

建築・住宅分野における開発途上国技術協力プロジェクト紹介シリーズ チリの構造物耐震設計および 地震災害軽減技術研究協力プロジェクト

北海道大学大学院教授 緑 川 光 正

1. はじめに

チリ共和国は南米大陸の南西部に位置し、南北の長さ4329kmに対して幅が150km前後の細長い国である。かつてはチリ硝石で知られ、戦後は1960年チリ津波で知られた地震国である。地形的には、東から西へアンデス山脈、中央平野、海岸山脈の南北に細長い3地域に区分される。北は長さ1000kmに及ぶ砂漠、東は標高5～6000の高峰が林立するアンデス山脈、西と南は太平洋に囲まれ、他の南米諸国から隔離されたいわば陸の孤島である。人口は約1500万人で日本の8分の1、面積は75.6平方kmで日本の約二倍である。国土が南北に細長いために気候も千差万別であり、北部の乾燥砂漠地帯、中央部の温和な地域、南部の多湿寒冷針葉樹林地帯の3地域に大別される。首都サンチャゴは福岡とほぼ同じ緯度（南緯33度）にあり、気候も温和で四季がある。3Wの国（Weather、Women、Wine）というのは、サンチャゴのことといえよう。ちなみに、サンチャゴ付近から100km位南までがワインの生産地である。



図 1 チリ共和国

チリと日本は共に環太平洋地震帯上にあり、過去幾度も大規模な地震による甚大な被害を被ってきた。地震工学に関する日本とチリの交流も古くから行われており、例えば、建設省建築研究所国際地震工学部（現 独 建築研究所国際地震工学センター）ではチリからの研修生を含めて1960年から延べ1000名以上受け入れている。これらの背景の下、チリと日本との間の技術協力を推進するために、国際協力



写真 1 アンデス山脈が背後に迫るサンチャゴ市内（1989年）



写真 2 チリの高層アパート（1989年）
サンチャゴの西方ピニャデルマル海岸



写真 3 カトリカ大学構造土質工学科の入り口(1998年)



写真 4 JICA 供与機材の構造実験施設(1998年)

事業団（JICA、現（独）国際協力機構）は、1988年12月からの3年間と1994年10月からの3年間の2度に亘り研究協力プロジェクトを実施した。これらは研究協力を主目的とするプロジェクトで、ミニ研究プロジェクトと呼ばれ、JICA としても初めての試みであった。本プロジェクトの日本側代表機関は建設省建築研究所（現（独）建築研究所、以下、建設省建研と呼ぶ）であり、チリ側カウンターパートはカトリカ大学の構造土質工学科の教官10名である。彼らの殆どは米国で博士号を取得している。カトリカ大学は1888年カトリック教会組織によって創設された私立教育機関だったが、1923年からは国立大学組織に組み込まれた。

2. 第一フェーズの研究協力

チリと日本との間の研究協力を推進するために、JICA は1984年以降4度にわたり技術調査団をチリに派遣した。これらの調査を経て、以下に紹介する研究協力プロジェクトが1988年12月1日より3年間の予定で開始された。

研究協力プロジェクト：チリにおける構造物の耐震設計（1988年12月～1991年11月）

- 1) 地震工学プログラム：サンチャゴ市における設計用地震力の評価
- 2) 構造工学プログラム：鉄筋コンクリート造及び補強組積造建築物の耐震性能評価
- 3) 土質動力学プログラム：構造物と基礎の耐震設計に用いる土の動的特性評価

計画に従い、1989年1月11日から長期専門家として翠川三郎氏（東京工業大学）がカトリカ大学に派遣され、地震工学プログラムに関する研究協力が実施された。他のプログラムにする研究協力も1990年から順次実施に移された。

研究協力の各プログラムの内容は以下の通りである。

地震工学プログラム（サンチャゴ市における設計用地震力の評価）

R. Riddell カトリカ大学教授と翠川三郎長期専門家を中心に実行された。貴重な強震観測記録も収録され、成果が蓄積された。

研究目的は、サンチャゴ市内の地盤の異なった地域で予想される地震動の特性を反映した設計用地震力を設定することである。この目的を達成するためには、まず、1) 種々の地盤条件における地震動特性を把握すること、2) サンチャゴ地域の代表的建物の動的応答特性を評価することが必要である。このため、強震観測と常時微動測定が実施された。

デジタル強震計、再生・解析装置、常時微動測定装置などの機材が供与され、1989年7月中旬に所定の観測地点に強震計が設置された。この強震計により、1989年7月22日にサンチャゴ市から北西約100kmのキンテロ沖合いで発生した地震による強震記録などが得られた。また、常時微動測定により、サンチャゴ市内の約100棟の建物についてその振動特性調査が実施され、その結果は1989年8月の第5回チリ地震学・地震工学会議で報告された。

構造工学プログラム（鉄筋コンクリート造及び補強組積造建築物の耐震性能評価）

研究目的は、補強組積造と鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性能を実験によって解明し、強度と変形能力をより正確に予測しうる理論を確立することである。チリにおいて建設されている建物の殆ど全てが主要な耐震要素として耐震壁を使用しており、得られる成果はこれらの建物の耐震設計を改善することに大きく貢献する。研究成果は、Institute of National Stational Standards に対して、補強組積造並

びに鉄筋コンクリート造の耐震設計基準の改定案として提出され、実務に反映されることが計画された。

このプログラムは、カトリカ大学構造工学科（当時）で実施中の実験研究プログラムの一環として位置付けられ、計画されている試験体の一部を対象とした実験が、アクチュエータと反力フレームなどの供与機材を用いて行われた。

土質動力学プログラム（構造物と基礎の耐震設計に用いる土の動的特性評価）

研究目的は、土の繰り返し強度や液状化可能性等の基本的な動力学特性と基礎構造の耐震設計との関連性を調査することである。地盤変状に伴う構造物の被害は、地盤の支持力の低下や地盤の液状化並びに大きな変位が発生する地盤によって生じ易い。従って、地盤上または地盤中の構造物が被害を受け易いような地盤を主な対象として調査を行う。研究成果は、地震地帯における基礎や上部構造物の耐震設計の確立に貢献する。

研究の具体的な進め方については、まず、強震計設置地点のボーリング調査を行い、同時に不擾乱試料の繰り返し三軸試験を行って、地震応答解析に必要な地盤物性を整備する。また、サンチャゴ市内で液状化が生じ易いと考えられる地点で地震観測を行い、液状化発生の可能性がある砂層中の間隙水圧および地表面加速度を測定する。一方、幾つかの地点を対象として、繰り返し三軸試験装置を用いた不擾乱試料の液状化試験及びピエゾコーン（三成分コーン）を用いた原位置調査を行う。これらの結果をまとめて、液状化に対する調査・試験方法、予測方法、液状化に関して危険性を有する地域などの検討を行う。

ピエゾコーン、原位置間隙水圧及び加速度測定装置、繰り返し三軸試験機用セルなどの機材が供与された。

以上の第一フェーズ研究協力に係わって派遣された事前調査団、長期・短期専門家、短期専門家チーム、セミナー等は以下に示す通りである。なお、所属は派遣当時であり、派遣時期、専門家氏名等の詳細が不明なものもある。

- ・事前調査団（1984年11月23日～12月21日、セミナー開催含む）
北川良和（建設省建研）今井弘（筑波大学）
大岡弘（建設省建研）
- ・事前調査団（1986年1月8日～2月1日、セミナー開催含む、メキシコ地震被害調査含む）
北川良和（建設省建研）上之園隆志（建設省建研）山田恭央（筑波大学）

- ・事前調査（1988年4月15日～30日）
平石久廣（建設省建研）
- ・事前調査団（1988年10月11日～16日）
北川良和（建設省建研）他
- ・長期・短期専門家（長期は6カ月間超、短期は6カ月間以下）
翠川三郎（東京工業大学）1989年1月～1990年4月：地震工学プログラム担当
安田進（九州工業大学）1990年4月～9月：土質動力学プログラム担当
和泉正哲（東北大学）1990年9月～12月：構造工学プログラム担当
小川淳二（東北大学）1990年12月～1991年7月：構造工学プログラム担当
和泉正哲（東北大学）1991年8月～11月：構造工学プログラム担当
- ・短期専門家チーム（1989年8月3日～20日）
北川良和（建設省建研）大久保全陸（九州芸術工科大学）安田進（九州工業大学）
平石久廣（建設省建研）緑川光正（建設省建研）
- ・第5回チリ地震学・地震工学会議（1989年8月7日～11日）
- ・短期専門家（1990年4月）安田進（九州工業大学）
- ・短期専門家（1990年6月25日～7月10日、セミナー開催含む）北川良和（建設省建研）
- ・短期専門家チーム（1991年6月8日～22日、セミナー開催含む）
平石久廣（建設省建研）他
- ・評価調査団（1991年10月26日～11月3日）
小泉重信（建設省建研）北川良和（建設省建研）
- ・フォローアップ個別専門家チーム（1993年4月3日～17日）
北川良和（建設省建研）他

3. 第二フェーズの研究協力

第一フェーズ研究協力プロジェクトは、協力の妥当性、目標の達成度、自立発展性（供与機材の活用状況、発展性）組織強化（研究体制、他機関よりの評価）研究成果の活用（活用、整備、財政的裏付）等について高く評価されて1991年11月30日に終了した。第一フェーズプロジェクト終了後の1993年4月に派遣されたフォローアップ技術調査団は、研究協力終了後も供与機材が引き続き有効に活用され、新たな研究成果が上げられていることを確認すると



写真 5 翠川長期専門家宅にて(1989年)
後列左から大久保、安田、平石、翠川、筆者、
前列左から北川、翠川夫人、田川令嬢、田川の各氏

もに、更に高度な研究協力を実施することが適切かつ有用であることを JICA に報告した。また、カトリカ大学側からも新たな研究協力に関する強い要請があった。1994年8月に事前調査団が派遣され、カトリカ大学との協議の結果、新たな研究協力が以下のように定められ、1994年10月1日から開始された。

研究協力プロジェクト：チリにおける構造物群の地震災害軽減技術(1994年10月～1997年9月)

- 1) 地震動および建物応答評価
- 2) 構造物被害評価および補修
- 3) 地盤災害評価

第一フェーズプロジェクトと同様に、JICA による長期・短期専門家派遣、研究協力担当者の受け入れ、機材供与が実施され、研究協力、研究情報交換、セミナー開催等が実施された。

第一フェーズプロジェクトが個々の構造物の耐震設計技術の向上を目指したのに対して、第二フェーズプロジェクトは都市やその周辺に存在する構造物群の耐震安全性の向上を目指したもので、都市地震防災の観点がより強く打ち出された。

研究協力の内容は以下の通りである。

地震動および建物応答評価

地盤上3地点の強震観測点が設置され、第一フェーズプロジェクトで設置された観測点を含めて太平洋沿岸からサンチャゴに至る直線的な観測点アレイが構成された。また、サンチャゴの高層建物にも多チャンネルの強震計が設置された。これらの強震記録は整理され、年報の形で公表されている。

1997年10月14日にサンチャゴの北約300kmで Ms6.8 の地震が発生し、アドベ造建物が倒壊し、約10名の死者が出た。この地震の際にサンチャゴのカトリ

カ大学構内で得られた加速度記録は、最大加速度 30cm/s^2 と小さいが、継続時間は数十秒に渡った。このようなチリのサブダクション帯で発生した地震記録の解析結果は、チリのみならず日本のサブダクション帯での地震による地震動特性を検討する上でも参考になる。

構造物被害評価および補強

第一フェーズプロジェクトで供与された構造実験用加力装置の性能向上が図られた。この加力装置によって耐震壁のせん断破壊実験や柱梁接合部及び短柱の構造実験が多数行われた。これらの実験結果に基づいて、今後、耐震壁を解析モデル化して弾塑性応答解析を行い、建物の耐震性を正確に評価することが計画された。チリの建物に対する耐震診断も我が国の耐震診断手法を適用して実施された。

地盤災害評価

PS 検層試験装置が供与されて鉾津ダムでの地盤調査が行われ、鉾津ダムの耐震性の評価に利用された。また、地震観測地点でも地盤調査が行われ、地震記録の地盤特性の解析に利用された。また、サンチャゴのマイクロゾーニングも行われた。そのために、約100地点で常時微動測定が行われ、斜面崩壊危険度の調査も行われた。この他にワークステーションやパソコンも整備され、チリ側カウンターパートの研究体制はより充実したものとなり、さらなる研究の進展が期待される。今後の課題としては、研究成果をいかに地震防災対策に具体的に応用していくかである。

以上の第二フェーズ研究協力に係わって派遣された事前調査団、長期・短期専門家、短期専門家チーム、セミナー等は以下に示す通りである。なお、所属は派遣当時であり、派遣時期、専門家氏名等の詳細が不明なものもある。

- ・事前調査団(1994年8月6日～16日)

平石久廣(建設省建研) 他

- ・長期・短期専門家

山崎吉高(応用地質): 地盤探査担当、多賀直恒(九州大学): 地震防災担当、山田恭央(筑波大学): 土質力学担当、小川淳二(東北大学): 構造工学担当、大町達夫(東京工業大学): 地震工学担当、年縄巧(東京工業大学): 地盤地震工学担当、小林克巳(福井大学): 耐震工学担当

- ・短期専門家チーム(1995年7月22日～8月6日、セミナー開催含む)

上之園隆志(建設省建研) 他

- ・短期専門家チーム（1997年9月20日～30日、セミナー開催含む）
上之園隆志（建設省建研）、他
- ・評価調査団（1998年3月30日～4月11日）
北川良和（広島大学）、緑川光正（建設省建研）
- ・フォローアップ個別専門家チーム（2000年3月20日～28日、セミナー開催含む）
小山信（建設省建研）、安田進（東京電機大学）、小林淳（秋田県立大学）

4. おわりに

サンチャゴは他の南米諸国と比べると非常に治安が良い所である。これも経済が比較的安定しているためであろう。また、チリの人々は温厚誠実で物静かであり、南米の他の国々とは極めて対照的で日本人には馴染み易く感じる。

筆者が1989年に初めてチリを訪れた際に受けた印象は、サンチャゴ市内の車の多さと排気ガスによるスモッグ、そしてまさに屏風のように聳えるアンデス山脈である。或る晩もの凄い雷雨があり、翌朝起きてみると道路は一面の川に変わっていた。数十km離れたアンデス山脈から雨水が一度に押し寄せたためである。いつもはスモッグで霞んでいるアンデス山脈が雨上がりで素晴らしい眺望に変わっていた。仕方なくタクシーに乗ったら車内まで浸水していた。それでも地元の人々は黙々といつものように活動しており、日本の大都会と違って自然との付き合いに慣れているのかと感心させられた。

現在のチリといえば頭に浮かぶのはワインとサーモンで日本中で見かけるが、1989年当時は京橋の明治屋でもチリワインは売られていなかった。しかし数年後には日本中で安くて美味しいチリワインが手に入るようになった。1998年に再びチリを訪れた際には、日本の技術協力でサーモンの養殖を始めたサンチャゴから1000km南にあるプエルトモン近郊のジャンキウエ湖を見た。透き通るほど綺麗な湖水で育ったサーモンはさぞ美味しいことだろうと想像したが、これも今や日本中に溢れている。互いに地球の反対側にあるにも拘わらず、経済面でも関係が拡大していると感じさせる一面である。

チリでは、他の開発途上国と同様に、異なった学問領域との交流や、研究領域の相互乗り入れが行われていない。同一研究領域においても、強震記録の公開や共同研究を通して研究の質を高め、研究者の層を厚くする試みは殆どなされていないようである。これが、研究成果が技術として社会に普及しに



写真 6 雷雨後に道路が川に変わったサンチャゴ市内（1989年）



写真 7 チリ富士とも呼ばれるオソレノ山（標高2652）を背景にサーモンが養殖されているプエルトモン近郊のジャンキウエ湖（1998年）

くい要因の一つになっている。ここに紹介した研究協力プロジェクトがこれらを促す契機になることを望むとともに、今後も様々な交流が行われることにより、地震被害が少しでも軽減されることを期待したい。

参考文献

- 1) 北川良和：チリ国への防災技術協力、地震工学振興会ニュース、No. 82、1985年5月
- 2) 北川良和：チリ国への防災技術協力（続編）、地震工学振興会ニュース、No. 88、1986年5月
- 3) 緑川光正：構造物耐震設計に関するチリとの研究協力、地震工学振興会ニュース、No. 109、1989年11月
- 4) 和泉正哲：チリとの JICA 研究協力「構造物耐震設計」、地震工学振興会ニュース、No. 124、1992年5月
- 5) 上之園隆志：チリ共和国カトリカ大学との研究協力及び1995年アントファガスタ地震、地震工学振興会ニュース、No. 151、1996年11月
- 6) 翠川三郎：チリ国との地震工学に関する研究協力、地震工学振興会ニュース、No. 158、1998年1月