

1999年台湾・集集地震における集鹿大橋架橋地点の 入力地震動の評価

怡土義博¹・庄司学²

¹学生会員 筑波大学 大学院理工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²正会員 博(工) 筑波大学講師 大学院システム情報工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

1. はじめに

近年、日本をはじめ、世界各国で大規模な地震災害が多発しており、社会基盤構造物の被災に伴って人々の生活環境や社会・経済活動は甚大な被害を被っている。特に、1999年に連発したトルコ・コジャエリ地震と台湾・集集地震では大きな強震動が観測されるとともに、地表面にまで断層変位が到達し、橋梁やパイプライン等のネットワーク構造物に多くの被害が発生した。中でも、台湾・集集地震では車籠埔断層が南北方向に約80kmにもわたって破壊し、これに起因する強震動と地表断層変位が原因となって数十橋の橋梁で甚大な被害が生じた。

台湾・集集地震によって被災した橋梁構造物の被害メカニズムに関しては、例えば文献1から3のように多くの研究者によって検討されている。しかし、これらの研究では、構造物に対する入力地震動として、近傍の観測点で観測された波形をそのまま用いる手法や地盤の残留変位を静的に入力する手法が採用される場合がほとんどである。このような手法では、当該構造物の立地地点における地震動の不確定性を留保した上で被害メカニズムを解明することになり、実際に構造物に作用した地震動と被害との関係が本質的に不明瞭なままである。

以上を踏まえ、本研究では、橋梁構造物の被害メカニズムを解明するために必要となる構造物の立地地点の地震動を直接的に数値シミュレーションによって再現した。その際、対象地震としては前述した台湾・集集地震を取り上げ、対象構造物としては同地震で被災した集鹿大橋を取り上げることとする。なお、集鹿大橋は大型のPC斜張橋で卓越周期が2秒以上となるため、地震波の再現周波数も集鹿大橋

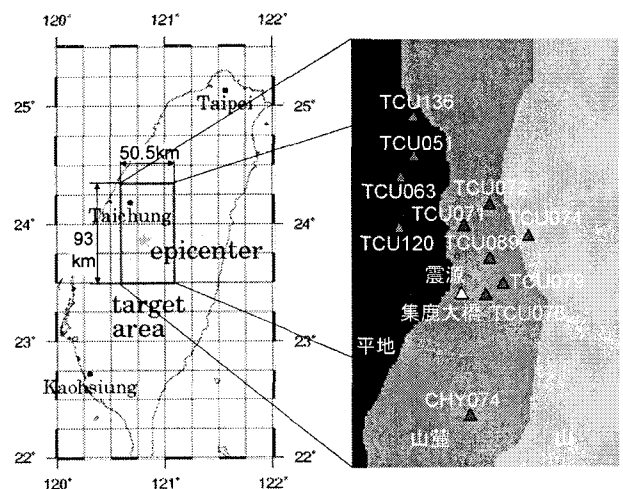


図-1 震源、集鹿大橋および強震観測点の位置関係

の卓越周期を狙い、やや長周期の周波数帯域に焦点を当てて入力波形の再現を試みるものである。

2. 台湾・集集地震および対象橋梁の概要

(1) 台湾・集集地震の概要

集集地震は1999年9月21日に台湾の集集を震源としたモーメントマグニチュード $M_w = 7.6$ の地震である。車籠埔断層が南北約80kmにわたり破壊し、断層変位が地表面にまで到達した。図-1には本地震の震源位置、解析対象橋の位置、計算波形の比較に用いた11の強震観測点の位置をそれぞれ示す。なお、後述する強震動のシミュレーションでは図-1に示す南北93km、東西50.5kmの領域を解析対象とする。

(2) 対象橋梁の概要

本研究で対象とする集鹿大橋は、震央からS30W方向へ約6kmの地点に位置するPC2径間斜張橋であ

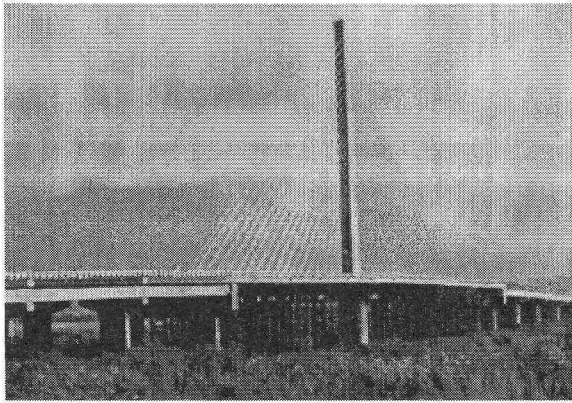


写真-1 集鹿大橋

表-1 集鹿大橋の構造諸元

形態	PC2 径間斜張橋
斜材	片側 17 段並列ケーブル 1 面吊り 2 組
主桁断面	円弧線形 2 室 1 主箱桁
桁高	2.75m
車線/全幅員	4 車線/24.0m
全長/支間長	240m/120m
主塔構造	中空菱形変断面 RC 造
断面	3.0m × 4.0 ~ 6.0m
高さ	58m
下部構造	6.0m × 6.3m 楕円形 RC 造
基礎	杭基礎

表-2 集鹿大橋の固有周期特性

モード	設計時固有周期(s)	文献5による固有周期(s)
1	2.28	1.99
2	1.79	1.66
3	1.04	1.19
4	0.94	1.08

り（写真-1），橋軸方向は概ね南北方向である。

表-1には本橋の設計時の構造諸元を示す。

被害の概要を図-2に示す⁴⁾。大きな損傷としては、写真-2に示すように主塔基部の東西方向面のかぶりコンクリートが剥離し、内側の鉄筋が露出した。また、橋軸直角方向に桁が移動し、ラーメン橋脚の上梁部にせん断ひび割れが発生した。これらの損傷状況より、地震時には東西方向に大きな地震動が作用したものと考えられる。さらに、主桁と主塔の剛結部において主桁コンクリートの剥離が生じ、特に南側では軸方向鉄筋の座屈が生じた。また、数本のケーブルで定着部のソケットと防震ゴムの抜け出しが発生した。

集鹿大橋の振動モード特性は文献5、6によって検討されている。表-2には設計時の固有周期と文献5による固有値解析の結果を示す。1次モードは橋軸直角方向（東西方向）、2次モードは逆対称の橋軸方向（南北方向）、3次モードは上下方向、4次モードは橋軸方向（南北方向）に励起されたモード形となる。

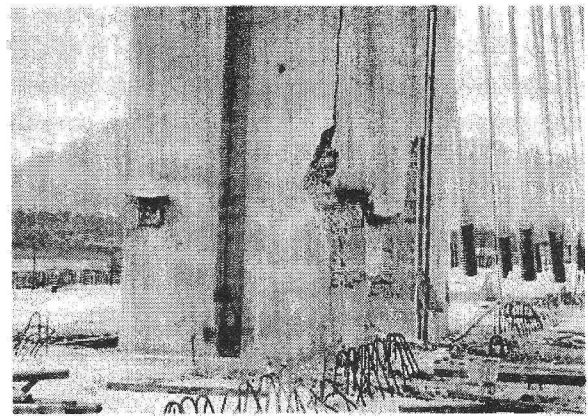


写真-2 主塔基部の損傷状況⁴⁾

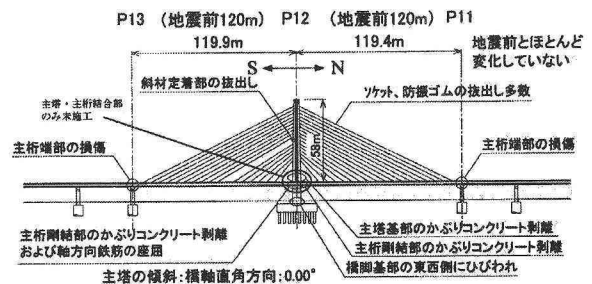


図-2 集鹿大橋の被害の概要⁴⁾

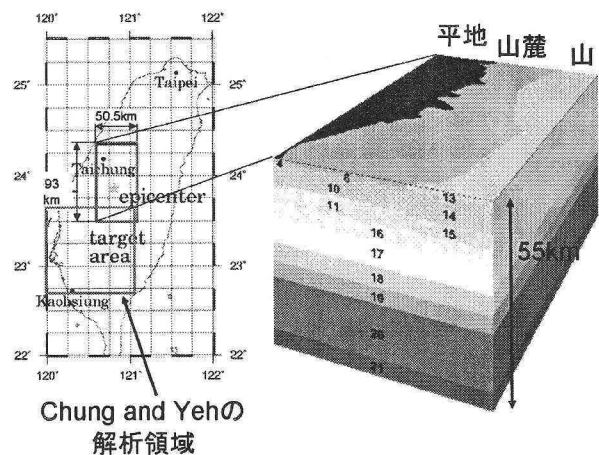


図-3 地下構造の設定

3. 入力地震動の再現

(1) 計算モデルの構築

a) 地下構造の設定

地下構造に関しては、Chung and Yeh⁷⁾によって推定された北緯22.7～23.7度、東経120.0～121.0度の領域における構造に基づいて、図-3に示す3次元積層構造を決定した。また、東西方向面における2次元構造を示すと図-4のようになり、これらの媒質の物性値を示すと表-3のようになる。山、山麓、平地の地形区分は地形図に基づき等高線より判断し、400m以浅の表層構造は時松、関口⁸⁾の微動アレイ観

深さ (m)	平地	山麓	山
0		200 1	
400	2	910 7	
600	3		12
1500	4	1910 8	
2000	5		13
3000	6	9	
3700			4000 14
8000	10		9000 15
13000	11		
17000		16	
25000		17	
30000		18	
35000		19	
50000		20	
55000		21	

図-4 2次元積層構造

表-3 媒質の物性値

媒質 番号	P 波速度 (m/s)	S 波速度 (m/s)	密度 (kg/m ³)	Q 値 (1Hz での値)
1	2090	1000	1900	90
2	1980	900	2100	100
3	2900	1320	2200	100
4	3476	1580	2300	150
5	3484	1960	2400	200
6	4551	2560	2500	250
7	2880	1550	2000	100
8	3150	1700	2050	200
9	4370	2500	2300	250
10	5130	2850	2400	250
11	5900	3300	2600	270
12	3480	1960	2400	200
13	4480	2620	2500	250
14	5250	3030	2600	250
15	5830	3350	2650	270
16	6210	3610	2700	300
17	6410	3710	2750	350
18	6830	3950	2800	400
19	7290	4210	3000	500
20	7770	4490	3100	500
21	8050	4680	3100	500

測結果を参考に設定した。

b) 震源断層の設定

震源断層に関しては関口、岩田⁹⁾のインバージョン解析結果に基づいてモデル化した。このモデルに基づく震源断層は図-5に示すように南北80km、東西40km、深さ20kmの領域に広がったものとなる。この断層を南北方向に26、東西方向に13の小断層に分割し、それぞれに点震源を設定した。破壊過程は、図-6に示すような幅2秒のタイムウィンドウを1.2秒ずつずらして8つのタイムウィンドウを各小断層上に設定することで表現した。震源時間関数には Smoothed ramp function の微分形を使用した。

c) 計算アルゴリズムと計算条件

解析には4次精度の有限差分近似に基づいた Ground Motion Simulator(GMS)¹⁰⁾を使用した。計算領域は図-7に示すように南北93km、東西50.5km、深さ55kmとし、計算メッシュサイズは深さ24kmまで

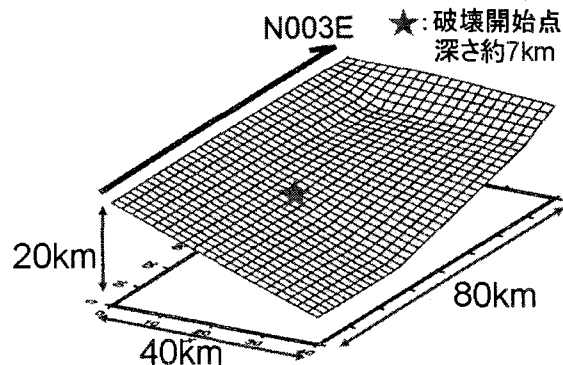


図-5 震源断層モデル⁹⁾

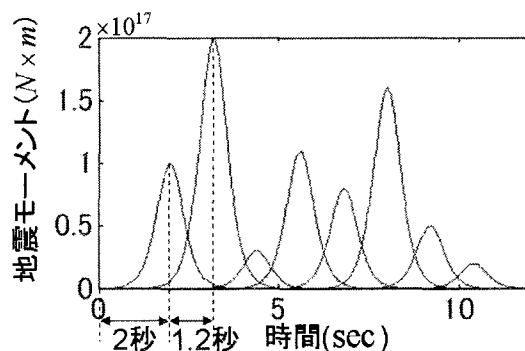


図-6 タイムウィンドウの設定

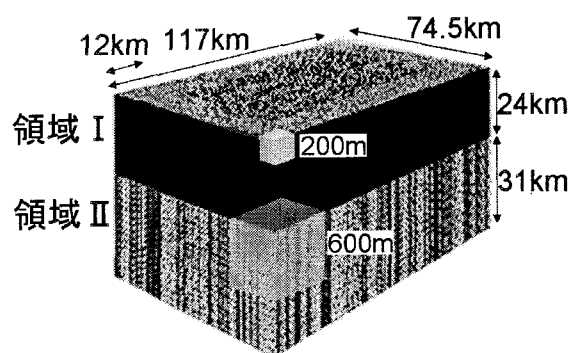


図-7 計算領域

表-4 差分計算に関する計算条件

設定項目	設定値	
	領域 I	領域 II
想定上限周波数	0.9Hz	
サンプリング数	6000	
サンプリング周期	0.01秒	
計算時間	60秒	
メッシュサイズ	200m	600m
領域 I と II の境界深さ	24km	
吸収境界格子数	60	20
吸収境界領域の減衰定数	0.005	0.015

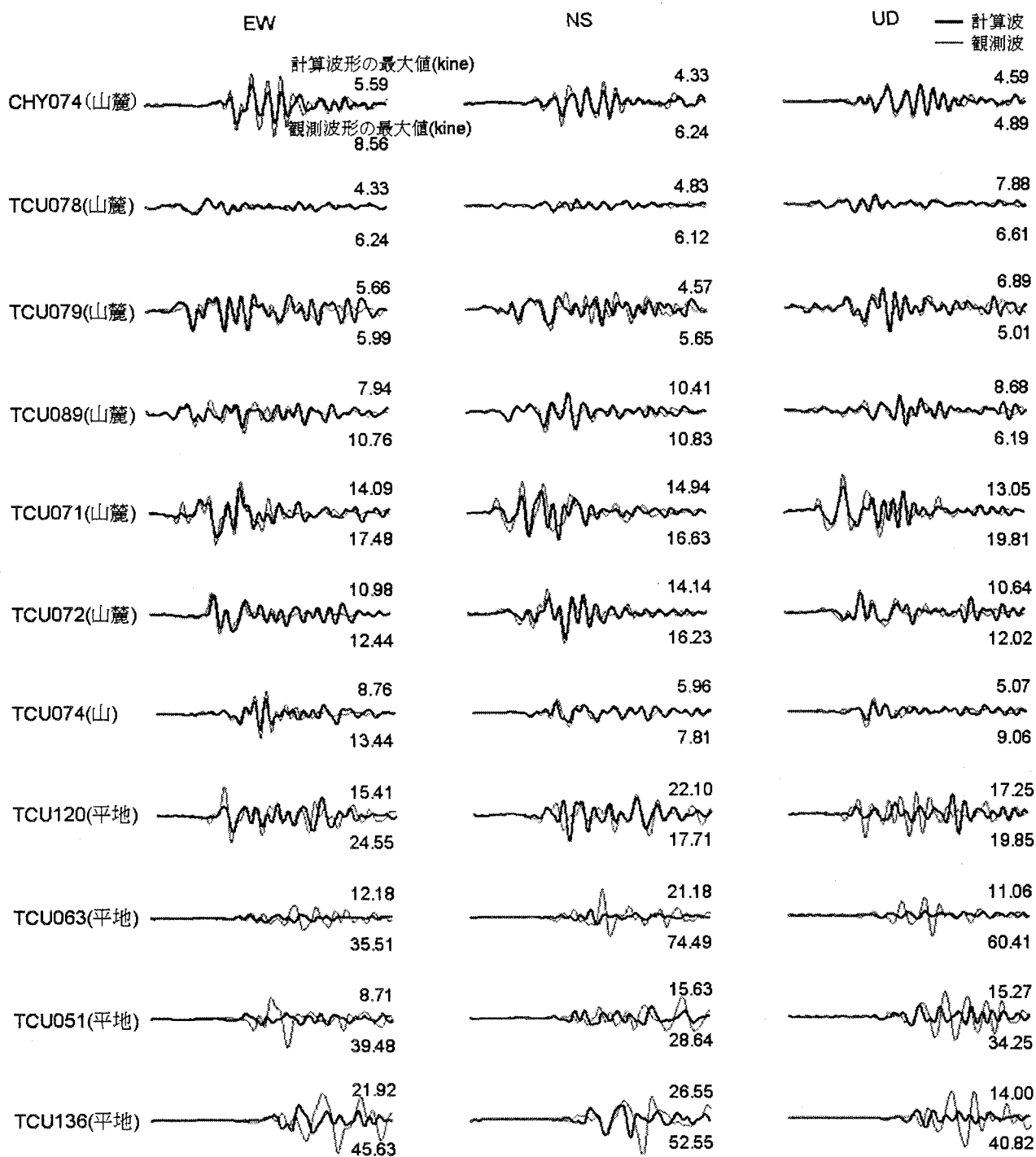


図-8 計算波形と観測波形の比較

の領域Iでは200m, それ以深の領域IIでは600mとした。境界条件は計算領域外に幅12kmの吸収境界を設定した¹¹⁾。また、表-4に示すように上限周波数を0.9Hz, サンプル周期を0.01秒として計算を行った。

(2) 計算波形と観測波形の比較

計算波形に対して0.05~0.2Hzのバンドパスフィルタを施し、観測波形との比較を行うと図-8のようになる。これより、山と山麓に位置する観測点では

ほぼ完全に計算波形は観測波形を再現できていることがわかる。一方、平地に位置する観測点では、TCU120における再現性が良好であるのみで、TCU120よりも北に位置するTCU063, TCU051, TCU136(図-1参照)における再現性は振幅および位相特性ともに低い。今後は、表層構造の再考を含め、地下構造の修正を検討するとともに、震源断層モデルにおける点震源やタイムウィンドウの設定に関して修正を行い、平地に位置する観測点における計算波形の再現性を向上していく予定である。

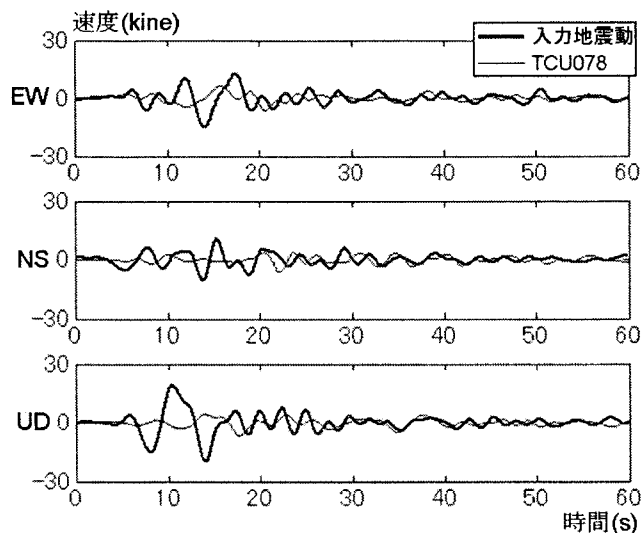


図-9 集鹿大橋立地地点の計算波形と TCU078 の観測波形

(3) 集鹿大橋立地地点における入力地震動の再現

以上より、集鹿大橋立地地点の入力地震動と、集鹿大橋と同じく山麓に位置し、集鹿大橋から約7.5km離れた地点に位置するTCU078の観測波形とを比較すると図-9のようになる。また、減衰定数が0.05の場合の速度応答スペクトルを求め、比較すると図-10のようになる。これらによれば、集鹿大橋立地地点とTCU078の波形は5～8秒の周期帯域において振幅特性に大きな相違があり、また、図-9の時系列の波形によると位相特性にも違いがあることが明らかである。

なお、台湾・集集地震における441の観測記録を用いて、高田、下村¹²⁾はマクロ空間相関係数 $R_{LL}(h)$ を次式のように近似的に導いている。マクロ空間相関とは、既往の距離減衰式によって求められる最大地動の中央値に対する各観測点の最大地動のばらつきを計算し、これらのばらつきと2点の観測点間の離間距離 h との相関を求めたものである。

$$R_{LL}(h) = \exp(-h/b) \quad (1)$$

ここで、 b は距離減衰式、最大地動および観測波形成分の相違を反映した係数であり、司、翠川¹³⁾の距離減衰式、最大速度、東西方向成分波形の場合には29.5となる。

集鹿大橋立地地点とTCU078との離間距離は約7.5kmであるため、式(1)によればマクロ空間相関係数 $R_{LL}(h)$ は約0.76となる。式(1)の最大速度に対する適用性に関しては高田、下村が指摘している通り注意を要するが、一方で上述のマクロ空間相関係数を参考値として解釈すれば、集鹿大橋立地地点と

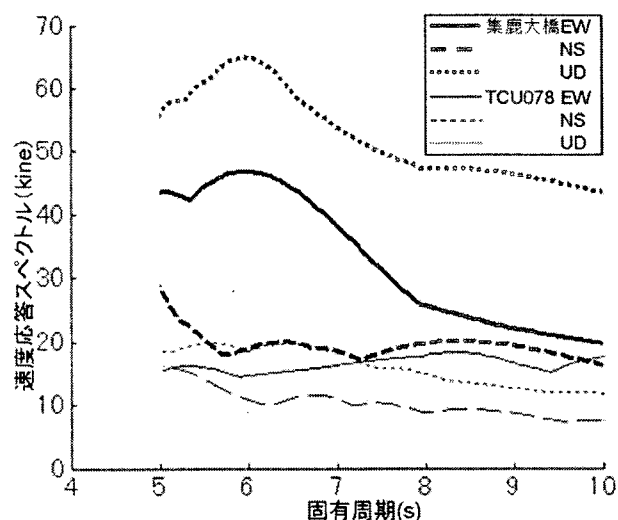


図-10 速度応答スペクトルの比較 (減衰定数 0.05)

TCU078での波形特性が異なることはマクロ空間相関の観点からも説明可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では1999年台湾・集集地震時に被災した集鹿大橋の被害メカニズムを解明するため、集鹿大橋立地地点の入力地震動の再現を試みた。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 計算波形は山、山麓に位置する観測波形をほぼ完全に再現したが、平地に位置する観測波形はTCU120以外、振幅および位相特性ともに再現性が低かった。今後は、表層構造の再考を含め、地下構造の修正を検討するとともに、震源断層モデルにおける点震源やタイムウィンドウの設定に関して修正を行なう予定である。
- 2) 集鹿大橋立地地点の入力地震動を再現するとともに、これらの計算波形と同橋と同じ山麓に位置し、同橋との離間距離が約7.5kmであるTCU078の観測波形と比較したところ、振幅および位相特性ともに相違が見られた。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)(1)（研究代表者：九州工業大学、幸左賢二教授）の一環として実施したものである。また、本研究を実施するに当たり、(独)産業技術総合研究所の関口春子氏には震源断層データの提供など数多くの貴重な御助言をいただきました。また、差分計算には(独)防災科学技術研究所の青井真氏および藤原広行氏が開発されたGMSを使用しました。ここに記して関係各位に対して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Unjoh, S. and Kondoh, M. : Analytical Study on the Effect of Fault Displacement on the Seismic Performance of Bridge Structures, *Proceedings of the Second International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures*, pp.222-233, Taipei, Taiwan, R.O.C., 2000
- 2) Chang, K.C., Mo, Y.L., Chen, C.C., Lai, L.C. and Chou, C.C. : Lessons Learned from the Damaged Chi-Lu Cable-Stayed Bridge, *Proceedings of the Third International Workshop on Performance-Based Seismic Design and Retrofit of Transportation Facilities*, pp.123-135, Tokyo, Japan, 2002.7
- 3) 田崎賢治, 幸左賢二, 手嶋康博, 小郷政弘 : 台湾集集地震における長庚橋の桁衝突解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.49A, pp. 573-580, 2003
- 4) 川島一彦, 家村浩和, 庄司学, 岩田秀治 : 1999年集集地震(台湾)における交通施設の被害と被災メカニズムに関する検討, 東京工業大学・耐震工学研究グループ・報告書, TIT/EERG 99-8, 1999
- 5) 幸左賢二, 山口栄輝, 高橋良和, 野村敏雄 : 台湾・集集地震における強震動による橋梁被害分析, 橋梁と基礎, pp.28-35, 2002.9
- 6) Tai, J.C. and Liou, Y.-Y. : Retrofit on Ji-Lu Cable Stayed Bridge after 921 Chi-Chi Earthquake, *Proceedings of the Second International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures*, pp.222-233, Taipei, Taiwan, R.O.C., 2000
- 7) Chung, J.-K. and Yeh, Y.T. : Shallow Crustal Structure from Short-Period Rayleigh-Wave Dispersion Data in Southwestern Taiwan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.87, No.2, pp.370-382, 1997.4
- 8) 時松孝次, 関口徹 : 微動観測から推定した台湾集集地震強震観測点の表層S波速度構造とその建物被害への影響, 日本建築学会構造系論文集, 第550号, pp65-70, 2001
- 9) 関口春子, 岩田知孝 : 1999年台湾・集集地震のやや長周期(2-20秒)震源過程, 活断層・古地震研究報告, No.1, pp315-324, 2001
- 10) 青井真, 藤原広行 : 不連続格子を用いた4次精度差分法による波形合成, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.875-879, 1998
- 11) Clayton, R. and Engquist, B. : Absorbing Boundary Conditions for Acoustic and Elastic Wave Equations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.67, No.6, pp.1529-1540, 1977.12
- 12) 高田毅士・下村哲人 : 台湾集集地震に基づく地震動のマクロ空間相関特性, 日本建築学会構造系論文集, 第565号, pp41-48, 2003
- 13) 司宏俊, 翠川三郎 : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp63-70, 1999