

1999 年台湾集集地震を受ける RC 造基礎免震構造物の耐震安全性について

中川 肇*

Seismic Safety of RC Structural Base Isolated Buildings Under 1999 Taiwan Jiji-chin Earthquake

Hajime NAKAGAWA

ABSTRACT

On September 21st, 1999, it occurred M7.6 Jiji-chin earthquake around Taiwan. This earthquake is near field earthquake. Due to the earthquake, they felt the great motions through the island of Taiwan and it was seen lots of RC structural building's collapse. By the way, from July 3rd, 2023 to the end of this month, Taiwanese students took this college's lesson with Japanese students. I explained this earthquake using some slide. They were not born at the time, and I wanted them to know about the awfulness of this earthquake and the collapse of RC structural buildings.

This paper wants to discuss the seismic safety and response reduction effects of RC structural base isolated buildings under Taiwan Jiji-chin earthquake. According to the analytical results, the maximum displacement response at TCU068 and TCU065 are 47.51cm, 56.71cm against NS, EW components and 31.19cm against EW component by using non-linear viscous damper. The displacement become less than the allowable value (60cm) of the rubber bearing. That would be safe.

KEY WORDS: Base isolated buildings, 1999 Taiwan Jiji-chin earthquake,
Damage of reinforced concrete buildings

1. はじめに

2020 年 1 月 6 日に厚生労働省より新型コロナウイルス感染症が発表され、2021 年度より、本校では、海外からの短期留学生を受け入れることができなくなった。今年 (2023 年度)、4 年ぶりに、漸く 7 月 3 日から 28 日まで、台湾から短期留学生 10 名を建築学科に受け入れることになった。私は、水曜日の 2 限、建築学科 5 年の「建築構造特論 A」において、4 回授業を担当した。彼らは、1999 年 9 月 21 日の台湾集集地震を知らない世代である。台湾集集地震に関する既往の研究については、2 章で紹介する。また、台湾からの短期留学生の授業の様子について、3 章で紹介する。

本論の目的は、2 点である。1 点目は、台湾集集地震の人的被害、建物被害特に、鉄筋コンクリート造建物の壊滅的な被害について説明したい。2 点目は、

この地震動を制御する方法として、免震構造物の採用が挙げられる。台湾集集地震を受ける 20 階建て RC 造基礎免震構造物の耐震安全性の検証及び応答低減効果について論じたい。この論文を通じて、当時、生まれていない世代の台湾の生徒達に、日本の免震技術を紹介したいと考えている。

2. 台湾集集地震の概要と既往の研究

2-1 地震の概要

1999 年 9 月 21 日、現地時間、午前 1 時 47 分に台湾のほぼ中央に位置する南投県集集镇を震源とした M7.6 の大地震が発生した。この地震は、内陸型活断層地震であり、車籠埔断層に沿って発生したり。地震の断層面自体は水平からおおよそ 30 度の角度をなしており、上盤側がのし上がるように動く「低角逆断層」タイプの内陸型活断層破壊地震であった。

図 1 に台湾集集地震の震度分布を、図 2 には、震源域周辺で得られた観測記録の一例を示している。

*建築学科

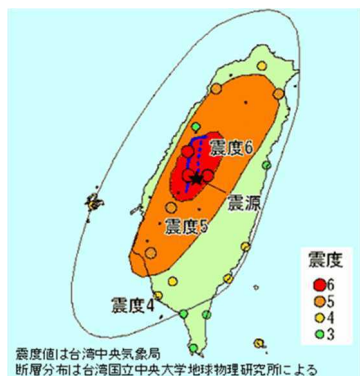


図 1 台湾集集地震の震度分布¹⁾

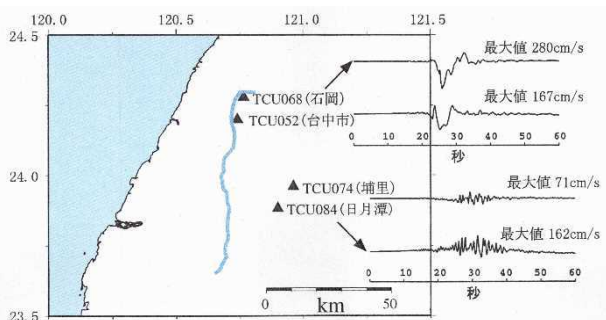


図 2 震源域周辺での観測記録¹⁾

図 1 より、集集鎮で震度 7、台中市周辺で震度 6、台北市、高雄市など主要な都市で震度 5、4 を観測している。図 2 より、断層北部の TCU068 (石岡) で最大速度が 280cm/s とかなり大きな値となっている。TCU052 (台中市)、断層の上盤側の TCU084 (日月潭) の最大速度が夫々 167cm/s、162cm/s となっていることが判る。日本の耐震設計で用いる極めて稀に発生する地震動が最大速度 75cm/s であるが、この地震の最大速度値は日本の基準値の 2.16~3.73 倍であることが判る。図 2 より、観測地点により、最大速度値が異なるのは、震源断層との位置関係や観測点直下の地盤構造など、様々な要因が複雑に関係していると推察される。この地震による死者は 2,415 名、負傷者は 11,306 名、倒壊した建物は 6,800 棟以上^{1),2)}で、多くの鉄筋コンクリート造の建物が壊滅的な被害を受けた。写真 1 に倒壊した RC 造建物¹⁾を示す。震源付近の台中市内で観測された最大速度が 71~280cm/s であり²⁾、典型的な内陸活断層破壊である。このような地震動において、注意しなければならないのが、鉄筋コンクリート造建物の柱、耐力壁のせん断耐力不足である。写真 1 より、1 階の層崩壊、1~4 階までの柱、耐力壁がせん断破壊を発生し、完全に倒壊していることが判る。



写真 1 RC 造建物の倒壊

2・2 既往の研究

文献 3) より、宮越等は、この地震で延べ 400 地点を越える強震記録が公表される中、台中市内の 32 地点に対し、主に小中学校の被害調査結果と強震記録を用いて、地震動強さと建物被害の関係を分析した。その結果より、①調査した学校建物では大破以上であり、被害を受けた学校建物の靱性性能が低かった。②調査地点における地震動強さ指標 (最大地動加速度 PGA/最大地動速度 PGV) の相関性は低かったと指摘している。

文献 4) より、境等は、台湾集集地震で得られた強震記録と調査した実際の建物被害 (台中縣、南投縣の国民小学校) を用いて、人命の損失に深く関わる、大きな被害を受けた建物の比率に対応するものを対象とし、これをより迅速かつ正確に予測できる地震動の破壊力指標について検討している。解析結果より、RC 造建物の弾性周期に対する頻度分布が 0.2~0.5 秒に集中しており、また、等価周期における弾性応答が建物被害と相関性が高く、0.8~1.2 秒程度の弾性応答を用いれば、適切に建物被害を予測できることを指摘している。

文献 5) より、高田等は、台湾集集地震で得られた高密度な観測記録を用いて、地震動強さの平均減衰特性からの偏差量の空間相関モデルを提案している。つまり、ある地点の地震動強さが既知の時に、 x km 離れた地点の地震動強さが確率的に予測できる。解析結果より、①この地震における強震記録は、

マクロ空間相関特性を評価するのに十分な密度であった。相関距離は概ね 14~30km と推定された。
 ②マクロ空間相関特性は、地震動の方向成分や断層の方向にあまり影響を受けず、また、地盤条件によって、相関距離が大きな値となることを指摘している。

文献 6) より、加納等は、台湾集集地震での断層帯の調査を行い、実際に温度計測を行うことで断層帯の物性を把握することが可能になったと示唆している。

参考文献 3) ~6) において、台湾集集地震での建物被害調査、調査から得た地震動の破壊力指標及び地震動の空間相関モデルから任意の地点の地震動強さの予測を説明している。しかし、台湾集集地震では、多くの RC 造建物が倒壊している。この倒壊を防止する対策として、免震構造の採用が挙げられる。このことについては、4 章以降で、詳細に説明したい。

3. 短期海外留学受入れに関する紹介

2023 年 7 月 3 日~28 日の約 1 か月間、高雄高級、中正高級、海青高級工業職業高等学校建築科の生徒 10 名と建築学科 1~5 年の学生と一緒に授業を受けた。

私は、建築学科 5 年の建築構造特論 A を担当し、10 名の台湾生徒と 5 名の 5 年生と一緒に、日本の耐震設計法、免震・制震構造について学んだ。今年の台湾の生徒は、流暢に日本語が話せる生徒は 2 名、英語と中国語が話せる生徒は 8 名だった。授業及び配布した教材は英語と日本語の Hybrid にした。

ここで、授業の様子を表 1 に示しながら、少し紹介する。

Table1. Class contents

date	class	content
5 th July	Group work	The difference of Taiwan and Japan architectural buildings
12 th July	Lecture	Seismic design method of Japan
19 th July	Lecture	Base isolated and passive controlled structures
26 th July	Presentation	Disaster prevention report

写真 2 に 1 週目の授業において、実施した台湾と日本の建築物の違いに関するグループワークの様子を示す。学生と生徒は、言語は異なるが、グローバル高専の代表として、英語で話しかけ、スマートフォンやタブレットを使い、夫々の国の建築物の特徴を説明していたのが印象的だった。

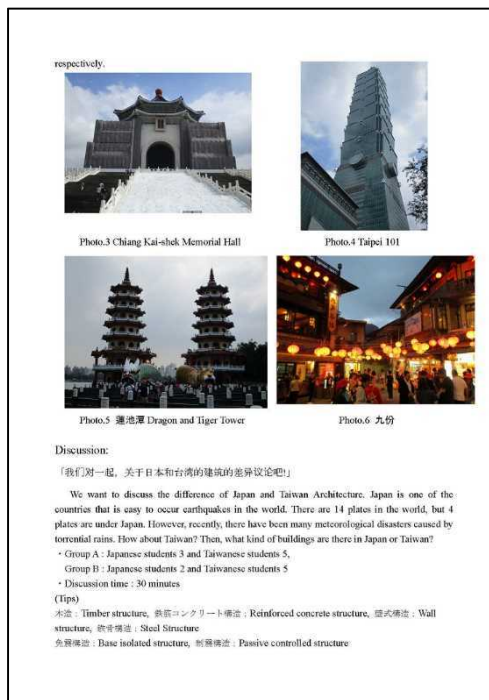


写真 2 グループワークの資料と様子 (1 週目)

2 週目の授業では、1981 年 11 月施行の新耐震設計法について、英語教材を配布し説明した。台湾の

設計規準とは異なるため、台湾の生徒には難しく感じたかも知れない。

3 週目の授業において、日本が得意とする免震構造、制震構造について、スライド、模型を使った説明した。台湾の生徒は高校 2 年生で、1999 年の台湾集集地震を知らない。その為、当時の写真を使い、鉄筋コンクリート造建物の倒壊の様子、地震動の強さを紹介した。台湾の生徒が、この地震から倒壊を防止できる構造の一つが免震構造であることを知ってもらいたいと思い、本論文を執筆するに至った。

4 週目は、5 年生 5 名が防災・減災に関するレポートを英語、中国語、日本語を混合し作成し、写真 3 に示すように、英語と日本語で発表した。これは、グローバル高専こそできる取り組みである。



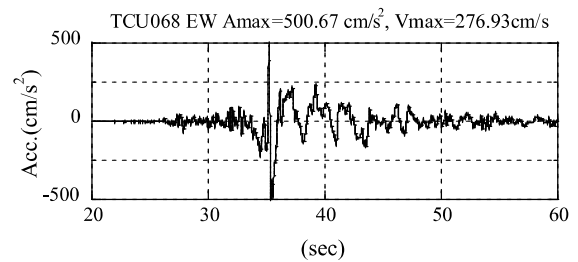
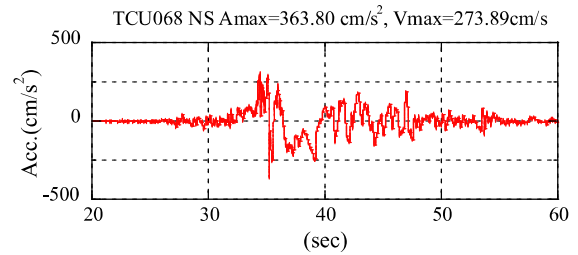
写真 3 レポート発表 (4 週目)

4. RC 造基礎免震構造物の地震応答解析法

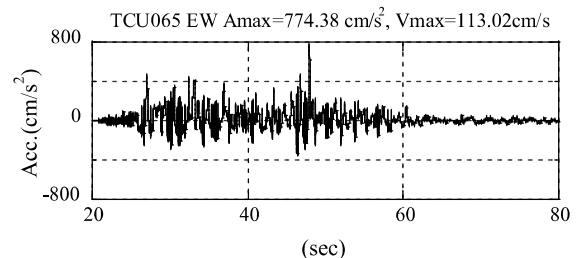
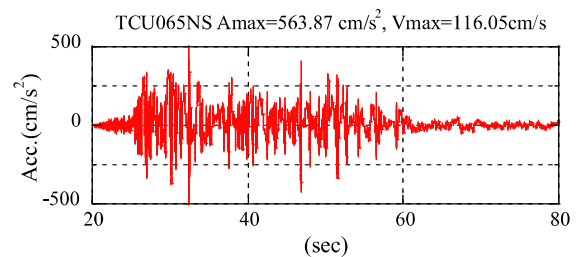
4-1 解析モデルと入力地震動モデル

本論では、RC 造 19 階建ての集合住宅 (30m×30m の床面積 900m²、構造階高 3.2m、地上 63.3m、塔上比 2.11) の基礎部に鉛入り積層ゴム (LRB)、非線形粘性ダンパー (2,000kN 用を 4 基、1,000kN 用を 1 基) を配置する 20 階建ての免震構造物を考える。つまり、上部構造物が 19 質点と免震層 1 質点を加えた 20 質点系の基礎免震系を意味する。LRB の荷重変形関係は、Bi-linear 型履歴特性とする。なお、免震構造物の場合、上部構造物は、弾性域を振動するために、その荷重・変形関係は線形モデルとした。入力地震動モデルは、台中市内におおよそ 120 地点の観測網が存在し、本論では、TCU068 (石岡)、TCU065 (霧峰) の地震動波形を採用する。図 3~5 には、2 地点の NS、EW 成分の地震波形と速度応答スペクトル (減衰定数 $h=0.05$) が描かれている。図 3、4 より、TCU068 (石岡) での最大速度は両成分とも 273.89cm/s、276.93cm/s、TCU065 (霧峰) では、夫々 116.05cm/s、113.02cm/s であり、日本の耐震規準で扱う国土交通省告示 1461 号に示されている「極めて稀に発生する地震動」と同等の地震動の 1.51 倍

~3.65 倍である。このパルス的な地震動⁷⁾の場合、一般の耐震建物ではかなり被害を受けることは明らかである。



(a) TCU068 (石岡) NS・EW 成分



(b) TCU065 (霧峰) NS・EW 成分

図 3 地震動波形 (TCU068, TCU065)

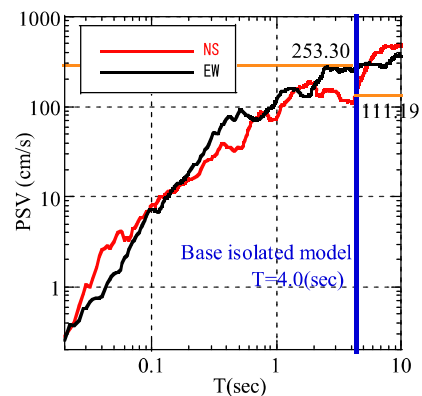


図 4 速度応答スペクトル (TCU068)

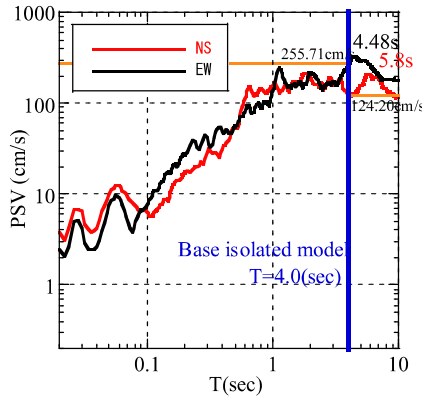


図5 速度応答スペクトル(TCU065)

文献7)で示している2016年の熊本県西原村小森の地震動波形の最大速度が259.0cm/sであり、この地震動と類似していると考えられる。

表2に地震動波形の諸元を示す。

表2 入力地震動の諸元

観測地点	成分	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)
TCU068 (石岡)	NS	363.80	273.89
	EW	500.67	276.93
TCU065 (霧峰)	NS	563.87	116.05
	EW	774.38	113.02

また、図4より、TCU068(石岡)の速度応答スペクトルから分かるように、地震動に卓越周期が見られないのが特徴である。一般には、地震動強さを分かる卓越周期が必ず存在するが、TCU068(石岡)には見られなかった。一方、図5より、TCU065(霧峰)では、NS成分の卓越周期が5.8秒、EW成分が4.48秒と文献1)に示されているように長周期地震動である。

4・2 運動方程式と状態方程式の誘導

基礎免震系モデルにおいて、任意*i*層、基礎免震層の層間座標系の運動方程式は、次式のように表現できる。

*i*層：

$$m_i(\ddot{u}_1 + \dots + \ddot{u}_i + \ddot{x}_g) + c_i \dot{u}_i - c_{i+1} \dot{u}_{i+1} + k_i u_i - k_{i+1} u_{i+1} = 0 \quad (1)$$

基礎免震層：

$$m_1(\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) - c_2 \dot{u}_2 + k_1 u_1 - k_2 u_2 + k_d y_1 + c_d \phi(\dot{u}_1) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $m_i, u_i, y_i, \ddot{x}_g, k_1, k_d, c_d, \phi(\dot{u}_1)$ は夫々*i*層の質量、上部構造物、免震層の層間変位、免震層を

構成するクーロン素子の層間変位、系の基盤に入力される加速度、積層ゴムと鉛プラグの剛性及び免震層の非線形粘性ダンパーの粘性減衰係数と非線形関数である。

非線形粘性ダンパーの非線形関数 $\phi(\dot{u}_1)$ は、次式に示す完全弾塑性型の非線形関数であり、 \dot{u}_{cr} はリリーフ速度である。

$$\phi(\dot{u}_1) = \frac{\dot{u}_1}{2} \{ \text{sgn}(\dot{u}_1 + \dot{u}_{cr}) - \text{sgn}(\dot{u}_1 - \dot{u}_{cr}) \} + \frac{\dot{u}_{cr}}{2} \{ \text{sgn}(\dot{u}_1 + \dot{u}_{cr}) + \text{sgn}(\dot{u}_1 - \dot{u}_{cr}) \} \quad (3)$$

また、クーロン素子の層間速度 y_i は、次式のように表現できる。

$$y_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \text{sgn}(y_i + \delta_i) - \text{sgn}(y_i - \delta_i) - \text{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{ \text{sgn}(y_i + \delta_i) + \text{sgn}(y_i - \delta_i) \}] \quad (4)$$

(1)~(4)式をマトリクス形式で表現すると次式となる。

$$\{\ddot{u}\} + [\tilde{c}]\{\dot{u}\} + [\tilde{c}_d]\{\phi\} + [\tilde{k}]\{u\} + [\tilde{k}']\{y\} = -\{1'\}\ddot{x}_g \quad (5)$$

ここで、 $\{u\}$ は層間変位応答ベクトル、 $[\tilde{c}], [\tilde{k}], [\tilde{c}_d], [\tilde{k}']$ は夫々上部構造の粘性減衰、剛性に関するマトリクス、基礎免震層の粘性減衰、剛性マトリクス、 $\{1'\}$ は最下段エレメントのみが1、その他は0のベクトルである。

(3)~(5)式より、状態ベクトルとして、 $\{U\} = \{\{u\}, \{\dot{u}\}, \{y\}\}^T$ とおくと、基礎免震系モデルの状態方程式は、次式のように表現できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [E] & [0] \\ -[\tilde{k}] & -[\tilde{c}] & -[\tilde{k}'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ -\{1'\} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ -[\tilde{c}_d] \end{Bmatrix} \{\phi\} \quad (6)$$

$$y_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \text{sgn}(y_i + \delta_i) - \text{sgn}(y_i - \delta_i) - \text{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{ \text{sgn}(y_i + \delta_i) + \text{sgn}(y_i - \delta_i) \}] \quad (7)$$

$$\phi(\dot{u}_1) = \frac{\dot{u}_1}{2} \{ \text{sgn}(\dot{u}_1 + \dot{u}_{cr}) - \text{sgn}(\dot{u}_1 - \dot{u}_{cr}) \} + \frac{\dot{u}_{cr}}{2} \{ \text{sgn}(\dot{u}_1 + \dot{u}_{cr}) + \text{sgn}(\dot{u}_1 - \dot{u}_{cr}) \} \quad (8)$$

(6)~(8)式に示す各応答は、4次精度のRunge-Kutta法を用いて求める。

5. 解析結果

本論では、19質点系の上部構造物の1次固有周期を1.9秒とし、20質点基礎免震系モデルの1次固有周期は、図4、5に示した速度応答スペクトルの特性及び上部構造物の階数を考慮し4.0秒とした。

免震層を構成する積層ゴムの層全体の剛性 k_1 を収斂計算により求める。ただし、各階の重量 w_i は一

定で 7,200kN とし、LRB の降伏せん断力 Q_d は全重量の 5% とする。(3)式に示した非線形粘性ダンパーのリリーフ速度 \dot{u}_{cr} は、筆者の実務時代の設計事例を参考に、30cm/s とした。

5・1 基礎免震構造物の最大応答特性(層間変位応答・絶対加速度応答)に関する検討

本節では、4 章で説明した台湾集集地震の観測 2 地点 (TCU068 (石岡)、TCU065 (霧峰)) を入力地震動とし、基礎免震構造物の地震応答解析を実施する。免震層には、LRB のみ、LRB と非線形粘性ダンパーを設置した 2 ケースを示すことにする。

図 6、7 には、TCU068 (石岡) の NS、EW 成分を受ける 20 階建て基礎免震構造物の最大層間変位応答と絶対加速度応答が描かれている。図 6 より、両成分とも、免震層の最大変位応答量は、夫々 76.58cm、106.31cm で、積層ゴムの最大せん断歪 300% (=60cm) を大きく超過していることが判る。免震構造物の設計において、隣地境界線との間に 1m 程度のクリアランスを設けられているが、クリアランスに設けられている擁壁に衝突することになる。ここで、免震層に LRB に加えて粘性ダンパーの減衰係数 c_d を 300kNs/cm とした場合、粘性ダンパーを付加することで、両成分とも 47.50cm、56.71cm (最大せん断歪 237.5%、283.5%) まで低減し、最大せん断歪 300% 以下となることが判る。一方、図 7 に示すように絶対加速度応答の結果を見ると粘性ダンパーを付加することで、建物全体の応答値を低減することができる。

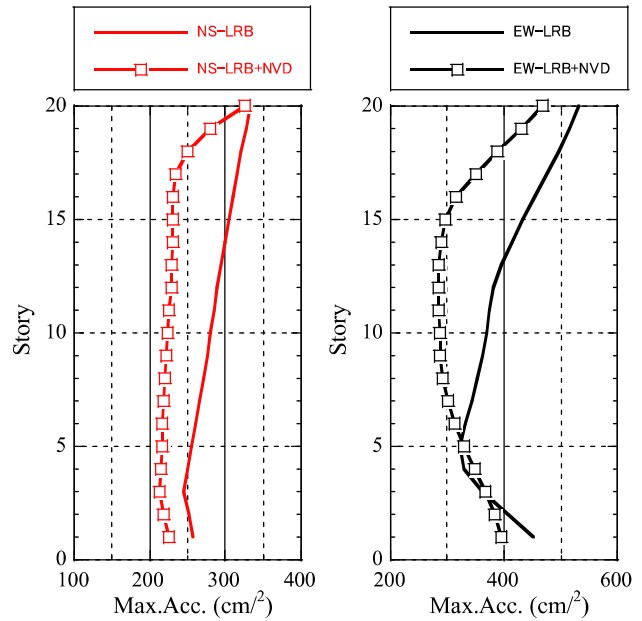


図 7 TCU068 (石岡) の絶対加速度応答

図 6、7 と同様に、図 8、9 には、TCU065 霧峰の NS、EW 成分に対する基礎免震構造物の最大層間変位応答と絶対加速度応答が描かれている。図 8 より、NS 方向について、LRB のみでの免震層の最大変位応答量は 38.34cm (最大せん断歪 191.7%) で 60cm 以内となっている。しかし、EW 成分は LRB のみで 69.13cm (最大せん断歪 345.7%) と 60cm 以上となっている。粘性ダンパーを付加することで、免震層のそれは、31.19cm (最大せん断歪 156.0%) となり、60cm 以下となる。

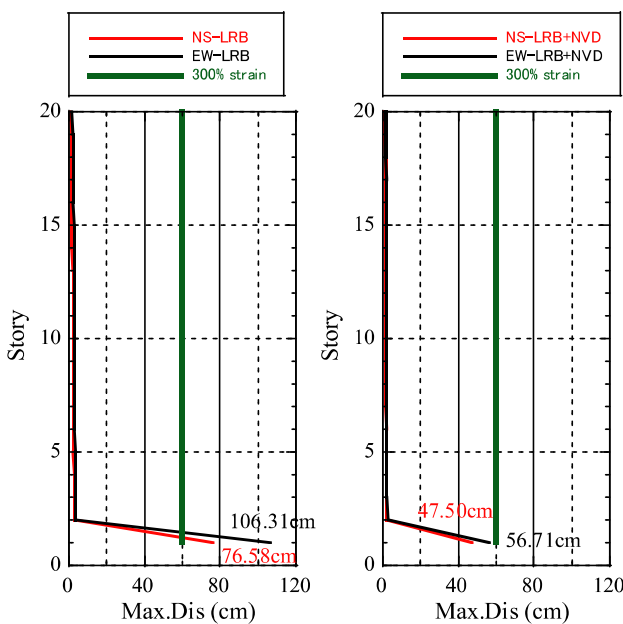


図 6 TCU068 (石岡) の最大層間変位応答

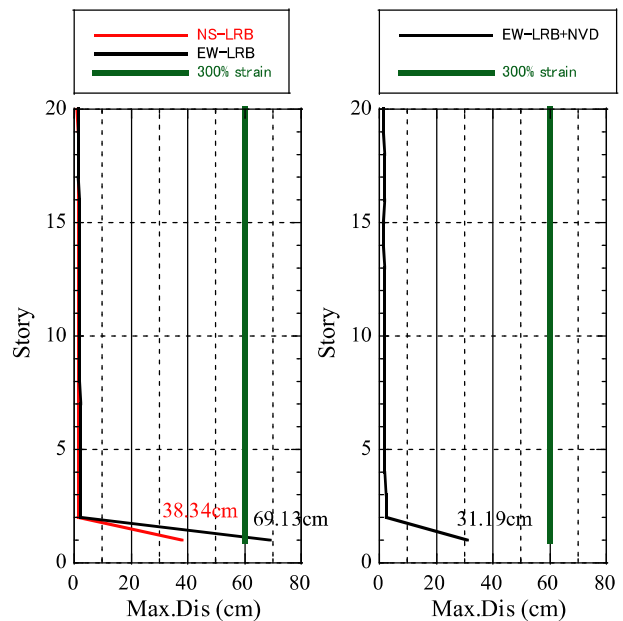


図 8 TCU065 (霧峰) の最大層間変位応答

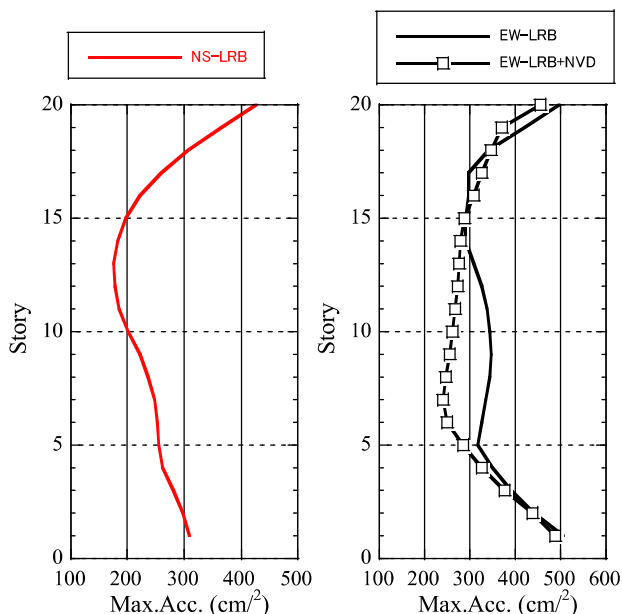


図9 TCU065 (霧峰) の絶対加速度応答

一方、図9より、EW成分の結果を見ると、上部構造物の5層目～14層目まで、粘性ダンパーの付加により、加速度応答は低減できるか、図6のTCU065石岡の結果ほど効果が得られなかった。この原因としては、図5に示した地震動特性の影響が若干あるのではないかと推察している。

5・2 免震層の残留変形

台湾集集地震は、2016年の熊本地震西原村小森の波形に類似しており、基礎免震構造物における免震層に残留変形が残る可能性がある。本節において、5.1節で解析した時(LRB+非線形粘性ダンパー)に得た免震層の層間変位応答波形をTCU068(石岡)、TCU065(霧峰)に対し示す。

図10、11には、免震層の変位応答波形を示す。

図10より、55秒以降の残留変形に着目すると、TCU068(石岡)では、免震層の残留変形は、NS、EW成分とも、夫々+1.4cm、-1.8cmで、残留変形角($=u_{1max}/20.0$)は+1/14.2、-1/11.1と大きい値である。

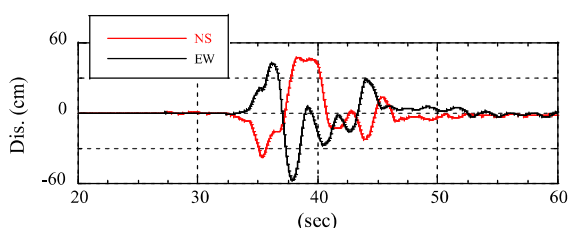


図10 免震層の残留変形：TCU068 (石岡)

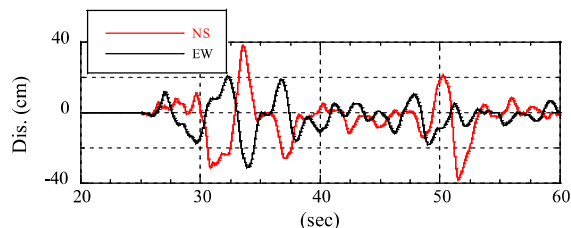


図8 免震層の残留変形：TCU065 (霧峰)

一方、図11より、TCU065(霧峰)では、残留変形はTCU065(石岡)より、非常に大きくなっていることが判る。残留変形角で、NS、EW成分に対し、+1/3.77、+1/4.35であった。最大速度が75cm/sを超える超高速の内陸活断層地震においては、積層ゴムに残留変形が残る可能性があるため、十分対策及び検討が今後、必要であると考えられる。

6. まとめ

本論では、①台湾高級工業職業高等学校からの短期留学生のグローバル教育の実施、②1999年の台湾集集地震による構造物被害及び基礎免震構造物の耐震安全性にと応答低減効果ついて、解析的な立場から論じた。

教育・研究から得られた工学的な知見は以下の通りである。

- 1) 台湾高級工業職業高等学校、10名の生徒を約1か月間、本校建築学科に受入れ、週1回の授業を担当した。この留学生は、熱心に授業を聞いてくれ、建築学科5年5名は、英語での授業に積極的に参加し、実りのある短期留学であったと思う。
- 2) 1999年の台湾集集地震の構造物被害、特にRC造建物は、壊滅と言っても過言でないほど倒壊したと言える。この原因は、内陸活断層破壊地震とその最大速度値に関係している。通常、100年に一度発生する「極めて発生する地震動」の最大速度は75cm/sであり、この値の1.51～3.61倍であった。
- 3) 台湾集集地震の観測2地点(TCU068(石岡)、TCU065(霧峰))に対する基礎免震構造物の地震応答解析の結果、NS、EW成分とも免震層にLRBと非線形粘性ダンパー(TCU065のNS成分を除き)を設置することで、免震層の最大層間変位応答は、最大で56.71cm(最大せん断歪283.6%)であり、60cm以下となる。一方、絶対加速度応答については、TCU065(石岡)では、

免震層に非線形粘性ダンパーを付加することで、建物全体の応答を低減することができる。

- 4) 免震層の残留変形量については、観測 2 地点とも大きい。最大速度値が通常の 75cm/s 以上の内陸活断層破壊の場合、積層ゴムに残留変形が残る可能性が十分にある。この点については、今後、対策を講じる必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、1999 年台湾集集地震の波形データは、高知高専ソーシャルデザイン工学科、まちづくり・防災コース、池田雄一准教授より提供を頂いた。ここに記して、感謝を致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：日本建築学会広報誌「なみふる」No.18、1～8 頁、2000.3
- 2) 鈴木崇伸ほか：台湾集集地震の強震記録の特徴について、土木学会第 57 回年次学術講演会、1679～1680 頁、2002.9
- 3) 宮腰淳一ほか：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、25～40 頁、清水建設研究報告、第 71 号、2000.4
- 4) 境有紀ほか：1999 年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討、日本建築学会構造系論文集、第 549 号、43～50 頁、2001.11
- 5) 高田毅士、下村哲人：台湾集集地震記録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、41～48 頁、2003.3
- 6) 加納靖之：1999 年台湾集集地震 (Mw=7.6) と断層摩擦決定のための断層帯の温度計測、自然災害科学 J.JSNDS 28-2、151～159 頁、2009.2 .
- 7) Toshimi Satoh: Study on Long-period Pulse and Permanent Displacement of the 2016 Kumamoto Earthquake Based on Comparison with Previous Prediction Equations, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol.83 No.750, pp.1117-1127, Aug. 2018.