

明石海峡周辺におけるアレー地震観測記録と ビームフォーミング残差波の分析

高橋 卓也¹・家村 浩和²・五十嵐 晃³・中西 伸二⁴

¹正会員 工(修) 西松建設(〒625-01 京都府舞鶴市大字平小字波入 44 関電舞鶴出張所)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻(〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻(〒606-01 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 京都大学技官 工学研究科土木システム工学専攻(〒606-01 京都市左京区吉田本町)

本研究では、明石海峡周辺の4地点において地震動のアレー観測を行った。観測地点は本州の明石と垂水、淡路島側の淡路と県立淡路公園南西山間部の日仏友好モニュメント建設予定地点である。このアレー観測システムにおいて得られた記録と一樣波動場を仮定したビームフォーミングによる合成波形の差により定義される残差波を分析することにより、波動伝搬特性より見たサイト固有の特性の定量的な評価を試みた。

Key Words : Array observation, Seismic observation, site effect, beamforming

1. はじめに

一般に多点入力地震動を考慮した場合の長大構造物の応答においては、地震動の位相や振幅等についての空間的変動が存在する場合に、ロッキングや回転のような応答のモードが重要となることが知られている。そのため、長大構造物の地震応答評価に際しては地震動の空間的変動を考慮する必要がある。

明石海峡周辺地域においては明石海峡大橋など、その耐震性を確保することが重要となっている長大構造物が存在している。これらの耐震安全性の評価の上で、そうした特性を踏まえ、本地域において想定すべき長周期多点入力地震動の性質を明らかにしていくことが必要とされている。この目的のため、明石海峡大橋周辺において長期にわたるアレー地震観測およびその結果に基づく地震動特性の調査が行なわれている。

本研究は、明石海峡周辺地域におけるアレー観測システムにより得られた地震記録に基づき、地震動の空間的特性の基礎的データのの一つとして、一樣波動場を仮定したビームフォーミングによる合成波形と記録波形の差により定義される残差波を分析することにより、当該観測点群における相互の空間的相関関係の定量的な評価を試みたものである。

2. アレー観測地点

長周期地震動のアレー観測は、明石海峡周辺の明石(A地点)、垂水(B地点)、淡路(C地点)、および県立淡路公園南西山間部の日仏友好モニュメント建設予

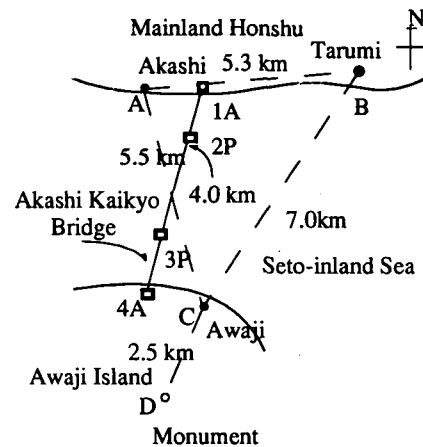


Fig. 1 Location of Akashi Kaikyo Bridge and Array Observation System.

定地点(D地点)の4地点で行った。観測点の配置をFig. 1に示す。

Fig. 2に明石海峡大橋下の地盤構造を示す。Table 1はその詳細な地盤のパラメータである。このデータより各観測点の地盤構造を仮定した場合、例えばA地点の主要な卓越振動数は0.6Hz、1-2Hz、4Hz、7Hz付近と推定される。この計算結果は過去に行われた常時微動記録の分析の結果ともよく符合している。

3. 対象地震記録

本研究では、明石海峡大橋や日仏友好モニュメントのような大規模構造物において問題となる、周期2秒を越える長周期の地震動入力に着目している。ここで

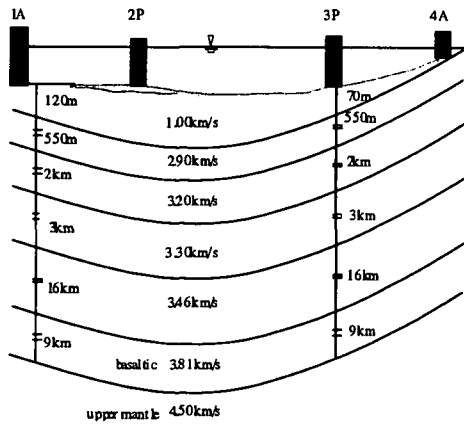


Fig. 2 The Crustal Structure under the Akashi Kaikyō Bridge.

Table 1 Soil Profile in Akashi Strait Area.

Layer	Thickness (m)	Density (t/m ³)	Shear Modulus (t/m ²)	Vs(m/s)	h(%)
1	3.0	1.96	3000.0	180.0	23.0
2	10.0	1.96	4000.0	180.0	23.0
3	25.0	1.96	4000.0	300.0	9.8
4	10.0	2.15	4500.0	450.0	2.1
5	19.0	2.25	12000.0	600.0	4.4
6	35.0	2.23	21300.0	700.0	4.1
7	44.0	2.27	26100.0	820.0	4.7
8	17.0	2.44	358530.3	1200.0	3.9
9	10.0	2.40	413877.6	1300.0	3.5
10	550.0	2.50	2145108.2	2900.0	5.0
11	2000.0	2.60	2716734.8	3200.0	5.0
12	3000.0	2.60	2889183.8	3300.0	5.0
13	16000.0	2.70	3298298.0	3460.0	5.0
14	9000.0	2.83	4147457.2	3810.0	5.0
15	0.0	3.20	6612245.0	4500.0	5.0

は1995年以前に明石海峡4点において同時に記録された、5つの比較的長周期成分の卓越する地震記録を対象とした。

1. 若狭湾地震 (No.40)

この地震は5つの地震の中で最も近距離で発生した地震であり、震源距離120km、マグニチュード3.1の地震である。記録後半部に長周期の地震波が確認できる。

2. 日本海中部地震 (No.49)

この地震は震源の深さが約500kmと非常に深いのが特徴である。震源距離697km、マグニチュード4.1であり、記録前半に短周期成分が卓越する振幅レベルの小さい波、記録後半に比較的長周期成分が卓越する振幅レベルの大きい波が見られる。

3. 能登半島沖地震 (No.50)

この地震は震源距離381km、震源深さ24.8km、マグニチュード6.6の地震である。記録後半部に長周期地震波の伝搬が確認できる。

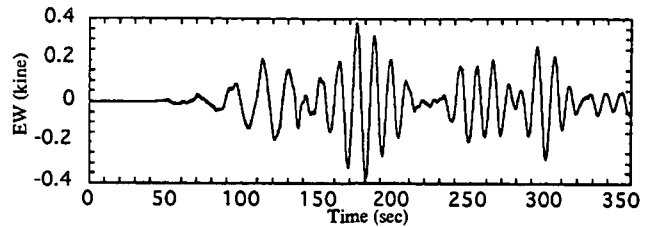


Fig. 3 Velocity Time History of Hokkaido Toho Oki Earthquake at Akashi Station.

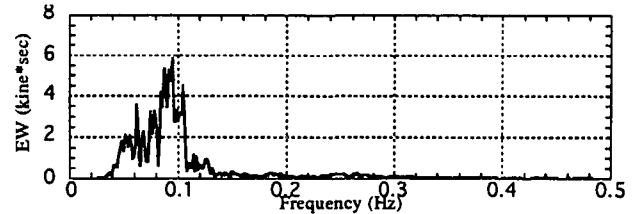


Fig. 4 Fourier Spectrum of Hokkaido Toho Oki Earthquake at Akashi Station.

4. 北海道南西沖地震 (No.55)

この地震は震源距離965kmと5つの地震の中で最も遠距離で発生した地震で、マグニチュードは7.8である。振幅レベルは他の地震を大きく上回っており、時刻歴の形状から短周期成分の波はほとんど伝搬しておらず、長周期成分が非常に卓越している。

5. ウラジオストック地震 (No.69)

この地震は震源の深さが550kmと非常に深いのが特徴であり、震源距離858km、マグニチュード7.6である。

代表的な観測記録およびそのフーリエスペクトルをFig. 3とFig. 4に示す。他の3つの観測点と比較して、淡路観測点では長周期成分が卓越する地震波に対して大きく震動している傾向が見いだされている。その速度波形の振幅レベルは他のサイトの2倍程度となっている。

4. ビームフォーミング残差波

本研究においては、アレー観測域が一様波動場であるという前提によるビームフォーミングによる合成波形と、実際のアレー地震観測記録の差異により定義される残差波を算出し、これを分析することにより地震動に対する地盤構造・地形による空間的な影響を含んだ観測点の特性を定量的に把握することを試みた。残差波の算出においては、ビームフォーミングによる合成波が原波形の最良近似を与えるように定義された重みを用いて、振幅の補正を行っている。

具体的には、残差波は以下の式で表される。

$$h(\vec{x}_i, t) = g(\vec{x}_i, t) - w_i \cdot f(\vec{x}_i, t) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$\int |g(\vec{x}_i, t) - w_i \cdot f(\vec{x}_i, t)|^2 dt \rightarrow \min \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

ここに、

h : 残差波 g : 観測波 w : 重み n : アレー観測点数 f : アレー重心点でのビームフォーミング波形

(2) 式のパワーを最小化するような重みを (1) 式に代入して残差波を求めた。これは、ビームフォーミング波形に原波形の最良近似を与える重みを用いて補正を行うことを意味している。また、残差波には以下に示す (3)~(5) 式の性質があることは、容易に示すことができる。

$$\int_0^T h(t) \cdot f(t) dt = 0 \quad (3)$$

$$\int_0^T g(t)^2 dt = \int_0^T h(t)^2 dt + w^2 \int_0^T f(t)^2 dt \quad (4)$$

$$w|F(\omega)| - |H(\omega)| \leq |G(\omega)| \leq w|F(\omega)| + |H(\omega)| \quad (5)$$

ただし、

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (8)$$

である。(3) 式はビームフォーミング波と残差波の直交性を表し、(4) 式はそれらと観測波のパワーについての加法性を表す。(5) 式は観測波のフーリエ振幅スペクトルが、ビームのフーリエ振幅スペクトルを中心に残差波のフーリエ振幅スペクトルの値を幅とする範囲内に必ず存在する事を表していることから、ビームフォーミングによる合成波と残差波フーリエスペクトルの絶対値の和は、実記録スペクトルの上限値となっていることを意味している。従って、理論的には、ビームフォーミング手法がそうした一様波動場における伝搬波の近似を与えると見なすとすると、これに対応して算出される残差波は、ビームフォーミングによる合成波の実際の地震動との誤差の上限評価に対応すると考えられるものである。

5. 残差波に関する検討

対象の5つの地震記録に対して、ビームフォーミングによる成分と残差波成分に分解し、それぞれのパワーおよびフーリエスペクトルを算出した。No.55のA地点のEW成分とD地点のNo.69のUD成分の観測波と残差波とビームに重みを考慮したのスペクトルの和の比

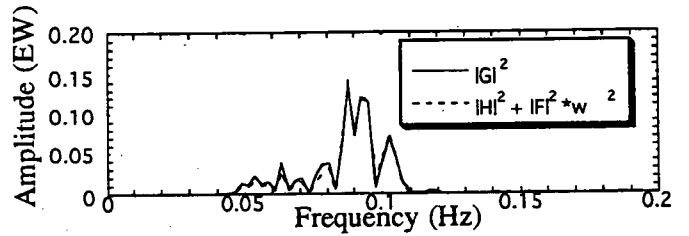


Fig. 5 Power Spectra of Observed, Synthetic and Remainder Waves at Akashi Station (No.55)

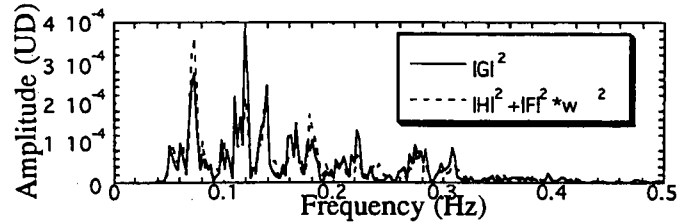


Fig. 6 Power Spectra of Observed, Synthetic and Remainder Waves at Monument Station (No.69)

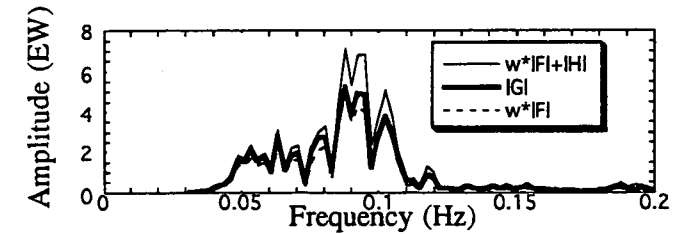


Fig. 7 Fourier Amplitude Spectra of No.55 Record at Akashi Station

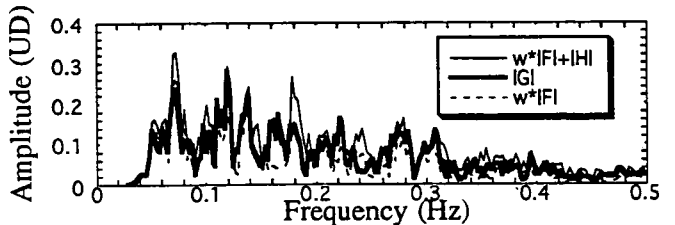


Fig. 8 Fourier Amplitude Spectra of No.69 Record at Monument Station

較をそれぞれ Fig. 5 および Fig. 6 に示した。No.55 の A 地点の EW 成分 No.69 の D 地点の UD 成分の (5) 式の関係を表した図を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。これらの図より、観測波のフーリエスペクトルは 2 種のスペクトルの間に必ず存在していることがわかる。特に Fig. 7 において、スペクトルにピークの生じている 0.09Hz 付近において、残差波成分の割合が大きくなっている傾向があることが注目される。

Table 2 は 5 つの地震に対して観測波形に対する残差波パワーの割合を表したものである。この表より NS・EW・UD の 3 成分の中で、特に UD 成分において残差波のパワーの割合が低くなっており、(4) 式の関係からビームの割合が高く成っていることを示している。非常に長周期成分の卓越している No.55 の北海道東方沖地震に関して見てみると、他の地震と比べて 3 成分と

Table 2 Power Ratios of Remainder Wave to Observed Wave and Parameters of Records.

		NS	EW	UD	Depth	Distance	Velocity
NO.40	A	0.852	0.824	0.405	350km	120km	Horizontal 1.75(km/s) Vertical 3.08(km/s)
	B	0.429	0.777	0.259			
	C	0.384	0.328	0.228			
	D	0.599	0.862	0.899			
NO.49	A	0.687	0.893	0.479	500km	697km	Horizontal 9.52(km/s) Vertical 7.14(km/s)
	B	0.636	0.423	0.508			
	C	0.191	0.469	0.265			
	D	0.511	0.467	0.376			
NO.50	A	0.397	0.829	0.198	24.8km	381km	Horizontal 3.13(km/s) Vertical 3.45(km/s)
	B	0.513	0.701	0.257			
	C	0.210	0.576	0.055			
	D	0.454	0.653	0.130			
NO.55	A	0.358	0.189	0.104	34km	965km	Horizontal 4.65(km/s) Vertical 2.99(km/s)
	B	0.298	0.050	0.064			
	C	0.209	0.026	0.010			
	D	0.497	0.172	0.033			
NO.69	A	0.240	0.283	0.446	552km	858km	Horizontal 7.69(km/s) Vertical 3.92(km/s)
	B	0.429	0.249	0.562			
	C	0.067	0.168	0.100			
	D	0.316	0.196	0.276			

Table 3 Weight Factors for Remainder Wave Calculation.

	NS	EW	UD
NO.40			
Akashi	0.460	0.280	0.550
Tarumi	0.910	0.820	1.450
Awaji	1.360	1.900	1.540
Monument	1.180	0.19	0.37
NO.49			
Akashi	0.525	0.185	0.650
Tarumi	0.780	1.205	0.950
Awaji	1.715	1.205	1.630
Monument	0.695	1.035	0.78
NO.50			
Akashi	0.720	0.48	0.72
Tarumi	0.88	0.88	0.80
Awaji	1.520	1.36	1.60
Monument	0.80	0.80	0.80
NO.55			
Akashi	0.70	0.70	0.75
Tarumi	0.90	0.85	0.85
Awaji	1.65	1.70	1.60
Monument	0.80	0.80	0.85
NO.69			
Akashi	0.75	0.65	0.70
Tarumi	0.70	0.90	0.65
Awaji	1.80	1.55	1.75
Monument	0.75	0.95	0.85

も残差波の割合が低くなっており、特にC点では1値を示している。また、No.40の若狭湾地震のような比較的近距离の地震では、短周期成分が部分的に大きく現れている部分の影響で、残差波の割合を結果的に非常に高くしているものと推察される。

4地点における残差波のパワーを比較すると、5つの地震の全てに関してC地点の残差波のパワーの割合が他観測点のパワーの割合を下回っている。C地点はarray apertureの中心に近い地点に位置している事が影響している可能性も考えられるため、より詳細な健闘を加えていく必要がある。

また、ビームフォーミング残差波を求める際に算出

された重み係数Table 3を各観測点の揺れ易さの指標として解釈することができる。長周期地震波については、概ね淡路観測点・垂水観測点・モニュメント観測点・明石観測点の順に揺れやすいという結果が得られた。特に淡路観測点は他の観測点と比較して著しく長周期地震動に対する応答が大きくなる傾向があることを裏付けている。

6. 結論

明石海峡周辺地域において地震動アレー観測を行って得た長周期地震記録を分析対象とし、ビームフォーミングによる成分と残差波の2つの成分への分解に基づいて地震記録を分析する手法について検討した。本研究では5つの地震に関する地震動記録を対象としたが、残差波のパワー比には個別の地震ごとの変動が含まれているが、観測サイト同士の比較では一定の傾向が見られ、空間的な相関関係についての傾向を示唆するものと解釈される。特に、淡路観測点の上下動成分においては、このパワー比率が1%の場合も存在する。この場合の記録は、ビームフォーミングにより得られる波形により十分な精度で説明できることを意味している。

一般に地震動は局所的な表層地盤以外にも、震源特性・地震動伝搬経路など様々な要因により影響を受けるため、特に個々の地震に依存した要素はまた別個に評価する必要がある。しかし、こうした分析によりサイト側に依存する特性あるいは地震動の影響のある側面を捉えるためのデータ評価の一つの手段として用いることができるものと考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたりご協力をいただいた、本州四国連絡橋公団第一建設局設計課、明石海峡情報管理室、垂水工事事務所の関係各位に深謝するものである。また、地震計の設置に当たっては、国立明石病院岩屋分院および(財)夢の架け橋記念事業協会の方々にお世話になった。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会本州四国連絡橋耐震・基礎に関する調査研究小委員会：本州四国連絡橋の耐震・基礎に関する調査研究報告書、昭和63年3月。
- 2) D. Johnson and D. Dudgeon: Array Signal Processing, Prentice Hall, 1993.