

海外調査報告：

台湾における建物の耐震・免震・制震技術調査



EHS&S 研究センター上級研究員 兼 構造コンサルティング部担当部長

中野 時 衛

Keyword：MATS、フリングステップ、花蓮地震、損傷部位限定構造

1. はじめに

2018年4月1～4日、台湾の台北市に東京工業大学和田章名誉教授、構造調査コンサルティング協会のメンバーと共に下記の目的に関連する学協会を訪問し、台湾のメンバーと建物の耐震・免震・制震に関する技術情報の交流を行った。

- ・2018年2月6日に発生した台湾花蓮地震の情報収集と検討会への参加
- ・和田名誉教授が提唱する実大動的加力装置の台湾における現状調査
- ・台湾における耐震診断・補強と免震・制震工法の情報収集



写真1 MATS試験機

2. 訪問した学協会

- ・国家地震工程研究中心（NCREE）：台湾を代表する土木建築の地震工学研究機関
- ・台北市結構技士公会（TSEA）：台北市の建築構造技術者協会
- ・中華民国全国建築士公会（NAA・R.O.C.（Republic of China））、中華建築隔震消能構造協会（CSSI）：花蓮地震検討会の主催団体

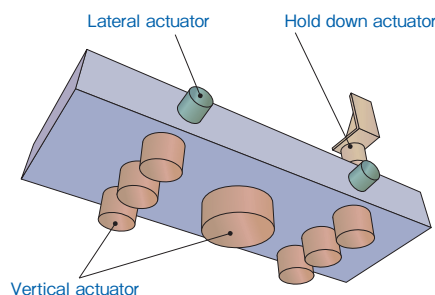


図1 各方向の加力装置

3. 国家地震工程研究中心(NCREE)訪問^{1～3)}

NCREEは、The National Center for Research on Earthquake Engineering の略称であり、地震工学に関する台湾の準国家的な研究機関である。財政的には7割が国の支援で、残り15%が学校、15%が民間が負担している。建物は台湾大学の敷地の中にある。NCREEはもとも1990年の設立で、10の応用研究所が2003年に合流して加わっている。職員数は約150名で、修士、博士などの高学歴の人が2/3を占める。

実験装置として3自由度の振動台、反力壁と静的・動的加力装置およびMATS (Multi-Axial Testing System) と呼ばれる多軸試験装置を保有している(写真1, 図1)。

さらに1999年9月21日に台湾中部で発生した集集地震で観測された地震断層近傍のフリングステップと呼ばれる大変形(10m)と大速度パルス現象(最大速度450cm/sec)(図6)⁸⁾を模擬できる装置として、BATS(dynamic BiAxial Testing System)と呼ばれる2軸の試験装置が2017年8月、台南市に完成した。

研究所の概要について、黄世建主任(所長)、張國鎮博士(前所長)から説明を受けた。特にMATSは30,000kNの圧縮力を载荷しながら水平2軸で±120cm変形させることができるもので、免震装置の終局耐力を確認することができ、和田名誉教授が提唱している実大動的加力装置に近いものである(表1)。

日本側からは、「近年における地震被害の特徴と通信用建物・鉄塔等の耐震安全性確保への取り組み」という、電電公社・NTTの1964年新潟地震から2011年東日本大震

表1 MATSの仕様

名称	個数	Type	Length (mm/個)		Force (kN/個)	
			Type	Stroke	Type	Stroke
動的加力装置	6	Hydrostatic	Tempo	+150 (上下)	Pressure transducer	5,000 (圧力)
静的加力装置	1	Pressure balanced	Tempo	+150 (上下)	Pressure transducer	30,000 (圧力)
加力装置	4	Pressure balanced	Tempo	±100 (東正西負)	Pressure transducer	±2,000 (東正西負)
加力装置	2	Pressure balanced	Tempo	-150 (上下)	Pressure transducer	2,000 (圧力)
動的加力装置	2	Dynamic (244)	LVDT	±500 (南正北負)	Load cell	±1,000 (独自定義)
静的加力装置	2	Static (201)	Tempo	±1,200 (南正北負)	Pressure transducer	±2,000 (独自定義)



写真2 論文の紹介スライドの一部（阪神・淡路大震災時の鉄塔の様子）⁴⁾



写真4 RC柱加力中のMATS



写真5 MATS(左から3人目が黄主任, 同5人目が和田名誉教授, その右隣が張前所長)



写真3 日本の発表の様子

災までの通信用建物・鉄塔等の地震被害の紹介とその後採用した耐震対策概要を紹介した（写真2, 3）⁴⁾。

特に地震被害を受けた鉄塔の様子は興味をひいたようで、様々な質問があった。台湾では送電用鉄塔の耐震性が問題になっている。日本における着雪による送電線の切断、原発の送電鉄塔用の高張力鋼の開発などについても説明した。

張前所長から「とても重要な話題について話して頂き感謝する。NCREEとしても通信施設の調査の実施と必要な補強を行う方針としている。また今後の研究が重要。台湾の地震でも1カ月間の停電があった。通信の2ルート化もしている。台湾では、斜面に建設した鉄塔基礎が地震時に崩壊したことがある」という発言があった。

実験場では、MATSによるRC柱の加力実験を視察した。台湾では実物を試験し、この試験に合格しなければその工法、製品は使用できないことになっているということで、必然的に大きな加力ができる装置が必要となっているようであった（写真4, 5）。

耐震設計基準	T=0.3 (約3階建て)	T=0.6 (約6階建て)	T=1.2 (約12階建て)	T=1.5 (約15階建て)
1982年改定	0.225 (g)	0.314 (g)	0.379 (g)	0.393 (g)
1997年改定	0.825 (g)	0.696 (g)	0.438 (g)	0.378 (g)
2011年改定	1.136 (g)	1.136 (g)	0.651 (g)	0.521 (g)
花蓮地震	0.405 (g)	0.699 (g)	0.638 (g)	0.441 (g)

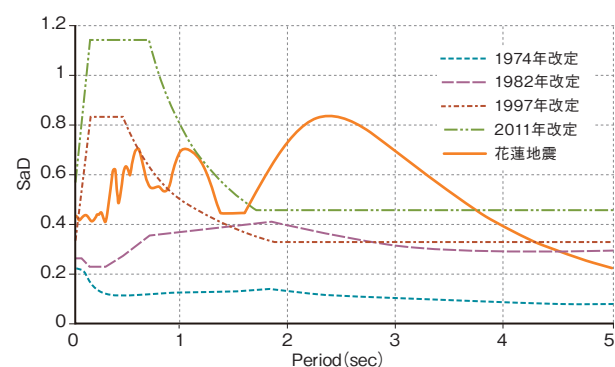


図2 耐震設計基準の加速度係数の変遷と花蓮地震の加速度スペクトル⁶⁾



写真6 集合写真（後列左から2人目が婁光銘理事長, その右隣が和田名誉教授）

4. 台北市結構技士公会（TSEA）訪問

以下について情報交流を行った（写真6）。

4.1 台湾の建築耐震設計基準

- 1982年までは旧基準で設計していた。1997年に大改訂があり、靱性を考慮した設計基準となった（図2）⁶⁾。
- 1999年9月21日に台湾中部でMw7.3の集集地震が発生し1万棟近くの建物が全壊、2,400名以上の死者が出た。1997年に耐震設計法をさらに見直している。
- 2005年に台湾内政部が建築物耐震設計規範を強化して、地域ごとに「震区水平加速度係数」を設定した。花蓮市は南北に米崙（ミルン）断層が走り、台湾の中でも最も高い加速度係数を採用している。今回の花蓮地震では断層近傍の建物破壊が4棟あったが、少し離れると無被害であった。
- 図2⁶⁾に台湾の耐震設計基準における加速度係数の変遷と花蓮地震の加速度スペクトルを示す。

4.2 台湾における耐震診断と補強設計

- 2009年以降、公立小・中学校の耐震診断・補強が実施され、現時点で補強工事はほぼ完了した。
- 民間では、商業施設やホテル等の9階建て以上の建物で、低層部がピロティなど脆弱な建物を最優先で調査した。
- 台湾では1階が駐車場で2階以上が住宅の建物が多い（低層部脆弱建物）。
- 台湾では先に予算（助成額）が決まっており、大規模な補強は行われていない。また特許工法は業者と紐付きになるため採用されない。

表2 検討会プログラム

13:00~13:30	受付	中華民国全国建築士協会 鄭宜平理事長 中華建築免震減衰システム協会 江信賢理事長
13:30~13:40	開始式	
13:40~14:00	花蓮地震災害建築士協会現場救助概要	劉燕湖理事長 花蓮県建築士協会
14:00~14:50	花蓮地震災害原因究明および建築耐震診断	和田章名誉教授 東京工業大学（日本免震構造協会会長）
14:50~15:40	花蓮地震までの建築耐震設計基準の変遷	陳介程建築士 桃園市建築士協会（北科大構造博士候補者）
15:40~15:50	休憩	中華民国全国建築士協会 特殊構造審査委員会 陳澤修主任委員
15:50~16:40	花蓮免震病院建築の地震時の状況	
16:40~17:30	台湾老朽建築構造の耐震調査および補強現況	
17:30~17:50	総合議論	

4.3 台湾の耐震診断基準と第三者評価

- 中央政府の建設省告示の基準を使っている。
- 個人で開業している建築士が診断・補強設計を行い、台湾に3カ所ある評定機関で審査を受ける。
- 建物用途と建物所在地によって必要な耐震性能は異なる。

5. 花蓮地震被害状況と日中の耐震診断・構造補強に関する検討会⁶⁾

主催：中華民国全国建築士公会（NAA）、中華建築隔震消能構造協会（CSSI）

期日：4月3日



図3 花蓮市内の米崙断層⁷⁾

HWA(花蓮市)震央距離=19.90km

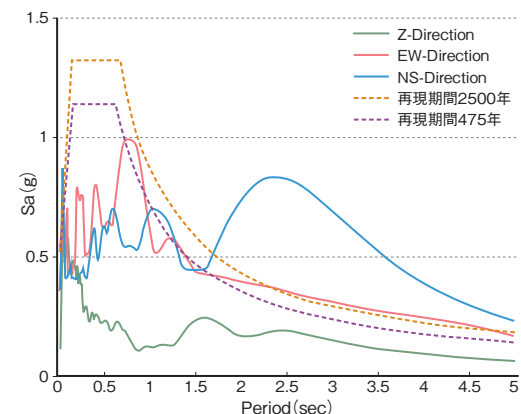
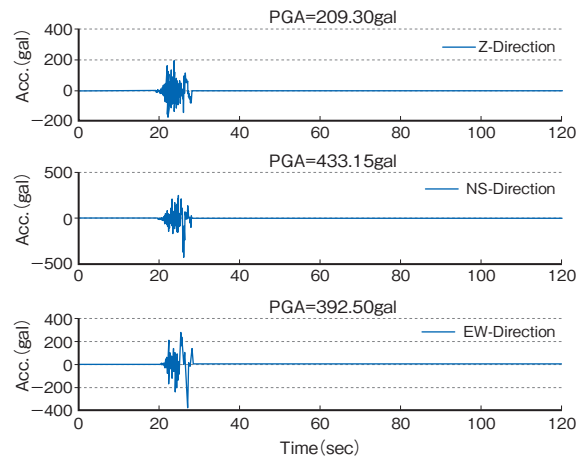


図4 花蓮市内で観測された加速度地震動波形と加速度スペクトル⁷⁾

雲門翠堤大樓（12階建て）…傾斜倒壊



國盛六街（11階建て）…41号民宅倒壊



写真7 花蓮地震における2つの建物被害⁷⁾

会場・出席者：台北市建築士公会大会議室，約100名
プログラム：表2に示す。

5.1 花蓮地震の概要と被害状況把握・応急判定 (花蓮市建築士会)

2018年2月6日，23時50分に発生した台湾・花蓮近海を震源とするMw6.4，最大震度7の地震で死者17名。花蓮市内を南北に走る米崙断層の近傍で建物，橋，道路等の大きな被害が発生した（図3）⁷⁾。

図4に示すような周期2.5秒の長周期パルスも花蓮市内では観測されており，建物倒壊には，この影響も大きいと推測されている。

花蓮市建築士会では他の市の建築士会，土木技師，構造士も入れて市内の大被害建物の緊急処置，被害状況把握，応急判定などを行った。

5.2 最近発生した大地震と耐震設計における 新しい考え方(和田名誉教授)⁵⁾

1) 地震被害の状況説明

2018年2月6日台湾花蓮地震，2016年2月6日台湾台南地震，2016年4月14日熊本地震の免震病院の免震層の変位は±45cm，2016年8月24日イタリア・アマトリーチ地震，1891年濃尾地震，1923年関東地震，1995年神戸地震，2011年東日本大震災，2011年NZ・クライストチャーチ地震の液状化による建物撤去。

2) 耐震設計方針の変更の必要性

建物の損傷によって人命を保証する設計法では，もはや今後の都市を大地震に対して持続可能でレジリエントにすることができない。

3) 新しい耐震構造物

免震構造，パッシブ制震構造，ステッピング・コラム構造（図5）⁵⁾，弾性ジョイントを有するPca-RC構造，損傷部位限定でエネルギー吸収を図る方法。

4) 上記の具体例

正倉院（免震構造），東京工業大学のステッピング柱を有するS造免震建物，RCセンターコア付きの30階高層RC造免震構造，Damage Controlled Structures，Sacrifice（主要でないものを損傷・犠牲にし，エネルギーを吸収することによって本体を守る）の考え方：人体の鎖骨と自動車のバンパー，Buckling Restrained Braces。

5) 結論

Not rely to large ductility. Ductility is not final goal.（今後の耐震設計は，靱性（塑性化許容）には頼らない設計＋エネルギー吸収機構＋損傷部位限定構造しかない）（写真8,9）。

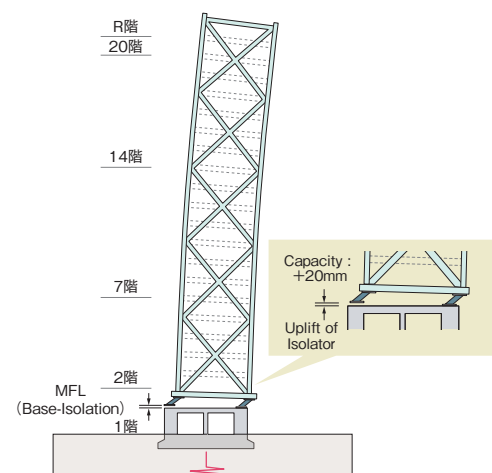


図5 ステッピング・コラム構造⁵⁾

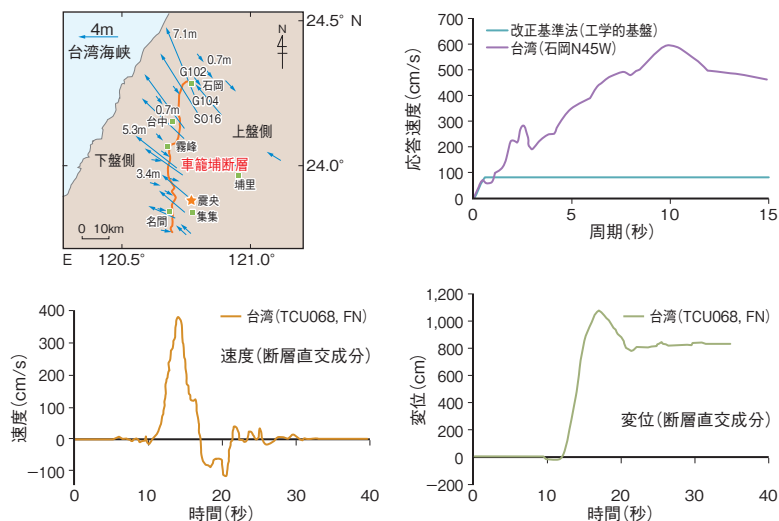


図6 1999年集集地震の震源断層と地表断層近傍の観測波・速度応答スペクトル (断層直交成分)⁸⁾



写真8 検討会の会場



写真9 和田名誉教授の講演の様子

5.3 台湾の耐震規定の変遷

台湾では前述のように何度かの耐震設計基準の変遷があり、設計用の加速度は基準が変わるたびに大きくなっている (図2)⁶⁾。

しかし、1999年の集集地震では断層近傍で下記に示すような現象がみられ、大きな被害が生じているため対策が急がれている。まずはどこに活断層が存在するかの調査が急いで行われている。集集地震の断層は、海溝性地震の断層であることが分かっている。

- ・上盤断層効果 (Hanging Wall Effect) : 逆断層の上側の層が大きく上側に持ち上げられる現象。
- ・フリングステップと呼ばれる地震断層近傍の大変形 : 集集地震では最大10mにも達した。
- ・大速度長周期パルス現象 : 最大速度450cm/sec, 周期10秒 (図6)⁸⁾。

5.4 花蓮市内の免震病棟(合心樓)(図7)の

花蓮地震時の状況

被害概要 : 最大加速度が450ガルであったにもかかわらず、免震クリアランスに若干の被害があったのみである。地震時の観測結果、上下動は低減されていない。

免震装置 : LRB800~1200 74基, SL400 14基



図7 建物配置図

SRC構造, 地上11階・地下1階
基礎免震

免震構造の特性
有効周期 $T_e=2.76$ 秒
免震層の層せん断力 $Q=0.15W$,
 w : 建物重量
免震層の許容変位 $D=24$ cm
有効剛性 $K_{eff}=22,759$ t/m
有効減衰比 $c_{eff}=28\%$

5.5 台湾の既存建物の耐震診断・補強状況

1) 台湾のこの100年間の大地震

- ・新竹-台中地震 : 1935年4月21日, M7.1, 3,323名死亡。
- ・集集地震 : 1999年9月21日, M7.3, 2,451名死亡。
- ・高雄美濃地震 : 2016年2月6日, Mw7.3, 117名死亡。
- ・花蓮地震 : 2018年2月6日, Mw6.4, 17名死亡。

2) 台湾の耐震診断・補強計画

- ・2017年8月末までに政府系, 自治市系建物など27,000棟の初步評価, 14,000棟の詳細評価, 5,000棟の補強工事を実施した。
- ・1997年5月1日より前に設計・施工された公的建物は, 2016年の台南地震 (高雄美濃地震) で被害を受け死傷者も出たが, 補強工事が完成した学校校舎はほとんど被害がなかった。
- ・2017年9月1日~2021年8月31日の4年間で, 毎年744棟の詳細評価, 900棟の公的建物の補強および31棟の公的建物の撤去・再建が予定されている。

3) 台湾で懸念されること

- ・建設後40年以上の老朽化住宅が台北, 高雄など全国で200万棟以上あること。
- ・活断層から3km以内の住宅があること。活断層近傍というリスクを考え, 地震力の割り増しが必要である。
- ・活断層は現在12あり, ほかに21の活断層の疑いがある地形が発表されている。活断層近くの建物はより早急に変形と大きな速度パルスに対しての補強が必要である。
- ・液状化地帯の住宅対策。台北は昔, 湖沼地帯の盆地であったため, 液状化リスクが高い。

4) 耐震以外の方法 (免震・制震)

この20年間に基礎免震, 地震エネルギー吸収デバイス, 振動制御による方法が増えてきている。これによって構造部材を破壊させる靱性設計が不適切な耐震設計になり

つつある。補強のために、建物の構造強度を上げるだけの設計は時代遅れになっている。

6. まとめ

- 短期間の和田名誉教授を団長とする調査団であったが、台湾側の熱意もあり得るものが多かった。特にNCREEでの成果が大きかった。
- 地震国同士の技術交流は重要。地震の再現期間が短くなる（地震体験が増える）ことと一緒である。今後も推進すべきである。
- 台湾での免震・制震技術は日本に負けていない。免震・制震では製品のごまかしが台湾側からも指摘されていたが、ごまかしのきかないシステムをつくる必要を感じた。
- 活断層近傍の大変形と大速度現象に対応した対策は、台湾特有の問題で済むのか？ 10mにも及ぶ大変形に対する建物対策は非常に難しい。
- 台湾のように実機の試験を課すことをしないと大容量の加力装置はなかなか普及しない。
日本は建築と土木、研究機関、ゼネコンでそれぞれ装置を持っており、分散損になっている（和田名誉教授）。

〔参考文献〕

- 1) 張国鎮ほか：NCREEの新しい実験装置，New Loading Machine at NCREE: The Dynamic Biaxial Testing System (BATS) and Its Future Potential Application，日本免震構造協会主催シンポジウム，設置が望まれる実大動的加力装置，pp.14～25，2015.12.10
- 2) NCREE：地震模擬実験室服務手冊NCREE-LT-TQM-B-S01，版次2.7，<http://www.ncree.org.tw>，2018.4.30
- 3) NCREE：<https://www.ncree.org/index.aspx?p=6>，2018.4.30
- 4) 赤木久真，中野時衛：近年における地震被害の特徴と通信用建物・鉄塔等の耐震安全性確保への取り組み，NTTファシリティーズ総研レポート，No25，pp.8～17，2014.6
- 5) Akira Wada:Recent Earthquakes and New Concepts for Earthquake Resistant Design，花蓮地震被害状況と日中の耐震診断・構造補強に関する検討会資料，pp.2-1～2-48，2018.4.3
- 6) 花蓮地震被害状況と日中の耐震診断・構造補強に関する検討会資料，2018.4.3
- 7) NARlabs 国家実験研究院：花蓮地震概要Ver6.0，www.narlabs.org.tw，2018.2.6
- 8) 久田嘉章：耐震の入り口と出口の話—強震動と地震防災—，第3回「震源近傍の強震動」SEIN WEB，<https://www.sein21.jp/NewSeinWeb/TechnicalContents/Hisada/Hisada0103.aspx>，2018.4.30