

トルコ・コジャエリ地震および台湾集集地震の地震動強さ

片岡 俊一 半澤 徹也 猿田 正明 石井 透
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Severity of the Earthquake Ground Motion Observed During the 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake and the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake

by Shunichi Kataoka, Tetsuya Hanzawa, Masaaki Saruta and Toru Ishii

Abstract

The 1999 Kocaeli, Turkey earthquake and the 1999 Chi-chi, Taiwan earthquake occurred close to cities and caused severe damage around the cities. There are several differences between these two earthquakes. One is that the Kocaeli earthquake is a strike-slip fault type and the Chi-chi earthquake is a reverse fault. In Japan, however, both of these types are presents. It is very important to study the ground motions that were observed in the fault region in order to advance the seismic design not only for Turkey and Taiwan but also for Japan. In this paper, we compare the severity of the ground motions with the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake. Following indices are chosen: peak ground acceleration, peak ground velocity, spectral intensity, duration time, calculated seismic intensity, response spectra and ductility factors. These indices show that ground motions observed during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake is the most severe among the three earthquakes.

概要

トルコ・コジャエリ地震と台湾集集地震は、都市のごく近傍に起き、大規模な災害を起こした。前者の地震は、横ずれ断層による地震であり、後者は逆断層による地震と言った違いはあるが、日本では両者の断層タイプが存在し、これらの地震による断層近傍の地震動を研究することは、今後の日本における耐震設計に有用と考えられる。そこで、本報告では1995年兵庫県南部地震の神戸市内の記録も併せて、三つの地震の地震動強さを検討した。地震動強さとして取り上げたものは最大加速度、最大速度、スペクトルインテンシティ (SI)、継続時間、計測震度、加速度・速度応答スペクトル、非線形応答スペクトルである。計測震度およびSIについては、兵庫県南部地震の記録が他の記録よりも大きいことが分かった。

§ 1. はじめに

1999年に引き続いて起きた、トルコ・コジャエリ地震(8月17日、以下コジャエリ地震)、台湾集集地震(9月21日、以下集集地震)は、都市のごく近傍に起きたことから、都市に大規模な災害を起こした。日本では1995年兵庫県南部地震以降、都市近傍に位置する活断層により引き起こされる地震動あるいはそれに続く被害については、様々な面から研究が進んでいる。今回の地震のうちトルコで起きた地震は横ずれ断層による地震であり、台湾で起きたは逆断層による地震と言った違いはあるが、日本では両者の断層タイプが存在するので、これらの地震による断層近傍の地震動を研究することは、今後の日本における耐震設計に非常に有用と考えられる。そこで、本報告では日本において初めて断層近傍の地震動が観測された、1995年兵庫県南部地震(以下、兵庫県南部地震)

の記録と両地震の記録を比較して、震源断層近傍の地震動強さを考える。

§ 2. 地震および地震動の概要

2.1 地震諸元

3つの地震の諸元を表-1に示す。なお、ここでは地震の規模を表すマグニチュードとして、モーメントマグニチュード (M_w と表記) を用いる。これは、各国が発表するマグニチュードはその定義が各国によって微妙に異なっており比較が容易ではないが、地震モーメントから定まるモーメントマグニチュードは国際的に比較が可能だからである。また、表-1に記した断層の長さとは幅は、地震モーメントをもとに破壊伝播速度を仮定して求めているため、研究者によってその

値が異なり、地表に表れた地表断層の長さとも異なる。同様にすべり量も地震モーメントから岩盤の剛性を仮定して求めたものであり、研究者によって異なる可能性がある。

表-1から、マグニチュードの面から見るとコジャエリ地震、集集地震は兵庫県南部地震よりも規模が大きかったことが分かる。

	兵庫県南部地震	コジャエリ地震	集集地震
震央#	34.61N, 135.04E	29.97N, 40.77E	23.85N, 120.78E
震源深さ# [km]	14.3	17	1
Mw*	6.9	7.4	7.6
長さ×幅 [km]	40×10+	60×20++	80×40++
すべり量 [m]	2.1+	4.2++	2.2++
断層破壊形状	右横ずれ	右横ずれ	低角逆断層

注)#: その国の担当機関の発表による

*: USGS が決めたもの

+: 参考文献¹⁾による

++: 東京大学地震研究所、EIC 地震学ノート

(<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp>

/EIC/EIC_News/index.html) による

表-1 地震諸元

2.2 断層と強震観測点

コジャエリ地震の震央及び推定断層面²⁾の水平面投影と強震観測点の関係を図-1に示す。断層破壊は、震源から東西二方向に伝播し、大きなすべりは断層面上の震源付近と断層面東側の浅い部分にある²⁾と言われている。図から断層から近い距離において強震記録が得られていることが分かる。

集集地震の震央及び地表に表れた断層と強震観測点の位置を図-2に示す。断層破壊は震源から南北二方向に伝播し、断層面上で最も大きなすべりを示すのは震源の北側30km程度の位置である²⁾。台湾全土には、自由地盤における強震観測が600以上の地点で行われており、今回の地震でも非常に多くの記録が得られている³⁾。

2.3 代表的な記録の波形

兵庫県南部地震の教訓の一つとして、地震動のディレクティビティ効果が挙げられる⁴⁾。これは、断層面上における破壊が進む方向に位置する地域において、破壊が遠ざかる地域に比べると、地震動の継続時間が短くかつ振幅が大きくなる現象である。破壊が伝播す

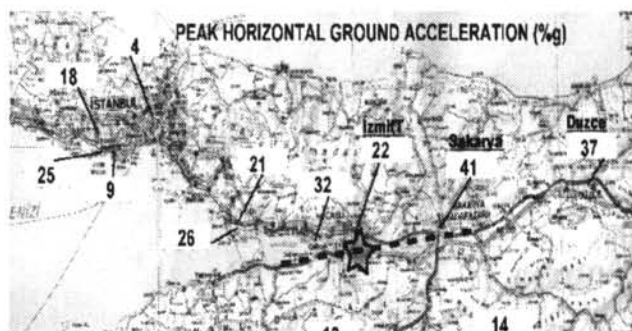


図-1 コジャエリ地震の震央(星印)、推定断層面の地表投影(破線)と強震観測点および水平最大加速度(重力加速度に対する%)
<http://geophysics.gg.utk.edu/izmit/earthquake.htm>の図に加筆

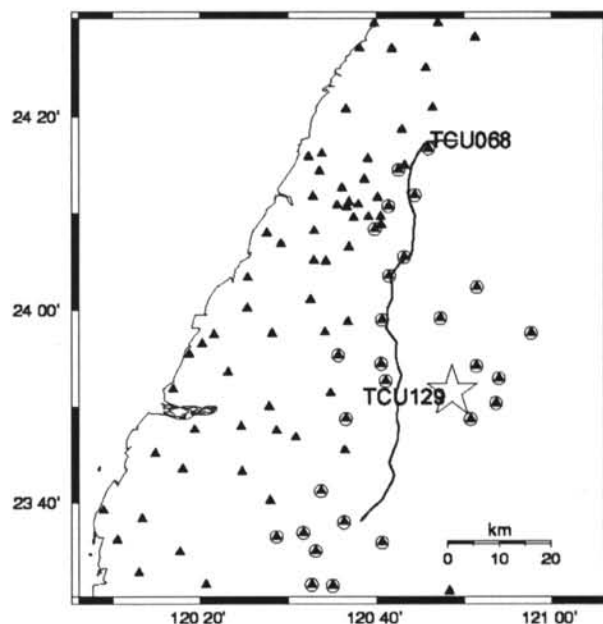


図-2 集集地震の震央(星印)、地表面に表れた断層(太実線)および強震観測点(黒三角)の位置

る方向に位置する地域に関しては、フォワードディレクティビティ、破壊が遠ざかる地域に関してはバックワードディレクティビティと呼ぶこともある。そこで、今回の2つの地震についてもディレクティビティの効果という観点から地震動を選択した。

コジャエリ地震の記録としては、震央に近い Izmit と断層破壊が伝播した方向に位置する Duzce (図-1 参照)、集集地震の記録として震央に比較的近い TCU129 と地表に断層が現れた地域の北端に位置する TCU068 (図-2 参照) を代表例とする。兵庫県南部地震については、神戸海洋気象台 (KOB) と葺合 (Fuki) の記録を用いる。

加速度波形を図-3に示す。なお、この波形は振幅

の平均値が0になるように、基準線を補正してある。コジャエリ地震、集集地震ともに震源近傍の地震動 (Izmit, TCU129) は、継続時間が長く複雑な形状をしているが、破壊が伝播してくる観測点 (Duzce, TCU068) の記録は比較的単純で一つの大きなパルス状の波が表れている。兵庫県南部地震の2つの記録は、いずれも破壊が伝播してくる方向に位置することから、比較的単純な波形となっている。これが、ディレクティブティ効果である。なお、コジャエリ地震と集集地震では震源から2方向に破壊が伝播したために、震央付近では、両方向のバックワードディレクティブティの影響で、振幅が小さくなった可能性がある。

なお、コジャエリ地震の記録は、トルコの公共事業住宅省のホームページ (<http://www.deprem.gov.tr/>) からダウンロードしたものであり、集集地震の記録は1999年12月にCD-ROMで公開されたもの⁵⁾である。また、トルコの観測点の地盤状況は、参考文献(6)表層のS波速度が300m/sを超える良好な地盤である。台湾の観測点についての報告は、現在のところない。現地を見た感じでは、TCU068の周辺で断層が地表に表れているものの、観測記録がその周辺の地震動を代表しているように思われた。

§ 3. 各種地震動強さ指標

地震動強さの指標として、最大地動加速度 (PGA)、加速度波形を積分して求めた最大地動速度 (PGV)、スペクトル強度 (SI)、継続時間および気象庁の計測震度をまとめて表-2に示す。ここで、加速度記録から速度波形への積分は振動数領域で因果性を考慮できる方

		PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]	SI [cm/s]	継続 時間 [s]	計測 震度
Izmit	SN	166	21	22	15.4	5.0
	EW	222	36	33	14.0	
	UD	131	16	10	17.4	
Duzce	SN	308	52	46	11.9	5.7
	WE	363	55	63	12.1	
	UD	470	23	16	12.1	
TCU129	NS	611	50	36	31.0	6.0
	EW	983	46	56	27.6	
	UD	329	37	28	51.0	
TCU068	NS	357	155	72	13.3	6.0
	EW	497	158	94	12.9	
	UD	520	144	78	9.4	
KOB	NS	818	91	114	8.3	6.4
	EW	617	76	87	9.5	
	UD	332	40	47	9.7	
FUKI	X	687	57	61	7.0	6.5
	Y	803	124	150	6.8	

表-2 用いた記録の特性値

法⁷⁾で行い、その際のハイパスフィルターはカットオフ振動数を0.1Hzとしたものを用いている。継続時間は、加速度のパワーが5%から95%まで累積されるまで

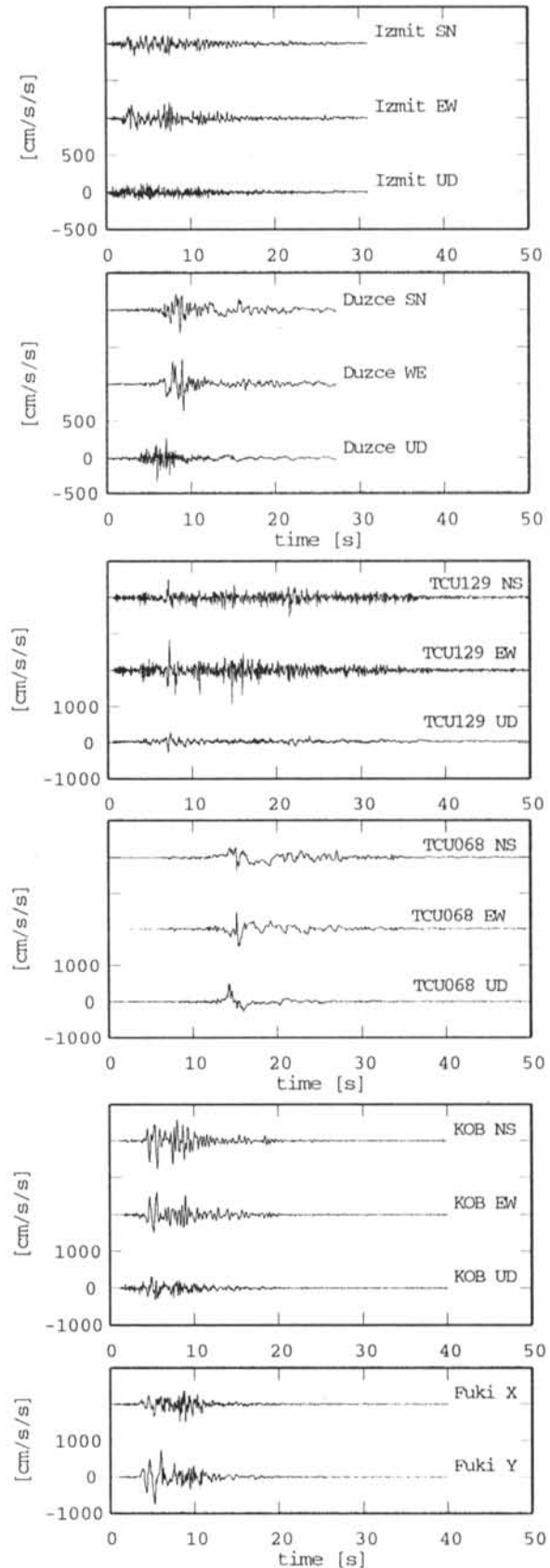


図-3 加速度記録

の時間とした。

最も大きな最大加速度は、集集地震の TCU129 の EW 成分であるが、これは波形からパルス的なものであることが分かる。また、最も大きな最大速度は集集地震の際の TCU068 で、水平 2 成分は 150cm/s を越えており、上下動もほぼ 150cm/s 程度となっている。この記録は積分方法を変えれば 200cm/s を越えることが指摘されている⁸⁾。

一方、スペクトル強度の最も大きなものは兵庫県南部地震の際の Fuki である。これまで、最大速度と SI とはほぼ等しいと言われており、例えば参考文献 9) ではスペクトル強度 (SI) と最大地動速度 (PGV) との関係を示す式を、

$$SI = 1.18PGV$$

としている。関係式のばらつきを考えると、Duzce と台湾の 2 つの記録を除けばこれまでの関係式が成立すると言えよう。しかしながら、Duzce と TCU068 では、3 成分とも最大地動速度の方が SI よりも大きく、特に TCU068 では SI が PGV の半分程度となっている。これは SI を算出する周期範囲が 0.1 秒から 2.5 秒であるのに対し、両地点で卓越している周期がそれより長いと考えられる。また、参考文献 8) では、今回の集集地震の記録からスペクトル強度と最大地動速度の関係を

$$SI = 0.66PGV$$

と求めている。つまり、集集地震で観測された地震動記録は、一般的に SI を計算する範囲より長周期の成分が卓越していると言えよう。地震規模が大きくなると長周期成分は励起されやすくなるが、今回の特徴が規模の大きい地震の一般的な特徴であるかについては、さらなる検討が必要である。

継続時間は、同じ地震で比較すると、震央付近の観測点の方が、長くなっていることが分かる。これは、前述したバックワードディレクティビティの効果の影響である。フォワードディレクティビティの効果が出ている Duzce および TCU068 は、兵庫県南部地震の記録と比較すると、地震規模の大きい順に継続時間が長くなっているが、その差は小さい。

計測震度は、5 から 6.5 の範囲であるが、兵庫県南部地震の記録から算出された震度が最も大きくなっており、地震の規模と対応している訳ではない。計測震度は、1 地点における水平 2 成分上下 1 成分の加速度記録を 3 種類のフィルターを用いて処理し、ベクトル合成した波形をもとに、継続時間を考慮してその最大値から算出する¹⁰⁾。この際のフィルター特性は周期 1 秒程度の成分を強調するものである。兵庫県南部地震の際の記録は後述するように周期 1 秒程度の成分が卓越していたために、今回の記録の中で最も震度が大きくなったと言えよう。

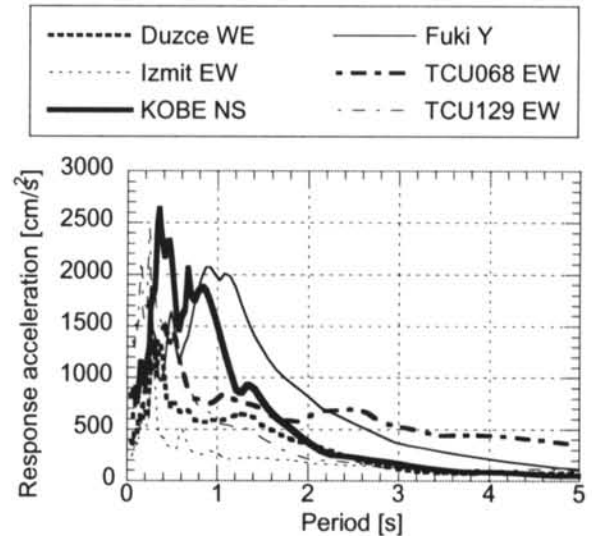


図-4 加速度応答スペクトル

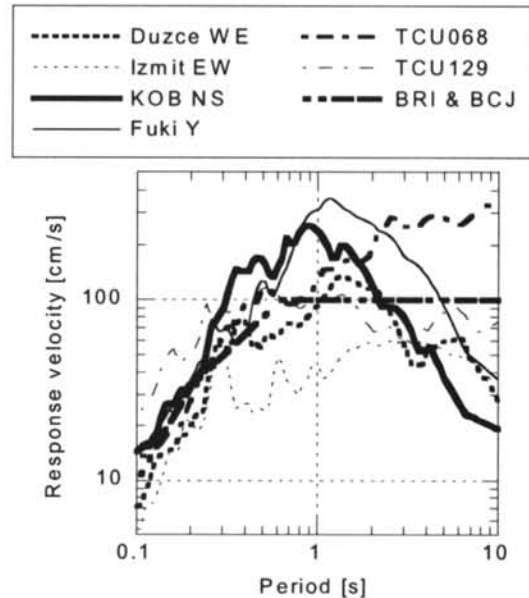


図-5 速度応答スペクトル

§ 4. 応答スペクトルの比較

ここでは、水平動の応答スペクトルを比較する。兵庫県南部地震の記録を除くと、それほど強い方向性が見られなかったため、最大加速度が大きな成分で応答スペクトルを比較する。

4. 1 線形応答スペクトル

図-4は、減衰定数を5%とした時の加速度応答スペクトルを比較したものである。加速度応答は、兵庫県南部地震の2記録が際だって大きいことが分かる。KOBでは

周期 0.4 秒前後、Fuki では周期 1 秒前後において、応答が 2000cm/s^2 を越えている。周期 1 秒前後では KOB でも卓越しているが、これは断層面上の主要な破壊領域（アスペリティ）の大きさから決まる卓越周期であり、兵庫県南部地震の特徴でもある。この周期帯域では、他の 4 つの記録はせいぜい 800cm/s^2 程度であるのに対し、兵庫県南部地震の記録では 1500cm/s^2 を越えている。

短周期領域では、TCU129 が周期 0.2 秒で 2000cm/s^2 を越えている。一方、長周期領域では TCU068 が卓越しており、周期 5 秒であっても応答値は 400cm/s^2 程度となっている。

また、地震毎に線種を変えているが、応答にもディレクティビティの効果を見ることができ、震央付近の記録（細線）よりも破壊が伝播してくる地域の記録（太線）の方が大きくなっていることが分かる。

減衰を 5% とした場合の擬似速度応答スペクトルを図一 5 に示す。兵庫県南部地震の 2 つの記録が周期 1 秒前後で卓越していることがよく分かる。一方、TCU068 は周期が長くなるとともに応答も大きくなっており、長周期成分に富んだ記録であることが分かる。

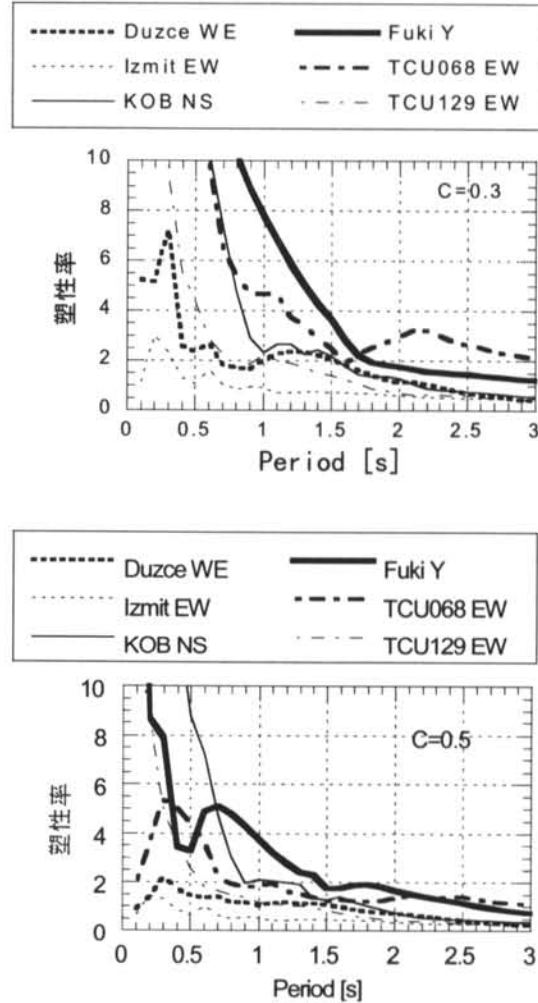
図には、建築研究所と日本建築センターが提案している露頭工学的基盤 ($V_s \sim 400\text{m/s}$, N 値 50 以上) での設計用地震動スペクトル¹¹⁾のうちレベル 2 地震動も示してある。このレベル 2 地震動は周期約 0.7 秒から 10 秒まで 100cm/s の一定値となっているが、兵庫県南部地震の 2 記録は周期 5 秒程度まで上回っており、Duzce は周期 1 ~ 2 秒の範囲で上回っている。また TCU129 はほぼ同程度の応答となっている。

4. 2 非線形応答スペクトル

兵庫県南部地震の後に話題になったこととして、比較的周期の長い大振幅の単純な地震動（大振幅パルス）が構造物に与える影響がある。このような地震動を構造物が受けた場合、地震動の卓越周期より固有周期が短い場合には、振動応答現象を生じることなく、いわば慣性力が片側から作用している状態で、大きな慣性力のために破壊するのではないかと指摘されている。

そこで、構造物の損傷程度を検討するために、塑性応答スペクトルを計算した。ここでは、2 次勾配を初期勾配の 1/100 としたバイリニア型の復元力特性を有するモデルを用いて塑性率を算出し、線形時の固有周期に対してプロットした。なお、除加時の勾配は初期勾配と同じとし、減衰は初期剛性比例型で 5% と仮定している。

降伏耐力係数を 0.3、0.5 とした場合の塑性応答スペクトルを図一 6 に示す。コジャエリ地震の記録では、短周期領域で大きな塑性率を示すものの、 $C=0.3$ の場合でも周期 0.5 秒を超えると塑性率は概ね 2 程度になり、それほど破壊能が強い地震ではないことが分かる。TCU129 も同様



図一 6 塑性応答スペクトル

な傾向で、周期 0.6 秒を超えると塑性率は 2 を下回る。

比較的広い周期帯域にわたって塑性率が大きなものは、Fuki と TCU068 である。特に、TCU068 は長周期が卓越しているために、周期 2 秒強で $c=0.3$ の場合塑性率が 3 程度となる。また、Fuki では周期 1.7 秒より短い周期帯域では、塑性率は 2 を大きく上回る。しかしながら、 $c=0.5$ とすると特に長周期帯域において、この状況は大きく変わり Fuki を除けば、周期 1 秒以上で塑性率は 2 を下回り、Fuki でも塑性率は 4 程度となる。

§ 5. おわりに

1999 年の 8 月、9 月に引き続いて起きた、トルコ、コジャエリ地震と台湾、集集地震とにおいて観測された今日新記録の地震動強さを兵庫県南部地震の記録と比較した。コジャエリ地震と集集地震では、少なくない数の強震記録が得られたことから、震央付近と破壊伝播が進む地域の地震記録を選び、破壊伝播が地震動におよぼす影

響（ディレクティビティ）も同時に検討した。

その結果、次のことが指摘できた。

- 地震動の最大値（最大加速度、最大速度）は集集地震における記録が最も大きい、SI は兵庫県南部地震の記録が最も大きかった。
- 集集地震では、SI と最大速度の関係が従来の関係式とやや異なっており、最大速度が SI よりも大きくなっていた。
- 計測震度では、兵庫県南部地震の記録が最も大きかった。
- 継続時間は、地震規模が大きい順に長くなったが、その差は小さかった。
- 応答スペクトルで見ると、概ね兵庫県南部地震の記録が大きい、集集地震の TCU068 は長周期成分が大きく卓越していた。
- 塑性率で比較しても、兵庫県南部地震の Fuki が極めて大きかった。TCU068 も周期 2~3 秒で塑性率が 3

程度となるが、それよりも長い周期では塑性率は 2 程度になる。

今回の検討では、3つの地震の際に異なる地震計で観測された地震記録を比較することから、全ての記録一律の処理を行った。しかしながら本来ならば、加速度記録の基線補正、積分方法やその際に用いるハイパスフィルターのカットオフ振動数などは、地震記録毎に十分に吟味すべきことである。今後は、地震計の情報とも収集し、処理方法を再吟味したいと考えている。

謝辞

本検討は、地震記録の早急な公開なしにはできなかつたものであり、早急な公開をされたトルコ公共事業住宅省、台湾中央気象局に敬意と謝意を示す。

本検討を行うに当たっては、技術研究所構造研究開発部応用解析グループの宮腰淳一研究員に様々な助言を頂いた。記して謝意を示す。

<参考文献>

- 1) Kikuchi M. and Kanamori H., Rupture process of the Kobe, Japan Earthquake of Jan. 17, 1995, Determined from Teleseismic body waves, J. Phys. Earth., vol.44, 429-436, 1996.
- 2) 東京大学地震研究所, EIC 地震学ノート (http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/index.html)
- 3) Shin, T. C., K. W. Kuo, W. H. K. Lee, T. L. Teng, and Y. B. Tsai : "A preliminary report on the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake", Seismological Research Letters, (in printing).
- 4) 頼瀬一紀 : "カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震", 科学, 66, No. 2, 93-97, 1996.
- 5) Lee, W. H., T. C. Shin, K. W. Kuo, and K. C. Chen : "CWB free-field strong-motion data from the 921 Chi-Chi earthquake: Volume 1. Digital acceleration files on CD-ROM, Pre-publication version (December 6, 1999)", Seismology center, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, 1999. p
- 6) Japan Society of civil engineers : "The Kocaeli Earthquake", Turkey, - The investigation into damage to civil engineering structures -, 1999. 12.
- 7) 林康裕, 勝倉裕, 渡辺孝英, 片岡俊一, 横田治彦, 田中貞二 : "デジタル強震計の加速度記録を積分して得られる変位の信頼性について", 日本建築学会構造系論文報告集, No.419, pp.57-66, 1991.1.
- 8) 宮腰淳一, 護雅史, 神原浩, 林康裕 : "地震観測記録を用いた台湾集集地震における建物被害と地震動強さの関係", 清水建設研究報告, 第 71 号, (印刷中)
- 9) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾 : "被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係", 第 9 回日本地震工学シンポジウム, 2299-2304, 1994.
- 10) 気象庁監修 : "震度を知る - 基礎知識とその活用 -", ぎょうせい, 1996.
- 11) 日本建築センター・建設省建築研究所 : "設計用入力時振動作成手法技術指針 (案) 資料編", 155-161, 1991.