

台湾集集地震(1999)の観測記録を用いた構造物の応答特性

室野剛隆・佐藤忠信

正会員 博(工) (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38)

正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

1. はじめに

台湾集集地震(1999)では、充実した強震観測網において断層近傍で数多くの強震記録が得られている。これらの記録を眺めると、バラエティーに富んだ地震動波形が得られていることに気づく。特に見かけの周期が数秒程度の長周期成分が卓越した特徴的なパルス波が観測されている。このような長周期パルス波は、米国 Landers 地震(1992)での LUC 観測点の記録やトルコ・コジャエリ地震(1999)の Sakarya(SKR)で観測されている。この長周期成分は、固有周期帯域が1秒以下の一般的な土木構造物への影響はそれほど大きなものではないと推測されるが、固有周期が長い構造物、例えば長大橋梁や免震基礎を採用した建物などでは、これまで設計で考えられていた以上の荷重が作用する可能性がある。

実在免震構造物の免震効果は1994年米国 Northridge 地震および1995年兵庫県南部地震で実証され、これを契機として免震構造が急速に普及した。しかし、Heaton *et al*¹⁾は断層震源域内におけるパルスの地震動に対しては、免震構造物のような長周期構造物では大きな変形が発生し、免震の効果は期待できないことを指摘している。そこで、本論文は長周期構造物の代表例として免震基礎を有する構造物を例にとり、台湾集集地震で観測された長周期パルス波が構造物の応答に与える影響について検討を行う。ただし、本論文では免震構造物そのものの成立性を厳密に議論することを目的としているのではなく、特徴的なパルス波が長周期構造物に与える影響について定性的な議論をすることを目的としている。

2. 検討方法

(1) 検討対象

一般に構造物を免震化、すなわち上部構造物と免震層を含む全体系の固有周期を長周期化した上で、免震層に減衰を付加することによって建物に作用する地震力を低

減させることができる。近年では、より長周期化が期待できる構造として、積層ゴムと弾性すべり支承を併用する装置も開発されている。

積層ゴムアイソレーターと履歴型ダンパーを用いた基礎免震構造は、免震層の降伏強度(ダンパーの降伏強度)を上部構造物の降伏強度より十分小さくし、かつ免震層を長周期化することにより地震時の応答変形を免震層に集中させながら、免震層の応答せん断力を抑えて上部構造に作用する水平地震力を低減する構造である²⁾。この水平地震力の低減効果で免震建物の耐震性能は飛躍的に高まる。免震構造は現在、固有周期が1秒程度以下の中低層建物に主に用いられている。中層建物は非免震の場合の応答せん断力が大きいので、水平地震力の低減効果が非常に大きい。一方、高層建物は非免震の場合でも応答せん断力が小さいので、水平地震力の低減効果は中低層建物程大きくはないが、固有周期が3~4秒程度でも50%近い低減効果が見られることが確かめられている³⁾。

本研究では、免震装置の優劣を議論するのが目的ではないが、より長周期範囲での検討を行うので、積層アイソレーターと履歴型のダンパーからなる免震装置を想定して議論をすすめることにした。

(2) 解析モデル

積層アイソレーターと履歴型のダンパーからなる免震層の上部に、高さ方向に均等な骨組み(上部構造)を配置した基礎免震構造物を検討対象とする。上部構造の質量と免震層の質量(免震層と一体となって動く質量)との比率は1:0.25とする。上部構造は1質点でモデル化し、復元力特性を弾性とする。免震層は1質点にモデル化し、積層アイソレーターの復元力特性を弾性、履歴型ダンパーの復元力特性を完全弾塑性とする。検討モデルをFig.1に示す。免震層の復元力特性は、積層ゴムアイソレーターの復元力特性(弾性)と履歴型ダンパーの復元力特性(弾完全塑性)を並列配置して合成したものと

なお、免震効果を確認するために、構造物下端を固定

にしたモデルの解析も行った。これを非免震構造物と呼ぶことにする。

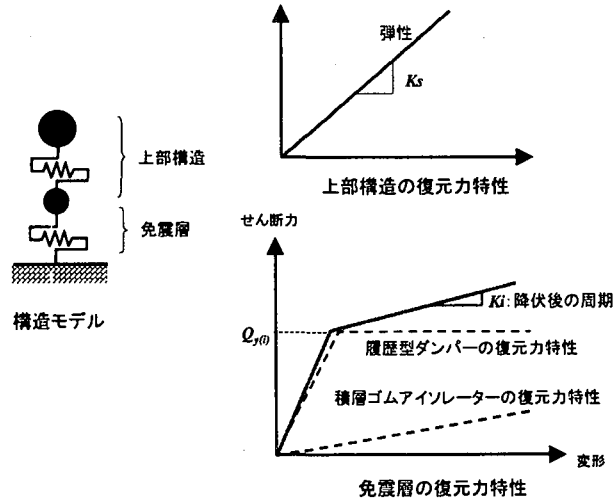


Fig.1 免震構造の2自由度解析モデル

(3) 解析定数

上部構造のパラメータは固有周期 \$T_s\$ とする。免震層の変数は、降伏せん断力係数 \$C_i\$ とダンパー降伏後の剛性に対する周期 \$T_i\$ とする。変数の定義を以下に示す。なお、免震層の弾性周期 \$T_{i0}\$ は0.5秒とした。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{K_s}} \quad (1)$$

$$C_i = \frac{Q_{yi}}{(m_s + m_i) \cdot g} \quad (2)$$

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{m_s + m_i}{K_i}} \quad (3)$$

ここに、\$m_s\$: 上部構造の質量、\$m_i\$: 免震層の質量、\$K_s\$: 上部構造の剛性、\$K_i\$: ダンパー降伏後の免震層の剛性、\$Q_{yi}\$: 免震層の降伏強度、\$g\$: 重力加速度、である。上部構造の減衰定数は5%、免震層の減衰は0%とした。

Tab.1 上部構造および免震層の変数

	パラメータ	値
上部構造	固有周期 \$T_s\$	0.2~5.0(sec)
	降伏せん断力係数 \$C_i\$	0.03
免震層	降伏後周期 \$T_i\$	4.0(sec)

3. 地震動特性

解析に用いた地震動は、台湾集集地震(1999)で観測された53点の記録である。観測点と断層との位置関係をFig.2に示す。また、比較のために、兵庫県南部地震(1995)の神戸JMAの記録と釧路沖地震(1993)の釧路気象台の記

録も対象とした。Table2に解析に用いた地震動波形の一覧を示す。

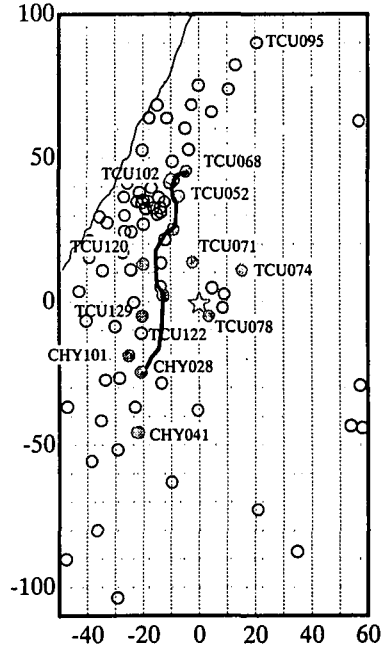


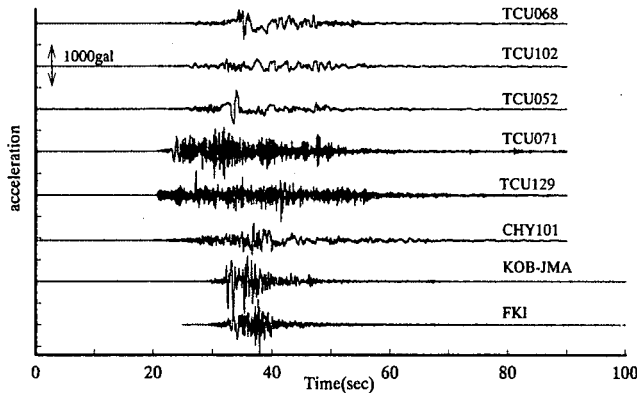
Fig.2 断層と観測点の位置関係

Table2 解析の対象とした地震

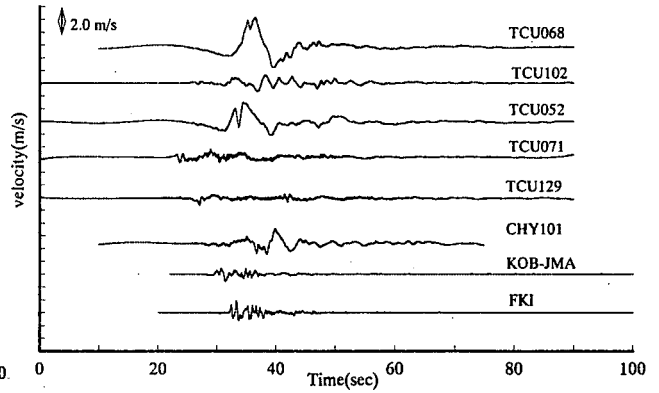
地震	M	観測点	No.
釧路沖地震 (1993)	7.8	釧路	a1-7
兵庫県南部地震 (1995)	7.2	姦合	a5-51
		神戸	a5-91
台湾集集地震 (1999)		全 53 記録	

Fig.3に地震動波形の一例を示す。速度波形は観測加速度波形を積分することにより求めた。その際、0.05~20Hzのバンドパスを施した。断層の北端(TCU068, TCU102, TCU052)と南端(CHY101)に位置する観測点では3~5秒程度の長周期の大速度パルス波が見られる。兵庫県南部地震では1秒程度のパルス波が見られたが、それよりも数倍も大きな最大速度を示し、周期も長い。また、断層直上のTCU129や震源近くのTCU071では加速度は大きいパルス的な成分は見られない。地点によってかなり複雑に波形の特性が変化している。岩田ら⁹⁾により震源過程が示されているが、それによると最終すべり分布は非常に不均質で、断層深部、浅部にアスペリティーが分布している。これらの大変位パルス波はこのアスペリティー分布およびディレクティブティ効果の影響が現れたものと考えられる。

Fig.4に所要降伏震度スペクトルの比較を示す。解析に用いたモデルはCloughモデル⁶⁾で、第2勾配比は5%とした。TCU068, TCU052の記録では塑性率8のスペクト



(a) 加速度波形



(b) 速度波形

Fig.3 時刻歴波形の比較

(Chi-Chi earthquake, Hyogoken Nanbu earthquake, Kushiro Oki earthquake)

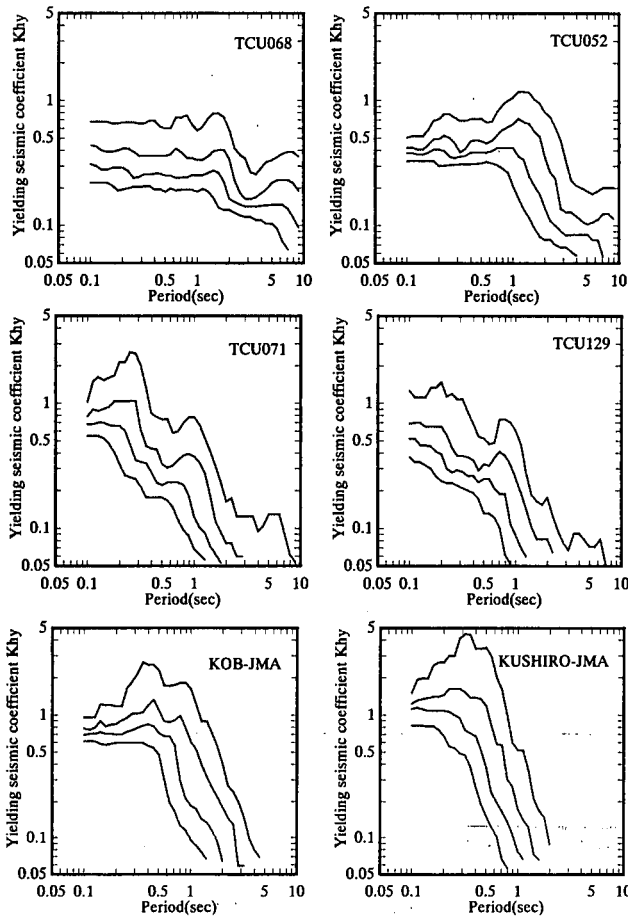


Fig.4 所要降伏震度スペクトル(ductility $\mu=1, 2, 4, 8$)

ルでもほぼ1秒程度までフラットな特性を有しており、それより長周期側でもスペクトルの低下は小さい。2秒以降では神戸 JMA の記録を上回っており、大速度パルス波が長周期構造物の応答にとって相当厳しい地震波であることが分かる。TCU071 は震央位置近傍の波形であるが、その波形に対する所要降伏震度スペクトルは兵庫県南部地震のものと同等の性格を有している。

4. 解析結果

(1) 免震構造物の応答特性

Fig.5, Fig.6 にそれぞれ上部構造物の応答せん断力係数と免震層の最大変位の例を示す。

上部構造物の応答せん断力係数に関しては、共通の傾向として、非免震構造物では固有周期による依存が大きく、凸凹した形状を有している。免震構造物では、応答せん断力係数は大幅に低減し、上部構造物の固有周期による依存性が小さく、ほぼ0.1前後の値になっており、免震効果が顕著に現れている。ここでは TCU071 と TCU129 の結果を示しているが、ほとんどの場合がこの2波と同様の傾向であった。しかし、TCU068 や TCU052 では0.25以上の応答せん断力係数を示しており、免震構造を採用しても上部構造物に比較的大きなせん断力が作用する。なお、兵庫県南部地震の記録や釧路沖地震では免震層による低減効果が顕著であり、応答せん断力係数は周期による依存も小さくほぼ0.1以下に収まっている。

免震層の応答変位についても、多くの台湾集集地震と兵庫県南部地震では上部構造物の周期によらず0.2~0.3m前後の応答で収まっている。短周期成分が卓越する釧路沖地震の記録ではさらに応答は小さく0.1m以下の応答となっている。ただし、TCU068 や TCU052 では0.8~1.5m程度の変形となっており、免震層が他の記録に比べて著しく大きな変形を示している。通常の免震構造では許容変位を越えるレベルとなっている。今回の解析では免震層の構造・諸元として1ケースのみを計算の対象としており、この結果のみで免震構造の適切性を議論することはできないが、定性的に TCU068 や TCU052 などのように長周期・大速度パルスを伴う地震動は免震構造物にとって厳しい地震動であると言える。

次に、免震層による水平地震力の低減効果を表す指標として、次式で示す水平地震力低減率 κ を定義する⁹⁾。

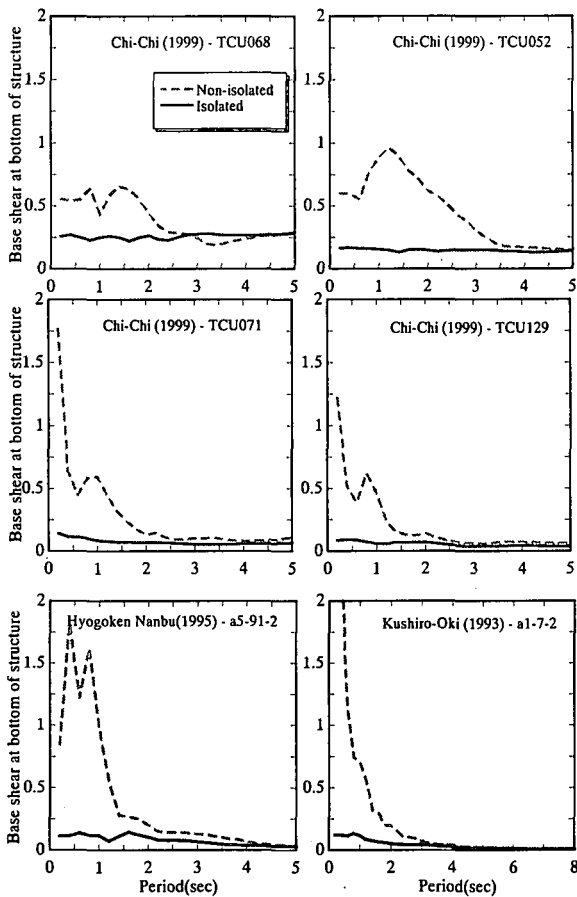


Fig.5 上部構造物のせん断力係数

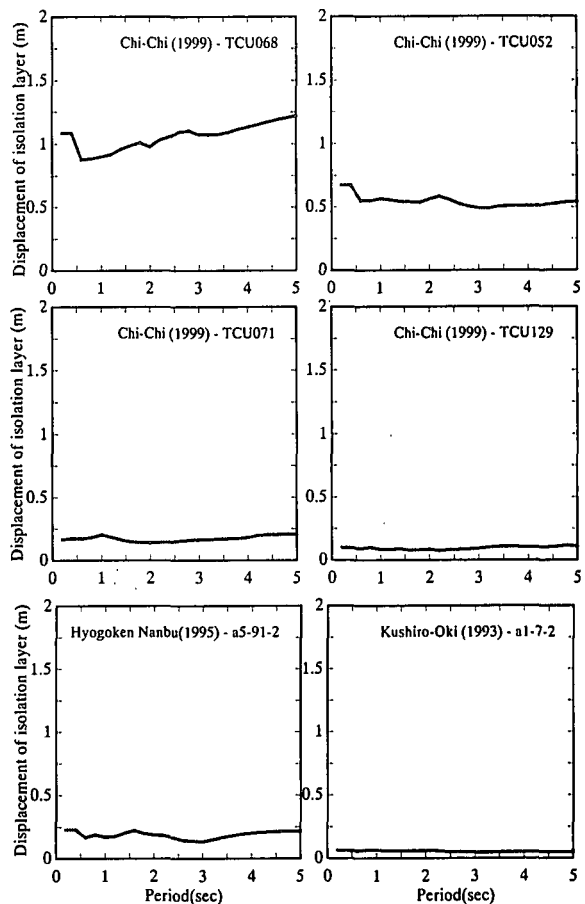


Fig.6 免震層の最大変位

$$\kappa = \frac{\text{免震構造での上部構造の最大応答せん断力}}{\text{非免震構造での上部構造の最大応答せん断力}} \quad (1)$$

水平地震力低減率 κ が1.0以下であれば免震層の効果があることを示す。逆に κ が1.0より大きければ免震層が構造物の地震時挙動にとってマイナスに働いてしまったことを示す。Fig.7に水平地震力の低減率 κ の算定結果を示す。地震波によらず、全地点に共通の傾向として、上部構造の水平地震力低減効果は、上部構造物の固有周期が長くなるに従い減少する。これはFig.5を見ても分かるように長周期構造物では非免震構造自体の慣性力が小さくなるためである。ただし、大速度パルスが卓越するTCU068では、低減係数 κ が0.5よりも小さく、せん断力の低減効果も小さい。特に、上部構造物の周期が3秒程度の構造物を想定した場合、 $\kappa > 1$ となり、免震層が構造物の応答に対しては、かえってマイナスとして作用することになる。

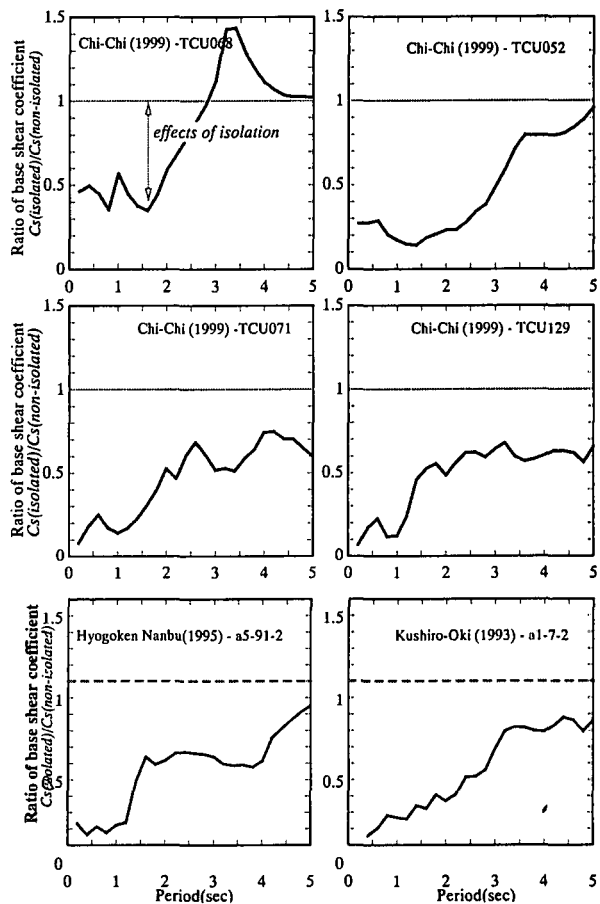


Fig.7 水平力の低減係数 κ

(2) 台湾集集地震に対する免震構造の応答コンター

免震構造の設計で最も注目すべき、上部構造物の応答せん断力係数と免震層の最大変位のコンター図をFig.8およびFig.9に示す。上部構造の周期 T は0.4, 1.0, 2.0,

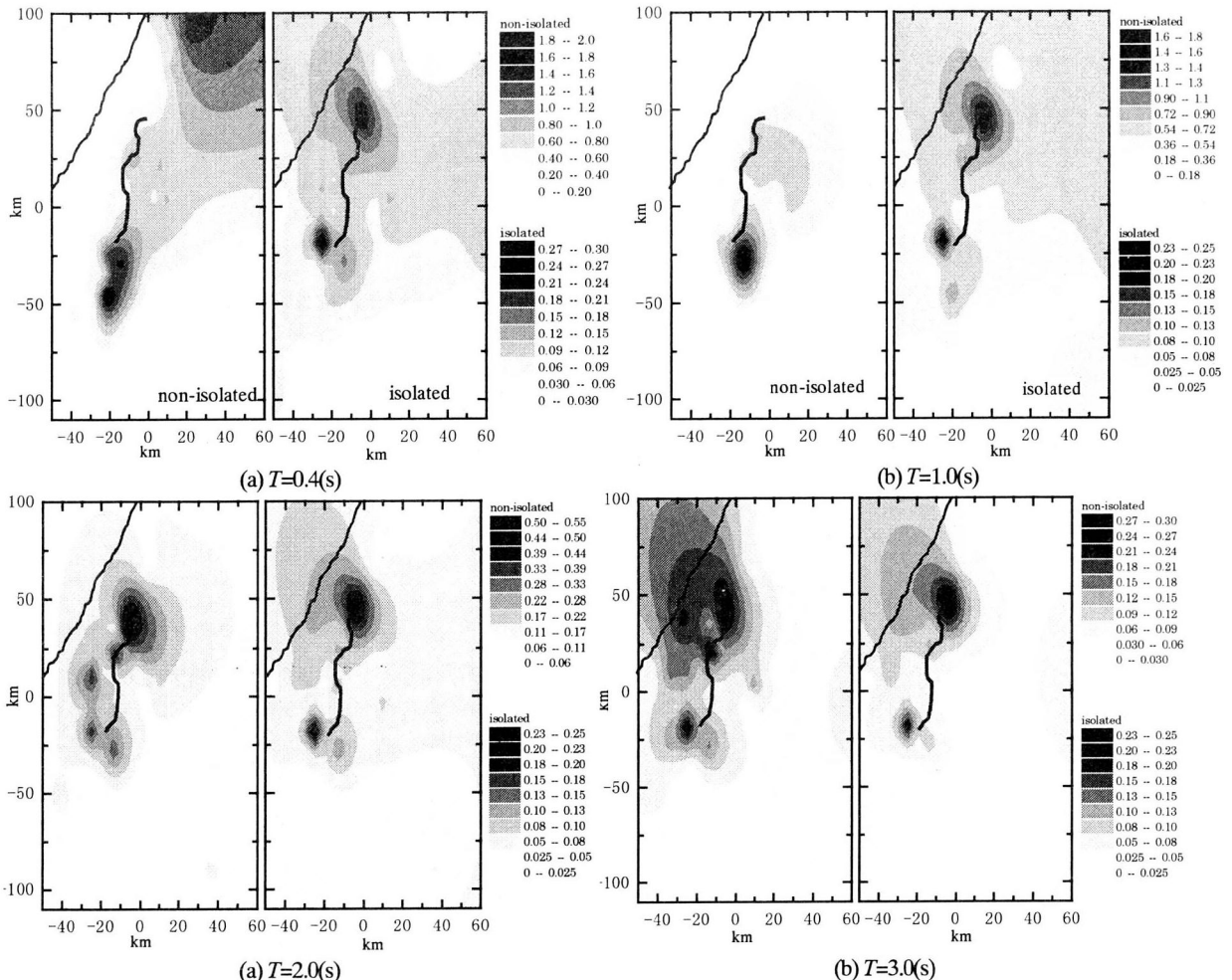


Fig.8 上部構造物の応答せん断力係数のコンター図 (各図において左：非免震構造, 右：免震構造)

3.0 秒の場合である。なお、地震動はNS成分を対象としている。

上部構造物の固有周期が0.4秒と1.0秒の場合、非免震構造の場合と免震構造の場合で応答せん断力係数のコンターの形状が大きく異なる(Fig.8)。この固有周期の構造物では、非免震構造の場合には、断層南端からさらに10~20km南側で明確なピークが見られる。最大で2.0に達している。これは短周期成分が卓越するCHY041の記録による影響である。よって、このピークは $T=0.4$ と1.0秒の場合にのみ見られる。(なお、 $T=0.4(\text{sec})$ では断層の北東方向に広域的にコンターが大きくなる傾向が現れているが、これは、解析に用いたこの周辺の記録数が少なく、大きな加速度を示すTCU029に対する解析結果がこの周辺を代表する値となってしまったためである。よって議論の対象にはしないこととする。)

一方、免震構造の場合は大幅に応答せん断力係数は低減されており、非免震構造で見られたピークも見られなくなっている。コンターの全体的傾向は北側に広がる形状を示し、断層の主たる破壊方向と一致しており、ディレクティビティ効果が免震構造物の応答にも影響している。

免震層の応答変位コンターも概ね同様の分布となっている。また、断層北端(TCU068, TCU052)および南端(CHY028)では、非免震構造では見られなかった大きなピークが見られる。断層北端と南端で生成された長周期・大速度パルス波が免震層を大きく変形させ、その結果、上部構造物にもせん断力が伝達されてしまい、応答せん断力係数が0.3程度発生することが分かる。通常の免震構造の場合、許容せん断ひずみは200~300%であることを考えると、断層の北端と南端では許容値を超えるまたは限界に近い値になっており、免震構造物としては厳しい状況になると言える。

Heaton *et al.*²⁾は $M_w 7.0$ の仮想断層に対して長周期構造物および免震構造物の解析を行って、ディレクティビティにより発生する大変位パルス波により長周期構造物が大きな被害を受ける可能性をシミュレーションにより示しているが、今回の台湾集集地震では観測波からも同様の結果が示されたと言える。

一方、上部構造物の固有周期が2.0秒と3.0秒の場合には、非免震構造の場合と免震構造の場合のコンターの形状が似通っている。ダンパー降伏後の免震構造物の周期

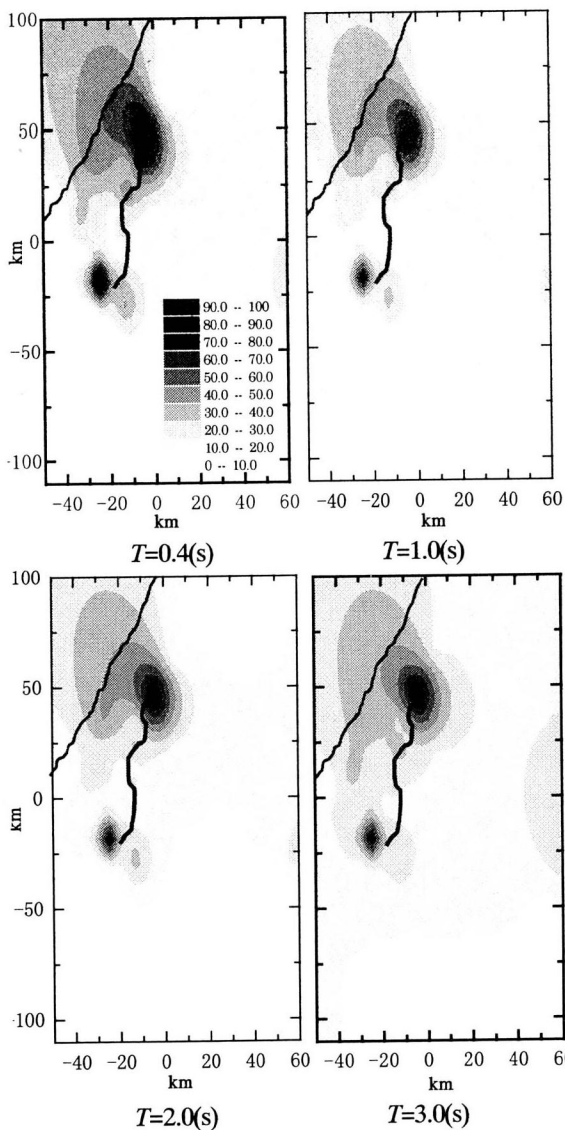


Fig.9 免震層の最大変位のコンター図

を 4.0 秒に設定しており、非免震構造物の固有周期がそれに近づくにつれて、応答特性も免震構造物に近づいていることを表している。

Fig.10 に構造物周期 $T=1.0$ と 3.0 秒の場合のせん断力低減係数 κ のコンター図を示す。これまでの議論と同様に、上部構造物の周期が長い方が免震層による低減効果は小さく、一部の地域で κ が 1 を越える領域がある。 κ は非免震と免震構造のせん断力の比で定義しているので、応答せん断力係数や免震層の応答変位のように明確な地域性（コンター図の傾向）は見られない。

5. まとめ

本論文では、台湾集集地震で断層近傍でバラエティに富んだ地震動が記録されており、これらが構造物の応答に与える影響を、免震構造物を例に取り検討した。その

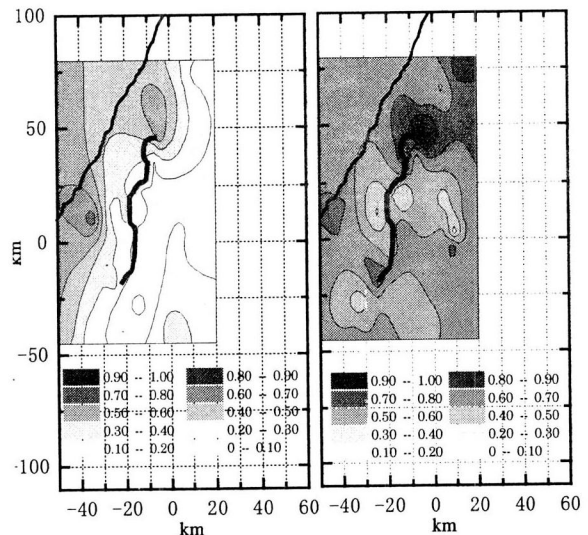


Fig.10 せん断力低減係数のコンター図

結果、アスペリティ分布やディレクティビティの効果により生成された断層北端および南端の長周期・大速度パルス波により、免震層が大きく変形すること、その結果、上部構造物の応答せん断力も大きくなることが分かった。定性的に、このような大速度パルス波は免震構造物の応答にとっては厳しいと言える。今後、益々需要が増えると思われる免震構造物であるが、断層近傍で発生する可能性のある長周期成分を含む大速度パルス波に対する対応は大きな検討課題となると思われる。

謝辞

本検討では、台湾集集地震で観測された多数の強震記録(CD-ROM 配布版)を使用しました。貴重な強震記録を使わせていただいた関係諸機関に感謝いたします。

参考文献

- 1) T. C. Shin *et al.* "A Preliminary Report on the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake", *Seismological Research Letters*, 2000.
- 2) Heaton, T. H., et al : Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake, *Science*, 267, pp.206-211, 1995.
- 3) 日本建築学会：免震構造設計指針，1993.
- 4) 小倉桂治，川端一三，小室努，征矢克彦，寺嶋知宏：高層免震建物の地震応答特性に関する検討，日本建築学会技術報告 第5号，pp.47-51, 1997.
- 5) 岩田知孝，関口春子：1999年台湾・集集地震の震源過程と震源近傍強震動，2000年地球惑星科学関連学会合同大会，Sb-009, 2000.
- 6) Clough, R. W. and S. B. Johnston : Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements, 第2回日本地震工学シンポジウム，pp.227-232, 1966.