

グローバルCOEプログラム

震災メガリスク軽減の 都市地震工学国際拠点 キックオフシンポジウム講演集

Proceedings of the kick-off Symposium on
International Urban Earthquake Engineering Center
for Mitigating Seismic Mega Risk (Global COE Program)

2008年10月6日



東京工業大学 都市地震工学センター

Center for Urban Earthquake Engineering (CUEE)
Tokyo Institute of Technology

目 次

1. ごあいさつ	1
拠点リーダー 建築学専攻 教授 時松 孝次	
2. 東京工業大学におけるグローバルCOEプログラムについて	3
東京工業大学 副学長 齋藤 彬夫	
3. グローバルCOEプログラム「震災メガリスク軽減の都市地震工学国際拠点」について	
プログラムの全体概要	7
人間環境システム専攻 教授 翠川 三郎	
地震防災イノベーション技術	9
土木工学専攻 准教授 市村 強	
都市耐震リノベーション技術	11
建築学専攻 准教授 竹内 徹	
都市災害マネジメント技術	13
土木工学専攻 准教授 藤井 聡	
「都市地震工学国際コース」教育プログラムの概要	15
土木工学専攻 教授 二羽 淳一郎	
都市地震工学センターの国際連携	17
建築物理研究センター 教授 笠井 和彦	
4. 「震災メガリスク軽減の都市地震工学国際拠点」に期待するもの	
グローバルCOE「震災メガリスク軽減の都市地震工学国際拠点」に期待すること	19
早稲田大学大学院理工学研究科 教授 濱田 政則	
巨大震災の被害軽減のための社会技術開発	21
首都大学東京大学院都市環境科学研究科 教授 中林 一樹	
5. 「四川大地震報告」	
四川大地震報告（震源過程と地震動）	23
東京大学地震研究所 教授 瀬藤 一起	
四川大地震による都江堰市における学校建築の被害	27
東京大学地震研究所 教授 壁谷澤 寿海	
四川地震による橋梁被害とその特徴	31
土木工学専攻 教授 川島 一彦	
急速に発展した中国と四川大震災	37
建築物理研究センター 教授 和田 章	
6. 閉会の辞	47
人間環境システム専攻 教授 大町 達夫	

ごあいさつ

グローバル COE プログラム
「震災メガリスク軽減の都市地震工学国際拠点」
拠点リーダー 東京工業大学 教授 時松孝次

わが国の大都市は、人口・産業・情報の集中により、都市機能が高密度化・複雑化・脆弱化し、巨大地震や直下地震などによる大きな震災リスク（震災メガリスク）を内包しています。これは、世界の大都市共通の問題であり、グローバルレベルで、都市生活の持続性が脅かされています。さらに、近年の地震により、長周期地震動、重要施設の機能停止にともなう被害の波及など、震災の巨大化を加速する新たな課題も明らかとなっています。巨大震災は日本経済を破綻させるばかりでなく、世界経済にも重大な影響を与えるといわれています。このような課題を解決して、より安全・安心な社会を形成するためには、地震に強い都市の創成・再生・回復技術を統合した新たな都市地震工学研究の推進、ならびに震災メガリスク軽減のための技術と戦略を世界各地で実践展開できる研究教育者・防災技術者の育成が不可欠です。本GCOEプログラムでは、世界的に増大する震災メガリスク軽減のため、都市地震工学センターのもとに、教育研究を推進し、世界の地震工学の教育研究をリードする、わが国唯一の都市地震工学国際拠点の形成を目指します。

教育面では、世界でリーダーシップをとれる防災専門家の養成を目標とし、優秀な留学生を受け入れる国際大学院特別コースを開設して、学生の国際性を高め、さらに英語集中訓練、海外インターンシップによる外国の大学への派遣、外国人招聘教授による専門科目授業などのカリキュラムを整備し、広い視野を養成します。また若手研究費の配分、国際会議への積極的派遣など若手育成施策を実施します。

研究面では、地震に強い都市の創成・再生・回復技術を統合化した震災メガリスク軽減のための「都市地震工学」として、(1)新たに顕在化した震災の巨大化を加速させる問題にも対応できる「地震防災イノベーション技術」、(2)既存大都市の多様なメガリスクの軽減に有効な「都市耐震リノベーション技術」、(3)巨大震災から早急に都市機能を回復させる「都市災害マネジメント技術」の研究を、国内外の機関等とも連携して推進します。

国際的社会貢献面では、米国太平洋地震工学センター（Pacific Earthquake Engineering Research Center, 略称 PEER、カリフォルニア大学バークレイ校を含め9大学が参加）との連携を基軸として、北南米、アジア、欧州などの各機関との連携協力体制を強化し、人材交流、共同研究、世界各地でのOJTや共同調査、復興協力を含む幅広い教育・研究活動の高度化、効率化を図ります。国際会議・若手研究者WSの開催、成果をまとめた英語教材作成などにより、積極的な情報発信、技術移転を図るとともに、研究者交流・研究者ネットワーク構築を推進します。さらに、

成果を技術者や一般市民に発信するため、都市地震工学データベースの構築やホームページの充実とともに、都市地震工学談話会・市民講座なども定期的を開催します。

震災軽減は、日本が世界から期待されている活動分野です。関係各位のご支援とご協力をお願い致します。

本プログラムの発足に際し、その内容を紹介するとともに、産官学界の方々より、本プログラムへのご意見ご助言をいただきたく、本キックオフシンポジウムを企画、開催いたしました。本プログラムの発展のために、忌憚のないご意見をいただければ幸いです。

東京工業大学におけるグローバル COE プログラムについて

Global COE Programs at Tokyo Institute of Technology

東京工業大学 理事・副学長（教育担当）齋藤彬夫

Akio Saito, Vice President, Tokyo Institute of Technology

1. 大学教育改革とグローバル COE

高等教育は、社会・経済・文化の発展、国際競争力確保等の国家戦略において、極めて重要な役割を担うことが求められています。その要請に応えるため、大学等高等教育機関は競争的環境の中でその個性・特色を明確にし、多様な発展を遂げていくことが必要です。文部科学省では、これらの重要な課題に向けた各大学における教育改革の取組を促進するため、「国公立大学を通じた大学教育改革の支援」の各種プログラム（平成20年度予算額680億円）を展開しています。これらのプログラムでは、各大学から申請のあった教育改革の取組の中から、特色ある優れた取組を選定し、重点的財政支援を行うことで、競争的環境の醸成、各大学の教育改革への意識高揚、積極的な教育改革の検討・取組の促進を図り、もって高等教育全体の活性化を図ることを目的としています。

グローバルCOEプログラムは、「国公立大学を通じた大学教育改革の支援」の最重点プログラムとして位置づけられるもので、平成14年度に開始された「21世紀COEプログラム」の評価・検証を踏まえ、その基本的な考え方を継承しつつ、平成19年度に新規事業としてス

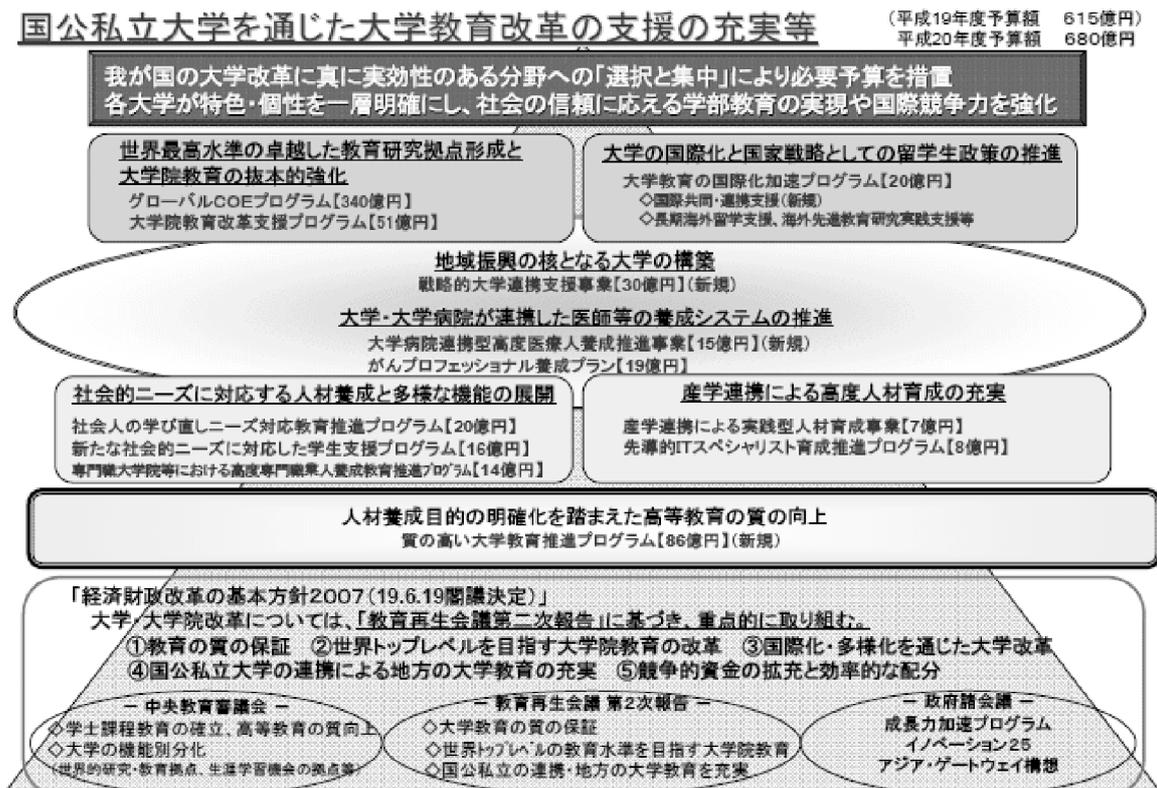


図1 国公立大学を通じた大学教育改革の支援の充実等（文部科学省 HP より）

スタートしました。本プログラムは、我が国の大学院の教育研究機能を一層充実・強化し、世界最高水準の研究基盤の下で世界をリードする創造的な人材育成を図るため、国際的に卓越した教育研究拠点形成を重点的に支援し、もって、国際競争力のある大学づくりを推進することを目的としています。

平成19年度は「生命科学」、「化学、材料科学」、「情報、電気、電子」、「人文科学」、「学際、複合、新領域」の5分野について公募が行われ、国公立私立大学111大学から281件の応募があり、合計63件が採択。平成20年度は、「医学系」、「数学、物理学、地球科学」、「機械、土木、建築、その他工学」、「社会科学」、「学際、複合、新領域」の5分野に、国公立私立大学130大学から315件の応募があり、68件が採択されました。

東京工業大学のグローバルCOE採択件数は、平成19、20年度採択分を合わせて8件、理工系分野だけの大学としてはその健闘が高く評価されます。分野別に見れば、「生命科学」1件、「化学、材料科学」2件、「情報、電気、電子」2件、「数学、物理、地球科学」1件、「機械、土木、建築、その他工学」1件、「学際、複合、新領域」1件です。8採択プログラムの今年度配分額は、22.9億円（間接経費30%を含む）となっており、中間評価はあるものの、5年間の継続支援が予定されています。

本グローバルCOEプログラム「震災メカリスク軽減の都市地震工学国際拠点」は、平成15年度採択された21世紀COEプログラム「都市地震工学の展開と体系化」で築いた研究教育基盤をさらに、国際競争力のある教育研究拠点へと発展強化するため、平成20年度「機械・土木・建築・その他工学」分野に申請し、採択となったものです。

2. 東工大の使命とグローバルCOE

本学は、学長の強いリーダーシップのもと、研究と教育により知的資産を創造し、次代を担う優秀な人材を育成し、もって社会に貢献することを使命とする「世界最高の理工系総合大学の実現」を長期目標に設定して教育研究に邁進しています。

本グローバルCOEプログラム応募にあたっては、「社会の要請に合致した領域」、「他機関・他国の研究者との連携によって画期的なシナジー効果が期待できる分野」、「世界の学生・研究者がこの拠点で勉学・研究をしてみたいと思うようなテーマ設定」、「研究者にも学生にとっても教育研究に熱中できる環境構築」を目的として、拠点案を策定しています。

本学の使命と長期目標

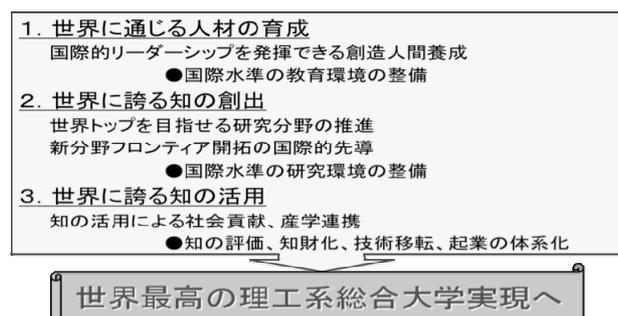


図2 本学の使命と長期目標

本G-COE申請拠点を含めた21COE、G-COE拠点の教育研究活動を連携することでその効果をさらに高めるため、全学的な教育研究システムを検討するとともに、研究者の適切な評価とそれに基づく処遇を可能とする組織運営を実現し、G-COEが目的とする世界的教育研究拠点の形成と教育システムの改革を目指します。

本学のグローバル COE 採択拠点は、いずれも世界に誇る研究陣を全学規模で選抜した強力なグループで構成されています。これらの拠点は、教育面では「専門性だけではなく高い柔軟性と広い視野を持ち産業界でも活躍できる人材育成」、「スクーリングを重視した多様なコース設計と国際コミュニケーション能力の強化」などを特徴とする教育システムづくりの観点から、研究面では「拠点形成により世界トップを目指せるもの」、「部局を超えた組織化により飛躍的な進展が期待できるもの」といった視点から選抜された、いずれも長期目標に合致した本学の「強い」教育研究分野です。

これらの教育研究成果をさらに高めるため、学長のリーダーシップのもと、**拠点形成の支援活動**として、1) 学内資源配分、2) 組織化支援、3) 広報支援、4) 産学連携支援、5) 国際化支援、6) 事務支援体制強化、7) 競争的資金獲得支援、8) 進捗状況管理と評価などを行っています(表1)。

本プログラム「震災メガリスク軽減の都市地震工学国際拠点」に関連する主な支援としては、平成15年9月1日に、「東工大都市地震工学センター」の設置、大岡山・すずかけ台両キャンパスに研究スペースを配分。さらに、平成19年4月に、大学院特別教育コースとして、専攻横断型の「都市地震工学特別教育コース」の設置。また、平成20年度10月から、都市地震工学分野に研究留学生5名の特別配置を獲得し、修士博士一貫制国際大学院プログラム「日本の地震防災技術による国際貢献を担う高度技術者の養成プログラム」の開設などです。

表1 拠点形成支援

-
1. 学内資源配分：研究スペース、教育研究経費の優先配分
(実績例) 21COE/G-COE 拠点への研究スペース(約3,240m²)、施設整備費(6億7千万円余)の配分
 2. 組織化支援：研究戦略室によるセンター化支援、教育推進室によるコース支援
(実績例) 12の学内措置センター、都合10の教育コースの設置
 3. 広報支援：各拠点の行う広報活動の側面的支援と全学体制での拠点アクティビティの広報活動
(実績例) COE 拠点を網羅した InterCOE シンポジウムを平成15年度より毎年開催
 4. 産学連携支援：産学連携推進本部による研究成果の社会還元支援
(実績例) 技術フォーラムの開催
 5. 国際化支援：国際室による海外拠点形成・国際化教育支援、協定大学への留学支援
(実績例) 清華大学との連合大学院、タイ科学技術省との共同研究
 6. 事務支援体制構築：各拠点の経理・事務書類作成の支援、研究者・学生の事務的負担の軽減
(実績例) 大岡山・すずかけ台両キャンパスに COE 支援室を設置
 7. 競争的資金獲得支援：研究戦略室による外部競争的資金の獲得に向けた支援
 8. 進捗状況管理と評価：副学長・研究戦略室等が進捗状況を管理、評価室が実績を評価
-

全学的には、拠点形成の継続性を担保するため、拠点リーダーをメンバーとする「**先進研究機構**」を統合研究院内に常設し拠点間の意識の整合を図るとともに、本学の教育研究施策決定へ積極的にフィードバックしています。さらに、これらの拠点で得られた教育的工夫を高め、あるいは次の拠点形成の礎とすることを目指して魅力ある大学院教育イニシアチブや大学院教育改革支援プログラムに応募する支援も行っています。

本学の目標である「世界最高の理工系総合大学」に向けて、グローバル COE が目標とする世界的研究教育拠点形成が重要なステップであると位置づけ、全学を挙げてこれを支援していくものです。

・ 教育研究の強みの抽出と組織化

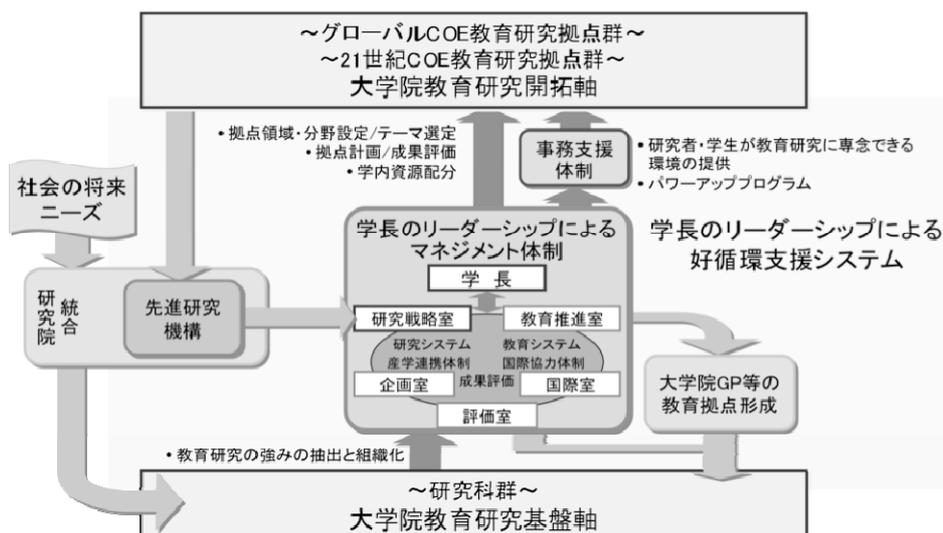


図3 拠点形成支援システム

プログラムの全体概要

Outline of Global COE Program

“International Urban Earthquake Engineering Center for Mitigating Seismic Mega Risk”

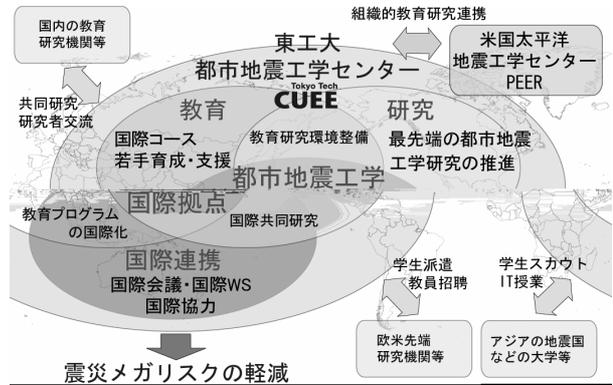
東京工業大学 人間環境システム専攻 翠川 三郎

Saburoh Midorikawa, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

1. 背景と目的

わが国の大都市は、人口・産業・情報の集中により、都市機能が複雑化・脆弱化し、巨大地震や直下地震などによる大きな震災リスク（震災メガリスク）を内包している。さらに、近年の地震により、長周期地震動、重要施設の機能停止にともなう被害の波及など、震災の巨大化を加速する新たな課題も明らかとなっている。巨大化する震災メガリスクは日本経済を破綻させるばかりでなく、世界経済にも重大な影響を与えるといわれている。これらは、世界の大都市共通の問題でもあり、グローバルレベルで、都市生活の持続可能性が脅かされており、地震に対して安心・安全な社会の実現が一層強く望まれている。

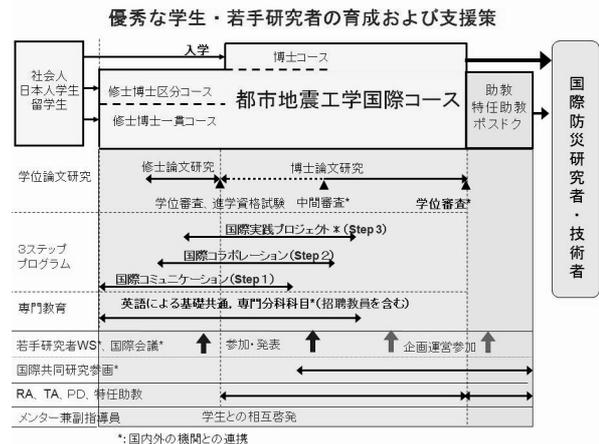
本プログラムは、より安全・安心な社会を形成するため、これらの問題の解決を目指し、都市地震工学センターのもとに、世界をリードする教育研究を推進し、わが国唯一の都市地震工学国際拠点の形成を目指すものである。そのため、21世紀COEプログラムで整備した都市地震工学に関する大学院教育プログラムをさらに充実させ、国際的な教育研究連携体制を強化した上で、震災メガリスク軽減のための人材育成と最先端研究を行う。さらに、得られた成果の情報発信と人材、知財、技術の国際展開を推進することで、地震防災の面から国際社会に貢献することを目標としている。



2. 防災専門家の育成のための大学院教育

教育面では、世界でリーダーシップをとれる防災専門家、すなわち「教育・研究の国際的リーダーシップをとれる人材」および「問題発見から解決までのプログラムを国際社会でマネジメントできる人材」の養成を目標として、国内外の優秀な学生を吸引し国際性豊かな教育を行うための都市地震工学国際コースを大学院に開設する。

本国際コースでは、本学教員や外国人招聘教授による専門科目授業の他に、国際人育成を目的として3段階の演習・実習（英語集中訓練、プロジェクト演習、海外インターンシップ）より構成された「3ステッププログラム」を開講し、幅広い人材を育成することを目指す。また、学生が経済的心配なしに自由に成長出来る環境を整備するため、RA 研究員としての採用、研究費の配分、国際会議への積極的派遣など若手育成施策も実施する。



3. 震災メガリスク軽減のための最先端研究の推進

研究面では、従来の工学地震学、耐震工学、防災計画、災害管理、災害心理学などを基礎とし、都市機能の耐震化のための創成・再生・回復技術を統合化した都市地震工学を進展させる。以下の3つの研究テーマを柱として、多角的な研究を展開し、世界の大都市が直面する震災メガリスクの巨大化を押しえ込み、震災軽減を目指す。

1) 新たに顕在化した震災の巨大化を加速させる問題にも対応できる「地震防災イノベーション技術」
例えば、統合型地震ハザード・震災シミュレータ、構造物応答低減システム、基礎・上部構造連成系の高耐震化、ライフライン防災センシング、リモートセンシング被害検出システムなど。

2) 既存大都市の多様なメガリスクの軽減に有効な「都市耐震リノベーション技術」

例えば、構造物の耐震診断・改修・修復技術、地中ライフライン構造物の耐震化、室内耐震安全化、震災時の交通フロー制御、防災ユニバーサルデザイン、帰宅困難者対策など。

3) 巨大震災から早急に都市機能を回復させる「都市災害マネジメント技術」

例えば、BCP 策定のための耐震化計画、震災後の応急居住計画、防災投資戦略、VR による防災教育システム、地域の生活慣習に根ざしたコミュニティ復興戦略、地震リスクに対応した都市耐震化戦略など。

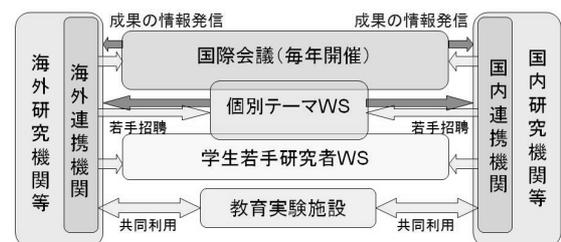
また、最先端の研究を実施できるよう、国際水準の地震工学先端大型教育研究設備等を整備し、大学院での教育に反映させ教育研究の質の向上を図るとともに、国内の若手研究者などが共同利用出来る体制を整える。



4. 国際的な連携および成果の発信

グローバル化する震災メガリスクの軽減には、人材・知財・技術を国際社会に広く展開することが必須である。そこで、カリフォルニア大学バークレイ校が主導し 9 大学が参加する米国太平洋地震工学センター (PEER) と連携協力に関する協定書を取り交わし、教育・研究の両面から連携を強化した。これを基軸として、北南米、アジア、欧州などの各機関との協力体制を強化し、a) 人材育成施策の強化、b) 共同研究の推進、c) 研究情報や人材の交流、d) 発展途上国への技術移転・国際共同調査・復興協力などを行い、教育・研究活動をより充実させ、高度化や効率化を目指す。

国際会議・若手研究者WSの開催、成果をまとめた英語教材作成などにより、成果の積極的な情報発信、技術移転を図るとともに、研究者交流・研究者ネットワーク構築を推進する。さらに、成果を技術者や一般市民に発信するため、都市地震工学データベースの構築やホームページの充実とともに、都市地震工学談話会・市民講座なども定期的開催する予定である。



5. おわりに

本プログラムでの活動を通じて、「東京工業大学・都市地震工学センター」が、国内および、北南米、アジア、欧州を繋ぐ地震工学教育研究のハブとして、教育・研究のみならず、国際貢献でも重要な役割を担えるよう、関連教員一同努力していきたい。なお、本プログラムの詳細については本プログラムのホームページを参照されたい。 <http://www.cuee.titech.ac.jp/>

地震防災イノベーション技術

Innovation Technology for Earthquake Disaster Mitigation

東京工業大学 土木工学専攻 市村 強

Tsuyoshi Ichimura, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

我が国では、人口・産業・情報の集中や都市機能の複雑化・脆弱化など国土構造・社会構造の脆弱性が増加しており、巨大地震や直下地震などによる大きな震災リスク（震災メガリスク）を内包している。また、近年の地震により、長周期地震動、震源直上の地震動と被害、原子力発電所をはじめとする重要施設の機能停止にともなう被害の波及など、以前には十分に想定できていなかった都市地震防災上の多くの問題が顕在化してきた。世界的にも、2025年には人口1000万人を超える巨大都市は現在の17から26へ、人口100万人以上の大都市は300以上も出現すると予測されている。これらがあいまって、都市の震災メガリスクはグローバルレベルで巨大化しつつあり、地震に対して安全・安心な社会の実現が一層強く望まれている¹⁾。

2. 震災メガリスク軽減のための地震防災イノベーション技術

近年の地震により多くの問題が新たに顕在化する一方で、Eディフェンスに代表される実験技術の向上、センサーなどの観測技術の向上、GIS/CADデータの整備や情報工学の向上、計算機性能・計算技術の向上など周辺技術も長足の進歩を遂げつつある。本グローバルCOEでは、「東工大都市地震工学センター」の下、これらの周辺技術の進歩を踏まえ、21世紀COE「都市地震工学の展開と体系化」の研究成果を発展させ、また、新たに顕在化した課題には新規研究課題を設定し、研究開発を行う予定である：「震災メガリスク軽減のための地震防災イノベーション技術」に関連するものとして、例えば、基礎・上部構造連成系の挙動解明及び構造物応答低減システム、統合型震災シミュレータ、最先端技術としての高精度地震・津波ハザードシミュレーション、ライフライン防災センシング技術、リアルタイム避難誘導システム、リモートセンシング地震被害早期検出システム等の開発および実用化など。本稿では、上記の研究予定課題のうちいくつかについて概要を紹介する。

1) 超高層免震構造物の地震時挙動観測

1940年に米国カリフォルニア州の発電所で記録されたEl Centro 1940の地震動記録がその後の耐震工学の発展に大きく寄与したように、土木・建築構造の耐震設計上、地震動の性質を明らかにすることが重要なことはいうまでもない。また、我々が必要としているのは安全な構造物の構築にあり、地震時の構造物そのものの動的挙動を知ることさらに重要である。21世紀COE「都市地震工学の展開と体系化」の重点研究の一つとして、東工大すずかけ台キャンパスに20階建て超高層免震構造物を中心に、構造物および周辺地盤の地震時

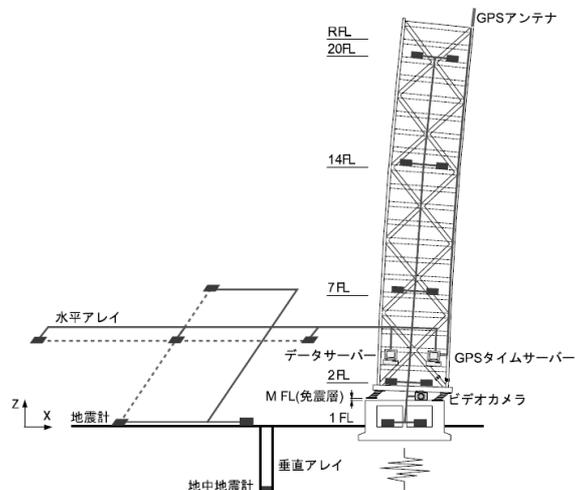


図1：超高層免震構造物の地震時挙動観測システム

挙動の観測網を構築した。収集されたデータを用いて、最新免震技術を駆使して建設された建造物の挙動を周辺地盤の動きとともに明らかにし、新しい耐震技術の検証、発展のための研究が引き続き行われる予定である。

2) 統合型震災シミュレータ

震災情報を高度化し、理解しやすい形で社会に伝え、様々な主体による評価を可能とするフレームワークは震災軽減を図る上で重要な役割を担うと考えられる。このようなフレームワークのひとつとして、地震工学の知見と計算・情報科学などの知見を用いて、都市GIS/CADデータなどのデジタルデータと地震シミュレーションを融合し、震災前、震災直後、復旧・復興を統合的にシミュレーションする統合型震災シミュレータの開発を進める予定である(図2)。社会の合意の下、適切な防災対策をすすめるためのプラットフォームが開発されると期待される。

3) 最先端ハザードシミュレーション

地球シミュレータやTSUBAME(東工大スーパーコンピュータ)に代表されるように、昨今の計算機環境の進歩には目を見張るものがある。従来では取り扱うことが難しかった膨大な計算量を必要とするシミュレーションも徐々に可能となりつつある。計算機の進歩と地震工学の進歩を融合することにより、さまざまな最先端ハザードシミュレーションの開発がすすめられる予定である:例えば、高精度高分解能地震波動場計算手法、超大規模数値解析モデル生成手法、高分解能三次元インバージョン手法、長周期地震動シミュレーション、原子力発電所などの超重要建造物の地震時挙動シミュレーション手法などが挙げられる。

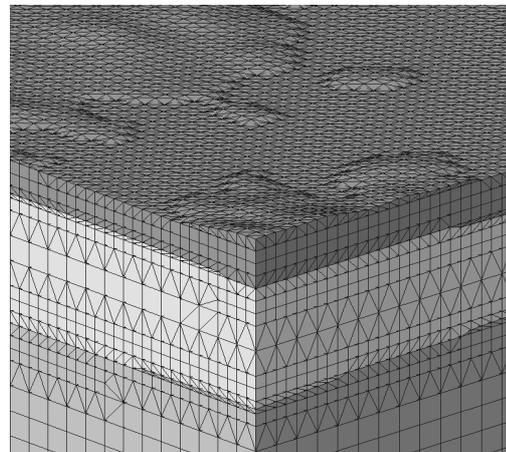
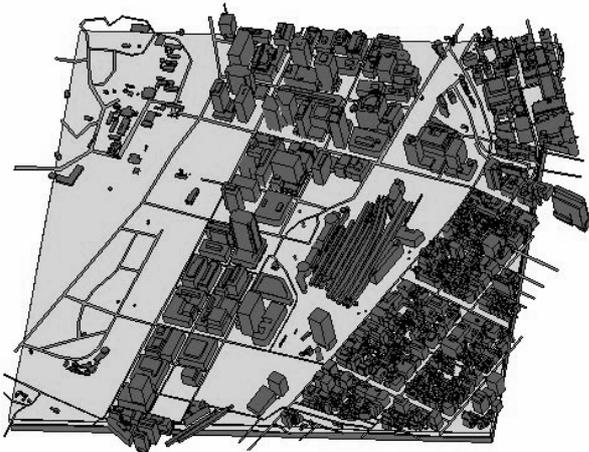


図2: 統合型震災シミュレーションのための都市モデル 図3: 自動生成された地殻の超大規模有限要素メッシュ

まとめ

「東工大都市地震工学センター」の下、周辺技術の進歩を踏まえ、21世紀COE「都市地震工学の展開と体系化」の成果を継続・発展させ、また、新たに顕在化した課題には新規研究課題を設定し、国際的水準の地震防災イノベーション技術の研究開発がすすめられ、その成果は震災メガリスク軽減に大きく寄与することが期待される。これらの研究開発過程での教育及びこれらの成果を反映させた大学院の教育は、国際社会においてリーダーシップをとれる地震防災分野の先導的研究者・高度専門技術者の育成につながると期待される。

参考文献

- 1) 例えば、日本学術会議地球規模の自然災害に対して安全・安心な社会基盤の構築委員会、対外報告「地球規模の自然災害の増大に対する安全・安心社会の構築」、2007.

都市耐震リノベーション技術

Renovation Technology for Urban Earthquake Resilience

東京工業大学 建築学専攻 竹内 徹

Toru Takeuchi, Department of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

2005年度の中央防災会議首都直下地震対策専門調査会報告¹⁾によると、今後30年以内に首都圏で発生するマグニチュード7程度以上の地震の発生確率は70%以上であり、都内のかなりの範囲で震度6強以上の揺れが発生する危険性があるとされている。揺れによる全壊建物の予想値は約20万棟、死傷者も最大20万人程度となる。帰宅困難者も大量に発生することが予想され、地震発生1ヵ月後の避難所生活者は270万人、必要とされる仮設住宅数は約65万棟と阪神・淡路大震災の10倍以上、これを建設するのに要する期間は最悪の場合2年以上とされており、多くの避難生活者が困難な状況に陥ることは想像に難くない。損壊構造物により発生する瓦礫量は約9000万t(9000万m³)と平成10年度の東京都の年間瓦礫発生量の20年分に達し、これらを都内で処理することは困難である。このように大都市における地震被害は、被災地外においても中長期的な環境破壊につながる要素を多く含んでいる。

これを防止するためには大都市部の既存建物の耐震化・無損傷化はまさに急務である。しかし全ての既存不適格建物を新しく建替えることは上記の瓦礫を人為的に発生させることに他ならず、経済的な困難のみならず環境的に退行する行為となる。従って、大都市における建築ストックを新陳代謝していく際には、従来のスクラップ・アンド・ビルトー辺倒ではなく、建物を改修しながらその性能を向上させる方法が環境負荷面や建物の継続使用面から今後ますます重要となるものと考えられる。

本稿では、地震防災イノベーション技術に引き続き、東工大都市地震工学センターの下で研究が予定されている震災メカリスク軽減のための「都市耐震リノベーション技術」の概要について述べる。同センターおよび推進研究者はこれらのテーマに既に長く取り組み、国内外より評価される実績をあげてきている。今後、研究開発の更なる推進、およびその過程における地震防災分野の先導的研究者・高度専門技術者の育成が期待される。

2. 震災メカリスク軽減のための地震防災イノベーション技術

1) 21世紀COEプログラムにおける成果

先述した必要性にも関わらず、大都市部の耐震リノベーションは予定通り進んでいないのが現状である。理由として以下のような要因が指摘されている。

- a) 予算不足：学校施設等、震災時の避難施設となる建物では公共投資予算の削減により耐震改修に十分な予算が与えられているとは言い難い。改修仕様も従来の建物並で、大地震時の避難所としての継続使用を保証するレベルに達していない場合が多いのが現状である。また、高速道路、水道・ガス管等の都市インフラでは老朽化が進み、設計時規準レベルの耐震性能の維持も懸念される。
- b) 継続使用要求：これらの施設は現在も機能している現役施設であり、改修に当たっては居住者および使用者が利用できる代替施設が必要となる。しかしこれらの移動費用および移動先を確保することが困難となる場合が多い。

このような課題に対し、当センターの研究者たちは既存建物の外壁面や基礎部に地震エネルギー吸収部材を付加することにより、既存不適格建物の耐震性能を向上させる構法開発を国内外で積極的に展開してきた。また、2005年には耐震性能上の危険性が判明していた本学の土木建築研究棟(緑ヶ丘1

号館他)を同様のコンセプトにより研究室居付きのまま改修する構法開発・設計・工事を実施した。同改修構法は低降伏点鋼によるエネルギー吸収ブレースにより、レベル2地震動に対し主架構を弾性範囲内に留め、従来の耐震改修性能を大きく上回る耐震性能を達成するとともに、ルーバーとガラスよりなるハーフダブルスキンファサードにより、年間を通じて建物の環境負荷を低減しうる改修構法となっている²⁾。本改修工事は文科省の改修規定予算内で実施され、日本構造デザイン賞、グッドデザイン賞経済産業大臣賞等の高い評価を受けた(図1)。一方、未だ首都圏の建物の大部分を占める木質住宅の制振改修構法(図2)³⁾や老朽化が進む鋼橋等の都市インフラの診断・改修構法の研究開発に関しても強力なリーダーシップを伴って積極的に推進している。

2) GCOEプログラムでの研究開発

GCOEプログラムでは上記の成果をより一般化し、広く首都圏の建築物ならびにインフラストラクチャーの耐震化に結びつけるため「都市耐震リノベーション技術」の開発を展開する。

- i) 具体的には、構造物の耐震診断・改修・修復技術、地中ライフライン構造物の耐震化、非構造材の高耐震化、室内耐震安全化、震災時の交通フロー制御、帰宅困難者考慮した広域避難計画、災害弱者に配慮したユニバーサルデザインに関する開発および実用化を推進し、国内外に展開できる形に実質化する。
- ii) 21世紀COEプログラムで導入した制振エネルギー吸収部材研究開発に適した構造物動的破壊実験システムに引き続き、免震エネルギー吸収部材研究開発に威力を発揮する多自由度大变位実験システム装置を導入するとともに、これらの装置を用いた国際共同研究ワークショップなどを通じて教育と連動した国際・産学共同実験研究を円滑に行うための運営体制を整える。
- iii) 具体的な部材開発・改良と合わせて、現実的・経済的でより汎用性のある既存建物・構造物の改修構法の開発・実用化を推進するとともに、改修による経済損失リスクの軽減効果の評価を行う。避難施設としての利用が期待される学校体育館等では、構造物のみならず避難施設としての利用を阻害する天井・照明等の非構造材の性能評価を行う。また、高架道路・橋梁等の都市インフラの耐震改修構法開発から避難施設周辺の広域避難計画に至るまで異なるレンジでの研究を同時並行的に実施し、それらの統合化を試みるとともに、より政策的な観点での提言に結びつけることを目標とする。

参考文献

- 1) 内閣府:中央防災会議首都直下地震対策専門調査会報告、2005.7
- 2) 竹内 徹、小谷野一尚、安田幸一、湯浅和博、岩田 衛:ファサードエンジニアリングの統合に関する研究-統合ファサードの提案および性能評価-、日本建築学会環境系論文集、No.601, pp.81, 2006.3
- 3) 坂田弘安、笠井和彦、大木洋司、松田和浩:在来軸組戸建木造住宅を対象とした2層木質制振架構の振動台実験、日本建築学会構造系論文集、NO.631 P.1607、2008.9

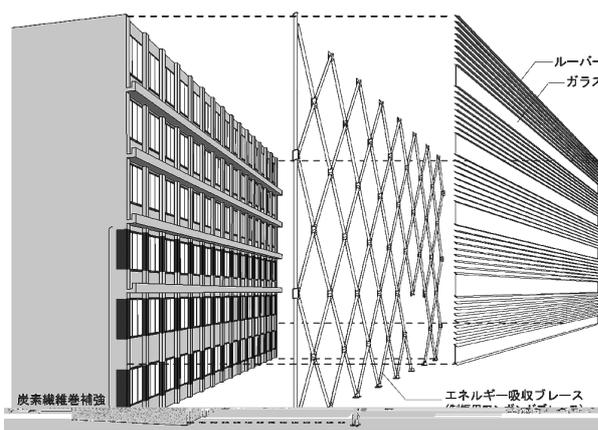


図1 制振部材と環境ファサードによる建物改修例²⁾



図2 木質住宅の制振改修実験³⁾

都市災害マネジメント技術

On urban-seismic-disaster management

東京工業大学 土木工学専攻 藤井聡

Satoshi Fujii, Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. 都市地震における都市災害マネジメントとしての「都市震災マネジメント」

都市地震における都市災害マネジメントを略して言うなら「都市震災マネジメント」であるが（以下、この用語を用いる）、ここに都市災害とは都市地震によって引き起こされる災害を言うものである。

さて、その「マネジメント」という言葉であるが、これはmanageという動詞の名詞形である。ここに、この動詞の原義は、容易には達せられざる**目標**を、あれこれと試行錯誤を凝らしながらやり遂げるという意味を持つ。したがって、その名詞形であるマネジメントとは、あれこれと試行錯誤を繰り返しながら、容易に達せられざる目標に近づいていこうとする一連の取り組みという意味を持つ。

一方、manageが動詞である以上、それはある**主体の行為**を意味している。それ故、マネジメントのあり方を考える上では、当然ながらその「主体」を想定することが不可欠である。いわゆる都市地震工学においては、地震に強い構造物についての技術をはじめとする、「モノ」についての技術が不可欠であることは論を俟たないが、その技術においては、必ずしもその技術を活用する主体は必ずしも想定されるものではない。しかし、都市震災の「マネジメント」についての技術においては、それがmanageという「行為」を意味するものである以上は、必ず、そのマネジメントの「主体」であるところの**ヒトや組織や社会が明示的に想定**されなければならない。この点が、モノについての技術であるハード的技術と、マネジメント、という人間や社会に関わるソフト的な施策との本質的な相違なのである。

2. 都市震災マネジメントの内容

さて、都市震災のマネジメントにおける「目標」は、言うまでもなく、「都市震災に伴う社会的被害を最小化すること」である。ただし、その大目標を達成するためのマネジメントのサブ目標には、少なくとも次の3つのサブ目標が考えられる。そして、それぞれに応じたマネジメントが存在している。

①都市地震が生じた時点における**地震被害の最小化**。

②都市地震によって生じた被害に対する、応急的な社会的対処である**復旧**の適切化。

③都市地震によって生じた被害に対する、長期的な社会的対処である**復興**の適切化。

1) 「地震被害の最小化」のための都市震災マネジメント（被害最小化マネジメント）

地震被害の最小化のための都市震災マネジメントとは、

「様々な主体が、地震被害を最小化するための、取り組みを**推進**すること、ならびに、他主体に対してそれらを**促進**していくこと」

を意味する。ここに、**推進**とは、当該主体が自ら各種対策を進めることを意味し、**促進**とは、当該主体が、それ以外の主体に、各種対策の推進を促すことを意味する。

個々の世帯や各種の法人・組織等においては、家屋・建築物の耐震性の向上についてのハード的対策や家具転倒防止等のソフト的対策が考えられるが、これらの取り組みを、逐次的に推進していくことが、世帯・法人等の都市震災マネジメントである。あるいは、地震に伴う津波や土砂災害が危惧される地域においては、適切な避難行動を行う生活習慣・防災文化を形成しておくことが考えられる。

さらに、それらの各主体が、他主体に対して、種々のコミュニケーション（一般に、**リスク・コミュニケーション**と呼ばれる）を通じて、そうした推進を促進していく。

一方、地域社会や各種の自治体においては、管轄する公共構造物の耐震性の向上を図る他、所属す

る諸世帯や法人等が、上記のような地震被害の最小化に向けた種々の取り組みを促進するための制度の構築やコミュニケーション施策の展開が考えられる。

2) 「復旧」ならびに「復興」のための都市震災マネジメント（復旧マネジメント、復興マネジメント）

震災に対する応急的な社会的対処である「復旧」「復興」のための都市震災マネジメントとは、

「様々な主体が、震災に対する応急的な社会的対処である「復旧」ならびに長期的な社会的対処である「復興」を円滑に進める準備を事前に推進し、かつ、震災発生時において円滑に復旧・復興を推進すること、ならびに、それらを他主体に対して促進していくこと」

を意味する。

個人・世帯・法人の事前のマネジメントについては、地震発生時にどの様に対応するかを十分に想定し、そのための準備を「推進」することが考えられる。例えば、「復旧」に関しては、最も短期的には、避難のための食料やラジオなどの準備や、避難場所や避難経路の想定等が含まれる。中長期的には、復興のための財源確保を意図した地震保険への加入等が考えられる。そして、事後においてはそれらの準備に基づいた、適切な復旧・復興のための各種行動を実際に推進するというものが考えられる。そして、促進については、他主体に対して、上記の各種の行為を促していくというものがある。

一方、地域社会・コミュニティ、ならびに自治体・政府については、各種の制度構築とインフラ整備、リスク・コミュニケーションを通じた、内部の各主体に対する上述のような復興・復旧の事前・事後対策の推進を促進することが第一のマネジメント内容として挙げられる。なお、地域社会・コミュニティにおいては、濃密なリスク・コミュニケーションの実施可能性が相対的に高い一方、自治体・政府においては、復旧・復興に資する制度設計とインフラ整備の推進の実施可能性が相対的に高い。

		マネジメントの3つの目標		
		地震被害の最小化	復旧	復興
マネジメント主体	個人・世帯・法人	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物耐震性向上等のハード対策や、家具転倒防止、適切な回避行動の準備等のソフト対策の自発的推進 ・これらの推進策を、コミュニケーションを通じて家族・親戚・知人等に促進。 	(事前) 避難・復旧に関する各種準備の推進、ならびに、他主体に対する避難準備の <u>促進</u> 。 (事後) 避難・復旧準備を踏まえた実際の避難・復旧の <u>推進</u> 、および他主体に対するその <u>促進</u> 。	(事前) 復興に関する地震保険加入等の各種準備の推進、ならびに、他主体に対するその <u>促進</u> 。 (事後) 復興準備を踏まえた実際の復興作業の <u>推進</u> 、ならびに他主体に対するその <u>促進</u> 。
	地域社会・コミュニティ・自治体・政府	<ul style="list-style-type: none"> ・直轄している構造物等の耐震性向上策の推進。 ・内部の個人・世帯・法人、あるいは地域社会・コミュニティに対して、各種の「地震被害最小化」の対策を推進していくことを、各種の制度構築とリスク・コミュニケーション施策を通じて<u>促進</u>。 	(事前) 直接実施できる各種の避難・復旧準備の <u>推進</u> 、ならびに、制度構築とリスクコミュニケーションを通じた内部の各主体に対する避難・復旧準備の <u>促進</u> 。 (事前) 事前準備を踏まえた、各種の避難・復旧の <u>推進</u> と <u>促進</u> 。	(事前) 直接実施できる各種の復興準備の <u>推進</u> 、ならびに、制度構築とリスクコミュニケーションを通じた内部の各主体に対する復興準備の <u>促進</u> 。 (事前) 事前準備を踏まえた、各種の復興の取り組みの <u>推進</u> と <u>促進</u> 。

表1 マネジメント主体別・目標別の都市震災マネジメントの内容

3. 課題

言うまでもなく、如何なる都市地震に関する技術であっても、それを活用していくという「行為」なくしてそれが社会に益することなどあり得ない。都市震災マネジメントとはまさに、様々な都市地震に関する技術を活用していくという「行為」そのものを言うものである。それ故、如何なる技術が開発されようとも都市震災マネジメントなくして、都市震災の被害を軽減することはあり得ないのである。もしも、これまでにそうした認識が十分ではなく、かつ、その研究が立ち後れているとするなら、都市震災マネジメント研究とは「**人間・組織・社会の行為そのものに関する研究**なのだ」という認識の下、それに課せられた重大な責務を十二分に認識しつつ、例えば表1の各セルの具体的な中身（すなわち、マネジメントの中身）を精緻化していく多面的な研究を推進していくことが課題なのである。

「都市地震工学国際コース」教育プログラムの概要

Outlines of Education Program for Urban Earthquake Engineering International Course

東京工業大学大学院 土木工学専攻 二羽 淳一郎

Junichiro Niwa, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology

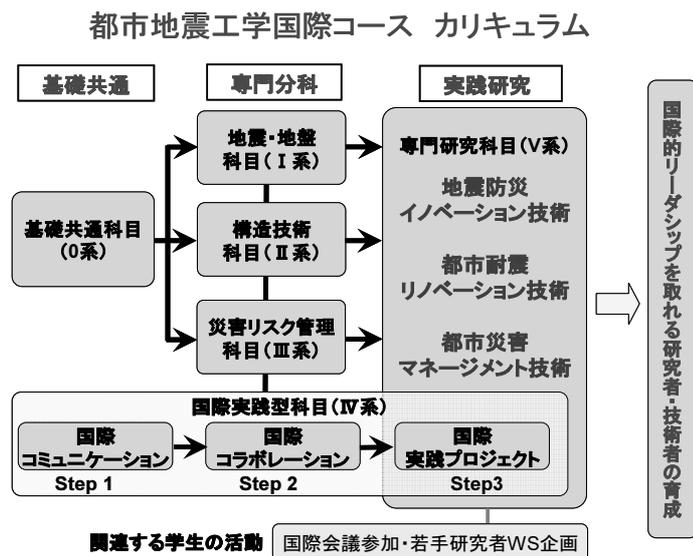
1. はじめに

東京工業大学では、1923年の関東地震を契機に地震工学の研究が積極的に行われるようになり、現在では約50名の教員が都市地震工学の教育・研究に携わっている。2003年には都市地震工学センター(CUEE)が設置され、21世紀COEプロジェクト等を通じて、国際研究交流、社会貢献、施設の整備などを積極的に推進してきた。

2008年度からスタートしたGCOEプログラムでは、国内外で巨大化する都市震災を軽減するために活躍できる研究者や高度技術者の育成を目指している。この目的に沿うべく、大学院に「都市地震工学国際コース」を開設した。本コースではそれぞれの専門分野の科目に加えて、英語コミュニケーション能力を養う「国際コミュニケーション科目」、日本人学生と留学生との協働作業により都市防災技術戦略を考える「国際コラボレーション科目」、海外連携機関などでの共同プロジェクトへの参加による「国際実践プロジェクト科目」が準備されている。これらは、3ステッププログラムあるいは国際実践型科目と総称される。なお、海外連携機関への派遣や国際会議参加の際の費用は、審査の上で本プログラムが負担する。また、博士課程学生がより良い環境で研究に集中できるよう、多くの経済的支援と若手研究者育成のための施策が用意されている。

2. コースカリキュラム

教育プログラムは、GCOEが目標とする人材育成を目指して、講義体系を0系(基礎共通科目)、I系(地震・地盤科目)、II系(構造技術科目)、III系(災害リスク管理科目)、IV系(国際実践型科目)、V系(専門研究科目)に分類している。講義科目は50を超え、そのほとんどが英語によって開講されている。また留学生も多く在籍している。これら十分な数の講義により、学生は主たる専門分野、ならびにその基礎分野、さらには関連専門分野を体系的に修得していくことができる。これを通して、実践的な研究の遂行が可能となり、さらに国際実践型科目(3ステッププログラム)との組合せにより、博士コース修了者はリーダーシップをとって国際プロジェクトをマネジメントできる素養を身につけることが可能となる。



3. 様々な博士コース

「都市地震工学国際コース」に所属する学生は、原則として博士取得が目標となる。このため本教育プログラムでは、以下の3つのコースを用意している。

1) 博士コース

修士号取得者、あるいはそれと同等な能力を有する者が対象であり、博士後期課程から入学するコース。

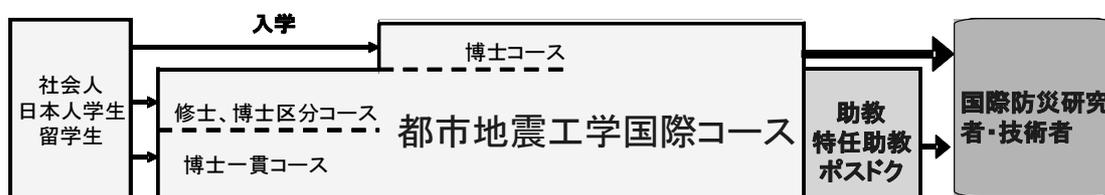
2) 修士、博士区分コース

学士取得者が、修士課程(博士前期課程)をまず修了し、その後、博士後期課程に進学するコース。

3) 博士一貫コース

修士課程在学中に、博士号取得を目指す学生が審査を受けて所属するコース。

様々な博士コース



4. 経済的支援と若手研究者育成のための諸施策

大学院生ならびに若手研究者の育成と経済支援を図るため、以下に示す諸施策を実施する。

(1) 教育力を育むため博士課程学生の半期の TA を必修とする。日本学術振興会特別研究員と同様の研究計画書の書類審査、面接、ならびに研究実績等により RA として雇用し、毎年成果報告書を提出させ、優秀者には重点的な経済支援(年間 100 万円程度から最大 240 万円程度)を行う。

(2) 独創的・萌芽的発想力、研究力等の育成と早期自立を目的として、研究経費を博士課程学生、若手研究者に配分する(研究計画書の書類審査、面接、ならびに研究実績等により、年間最大 150 万円程度)。

(3) 連携機関との共同研究などに関連した博士課程学生・若手研究者の国際交流、博士課程学生・若手研究者の主体的な企画運営による若手研究者国際ワークショップなどを継続的に実施し、これに参加する優秀な学生を支援するとともに、若手研究者の国際ネットワーク形成を促進する。

(4) 優秀な博士課程修了者や若手研究者が、本拠点の研究環境の中で、自立して研究を遂行する能力を育めるように、PD、特任助教などとして採用し、経済的に支援する(研究計画書の書類審査、面接、ならびに研究実績等により、年間 480 万円程度から 720 万円程度)。また国際公募により、海外の優秀な若手研究者も募集する。

5. 参加専攻、教員

都市地震工学国際コースの教育、研究指導等は、都市地震工学センター(CUEE)に参加する 5 つの専攻(建築学、土木工学、人間環境システム、環境理工学創造、情報環境学)に所属する教員が担当する。

6. 問合せ先

都市地震工学国際コース関係： 都市地震工学センター e-mail: Gprogram@cuee.titech.ac.jp、

WEB: <http://www.cuee.titech.ac.jp/>

入試関係： 東京工業大学学務部入試課大学院入試係 <http://www.gakumu.titech.ac.jp/nyusi/>

都市地震工学センターの国際連携

CUEE' s International Collaborations with Overseas Institutions

東京工業大学 建築物理研究センター 笠井 和彦

Kazuhiko Kasai, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

本 GCOE プログラムでは、21 世紀 COE プログラムで育ててきた教育・研究体制を拡充強化し、「東工大都市地震工学センター」の下に、震災メガリスク軽減のための最先端の研究を進展させ、国際会議、学生・若手研究者国際ワークショップ、研究者交流などにより、成果の情報発信と人材・知財・技術の国際展開を推進することで、世界をリードする、わが国唯一の都市地震工学の国際教育研究拠点を形成する。そのため、以下の視点から活動を行う。

2. 国際的な教育研究連携の強化

グローバル化する震災メガリスクの軽減には、人材・知財・技術を国際社会に広く展開することが必須である。米国の太平洋地震工学センター(Pacific Earthquake Engineering Research Center, 略称 PEER)は米国3地震工学センターの代表格で、教育研究の実績は卓抜し、「東工大都市地震工学センター」とは良きライバル・良きパートナーとして、近年、個別研究者レベルでの連携協力関係を強め、研究・教育面で大きな成果を挙げつつある。PEERには、カリフォルニア大学バークレイ校を含め9大学が参加しており、地震先進国の日米両機関が組織連携することで、より高度な教育・研究の推進が可能になり、また、国内外の教育研究機関や学生・若手研究者に対する求心力も増すと考えている。

PEER と取り交わした協定書に記した連携協力は、(1)日本および世界各国の震災メガリスク軽減に貢献する人材育成施策の強化、(2)震災メガリスク軽減に向けた学生・若手研究者の参画を含む共同研究の推進、(3)国際会議・若手研究者 WS の共同開催による情報発信と人材交流、そして(4)発展途上国の震災メガリスク軽減のための技術移転、被災地の国際共同調査・復興協力である。

また、この連携を基軸として、北南米、アジア、欧州などの各機関との協力体制を強化し、国際会議・若手研究者WSの開催、成果をまとめた英語教材作成などにより、成果の積極的な情報発信、技術移転を図るとともに、研究者交流・研究者ネットワーク構築を推進する。

3. 国際連携推進体制

国際連携を積極的に推進するために国際連携部会を設置し、教育運営部会や研究戦略部会と連絡しながら、海外連携機関との国際的な教育研究交流を施策・調整する。同様の取組を、アジア、欧米の他の先端教育機関とも推進することで、優秀な留学生の獲得、若手研究者の人材交流に結び付ける。

なお、PEER から事業推進者として参加する Jack P. Moehle は、カリフォルニア大学バークレイ校教授 (PEER 所長) で、米国耐震工学のリーダーの一人であり、また、Ross Boulanger は、同大学デービス校教授で、米国地盤地震工学の若手リーダーである。両者ともに、東工大教員との共同研究や研究者交流などの実績を有している。同様な繋がりを持つ研究者は他の PEER 参加校にも所属している。参加校は、上記カリフォルニア大学バークレイ校、デービス校のほか、アーバイン校、ロサンゼルス校、サンディエゴ校、そして私立のカリフォルニア工科大学、スタンフォード大学、南カリフォルニア大学、また、ワシントン州立ワシントン大学である。さらに、これまでと同様に共同研究などが継続する海外機関は、例えば PEER と並んで米国3地震工学センターであるイリノイ大学の MAE と、ニュ

ーヨーク州立大学の MCEER、また、タイのチュラルコーン大学、台湾国立中央大学がある。

4. 進行中の国際連携活動

日米共同研究として、世界最大の防災科研震動台 E-Defense を用いた大型実験研究が行われており、東工大の川島一彦が橋梁プロジェクト、笠井和彦が鉄骨建物プロジェクトを統括し、他大学と共同で東工大研究者らが活動している。このため、東工大と米国 PEER や MAE との連携が盛んになり、大学院生や研究者の派遣、インターネット会合、共著論文発表など、研究・教育面で大きな成果を挙げつつある。図 1、図 2 は、それぞれ E-Defense での大型実験前に PEER の研究者と行った橋梁柱の実験、PEER、MAE の研究者と行った新形式の鉄骨建物構造の実験である(日本 WG 主査：竹内徹)。



図 1 米国での橋梁実験風景 (TITech - UCB 共同研究)

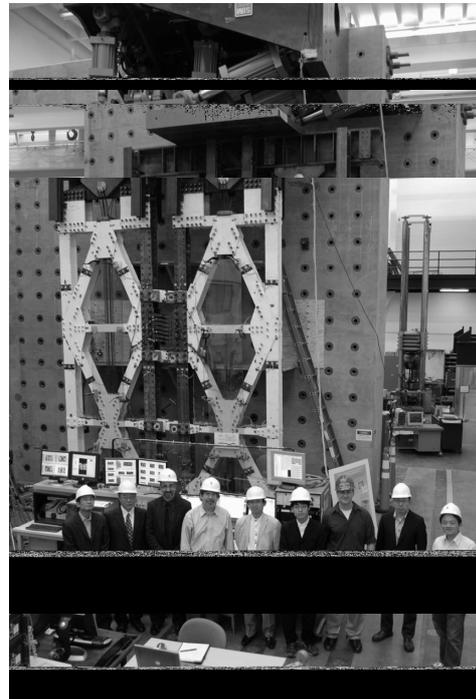


図 2 米国での新形式鉄骨建物構造実験 (MAE 訪問)

上記のほかにも、研究のコラボレーションが、欧米・アジアの大学と行われている。また、これら研究成果に加え、2004 年から、毎年都市地震工学国際会議(第 1~5 回)を開催し、各回平均約 250 名の参加のもと、有益な国際交流を推進してきた。これを含めて、国際 WS・シンポジウム、国内シンポジウム、都市地震工学談話会、市民講座などを開催し、5 年間で延べ 5,500 人の参加者を集めた。ちなみに、第 6 回国際会議は 2009 年 3 月 3~4 日に開催予定である。また、第 7 回国際会議は、環太平洋における他の 11 の機関 (PEER, MAE, MCEER も含む) からなる Asian-Pacific Network of Centers for Earthquake Engineering (ANCER) が予定する 5th International Conference on Earthquake Engineering と共同で行う予定であり、約 20 カ国からの参加が予想される。

このように、国際シンポジウムの開催、博士課程学生・若手研究者を含めた国際交流等、研究機関としての成果が期待通り着実にあがってきている。本プログラムにより、この「都市地震工学センター」を教育機関としても充実させることで、教育、研究、国際貢献を推進させ、グローバル化する震災メカニズムの軽減に貢献していきたい。

5. まとめ

「東工大都市地震工学センター」では、欧米先進国の先端研究機関との国際共同研究の実施、日米、日欧間の国際シンポジウム等を企画・開催し、若手研究者や大学院生を含めた国際交流を積極的に行う。また、アジア圏に存在する巨大都市、開発途上国の人口過密都市における地震防災技術の向上のため、地震工学セミナーなどを実施し、国際的に貢献する。また、国内外の行政機関や研究機関との一層の協調を図り、都市地震防災対策の実践展開を推進する。

グローバルCOE「震災メガリスク軽減の都市地震工学国際拠点」 に期待すること

早稲田大学 創造理工学部 濱田 政則

Masanori Hamada, Department of Civil and Environment Engineering, Waseda University

はじめに

本年に入って、中国四川省での地震やわが国の岩手・宮城内陸地震などによる災害が相次いで発生している。地震災害ばかりでなく、昨年のバングラデシュ、本年のミャンマーなど風水害も頻発している。過去約 20 年間の統計によれば、地震災害や風水害など自然災害による犠牲者の数は世界で約 100 万人に達し、その約 9 割がアジア地域となっている。アジア地域での自然災害を軽減することが、「21 世紀の持続可能な世界」を構築するための重要要件であることを近年の自然災害が示していると言えよう。

中央防災会議の予測によれば、東海地震・南海地震など駿河トラフ沿いの巨大地震の今後 30 年間の発生確率はいずれも 70%を超えている。また、東京湾北部を震源とする地震の発生確率も高く、この地震による死者は 1 万 1 千人、倒壊家屋は 86 万棟に達すると予測している。東京など大都市圏には、耐震性の低い社会基盤施設および家屋や建物が依然として数多く存在し、かつ都心部の過密化や住民の危機意識の低さなどが未曾有の災害発生の要因となることが危惧されている。

わが国および世界の大都市圏においては、将来の地震災害軽減のために我々が取り組まなければならない課題が山積しており、21 世紀 COE「都市地震工学の展開と体系化」をさらに発展・展開させるためにスタートしたグローバル COE「震災メガリスク軽減の都市地震工学国際拠点」に期待する所は大きい。

グローバル COE に期待すること

(1) 地震災害軽減のための政策・施策の提言

本拠点には、地震工学に関わる土木・建築、人間環境、情報等理工学分野の多方面の研究者が参画する。理工学分野から都市の地震災害軽減に資する多くの技術が開発され知見が累積されるものと考えられる。これらの調査研究成果が国の防災政策や自治体による施策に十分反映されるよう「政策提言」等による発信を期待したい。

わが国において自然災害軽減のための第一義的な責任を担うのは国であり自治体である。調査研究分野からの発信の不足、縦割行政による弊害、自治体の財政難、時には首長の無理解等も原因となって、地震工学分野の調査研究成果が十分に具体的な対策に活用されていない面も見られる。本拠点からの積極的な社会への発信、特に防災行政担当機関への発信と働きかけを期待する。

(2) アジアの地震災害軽減への貢献

冒頭に記したように、自然災害はアジアに集中している。特に近年の地震災害の多くはアジアを中心とした開発途上国で発生している。これらの地域における災害軽減への貢献はわが国の ODA において主要な位置を占めるべきものであり、そのための防災技術の開発と普及はわが国の技術者・研究者に課せられた役割である。21 世紀 COE で実施したアジアを対象とした防災に関する講義の配信は評価されるもので、グローバル COE においてもこれらの活動がさらに発展することを期待する。

アジア地域における地震による人命の損失の最大の原因は耐震性がほとんどない（いわゆる Non-Engineering）家屋、建物の崩壊である。開発途上国で地震が発生する度に家屋、建物の崩壊によ

る多数の人命が失われている。21世紀に入っても依然としてこの状況は続いている。構造物の耐震性や都市圏の防災性向上のための先端的な技術の開発も勿論重要課題であるが、開発途上国に無数にある低耐震家屋・建物の補強等についての調査・研究も期待したい。それが真に世界に貢献する「グローバル」な拠点に必要とされる課題と考える。

(3) 社会への直接的貢献

21世紀 COE においても、自治体職員や一般住民を対象としたセミナー等を開催していたと報告されている。地域住民の防災意識の向上を図ることは災害に強いコミュニティの形成に最も重要な課題である。調査研究成果を分かりやすく一般住民に伝達し、地域の防災性向上に役立てるとともに防災教育へ反映することを期待したい。さらに、このような活動を国外においても積極的に展開することが必要である。

(4) 都市圏の機能の早期復旧に関する研究

東京湾北部の地震による経済被害額は直接被害および間接被害を含めて 110 兆円にのぼるとされている。東京など大都市圏の地震災害はわが国のみならず世界の経済に深刻な影響を与えるばかりでなく、わが国の国際競争力の低下を招き、長期的な国力の低落にもつながる。被災した大都市圏の機能の早期復旧は極めて重要な課題であり、そのためには復旧物資・人員の輸送のための陸上および海上輸送網の確保が不可欠である。大都市圏内の地震防災性向上に関する研究にとどまらず、大都市圏につながる道路、鉄道、海運等の機能維持も視野に入れた調査・研究を望みたい。具体的には、東京湾に建設中の基幹的防災拠点への海上輸送能力の確保や、最近の地震で顕著になった中山間地の道路構造物の耐震性の問題に取り組む必要がある。

おわりに

地震災害軽減のための調査・研究に同じく携わる者として、本拠点の設立は誠に喜ばしく、その活動によってわが国のみならず世界の地震災害が軽減されることを祈念している。拠点リーダー時松教授をはじめとする事業担当者および関係者に敬意を表するとともに奮闘を期待したい。

巨大震災の被害軽減のための社会技術開発

Development of Engineering for Reduction of Risk and Damage from Catastrophic Earthquake Disaster as a Social Technology

中林一樹（首都大学東京 都市環境科学研究科）

Itsuki NAKABAYASHI,

Graduate School of Urban Environmental sciences, Tokyo Metropolitan University

1. 巨大地震災害と複合化する災害

世界的にも地震活動が活発化してきているように感じる 21 世紀は、地球温暖化や都市地域のヒートアイランド現象の激化など、気象環境の変化にともなう気象災害が多発化・激化も危惧される。文部科学省に設置された地震調査委員会によると、宮城県沖地震(30年確率99%)、東海地震(同87%(参考値))、首都直下地震(同70%)、東南海・南海地震(同60~70%)を始め既往の海溝地震及び、内陸110の活断層地震の長期評価を公表している。

それらを基に「今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率」(確率論的地震動予測図)が公表されている。全国で最も確率の高い地域は東海、東南海・南海、首都直下地震の複合的影響によって、首都圏から大阪にかけての東海道地域及び四国南部地域である。そして、この地域に東京、大阪、名古屋の3大都市圏が含まれている。21世紀は、日本の人口の過半が居住している3大都市圏と太平洋沿岸地域で、巨大地震災害の連続的発生が危惧されている。もし21世紀中に次々と3大都市圏が巨大地震災害に見舞われると、これは「国難」と成りかねない。しかも、その復興期間中に巨大台風や前線豪雨などの気象災害が被災地を襲う可能性も低くない。巨大災害が複合災害化して被害はさらに巨大化するのである。

2. 大都市の地震災害の様相と被害軽減課題

3大都市圏の都市構造は共通するところが多い。市街地の土地利用から見た大都市圏の地域構造は、業務・商業機能に卓越し建物の不燃化が進んでいる都心・副都心地域、それを取り巻いて基盤未整備で老朽木造建物も多い木造密集市街地が分布し、その外周に1960年代後半以降に郊外住宅地域が急速に拡大していった。

東京の都心地域は関東大震災後の帝都復興事業で、名古屋や大阪の都心地域は戦災復興事業等を契機に基盤整備されてきた。その結果、建物の更新と不燃化が進み、もはや大規模な都市大火は発生し難い不燃市街地となっていると評価されている。しかし、この都心・副都心地域は、超高層ビルをはじめとする「超立体空間市街地」と、それを取り巻く1950年代~1970年代に建てられた「中小ビル密集市街地」で形成されている。これら都心の「超立体空間市街地」の地震防災の課題は、わが国でも未経験の地震災害の様相への対応を迫られよう。また「中小ビル密集市街地」では、耐震性の面でも既存不適格構造のビルが少なくない上に、個別の小規模テナントビルが多く、その耐震改修も進捗しない状況にある。また。現行の都

市再開発事業に対してはビル化の進捗によって現事業手法ではその実施も容易ではない。中小ビル密集市街地の被害軽減には、耐震改修が最重要方策であるが、それは、「耐震補強という工学技術」の課題というよりも「耐震化の促進という社会技術」としての課題である。

この都心・副都心地域の周囲に、基盤未整備であるが故に個別建て替えもままならず木造住宅が既存不適格状態で老朽化してきた「木造住宅密集市街地」がある。この被害軽減には、緊急措置としては既存不適格状況の木造建物も含めて「耐震改修」の推進と、木造建物の補修による「難燃化」の促進である。しかし、火災被害の軽減には、木造建物の建て替えによる「不燃化（耐火構造化）」の推進が求められるが、それには、最低限の地区の基盤施設を整備して建物更新を可能とする「防災街づくり」の推進が不可欠である。しかも、人口減少と高齢社会の下で、これらの被害軽減対策を推進するには、「工学技術の課題」よりもむしろその実践に関わる「社会技術の課題」に我々は直面しているのである。

そして郊外の住宅市街地は、一方では水田地域や湾岸地域の埋め立てによって沖積地域に広がり、その一部は「ゼロメートル地域」を形成していることもある。他方では丘陵地に大規模なニュータウン開発を推進させてきた。初期のそれには、耐震上の既存不適格の集合住宅も多い。さらに、個別の宅地造成がスプロール的に展開し、アプローチ道路の被災によっては孤立化してしまうような住宅地も少なくない。しかも、より遠郊で交通不便な郊外住宅地では住宅の空家化・宅地の空地化が高齢化の進行とともに増してきており、人口減少時代の新しい防災上の課題とも成っている。このように、大都市の郊外にも新たな地震対策の課題が広がりつつある。

3. 「国家機能」に関わる首都直下地震の課題

しかし、他の大都市圏と違い東京には、わが国の首都として政治・経済の国家中枢機能を保持し、その防災課題がある。それは、国家としての業務継続を求められる課題であり、これらの業務機能を維持するために「ライフライン自立街区」の形成という課題も検討する必要がある。とくに、外交・防衛・経済は、寸時も停止することが許されないのが今日の世界状況であり、それには何よりも電気と情報の確保である。

4. 国際化と「被害軽減技術」の社会技術化

上記2で述べた「被害軽減技術」の社会化という課題は、わが国における課題であると同時に、発展途上地域での最重要課題でもある。発展途上地域では先進的な技術開発よりもむしろ「地域の資源と技術力・経済力で実現できる被害軽減技術」が求められている。それは、それぞれの地域特性を反映した「社会技術」としての「地震被害軽減技術」の開発なのである。事前の被害軽減技術と同時に、復興にあたっては同様である。

国際研究拠点としての大きな期待と役割のひとつは、こうした「社会技術としての地震被害軽減技術の開発」ではなかろうか。

四川大地震報告（震源過程と地震動）

Report on the 2008 Wenchuan Earthquake (Source Model and Ground Motions)

東京大学 地震研究所 瀨瀨 一起

Kazuki Koketsu, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. 地表地震断層と余震分布

2008年四川大地震（汶川地震）は現地時間の5月12日に中国四川省の龍門山衝上断層帯で発生し、それによる地震動が世界中に伝播した。この地震動は International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN) の観測点で観測されているので、その記録を Incorporated Research Institutions for Seismology の Data Management Center (IRIS DMC) から入手した。入手した記録を点震源解析¹したり、米国地質調査所 (USGS) や Global CMT Project (ハーバード大より移管) による Centroid Moment Tensor インバージョン結果を参照することにより、汶川地震の断層モデル形状を概ね決めることができる。しかし、断層モデルの詳細な位置はこれらから決定することは困難で、地表地震断層の調査や余震分布から検討されるのが常道である。

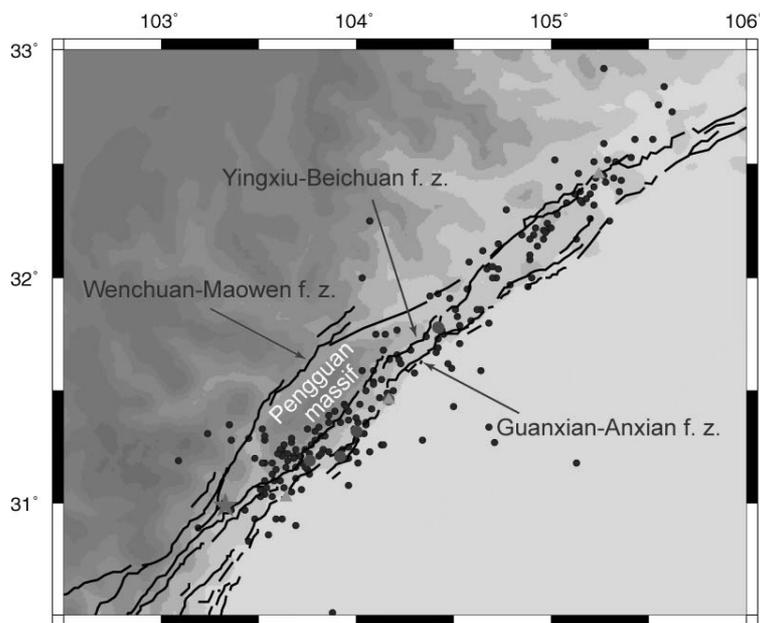


図 1. 龍門山衝上断層帯の地質学・地理学的背景。東から灌県—安県，映秀—北川，汶川—茂汶の 3本の断層系で構成され，灌県—安県と映秀—北川断層系の間の南側には灌彭山塊がある。▲の地点では四川大地震復旧技術支援連絡会議（2008）により，●では Hao et al. (2008) により地表地震断層が特定された。★と・は USGS による本震と余震の震央位置を示す。

Koketsu et al. (2008)²は四川大地震復旧技術支援連絡会議（2008）³や Hao et al. (2008)⁴による地表地震断層の調査結果をコンパイルし，龍門山衝上断層帯であらかじめ知られていた断層トレース^{5,6,7}と比較した（図 1）。その結果，龍門山衝上断層帯の南半分では，同断層帯を構成する 3 断層系のうちもっとも東側の灌県—安県断層系（Guanxian-Anxian fault zone）に沿って地表地震断層がみつかっているように見えるのに対して，北半分では映秀—北川断層系（Yingxiu-Beichuan fault zone）に沿っているように見える。また，USGS による本震後 1 週間の余震分布（図 1）を見ても，南半分では余震の震央が灌県—安県断層系からチベット高原側（北西側）に分布しているのに対して，北半分

では映秀—北川断層系前後から北西側に分布しているように見える。

2. 断層モデル

そこで 2008 年汶川地震の断層モデルは南北 2 セグメント構成とし、各セグメントの幾何形状は点震源解析¹の結果（図 2A）を参考に図 2B のように決定した。解析では 3 点震源が得られており、その中でも南西側の 2 点震源には低角の傾斜（dip）が得られているのに対して、北東側の 1 点震源では高角の傾斜になっている。これらの傾斜も図 2B の断層モデルに都合がよい。

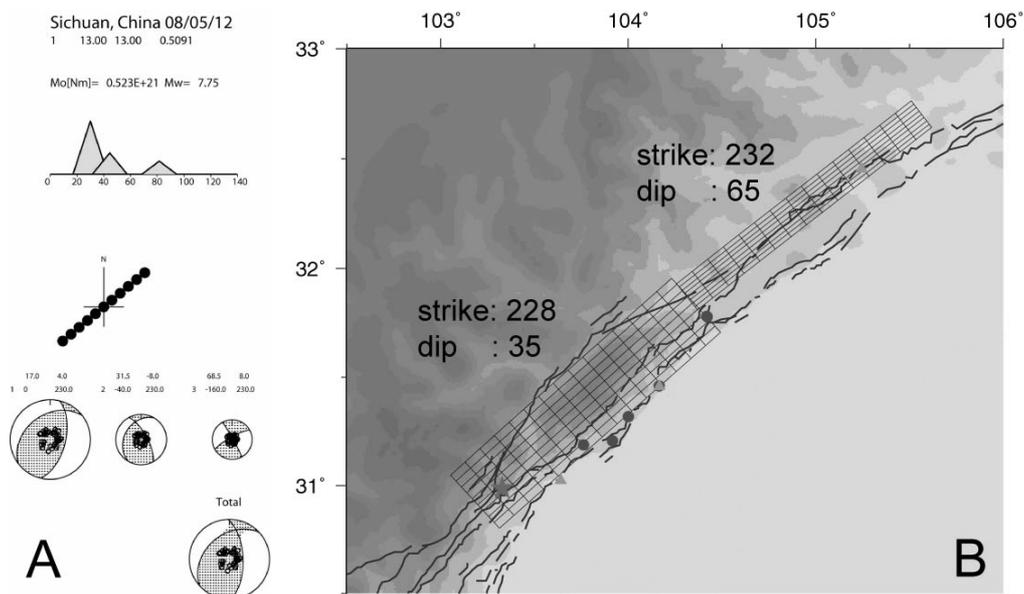


図 2. 点震源解析の結果 (A) と断層モデル (B)。

ところが、中国地震局（2008）⁸や Kirby et al.（2008）⁹による予備的な検討結果では、南部セグメントでも映秀—北川断層系を地表地震断層としている。しかし、この位置に南部セグメントの上端を持ってくると、点震源解析で得られている低角傾斜の断層モデルを設定することができない。また、灌県—安県断層系沿いに南から 3 番目の●地点（彭州市白鹿鎮）では、図 3 のような非常に明瞭で大きなすべりの地表地震断層が出現しているので、南部セグメントの断層モデルはその上端を灌県—安県断層系付近の地表近くとした。



図 3. 彭州市白鹿鎮の中心学校校庭に現れた地表地震断層。変位は上下変位だけでも約 3 m あった。

2. 震源インバージョン

図2の断層モデルと、IRIS DMCからダウンロードした記録から抽出した遠地実体波を用いて、震源過程のインバージョン(震源インバージョン)を行った。インバージョン法にはYoshida et al. (1996)¹⁰によるものを用い、グリーン関数はKikuchi and Kanamori (1991)¹に基づいて計算された。このインバージョンにより得られたすべり分布(北西側上盤の動き)を図4に示した。主要なすべりは長さ250 kmの間で起こっているので、断層面の幅40 kmを掛けると断層面積は10,000 km²となる。右側(南西側)の南部セグメントでは逆断層成分が主体となっているのに対して、左側(北東側)の北部セグメントでは横ずれが主体となっている。また、どちらのセグメントにもひとつずつ、すべりの大きな場所(アスペリティ)が現れた。両方の合計で地震モーメントは 1.0×10^{21} Nmとなり、これはモーメントマグニチュード(M_w) 7.9に相当する。最大すべり量は約9 mである。

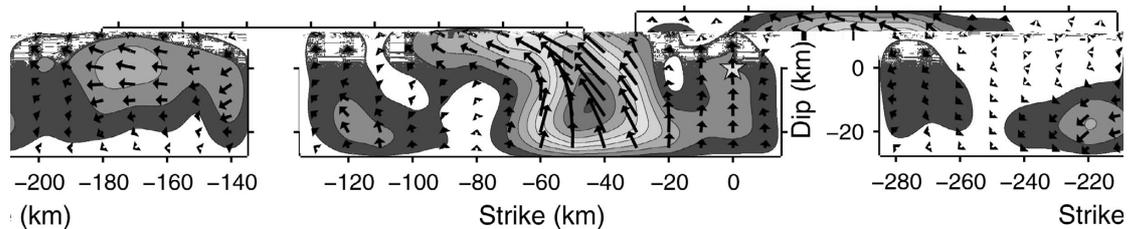


図4. 震源インバージョンにより得られたすべり分布(北西側上盤の動き)。右側が南部セグメント、左側が北部セグメントを表す。

このすべり分布を地表に投影して、断層トレースや余震震央と重ね描いたものを図5に示した。余震はアスペリティの周辺で起こっているように見受けられる。また、南部セグメントにある最大アスペリティは、図1の灌彭山塊(Pengguan Massif)の位置に復元されており、その地質学意味合いを十分に検討する必要がある。

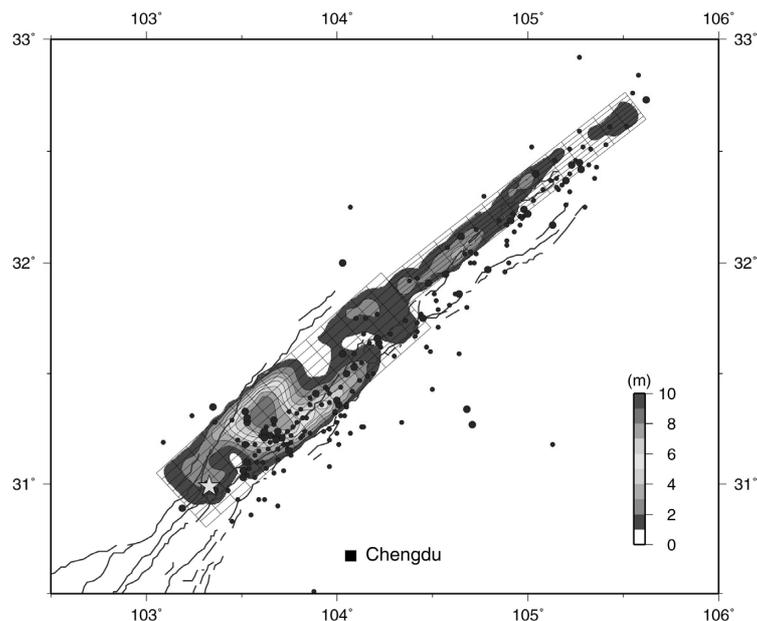


図5. すべり分布を地表面に投影したもの。断層トレースやUSGSの余震分布も併せて重ね描いた。

3. 地震動

強震記録がまだ公開されていないので詳細は依然として不明であるが、断片的に公開されている

震度や最大加速度の分布とすべり分布を比較すると、大きな震度や最大加速度は震源域（地下で震源断層が広がっている領域）、特にアスペリティの直上で起こっているように見える。したがって、甚大な被害をもたらした大きな原因のひとつとして、震源域の強震動を挙げておきたい。このほか、震源域からの距離が 1,500 km 以上離れている北京、上海、台北などの高層ビル内では、2008 年汶川地震からの長周期地震動が観測、体感されたことも付記しておく。

参考文献

1. Kikuchi, M. & Kanamori, H. Inversion of complex body waves - III. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **81**, 2335-2350 (1991).
2. Koketsu, K., Hikima, K., Miyake, H. & Maruyama, T. Source process and ground motions of the 2008 Sichuan, China, earthquake. *Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng.* S31-007 (2008).
3. 四川大地震復旧技術支援連絡会議. 報告会資料 (土木学会, 東京, 2008).
4. Hao, K. X.-S., Si, H. & Fujiwara, H. A preliminary investigation of the coseismic surface ruptures for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China. *Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng.* S31-007 (2008).
5. Kirby, E., Whipple, K. X., Tang, W. & Chen, Z. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles. *J. Geophys. Res.* **108**, 2217, doi:10.1029/2001JB000861 (2003).
6. Burchfiel, B. C., Chen, Z., Liu, Y. & Royden, L. H. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, Central China. *Int. Geol. Rev.* **37**, 661-735 (1995).
7. Densmore, A. L. et al. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics* **26**, TC405, doi:10.1029/2006TC001987 (2007).
8. 中国地震局. 汶川 8.0 級地震成因分析. (http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_content/08_05/30/1212119940937.html).
9. Kirby, E., Whipple, K. & Harkins, N. Topography reveals seismic hazard. *Nature Geoscience* **1**, 485-487 (2008).
10. Yoshida, S. et al. Joint inversion of the near- and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake. *J. Phys. Earth* **44**, 437-454, 1996.

四川大地震による都江堰市における学校建築の被害

Damages to School Buildings in Dujiangyan by the Great Sichuan Earthquake

東京大学地震研究所 壁谷澤 寿海

Toshimi Kabeyasawa, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

北京工業大学 李 康寧

Kangning Li, Beijing University of Technology

横浜国立大学 楠 浩一

Koichi Kusunoki, Yokohama National University

東京工業大学 壁谷澤 寿一

Toshikazu Kabeyasawa, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

2008年5月12日に発生した四川大地震(M8.0)によって中国四川省の主要な都市において多くの構造物が被災した。同地震では約350万棟の家屋が倒壊し、69000を超える人命が失われ、18000人が家屋の倒壊などで行方不明と報告されている。一方、学校建築物では数千の教室区画が崩壊し、数千人の学生および教師の亡くなったと報告されている。6月中旬、著者らは地震発生1ヶ月後に四川省都江堰市中心部における学校建築物の被災度調査を行った。本稿では都江堰市中心部の合計80棟以上の学校建築物における被害調査結果について報告する。

2. 調査方法

2.1 被災度判定方法

著者らは2日間にわたって都江堰市内中心部の全ての学校構造物について被害調査を行った。建設位置、建設年代、階数、方位、構造種別は調査時に現地で情報を収集し、構造物の被害観察結果は震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針(日本建築防災協会、2001)を参照して復元力特性上で最大応答を推定し、同様に無被害および5つの被災度判定区分に分類した。一部を除いて内部も観察しているが、限られた調査時間および行程のため損傷割合は算出せず、分類は著者らの判断による。建設年代は学校関係者から直接収集された情報または記録から特定しており、構造形式は著者らによって推定、判断している。一部の構造物では構造形式、立平面を計測して詳細な調査も行った。

2.2 調査対象構造物

被害調査は図1に示す都江堰市内中心部に所在するほぼ全ての学校建築物を対象として行われた。郊外に所在する学校は調査していない。表1に示すように、合計27校の学校、78の学校建築物について調査を行った。幼稚園3校、小学校10校、中学校8校、外国語実験学校2校、単科大学2校、大学2校となっている。うち数校では現地調査を規制されたため、外観からのみの評価となっている。また、大学は全棟数が多いので、一部の校舎群のみとしている。各学校の多くは一般教室を含む校舎棟を保有しており、その他敷地内に先生、生徒用の寄宿舎(住宅)などが併設されており、これらも統計に含まれている。

3. 被害調査結果

3.1 構造形式

構造形式は、推定不可能な場合を除き、著者らによって推定または特定された。その結果、40 棟の校舎が梁、スラブや階段など特定の部位などを除いて鉄筋コンクリートが使用されていない組積造構造物と判断された。23 棟の構造物が鉄筋コンクリート枠組み構造に無筋ブロック壁もしくは組積造レンガ壁を有していた。残りの 15 棟は構造形式を特定することができなかった。1/2～2/3 程度の調査構造物が組積造構造物であったと推定される(3.5 参照)。

3.2 全体被害率

構造物の被災度を梁間・桁行方向における被災の大きい方と判定した時の調査全数の被災度統計結果を図 2 に示す。各被災度建物の割合はそれぞれ (0)無被害 10% (1)軽微 27% (3)小破 26% (4)中破 18% (4)大破 13% (4)倒壊 6%であった。これら各被災度に判定された建物例を図 3 に示す。

3.3 被害率と階数の関係

1, 2 階の低層構造物は比較的軽微な損傷に留まっており、3, 4 階の中低層建物では 43 棟のうち 3 棟のみが大破または倒壊と判定されたが(1 棟は地盤基礎沈下による被害、残り 2 棟は倒壊後すでに更地になっていた)、5, 6 階の中層建物では 22 棟のうち半分の 11 棟が大破または倒壊と判定されている。構造物被災度と階数には高い相関があり、高い建物での被害が大きかった。

3.4 被害率と建設年代の関係

1980～85 年に建設された建物の半分以上は大破または倒壊であったのに対して、建設年代が後期になるほど被害率は小さい値に留まっている。2001 年以降に建設された建物では大破または倒壊の建物が存在せず、2/3 の建物が軽微または無被害に留まっていた。すなわち、近年建設された建物被害は明らかに小さく、大きな被害は古い建物に集中している。

3.5 被害率と構造形式の関係

建物の構造形式(組積レンガ造、鉄筋コンクリート枠組レンガ・ブロック壁構造)と建物被害率の関係については、構造形式の違いによる建物被害率の明確な差異は見られなかった。組積造構造物ではレンガ壁の壁厚が大きく、比較的断面積が大きいためであると考えられる。

4. 結論

四川大地震後に都江堰市内の学校建物について全数被害調査を行い、以下の結論が得られた。

- 1) 20%の学校建築物は大破もしくは倒壊し、20%が中破であり、60%が軽微または無被害に留まっていた。
- 2) 1/2 から 2/3 の建物の構造形式は鉄筋コンクリート柱を含まない組積造レンガ壁構造物であった。
- 3) 高い建物では明らかに被災度が大きかった。
- 4) 近年建設された建物は無被害または軽微に留まり、古い建物で大破または倒壊などが多く見られた。
- 5) 組積造レンガ壁構造物の被害率はブロック・レンガ壁内蔵鉄筋コンクリート枠組構造と比較して大きくなかった。

謝辞

調査は文科省と中国地震局との共同研究に関する交渉が進行中の段階で、筆者らのグループにより独自に行われたが、現地調査では四川省建築科学研究院副所長 Luo Linglong 博士に多大なご支援をいただいた。なお、本稿はすでに投稿済みの論文[2][3]の一部である。

参考文献

- [1] 日本建築防災協会(2001)：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，日本建築防災協会、360pp、2001.9
- [2] Kabeyasawa, Toshimi, et al. (2008). An outline of damages to school buildings in Dujiangyan by the Wenchuan Earthquake on May 12, 2008. Paper submitted to Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008.
- [3] 壁谷澤 寿海ほか(2008). 中国四川大地震による都江堰市における学校建築の被害の調査，日本地震工学会年次大会論文集（投稿中），日本地震工学会，2008.11.

表 1 調査対象の学校と建物

幼稚園	3	教室棟	65
小学校	10	図書室	2
中学校	8	食堂	3
外国語学校	2	宿舍	7
専門学校	2	玄関（ピロティ）	1
大学	2		
学校数合計	27	建物棟数合計	78



図 1 都江堰市における調査対象建物の位置

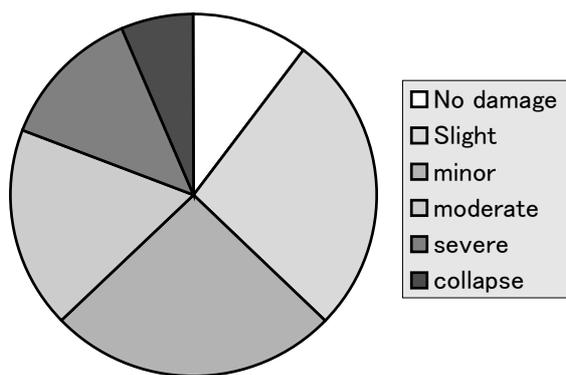


図2 全体の被害率



(Grade 0) No damage



(Grade 3) Moderate damage



(Grade 1) Slight damage



(Grade 4) Severe damage



(Grade 2) Minor damage



(Grade 5) Collapse or near collapse

図3 被災度が異なる被害例

四川地震による橋梁被害とその特徴

Reconnaissance Report on the Damage of Bridges during 2008 Sichuan, China Earthquake

東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻 川島一彦

Kazuhiko Kawashima, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

四川地震は2008年5月12日14時28分(現地時間)に発生したMs8.0(中国国家地震局), Mw7.9(USGS)の巨大地震であり, 我が国の1991濃尾地震に匹敵する. 被災地はもろい石灰岩質の急峻な山岳地帯であり, 山体崩壊のほか, 斜面では無数に大規模崩壊が発生した. 河川も激流であり, 極めて自然条件の厳しい地域である.

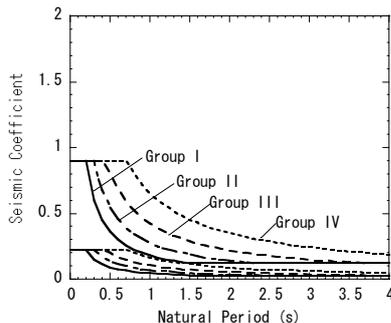
著者は, 四川大地震復旧技術支援連絡協議会(会長: 早稲田大学濱田政則教授)派遣の第2次協力チーム, 及び, 文科省科研特別研究推進費(研究代表: 小長井和男東京大学教授)の一員として, 2回にわたって橋梁被害を調査する機会を得た. これに基づいて, 橋梁被害の概要と被害の特徴を紹介する.

2. 中国における橋梁の耐震設計

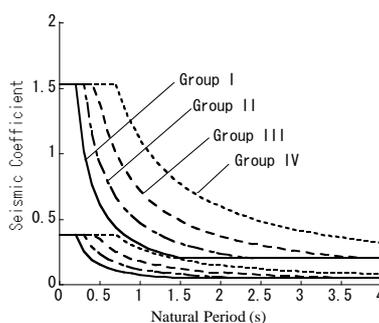
中国では1989年交通部作成のJTJ004-89に基づいて支間長150m以下の橋梁が設計される. 簡単な構造の橋では, 地震力は次式で求められる.

$$E_{ihp} = C_i C_z K_h \beta_1 G_{tp} \quad (1)$$

ここで, C_i : 重要性修正係数(重要度に応じて0.6~1.7), C_z : 総合影響係数(構造形式に応じて, 0.2~0.35), K_h : 標準水平地震係数(基本烈度が7の地域では0.1), β_1 : 動的応答係数(周期と地盤種別で変化し, 最大2.25), G_{tp} : 支承に作用する死重量である. 式(1)で $C_i K_h \beta_1$ を弾性応答震度と考え, これを基本烈度7および9の地域を想定して, 特に重要な橋梁($C_i=1.0$)と一般クラスの橋梁($C_i=1.7$)に対して求めると, 図1のようになる. 四川省では基本烈度は7と指定されていた. 基本烈度が7の場合には, $C_i=1.0$ のカテゴリーの橋では最大弾性震度は0.225で, これに総合影響係数 C_z を考慮すると, ディマンドとしての非線形応答震度は0.1以下となる. また, $C_i=1.7$ のカテゴリーの橋では最大弾性震度は3.83で, 非線形応答震度は0.1前後となる. この程度の震度であれば, 実質的に耐震設計では断面が決まっていまいと考えられる. 基本烈度9の地域であれば, 図2に示す我



(a) $C_i=1.0$ の場合



(b) $C_i=1.7$ の場合

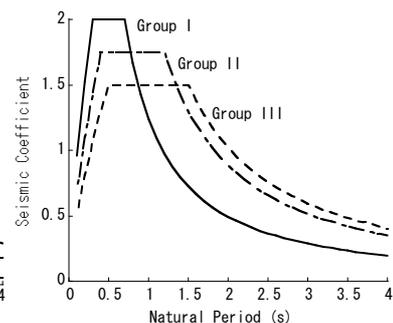


図2 日本の設計震度

図1 JTJ004-89に基づく震度(基本烈度7の場合)

(タイプII地震動, 日本道路協会)

が国の橋梁の耐震設計に用いられているタイプ II 地震動に対する設計震度と比較可能な範囲に入ってくる。長周期になると、地震力が大きく低下するのが特徴である。

一方、図 3 は今回の地震でもっとも PGA が大きかったといわれている汶川臥龍観測台での強震記録である。波群が 2 つあり、これは断層の破壊過程によると考えられる。応答スペクトルを求めると、図 4 のようになる。周期 0.5s 以下ではスペクトル値は 3g 以上と大きいが、これ以上になるとスペクトル値は小さいのが特徴である。比較のために、1995 年兵庫県南部地震の際の JMA 神戸海洋気象台および JR 鷹取駅での応答スペクトルをそれぞれ図 5 および図 6 に示す。

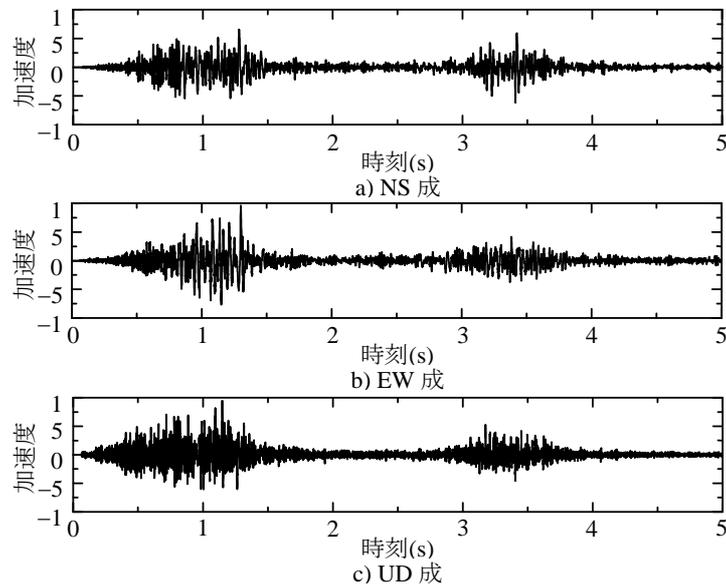


図 3 汶川臥龍観測台における加速度記録

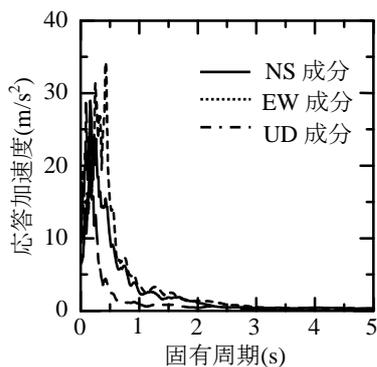


図 4 汶川臥龍観測台記録の加速度応答スペクトル

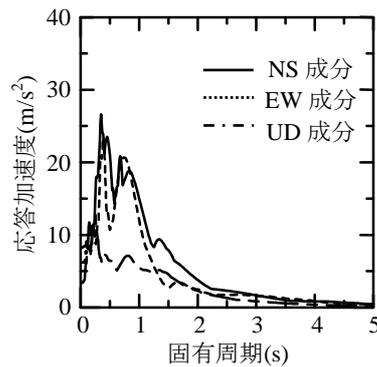


図 5 JMA 神戸海洋気象台記録（兵庫県南部地震）の加速度応答スペクトル

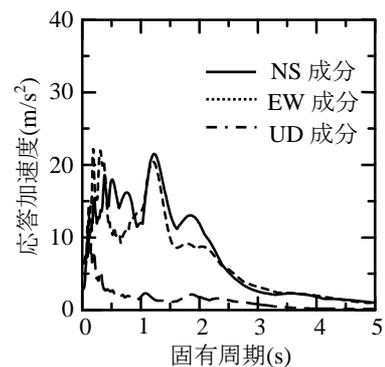


図 6 JR 鷹取駅記録（兵庫県南部地震）の加速度応答スペクトル

3. 主要橋梁の被災状況

(1) 調査範囲

成都を起点として都江堰市、汶川县、彭州市、綿竹市、青川县における被害を約 32 橋に対して調査した。主要な被害を示すと、以下ようになる。ただし、北青はじめ、道路被害のために立ち入れなかった地域が残されている。

(2) 廟子坪大橋 (Miaoziping Bridge)

成汶高速道路が紫坪埔ダム (Zipingpu dam) のダム湖 (岷江) を渡架するための橋梁で、橋脚高さ

が約100mというスレンダーな構造である。主構造は中央径間220m、側径間2@125mの3径間連続PC箱桁である。これを中心に、一方の側には2径間連続桁橋1連、他方の側には5径間連続桁橋1連、4径間連続桁橋3連から構成されている。桁橋は支間長50mの10主桁（PCT桁）で、桁間は直接固定されておらず、床版を連続とした構造である。積層ゴム支承で支持されているが、特に固定点は設けられておらず、すべて弾性固定方式になっている模様である。

写真1に示すように、4径間連続桁端に隣接する5径間連続桁橋のうちの1連が落橋した。地震時には湖面は橋脚基部から85mの位置にあったが、地震後には写真1のようにこれよりも約40m湖面が下げられている。写真2は落橋した桁を支持していた橋脚である。この橋脚には基部に幅1mm程度の残留クラックが生じており、橋脚上端では当初の支間長が0.69m広がったといわれている。写真3は落橋した5径間連続桁橋の桁端側を支持していた支承である。橋脚天端の張り出し部には、桁の落下に伴って生じた大きな損傷が残っている。明らかに桁はここから滑り落ちて落下していったと考えられる。一方、写真4はこれとは反対側の床版である。床版が引きちぎられる形で桁が落下していったことを示している。積層ゴム支承の抜け出しやサイドブロックの損傷等、大きな桁変位が生じたことを示す損傷が随所に残っており、こうした大きな桁変位に伴い、5径間連続桁の端部に桁かかり長を上回る変位が生じ、落橋したと考えられる。なお、落橋防止構造は設けられていなかった。



写真1 廟子坪大橋



写真2 落橋区間 写真3 桁が最初に落下した側の支承部 写真4 連続床版の被災

(3) 百花大橋 (Baihua Bridge)

映秀鎮と都江堰市を結ぶ国道213号の橋梁であり、都江堰市側は曲線区間になっている。全長は約500mで、高さ約30mの橋脚によりRC桁がゴムパッドにより支持されている。橋脚は中間高さには横梁を有する2脚RCラーメン橋脚であり、橋脚頂部には横梁があるものとないものがある。杭基礎で支持されている。2004年12月に竣工した。写真5に示すように、地震により曲線区間の3基の橋脚が倒壊し

桁が落下した。本橋の被害は甚大な被害を受けた映秀鎮の避難、救助活動に大きな障害となったといわれている。落橋しなかった区間にも橋脚と横梁接合部や基部の損傷、橋桁の橋軸直角方向への移動など、大きな被害が生じたため、安全上の観点から5月28日に爆破され、写真6に示すように調査時には原型を留めていなかった。ただし、地震によって落橋した区間はそのままの状態が残されていたため、これらを中心に調査した。

写真7に落橋部の橋脚損傷状況を示す。これは天端に横梁がない橋脚であるが、写真8に示すように、横梁が橋脚からはずれ、橋脚も途中で折れている。横梁は1m角の断面であるが、写真9に示すように縦に6本、横に5本、計18本と少数の鉄筋が配置されているだけであり、脚との接合面はほとんど損傷を受けずに残っている。この部分が塑性ヒンジを形成することなく、単純にはずれたことを示している。また、写真10～12は橋脚天端における支承のセット状況を示したものである。基本的には、支承部において桁は橋脚上に置かれているだけであり、横抵抗できる構造にはなっていない。

以上の点から見て、地震動を受けて橋脚横梁が脱落し、横抵抗を無くした橋脚が倒壊したり、橋軸直角方向の桁のズレにより桁が落下したと考えられる。なお、地震直後の写真を見ると、落橋部を横切る形で断層変位と見られる痕跡が残っており、これが桁の掛違い部で桁落下を招き、この結果、橋脚の倒壊が生じて曲線部が落橋した可能性もある。



写真5 百花大橋（新華社による）



写真6 爆破区間



写真7 地震による倒壊区間



写真8 地震による橋脚の倒壊



写真9 分離した脚と横梁の接合部



写真10 橋脚天端



写真11 ゴム支承

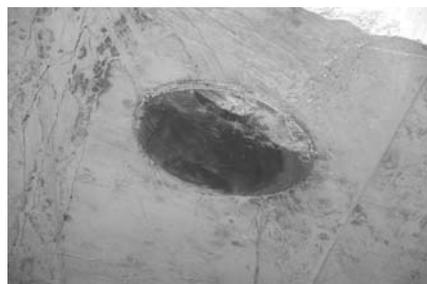


写真12 桁と一体となった上沓

(4) 小魚洞橋 (Xiaoyudong Bridge)

彭州から白水河に至る道路上にある橋長 187m, 幅員 12m の 4 径間連続方杖ラーメン橋である (図 7 参照). 一見するとアーチ橋のように見えるが, アーチ主構が連続しておらず, 頬杖ラーメン橋と判断される. 桁はラーメン脚のほかに斜材によって支持されている. 写真 1 3 に示すように, 桁 2 を除く 3 連が落橋した. 下部構造は 2 基の RC 杭で支持された 2 脚 1 層式ラーメン橋脚で, ラーメン橋脚天端の横桁により桁端は単純支持されている. 杭頭はフーチングではなく, パイルキャップで結合されており, ここにラーメン橋脚, 頬杖ラーメン脚と斜材が剛結されている. このような構造では, ラーメン脚からパイルキャップに伝達される橋軸方向水平力のバランスが重要であり, これが崩れると杭基礎のバランスが失われ, 杭が傾斜し, 落橋する可能性が高い. 支間長は 40m である. 1998 年に竣工した.

写真 1 4 は, 唯一落橋しなかった橋脚 2 上の桁 2 である. 橋軸方向に大きく移動し, 桁 2 が橋脚天端の横桁から落下寸前になっていることがわかる. 写真 1 5 は, 橋脚 3 によって支持されていた桁 3 および 4 が橋脚天端から落下し, 頬杖ラーメン脚と斜材を破壊してパイルキャップまで落下した状態を示している. なお, 写真 1 6 は左岸側 (桁 1) のラーメン脚及び斜材と A1 橋台との接合部の損傷である. 桁 1 が A1 側に移動する形でラーメン脚及び斜材が破壊し, A1 橋台にはこの向きのせん断破壊が生じている.

なお, 本橋では, 副次的な断層が左岸側護岸を横断し, 写真 1 7 に示すように左岸側の橋台から約 10m と 30m 位置で取り付け盛土を崩壊させた. 写真 1 8 は本橋か 100m ほど上流側で左岸側護岸を横断した断層であり, 約 0.8m 上流側が盛り上がっている. ただし, 横ずれは 10mm 程度と小さかった. ここから, コーン畑を横断して, 取り付け盛土を超え, さらに下流側に断層が続いていた. ただし, 上記の被災メカニズムから見て, 断層によって本橋が落橋した可能性は低いと考えられる.

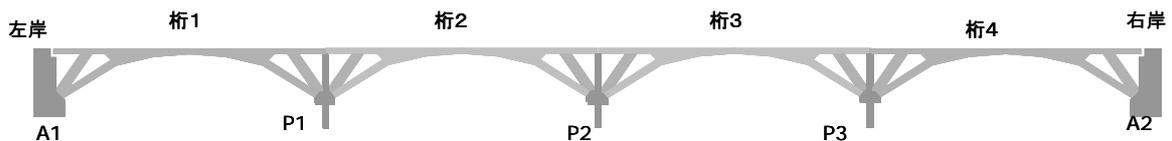


図 7 小魚洞橋



写真 1 3 小魚洞橋の落橋



写真 1 4 落下寸前の橋脚 2 上の桁 2



写真15 橋脚3上における桁3, 4の落橋



写真16 脚と斜材の被害 (A1との固定部)



写真17 左岸側護岸から取付け盛土に向かう断層



写真18 100m上流の左岸側の断層変位

4. 被害の特徴及びまとめ

被災地は基本烈度7の地域に相当するが、基本烈度7の地域では、重要性修正係数を1.0とすると設計水平震度は最大で0.225程度となり、これに総合影響係数を考慮すると実質的に設計水平震度は0.1以下となる。したがって、事実上部材断面や配筋は死荷重に対して定められ、耐震性が決定要因となった部材が限られていたのではないかと考えられる。百花大橋の橋脚における柱と横梁の結合部や小魚洞橋のラーメン脚等のように主要構造部材やその結合部が弱点となったり、低鉄筋で帯鉄筋も少ないためじん性の低い構造部材であったことが破壊の進行を防止できなかった原因と考えられる。

一方、M8クラスの内陸直下型地震の震源断層域における地震動強度がどの程度であったかが重要であるが、もっとも最大加速度が大きかった川臥龍観測台における強震記録等から判断すると、周期0.5s以下の構造物には大きな影響を与えるが、これ以上の周期では地震応答スペクトルは比較的小さなものであった。これは、震源断層域が山岳地帯であり、地盤の増幅が小さかったことも原因の一つと考えられる。今後、地震動特性、橋梁の具体的な耐震設計法とも併せて被害の分析を行っていく必要がある。

謝辞

橋梁被害の調査に際しては、濱田政則、アイダンオメル（東海大学）、本間淳史（(株)高速道路総合技研）、大窪克己（(株)高速道路総合技研）、呉旭（応用地質）（以上、四川大地震復旧技術支援連絡協議会第2次協力チーム）、高橋良和（京大防災研）、呉智深（茨城大）、葛漢彬（名城大）、張建東（江蘇省交通科学研究院）、J. Ling（地震局工程力学研究所）S. Zheng（西南交通大学）、Z. Liu（東南大学）の各氏に大変お世話になった。本文はこれらの方との共同調査結果であることを記し、厚くお礼申し上げる次第である。

RECONNAISSANCE REPORT OF THE 2008 SICHUAN EARTHQUAKE, DAMAGE SURVEY OF BUILDINGS AND RETROFIT OPTIONS

急速に発展した中国と四川大震災

H.K. Miyamoto^{1,2}, and A.S. Gilani¹ and Akira Wada²
H. K. Miyamoto, A. S. Gilani, 和田章

¹ *Miyamoto International Structural and earthquake Engineers, USA*

¹ *Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan*
Email: agilani@miyamotointernational.com

ABSTRACT :

On 12 May 2008, a magnitude 8.0 earthquake struck China, approximately 80 km west of Chengdu in the Sichuan (Wenchuan) province and 1550 km southwest of Beijing. This event occurred on one of the tectonically related faults that run along the base of the Longmenshan Mountains marking the boundary of the Tibetan plateau. The rupture of the fault extended over 200 km and exceeded 6 m on the surface. The fatalities approached 70,000 and millions were injured or left homeless. Damage was estimated at billions of US \$. This area had previously been considered a moderate earthquake zone by the Chinese Building Code, and hence, the level of damage was not anticipated. Thousands of buildings and many bridges collapsed or sustained severe damage. Schools and hospitals were especially vulnerable and many such buildings collapsed. Many factors contributed to the unprecedented level of devastation. For the collapsed buildings, the lack of ductility, the absence of a well-defined load path, and the building irregularity were primary contributors. Many schools used a hybrid structural system comprised of masonry columns, concrete beams, and hollow precast decks. This system was responsible for a disproportionate number of collapsed buildings. Residential unreinforced masonry buildings also fared poorly and many of them collapsed. By comparison, non-ductile reinforced concrete framed buildings performed slightly better. Many of these buildings sustained significant damage, but did not collapse. For concrete framed buildings, the presence of masonry infills introduced additional failure modes. For many buildings, the infill walls were terminated at the first floor introducing weak story at the ground level. Captive column failure was also common resulting from attachment of partial height infill walls to concrete columns. The observed types of damage have previously been witnessed in many parts of the world in past earthquakes. Fortunately, robust, simply implemental, and cost-effective retrofit methodologies have been developed to alleviate such failures. Analytical tools, experimental data, and available knowledge provide the basis of the suggested retrofits with the objective of strengthening and adding ductility to the structure to protect vulnerable non-ductile components. Both conventional and innovative retrofits options are available. The authors were some of the first foreign structural engineers to reach the area and survey the damage. Their observations and recommendations for future mitigations are presented in this paper.

KEYWORDS: Magnitude 8 earthquake, collapsed building, URM building, non-ductile concrete, incomplete load path, seismic retrofit

1. INTRODUCTION

The 12 May 2008, magnitude 8.0 Sichuan (China) earthquake resulted in over 69000 fatalities, injured more than 370000, and left millions homeless. As of 26 June 2008, 18000 people were still missing. Millions of structures were damaged, including numerous schools and hospitals, and commercial, industrial, and residential buildings. The total monetary loss to date, as reported by Chinese officials, is more than 1 trillion yuan (US\$146 billion). This quake is classified as an X event on the Modified Mercalli Intensity (MMI) scale (Figure 1) indicating violent shaking and heavy damage. The event caused tremendous damage as seen in **Error! Reference source not found.** The main shock was followed by a number of aftershocks. Figure 3 shows the location of these aftershocks including a magnitude 6.0 event on 25 May, 13 days after the main shock, caused additional casualties and damage.

The authors (Miyamoto and Wada) were two of the first engineers to visit the site. This paper presents the results from a reconnaissance survey conducted by the authors, attempts to describe the causes for disproportional failures observed in certain construction, and presents cost effective retrofit options. It is hoped that the findings presented in this paper will assist in mitigating such disasters in the future.

2. SITE SEISMICITY

The earthquake epicenter was located 80 kilometers west of Chengdu, the Sichuan Province capital, and 1500 kilometers southwest of Beijing. The earthquake had an epicentral depth of 19 kilometers and occurred as the result of movement on the Longmenshan Fault. This thrust fault runs along the base of the Longmenshan Mountains in Sichuan Province in southwestern China. The fault rupture started in the mountains and traveled at least 200 kilometers toward the northeast. Ground rupture exceeded 6 meters. Figure 4 depicts the major earthquakes impacting the region and a close-up of the earthquake epicenters and local faults. The Sichuan province of China has seen many earthquakes. The 1933 Diexi earthquake occurred in Diexi, (nearly 80 km from the epicenter of the 2008 earthquake and destroyed the town of Diexi and many villages, and caused many landslides.

Because seismic waves associated with shallow quakes can reach the surface with very little energy loss, they produce stronger shaking and usually more damage. Additionally, because of the stiff soil and rocks surrounding the fault, the waves traveled far without losing their strength. The China Earthquake Networks Center (CENC) has instrumented many buildings in China. In the Sichuan Province, an instrumentation program comprising 211 stations was completed in 2007. The instrumentation array includes 60 stations along the Longmenshan Fault. As a result, a number of strong motion records were obtained from stations in Sichuan. Very high vertical accelerations, order of 0.64g were recorded.



Figure 1. Intensity map (USGS)

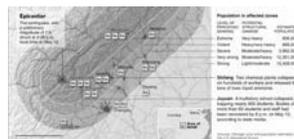


Figure 2. Damage map (NY Times)



Figure 3. Aftershocks (NASA)

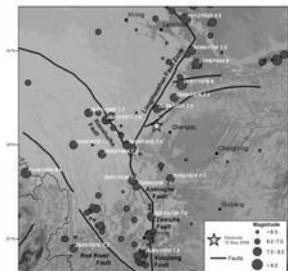


Figure 4. Local faults and earthquakes (BGS)

3. BUILDING STRUCTURES

Most commercial, retail, and residential buildings at the earthquake site consisted of three types of structures: unreinforced masonry (URM) bearing walls for low rise residential buildings, Hybrid URM column-concrete beam and cast-in-place reinforced concrete (CIP-RC) moment frames for low-rise to mid-rise buildings including schools and hospitals. The buildings use an unconventional floor system. It consists of concrete ring beams at the perimeter with interior hollow precast slab planks. There is minimal reinforcement continuity between the concrete floor slabs and the URM walls.

3.1.1 Schools and Hospitals

Many schools and hospitals collapsed in this Earthquake. The death toll is expected to exceed 10000, and more than 7000 classrooms were damaged. Many of the collapsed buildings were newer structures and consisted of URM construction or nonductile CIP-RC construction. Several examples of damaged schools and hospitals are summarized below.

3.1.2 *Juyuan Middle School*

This three-story school is in Juyuan, a town in the county-level city of Dujiangyan. Juyuan has a population greater than 50000 and is approximately 20 kilometers from the fault rupture. The school housed 1000 students and was constructed in 1986. More than 700 died when the building collapsed. Construction consisted of nonductile CIP-RC beams supported by URM walls, with precast concrete floor planks. Figure 5 shows the collapsed floor precast planks. Note that the planks pulled away from the walls and are hanging and attached to the opposite walls. The collapsed URM walls and nonductile concrete beam is shown in Figure 6. A lab building adjacent to the collapsed school with similar construction did not collapse. This better performance was likely due to the orientation of its URM walls or better construction quality. Figure 7 shows the cracked walls.

3.1.3 *Xingfu Primary School*

This four-story school is in the town of Xingfu, in the county-level city of Dujiangyan. It has a population of more than 300000 and is located 15 kilometers from the fault rupture. The building collapsed and killed more than 300 of the 600 occupants. Building framing consisted of nonductile CIP-RC columns and beams, URM walls, and precast concrete floor planks. The stairway (Figure 8) survived the event. The stairwalls added stiffness and resistance to this portion of the buildings and survived even when the main building had collapsed.

3.1.4 *Hanwang High School*

This four-story school is located in the Hanwang township of Mianzhu with a population of more than 60000 within 10 km of the fault. The building sustained significant damage but no collapse. Construction consisted of CIP-RC framing and URM walls. The walls had extensive damage and concrete columns failed (Figure 9) because the URM walls created captive columns and prevented flexural yielding.

3.1.5 *Mianzhu Experimental School*

This school is located in the city of Mianzhu, with a population well over 500000, about 20 km from the fault rupture. Framing comprised of nonductile CIP-RC columns and beams, and URM bearing walls. There was significant structural damage. In particular, large flexural demand and lack of adequate confining transverse reinforcement resulted in severe column damage (Figure 10).

3.1.6 *Hanwang Primary School*

The main school building collapsed, but the adjacent dormitory building survived although its walls were cracked (Figure 11). Both structures were built in 1994 and were of similar construction using URM walls and precast concrete floor planks. The better performance of the dormitory is attributed to the redundancy provided by the many interior URM walls and shorter spans for precast floor planks.



Figure 5. Collapsed floor planks



Figure 6. Collapse URM wall and concrete beam



Figure 7. Shear cracks in masonry walls



Figure 8. Collapsed primary school



Figure 9. Captive column failure



Figure 10. Column flexural failure



Figure 11. Cracked URM wall

3.1.7 *Xingfu Hospital*

A wing at the Xingfu Hospital collapsed (Figure 12), resulting in 200 fatalities. This wing, constructed in 1996, had typical nonductile CIP-RC framing with URM walls and precast concrete floor planks. An adjacent wing, constructed in 2000, performed better and sustained moderate structural damage, shear-wall cracks, and nonstructural damage, dropped ceiling panels (Figure 13).

3.1.8 *Hanwang Hospital*

This five-story hospital was constructed in 1999. Construction consisted of nonductile CIP-RC framing and URM walls. The ground floor was designed as a parking garage. Hence, the URM bearing walls were terminated at the first floor, creating a bottom story with much smaller lateral stiffness. This soft story completely collapsed during the earthquake (Figure 14) and the upper floors dropped down one floor.



Figure 12. Collapsed wing



Figure 13. Nonstructural damage



Figure 14. Soft story collapse

3.1.9 *Industrial Facilities*

Structural, nonstructural, and equipment damage was widespread and was attributed to the lack of redundancy and ductility of nonductile CIP-RC and URM construction and to the lack of adequate tie-down and anchorage for equipment. Industrial damage depended on the magnitude of ground accelerations. In sites with large acceleration, the building damage was significant, whereas, in sites with moderate ground shaking, buildings performed well but equipment damage was extensive. The equipment damage observed in this event is similar to observations from past earthquakes. Such loss is preventable with cost-effective tie downs which can reduce business interruption (BI). Observations from a number of industrial facilities are presented here.

3.1.10 *Glass Manufacturer*

This 300-employee glass manufacturer, built in 1996, is located near the city of Mianzhu. The plant has several production and storage buildings, and many of the one-story buildings used lightweight steel construction. Two URM stacks measuring 50 m high and 5.8 m wide failed. The top 5 meters of the stacks collapsed (Figure 15) due to large accelerations. A mezzanine structure above the bottle production machine failed because it was not properly braced. Equipment at this plant was generally well anchored and performed well. Approximately 10% of the glass bottle inventory was destroyed when it fell from the 5 m tall product shelves. The loss of the stacks is critical since the plant cannot operate without them. The estimated BI is up to six months.

3.1.11 *Steel Fabricating Plant*

This lightweight steel fabricating plant, built in 2003, is southwest of the city of Mianyang, 40 kilometers from the fault rupture. No major damage was observed to either structural or nonstructural components (Figure 16), except for some broken window glass, which was caused by excessive building displacement. However, this facility sustained a BI of one week of BI after the earthquake.

3.1.12 *Packaging Plant*

This packaging plant is located in the Hanwang township of Mianzhu. The plant was constructed of precast roof panels over steel trusses supported by steel columns, and URM infill walls. These walls did not have adequate out-of-plane anchorage and many sections, including part of the roof (Figure 17) collapsed because of out-of-plane seismic excitations. BI for this plant is expected to exceed six months.

3.1.13 *Light Industrial Plant*

This light industrial plant is located in the Hanwang. The plant was constructed of precast roof panels over steel trusses supported by concrete columns. This structure performed well, except for the collapsed entrance canopy. Unanchored heavy pieces of equipment slid at least 150 mm off their base. BI is expected to be several months because of direct damage to the building and unanchored equipment.

3.1.14 *Steel Fabricating Plant*

This steel fabricating plant is located in the Hanwang. The plant was constructed with a lightweight steel roof, steel trusses, and steel braces. The structure performed well and had little damage. However, unanchored heavy pieces of equipment slid off their bases (Figure 18) causing BI of several months



Figure 15. Damaged URM stack



Figure 16. Undamaged building



Figure 17. damaged URM wall and emergency tents



Figure 18. Sliding of un-anchored equipment

3.1.15 *Commercial Buildings*

Many commercial structures performed adequately, particularly those built after the late 1990's. Typical commercial structures usually consisted of a retail stores on the ground level with three to seven stories of mid-rise residential or office occupancy above. These buildings use CIP-RC moment frames at the storefront and URM walls. The concrete columns were closely spaced and provided adequate strength and redundancy. Nonstructural damage often included damage to unbraced ceilings and equipment.

3.1.16 *Office Building 1*

The two- and four-story office building complex, still under construction, is located in the town of Juyuan, Dujiangyan City, very near the collapsed middle school building. The structural damage was minor and consisted of cracking of URM walls. Nonstructural damage was mainly the panel loss and grid collapse of suspended ceilings (Figure 19). The ceilings did not have lateral bracing.

3.1.17 *Retail with Mid-Rise Residential*

This five-story building is located in Xingfu. Construction consisted of nonductile CIP-RC columns and beams,

URM walls, and precast concrete floor planks. The corner of the structure collapsed into the street. It appears that the termination of walls above the ground floor resulted in a soft story response at that floor, leading to collapse (Figure 20). Incidentally, an almost identical building next door, only sustained minor damage, leading to the conclusion that the construction quality and detailing are the likely differences.

3.1.18 Office Building 2

This three-story office building is located in the Hanwang township of Mianzhu. It sustained minor damage, although many close by buildings had collapsed. The only visible damage was to the wood roof (Figure 21). This concrete structure has many walls, and appears to be well designed and constructed.

3.1.19 Bank of China Building

This five-story office building is located in the business district of Dujiangyan City, almost 25 km from the epicenter. Construction consisted of nonductile CIP-RC frames, URM walls, and precast floor planks. This structure collapsed (Figure 22). Bank branches experienced significant damage and collapse in hard hit areas, including those of China Construction Bank Corp. and Agricultural Bank of China. Within three weeks of the earthquake, financial institutions began providing financial services in tent banks and mobile banking stations.



Figure 19. Damaged suspended ceiling



Figure 20. Collapsed corner of the building



Figure 21. Damaged roof of the building



Figure 22. Collapsed Bank of China branch

3.1.20 Residential (Houses and Apartments) Buildings

Many houses collapsed because of the Earthquake. Most of the collapses were in older, traditional URM bearing wall construction or in modern buildings that had soft stories at the ground floor. Typical traditional houses are composed of URM walls and wood roof systems with clay tiles for waterproofing. This type of system has little lateral capacity and ductility. The roof tiles are lighter and thinner than the similar Japanese version and are not interlocked. Thus, in earthquake, they dislodged and saved the structure by reducing the inertial mass. Some URM mid-rise structures, with the exception of units with configuration irregularities, performed adequately. Since a typical apartment is very small, many interior partition walls were used in construction. This configuration provided additional shear strength and redundancy and improved the performance of the building.

3.1.21 Residential Village North of Mianzhu

This small village of residential structures sustained severe damage and over 80% of the buildings collapsed (Figure 23). The structures were built of brick walls and wood-frame roofs with lightweight black roofing tiles.

3.1.22 Apartment Building Complex

Several eight-story apartment buildings, constructed of URM bearing walls and concrete slabs, constitute a complex in the center of Hanwang township. Many diagonal shear cracks occurred in the walls between windows (Figure 24), but the buildings did not collapse due to the redundancy and lateral capacity provided by the network of interior walls.

3.1.23 Residential Complex

In this complex, a construction detail was used that called for connecting the adjacent residential units via a narrow corridor with a large number of windows. Hence, this portion of the complex, had little lateral stiffness or strength. The corridor URM walls for this complex failed, resulting in a portion of the building tilting and dropping by 3 m, and causing a vertical split in the corridor (Figure 25).



Figure 23. Collapsed residential units



Figure 24. Cracked URM walls



Figure 25. Vertical split and displaced apartment complex

4. LIFELINES

Lifelines serving the earthquake area in Sichuan Province include transportation infrastructure, electric power, telecommunications, road and rail lines, and local potable water supplies. All these systems suffered serious damage and prolonged service outage. Transportation systems serving the earthquake-affected area are a combination of road and rail. Movement of personnel, heavy equipment, and hardware to support repair efforts was seriously impeded by closures of both highway and rail lines. Power and telecommunications were the first lifelines to be restored, with most of the disrupted service area back in operation within a week of the earthquake. Water systems normally take longer for full restoration, with many communities in the most heavily shaken areas still isolated from adequate transportation or water service a month after the earthquake.

4.1. Bridges and Roadways

Over 3000 bridges and 16000 km of highway were damaged. The fault rupture crossed some bridges and in these instances, significant damage was observed. Roadway damage (Figure 26) was the result of ground shaking (acceleration), surface rupture, and earthquake related geotechnical issues such as landslide, and slope instability.

4.2. Railways

Railways were damaged because of shifting ground (Figure 27), slipping, or settlement. Rail lines are especially susceptible to earthquake damage because they must remain in alignment and therefore have less tolerance for ground shaking and movement. Rail-line restoration trailed behind roads. Many rail routes are electric powered and therefore require restoration of the power grid.

4.3. Electricity Generation and Distribution

The Sichuan Province power grid lost about 40% of its load following the earthquake. As in past earthquakes, damage to the power system was concentrated in the most critical, high-voltage substations. Fifteen 220-kV substations and a critical 500-kV substation were out of service primarily because of the collapse of tall ceramic switchyard equipment. Additional effects to the power system included sporadic damage to high-voltage transmission lines, most often due to landslide beneath transmission towers in mountainous regions. Figure 28 shows the damage to a substation located near Mianzhu, approximately 20 kilometers from the fault rupture. This substation was shut down for five days because porcelain components of high voltage elements dislodged

from their steel pole base. URM walls, subjected to out-of-plane seismic excitation and lacking bracing, also failed. In addition, water pipes into the substation's supply tank failed, elongating the downtime for this substation.

4.3.1 Telecommunications

Damage to communications systems was concentrated in about 12 counties in the most heavily shaken area. A total of 616 landline switching stations (central offices), 16500 wireless stations, and 11000 km of fiber-optic line were reported as damaged. Damage to this infrastructure included partial collapse of building enclosures of switching stations; collapse of interior switch racks, power supply, and other equipment; and damage or misalignment in towers supporting microwave antennae.

4.3.2 Water

China Urban Water Association (CUWA) reported that 7800 km of water pipes and 839 tanks were damaged. Pipeline damage was attributed to the ruptures in the rigid buried pipes subjected to seismic waves, ground shaking, and differential displacement. A water tower, constructed of URM, is located in the town of Juyuan, adjacent to the Juyuan Middle School collapse. The tower has leaned extensively and threatens the adjacent, and undamaged, commercial building; thus making the building inaccessible. There is also a large shear crack in the tower wall (Figure 29). It is unlikely that this structure would be repaired.

4.3.3 Dams

This area of China is the basin of many rivers flowing from the nearby mountains. There are thousands of dams in this region and many were subjected to severe ground shaking. Over 2400 large and small dams were damaged. The Three Gorges River Dam was not damaged. However, hundreds of important dams either collapsed or were seriously damaged.



Figure 26. Damaged roadway



Figure 27. Damaged roadway

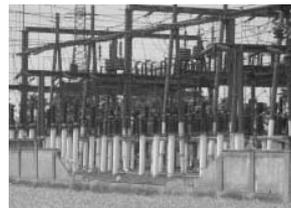


Figure 28. Collapsed URM wall at a substation



Figure 29. Shear crack in URM water tower

5. EMERGENCY RESPONSE

The severity of the earthquake and the exceptional damage were unexpected. The human and infrastructure loss was unprecedented. Nonetheless, shortly after the earthquake, the Chinese government mobilized the emergency response team and dispatched rescue and recovery teams. The national disaster plan was initiated and the plan was executed exceptionally well following the earthquake. Within 24 hour of the earthquake, national emergency response had begun, over 150000 local and army core rescues and 30000 medical staff had arrived at the hardest hit areas. Thousands of emergency tents had been setup. Personnel disinfected the area and survivors to prevent spread of infectious diseases. The only noticeable omission was a system of tagging the surviving buildings (green for safe, yellow for damaged, and red for dangerous) to provide valuable information to public.

6. SEISMIC RETROFIT

Nearly all the collapsed buildings had low strength, or stiffness, and ductility; little redundancy; questionable load path, and some undesirable seismic configuration (soft story, short columns, or irregularity). Cost-effective retrofit options are available to mitigate such deficiencies. Typical options are listed in Table 1 and schematically shown in Figure 30. Since schools, hospitals, and apartments can be classified as important buildings and high-density population areas, the presented options emphasize these buildings. While the basic ideas discussed here do not address substandard construction, retrofitting might have prevented the sudden and total collapse of many buildings and the subsequent loss of life. The retrofit options are intended to provide the basis life safety goal; that is to prevent collapse. Higher retrofit goals such as minimizing structural damage or immediate occupancy are also possible, albeit at a greater monetary cost.

Table 1. Proposed building retrofit options

Building Type	Deficiencies	Retrofit design
All	Lack of diaphragm action	Check strength and ductility of the RC ring beams. Reinforce and confine them as needed. Add ring beams at each floor if they are not present.
URM bearing wall	Lack of lateral capacity and ductility	Add full-height ductile, RC shear walls on the exterior of the building
		Apply engineered cementations concrete (ECC) to the exterior of the walls
		Place the structure atop of seismic isolators
Nonductile RC moment frame with URM infill	Inadequate joint capacity, lack of column confinement, captive columns	Add full height ductile RC shear walls on the exterior of the building
		Cut the connection between the partial height infill URM walls and concrete columns; Wrap columns using FRP; Add prestressing or confinement to joints to; Add shotcrete to the existing members
		Place the structure atop of seismic isolators
Soft story at ground floor	Lack of lateral stiffness and capacity at a floor	Add single-story ductile RC shear walls on the exterior of the building
		Add single story steel braces on the exterior of the
		Add viscous or Visco-elastic dampers to the ground floor

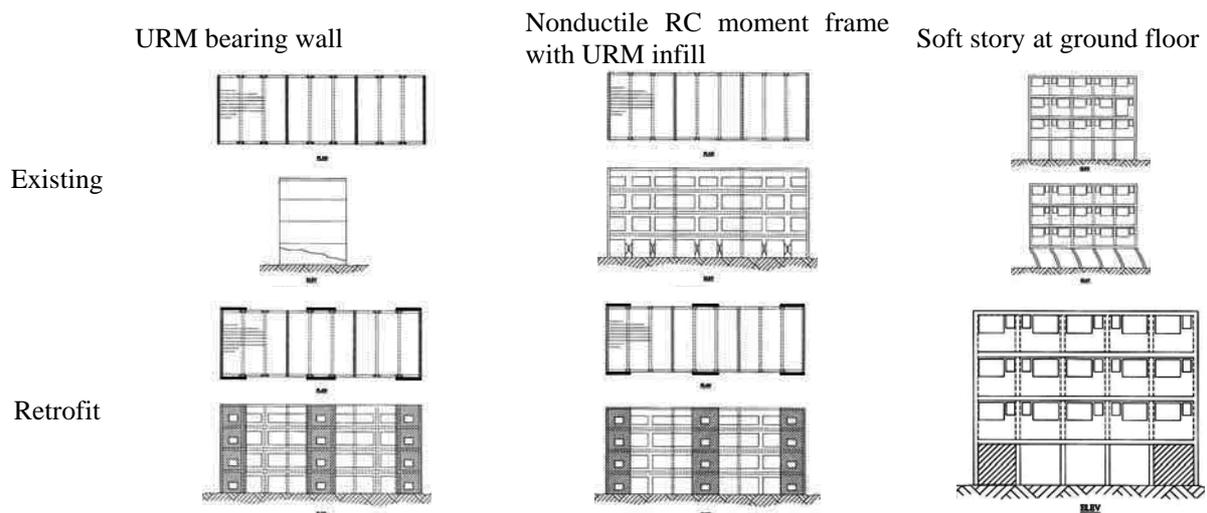


Figure 30. Proposed retrofit schematics

7. SUMMARY, CONCLUSIONS, AND RECOMMENDATIONS

The Sichuan, China, Earthquake did not produce results that were unexpected. The reconnaissance data and literature surveyed showed the following.



- Nearly all the collapsed were constructed with very little seismic resistance, ductility of redundancy. URM bearing wall, nonductile concrete moment frames, questionable load path, lack of diaphragm, poor detailing, and non-desirable structural configurations all contributed to the observed damage.
- China is not an exceptional case when considering vulnerable structures. The recent earthquakes all shown strikingly similar findings when it comes to collapse of susceptible nonductile buildings. Nonductile and vulnerable constructions perform poorly in earthquakes.
- It is vital to identify seismic hazards and to develop retrofit programs for hazardous structures.
- International communities and structural engineers must share their knowledge, developing and building on lessons learned from past mistakes, and increase awareness of earthquake risks.

8. REFERENCES

Briefing by Xi Guohua, 19 May 2008 17th CPC, Central Committee, Central Commission for Discipline Inspection

Briefing by Gu Junyuan, 19 May 2008 Chief Engineer of the State Electricity Regulatory Commission

British Geological Survey (BGS)

China Earthquake Networks Center (CENC) <http://www.csi.ac.cn/>

Banking <http://www.grgbanking.com/english/>

NASA Earth Observatory

United State Geological Survey (USGS)

New York Times

閉会の辞

Closure

東京工業大学 人間環境システム専攻 大町達夫

Tatsuo Ohmachi, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

1. 21COE から GCOE へ

2003年7月にスタートした21世紀COEプログラム(略称 21COE)「都市地震工学の展開と体系化」は2008年3月末で終了し、グローバルCOEプログラム(略称 GCOE)「震災メガリスク軽減の都市地震工学国際拠点」へ引き継がれることになった。JSPSの21COE委員会による正式な事後評価結果はまだ発表されていないが、21COEからGCOEへ無事にバトンタッチできた事実が、合格点の必要十分条件と勝手に解釈し、21COEのリーダーとしての使命と責任が辛うじて果たせたとの思いを強くしている。過去5年間に関係各位から賜ったご支援とご協力に、まずは厚くお礼を申し上げたい。

GCOEでは、筆者は「ご意見番」としての役割が期待されているらしいので、以下その観点から2,3の意見を述べてみたい。

2. 国内唯一の地震工学COE拠点

最近5年間だけを振り返っても、2003年十勝沖地震(M8.0)、2004年新潟県中越地震(M6.8)、2005年福岡県西方沖地震(M7.0)、2007年3月能登半島沖地震(M6.9)、2007年新潟県中越沖地震(M6.8)、2008年7月岩手・宮城内陸地震(M7.2)などの被害地震が日本国内で続発している。海外にも目を向ければ、2004年12月スマトラ島沖地震(M9.0)以降、インドネシアでの一連の被害地震をはじめ、2005年パキスタン北部地震(M7.6)、さらには2008年6月中国四川省の地震(M8.0)などの大規模地震被害が発生している。このような状況の中で、わが拠点が日本で唯一の地震工学のCOEに採択され、多額の資金を国家予算から安定的に配分される意味を、われわれ関係者は今一度、胸に手を当てて考えてみる必要があると思われる。

3. わが拠点の特長と基本姿勢

21COEのスタートにおいて、我々は学内に分散している東工大建設系の総力を結集して地震災害の軽減に貢献することを誓い、まず活動拠点として都市地震工学センター(CUEE)を1923年関東地震の80周年目にあたる2003年9月1日に設置した。それ以降、20名の事業推進担当者に協力者を順次加えながら、教育、研究、社会貢献を3本柱とする諸活動を多くの仲間とともに展開してきた。地震工学関連分野の研究者数が多いことが、わがCOE拠点の最大の特長と言える。現有の教育研究施設は明らかに不十分ではあるが、懐手でそれを嘆くよりも、多くの有能な人材を擁している利点を大いに活用して可能な限りの有意義な成果をあげることに汗を流して欲しい。

地震工学は、社会に直接役立つ学問や技術で、医学や商学と同様に典型的な実学である。どんなに高級な理論を掲げようとも、それが地震災害の軽減に役立たなければ、空論と言われ、無意味と見なされる。拠点の特長を活用して地震災害の軽減に役立てる方策には、長期的/短期的な方策、ハード/ソフトな内容など、極めて多種多様なものがありうるが、実学である都市地震工学を推進する上での基本姿勢として、国内外における地震災害の現場にわが身を置いて、災害の原因や波及状況、あるいは被災者の困窮を、単なる傍観者や評論家としてでなく、当事者としての立場で見つめること、すなわち現場主義に立脚するのがわが拠点到相応しいと筆者は思う。

4. 明確な目標設定

GCOE のキックオフに際して、今後5年間にわが拠点をどのような姿にしたいのか、達成目標を明確に描いて具体的に提案し、それを全員で共有するとよいと思われる。

21COE では「東工大を地震工学のショウケースにする」ことを目標に掲げて、メンバーの全体会議で繰り返し唱えた結果、関係者全員の合言葉にもなった。この目標のもとに、すずかけ台キャンパスに新設された超高層免震建物を中心に据えた地震観測ネットワークシステムの構築を構想した。当初は反対意見もあったが、最終的には立派なシステムが構築でき、今やわが拠点の貴重な共有財産となっている。またこの目標は、緑ヶ丘の教育研究施設の整備や専門書の刊行、各種会合の開催などの活動を円滑に推進する上でも役立った。

GCOE のキーワードである「震災メガリスクの軽減」と整合する平易な達成目標が高々と掲げられれば、目標に至る具体的な針路や進路が自ずから明らかになるに違いない。

5. GCOE は団体競技

先日の北京オリンピックでは、「思いの強い者が最終的に勝利する」といった意味の言葉がメダリスト達によって何度も語られていた。彼らの目標は「金メダルを取る」あるいは「オリンピックへ出る」と単純明快であり、周囲からも温かい支援が提供される環境にあったが、それでもなお目標達成への道程が決して平坦でなかったという苦労話にも感動させられた。水泳で大活躍した某選手は、帰国後、子供たちに向かって「大きな夢をもって、あきらめず、頑張っで欲しい」と語っていたが、並外れた能力をもつ選手でさえも金メダルを取った瞬間には感無量で「何も言えネー」状態であった。

GCOE をオリンピック競技にたとえるのはやや乱暴だが、わが GCOE プログラムは本質的に団体競技と類似している。応募申請書の事業計画に記述されているように、教育・研究・社会貢献に関連する多種多様な活動内容があり、それらを事業推進担当者や協力者で分担して、GCOE 事業は推進される。この事業を円滑に運営するには適材適所で、負荷がなるべく均等になるように役割分担を決定し周知することが肝心であると同時に、分担者が自分の役割を十分理解して率先して役割を果たすことも不可欠である。途中で故障者・退場者がでる時もある。その時は、損失を最小限に抑制するよう周辺の者が早期にそのカバーに回ることの重要性も、団体競技とのアナロジーから指摘できる。

6. 燦然と輝き続ける CUEE に

わが拠点が日本唯一の地震工学の COE に選定されてから、5年が経過した。文字通りの世界最高レベルの COE 拠点として世界中で認知されるまでには、今後一層の努力と実績とが必要なことは言うまでもない。「名実ともに世界に冠たる COE になる」との大きな夢をもち、夢の実現に向けて全員の総力を結集し、困難に遭遇してもあきらめず頑張る決意を各人が抱いて欲しい。

GCOE 全体の期間は5年間でも、中間評価が目前に控えている。21COE と同様の日程とすれば、

中間評価用調書の提出締め切り	2010年1月	(キックオフシンポから1年3ヶ月後)
中間評価ヒアリングの実施	2010年5月	(キックオフシンポから1年7ヶ月後)
中間評価結果の公表	2010年10月	(キックオフシンポから2年後)

となる。中間評価結果はわが拠点を継続発展させる上でも非常に重要な意味をもっている。

都市地震工学センター (CUEE) が震災メガリスクの軽減に目に見える貢献を果たして、地震災害に苦しむ多くの国の人々から感謝・尊敬されるとともに、「世界最高の理工系総合大学」を目指す東工大の中で燦然と輝き続ける存在となることを願ってやまない。

(2008年9月9日)