

- I. はじめに
- II. 斜張橋模型実験
- III. 時刻歴応答解析による多点入力の影響評価
- IV. まとめ

I. はじめに

高強度部材の開発や施工技術の発展に伴って、橋梁は長大化、多径間化の傾向にある。橋梁のような横方向に長い構造物が長大化した場合、各橋脚に入力する地震動は異なり、構造物の応答も一様入力(地盤から各橋脚へ、同一位相・同一振幅の地震波を入力)とは異なったものになると考えられる。これまで、地震動の空間・時間分布特性に関する検討¹⁾や、連続桁橋等について地震動の位相差を考慮した検討²⁾は行われている。しかしながら、斜張橋を対象とした検討は少なく、また、報告されているもの³⁾でも同一の地震動の位相差入力に関する検討は行われているが、実際の地震波のよう振幅特性と位相特性が異なる場合についての検討例はない。

そこで、長大PC斜張橋である青森ベイブリッジでの地震観測⁴⁾記録を用いて、振幅特性や位相特性が異なる地震動が多点入力された場合の斜張橋の振動特性について検討を行った。ただし、実構造物について、支承の摩擦や基礎と周辺地盤の動的相互作用などを厳密に評価することは難しいため、実構造物と比較して境界条件が比較的明確な斜張橋模型を用いることとした。

今回の検討で用いた模型は、地震観測を行っている青森ベイブリッジをモデルとして1/150縮尺で製作した。また、入力地震動は、有効入力とするため、青森ベイブリッジの橋脚基礎の観測波形を相似則に合わせて調整したものをを用いた。ここでは、この模型実験の

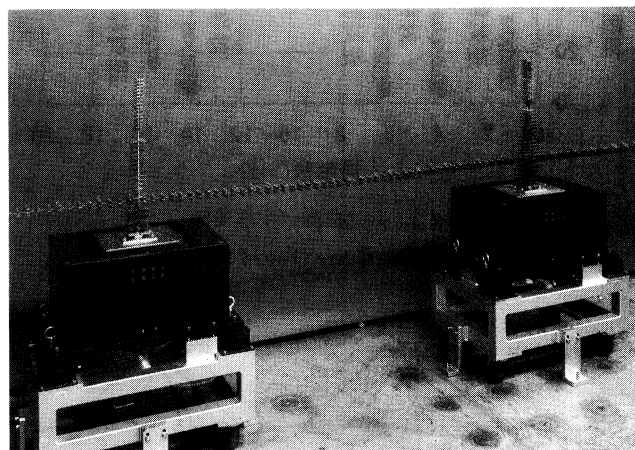


Photo 1 模型実験の概観
(General View of Model Experiment)

概要と、そのシミュレーション解析によって多点入力斜張橋の応答に与える影響について評価した結果を報告する。

II. 斜張橋模型実験

1. 模型実験の概要

Photo 1に模型実験の概観を、Fig. 1に斜張橋模型の形状を示す。これは、長大PC斜張橋である青森ベイブリッジをモデルとして、縮尺1/150で製作したものである。部材は真鍮製で、曲げ剛性が相似則を満足するように断面形状を決め、質量の相似則は付加ウェイトで合わせてある。なお、主桁の支持形式は、主塔位置で主桁の変位を拘束しないフローティングタイプで、主桁端部はスライド支承としている。斜材はモデル化を容易にするため、実橋よりも本数を減らした。また、実験に使用した斜材の材料は、相似則を考慮する

1) 横浜支店 土木部設計課

キーワード：多点入力，斜張橋，模型実験，位相
電磁式加振機

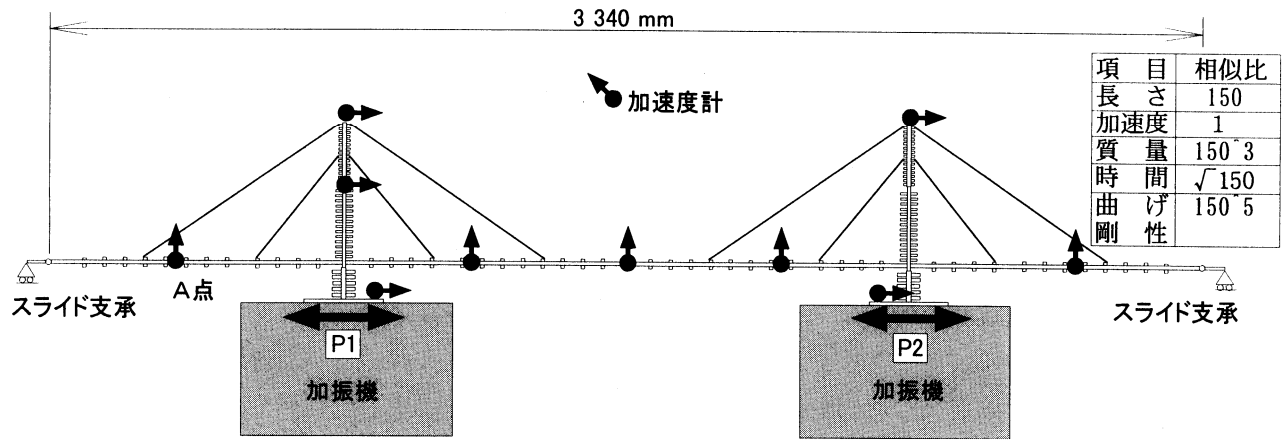


Fig. 1 斜張橋模型の形状
(Cable-Stayed Bridge Model)

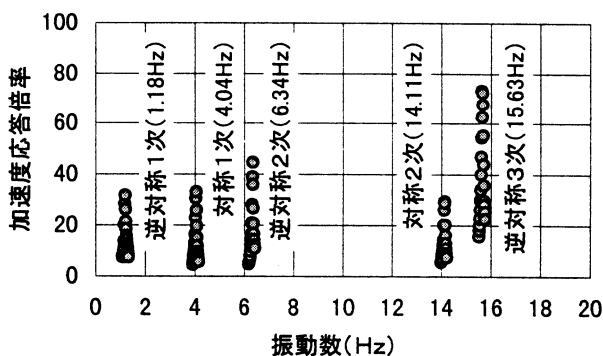


Fig. 2 共振曲線 (主塔頂部)
(Resonant Curve (Top of Tower))

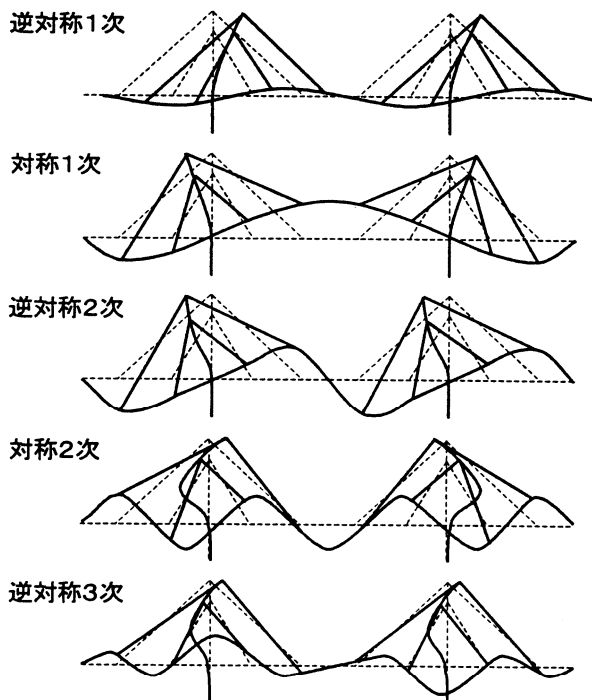


Fig. 3 卓越振動モード
(Predominant Vibration Mode)

と実橋の斜材よりも曲げ剛性の大きなものとなった。

この模型を Fig. 1 の P1, P2 位置に配置した 2 台の電磁式加振機上に設置して水平方向に加振し、構造物の応答を計測した。ここでは、模型の振動特性に影響を与えないように小型軽量（重さ約 3.5g）の半導体加速度変換器を Fig. 1 に示す位置に設置して、加速度応答を計測した。

2. 斜張橋模型の基本振動特性

斜張橋模型の基本的な振動特性を把握するために、正弦波加振による共振曲線の計測を行った。例として、主塔頂部の共振曲線を Fig. 2 に、また、各測点の加速度応答の位相と固有値解析結果から判断された各卓越振動数でのモード形状を Fig. 3 に示す。なお、逆対称モードは、2 台の加振機を同位相（位相ずれ = 0 度）で加振した場合のもので、対称モードは、逆位相（位相ずれ = 180 度）で加振した場合のものである。

3. 位相ずれによる加速度応答の変化

Fig. 4 には、対称 1 次モードと逆対称 2 次モードの主塔頂部の加速度応答について、入力地震動（正弦波）の振幅及び振動数を等しくして、位相を徐々にずらした場合の応答の変化を示す。この図から、対称 1 次モードは位相ずれが 180 度から 0 度に近づくに従って、逆対称 2 次モードは位相ずれが 0 度から 180 度に近づくに従って、応答が小さくなっていくことが分かる。しかし、その変化は直線的ではなく、対称 1 次モードの位相ずれ 180 度付近や逆対称 2 次モー

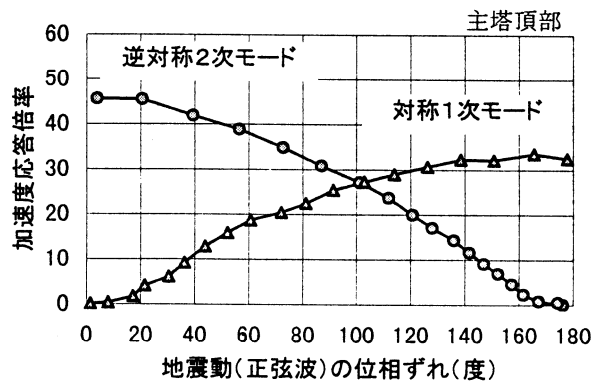


Fig. 4 位相ずれによる加速度応答の変化
(Phase Lag vs. Acceleration Response)

ドの位相ずれ0度付近では、30度ほど位相がずれても応答は大きく変化しないことが分かる。また、位相が90度ずれても応答は1/2にはならないことも確認できる。

4. 一様入力と多点入力のスペクトル比較

一様入力と多点入力による橋梁の振動応答を比較するため、観測波形（後述する多点入力の影響の大きな地震動；EQ17）を入力して模型の応答を計測した。ただし、入力地震動は、有効入力とするため、自然地盤ではなく、主塔橋脚の基礎上で観測された波形を用いた。また、模型の縮尺が1/150であるため、時間の相似則を合わせ、観測波形の時間軸を $\sqrt{1/150} \approx 1/12$ に縮めてある。なお、今回の検討では、一様入力と多点入力の相対的な比較が主で、応答の絶対値は重要でないため、波形の振幅に関しては相似則を考慮せず、あまり模型の振動が大きくなりえない範囲で精度良く加速度が計測できる程度の振幅（模型の応答で最大200Gal程度）とした。

Fig. 5に、一様入力（P1主塔基礎で観測された同一の波形を2台の加振機に入力）と多点入力（P1及びP2主塔基礎で観測された波形をそれぞれの位置の加振機に入力）による主桁（Fig. 1のA点）鉛直方向の加速度波形のフーリエスペクトルを示す。ただし、図の振幅は、一様入力のフーリエ振幅の最大値が1となるように基準化した振幅である。

この図から、多点入力の場合には、一様入力と比較して逆対称モードの応答が小さくなり、一様入力では励起されない対称モードが発生することが確認できる。なお、今回は一様入力にP1主塔基礎の波形を用いたが、P2主塔基礎の波形を用いた場合でも同様の結果であった。

この逆対称モードの減少や対称モードの励起の程度は、それぞれの基礎に入力する地震動の振動数特性や位相特性に起因すると考えられる。この点については、以後の時刻歴応答解析によって詳細な

検討を行う。

III. 時刻歴応答解析による多点入力の影響評価

1. 解析の概要

加振機による模型実験結果より、多点入力によって一様入力では励起されない対称モードの振動が発生することが確認された。そこで、この現象が構造物に及ぼす影響を評価するために時刻歴応答解析を行い、加速度応答および断面力レベルでの比較を行った。

解析モデルは、縮尺模型をそのままの寸法でモデル化し、主桁および主塔はフレーム要素で、斜材はトラス要素で、また、付加ウェイトは付加質量としてモデル化した。

構造物の減衰定数は、構造物の振動応答の大きさに影響を与えるが、定量的な評価が難しい物理量である。また、今回の検討で用いた模型は、長さ1cmの付加ウェイトを主桁や主塔の部材に全面接するかたちで取付けているため、その部分での剛性増加がみられた。そこで、解析モデルの作成に当たっては、まず、模型の材料や寸法から基本的な解析モデルを作成し、卓越振動数と応答の大きさが実験結果と合うように、構造物全体の減衰定数と躯体の部分的な剛性を調整した。最終的に解析で用いた減衰定数の値は0.5%程度であった。

2. 模型実験のシミュレーション

一様入力と多点入力での主桁（Fig. 1のA点）鉛直方向の加速度波形のフーリエスペクトルについて、解析結果と実験結果の比較をFig. 5に示す。なお、解析では、模型実験で観測された加振機テーブルの応答波形を入力としている。また、フーリエスペクトルの振幅は、模型実験（一様入力）のフーリエ振幅の最大値が1となるように基準化した振幅である。

この図で、主桁の卓越振動数については、解析結果と実験結果は

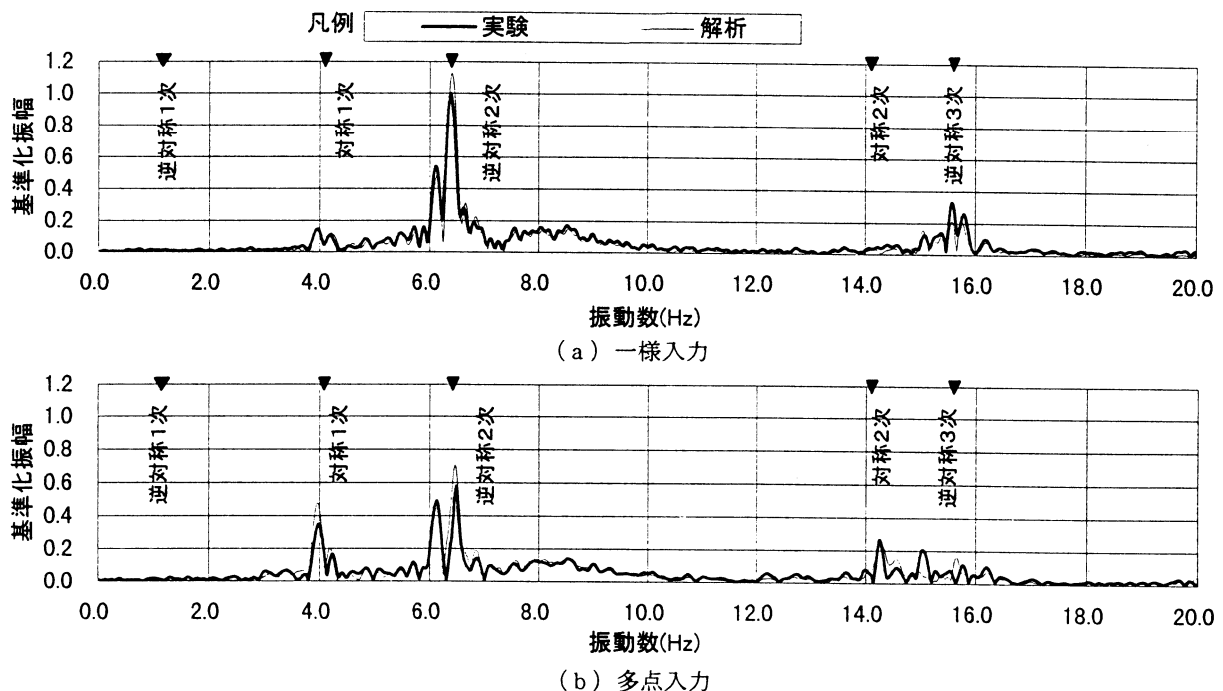


Fig. 5 主桁鉛直方向の加速度波形のフーリエスペクトル
(Fourier Spectrum of Vertical Acceleration Response of Girder)

よく一致しており、また、応答の大きさについても概ね一致していることから、この解析モデルが模型の振動特性をよく再現していることが確認された。

3. 地震動の位相ずれ

実際の地震動の位相ずれはどの程度か調査を行った。ここでは、1993年から1997年までの5年間に観測された地震動のうち、地表面での最大加速度が比較的大きな（5Gal程度以上）地震動17個を対象とした。ただし、地震動は、観測波形そのものではなく、相似則に合わせて時間軸を1/12に縮めたものである。

これらの地震動の諸元と各振動モードの卓越振動数での位相ずれをTable 1に示す。この位相ずれは、P1側を基準として、地震動全体の伝達関数から求めた値である。なお、表中の地震動は、地表面の最大加速度の大きさの順に並べている。

この表から、各振動モード毎に位相ずれはランダムにばらついていることが分かる。この中で、EQ1は、逆対称モードの位相ずれが小さく、対称モードの位相ずれもそれ程大きくないことから、一様入力に近い地震動であると考えられる。逆に、EQ17は、全体的に位相ずれが大きく、多点入力の影響の大きな地震動であると考えられる。

4. 構造物の加速度応答、断面力に及ぼす多点入力の影響

Table 1の地震動を入力として時刻歴応答解析を行い、構造物の加速度応答や断面力の値について、一様入力と多点入力の比較を行った。

Fig. 6に、主桁と主塔の最大加速度分布及び最大曲げモーメント分布の最大値について、一様入力を1とした場合の多点入力の値を示す。なお、一様入力については、2箇所の主塔基礎での入力地震動が、最大加速度の差は小さいが同一の波形ではないので、それぞれの波形で一様入力による解析を行い、その平均値を求め、一様入力の値とした。

この図から、主桁最大曲げモーメントは、多点入力の値が一様入

力よりも大きくなることは無いが、主桁、主塔の最大加速度や主塔の最大曲げモーメントは、多点入力の方が一様入力よりも大きくなる場合があることが分かる。また、主塔の最大曲げモーメントに着目すると、一様入力と多点入力で応答値に大きな違いのない地震動（EQ2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 13, 17）と多点入力の方が一様入力よりも応答が大きく低減している地震動（EQ5, 8, 11, 12, 14, 16）に大別できる。これらの結果とTable 1に示した地震動の位相ずれを比較すると、一様入力と多点入力で応答に大きな違いのない地震動は、EQ17を除いて逆対称モードの位相ずれが比較的小さいことが分かる。また、多点入力の方が応答が低減している地震動は、全体的に中程度（100度前後）の位相ずれとなっていることが分かる。なお、一様入力に対する多点入力の応答の大きさと地震動の諸元（震央距離、震源深さ、震央方位）との間に相関は認められなかった。

Table 2に、Fig. 6の値の最大値、最小値及び平均値を示す。この表から、主桁については、最大加速度が3割程度増加する場合があるが、曲げモーメントは一様入力よりも大きくならないことが分かる。また、主塔については、最大加速度で2割程度、最大曲げモーメントで1割程度増加する場合がある。従来の同一の地震動を用いた位相差入力による検討³⁾では、入力地震動の位相ずれの大きさ（地盤のせん断波速度の大きさ）によっては多点入力の方が一様入力よりも橋脚の曲げモーメントが大きくなることが指摘されているが、今回の実地震動の結果からも、多点入力の影響によって一様入力よりも曲げモーメントが少なくとも1割程度増加する可能性があることが確認された。

5. 特徴的な地震動の断面力のスペクトル比較

Table 1に示した17個の地震動のうち、Table 2で主塔最大曲げモーメント比が最大の1.12となった地震動（EQ1）と逆対称モードの位相ずれが比較的大きいにも関わらず主塔最大曲げモーメント比が1よりも大きくなった地震動（EQ17）について、曲げモーメントの振動成分の比較を行った。

Table 1 5年間に観測された比較的大きな地震動の諸元と位相ずれ
(Specification and Phases Lags of the Considerable Earthquakes Observed in Last 5 Years)

地震名	地表加速度 (Gal)	マグニチュード	震央距離 (km)	震源深さ (km)	震央方位	入力地震動の位相ずれ (度)				
						逆対称 1次	対称 1次	逆対称 2次	対称 2次	逆対称 3次
EQ1	4.0	5.6	168	45	ENE	-6	-54	-71	72	-4
EQ2	4.7	5.1	164	24	E	-11	-75	-69	-63	-74
EQ3	4.8	6.6	273	9	E	-68	-56	-54	27	22
EQ4	5.0	4.6	55	15	E	-46	-64	-44	-108	-3
EQ5	5.2	5.1	135	59	ENE	-82	-97	-57	167	-104
EQ6	5.5	5.3	114	40	W	-144	-63	-29	-37	-30
EQ7	5.6	5.4	157	40	SE	-78	-61	-54	129	-98
EQ8	5.7	6.5	529	84	NE	150	-55	76	-118	90
EQ9	5.8	5.9	158	29	ESE	-29	-55	-54	29	-47
EQ10	6.8	5.5	145	79	NE	-177	-46	5	156	7
EQ11	8.0	7.6	620	551	WNW	-99	-52	-62	82	87
EQ12	8.4	5.3	159	50	ENE	126	-64	-38	-10	-43
EQ13	46.0	6.9	151	30	ESE	-4	-50	-25	174	-15
EQ14	49.0	8.1	637	30	ENE	126	-49	-57	-83	-92
EQ15	51.0	7.8	376	107	NE	-67	-32	-38	-80	38
EQ16	84.0	7.8	254	34	NNW	-60	-60	-7	106	116
EQ17	153.0	7.5	254	0	E	87	-58	-123	-142	-105

注) 青森ベイブリッジの橋軸方向はEW方向

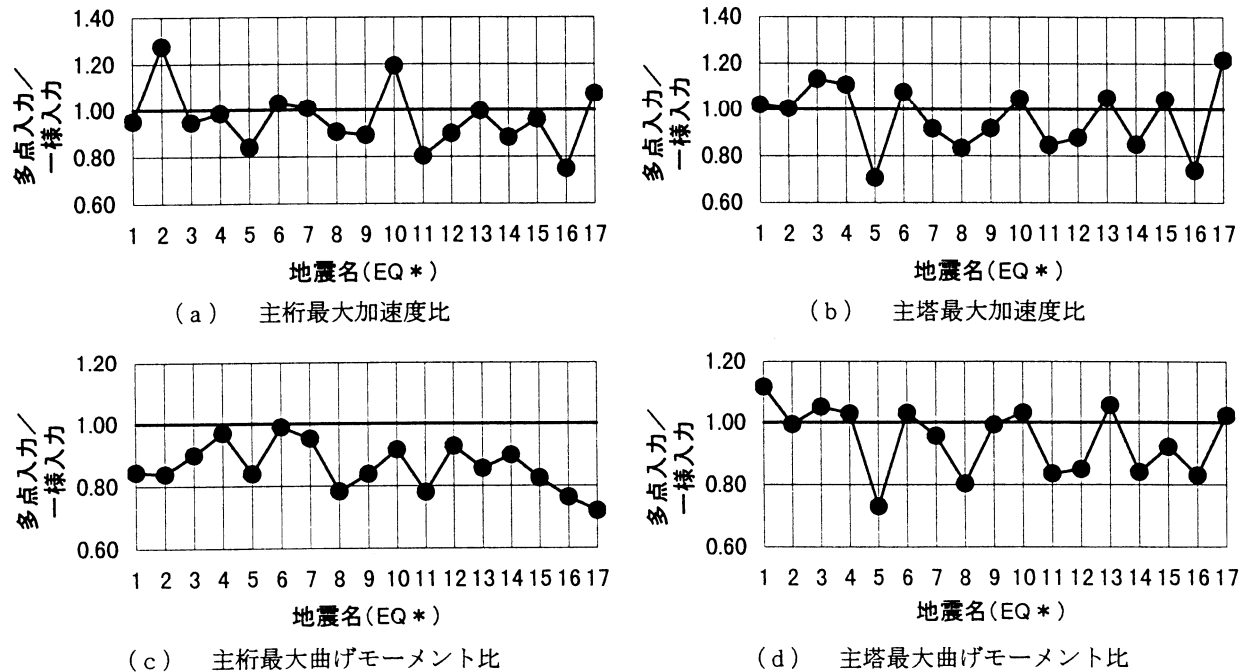


Fig. 6 一様入力に対する多点入力の応答値

(Response Value of Multi-Support Excitation vs. Uniform Seismic Input)

 Table 2 一様入力に対する多点入力の応答値
(5年間の地震動の統計値)

 (Response Value of Multi-Support Excitation
vs. Uniform Seismic Input)

項 目	多点入力/一様入力		
	最大値	最小値	平均値
主桁最大加速度比	1.28	0.75	0.96
主塔最大加速度比	1.22	0.71	0.96
主桁最大曲げモーメント比	0.99	0.72	0.86
主塔最大曲げモーメント比	1.12	0.73	0.95

Fig. 7 に、EQ1 と EQ17 の主塔橋脚基部の曲げモーメントのフーリエスペクトルを示す。この図の振幅は、一様入力のフーリエ振幅の最大値が1となるように基準化した振幅である。

EQ1 では、一様入力と多点入力でスペクトルの値はほぼ等しいが、EQ17 では、逆対称モードの応答が半分程度に減少しており、逆に、対称モードの応答が大きく励起されていることが分かる。これらの結果は、Table 1 に示した入力地震動の位相特性をよく反映した結果となっている。

全振動成分の曲げモーメントに占める逆対称モードと対称モードによる曲げモーメントの割合を数値として示したのが Table 3 である。この表の値は、曲げモーメントの波形から各振動モードの成分のみをバンドパスフィルターにより抽出して、逆対称モードと対称モード毎に波形の重ね合わせを行い、一様入力の原波形の振幅に対して、その振幅の倍率を示したものである。なお、フィルター形状は、頂部幅 0.2Hz、底部幅 0.6Hz の台形とした。

この表から、多点入力によって、EQ1 では逆対称モードの割合はほとんど変わらず、対称モードの割合が微増していることが分かる。このことから、EQ1 で曲げモーメントが増加していたのは、多点入

力によって、一様入力とほぼ等しい応答に対称モードの応答が加わったためと考えられる。一方、EQ17 では、逆対称モードの割合が3割程度減少し、逆に対称モードの割合が4倍以上に増加しており、逆対称モードと対称モードの割合が近くなっていることが分かる。従って、EQ17 では、逆対称モードの応答は低減したが、対称モードの応答が加わることによって、結果的には一様入力と多点入力ではほぼ等しい曲げモーメントになったと考えられる。

このように、主塔の曲げモーメントの最大値だけみれば、EQ1、EQ17 とも一様入力と多点入力では大きな差は無いように見えるが、振動数成分は、EQ1 はほぼ等しいが EQ17 は大きく変化していることが確認された。

Table 3 逆対称モードと対称モードの断面力の割合

 (Bending Moment Ratio of Anti-synchronous
and Synchronous Motion)

振動モード	EQ 1		EQ 17	
	一様	多点	一様	多点
逆対称モード	0.79	0.74	0.76	0.53
対称モード	0.04	0.09	0.09	0.41

IV. まとめ

長大PC斜張橋である青森ベイブリッジでの地震観測波形を入力として、多点入力模型実験を行った。次に、この斜張橋模型の振動特性をよく再現した解析モデルを作成し、時刻歴応答解析によって、多点入力の影響評価を行った。得られた知見を以下にまとめる。

①斜張橋模型を用いた振動実験により、多点入力によって、一様入力と比較して逆対称モードの応答が低減し、一様入力では励起されない対称モードの応答が生じることが確認された。

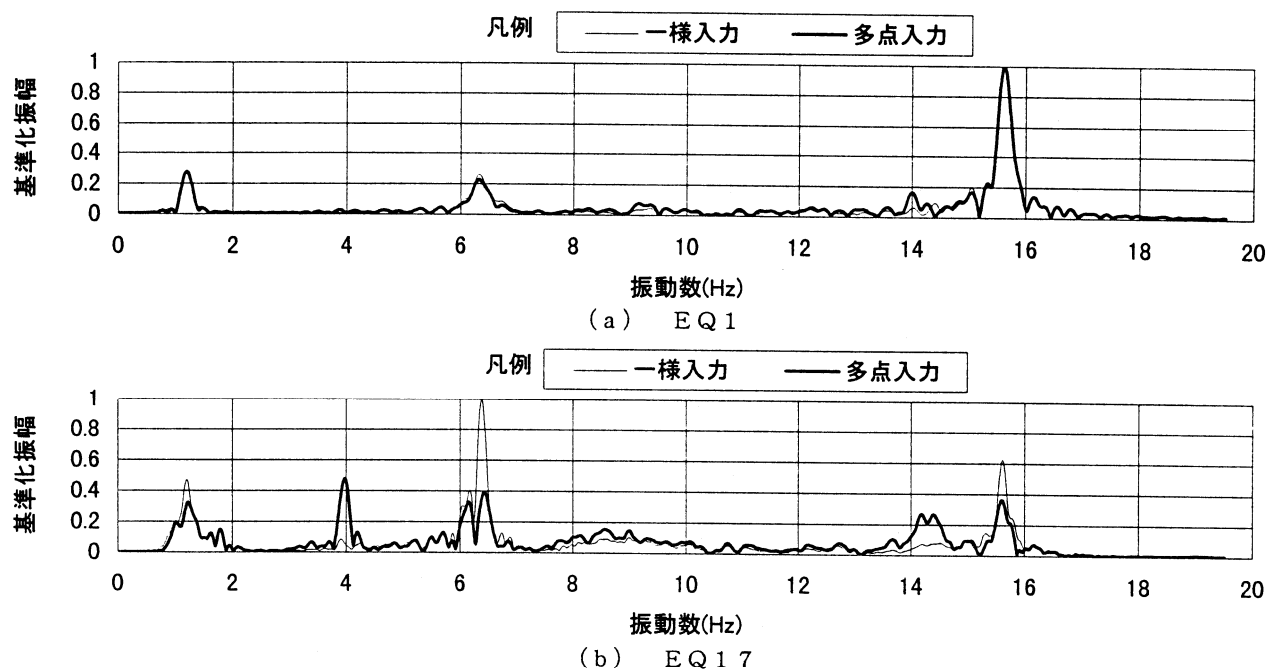


Fig. 7 曲げモーメント波形のフーリエスペクトル
(Fourier Spectrum of Bending Moment Wave)

②両主塔基礎に入力する地震動の、逆対称モードの振動数成分の位相ずれが小さい場合には、一様入力と多点入力で逆対称モードの応答は変わらず、これに対称モードの応答が加わることによって、一様入力よりも多点入力の方が曲げモーメントが大きくなる場合がある。

③両主塔基礎に入力する地震動の、逆対称モードの振動数成分の位相ずれが大きく、多点入力によって逆対称モードが大きく低減する場合でも、対称モードが大きく励起されることによって、多点入力と一様入力での曲げモーメントの大きさがほぼ等しくなる場合もある。

④5年間の比較的大きな地震動の統計をとると、一様入力に対する多点入力の応答比の最大値は、主桁、主塔の最大加速度で1.2~1.3倍、主塔の曲げモーメントで1.1倍程度となった。したがって、斜張橋の耐震検討に当たっては、多点入力の影響によって、一様入力よりも少なくとも1割程度、曲げモーメントが増加する可能性があることを念頭に置いておく必要がある。

本検討で得られた知見のうち、多点入力によって、一様入力と比較して逆対称モードの振動が減少し、一様入力では励起されない対称モードの振動が励起される現象は、検討対象とした青森ベイブリッジ特有のものではなく、等橋脚を有する3径間以上のすべての斜張橋についてあてはまることであり、同様のことは他の構造形式の

橋梁についても言える。この現象による橋脚および主げた等への影響は、橋梁の規模や構造形式等の構造的要因および地震動や地盤条件等の影響によるところであるが、現在、青森ベイブリッジをはじめ国内数橋の地震観測を行っており、これらの記録をもとに、多点入力による影響をさらに検討することで、耐震設計における多点入力の影響評価方法について、具体的な策を提案できるものとする。

最後に、青森ベイブリッジでの地震観測は、運輸省港湾技術研究所と共同で行っているものであり、菅野高弘室長はじめご協力頂いた皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 星谷勝, 石井清, 栗田博昭; 空間・時間分布特性を有する地震動シミュレーション, 土木学会論文集, 第386号, 1987.10.
- 2) 山田善一, 竹宮宏和, 河野健二, 平野明; 動的相互作用を考慮した多点入力系高橋脚橋の地震応答解析, 土木学会論文報告集, 第328号, 1982.12.
- 3) 吾田洋一, 川島一彦, 運上秀樹; 入力位相差を考慮した斜張橋の地震応答解析, 第41回土木学会年講, 1986.
- 4) 稲富隆昌, 竹田哲夫, 大保直人, 山野辺慎一; 地震観測に基づくPC斜張橋「青森ベイブリッジ」の地震応答特性について, 構造工学論文集, Vol. 40A, 1994. 3.