



土質材料による建造物の耐震性に関するセミナー（SismoAdobe2005 in Peru）への参加報告

海外編

独立行政法人建築研究所国際協力審議役 榎 府 龍 雄
社団法人国際建設技術協会 上席調査役 野 村 聡

1. はじめに

世界各地で大規模な地震が発生するたびに大きな被害が発生している。その被害は地震対策の十分でない開発途上国において著しく、その中でも特に経済的に恵まれない低所得者層において甚大となっているといわれている。

独立行政法人建築研究所は、建築・住宅分野の総合的な公的研究機関として、その有する蓄積を活用して、これまでも開発途上国の地震対策の推進に資するため、日本や海外における研修、セミナー等による開発途上国の人材育成や各国における研究開発活動の中心となるべき地震防災センターの設立の支援等の種々の活動を実施してきている（本誌6月号より連載されている「建築・住宅分野における開発途上国技術援助プロジェクト紹介シリーズ」にお

いてそれらの概要を紹介させていただくこととしている）が、本年度、これまでの蓄積を踏まえて、一般庶民が居住する伝統的な工法の住宅に焦点をしばり、その被害軽減を図るための総合的な戦略造りについての研究開発プロジェクトの企画・構想を立案するためのフィージビリティスタディを実施している。

また、社団法人国際建設技術協会は、開発途上国に対する技術援助に取り組んできており、地震防災分野では、「途上国建設技術開発促進事業」として、2001年度から2003年度にペルーを対象に実施された「耐震性住宅技術」プロジェクト、2004年度に採択され現在実施中のイランを対象にした「簡易耐震補強技術」プロジェクトに取り組んでいる。

今般、ペルー共和国リマ市において、土質材料



図 1 SismoAdobe2005のポスター

による構造物についての地震対策をテーマとする SismoAdobe2005と題する国際セミナーが本年5月に開催されたことから、両機関よりこれに参加し、これらの活動の成果を紹介するとともに、それぞれの機関が今後活動を進める上で必要となる情報の収集を行った。本稿では、そこでの発表と入手情報の概要の紹介を行うものである。なお、今後、入手した文献の翻訳（大部分はスペイン語）、調査、分析等を進め、この分野での世界の主要な活動の概要の紹介もしたいと考えている。

2. セミナーの概要

2005年5月15日から同19日の4日間にわたり、ペルー共和国リマ市のカトリカ大学キャンパス内の2つのオーディトリウムにおいて、「SismoAdobe2005, Architecture, Construction and Conservation of Earthen Building in Seismic Areas」（地震危険地域における土質材料による建築物、構造物とその保全）と題するセミナーが開催された。主催は、ペルーカトリカ大学（PUCP, Pontificia Universidad Católica del Perú）、プロテラプロジェクト（Proterra）、CYTEDプロジェクト（CYTED, El Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo）、地震工学研究所（EERI, Earthquake Engineering Research Institute）、ゲティ保全研究所（The Getty Conservation Institute）である。（本稿「2. 8）主要な研究開発、プロジェクト等の動向」参照）

セミナーは、発表者（口頭及びポスター）が29



写真 2 ペルーカトリカ大学のキャンパス
手入れが行き届いており大変きれいに
整備されている

カ国に及び本格的な国際セミナーで、参加者は概ね250名、大学、研究機関等の研究者の他、建築家、コミュニティで活動している実務家の参加も相当あった。

下記のような盛況な発表状況で、各国の取り組みが幅広く紹介されるとともに、主催者の一員であるカトリカ大学がキャンパス内の振動台を用いて、アドベ建築物の実大振動実験（第1日に無補強のもの、最終日にカトリカ大学が提案している補強を施したもの。本稿「2. 6）実大試験体による振動台実験のデモンストレーション」参照）も実施するなど、大変充実した内容のものであった。長時間、長期間にわたるセミナーであるにも拘らず各日の最終セッションや最終日になってもほとんど参加人数に変化が無い（退席者がほとんどいない）ことも驚きであった。



写真 1 セミナーのメイン会場のオーディトリウム



写真 3 セミナーの開会

発表の状況

4日間のセミナー全体としての発表者の状況は以下のとおり。(最終プログラムベース。実際は一部入れ替わりがあった。両者の重複を除くと発表者の国の数は、29カ国。)



写真 4 セミナーのメイン会場の状況



写真 5 ポスターセッション会場



写真 6 クロージングセレモニー
主催者関係者と運営をサポートしたスタッフ

- 口頭プレゼンテーション (発表時間一人当たり30分) 57セッション (18カ国)
- ポスター発表 55人 (23カ国)

アドベに関する発表内容の概要

1) 幅広く使われているアドベ

「アドベ」と聞くと開発途上国の低所得者層の住宅材料というイメージを持ちやすいが、本セミナーの発表のうちこのタイプのものは半分程度で、かなりのものは文化財保護の分野の研究開発に関するものであった。アドベは、世界で最も歴史が古く、また最も広く使われている建築材料のひとつであり、住宅以外にも広範に使われてきており、当然文化財として扱われているものにもアドベのものが多くあることである。文化財として研究対象となっている建物としては、宗教施設、王宮、集会施設等のモニュメンタルなものが多いが、表面仕上げがされていることも多く、一見すると石造か煉瓦造と思ってしまうものが多い。また、平屋建てのアドベ構造に、2階と庇を木造で増築した住宅も紹介されていたが、外観はコロニアルスタイルの木造住宅としか見えない。

分布エリアも、「アドベ」と聞いて思い浮かべる地域よりはるかに広い範囲に分布しており、今回研究対象として紹介されたものだけでも、中南米、中近東、南アジア以外に、アメリカ合衆国、イタリア、ニュージーランドがあった。アメリカ合衆国ではスペイン文化の影響が強かったカルフォルニア州には特に多く、これらの耐震診断、補強計画作成を行うコンサルタントが業として成り立っている、強制規定の構造基準がある、また、地震国であるにもかか



写真 7 クスコ市内の王宮の修復現場



写真 8 クスコ市内の王宮の修復現場
敷地内で修復に用いるアドベを製作している

ならずニュージーランドでは新築のアドベ住宅が現在でも毎年8～15棟建設されており、その構造基準が整備されている等アドベに関する認識を大きく改めさせられたセミナーであった。

2) アドベの評価、再評価

「アドベ」というと、構造的に脆弱というイメージを持っていたが、これも必ずしも正しくないことも認識させられた。多くのプレゼンテーションでアドベ構造の耐震性に関連する報告がなされたが、ほとんどのものの中で、歴史的に種々の工夫がなされてきており、一定の耐震性を有している、被害が著しいのはそれから逸脱してしまったものであるという趣旨が述べられていた。それらの主要なものは以下のとおり。発表者のほとんどがアドベに愛着を持った人々であることを割り引く必要があると思われるが、ある程度の耐震性能を有していたことは間違いないように思われる。

* セミナーにおけるアドベの耐震性に関する報告内容の例

- ペルーでは、伝統的にカーニャ（篠竹のようなもの）などで補強がされており、ある程度の耐震性を有している。スペイン侵略以前の建築で何度も大きな地震を経てきているもので構造的に問題のないものが相当あり、中には1500年以上経ているものもある。被害が著しいのはスペイン人が建築したもので、伝統的な技術が失われてしまった後のものである。
- イランのバム地震でも、伝統的なアドベ構造では倒壊を免れているものが多い。倒壊したものは、鉄骨を用いる等をしている近年のものが多い。一



写真 9 クスコ市内の王宮の修復現場
修復を終えた部分。耐震性を高めるため、長辺の壁を相互に繋ぐ木材によるタイバーが設置されている。

方、エンジニアがしっかり耐震設計をしたものは、町全体が壊滅状態になったにも拘わらずそのまま使用できる状態のものも僅かであるが存在する。

また、近年の地球環境問題、自然志向等の視点から、アドベを再評価する次のような主張もなされた。

* セミナーにおけるアドベを再評価する報告の例

- アドベは自然素材を原料として、少ないエネルギー消費により製造された材料で地球環境に優しい材料である。現在使われているアドベを焼成して煉瓦にするとしたら膨大な量の燃料等を消費し、莫大な二酸化炭素を排出することになる。アドベは将来的にもっと活用が図られるべきである。（その延長で、建築家ももっと積極的に取り組むべきである、「アドベ」はローコスト、ロークオリティというイメージが付きまってしまうので別の名称（例えば「ジオブロック」）を使うようにしようなどとの提言もあった）
- ニュージーランドでは、自然素材である土質材料による建築を愛好する人の集まり（Earth Building Association 会員275名、一般市民約50%、ハウスピルダラー、建築家、行政等約50%）があり、毎年8～15棟程度新築されており、そのための技術基準が整備されている。（実例として紹介されたものは、約600m²の平屋の郊外住宅、建物全体が植物で覆われた環境共生住宅など）



写真 10 ニュージーランドの Earth Building Association の紹介スライド
背景は同国の Earth Building の一例



写真 12 振動台を用いたアドベ建築の実験の報告
振動方向に対して面外の壁が大きく変位し、
構造上不利となっている部分が破壊している

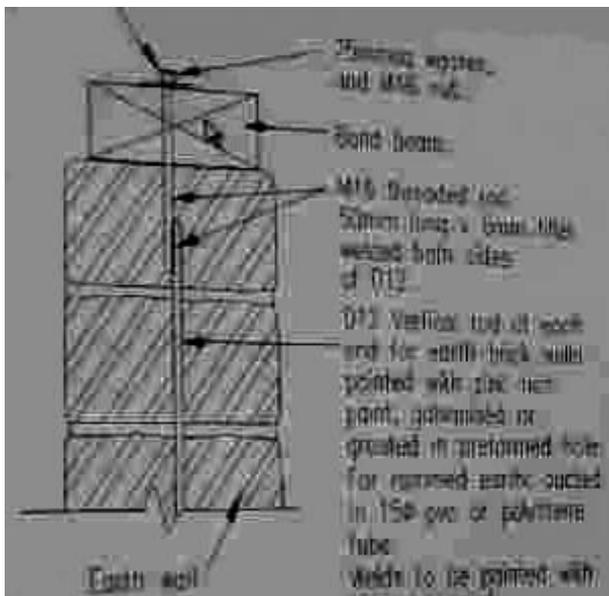


写真 11 ニュージーランドの Earth Building の補強方法の紹介スライド
壁内部を貫通して垂直に基礎から補強の鉄筋が立ち上げられている
壁の上端には木材の臥梁が配置され鉄筋はこれに固定されている

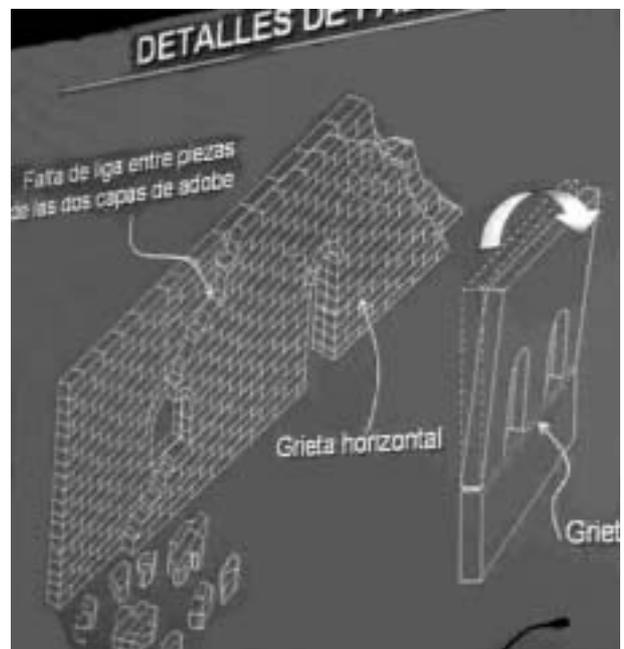


写真 13 地震による被害の典型パターンの説明スライド
開口部周辺に破壊を生じやすいことが説明されている

3) 耐震性に関する報告

SismoAdobe というセミナーのタイトルからも分かるように、セミナー開催の主要な関心が地震対策であり、歴史的な建築物の現状の調査、地震後の被災建築物の調査、試験体の静的繰り返し加力試験、傾斜台を使った加力試験、振動台実験（縮小モデル、実大モデル）など多様なタイプのアドベの耐震性に関する報告が行われた。また、部材レベル、建物全体についての種々の補強方法の提案、その検証のための実験の結果の報告も多く寄せられていた。

4) 補強方法の提案

前述のように研究対象が、文化財的なものと低所得層の住宅に大別でき、その補強方法も前者ではコストは気にせずに補強材も制約無く試行しているのに対し、後者では低コストで使用材料も住宅所在場所で容易に入手できるものに限定して研究開発が取り組まれている。ここでは、筆者の関心の所在から後者に限定して、セミナーで紹介されたものを列挙させていただく。以下では、多様な提案がなされていることを、補強方法等の切り口で説明しよう

するものであり、具体的な補強提案の多くは複数の方法の組み合わせにより、建物全体としての耐震性能の確保が図られていることに留意していただきたい。

対象住宅

大部分は、2階建てまでのものを想定している。

中には、耐震性への配慮から2階をアドベ以外のより軽量の構造とするものもあった。(エクアドル、Patricio Cevallos 他)

また、木材の補強部材を使うことにより4階建てにするという提案もあった。(コロンビア、ロスアンデス大学)

補強方法

① 水平方向

* 補強材と壁とを一体化するタイプ

水平に連続的な補強部材を設置するもので、原則として外壁すべてを連結するように配置している。補強材の一般名称は、tie band、horizontal beltなどで、壁の上端部(2階床レベルを含む)に設置するものは、collar beam、窓の上端部では、continuous lintel、下端部では continuous sill などとも呼ばれている。また、目地の中に敷き込む方法も多く試みられている。

* 補強材を独立した形で設置するタイプ

平行する壁を相互に緊結するもの(tie bar、tie beam などと呼ばれている)が多いが、壁の隅部を日本の火打ち梁のように連結する提案もあった。

② 垂直方向

補強部材を一定間隔でアドベを貫通させて配置したり、目地部分に敷き込んだりするものがほとんどで、補強部材を付加したような外観のものは、水平方向の場合とは異なり、ほとんど無かった。壁体外部に補強材を添えるような事例、補強部材で枠組みをつくりアドベを充填するような例もあった。また、水平の独立補強材を設置する場合にその部材を受ける部分等荷重が大きくなると想定される壁の部分の補強する趣旨から壁厚を増したりする方法をとる例があった。

③ 水平平面部材の剛性向上

2階床、屋根面などの水平平面部材の剛性を高めることを目的とした工法の提案もあった。

④ 特定部位の補強(開口部周辺、壁の端部等)

構造的な弱点となりやすい開口部周辺、壁の端

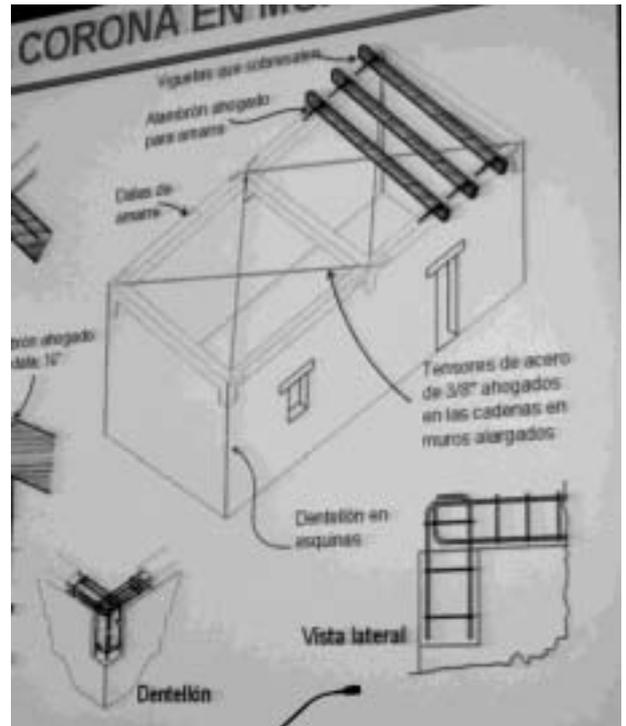


写真 14 建物全体についての補強の提案のスライド
屋根面の部材(横架材とクロスパー)による水平面の補強と壁の交差部分、壁の上端部の補強などが提案されている

部を局部的に補強する提案も種々のものがあった。

補強材料

① 植物材料、植物繊維

植物系の材料は歴史的に長期間使われてきた材料で、報告内容としては、歴史的建築物に用いられている工法の分析・評価、現在の工学的知見に



写真 15 カーニャを格子状に配置する補強方法を示すスライド
プaster状のもので仕上げをされている



写真 16 カトリカ大学の実験施設で作成中のアドベ試験体
垂直方向はカーニャがそのまま、水平方向は目地部分にクラッシュしたものが配置されている



写真 17 カトリカ大学の実験施設で作成中のアドベ試験体
種々の補強方法の試験体が製作されている

基づく検討等からの種々の提案などのタイプのものが多かった。それぞれの地域で容易に入手できる材料を対象に行われており、ペルーではカーニャと呼ばれる篠竹のような素材(相当堅いもの)が主たる対象である。使い方は、丸のまま、日本の割竹のような形にするもの、クラッシュして扁平にして使うもの、更にそれを直角方向に編んでシート状にしたものなどがある。ほとんどの研究機関が、何らかの位置づけで(補強方法の検討を行う出発点、最終的な今後の補強提案など)取り組んでいる。(以下に紹介する他の多くの材料は、このタイプのものの代替(入手が困難になっている、強度が不十分等から)として検討しているという説明が多かった)

① 木材

木材も上記の植物系の材料と同様に、歴史的に使われてきた素材である。ほとんどは製材した状態で植物繊維の紐、スチール等の材料を使って緊結するものである。単材のもの他、組み立て梁のような提案もあった。

② 鉄筋

多くの補強方法の提案の中で用いられている。

材料はそれぞれの国で一般に流通しているものが対象となっており、日本の鉄筋コンクリート造で使われているものよりは細いものが多いように見受けられる。

③ 金属メッシュ

大変多様なものが試行されており、材料の金属バーの口径の大きいものからあげると、

- 3mm程度のバーを格子状にして、交点を溶接したもの(ペルーカトリカ大学等)
- 上記のものを溶接でなく針金で縛った物
- メッシュ状の製品として流通しているもの(鶏舎に使われる金網、外構のフェンスに使われるものなど。セミナーにおいては、具体的な補強提案の紹介にはほとんど登場しなかった。)

④ プラスチックメッシュ

廉価で引っ張り強度の期待できる材料で、金属メッシュ等の代替となりうるものを検討する中で、候補となってきているようである。具体的な材料自体は、既に他の用途で相当使われており、市場で廉価に流通しているものを主として対象と



写真 18 カトリカ大学の実験施設で作成中のアドベ試験体
細い金属メッシュを壁面に張り付けた試験体

している。

本セミナーの主催者の一員であるペルーカトリカ大学のグループにより、セミナーの一環として行われた下記のデモンストレーションはその代表的なものである。

㊦ ナイロンストラップ

ナイロンストラップにより壁上端部の外周をバンド状に取り巻くという提案に採用しようという例があった。(イラン Kauffman)

㊧ PPバンド

ダンボール箱の荷造り等に用いられるポリプロピレンのバンドが世界中どこでも安価に取得することに着目した提案である。(日本。本稿「3.

2) イランにおける「簡易耐震補強技術」プロジェクト参照)

㊨ ビニール繊維を編んだ米袋

米の販売の際に使われるもので使用後捨てられてしまうものを、その引っ張り強度に着目して、再利用しようとする提案があった。(ペルー国立工科大学)

5) 検証方法

傾斜台 (tilting table) や、静的荷重の繰り返し加力によるものが多いが、震動台を用いた震動実験も相当数の報告があった。スケールは、1/5、1/3、1/2 などの他、小規模な試験体ではあるが実大実験も数例報告されていた。(平面寸法 3 × 3 程度)

6) 実大試験体による振動台実験のデモンストレーション

セミナーの一環として、会場となったペルーカトリカ大学キャンパス内の構造試験施設の振動台 (5 × 5 程度。震動方向は 1 軸。) を使用して、カトリカ大学マーシャル・ブロンディッド教授により、3 × 3 程度の実大のアドベ試験体を用いた震動台実験のデモンストレーションが実施された。セミナー第 1 日目 (5 月 16 日) に無補強のもの、最終日 (同 19 日) にプラスチックメッシュを用いて補強がなされたものについて実施された。

カトリカ大学は、前項のように各種の補強材料を用いた補強方法の研究開発を長年にわたって実施していき、今回のものは現時点で、入手が容易で廉価 (道路の法面保護などに広く使われている材料)、ある程度の引っ張り強度を有するなどから最も有力と考えられるとのことであった。耐久性につ



写真 19 カトリカ大学による振動台デモンストレーションの実大試験体 (無補強モデル)



写真 20 カトリカ大学による振動台デモンストレーションの実大試験体 (無補強モデル) 振動により大きく破損した状態 (振動方向は手前の壁面の方向)



写真 21 カトリカ大学による振動台デモンストレーションの実大試験体 (無補強モデル) 振動により振動方向に対して面外の壁が大きく破損していることが分かる

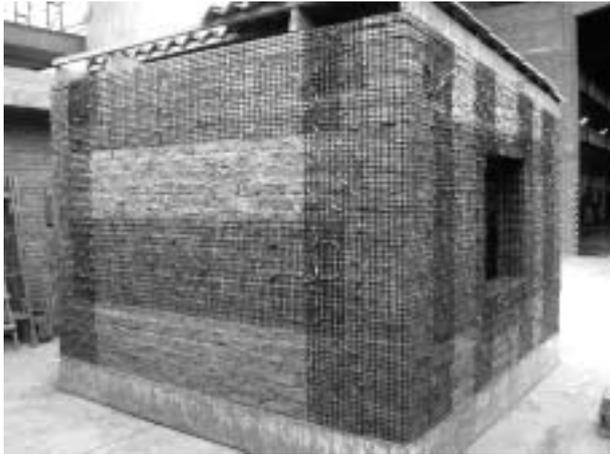


写真 22 カトリカ大学による振動台デモンストレーションの実大試験体（補強モデル）プラスチックメッシュにより補強されている状況



写真 23 カトリカ大学による振動台デモンストレーションの実大試験体（補強モデル）振動後の状況。壁体自体は相当ひどく破壊しているが、プラスチックメッシュにより倒壊を免れている状況が分かる

いての質問があったが、完璧な材料とは考えていないが現在使用可能なものではベストと考えている旨の回答であった。

補強材料自体、鉄筋等の通常の補強材料と比較して強度的に相当劣りそうで、定着方法も荷造り用のビニール紐で結ぶという簡易な方法で、実際に効果があるのか疑問に思ったが、予想に全く反して結果は大変大きな効果があることを示していた。

無補強試験体の実験は、倒壊のメカニズムが、多くの文献や今回のプレゼンテーションでも共通に指摘されているように、震動方向に対して面外の壁体が大きく振れることによりそのうちの構造的な弱点部分で破壊が始まり、倒壊に至るということを裏付

けるものであった。

一方、補強されたものは、壁の内側と外側に帯状にメッシュを張り、相互に荷造り紐で結びつけることにより、面外の振れを押さえるとともにクラックが大きくなった後の壁材の崩落を防ぐことができ、結果的に壁面自体はボロボロの状態になっても壁面の倒壊は防ぐことができていた（基礎への定着、壁上端部での壁内外は補強材の緊結は行っていない）。

7) 幅広い視点、分野からのアプローチ

粘土の適性

各地の各種の粘土を取り寄せ、アドベの材料に適したものを調べる研究や、アドベに適したものを選別するための簡易な試験方法の開発などが行われている。（ペルーカトリカ大学他）

混和材、混和剤

乾燥によるヒビ割れの防止等のため、引っ張り強い植物繊維（日本の土壁の場合の藁に類似）や砂を混入することが歴史的に行われてきたが、その種類、量、更に新しい材料の可能性について研究されている。

また、少量（10%以下）の石膏、セメントを混入することにより強度を高めようとする試みもいくつか取り組まれている。

製造方法

製造時に材料に圧力を加えることも広く行われており、それらをコンパクティドアドベなどと呼び、そうしたプロセスを経ていないもの（シンプルアドベなどと呼ばれている）と区別しているようである。

物理特性

強度や吸湿による膨張・収縮、塩分による影響などの特性についての報告もされた。（ベルリン国立

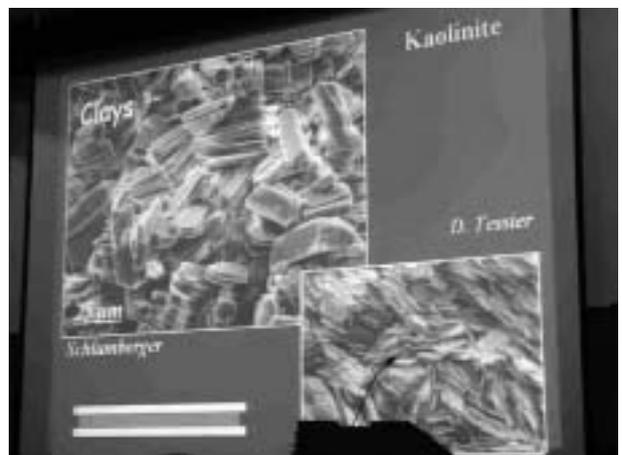


写真 24 アドベの電子顕微鏡写真のスライド

博物館。中東の古代遺跡の崩壊メカニズムの解明が直接的な動機のようにあった。)

粘土粒子の結合強度と含有水分の関係を、物理学的なアプローチから明らかにしようという試みも紹介された。(フランスからの報告。下記8) 主要な研究開発、プロジェクト等の動向の ProTerra プロジェクトの一環。)

8) 主要な研究開発、プロジェクト等の動向

今回のセミナー参加等から明らかになった、今後この分野の研究開発に取り組もうとする場合に、内容を十分に把握しておく必要があると思われる重要な研究開発、プロジェクト等をここに列挙させていただく。資料の多くがスペイン語であること等から内容を把握するには時間を要するため、今後作業が進んだ時点で改めて概要の紹介をさせていただくことにしたい。(下記以外にも、この分野で注目すべき活動は例えば南アジア等にも存在している。)

ペルーカトリカ大学 (PUCP)

USAID 等の援助により、1970年代よりアドベ研究を積極的に実施。震動台を所有しており、それを活用した実験研究も多い。

プロテラ (ProTerra)

ゲティ保存研究所 (アメリカ合衆国カリフォルニア州。1953年に設立された博物館が出発点となり、現在は財団、博物館、研究所、保存研究所の4つの組織で構成されているゲティグループの一つ) の資金援助により、18カ国の研究者が参加する国際的、総合的なアドベに関する研究開発プロジェクト。研究対象は、文化財、一般住宅等すべての土質材料による建築物、構造物で、参加者の分野は、研究者 (大学、研究機関等) 約60%、実務者 (NGO、建築家等) 約40% である。別名 GSAP (Getty Seismic Adobe

Project) とも呼ばれている。

地震工学研究所 (EERI Earthquake Engineering Research Institute)

研究者、実務者、教育者、行政官、建築行政関係者等から構成される、1949年に設立されたアメリカ合衆国カリフォルニア州の非営利の研究所。ノンエンジニアドを含めた世界各国の住宅とそれに関連する幅広い情報を提供する World Housing Encyclopedia が有名であるが、現在これをベースに、構造種別毎に簡明な手引き書 (Tutorial) を作成中 (アドベについて、スペイン語版、英語版が完成。枠組み組積造のスペイン語版まで完成。今後、RC造にも取り組む予定とのこと。) また、アドベに関連する研究者、実務者向けのメールマガジンを発行 (2005年3月発行) 更に現在新たなウェブサイト作成のための準備中であり、そのあり方についての意見交換が本セミナーの中で行われた。

GTZ-CERESIS-PUCP-SENCICO プロジェクト

CERESIS (中南米12カ国とスペインの地震学の研究者を中心に結成されている国際組織) のイニシアティブで GTZ (ドイツの援助機関) の援助により実施されたプロジェクト。耐震構造技術は PUCR (ペルーカトリカ大学) が担当し、SENCICO (ペルー政府住宅・建設省管下の、技術基準の作成・普及、技術者の育成等を担当する機関) がモデル住宅の建設、技術トレーニング等を実施した。

アドベ住宅の低コストの耐震補強を普及することを目的とするもので、ペルー国内6地区、ボリビア、コロンビア、チリ、エクアドル、ベネズエラにおいてモデル住宅を建設し、地域の技術者のトレーニング等も実施。

