

京都大学工学研究科 フェロー 家村 浩和 京都大学工学研究科 正会員 五十嵐 晃  
 京都大学工学研究科 正会員 中西 伸二 西松建設(株) 正会員 ○高橋 卓也

1.はじめに

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(A地点)と垂水(B地点)、淡路島側の淡路(C地点)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(D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様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って定義される残差波を分析することにより、観測記録に含まれるビームフォーミングでは捉えられないサイト特性の定量的な評価を試みた。

2.対象の地震記録

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秒を超える長周期の地震動入力に着目している。そこで、1995年以前に明石海峡4点アレーにおいて4点同時に記録された、5つの比較的長周期地震記録を対象とした。

- ・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。

- ・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、記録前半に比較的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みられる。

- ・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播が確認できる。

- ・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播しておらず、長周期成分が非常に卓越している。

- ・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。

3.ビームフォーミング残差波

アレー地震記録は観測点固有の地盤や伝播条件などの影響を含んでいると考えられる。アレー観測地域が一様波動場であると仮定して、アレーの重心において得られる合成波形を各アレー観測記録から減算するこ

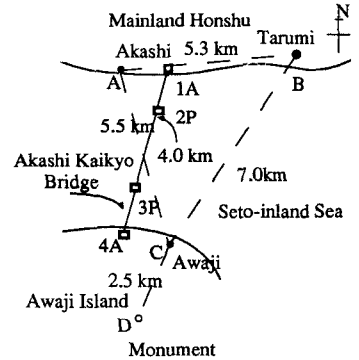


Fig.1 Location of Akashi Kaikyo Bridge and array observation system.

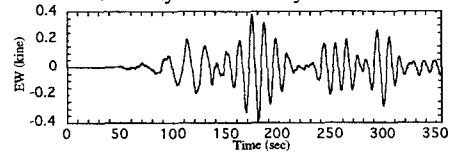


Fig.2.1 Velocity time history of Hokkaido Toho Oki earthquake at Akashi Station.

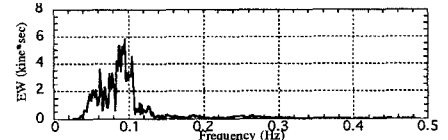


Fig.2.2 Fourier spectrum of Hokkaido Toho Oki earthquake at Akashi Station.

Table 1 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			

とで、近似的に残差波を求めローカルな地盤の影響の抽出を試みた。その際、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った。式としては以下になる。

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

$$\int_0^T |g(\bar{x}_i, t) - w_i \cdot f(t + \Delta t_i)|^2 dt \rightarrow \text{Min.} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

h: 残差波 g: 観測波形 w: ウェイト n: アレー観測点数  
f: アレー重心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ウェイトを(1)式に代入して残差波を求めた。また、残差波には(3)~(5)式のような性質があることは容易に示すことができる。

$$\int_0^T h(t) \cdot f(t) dt = 0 \quad (3) \quad \int_0^T g(t)^2 dt = \int_0^T h(t)^2 dt + w^2 \int_0^T f(t)^2 dt \quad (4)$$

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

ただし、

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt, G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i\omega t} dt$$

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幅の範囲内に必ず存在すること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の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。

各観測点の残差波パワーを増大させる要因として、各観測点の観測機器の影響や地盤の固有振動数の影響、さらにはビームフォーミングの際に捉えた波形とは異なった位相速度及び方位角を持った波の伝播による影響等が考えられる。

#### 4. 残差波に関する考察

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、それぞれのパワー及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成分の観測波のパワーと残差波とビームに重みを考慮してパワーを足したスペクトルの比較をそれぞれFig.3.1, 3.2示した。NO.55のA地点のEW成分とNO.69のD地点のUD成分の(5)式の関係を表した図をFig.4.1, 4.2に示す。これらの図より、観測波のフーリエスペクトルは二つのスペクトルの間に必ず存在していることがわかる。

Table 1は5つの地震に対して観測波形に対する残差波のパワーの割合を表したものである。この表より、NS・EW・UD3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な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してみると、他の地震と比べて3成分とも残差波の割合が低くなっており、特にC点では1%以下の値を示している。また、NO.40の若狭湾地震は近距離地震であり、記録前半部分に短周期成分が大きく現れており、この成分が残差波の割合を非常に高くしているものと推察される。

A、B、C、D地点の残差波のパワーの比較をしてみると、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ことが影響している可能性も考えられるため、より詳細な検討を加えていく必要がある。

#### 5. おわりに

ビームフォーミングによる波形合成には、少数のアレー地震記録に基づく限りにおいては必ずから精度に限界がある。しかし、本研究で扱っているような地震記録に限定すれば、ここで算出された結果によりサイト特性の差を評価することは基本的に可能である。

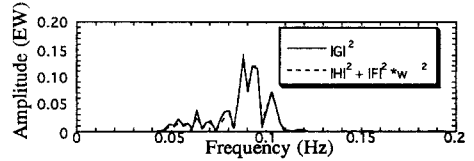


Fig.3.1 Power spectra of observed wave and remainder wave + beam\*weight\*\*2 at Akashi Station (NO.55).

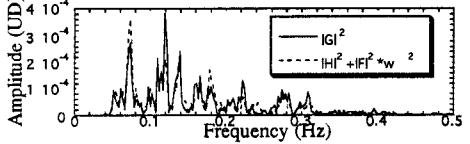


Fig.3.2 Power spectra of observed wave and remainder wave + beam\*weight\*\*2 at Monument Station (NO.69).

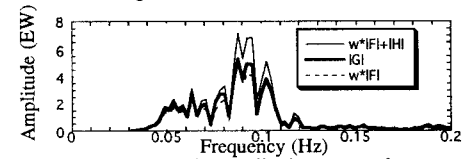


Fig.4.1 Fourier amplitude spectra of NO.55 at Akashi Station.

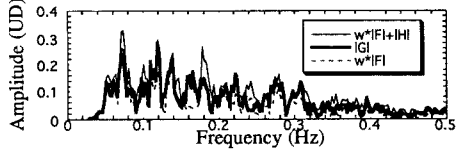


Fig.4.2 Fourier amplitude spectra of NO.69 at Monument Station.