

## УЛУЧШЕНИЕ СМЯГЧЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТАЙВАНЕ

**Ших-Цзянь Хван, Куо-Чун Чанг и Кех-Чюань Цай**

*Национальный центр исследований в области сейсмостойкости,  
Тайбэй, Тайвань.*

*Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan*

*Email: sjhwang@ntu.edu.tw, ciekuo@ntu.edu.tw, kctsai@ntu.edu.tw*

**Аннотация.** Тайваньское землетрясение в Чи-Чи в 1999 году стало самым разрушительным за последние десятилетия, и оно также стало важным переломным моментом для развития инженерной сейсмологии на Тайване. После этого землетрясения Национальный центр исследований в области сейсмической инженерии (NCREE) вложил много ресурсов в разработку технологий предотвращения землетрясений. В этой статье представлены три примера с разными аспектами. Первый – выяснить, насколько велика сейсмическая угроза, с помощью новой процедуры вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA). Подробная и точная информация о сейсмической опасности является основой сейсмического проектирования и предотвращения стихийных бедствий. Во-вторых, школьные здания, поврежденные землетрясением 1999 года в Чи-Чи, подчеркнули проблему их хрупкости. Сейсмические характеристики школьных зданий были всесторонне улучшены за счет сейсмической оценки и модернизации для защиты учащихся. Наконец, усовершенствованная система раннего предупреждения о землетрясениях и система мониторинга структурной безопасности могут снизить человеческие и материальные потери при землетрясении.

**Ключевые слова:** сейсмическая инженерия, сейсмическая опасность, сейсмическое переоборудование, раннее предупреждение о землетрясениях.

### Введение

Национальный центр исследований в области инженерии землетрясений (NCREE) был основан в 1990 году и завершил строительство лаборатории и исследовательского корпуса в 1998 году. Основная цель заключалась в совершенствовании технологии инженерии сейсмической инженерии с помощью лаборатории симулятора землетрясений (Shaking table, et al.). Прикладные исследования в NCREE, включая проблемы сейсмостойкости, которые должны быть решены теоретически или экспериментально, были выполнены для разработки новой технологии сейсмостойкости.

В 1999 году разрушительное землетрясение магнитудой MW7,6 произошло в центре города. Землетрясение Чи-Чи 1999 г. стало самым разрушительным землетрясением на Тайване за последние десятилетия. В геологическом отношении Тайвань находится между плитами Филиппинского моря и Евразийской плитой. Ежегодно на Тайване происходят десятки тысяч землетрясений, из которых около тысячи существенно ощущаются. Каждые 10–15 лет на Тайване происходило катастрофическое землетрясение,

в результате которого погибло более 100 человек. Поэтому людям на Тайване приходится жить в условиях землетрясений. Невозможно устранить катастрофы, вызванные землетрясениями, но мы можем смягчить их за счет развития сейсмической инженерии. За последние два десятилетия массивные и высококачественные данные о сильных движениях грунта землетрясения Чи-Чи 1999 года способствовали развитию сейсмологии, сейсмологической инженерии и управления стихийными бедствиями на Тайване. Это также способствовало быстрому развитию технологий предотвращения стихийных бедствий, особенно для оценки сейсмической опасности, сейсмической модернизации зданий и раннего предупреждения о землетрясениях и др. В этой статье представлены достижения по трем направлениям смягчения последствий землетрясений на Тайване.

### **Вероятностный анализ сейсмической опасности**

Чрезвычайно высокая сейсмическая опасность Тайваня должна быть серьезно рассмотрена при проектировании сейсмостойкости, строительных норм и правил и мер по предотвращению стихийных бедствий. Однако большинство исходных данных для подробного и точного анализа сейсмической опасности, таких как характеристики движения грунта, влияние площадки, эффект близкой к разлому, эффект длительных импульсов и т. д., были недостаточными до землетрясения Чи-Чи 1999 года. Большое количество данных о сильных движениях с высоким разрешением, записанных Тайваньской инструментальной программой сильных движений (TSMIP), сделало это землетрясение поворотным моментом. NCREE инвестировала много ресурсов и сделала большой шаг в разработке вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA).

С 2000 года NCREE сотрудничал с Центральным бюро погоды (CWB) для создания инженерно-геологической базы данных для TSMIP (EGDT) для оценки скорости продольных и поперечных волн и предоставления информации о геологическом описании от бурения для станций с сильным движением. К 2012 году EGDT создала около 450 площадок, которые предоставляют подробную информацию о площадках, такую как  $V_{s30}$  (средняя скорость поперечной волны для верхних 30 метров), для классификации площадок, PSHA и сейсмического проектирования. Между тем, различные техники, базы данных и модели PSHA постепенно изучались и обновлялись. Основываясь на все более глубоком понимании характеристик движения грунта и сейсмической опасности, код сейсмического проектирования (рис. 1) на Тайване также несколько раз пересматривался, чтобы учесть новые сейсмические зоны, микроразнообразие бассейна Тайбэя и фактор близкого к разлому. и т. д. В 2016 году NCREE организовал проект Комитета по высокому анализу сейсмической опасности (SSHAC) уровня III для переоценки сейсмической опасности атомных электростанций на Тайване. Этот проект помог нам всесторонне улучшить процедуру PSHA с привлечением экспертов в стране и за рубежом. Теперь новая база данных EGDT включает

Vs30, Z1.0 (глубина скорости достигла 1,0 км / с) и каппа (высокочастотное затухание для FAS) примерно для 850 станций TSMIP [1] в соответствии с глобальной тенденцией в классификации площадок для PSHA и сейсмического проектирования. Недавно разработанное уравнение прогнозирования движения грунта для Тайваня было разработано на основе локальной базы данных о движении грунта, опыта американского NGA и новой регрессии для усечения [2]. Кроме того, в сотрудничестве с экспертами в области наук о Земле была построена модель характеристик сейсмических источников для всего Тайваня. PSHA может воспользоваться всеми достижениями для выявления потенциальных сейсмических угроз и выявления потенциальных опасностей и рисков на Тайване.

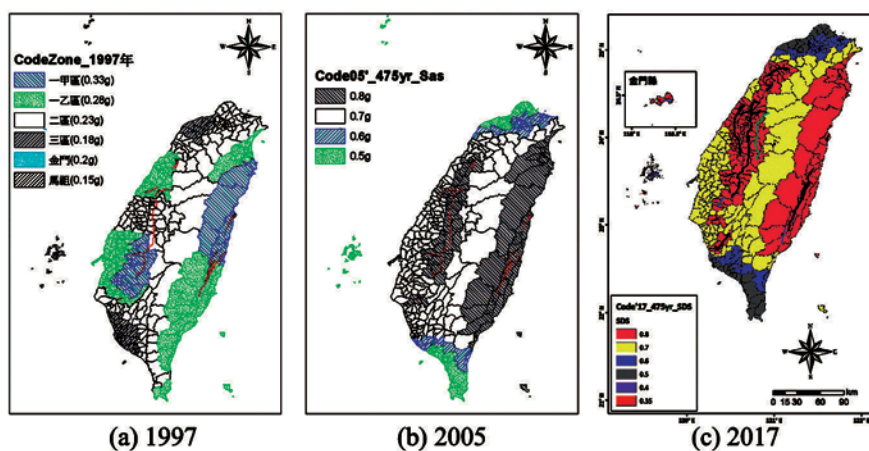


Рис. 1. Развитие норм сейсмического проектирования для зданий на Тайване.

### Сейсмический переоборудование школьных зданий

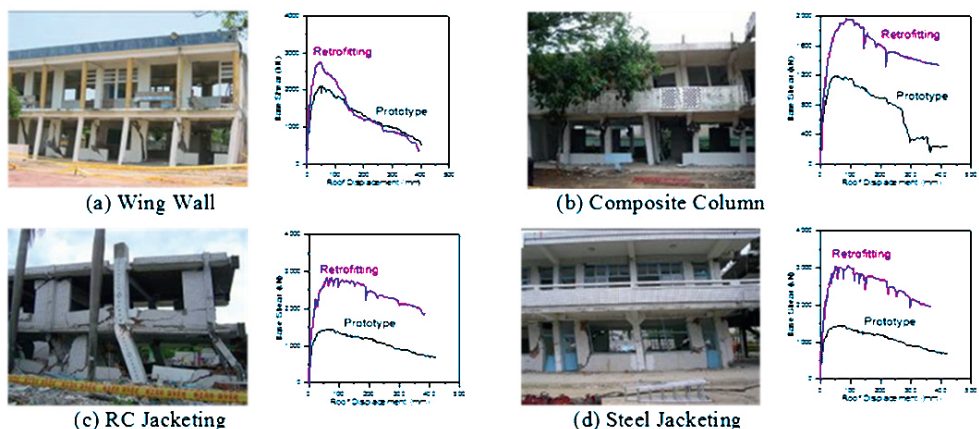
Землетрясение 1999 г. в Чи-Чи продемонстрировало, что уровень безопасности школьных зданий на Тайване вызывает серьезную озабоченность. Во время этого землетрясения более половины школьных зданий в округе Наньтоу были частично или полностью разрушены. Таким образом, нет сомнений в том, что сейсмичность школьных зданий на Тайване должна вызывать серьезную озабоченность и что сейсмичность школьных зданий нуждается в срочном повышении за счет модернизации. Однако на Тайване имеется 3763 государственных начальных, младших и старших средних школ (включая профессионально-технические школы) и более 27000 школьных зданий. Такое большое количество зданий легко исчерпало бы имеющиеся средства, если бы не было экономически эффективного метода.

Согласно результатам изучения 921 поврежденного школьного здания, типичные школьные здания Тайваня были в основном повреждены из-за разрушения вертикальных конструктивных элементов на первом этаже и привели к обрушению зданий в направлении коридора. Следователь-

но, увеличение количества вертикальных конструктивных элементов или повышение прочности и пластичности существующих колонн являются эффективными методами модернизации. Традиционные методы модернизации, такие как обшивка колонны RC, стальная обшивка и добавление стенки крыла, выбираются по экономическим причинам. Эти выбранные методы модернизации были проверены в ходе школьных испытаний на месте. Рис. 2 иллюстрирует несколько традиционных методов модернизации зданий [3].

Правительство Тайваня выделило бюджет в размере около 98 миллиардов тайваньских долларов (1 долл. США ~ 30 TWD) на модернизацию с 2009 по 2022 год сейсмической устойчивости государственных зданий начальных, младших и старших классов средней школы. NCREЕ по поручению Министерства образования учредил Проектный офис по сейсмической модернизации школьных зданий для оказания технической и административной помощи проекту. Что касается технической помощи, NCREЕ предоставила методы сейсмической оценки и модернизации школьных зданий. Что касается административной помощи, проектный офис разработал рабочие спецификации, провел семинары, популяризировал хорошие примеры модернизации и создал банк данных.

В настоящее время реконструировано 6 526 школьных зданий. К концу 2022 года количество модернизированных школьных зданий может достигнуть 7852, что составляет примерно 1/3 от общего числа зданий государственных школ на Тайване. Есть надежда, что с помощью сейсмической оценки и модернизации школьных зданий широкая общественность Тайваня поймет важность сейсмической модернизации. Эту работу можно продолжить и распространить на другие существующие здания, чтобы создать более безопасную родину.



*Рис. 2. Экспериментальная проверка мер по модернизации испытаниями школ на месте.*

## **Разработка системы раннего предупреждения о землетрясениях и мониторинга конструкционной безопасности**

NCREE разработала локальную систему раннего предупреждения о землетрясениях (On-site EEWs), которая может обнаруживать первую приближающуюся P-волну землетрясения и оценивать силу (Peak Ground Acceleration, PGA) следующей сильной волны за 1–3 секунды. Система EEWs на месте состоит из зондирования (сейсмические датчики), обработки (оценка PGA следующей S-волны) и действий (предупреждение людей, реле управления для уменьшения сейсмических потерь). Несколько датчиков применяются в разных местах для уменьшения ложных срабатываний. После многолетних испытаний во время землетрясения в Мей-Нонг в 2016 году один локальный EEWs в слепой зоне обычного EEWs (расстояние до эпицентра 38 км) успешно выдал предупреждение за 5,34 секунды до максимального толчка. Благодаря выдающимся характеристикам количество локальных EEWs постепенно увеличилось до 94 по всему Тайваню. А точность прогноза интенсивности ( $\pm 1$  уровень) с 2016 по 2020 год составила более 98%.

В 2016 году CWB объявил о создании региональной службы EEW для населения Тайваня. С ростом применения локальной и региональной EEW, NCREE получил задание от правительства объединить региональную и локальную EEW в «гибридную EEW», создать облачный сервис (B2B) для отрасли и разработать различные приложения для автоматизации EEW с промышленностью. Конечная цель — создать индустрию уменьшения опасности сейсмических бедствий. До 2020 года более 3500 школ, 21 пожарная часть, 12 зданий, 8 полупроводниковых заводов, 2 научных парка, 2 больницы, 2 выставочных зала, один стадион и Тайваньская высокоскоростная железная дорога применяли систему раннего предупреждения о землетрясениях. Сигнал землетрясения передается на различные устройства через Интернет за 2 секунды. В этих демонстрациях люди были предупреждены, прежде чем встряхнуть, звуковым сигналом и фонариком, газовая заслонка автоматически закрывается, лифт останавливается на ближайшем этаже и эвакуируется пользователей, прожектор указывает людям положение безопасного укрытия, производственная линия мягко останавливается (для быстрого восстановления). Во время землетрясения в Хуаляне в 2019 году гибридный EEWs снова показал отличные характеристики. Через 6–14 секунд после землетрясения локальный EEW выдал предупреждение для близких к эпицентру областей, где распространялась волна землетрясения. На 14-ой секунде региональный EEW вынес предупреждение для всей страны. Он показал большое преимущество гибридной EEWs, локальная EEWs может помочь ближнему эпицентру получить предупреждение раньше, значительно уменьшить слепую зону обычного EEW.

С разработкой приложения EEW люди также начали думать дальше, будет ли конструкция безопасна после землетрясения. С 2013 года NCREE сотрудничал с несколькими университетами Тайваня в разработке Системы

мониторинга структурной безопасности (SSMS). Современные технологии мониторинга состояния конструкций разрабатывались десятилетиями. Пришло время NCREE интегрировать датчики, систему мониторинга и оценку безопасности конструкций в SSMS. Расположение датчиков было разработано в соответствии с конструктивными особенностями, функциями и стоимостью. Система мониторинга обнаруживает землетрясение и собирает все данные, а для сравнения были применены различные методы оценки безопасности, предложенные учеными. Первая демонстрационная система была установлена в офисном здании Центрального научного парка на Тайване. С 2020 года NCREE начала сотрудничать с Центральным бюро погоды для установки SSMS для 30 зданий. Новое здание NCREE было одним из них. На рис. 3 показан рабочий процесс SSMS. Примерно через одну минуту после встряхивания SSMS предоставит быстрый отчет, в котором будут показаны все зарегистрированные датчики. Через 5–10 минут будут созданы несколько отчетов об оценке безопасности конструкции, чтобы показать уровень безопасности конструкции и возможные места повреждений. Это может значительно ускорить реакцию после землетрясения, людям не придется ждать на улице, пока эксперты проверит конструкцию, а устойчивость может быть увеличена. В то же время все данные будут открыты для академических кругов, и можно будет разработать и проверить больше методов оценки безопасности конструкций.

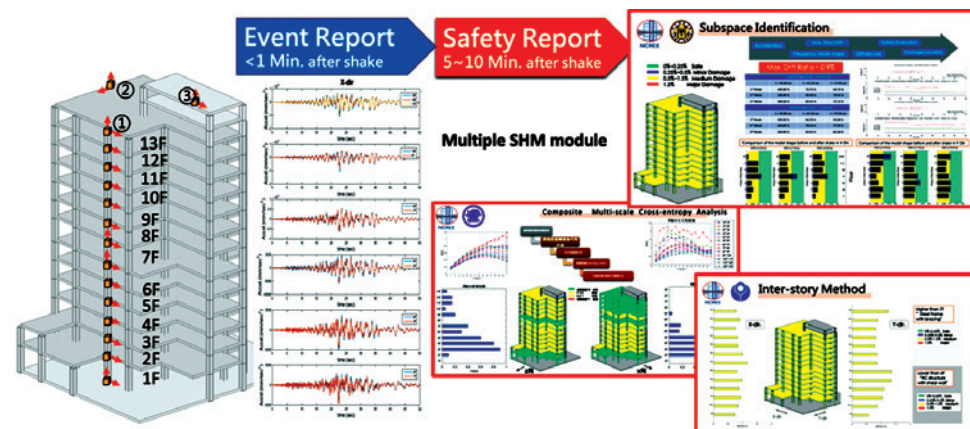


Рис. 3. Рабочий процесс системы мониторинга структурной безопасности (SSMS) в NCREE.

### Выводы

Высокая сейсмичность — насущная проблема для Тайваня. Неизбежные стихийные бедствия могут быть смягчены путем разработки технологий предотвращения стихийных бедствий в сейсмической инженерии. В этой статье представлены три примера, проведенных NCREE после землетрясе-

ния Чи-Чи 1999 года. Первый — выяснить, насколько велика сейсмическая угроза с помощью новой процедуры PSHA. Затем сейсмические характеристики школьных зданий были всесторонне улучшены за счет сейсмической оценки и модернизации, чтобы защитить учеников и учителей. Наконец, были внедрены усовершенствованная система раннего предупреждения о землетрясениях и система мониторинга структурной безопасности, которые могут помочь сократить человеческие и материальные потери при сильных землетрясениях.

NCREE стремится к совершенствованию приложений сейсмологической инженерии. Проведено множество исследований по смягчению последствий землетрясений. Кроме того, новая Тайнаньская лаборатория, завершенная в 2017 году, и новое дополнение исследовательских помещений в исследовательском здании Тайбэя, завершенное в 2020 году, еще больше укрепили исследовательский ресурс NCREE. Мы продолжим продвигать сейсмическую безопасность Тайваня.

### Литература

1. Kuo, C. H., Lin, C. M., Chang, S. C., Wen, K. L., and Hsieh, H. H. (2017), “Site Database for TSMIP,” NCREE Report, NCREE-17–004, Taipei, Taiwan. (In Chinese).
2. Chao, S. H., Chiou, B., Hsu, C. C., and Lin, P. S. (2020). “A horizontal ground-motion model for crustal and subduction earthquakes in Taiwan,” *Earthquake Spectra*, 36 (2), 463.
3. Chung, L. L., Yeh, Y. K., Chien, W. Y., Chai, J. F., Hsiao, F. P., Shen, W. C., Chiou, T. C., Chow, T. K., Chao, Y. F., Yang, Y. S. and Hwang, S. J. (2008), “Technology Handbook for Seismic Evaluation and Retrofit of School Buildings,” NCREE Report, NCREE-08–023, Taipei, Taiwan. (In Chinese).