

地盤工学会
2010年チリ Maule 地震による
被害に対する災害緊急調査団
報告書

平成 22 年 5 月 17 日
地盤工学会 2010 年チリ Maule 地震による
被害に対する災害緊急調査団

まえがき

チリ国は日本と同様に地震国である。過去にも 1960 年、1985 年などと大きな地震が発生し、建物や道路、鉄道構造物などに多くの被害が発生してきている。また、海岸付近で地震が発生し、規模も大きいため、津波による被害も起きてきている。ただし、その被害状況は我が国ではあまり知られてきていない。

本年（2010 年）2 月 27 日にチリ中部～南部にかけてマグニチュードが 8.8 といった巨大な地震が発生した。地球の反対の遠い国のことでなかなか被災状況は把握できなかったが、過去の地震と同様に建物や道路、鉱さい堆積場などの被害が発生し、さらに津波による被害も甚大であるとの情報もはいつてきた。その中には地盤変状に関係した被害もかなりあるのではないかと考えられた。特に、マグニチュードが 8.8 と巨大なため、種々の被害が広い範囲で発生していることが予想され、この現地調査を行うことはチリ国および我が国の今後の地震防災に役立つものと考えられた。このため、地盤工学会では緊急調査団を派遣することを決定した。同時に、関連学会の日本地震工学会、土木学会、建築学会も調査団を派遣することを決定したため、四つの学会で合同調査団を組むこととした。そして、往復を含めて 3 月 27 日から 4 月 8 日の間調査団を派遣した。

チリ国は地震国であるため、我が国とチリ国とは地震関係の研究・技術協力を過去にくっか行ってきている。特に 1988 年～1995 年まで行われた JICA による「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」では長期にわたって研究協力を行ってきた。海外の現地調査にあたっては相手国などの協力が必須であるが、今回は特に在チリ日本大使館、JICA チリ支所、チリのカトリカ大学、チリ大学などから協力を得た。文部科学省からの援助も受けた。また、現地調査にあたっては、Prof. Ramon Verdugo (Universidad de Chile), Prof. Felipe Villalobos (Universidad Catolica de la Santisima Concepción), Mr. Andrés Torres Guerrero (Universidad de Chile) に同行していただいた。また、4 学会合同で調査したため、北川良和合同調査団長以下、他学会の調査団の方々からの協力も得た。今回の調査はこれらの協力なしでは行えなかった。大変感謝する次第である。

平成 22 年 5 月 17 日 調査団一同

目次

	ページ
1. 調査目的, 調査メンバーおよび調査行程	1
2. 調査地域の地形, 地質特性	4
3. 地震動の諸元とその特徴	12
4. 液状化による建物の被害	18
5. 津波の発生およびそれによる構造物の被害	27
6. 道路盛土および橋梁の被害	32
7. 港湾施設の被害	39
8. ダムの被害	43
9. 鉱さい堆積場の被害	45
10. 海岸部の斜面崩壊および隆起	50
11. その他の被害	56
12. チリ国とのセミナーの概要	59
13. あとがき	59

調査団メンバーおよび執筆担当

地盤工学会調査団長：安田 進（東京電機大学，地盤工学会災害連絡会議複合災害専門
委員） 執筆担当：まえがき，第 1, 2, 5, 9, 10, 11, 13 章

地盤工学会調査団員：菅野高弘（(独) 港湾空港技術研究所地震防災研究領域）
執筆担当：第 7 章

地盤工学会調査団員：岡村未対（愛媛大学）執筆担当：第 6 章

地盤工学会調査団員：飛田哲男（京都大学）執筆担当：第 3, 4, 12 章

日本地震工学会調査団員：小長井一男（東京大学）執筆担当：第 8 章（地盤グループに
同行いただき現地調査を一緒に実施）

1. 調査目的, 調査メンバーおよび調査行程

1.1 調査目的

2010年(平成22年)2月27日にチリ中部～南部を震源とするマグニチュード8.8のMaule地震が発生した。チリでは我が国と同様に太平洋沿岸付近で海洋型の大地震がしばしば発生してきている。1960年にも今回より少し南の地域を震源とするマグニチュード9.5の巨大地震が発生し、地盤に係る被害だけでも液状化や斜面崩壊、盛土の崩壊、地盤の沈降などが発生した。今回の地震はマグニチュードが少し小さいものの、被災範囲は非常に広く、首都のSantiago(サンティアゴ)も被災しているとの情報が伝わってきた。ただし、日本からは地球のほぼ真反対にあり、なかなか詳細な情報は伝わってこなかった。地震後数日の間にテレビや新聞で報道されたのは、Concepción(コンセプション)やSantiagoにおけるアパートの被害、高架橋の落橋、津波による被害といった程度であった。また、Santiagoにあるカトリカ大学の教員に問い合わせても、その程度の情報しか得られなかった。

ところが、マグニチュードが8.8と巨大なことや、1960年、1985年の地震などの過去の被害例からいって、今回も地盤に係る被害がかなり発生しているのではないかと推測された。また、地盤関係の被害を現地調査することは、チリ国および我が国の将来の地震地盤工学および地震防災の発展に役に立つのではないかと思われた。そこで、地盤工学会として災害緊急調査団を派遣することになった。

1.2 調査団派遣の経緯

地盤工学会では災害連絡会議にて災害緊急調査団の派遣を検討する。今回も災害連絡会議にて地震発生後にいち早く検討が行われ、地震発生後4日後には調査団を派遣する方向で調整にはいった。同時に関連学会との調整も行われ、日本地震工学会、土木学会、建築学会との四学会合同の調査団を結成しようとの動きとなり、その調整の会議が3月9日に行われた。

国内の災害と違って海外の災害の場合には、災害緊急調査団の派遣には相手国の研究者の協力が必要である。また、調査団員も相手国のことをかなり知っておく必要がある。チリの地震災害関係に関しては、JICAによって1988年～1991年に“チリにおける構造物の耐震設計”研究協力プロジェクト、1994年～1997年に“チリにおける構造物群の地震災害軽減技術”研究協力プロジェクトが行われた経緯がある。そこで、この時のプロジェクトに関係し、また、その後もチリの地震災害関係の研究者と緊密な関係をとってきている方が、今回の合同調査団のお世話をするのが良いのではないかとその会議で話し合い、合同調査団の団長として北川良和博士(元慶応大学教授)、幹事として安田進教授(東京電機大学)と翠川三郎教授(東京工業大学)が務めることになった。そして、各学会からの調査団員も選定していくことになった。

さて、地盤関係の被害としては、道路、港湾、建物、

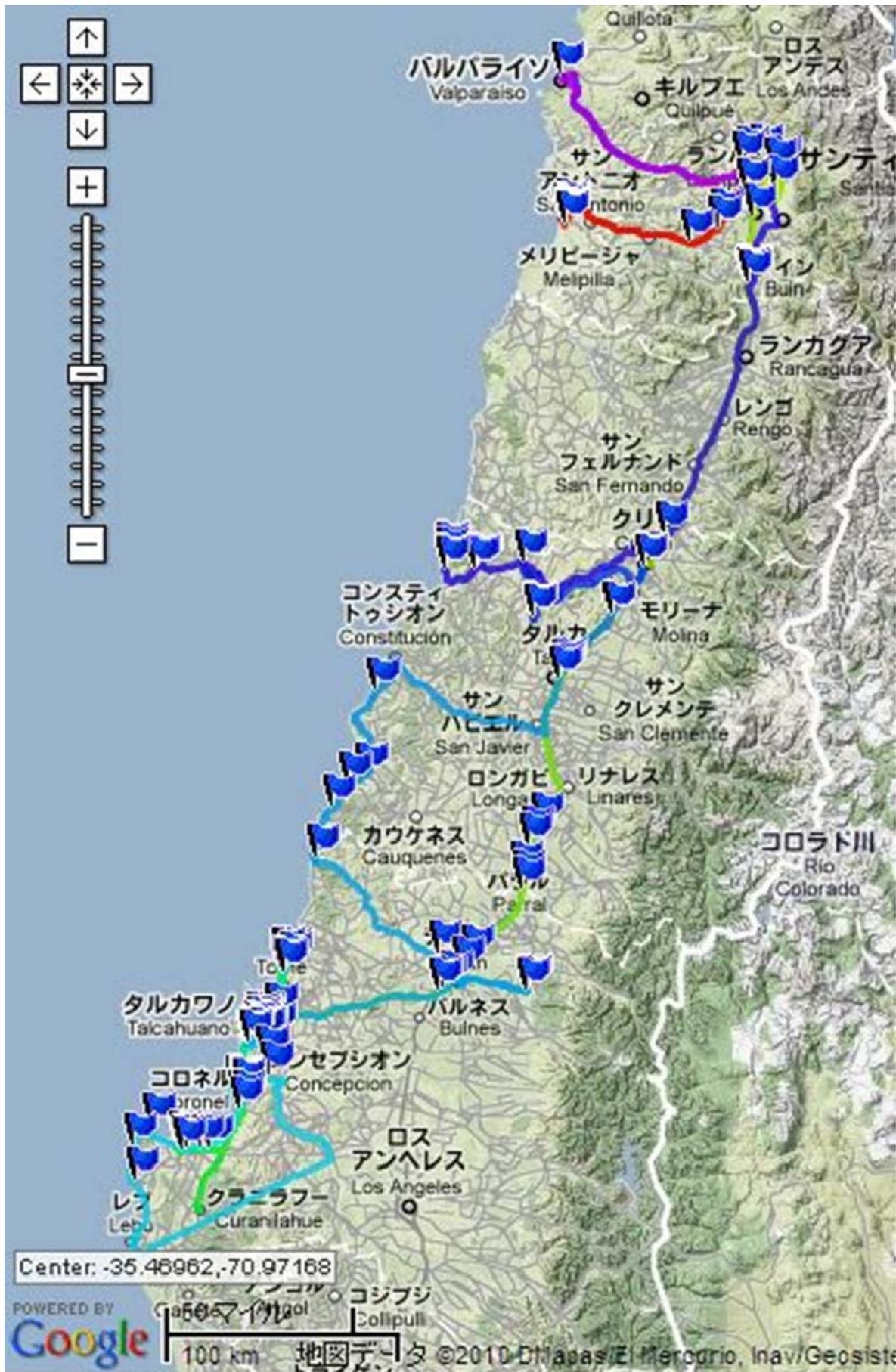
ライフライン、鉱さい堆積場などの施設で発生しているのではないかと推測された。そこで地盤工学会としてはこれらを専門にしている方々を調査団員としてお願いすることにした。そして、港湾関係で菅野高弘博士(港湾空港技術研究所)、道路関係で岡村未対教授(愛媛大学)ライフライン関係で飛田哲男助教(京都大学)をお願いし、地盤工学会での団長として安田進が務めることになった。ただし、現地調査にあたっては地盤、地震動・建築、津波、橋梁の四つのグループに分かれて調査を行うことになり、地盤グループの方に日本地震工学会からの調査団員である小長井一男教授(東京大学)に加わっていただくことになった。

このような経緯で地盤グループのメンバーが決定し、3月17日に再度合同の会議を開いて、現地に出かけた。なお、この間に関係者の努力により文部科学省から援助をいただくことになり、また、JICAにも現地における車や宿泊の手配などの協力をしていただくことになった。さらに、チリ側における協力者として、Prof. Ramon Verdugo(ベルドゥゴ, Universidad de Chile), Prof. Felipe Villalobos(ビジャロボス, Universidad Catolica de la Santisima Concepción), Mr. Andrés Torres Guerrero(トーレス, Universidad de Chile)に現地調査に同行していただけることになった。

1.3 調査範囲と調査行程

現地調査は3月28日(日)～4月4日(日)まで行い、5日にはSantiagoでチリ側の研究者と一緒に、チリの技術者・研究者向けにセミナーを開いた。現地調査のルートを図-1.1に示す。調査範囲はSantiagoからConcepciónの南のLebu(レブー)までである。以下、時間をおって調査行程の概要を述べる。

- (1) 3月27日(土): 成田空港発(18:10), Dallasで乗継ぎ
- (2) 3月28日(日): Santiago着(9:30)
 - a) ホテルにチェックイン後、Prof. Verdugoから被災概要の説明を受ける
 - b) Santiago市内の高速道路高架橋落橋箇所調査
 - c) San Antonio(サン・アントニオ)の海岸斜面変状箇所、建物被災箇所、橋梁変状箇所、津波被害箇所の調査
- (3) 3月29日(月): Santiago市内で打合せ
 - a) JICAチリ支所にて打合せ
 - b) 在チリ日本大使館表敬訪問
 - c) MWH社にてDr. Jorge Troncoso(トロンコース)らに会い、鉱さい堆積場の被害に関する情報収集
 - d) Pontificia Universidad Catolica de Chile(カトリカ大学)にて打合せ
 - e) Maipú(マイブ)にてアパート被災箇所の調査
 - f) Ministerio de Obras Publicas(公共事業所)にて港湾関係の被害に関する情報収集
 - g) Atton Hotel会議室にて合同調査団のミーティング
- (4) 3月30日(火): SantiagoからConcepciónまで調査しながら移動



図一.1.1 現地調査ルート (Google Map に GPS で記録した位置を記入したもの)

- a) Superior Hospital (スペリオール・ホスピタル) 跨線橋の落橋および取付け盛土被災箇所の調査
 - b) Curico (クリコ) の病院被災箇所の調査
 - c) Claro (クラロ) 川橋の被害調査
 - d) Talca (タルカ) のサイロ被災箇所の調査
 - e) Chillán (チジャン) のガソリンスタンド地下タンク被災箇所の調査
 - f) Concepción 着
 - g) Prof. Felipe Villalobos から Concepción における被害に関する情報収集
- (5) 3月31日(水) : Concepción から南の Coronel (コロネル), Lota (ロータ), Arauco (アラウコ), Tubul (テュブル), Curanilahue (クーラニラウエ) の調査
- a) Coronel 港にて港湾施設の被害調査
 - b) Coronel 漁港の被害調査
 - c) Lota 漁港の被害調査
 - d) Lota にて道路・鉄道盛土被災箇所の調査
 - e) Arauco にて液状化による被害調査
 - f) Las Peñas(ラス・ペニャース)の斜面崩壊調査
 - f) Tubul にて三つの橋の落橋および取付け盛土崩壊被災箇所の調査(写真-1.1に Raqui II 橋で撮影した写真を示す)。
 - g) Curanilahue にて病院の被害調査
- (6) 4月1日(木) : Concepción から北の Dichato までの調査, Concepción 市内の液状化被害箇所調査, およびヘリコプタによる Concepción から Lebu までの海岸線および Biobio (ビオビオ) 川沿いの被災状況調査
- a) Coliumo (コリウモ) における津波被害調査
 - b) Dichato (ディチャット) の高級住宅地および市内の津波被災状況調査
 - c) Concepción の Briss del Sol (ブリス・デル・ソル) における液状化による家屋被災箇所調査
 - d) ヘリコプターによる被災調査(2時間のフライト, Concepción - Coronel - Lota - Arauco - Tubul - Aguila (アギューーラ) 岬 - Lavapié (ラバピエ) - Quidico (キィディコ) - Lebu - La Laja (ラ・ラッハ) - Concepción
 - e) Concepción の Los Presidentes (ロス・プレジデント) の液状化によるアパート被災箇所調査
- (7) 4月2日(金) : Concepción 内の調査, Coihueco (コイウエコ) ダム調査, 震源付近の海岸の調査を経て Curico まで
- a) Concepción の Bayona (バイオナ) における液状化による家屋被災箇所の調査
 - b) Concepción の San Pedro del Valle (サン・ペドロ・デル・バージェ) における液状化による下水施設被災箇所の調査
 - c) Concepción の San Ignacio (サン・イグナシオ) 学校における液状化による校舎の被災箇所の調査
 - d) Ribera Norte (リベラ・ノルテ) における地盤改良
- 地区のアパート被災状況調査
- e) Juan Pablo II (ファン・パブロ・セグンド) 橋の橋梁被害調査
 - f) Concepción の Valle Noble (バジェ・ノブレ) における液状化による家屋被災箇所の調査
 - g) Coihueco ダムの被害調査
 - h) 震源付近の Cobquecura (コップケクラ) から Chanco (チャンコ), Constitución (コンスティテューション) にかけての海岸に沿った被害調査
- (8) 4月3日(土) : Las Palmas (ラス・パルマス) の調査, Iloca (イロカ) の調査を経て Viña del Mar (ビーニャ・デル・マール) まで
- a) Las Palmas の鉱さい堆積場被害調査
 - b) Iloca の津波被害箇所調査
- (9) 4月4日(日) : Valparaíso (バルパライソ) の調査を経て Santiago まで
- a) Valparaíso における港湾被害調査
 - b) Santiago のホテルの会議室にてデータ整理およびグループ内打合せ
- (10) 4月5日(月) : JICA にて打合せおよび Catolica 大学にてセミナー
- a) JICA チリ支所にて打合せおよび精算
 - b) Catolica 大学にてチリ側と合同でセミナー開催
 - c) 小長井, 菅野, 岡村, 飛田は Santiago 発 (20 : 55)
- (11) 4月6日(火) : 大使館にてミーティング
- a) 大使館にて林渉在チリ日本大使らに調査結果の報告
 - b) 大使館公邸にてチリ側関係者と昼食会
 - c) 安田 Santiago 発 (20 : 55)
- (12) 4月7日(水) : 小長井, 菅野, 岡村, 飛田成田空港着 (13 : 10)
- (13) 4月8日(木) : 安田成田空港着 (13 : 10)



図-1.1 Tubul の近くの Raqui II 橋にて

2. 調査地域の地形、地質特性

2.1 チリ国全体の地形および気候の概要

チリ国は図—2.1 に示すように総延長約 4,330km、平均幅約 175km の南北に細長い国である。面積は 756,626km² である。西側は太平洋に面し、東側には標高が 3000m～7000m といた高い Andes (アンデス) 山脈が連なっている。国土の 80% は山岳部が占める。

北部では Arica (アリカ) から Iquique (イキケ), Calama (カラマ), Antofagasta (アントファガスタ) と、写真—2.1～2.4 に示すような 1 年を通してほとんど雨が降らない乾燥した砂漠地帯が広がる。その中でも写真—2.4 に示す Atacama (アタカマ) 砂漠は世界でも最も乾燥した砂漠である。アンデスの麓に村が点在するが、ここではアンデス山脈の雪解け水によって生活がなされている。一方、太平洋沿岸では寒流 (フンボルト海流) が流れているため気温あまり上がらない。

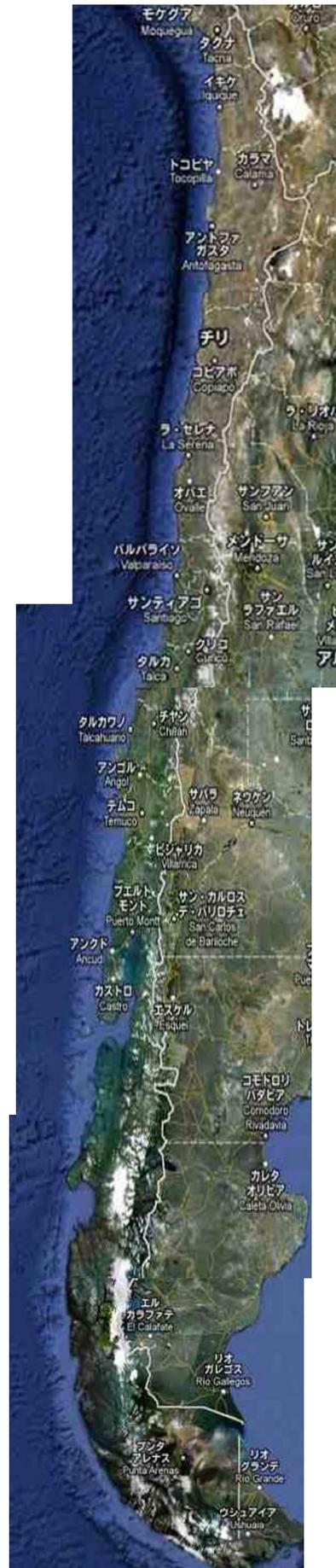
La Serena (ラ・セレーナ) あたりから南に Santiago (サンティアゴ), Talca (タルカ) といったチリ中部になると地中海性の気候の田園地帯になり、ブドウなどの果物が栽培されている。それでも降雨量は少なく、快晴の日が多い。Santiago の年間降水量は約 350mm しかない。写真—2.5 に Santiago 市内の街並みを、また、写真—2.6 に Santiago の少し南の風景を示す。写真—2.7 には少し南に下った Talca 付近の風景を示す。Chillán (チジャン) 付近では米も栽培されている。

Concepción (コンセプション) から南になるにつれて、写真—2.8 に示すように緑が増え、森林に覆われ湿度も高くなる。Valdivia (バルディビア) から Puerto Montt (プエルト・モン) の南部湖水地方では写真—2.9, 2.10 に示すように湖沼と森林地帯が広がる美しい景観が広がる。牧場も多く、火山も多い冷涼で湿度の高い気候となっている。年間降雨量も 2500mm と多くなる。

さらに南の南緯 40 度以南は、いわゆる Patagonia (パタゴニア) 地方であり、1 年の大半が冬という寒冷気候である。氷河を抱いた鋭い峰々が続いている。写真—2.11 に Torres del Paine (トーレス・デル・パイネ) における氷河で削った山を示す。

2.2 チリの地質構造 (平凡社大百科事典¹⁾ より抜粋して引用)

チリ付近では海洋プレートが大陸の下に直接もくりこんでいて、そこにアンデス山脈が形成されている。太平洋東縁には深さ 5000～7000m のペルー・チリ海溝があり、アンデス山脈との間に 1 万 m を超える高度差を生じている。主要な河谷は地質構造に支配されて山脈の走行と平行して形成されている。チリではこの河谷の発達が発弱でしかも浅い。そのため、起伏の小さい卓状の高原となっている。



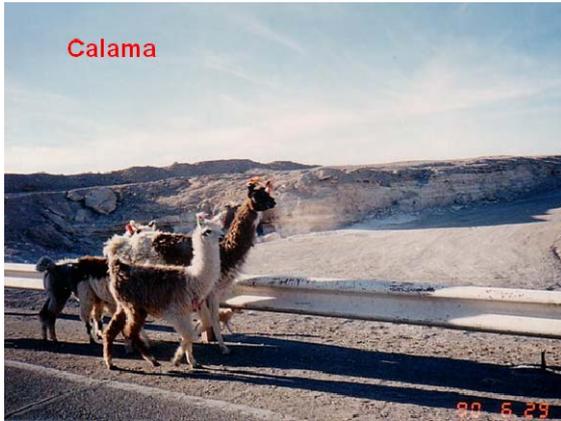
図—2.1 チリ全体の地図 (Google より)



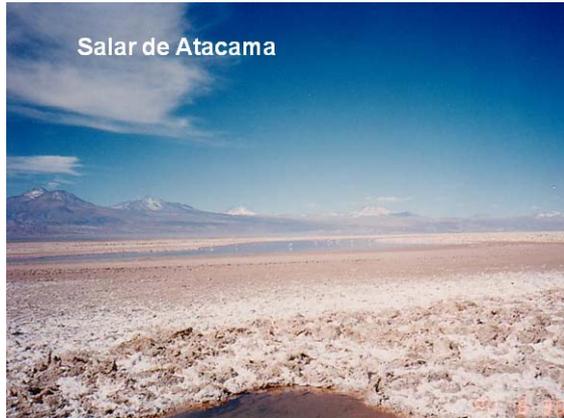
写真—2.1 Arica の風景



写真—2.2 Iquique 近くで 5 年前の地震より崩壊した建物



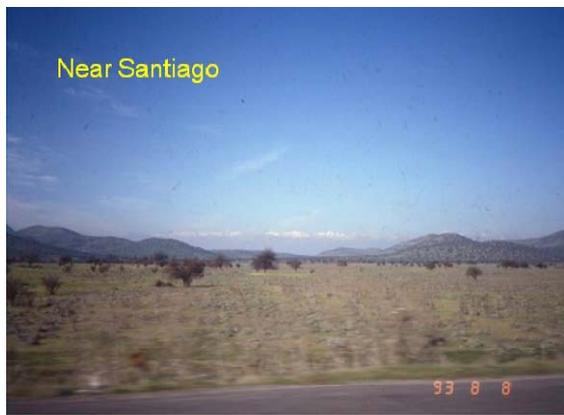
写真—2.3 Calama の風景



写真—2.4 Atacama 砂漠の風景



写真—2.5 Santiago 市内の風景



写真—2.6 Santiago 郊外の風景



写真—2.7 Talca 付近の風景



写真—2.8 Concepción 付近の山の風景



写真—2.9 Valdivia の風景



写真—2.10 南部湖水地方の風景



写真—2.11 Patagonia の氷河地形 (Torres del Paine)

アンデス山脈は海岸山脈、主脈、前山脈の三つの列からなる。海岸山脈はチリで最も顕著に発達し、起伏の小さい丘陵状の山脈で、海とは直線的な急崖で接していることが多い。主脈との間は中央縦谷と呼ばれる構造的な凹地で、主脈から流下する河川堆積物で埋められた堆積平野となっている。チリの首都 Santiago がここに位置するほか、同国の主要な農業生産活動の場となっている。

アンデス主脈部では中生代から第三紀にかけて火成活動が活発であった。それは現在貫入深成岩類として東西山系に広く認められ、チリの銅などアンデスの豊かな鉱物資源は主としてこの時代の火成作用によって形成された。

2.3 今回の地震で被災した地域の地質および土質の特性

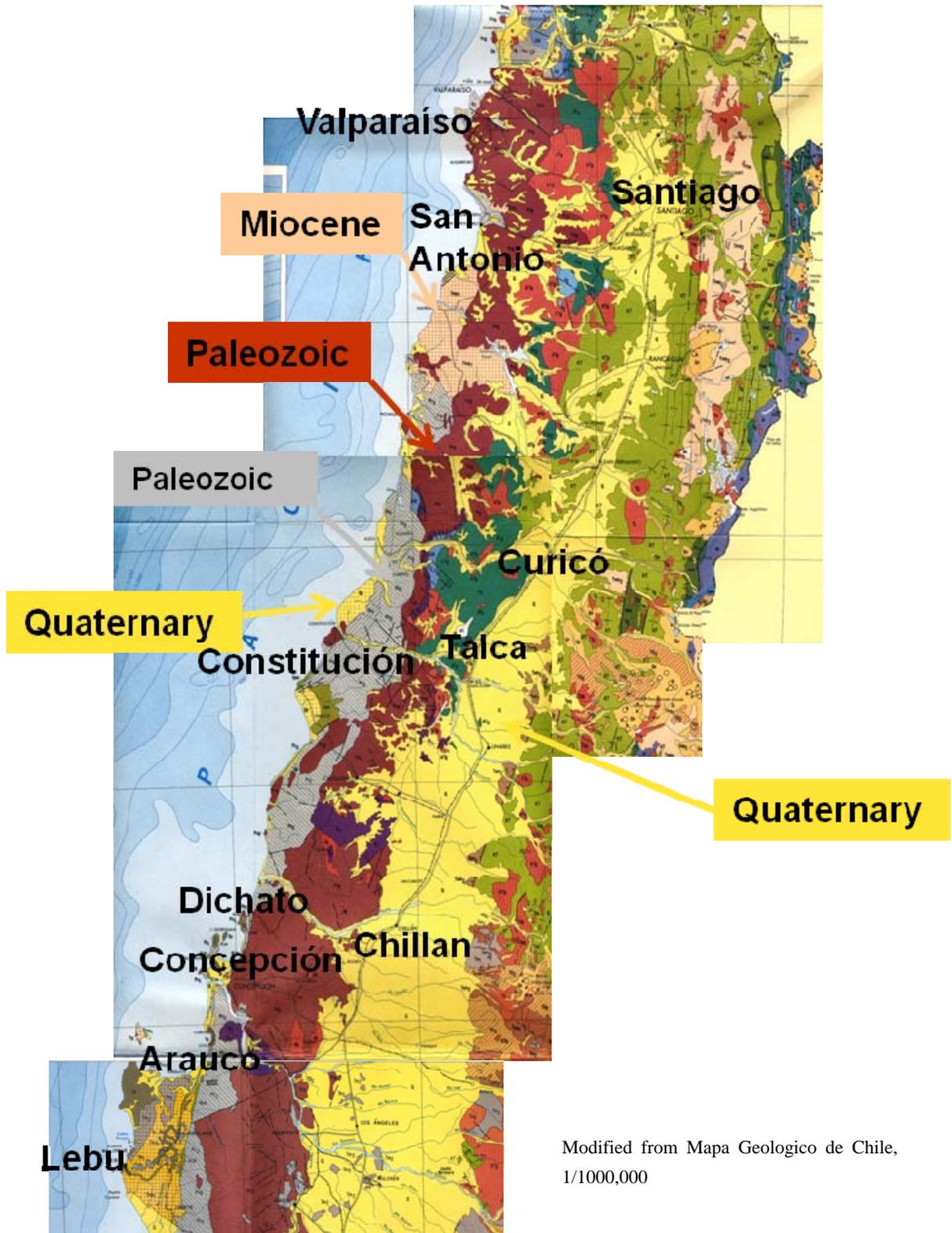
今回の地震で被災した地域の 1/1,000,000 の地質図²⁾を図—2.2 に示す。また、図—2.3 にこの地域の赤色立体地図³⁾を示す。海岸山脈は新生代第三紀の中新世(Miocene)や暁新世(Palaeocene)の地層などで構成されている。これに対し、中央縦谷ではそれより新しい新生代第四紀の堆積物で構成されている。海岸にも一部第四紀の堆積物があるが、その範囲は狭い。内陸にはいりアンデスの主脈になると新生代第三紀に加えて中生代の地層で構成されている。

土質的に見ると、気候に応じて、被災した地域の南部になるにつれて軟弱な地盤が多くなっている。なお、地震が発生した 2 月はこの地域では乾期に該当しており、盛土の被災原因としてよくあげられる直前の降雨の影響はほとんどないと考えてよいと思われる。

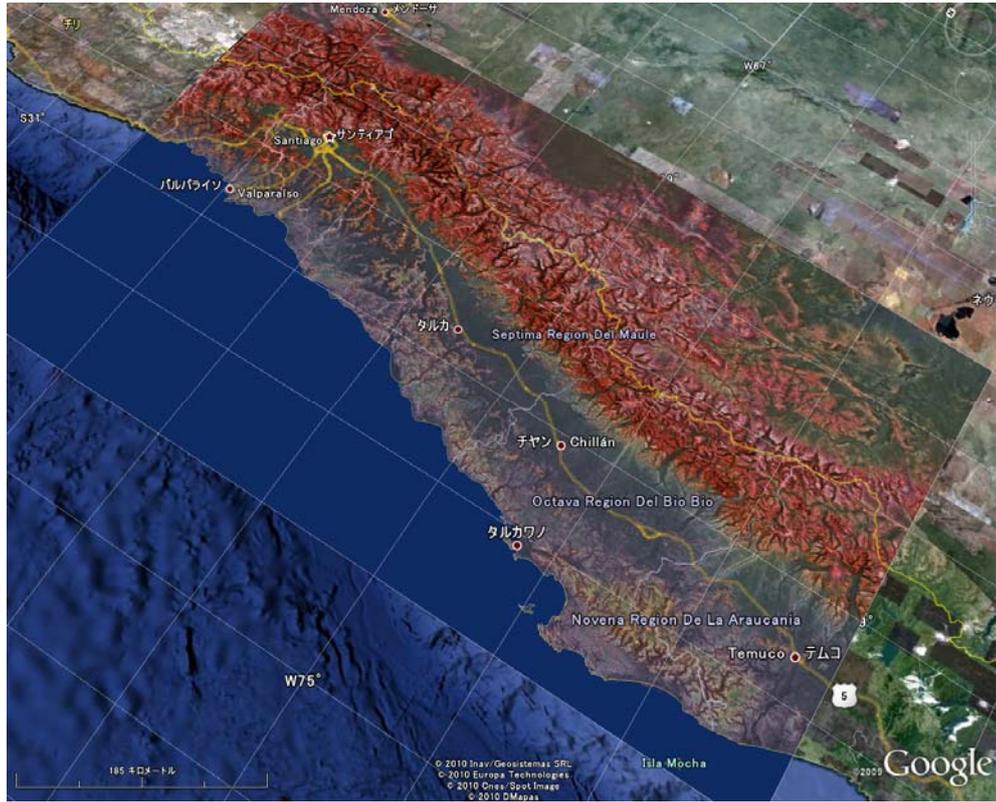
図—2.4 に Santiago の地質図⁴⁾を示す。Santiago は東西約 40km、南北約 50km にわたる広い都市であり、中心街が図中の中央から北東にかけて広がっている。ここは、北東に聳えるアンデス山脈から流れ下ってくる急流河川の Mapocho (マポチョ) 川の扇状地に位置する。市街地でも地表面勾配が結構きつく、南西側に下っている。そのため、扇状地性の砂礫が堆積している硬い地盤となっている。一方、市街地の北側に位置する San Cristobal (サン・クリストバル) の丘からさらに北西側の土質は異なっている。ここには急流河川が流れていないため、シルトなどの細粒土が堆積している。Santiago の市街地の外周に建設された環状高速道路 Américo Vespucio (アメリカ・ベスプシオ) では、今回の地震で北西部の Miraflores (ミラフローレス)、Lo Echevers (ロ・エチェベルス) で橋桁が落橋したが、これは図—2.4 に示すように、細粒土が堆積している地盤が悪い地区に該当する。その他、火山堆積物であるパミスも市内の南西部などの一部に発達している。そのうちの Maipu では第 11 章で後述するようにアパートが傾いた。その位置も図—2.4 に示す。

次に、図—2.5 に Concepción の地質図⁵⁾を示す。Concepción は Biobio (ピオピオ) 川の河口に発達した町である。中心部の Biobio 川右岸の旧市街地の地盤は良好であるが、その北西側および Biobio 川の左岸側には旧河道跡があり、低湿地のシルト質などの地盤となっている。そこが近年宅地化し新興住宅地となっている。第 4 章で後述するように、液状化による被害はこの低湿地に盛土や埋め戻した土で発生した。一方、旧市街地では第 11 章に後述するように中層建物の被害がいくつか発生したが、これは主に震動によるものである。

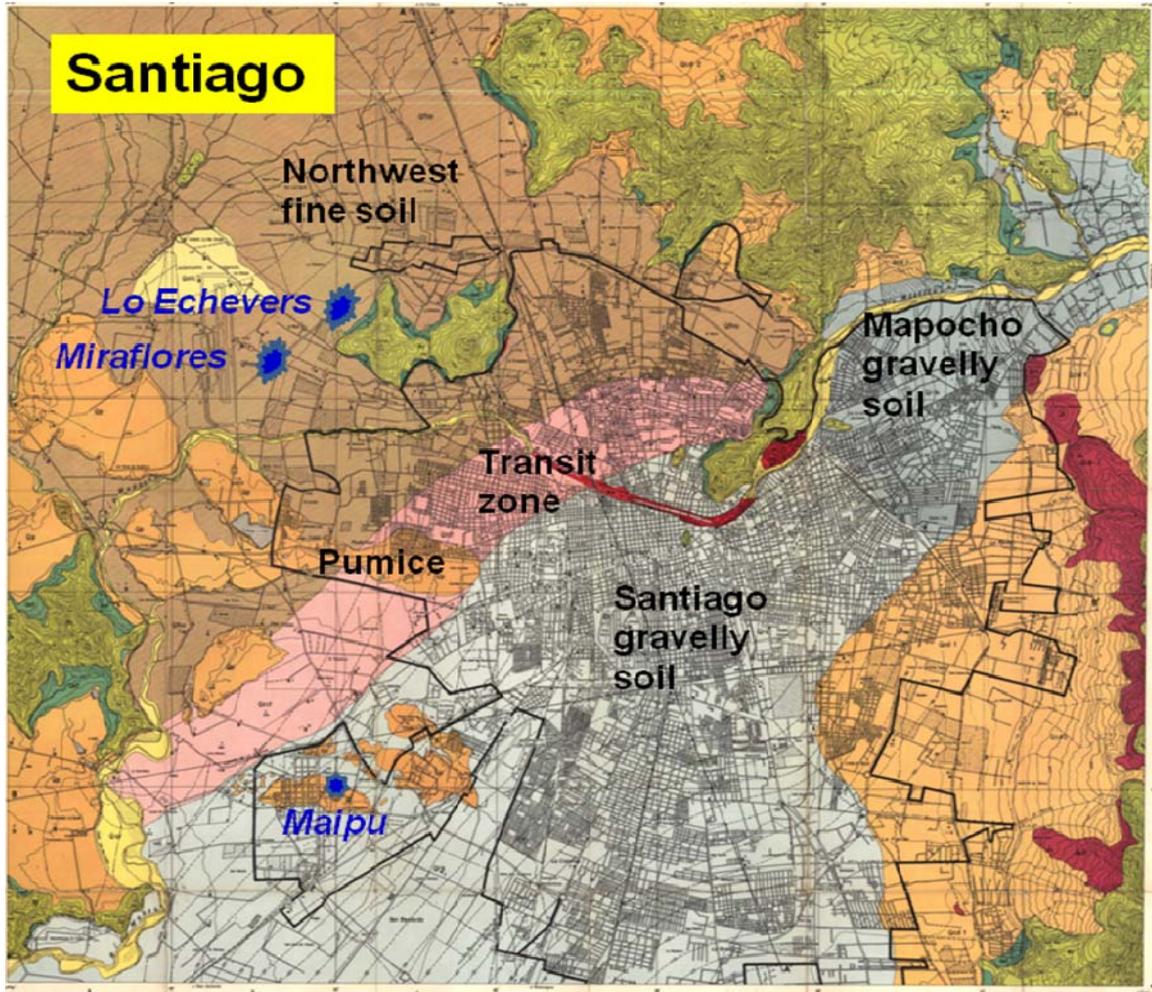
さらに南の Arauco (アラウコ) から少し西の Tubul (テュブル) 付近の地質図⁶⁾を図—2.6 に示す。ここでは写真—2.12 に示すように海岸から内陸にかけてシルト質の低湿地が広く広がっている。第 6 章で後述するように、ここでは二つの橋が落橋し、また、取り付け盛土も大きく崩壊した。写真—2.13 にそのうちの一つの Laqui II (ラクイ・セグンド) 橋で撮影したブルドーザーを示す。



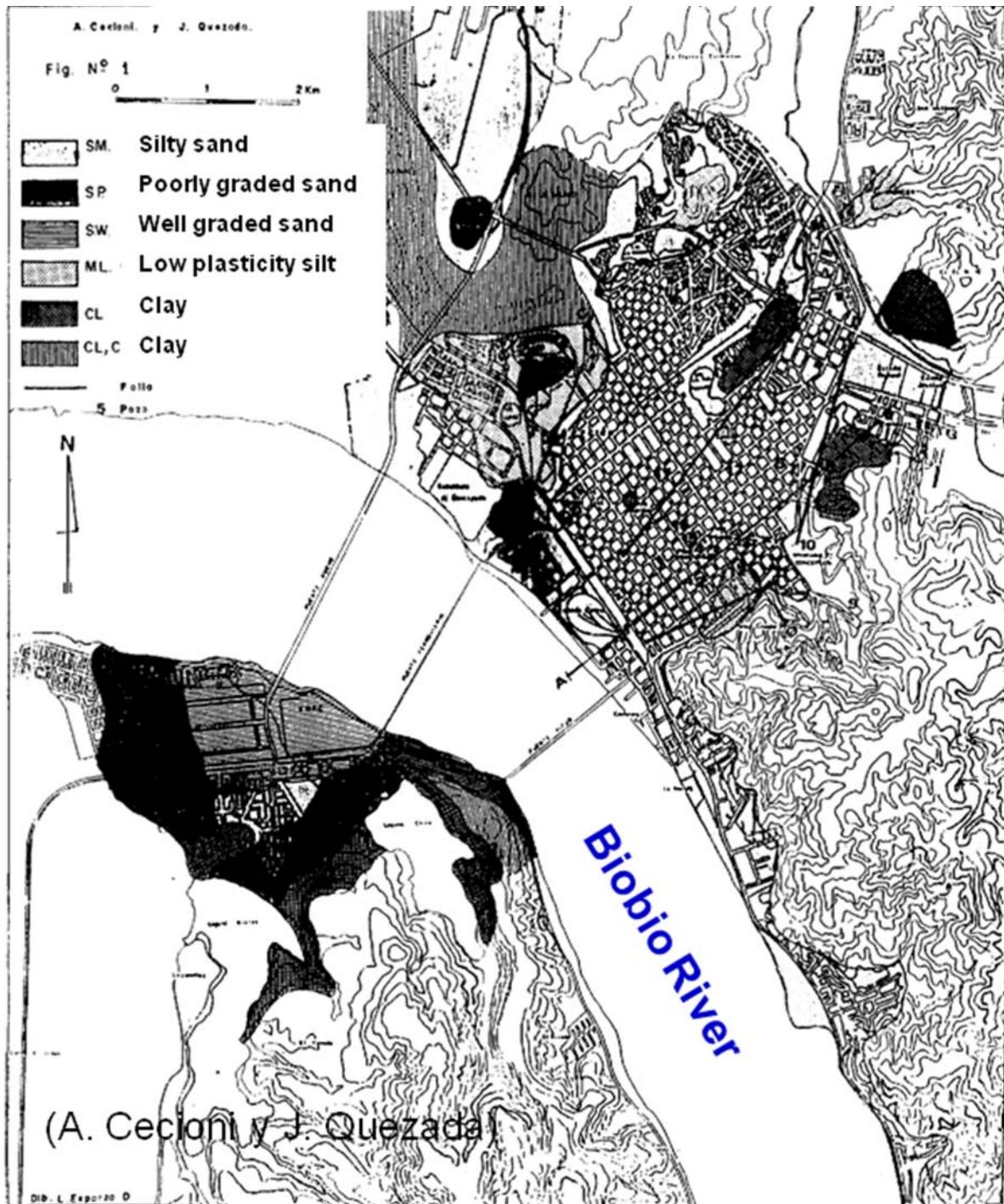
図—2.2 今回の地震による被災範囲内の地質図（文献2）に加筆



図—2.3 被災範囲の赤色立体地図³⁾



図—2.4 Santiago の地質図⁴⁾



図—2.5 Concepción の地質⁵⁾

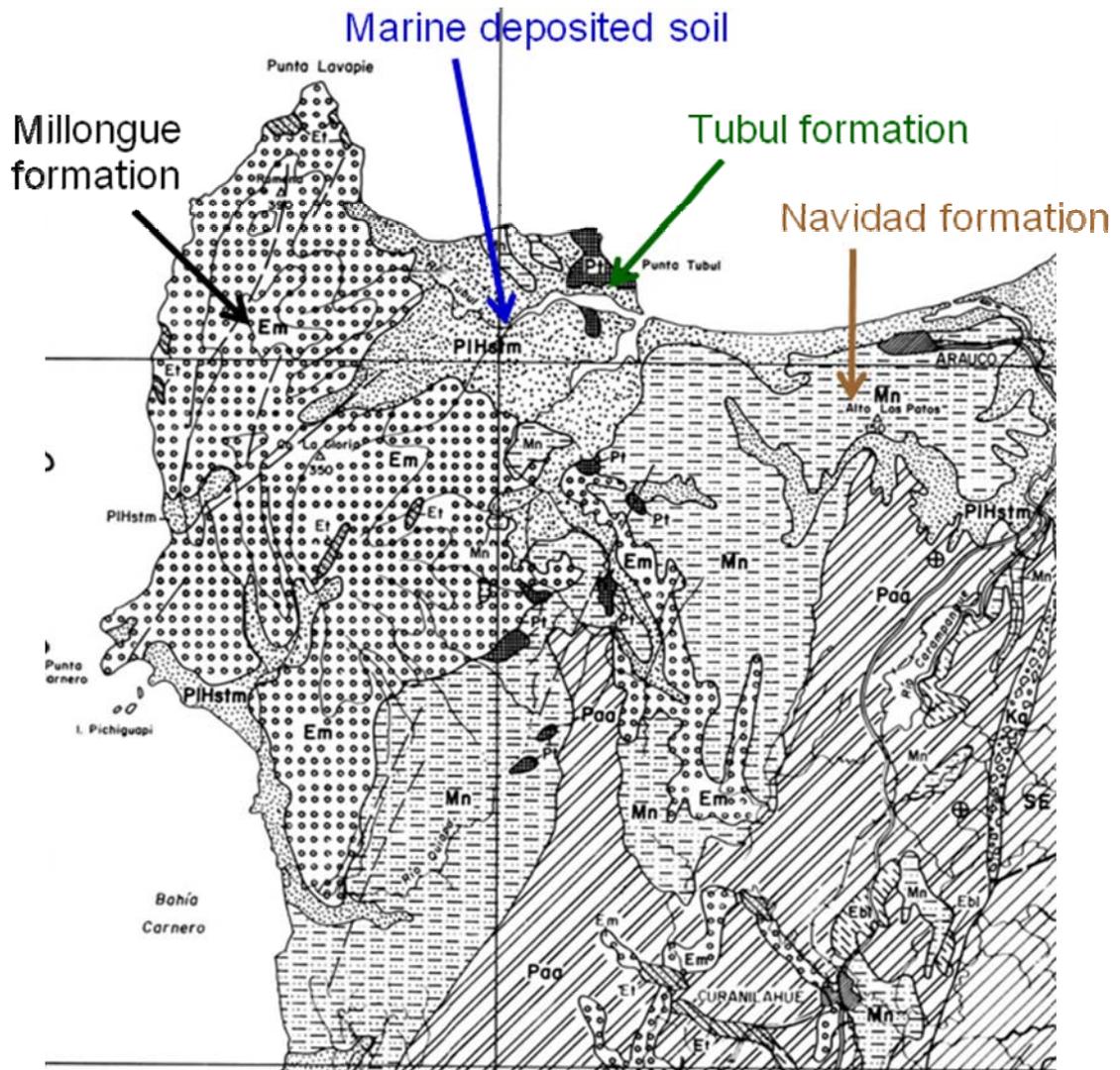


図-2.6 Arauco から Tubul にかけての地質図⁶⁾



写真-2.12 Tubul に広がる低湿地



写真-2.13 軟弱なPEAT地盤で動けなくなったブルドーザー

このブルドーザーは落橋した付け替え道路の工事をして
いたようであり、湿地にはまりこんで動けなくなってい
た。バックホウで引っ張り上げようとしたが出来ず、筆
者達が訪れた日は諦めてそのままに放置された。ここの
土は軟弱なピートであった。

第2章の参考文献

- 1) 平凡社：大百科事典，1984.
- 2) Servicio Nacional de Geología y Minería: Mapa Geologico de Chile, 1982.
- 3) 千葉達朗作成による
- 4) Valenzuela: Geologic map of Santiago, 1978.
- 5) Cecion, A., and Quezada, J.: Sintesis preliminar de la geologia urbana de Concepción, 7 ° Congreso Geologico Chileno, pp.595-599, 1994.
- 6) Instituto de Investigaciones Geolgicas: Carta Geologica de Chile, 1:250,000, Hoja Arauco-Lebu y Sector Norte de la hoja Ouerta Saavedra.

3. 地震動の諸元とその特徴

2010年2月27日午前3時34分(現地時間), Chile(チリ) Maule (マウレ)州沿岸部 (35.909S, 72.433W, Depth=35 km) を震源とするマグニチュード 8.8 の巨大地震が発生した¹⁾(図-3.1)。USGSによるシェイクマップ(図-3.2)によると、震源断層上広い範囲でメルカリ震度 VIII (JMA 震度 5 相当) の揺れであったと推測されている。この地域は、年 5.5cm から 7cm の速さで東へ移動するナスカプレートが南米大陸に衝突している地域であり(図-3.3)、南米大陸の西に標高 6,000m を超えるアンデス山脈が、また西海岸の沖合いには全長 5,900km を超える非常に長いペルー・チリ海溝が形成されている⁵⁾。このためプレート境界で発生する海溝型地震が多く、これまでもマグニチュード 8 を超える大地震と津波が頻発している(図-3.4)。



図-3.1 2010年2月27日チリ・マウレ地震の震央と震源域²⁾に加筆

特に 20 世紀以降最大規模であったとされる 1960 年チリ大地震 (M9.5) の震源域は 1,000km を超えると推定されている。今回発生した地震の震源域はその地震の震源域の北に位置し(図-3.4)、推定される震源断層の長さは Santiago (サンティアゴ) から Concepción (コンセプション) に至る約 450-500 km, 最大滑り量は 11 m である^{6,7)}。震源メカニズムは、東に約 15 度か

ら 18 度傾斜の低角逆断層型であり、沈み込み帯の比較的浅いところに震源があると推定されている⁷⁾。Poiate・額綱(2010)⁷⁾は、Santiago で被害が発生したのは、震源(図-3.5の星印)の北側に滑りの大きなアスペリティーが広がっていること、また主要な断層破壊が震源から北方へ向かったことなどが原因であると推測している。

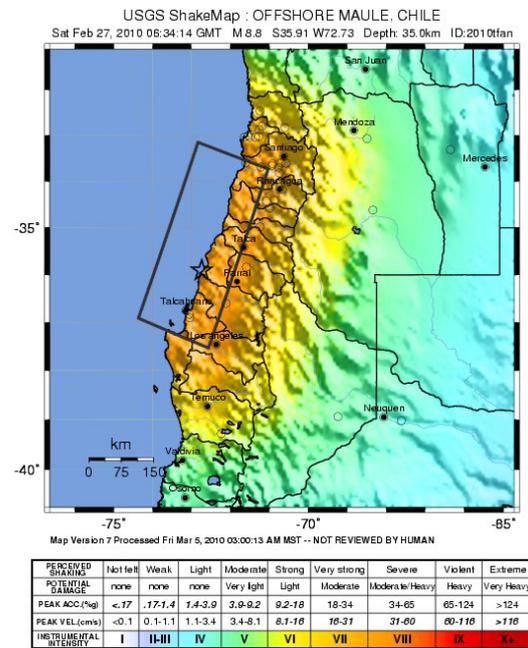


図-3.2 USGSによるシェイクマップ³⁾

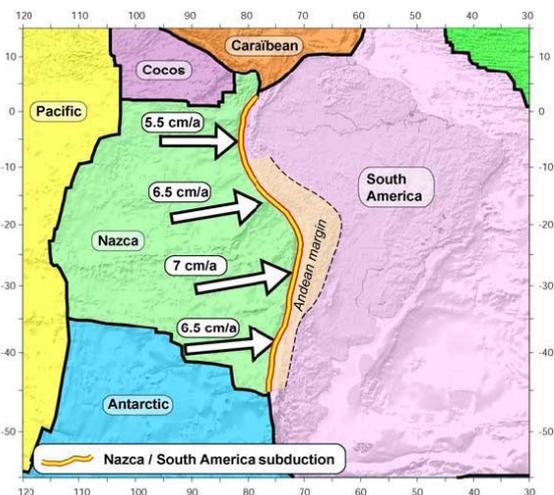


図-3.3 南米大陸太平洋岸のプレート群⁴⁾

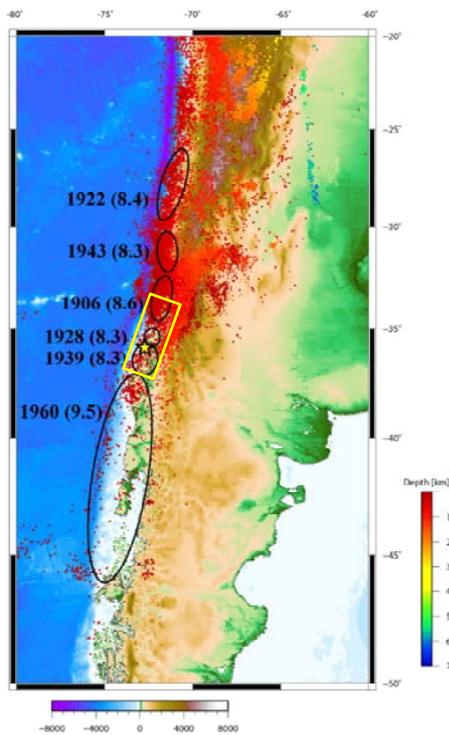


図-3.4 今回の地震（四角枠）と過去の大地震の震源域⁵⁾に
加筆

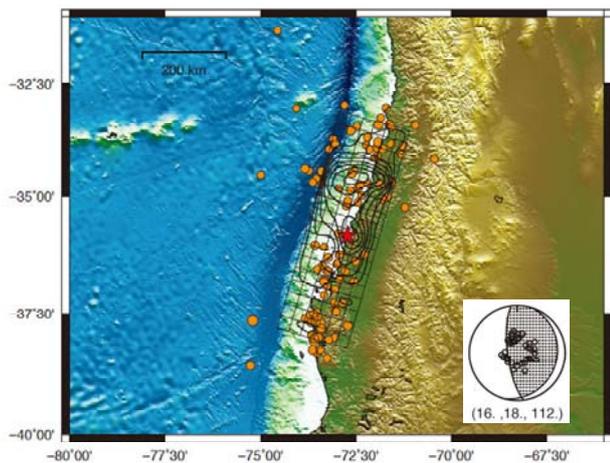


図-3.5 2010年2月27日 Maule, Chile 地震の震源メカニ
ズム⁷⁾

またこの地震では、震源に近い Constitución（コンスティトゥション）と Concepción で西向き約 3m, Arauco（アラウコ）で鉛直 3m の地殻変動が観測された（図-3.6）⁸⁾。また Argentina（アルゼンチン）の Buenos Aires（ブエノス・アイレス）付近も約 5cm 西へ移動したものと推測されている。写真-3.1 および写真-3.2 は、Arauco 半島で見られた地殻変動である。隆起した部分の岩についていた海藻や貝が乾燥して白く変色している。図-3.7 は、「だいち」PALSAR による InSAR 解析画像⁹⁾であるが、Concepción の南約 200km の沿岸部からバルパライソ（Valparaiso）の南まで、約 600km にわたって地殻変動に伴う多くの縞模様が見られる。衛星の視線方向と縞模

様の繰り返し回数から、この地域で西向きに 2m 以上の地殻変動があったことが推定される。



図-3.6 2010年2月27日 Maule, Chile 地震による南米大陸
の地殻変動⁸⁾



写真-3.1 地震後に観測された沿岸部の隆起(A. Tassara,
University of Concepción)



写真-3.2 本調査で観測された Arauco Peninsula（アラウコ

半島)の隆起の様子

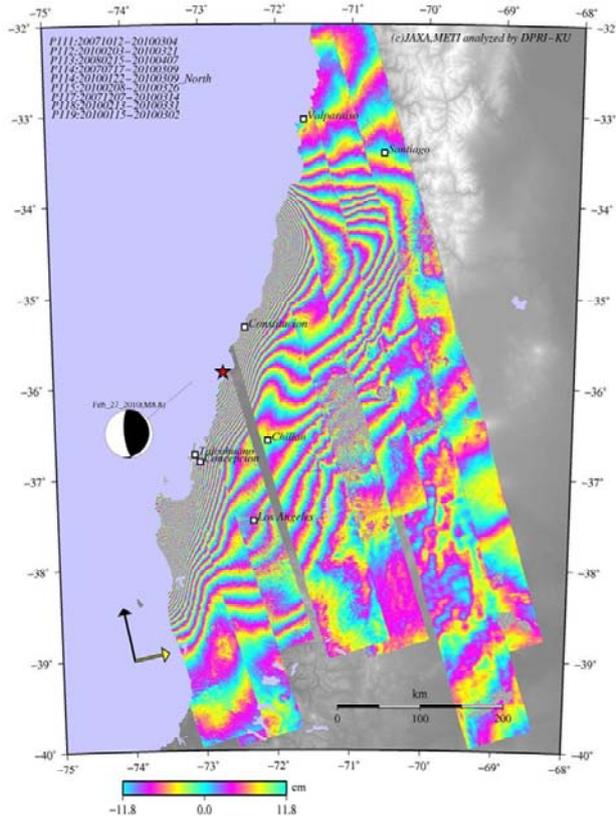


図-3.7 2010年2月27日 Maule, Chile 地震における InSAR 解析画像⁹⁾

またこの地震では津波が発生し、チリ沿岸部だけでなく太平洋沿岸部の広い範囲に到達したことが報告されている(図-3.8)¹⁰⁾。1960年の地震では、に押し寄せた最大波高6mの津波で北海道から千葉県沿岸部で119名が亡くなっている¹¹⁾。今回の地震では、津波は北海道から沖縄に至る太平洋沿岸部各地で観測され、最大波高は約2mであったとの報告もある。この津波により、人的被害はなかったものの、魚介類や真珠の養殖棚が被災し最終的な総被災額は数百億円に達すると予測されている¹²⁾。

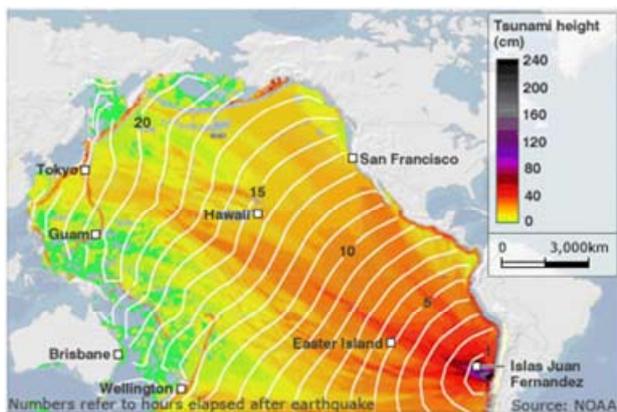


図-3.8 2010年2月27日 Maule, Chile 地震による津波¹⁰⁾

チリでは、チリ大学が中心となって強震観測点を設置しており、表-3.1に示すように、震源から約100km南に位置する Concepción の Colegio San Pedro で最大水平加速度 0.65g(NS)、最大鉛直加速度 0.6g (UD) (図-3.9) が得られている⁴⁾。また、震源から約340 km離れた Santiago 市内においても、最大水平加速度 0.56g が観測された¹³⁾ (図-3.10)。ここで、Concepción と Santiago における加速度時刻歴の波形に着目すると、断層の破壊領域の南端に位置する Concepción の波形(図-3.9)は、振動の開始とともに大きな振幅が継続しているのに対し、北端に位置する Santiago の波形(図-3.10)には、振幅の大きな二つの山が見られる。先に述べたように、今回の地震は震源から北方に向かって破壊が進行したと推定されており⁷⁾、震源付近とその北部にも滑り量の大きなアスペリティーがあると推測されていることから、Santiago の波形に見られる波形の二つの山はこれを反映したものであると思われる。図-3.11は、図-3.10より得られた加速度応答スペクトルである。水平成分の卓越周期は0.5秒となっている。Santiago で記録された他の記録をみても、長周期成分の影響は小さい。

震源から約200km離れた中央盆地に位置する Curico (クリコ)は、人口の集中する中規模の街であるが、アドベ造の倒壊が目立った。ここでの強震観測点において最大水平加速度 470gal が観測されている¹³⁾。地震計は半壊した病院から道路を隔てた建物の中に設置されていた。この位置で微動観測もされているが、その詳細は4学会合同調査団報告書を参照されたい¹⁴⁾。

震源地 Cobquecura (コブクエクラ)では、アドベ造の倒壊が多くみられた。また、屋根の瓦だけが破損しているものも数は少ないが見受けられた。

表-3.1 Concepción で観測された最大加速度⁴⁾

Red Sismológica Nacional

Localidad	Aceleración Máx. Horizontal NS	Aceleración Máx. Horizontal EW	Aceleración Máx. Vertical
Colegio San Pedro, Concepción	0.65 g	0.58 g	0.60 g
Cerro Calán, Santiago	0.20 g	0.23 g	0.11 g
Campus Antumapu, Santiago	0.23 g	0.27 g	0.17 g
Cerro El Roble	0.19 g	0.13 g	0.11 g

表-3.2 Santiago で観測された最大加速度¹³⁾

RENADIC

Localidad	Aceleración Máx. Horizontal	Aceleración Máx. Vertical
Depto. Ing. Civil, U. de Chile	0.17 g	0.14 g
Estación Metro Mirador	0.24 g	0.13 g
CRS Maipú, R.M.	0.56 g	0.24 g
Hospital Tisne, R.M.	0.30 g	0.28 g
Hospital Sótero del Río R.M.	0.27 g	0.13 g
Hospital de Curicó	0.47 g	0.20 g
Hospital de Valdivia	0.14 g	0.05 g

Estación Colegio San Pedro, Concepción.

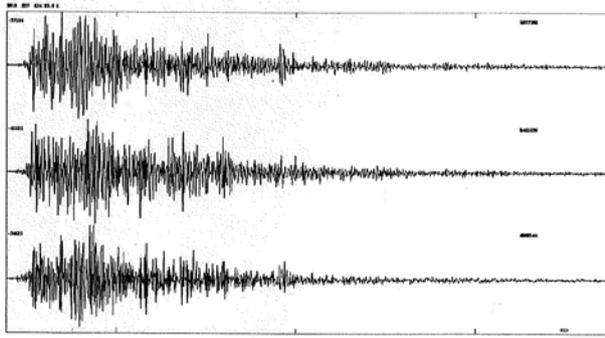


図-3.9 Concepción (Colegio San Pedro) で観測された加速度時刻歴波形⁴⁾

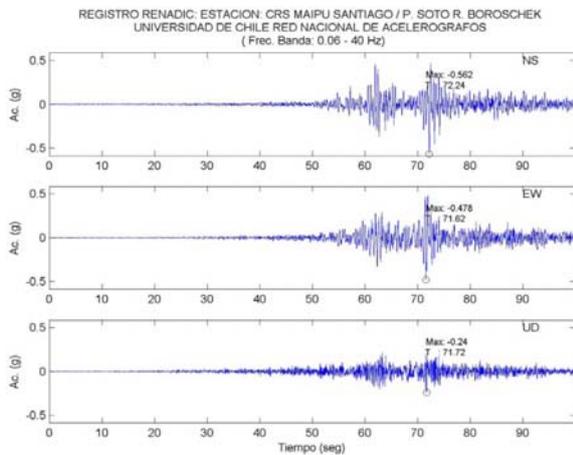


図-3.10 Santiago (CRS Maipú) で観測された加速度時刻歴波形¹³⁾

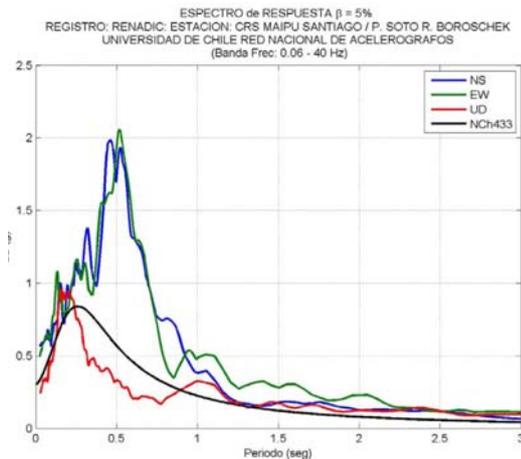


図-3.11 Santiago (CRS Maipú) で観測された加速度時刻歴(図-3.10)より得られた加速度応答スペクトル¹³⁾

図-3.12は、2010年4月3日現在、余震観測がおこなわれている140観測点の位置を示す⁴⁾。チリの関係機関

とアメリカやペルーなどの関係機関が地震計を設置しているとのことである。図-3.13は、発震から36日後までのマグニチュード4.7以上の余震発生回数の推移を示したものである。これによると、本震後約7日で余震の数は急減しているものの、18日後にもマグニチュード7程度の地震が発生していることがわかる。しかし、それ以後の余震は比較的規模も小さく、余震回数も減少してきている。また、調査期間中にも、4度大きな揺れを感じた。

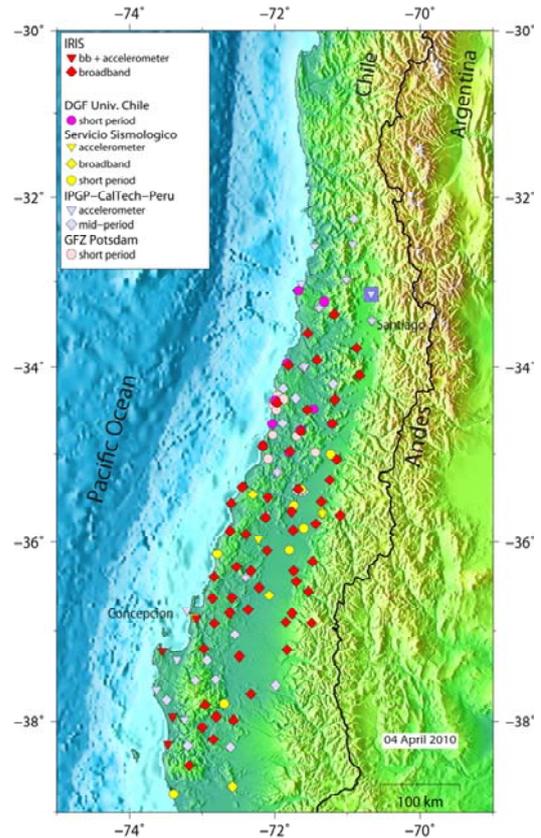


図-3.12 2010年4月3日現在の余震観測点⁴⁾

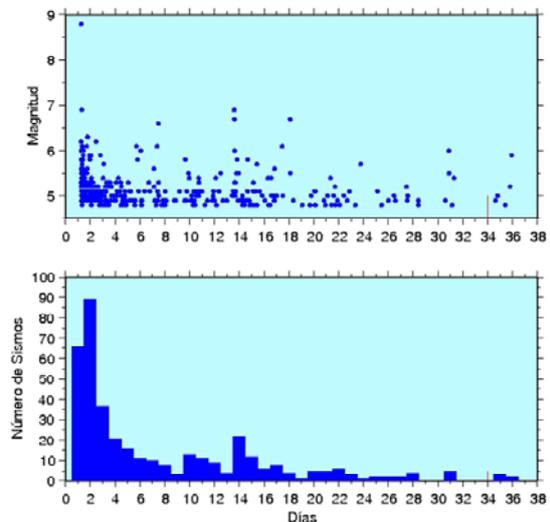


図-3.13 発震から36日後までのマグニチュード4.7以上の余震発生回数の推移⁴⁾

今回の調査に見られた主な被害とそれらの位置を図-3.14 に示す。同図より、震源から約 340km 離れた Santiago では環状高速道路橋の橋桁の崩落 (写真-3.3) アパート 3 棟の全半壊 (写真-3.4) が見られた。また、Santiago から Concepción へ向かうパンアメリカンハイウェイ 5 号線に沿って、道路盛土および道路橋 (写真-3.5)、歩道橋の落橋、道路・鉄道盛土の崩壊、サイロの倒壊 (写真-3.6)、水・ガソリンタンクの浮上等の被害が見受けられた。

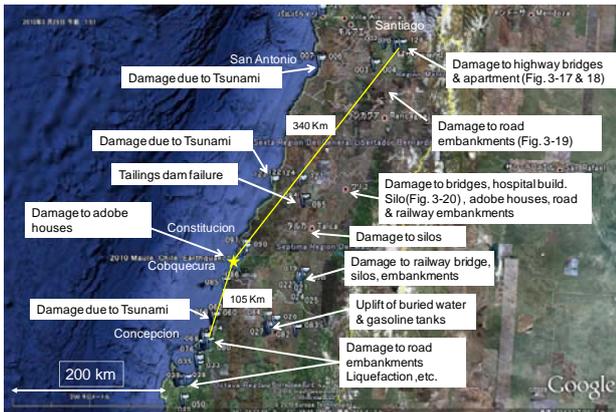


図-3.14 今回の調査で見られた主な被害と位置



写真-3.5 国道 5 号線に隣接する一般道の盛土被害と落橋



写真-3.6 Talca (タルカ) 付近で見られたサイロの被害



写真-3.3 Santiago の環状高速道路橋の橋桁の崩落 (写真: AFP)



写真-3.4 Santiago の地上 1 階, 地下 1 階 RC アパート倒壊

参考文献

- 1) USGS: <http://earthquake.usgs.gov/>, 2010.
- 2) U.S. Department of State:
<http://www.state.gov/r/pa/ei/bgn/1981.htm>, 2010.
- 3) USGS: ShakeMap Chile-Mw=8.8-February 27, 2010.
- 4) Servicio Sismologico: Terremoto cauquenes 27 Febrero 2010, Informe Tecnico, Universidad de Chile, Santiago, 3 Abril, 2010.
- 5) Wikipedia: ペルー・チリ海溝. (2010, 3 月 28). Retrieved 02:58, 4 月 18, 2010
<http://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%83%9A%E3%83%AB%E3%83%BC%E3%83%BB%E3%83%81%E3%83%AA%E6%B5%B7%E6%BA%9D&oldid=31261627>, 2010
- 6) 大木聖子: 東京大学地震研究所ホームページ,
http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/2010/02/201002_chile/, 2010.
- 7) Poiata, N., 額畑一起: 東京大学地震研究所ホームページ,
http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/2010/02/201002_chile/, 2010.
- 8) Foster, J. and Brooks, B.: A preliminary solution for the coseismic displacement field associated with the recent M 8.8 Maule earthquake in south-central Chile, University of Hawaii, 2010.
- 9) 橋本学: Personal communication, 2010.
- 10) NOAA: Tsunami Event - February 27, 2010 Chile - Main Event Page, <http://nctr.pmel.noaa.gov/chile20100227/>, 2010.
- 11) 宇佐美龍夫: 日本被害地震総覧[416]-2001, 東京大学出版会, 2003.

- 12) 毎日新聞: 3月4日21時12分,
<http://mainichi.jp/life/food/news/20100305k0000m040088000c.html>, 2010.
- 13) Boroschek, R., Soto, P., Leon, R., and Comte, D.: Informe preliminary Red Nacional de Acelerografos, Terremoto centro sur Chile 27 de Febrero de 2010, Informe Preliminar No. 3, Departamento de Ingenieria Civil/Geofisica, Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas, Universidad de Chile, 2010.
- 14) 報告会資料: 2010年「チリ地震合同調査団」報告会, 共催 : 日本地震工学会・土木学会・地盤工学会・日本建築学会, 2010.

4. 液状化による建物の被害

4.1 Concepción(コンセプション)の液状化発生状況

ここではおもに液状化に起因すると推察される被害状況について報告する。被害が多く見られたのは Concepción 周辺である。同市はアンデス山脈に源流をもち北流する Bio Bio (ビオビオ) 川の河口部右岸に位置する。現在の Bio Bio 川の河口部は、Concepción 西部で西へ大きく向きを変え太平洋に至る(図-4.1)。本調査時期(4月初旬)は現地の秋口であったが水量は豊富であった。河口部の川幅は約 2km に達し、右岸に位置する Concepción と左岸に位置する San Pedro de La Paz (サン・ペドロ・デ・ラ・パス) との間には、3本の橋がかかっている。調査時点では、最上流に位置するビオビオ橋と、最下流に位置する Juan Paburo II (フアン・パブロ2世)橋が被災したため供用は制限され、Liacolén(ジャコレン)橋のみ車の通行が可能であった。ただし、ビオビオ橋は、1990年代に行われた耐震性診断で供用不可とされて以来、人道橋としてのみ使われていたとのことである。

同市内平野部の表層地質は細粒分を多く含む有機質を含まないシルト質土 (ML) が占めている¹⁾。Concepción 空港の北には広大なデルタ地形が見て取れるが(図-4.1)、このあたりは Concepción の東を北流する Andalién (アンダリエン)川の氾濫原であったことが推察される。表層地質は有機質を含まない粘性土 (CL, CH) が卓越する。また、Concepción の対岸にあたる San Pedro (サン・ペドロ)の表層地質は、Concepción とは異なり、細粒分の少ない砂質土 (SW, SP) が卓越する。あとで述べるように、Concepción に液状化被害が集中したのは、河口部に位置するため地下水位が高いことと、住宅や土木構造物の建設に当たり細粒分を多く含む堆積土を置き換えたり盛土した砂質土が液状化したためであると考えられる。また、サン・ペドロにおける液状化被害も、原地盤である細粒分を多く含む土に盛土した砂質土の液状化によるものである可能性が高い。Concepción における液状化関連被害としては、図-4.3 に示す7地点を調査した。



図-4.1 Concepción 周辺の概観図

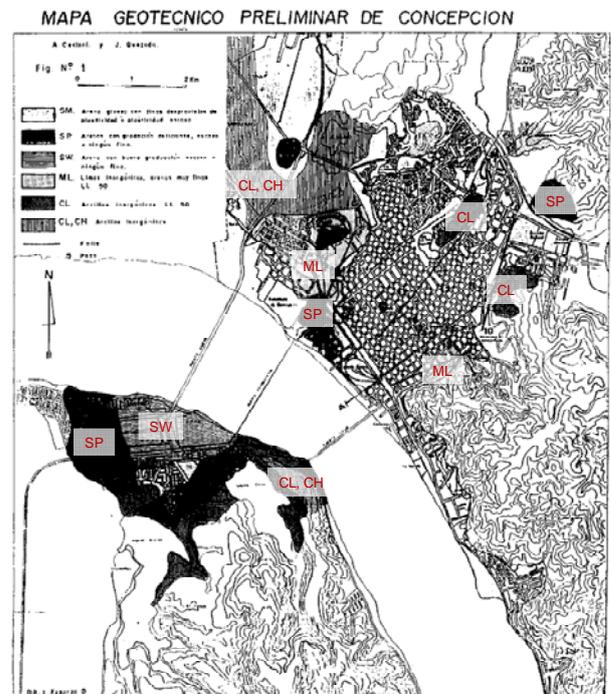


図-4.2 Concepción の表層地質¹⁾



図-4.3 Concepción における液状化関連被害調査地点

4.2 Arauco (アラウコ) の液状化発生状況

Arauco の東端の道路を含む緑地帯と（図-4.4）において、局所的な地盤の変形に伴う長さ約 10m 程度のアスファルト舗装のひび割れやマンホールの浮上がりが見られた（写真-4.1）。補修のために掘削されたトレンチ内の水位は、GL-1.2m であった。図-4.4 に示すように、この地点は、北に向かって流れる小さな川の旧河道上に位置していることから、道路や住宅地を盛り立てたときの地盤材料の液状化が原因であると推察される。付近の緑地帯内には填砂跡が確認され、通信用マンホールの浮上がり、電柱の傾斜も確認された。また、付近の公園内におかれていた大砲 3 基のうち 2 基が北東方向に転倒しており（写真-4.2）、地震動も大きかったものと推察される。



図-4.4 Arauco における地盤変状が観察された地点の空中写真



写真-4.1 地盤変状によるアスファルト舗装の亀裂 (Arauco)



写真-4.2 北西方向に転倒した砲台 (Arauco)

4.3 液状化による RC 建築物の沈下・傾斜

(1) Curanilahue (クラニラウエ) の病院

Arauco の南約 30 km に位置する Curanilahue の Hospital Provincial Dr. Rafael Avaria Valen Zuera 病院（図-4.5）の 6 つの RC 造のうち 1 つ（5 階建て）が約 8cm 沈下し、地上階の床面に盛り上がりが生じた（写真-4.3）。またこの建物の南側に隣接する 2 階建ての RC 造の壁面底部には泥水が飛び跳ねた跡が見られ、建物の周囲の地表面に配されたインターロッキングブロックに盛り上がりが見られた。このため同病院では、東側の 4 つの建物の使用を停止していた。しかし、ほぼ無被害であったと思われる中央のビルで、夜 9 時を過ぎても診察が行われている様子であった。図-4.5 より、同病院の南側には東へ流れる川があり、周辺の地形から判読すると、同病院一帯はこの川の氾濫原であったものと推察される。同病院で行ったヒアリングによると、地下水位は GL-1.4m、沈下した 5 階建て建物の基礎は直接基礎で深さは 4m、建設に当たり地盤改良として原地盤を掘削して砂で埋め戻したとのことである。

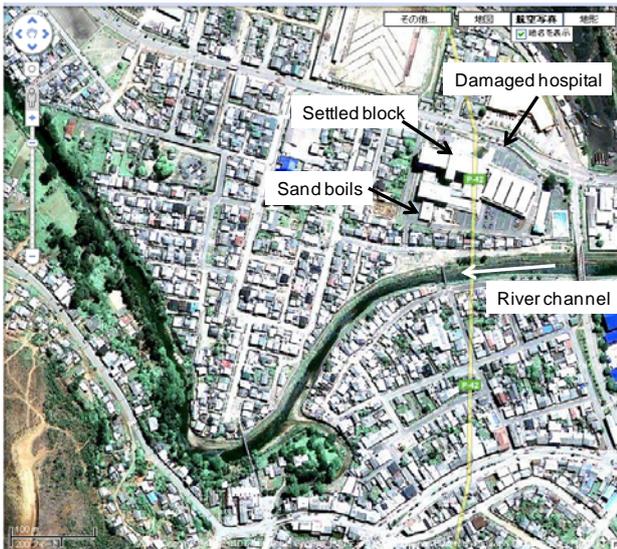


図-4.5 RC 建築物の傾斜と沈下が見られた地点周辺の空中写真 (Curanilahue)



写真-4.3 病院1階の床に盛り (Curanilahue)

(2) Los Presidentes (ロス・プレジデントス) のアパート

Bio Bio 川右岸の Concepción 空港の南に位置する Los Presidentes (図-4.3, 写真-4.4) では、8階建て RC 造 4棟のうち西側の2棟の建物本体にわずかな傾斜が確認された。南西に位置する高さ 20m、幅 22 × 13 m の建物について住民からヒアリングしたところ、屋上階が北に 27cm ほど水平にずれていたとのことである。建物の高さは 20m のため北に 0.77 度傾いたことになる。(図-4.6)。同建物の北面底部には泥水が飛び跳ねた痕跡が残っており (写真-4.5)、また東側の地表に配された路面用ブロックには建物とほぼ平行に幅 20cm 程度で長いクラックが発生していた (写真-4.6)。

当該地点の地盤面標高は 15m 以下であり、原地盤は湿地帯であったとのことである (写真-4.4)。アパート建設前の 2005 年に実施された標準貫入試験結果によると、図-4.7 のボーリング B-1 地点における地盤は、表-4.1 に示す通り、層厚 0.15m の表土の下 GL-1m 付近に層厚 1.15m のシルト混じり粗砂、GL-1.8m 付近に層厚 1.10m の湿潤な高塑性シルト、GL-3.5m 付近に層厚 2.55m の比較的粒度のそろった中砂、その下部に層厚

0.95m の砂混じりシルトとなっている。表-4.2 と 4.3 に示す B-2 と B-3 における地盤についても、表層付近はおおむね砂とシルトの互層となっていることがわかる。いずれの地点も地下水位は GL-1m 程度である。また、図-4.8 に示す換算 N 値の深度分布より、GL-2m から 4m 付近のシルト層の N 値はゼロから 4 程度であり、軟弱層となっていることがわかる。現地で行ったヒアリングによると、当該建物を建設するに当たり、建物の側面位置から 2m 離して深さ 4m まで掘削し、その中に 35cm 厚で砂を転圧して深度 1m まで締め固め、その上にべた基礎の RC 造を建設した。また、GL-1m 付近に存在する地下水は Well point 工法により水位を下げたとのことである。図-4.8 より、特に B-2 地点では、GL-5m 以深で N 値が 20 から 30 程度となっており、このことから原地盤の掘削深さを決定したものと推察される。

埋戻しに用いた砂が液状化したにもかかわらず倒壊に至らなかった原因として、建物直下は拘束圧が高く液状化には至らず、一方建物周囲の埋戻し土は拘束圧が低い完全液状化に至ったが、掘削範囲が狭いため建物の傾斜に伴う砂のダイレイタンスの効果が発揮され、せん断強度が増加したためではないかと考えられる。



写真-4.4 Los Presidentes のアパート群遠景とその手前の湿地帯

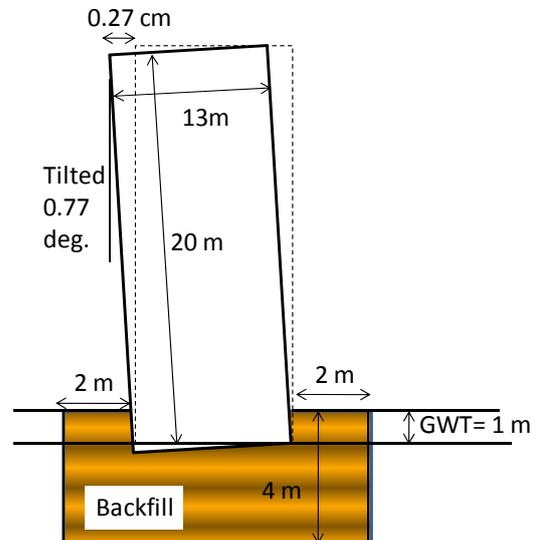


図-4.6 アパートの傾斜角と基礎の概略



写真-4.5 側壁に付着した泥水の噴出痕 (Los Presidentes)



写真-4.6 路面用ブロックに生じた亀裂 (Los Presidentes)



図-4.7 2005年のボーリング調査地点 (Los Presidentes)

表-4.1 B-1 地点における表層地質の詳細

Depth (m)	Thickness (m)	Material description
0.00 - 0.15	0.15	Vegetation, grass and sand
0.15 - 1.30	1.15	Coarse sand of dark grey colour, low humidity, compactness and quantity of silt, although with some lumps of silt
1.30 - 2.40	1.1	Silt of dark grey colour very plastic, low compactness, high humidity
2.40 - 4.95	2.55	Medium sand of dark grey colour, high humidity, medium compactness, low fines content, some fine gravel
4.95 - 5.90	0.95	Silt of dark grey colour with some sand, low compactness, high humidity
5.90 - 6.70	0.8	Fine sand of grey colour with a few silt lenses, high humidity, low compactness
6.70 - 9.00	2.3	Silt of clear grey colour with lenses of medium sand of 5 cm thickness, some groups of medium and fine gravels with medium to high compactness
9.00 - 11.00	2.1	Homogeneous fine sand of grey colour, slightly silty, high humidity, high compactness

B-1: GWT GL-0.95 m (2005/12/19)

表-4.2 B-2 地点における表層地質の詳細

Depth (m)	Thickness (m)	Material description
0.00-0.31	0.31	Silt fill, dark brown colour, very compacted
0.31-2.21	1.9	Medium sand of dark grey colour, low humidity, medium compactness, no fines
2.21-3.41	1.2	Silt of dark grey colour, low compactness, high humidity, medium plasticity, slightly organic, a lot of little roots, some sand
3.41-4.83	1.42	Medium sand of dark grey colour, high humidity, high compactness, no fines content
4.83-5.31	0.48	Very fine sand of clear grey colour, medium compactness, medium humidity, some silt lenses
5.31-6.15	0.84	Silty sand of clear grey colour, medium humidity, medium compactness, some silt lenses
6.15-7.21	1.06	Coarse sand of dark grey colour, high humidity, high compactness, clean sand (no fines)
7.21-8.46	1.25	Coarse to medium sand of dark grey colour, high humidity, very high compactness, some quartz particles, some fine gravels, some silt
8.46-10.02	1.56	Medium sand of dark grey colour, high humidity, very high compactness, no fines

B-2: GWT GL-0.82 m (2005/12/19)

表-4.3 B-3 地点における表層地質の詳細

Depth (m)	Thickness (m)	Material description
0.00-0.40	0.4	Silt dark brown colour, very compacted, rubbish
0.40-1.35	0.95	Medium clean sand (no fines), high humidity, medium compactness
1.35-2.20	0.85	Clayed silt of clear grey colour, low compactness, high humidity
2.20-5.15	2.95	Coarse sand of grey colour, very little silt, high humidity, medium compactness, homogeneous
5.15-7.80	2.65	Silt with some sand of clear grey colour, medium compactness, high humidity, medium to low plasticity
7.80-8.70	0.9	Medium sand of dark grey colour, very little silt, homogeneous, medium compactness, some silt lenses
8.70-10.30	1.6	Very fine silty sand of dark grey colour, low humidity, high compactness, some silt lenses

B-3: GWT GL-1.02 m (2005/12/19)

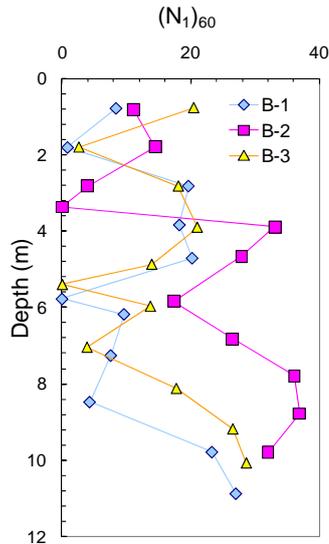


図-4.8 換算 N 値の深度分布 (ロス・プレジデンス)

(3) Colegio San Ignacio (サンイグナチオ小中高校)

Bio Bio 川左岸に位置する Colegio San Ignacio では、南東に位置する 1 階建て RC 造校舎 (6.2 m (東側面長) × 9.15 (南側面長) m) の南東角が約 27cm 不同沈下した (図-4.7, 4.8)。被災後の建物の傾斜角は南向き、東向きともに約 1.5 度であった。これに伴い、隣接する校舎との天井ダクトに約 13.5cm から 15cm のずれが生じた (写真-4.8)。また、西に隣接する校舎の廊下には、被災した建物の西面の壁の延長上に幅 5 から 8cm 程度のクラックが廊下を横断する形で発生した。図-4.9 は、Google Map による同地点の様子であるが、校舎建設前の地盤状況がわかる。これによると、不同沈下した建物付近を境界に、北に高い段差があったことがわかる。校舎南側の芝生に填砂跡が見られたことから、南面の地盤が液状化したことでこのような被災形態になったものと推察される。しかし、西に隣接する校舎には先に述べたクラック以外大きな損傷は見られなかった。不同沈下した建物は RC 構造で壁が厚いのに対し、西に隣接する校舎の側面はガラスを多用したものとなっている (写真-4.7)。このことから、不同沈下の原因の一つとして、建物の接地圧の影響もあったのではないかとと思われる。



写真-4.7 Colegio San Ignacio 校舎の不同沈下

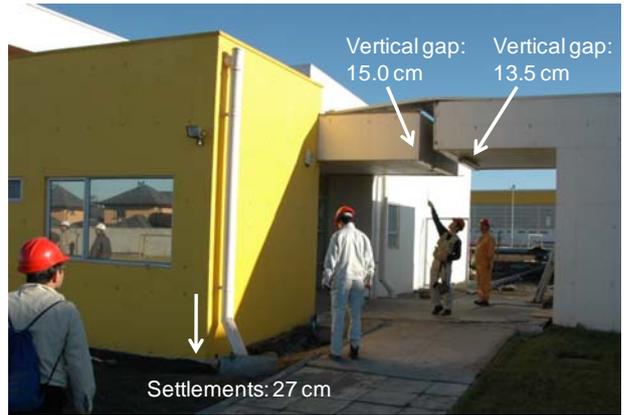


写真-4.8 校舎の不同沈下詳細 (Colegio San Ignacio)



図-4.9 校舎建設前の地盤状況と現在の校舎の位置 (Colegio San Ignacio)

(4) Ribera Norte (リベラ・ノルテ)

次に、地盤改良によりほぼ無被害であった事例を示す。ビオビオ川右岸に位置する Ribera Norte (図-4.10) は、5 階建て RC 造アパート群である。もともと湿地帯ではあるが、砂質土の卓越する (図-4.2) 同地域の開発に当たり、先ず堤防を建設し、その後後背湿地の埋立てを行った。さらに埋立てに当たっては、動圧密工法により地盤改良を行ったとのことである (Prof. Verdugo 談)。その結果、今回の地震では被害はごく軽微なものに抑えられた。本事例は、地盤改良が機能したことを示す好例であると言える。しかし、北西端のアパートに地盤の変動によるクラックが生じたとのことである。これは動圧密工法による地盤改良域の端部では改良範囲外の地盤が緩いため、想定通りの改良効果が得られないことを示している。



図-4.10 Ribera Norte のアパート群



写真-4.9 動圧密工法による地盤改良でほぼ無被害であったアパート群 (Ribera Norte)

4.4 液状化による戸建住宅の沈下・傾斜

(1) Brisa del Sol (ブリサ・デル・ソル)

Concepción 空港の西に位置する住宅地 Brisa del Sol では、液状化により戸建住宅4棟が最大 16 度傾斜するなどの被害を受けた(写真-4.10)。被災した住宅の付近の地盤面にはクラックが生じ、填砂が確認された。被災した住宅は、敷地の外を北西-南東方向に流れる水路跡に向かって、いずれも南西方向に傾いている(図-4.11)。敷地の境界にある壁の底部はおよそ 2m 南西に移動しており、その背後の敷地は約 1m 程度陥没している。当該地点の東には用水路があり、もともと湿地帯であったところを鉋さいで埋立てたとのことである。埋立に使われた鉋さいは、粗砂程度の粒径であった。しかし、大きく被災したのは、ここで述べた4件のみであり、同じ並びで北西に位置する住宅では、調査はしていないが被害があったとの報告はないようである。Google Map の衛星写真からは、この地点の地形的な特徴を読み取ることは難しい。



写真-4.10 地盤の側方流動により傾斜した住宅 (Brisa del Sol)



図-4.11 被災前後の住宅の位置と被災後の境界部の変位 (Brisa del Sol)

(2) Bayona (バイオナ)

次に、Bio Bio 川右岸側に位置する Bayona の被災状況について報告する。図-4.12 に示すように当該地点は東に小高い丘、南に池を有する地域である。被災地点を拡大し、各家の沈下量(cm)と傾斜方向をプロットしたものが図-4.13 である。同図に示す通りの両側の住宅に写真-4.11 に示すような、沈下や傾斜が生じた。最大沈下量は 17cm であったが、10cm 以上沈下した家は、同図左下の狭い範囲に集中していることから、局所的な地盤の性質の違いがあるものと思われる。また、この通りの北に位置する道路アスファルトにも亀裂が観察された。



図-4.12 住宅の沈下と傾斜被害が発生した Bayona 地区

が堆積していた。この家の付近の道路にも液状化に起因すると思われる亀裂が多くみられた。この地点の衛星写真(図-4.14)から旧地形を判読すると、当該地点がその北部を東から西へ流れるアンダリエン川の旧河道上、あるいは自然堤防などによって地形が急変する地点に位置しているものと推察される。通りには、水のタンクが置いてあったことから、上水道配管にも被害があったようである。



図-4.13 各家の沈下量(cm)と傾斜方向 (Bayona)



写真-4.12 液状化により傾斜した住宅 (Valle Noble)



写真-4.11 沈下と傾斜による被災を受けた住宅 (Bayona)



写真-4.13 被災した住宅内部に堆積した填砂 (Valle Noble)

(3) Valle Noble (バジェ・ノーブル)

次に Concepción 東部の住宅地 Valle Noble で発生した液状化による住宅の被害について報告する。当該住宅地は近年開発されたらしく、約 200 戸からなる新しい住宅地である。写真-4.12 は、大きな被災を受けた住宅である。外観からは無被害に見受けられたが、建物本体がわずかに傾斜しており、生活することは不可能であろうと思われる。内部に案内してもらると、写真-4.13 に示すように 1 階の床や庭に厚さ 8cm から 10cm のシルト質砂



図-4.14 被災した住宅と北部を流れる川の位置 (Valle Noble)

4.5 地中埋設構造物の浮上がり

今回の地震では、地中埋設構造物の浮上がりも顕著であった。日本の事例以外で、これほど多くの浮上がりが報告された事例は今回が初めてではないかと思われる。今回の調査で浮き上がりが確認された構造物は、Chillan（チジャン）市のパンアメリカンハイウェイ 5 号線沿いのガソリンスタンドの地下ガソリンタンクと水タンク（写真-4.14）、Arauco の通信用マンホール（写真-4.15、4.16）、Bio Bio 川左岸の San Pedro del Valle（サン・ペドロ・デル・バレ）の下水用マンホールと隣接する中継ポンプ場の大型タンクである（写真-4.17）。これらのうち San Pedro del Valle の下水中継ポンプ場の被災状況について以下詳述する。



写真-4.14 浮上した水タンク (Chillan) (撮影:Prof. Verdugo)



写真-4.15 浮上した通信用マンホール 1 (Arauco)



写真-4.16 浮上した通信用マンホール 2 (Arauco)

当該地点は、図-4.12 に示す住宅被害のあったバイオナの南西約 300m の地点である。東に約 400m の地点に大きな池がある。写真-4.17 に示すように、被災したのは中継ポンプ場とその前面の道路に設置されたマンホールである（図-4.15）。マンホールは写真-4.18 に示すように約 0.3m 浮上がった。一般にポンプ施設に入る手前のマンホールが最下流に位置するため、全長が長く見かけの単位体積重量が小さくなる。このため浮上がりやすくなると考えられる。このポンプ施設では、流入する下水を一時的に貯留するための直径 4.1m、長さ 4.0m、肉厚 0.1m の円柱型 RC タンクを備えているが、このタンクに約 1.2m の浮上がりが生じた。また、このタンクの浮上がりに伴い、同タンクと配管でつながっていたバルブ室にも浮上がりが生じたものと思われる。地震によってこの配管が破損したため、浮上がった位置で応急的に仮の配管を溶接したようである（写真-4.19）。このため調査時点では、同ポンプ施設は稼働中であった。同施設の敷地内の表層地盤は、Bio Bio 砂と呼ばれる黒い砂であり、粒径加積曲線（図-4.16）より平均粒径は $D_{50}=0.63\text{mm}$ の粗砂であることがわかる。地下水位は不明であるが、この砂の液状化により浮上がりが発生したものと考えられる。

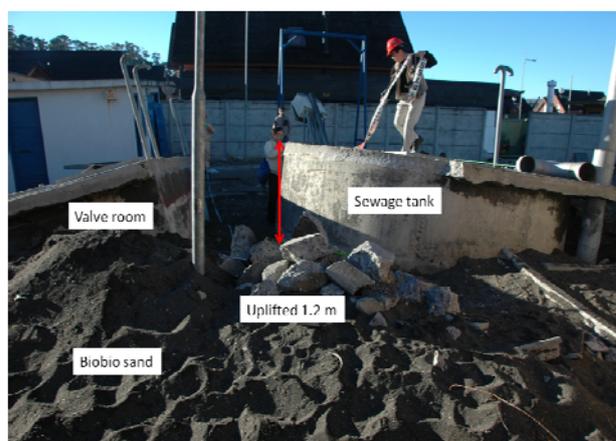


写真-4.17 浮上した下水貯留タンク (San Pedro del Valle)



図-4.15 被災した下水施設とマンホール (San Pedro del Valle)

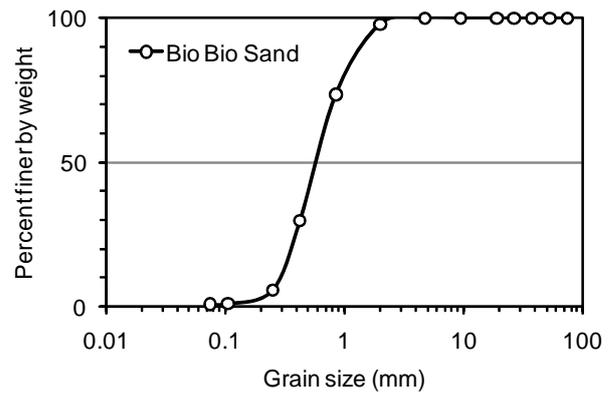


図-4.16 Bio Bio 砂の粒径加積曲線

参考文献

- 1) Cecioni, A. and Quezada, J.: Sintesis preliminar de la geologia urbana de Concepcion, 7th Congreso Geológico Chileno, Actas Volumen I, pp.595-599, 1994.



写真-4.18 浮上したマンホール (San Pedro del Valle)

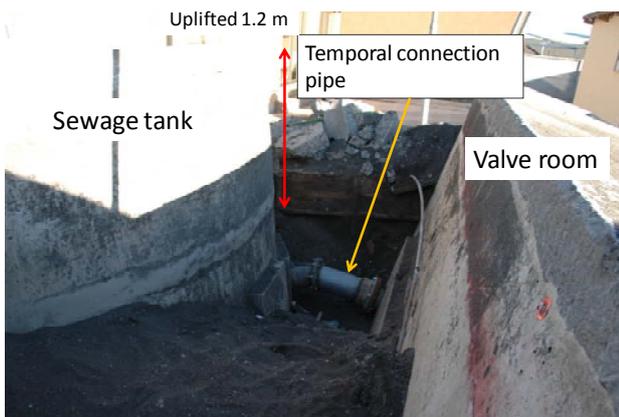


写真-4.19 貯留タンクとバルブ室をつなぐ仮配管 (San Pedro del Valle)

Coliumo 湾の西側にある Blanca (ブランカ) 岬付近では、太平洋側に面した北側の家屋は津波による被害を受けていなかった。それに対し、反対の Coliumo 湾に面した南東側の家屋は写真—5.4 に示すように甚大な被害を受けていた。ただし、海岸堤防はしっかりとしており、写真—5.5 に示すように被災していなかった。

Coliumo 湾の東側で Dichato から少し北にいった高級住宅地の Pingueral では津波によって家屋が被災していた。ただし、家屋自体が立派であり、構造的にしっかりしていることもあったためか、被災状況は他の地区とは少し異なっていた。写真—5.6 の奥に見られる家は、手前の基礎の上に建てられていたようで、津波によって東石から家屋がはずれ、全体が浮いて、奥の方まで流されていったようである。家の壁には水が約 40cm の高さまで浸かった痕跡があり、家屋が浮いていったことを物語っていた。これに対し、隣接する写真—5.7 に示す家屋は被災状況が異なっていた。この家屋は布基礎で基礎と家屋がしっかりと固定されたままになっていたようで、浮き上がっていなかった。窓ガラスには 180cm の高さまで水がきた痕跡が残されていた。ただし、家の中にはいってみると、写真—5.8 のように床が持ち上がっており、床は浮力によって破壊されたものと考えられた。この他、地中埋設管への津波による被害も写真—5.9 のように見られた。

さて、写真—5.10 は Dichato の町を東側の高台から見た風景である。図—5.1 に示されるように地震前は海岸線にそって家屋や道路があったようであるが、津波によって大きくえぐられていた。写真—5.11 にそのえぐられた箇所での様子を示す。橋の橋台やマンホールなどはあちこちに移動しており、もともとどこにあったか良く分からなくなっていた。

(3) Cobquecura (コップケクラ) から Chanco (チャンコ), Constitución にかけての海岸

今回の地震の震央に最も近い町が Cobquecura である。そこでここにおける被災状況を調査に行ったが、町は悲惨な状況になっていなく、写真—5.12, 5.13 に見られるようにアドベ造りの家屋が壊れた程度で、石で積んだ塀もあまり崩れていなかった。町中のレストランで食事をしたが、普段と変わらない様子であった。この町には立ち寄っただけで調査はしていないので詳細は不明であるが、ここは津波による被害も発生していなかったようである。

筆者達は Cobquecura (コップケクラ) から Chanco (チャンコ), Constitución と海岸線に沿った道路を走った。ただし、Constitución に着いた時にはすでに日没になってしまい、Constitución は見て回っていない。この間、町ごとに津波の被害があったり、なかったり、様子が大きく異なっていた。この間の距離は長く、車を止めて津波による被害見たのは Curanipe (クラニペ) と Pelluhue (ペジュウエ) の 2 箇所だけである。Pelluhue では写真—5.14 に示すように、広い範囲で家屋が津波によって破壊されていた。なお、Curanipe の津波による影響に関しては道路橋の第 6 章で述べる。



写真—5.4 Blanca 岬つけねの集落の津波被害



写真—5.5 無被災の海岸堤防



写真—5.6 Pingueral において津波で浮いて動いた家屋



写真—5.7 Pingueral において津波で浮かなかった家屋



写真—5.8 浮かなかった家屋の中の被災状況



写真—5.9 地中埋設管の被災状況



写真—5.10 Dichato の遠景



写真—5.11 Dichato における津波による被災状況



写真—5.12 Cobquecura のアドベの被災状況



写真—5.13 Cobquecura で壊れなかったと思われる塀



写真—5.14 Pelluhue における津波による被災状況



写真—5.15 Rancura の状況

(4) Iloca (イロカ) における被害

Curico (クリコ) から海岸に向かう道路が海岸に出たところの Rancura (ランクーラ) の様子を写真—5.15 に示す。ここでは津波高さの簡易測定を行ってみたところ、約 4m であった。

それから海岸線を北に行った Iloca では写真—5.16 に示すように津波によって家屋が多く被災していた。この 1 箇所でも簡易測定した結果によると津波高さは 1.4m 程度であった。

(5) San Antonio における被害

San Antonio にはチリに到着した日に Prof. Verdugo に案内してもらい、市街地南部の Llo-Ileo (ジョジェオ) の津波による被害箇所を調査した。ここは写真—5.17 に示すように、海岸に面した集落の中央部に盛土によって道路が造られ、写真の右側の集落ではその道路が海岸線を走って港まで続いている。盛土高さは 6m 程度である。ここに津波が襲い、道路がない区域は写真—5.18 に見られるように壊滅状態になったのに対し、道路で囲まれていた区域は写真—5.19 に示すように津波による被害を免れた。この津波高さは前述したように 5.2m とのことである。



写真—5.16 Iloca の津波による被災状況



写真—5.17 San Antonio の Llo-Ileo において津波によって被災した区域と被災しなかった区域



写真—5.18 津波で被災した区域の状況



写真—5.19 津波の被害を免れた区域の状況

6. 道路盛土及び橋梁の被害

6.1 Santiago (サンティアゴ) 市内の被害

Santiago 市の地盤は、San Christba (サン・クリストバル) 丘の南側は Mapocho (マポチョ) 川による発達した扇状地に堆積した砂礫地盤であるのに対し、北側には緩い砂またはシルト地盤が堆積しており、被害は地盤条件の悪い北側に集中している。

Santiago 市内では、環状高速道路が Lo Echevers (ロ・エチェベルス) Road および Miraflores (ミラフローレス) Road と交差する地点において、環状高速道路のオーバークラスの橋梁が落橋した。橋梁の位置を図-6.1 に△印で示す。これらの橋はいずれも 3 径間コンクリート橋である。地盤が軟弱な粘性土であり、地盤の揺れが大きかったことと橋脚の基礎に問題があったことが原因として考えられる。橋台はテールアルメによる補強土擁壁で造られており、これには変状は見られなかった。



図-6.1 被災した橋梁の位置 (△印)

6.2 Lo Gallardo (ロ・ガジャルド) 橋

San Antonio (サン・アントニオ) 南側の Maipo 川を横断する比較的新しい 28 径間の橋であり、その上流側に現在は使用されていない古い橋がある。Lo Gallardo 橋にはほとんど被害はなかった。右岸の下流側に液状化によると思われる川岸の流動が見られた。古い橋は 1985 年の地震で被災したものがそのまま残っている。写真の赤線が橋梁、ドットは橋脚の位置を示す。



図-6.2 Lo Gallardo 橋



写真-6.1 Lo Echevers Road との交差点での被災状況



写真-6.2 Miraflores Road との交差点での被災状況

6.3 高速 5 号線盛土

Santiago から南に約 50km, Paine (パイネ) の南約 6km の高速 5 号線下り線 (南行き) の Paso Superior Hospital (パソ・スペリオール・ホスピタル) 橋と取り付け部の盛土が被災した。現場付近にはラグーンがあり、地盤は粘性土が卓越する地盤であると推測される。7 m までシルト質砂、地下水位は地表付近までであった。

この地点では、今回被災した古い道路の横に高速道路が新設され、旧道の橋と現在の高速道路 (上下線) の合計 3 本の橋があり、鉄道のオーバークラス部で盛土高が増加しながら橋梁にとりついている (図-6.3)。高速道路の登り線と旧道の 2 本の橋が落下。落橋した 2 橋梁は、斜橋であり、残った 1 本は直橋 (斜角が 90°) であった。落橋した斜橋の斜角 (アバットと道路軸のなす角) がおよそ 45° と小さい。日本の道路橋では斜角をおよそ 60° 以上 (目安値) とする制限がある。

取り付け盛土の被災部は図-6.3 のドットを付した箇所である。盛土が滑り天端が沈下して、多数の縦断クラックが発生し (写真-6.5)、橋梁との接合部で 0.9m の段差

が生じた。図-6.4 は天端に発生したクラック位置である。盛土は接合部で高さが最大の9mとなり、のり面勾配(破壊後)は1:1.5~1:2.1, 天端の沈下量は橋台背後で0.6~0.9m, 法肩ガードレールの水平変位は下図0.7~1mであった(写真-6.6)。

盛土の復旧では、舗装厚35cm, 路盤厚25cm, その下に粒度の良い砂礫土で復旧されており路盤下面から40cm間隔に3枚の不織布(ジオテキスタイル)が敷設されていた。



図-6.3 被災した盛土の概要



写真-6.5 道路天端の状況



図-6.4 天端のクラック発生位置



写真-6.6 盛土と橋台の接合部。地震前は平坦な道路面であった

6.4 Claro (クラロ) 川橋

レンガ積みのアーチ橋が崩壊した(写真-6.7, 6.8)。この地点には、高速道路、鉄道及び被災したアーチ橋の3本の橋が並行して架かっている。被災したアーチ橋は1870年に建設されたレンガ積みのアーチ橋である。この橋の5つの橋脚が崩壊している。損傷度が低い中央の橋脚にもクラックが見られ、また材料の劣化が激しい。橋台にはほとんど変状が見られなかった。この橋は、並走する道路橋の建設後は車両の通行は禁止されていた。並行している道路橋には被害が見られなかったが、鉄道橋の取り付け盛土は沈下してレールの下に隙間が生じていた。

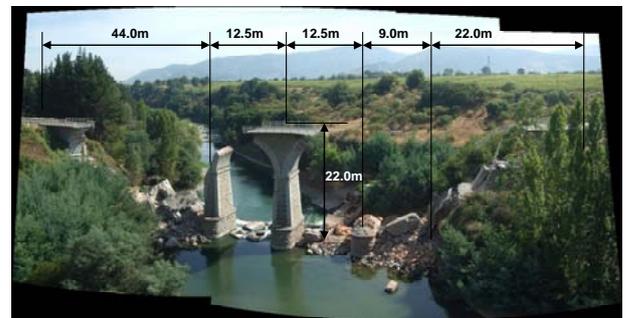


写真-6.7 崩壊したアーチ橋



写真-6.8 崩壊したアーチ橋

6.5 Conception 付近

(1) Lota (ロータ) 北部の道路盛土

片側二車線の道路盛土と鉄道橋が交差する地点付近において、道路盛土と鉄道盛土が被災した。現場の状況を図-6.5 および写真-6.9 に示す。図中の点線で囲んだ部分が被災した盛土箇所である。道路盛土は高さ16m (図-6.5 の A-A 断面及び B-B 断面)、無被害断面の法面勾配は1:1.5で、小段のない一枚法面であった。道路は図の左側二車線が元々建設され、右側の二車線が腹付け盛土により拡張された部分である。道路盛土と鉄道盛土に囲まれた部分は元は沼地であり、調査時においても地表に浮いた水が部分的に見られた。



図-6.5 盛土の概要



写真-6.9 被災部をヘリコプターから撮影

道路盛土は、新設された道路盛土が最大で7m沈下し、そこに車が転落していた。新設道路部の被災断面を図-6.6に示す。また、滑落した盛土を写真-6.10に示す。約5cm厚のアスファルトの路盤としてシルト質の砂(写真の茶色い部分)が約20cmあり、その下は砂の盛土である。この盛土材料の粒径過積曲線を図-6.7に示す。均一で細粒分をほとんど含まないきれいな砂であり、近隣の海岸から採取された砂であると考えられる。

この被災断面は、粒度の悪い砂を用いた腹付け盛土であり、建設時に十分に締固められていなかったことも考えられる。一般に、粘着力を持たない均一な砂盛土の地震による崩壊形態は、法面表面にごく近いすべり面に沿って崩壊する。この盛土の盛土中央から大きく滑っている被災形態からして盛土自体の滑り崩壊ではなく、地震により基礎地盤が液状化し、腹付け盛土が元の盛土の裏面に沿って滑ったことが推察される。

鉄道盛土の被災状況を写真-6.11に示す。この区間の盛土全体が沈下し、最大で天端が2m沈下した。鉄道盛土は道路をアンダーパスしており、盛土高さは道路盛土よりも数メートル低い。鉄道盛土は一部の法面に変状がみられたが盛土の形状をほぼ保ちながら最大約2mと大きく沈下し、天端や法面にも目立ったクラックは生じていないことから、地表面にある軟弱な腐植土に沿って滑ったのではなく、その下に液状化した砂地盤があるものと推測されるが、噴砂痕などの液状化の明確な痕跡は見られなかった。



写真-6.10 道路盛土の被災状況

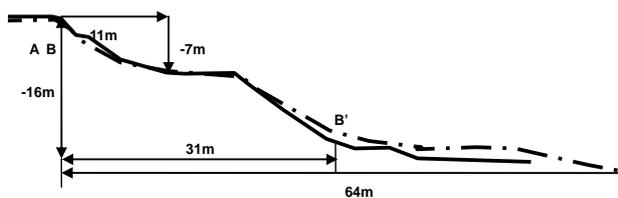


図-6.6 被災断面形状

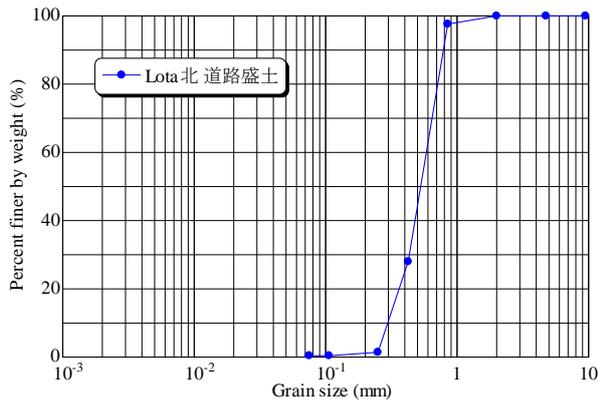


図-6.7 盛土材の粒径過積曲線



写真-6.12 Raqui II 橋の被災状況。2つの桁が落下している（橋の北西側から撮影）



写真-6.11 鉄道盛土の被災状況

(2) Tubul (テュブール) 東

2つの河川の河口部を横断する道路橋 (Raqui (ラクイ) 2橋と Tubul 橋) とそれらの取付盛土が被災した。現場の位置を図-6.8 に示す。現場は2章の地質図で海成 (沖積) 地盤に分類され、河口のデルタ地帯である。後述するように、この付近に河川により供給される土は主に砂であり、部分的に腐植土が堆積している。

Raqui II 橋は4径間、Tubul 橋は8径間の単純桁橋である。これらの橋は1950年代後半に建設され、当時は木製桁であったが、1990年頃にコンクリート桁とされた。Raqui II 橋は2つの桁 (写真-6.12)、Tubul 橋 (写真-6.14) は8つの桁が落下した。



写真-6.13 Raqui II 橋の橋脚。橋脚の幅と桁掛かりが非常に小さい



図-6.8 Raqui II橋とTubul 橋の位置



写真-6.14 Tubul 橋の被災状況 (北東方向上空から撮影)

盛土は橋台に向かって徐々に高くなり、橋台の取り付け部で約2mである。

盛土の材料は、海岸で採取し盛土に用いられたと考えられる均一で粒径のきれいな中砂～細砂である。この盛土が、橋梁の取り付け部から数十mの区間で沈下し、天端および法面にクラックが発生した (写真-6.14～6.18)。沈下量は取り付け部で約1mである。

何れの橋の取り付け盛土においても、被災した箇所は

河道内に築造された盛土部であり（写真-6.14 図-6.9），地盤条件の悪い部分が被災したものと考えられる。写真-6.17 と写真 6-18 は橋の南側から撮影したものである。写真 6-18 の右端（下寄り）の草むらの中にはいくつものクラックがあり，そのクラックの中に見える断面（目視で確認できた深さ 30～40cm まで）は砂であった。また，橋からおよそ 50m の法尻部（写真 6-17 の右側）には噴砂痕が見られたことから，地盤が液状化し盛土が被災したものと考えられる。

Raqui II 橋付近の地盤表面は腐植土で覆われており，部分的には砂の部分も見られた。Raqui II 橋付近では明確な噴砂痕は確認できなかったが，盛土の裏面のクラック内に水を吹いた痕跡らしきもの存在した（写真-6.19）。ここでは地表面に腐植土が分布していることから，腐植土上に建設した盛土が腐植土層の圧縮により大きく沈下し，これによって地下水位以下となった盛土底部が液状化した可能性も考えられる。



図-6.9 取付け盛土の被災箇所（Raqui II 橋）



写真-6.15 Raqui II 橋の取り付け盛土の被災状況（橋台より北西側の盛土を撮影）



写真-6.16 Raqui II 橋の南東側



写真-6.17 取付け盛土の被災状況（Tubul 橋南側）



写真-6.18 取付け盛土の被災状況（Tubul 橋南側200m地点）



写真-6.19 クラック内の水を吹いた痕跡（Raqui II 橋北西側盛土法尻）

(3) Concepción 市内の橋梁：Juan Pablo（フアン・パブロ）II 橋

Biobio 川を横断する桁間 32m、全長 2310m、片側二車線の道路橋で、1974 年竣工。橋脚の基礎は直接基礎である（写真-6.20）。

最も右岸側寄りの橋脚がせん断破壊していた（写真-6.22）。また、杭のない橋脚基礎が沈下し、路面には大きなうねりが生じていた（写真-6.21）。右岸側から 2 つめの橋脚は大きく沈下しており（写真-6.23）、桁が横断方向に約 3°傾斜していた。



写真-6.20 Juan Pablo II 橋の全景



写真-6.21 路面のうねり



写真-6.22 橋脚のせん断破壊



写真-6.23 直接基礎の沈下

(4) Concepción 市内の橋梁：Viejo Biobio（ビエッホ・ビオビオ）橋

この橋は 1942 年竣工した古い橋で、杭基礎で指示されている。1960 年の地震で被災し、その後供用が制限されていたが、今回の地震で多くの桁が落下した。



写真-6.24 Viejo Biobio橋の被災状況

(5) El Parron（エル・パロン）橋

Concepcionの北約70kmの海岸沿いのCuranipe（クラニペ、図-6.10）で、小さな河川を渡る道路橋が落橋していた（写真-6.25）。

これは川と道路が斜めに交差している地点に架けられた斜橋である。図-6.11は被災前の Google Map の写真であり、斜角が約 45°と大きいことがわかる。

目撃者によると、地震で落下した桁が津波と共に遡上した家屋や車などを堰き止め、橋の上流側の家屋に対する被害を軽減したようである。橋台の欄干に津波の痕跡があり、津波水位は欄干部まで達していたと考えられる。



図-6.10 被災地点周辺の地形図



図-6.11 被災前のEl Parron橋



写真-6.25 被災後の橋台

7. 港湾施設の被害

7.1 チリ共和国の港湾施設整備・運用の概要

チリ共和国の経済は、主に輸出により成立しており、世界の生産量を誇る「銅」が輸出品目の第一位を占め、第二位は農業関連製品となっている。さらに近年、モリブデン等のレアメタルの輸出も多くなってきている。各地で産出される良質なワイン、サーモン、木材パルプの輸出が始められている。南北に長い国土形状を有するチリ共和国において、北部の主要産業は鉱業であり、南部では大規模な農業、酪農が主要産業となっている。

一般貨物及びコンテナ貨物に対応している主要港湾は5港あり図-7.1に示すように北から Iquique（イキケ）



図-7.2 地形を利用した Talcahuano 港



図-7.1 チリ共和国の主要港湾

港、Valparaiso（バルパライソ）港、San Antonio（サン・アントニオ）港、San Vicente（サン・ビセンテ）港、Talcahuano（タルカワーノ）港である。今回の地震・津波によりペルー国境に近い Iquique 港を除く主要4港が何らかの被災を受けている。また、図-7.2に示すように San Vicente 港と Talcahuano 港は Talcahuano 市街地の西部と北部に位置している。チリ共和国沿岸部の海象条件から、Talcahuano 港のように北北東方向に開口部を持つ地形や、San Vicente 港のように北北西方向に開口部を持つ地形を利用した港湾が多く、Valparaiso



図-7.3 岸壁と防波護岸を併用した San Antonio 港

港も同様である。San Antonio 港では図-7.3のように法線方向が北北西方向の岸壁の港外側を防波護岸としている。本調査団では、最も新しくコンテナふ頭が整備された Coronel 港についても調査を実施している。Coronel（コロネル）港の場合、西方20km程度に Santa Maria 島があり、防波堤の役割を果たしているものと考えられる。

比較的古い港湾においては岸壁の構造形式として重力式や矢板式が見られるが、比較的新しい港では、縦棧橋形式が用いられている。

これらの港湾整備は、1980年代初頭から政府の民営化政策の実施により、主要道路、空港、港湾施設については、コンセッション方式による民営化が推進されている。同様に電力、通信、金融、製鉄、製糖、空輸、海運等についても民営化が終了している。

港湾施設についても、主にヨーロッパ資本のコンセッション構成企業による施設整備・運用がなされている。急速な国際経済・社会のグローバル化により国際海上物流においてコンテナ輸送のグローバル化の急速な進展、メガオペレーターの出現、船社の合併やアライアンスなど、巨大化・少数化によるスケールメリットの追求や巨大コンテナ船の投入などが急速に進む状況に迅速に対応

した港湾施設整備が必要となっている。十分な資金調達が困難な国の経済状況において、BOT (Build Operate Transfer: 民間企業の資金、建設、運用のノウハウを活用して行う社会資本整備、公共サービス提供のための事業手法であり、民間企業は自らの資金で施設を建設 (Build) した後、一定の契約期間を定めて営利目的で運営 (Operate) し、期間終了後は施設を公共部門に移管 (Transfer) する方式) やコンセッション方式 (Concession: 民間企業が港湾施設整備に投資を行い、建設した施設を一定期間運営する権利を公的部門から入手する契約方式。チリ共和国の場合、土地の所有権は民間企業に移さず公的部門が保有している。) の導入により近代的な港湾施設の建設、港湾オペレーションの民営化、貿易や港湾管理運営の IT 化等が迅速に実施できる。これらの社会基盤施設に求められる事項として、経済性のみではなく、安全性確保も重要であるが、コンセッション構成企業(多くは多国籍企業) による施設の建設・運営が進められるため、「利益の追求」が最優先されることになりがちである。本来、どの様な施設整備形態であろうとも、チリ共和国の自然・経済および社会環境に適した港湾施設の設計・施工および運営が求められるべきと考えられる。今回の調査で実施した公共事業省へのヒヤリングの結果、チリ共和国の港湾施設整備に関する国や公的機関の「設計基準」が存在しないことが確認され、コンセッション構成企業の判断により設計・施工されているとのことであり、主に、コンセッション構成企業の母国の基準類を準用することが多いとのことである。地震・津波の多発地帯に位置するチリ共和国ではあるが、コンセッション

構成企業の多くがヨーロッパ圏の企業であることから、耐震設計について、技術水準が必要十分であるか検証が必要であろう。港湾施設の耐震設計については、基準が無いため、建築分野の「設計震度」を考慮しているとのことである。

7.2 被害事例

(1) 縦栈橋の被害

地形をうまく利用した縦栈橋式の施設について、典型的な被

災事例として Coronel 港北側に隣接する漁港の栈橋 (図

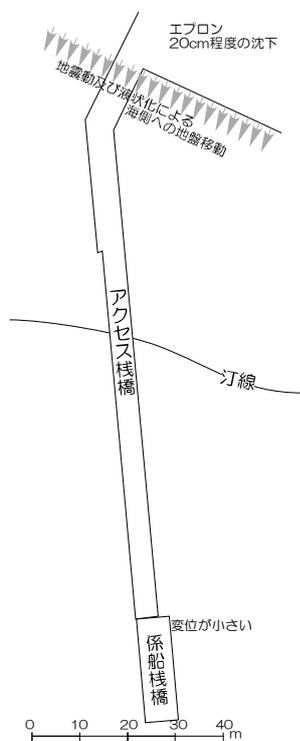


図-7.4 漁港の縦栈橋平面図

7.4) の被災を取り上げる。

縦栈橋とは汀線と直行するように岸から沖に向かって、必要な水深が確保される地点に係船用の栈橋を設置するものである。陸上部 (自然海浜) から係船用栈橋までのアクセス経路については、橋梁形式と栈橋形式が考えられるが栈橋形式であることが多く、本漁港栈橋へのアクセス経路も栈橋形式である。この様な形式の利点としては、埋立と異なり、杭の打設・床版の設置であることから施工期間が短い、安定した自然勾配の海浜から沖合に向けて栈橋の杭を配置するため常時の安定性の確保が容易である、当該地点の海流等によって形成された海底地形を利用していることから水深を維持する浚渫等のメンテナンスの必要性が小さいなどが挙げられる。一方、欠点としては、アクセス栈橋部の陸側部分において揚圧力への配慮が必要となること、荷役効率が良くないことが挙げられる。

被災状況として、写真-7.1 に示すようにアクセス栈橋部の床版が屈曲している。陸側エプロン部で 20cm 程度



写真-7.1 漁港の縦栈橋の被災状況

の沈下が観測されていることから、液状化現象が発生したものと考えられる。ただし、エプロンの平坦性が保たれていることから比較的深部に液状化層が存在するか、液状化の程度が低かった可能性がある。液状化の発生により、自然勾配の海浜ではあるが、地盤が海側へ移動することが考えられる。陸上部のアクセス栈橋の鋼管杭が傾斜していることから地盤が海側へ移動したことが想定される。一方、係船用栈橋部は、船舶の接岸力・牽引力に抵抗するための鋼管杭配置となっているため、変位は小さいものと想定される。このため、係船用栈橋部がほぼ不動であり、アクセス栈橋が陸側から海側への地盤変位に伴い圧縮されることになる。海底部分においても液状化現象が発生したものと想定され、摩擦杭の抜け上がりや沈下が発生し床版が座屈したものと考えられる。一般的に、斜組杭は変位抑制のために設置されることから工学的基盤へ打設することが多いが、比較的良く締まった砂質地盤であることから摩擦杭として設計・施工されたためこのような被災形態になったものと想定される。対策としては、地盤の液状化対策・変位を吸収できる渡版

の設置などが考えられる。

なお、この漁港栈橋およびアクセス栈橋は被災前には小型トラックによる魚箱の輸送を行っていたが、被災により小型トラックの進入が困難となった。一方、地元漁民にとって、本施設は生活基盤施設であるため地震直後から係船・荷役が行われ、係船栈橋から陸上エプロンまでは人力による魚箱の輸送が行われていた。

(2) Coronel 港の縦栈橋の被害

Coronel 港には、一般貨物用縦栈橋 (図-7.5) とコンテナ貨物専用縦栈橋 (図-7.5) がある。一般貨物用縦栈橋 (+8m~+12m, 栈橋天端は+6m) およびアクセス栈橋は直杭および斜組杭を用いた構造であり、水際線背後に自

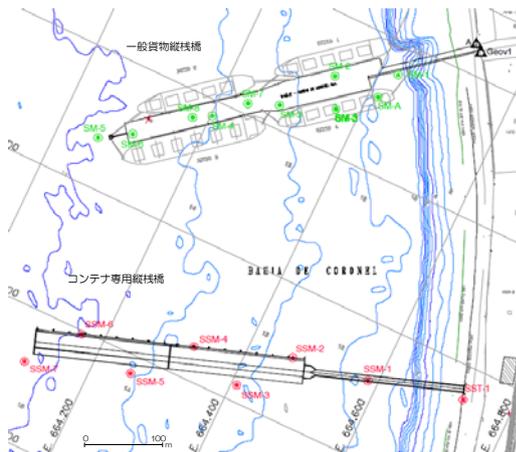


図-7.5 Coronel 港の縦栈橋平面図

立矢板式の護岸を有している。当該地点の支持層は GL-70m 付近であるが、鋼管杭下端は GL-50m~55m であり直径 600mm、肉厚 14mm の摩擦杭として設計されている。被災形態として、護岸部が海側へ移動したことによるアクセス栈橋の杭頭部・床版のプレートガード一部分に損傷 (写真-7.2) が確認された。

護岸の海側への移動の原因として、一般的に液状化現象による事が多いが、荷さばきエプロン部については舗装工事の際

に締固めがなされていることから、大きな変状は確認されなかった。護岸背後 15m 程度の区間には顕著な亀裂および沈下が確認された。護岸構造が自立矢板 (IV 型



写真-7.2 アクセス栈橋の被災状況

鋼矢板 L=6m、根入部 4 m、壁面部 2m) であることから地震動によって矢板が海側へ移動することが想定され、液状化の有無は明瞭に確認できなかった。護岸背後 45m 区間のクラック幅の総和は概ね 90cm であり、これは護岸の変位量に近い数値と考えられる。漁港の縦栈橋同様に地盤改良および護岸部とアクセス栈橋間に変位吸収可能な渡版を設置することにより、より耐震性の高い構造となるものと考えられる。

コンテナ貨物専用縦栈橋 (+10~+13m, 栈橋天端は+6m) にはレールスパン 24m のガントリークレーンが 2 機設



写真-7.3 斜杭で支えられたプラットフォーム上の鉛プラグ入積層ゴム支承

置されている。この栈橋の特徴として写真-7.3 に示すように斜組杭では無く、斜杭を用いたプラットフォームを設置し、床版との間に鉛プラグ入積層ゴム支承を配置していることが挙げられる。この支承は、橋梁・建築等で使用されている「免震要素」と同様のものであるが、栈橋への適用は珍しいものである。但し、この栈橋への鉛プラグ入積層ゴム支承の導入目的は、免震効果を狙ったものではなく、床版を支える梁断面の軽減を主目的とし、鉛直荷重を効果的に伝達させようという設計思想である。また、栈橋全体の減衰特性を向上させるという狙いもあるようである。一般的に直杭のみ栈橋では杭の諸元が大きくなりがちであり、杭本数が増えるのを押さえるために斜杭を併用することが多いが、本栈橋の設計に当たっては、地震時になどに水平変位が発生した際に斜杭が破損することを嫌い、アイソレーターを導入、変位抑制のために栈橋の減衰特性を向上を狙い鉛プラグ入りとしたと考えられる。

管理者へのヒヤリングの結果、一般貨物用縦栈橋、コンテナ貨物専用縦栈橋ともに、地震後点検を経て翌日から供用を再開したとのことである。

7.3 災害時の港湾施設の運営

日本においては、地震発生により陸上輸送機関の道路や鉄道に障害が出ることがあり、港湾施設を用いた緊急対応・復旧支援が期待されている。

地震発生からの時系列で港湾施設に求められる機能と

施設の状態を時系列で示すと図-7.6 のようにまとめられる。ここでは、対象とする地震をレベル2地震動（巨大地震）と考えており、対象港湾施設にもある程度の損傷が発生することが想定されることから、発災直後から1日程度の期間には、警察・消防・自衛隊・海上保安庁等の緊急出動に対応するために「耐震強化施設」および被災程度の簡易判定により供用可能と判断された施設を用いる。発災から概ね2～3日以内に、被災住民への食料・水等の支援物資の輸送に対応する。発災から1週間程度を目処に、港湾の各施設の被災程度に応じた応急復旧計画を策定し、順次、復旧資材・重機の搬入を行い、復旧を開始する。同時に、被災地への支援活動に供することになる。

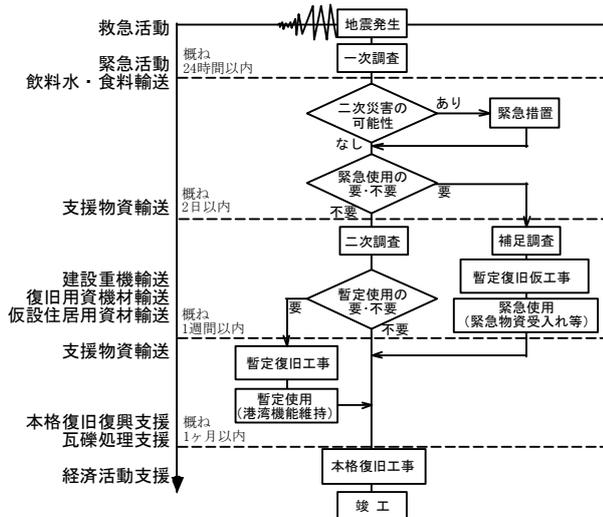


図-7.6 地震後の港湾施設に求められる機能と対応

今回、チリ共和国において、経済活動の基幹施設である高速道路が寸断され、比較的軽微な被害であった港湾施設を活用することにより迅速な被災住民支援や復旧支援が可能となるものと想定していた。しかし緊急対応等についてヒヤリングしたところ、被災住民支援や復旧支援といった発想が全く無かったことが判明した。すなわち、コンセッション構成企業の「活動再開」を最優先して、専門家による迅速な点検・供用の可否判断がなされ、翌日からは供用を再開している。一方、コンセッション市内では、水や食料を求めて略奪が発生したことが今後の課題となるものと考えられる。日本においては、企業の専用施設が、万一の災害時に被災住民支援を担うことが想定されており、自治体との協力協定が締結されている。チリ共和国においても、同様の取り組みを実施することが望まれる。

7.4 まとめ

コンセッション方式による港湾整備・運営により、施設自体の地震・津波後の復旧は迅速に行われた。一方、被災住民救援や復旧への対応には、残念ながら活用されなかったが、国・自治体・近隣コミュニティとコンセッション組織企業間の連携・災害時協定締結等のソフト的

対応が期待される。

コンセッション方式により構成企業の判断で施設設計・運営がなされているが、今後は対象地点の自然条件・経済や社会環境に対応した設計・運営が望まれる。このため、これらの条件を考慮したチリ共和国独自の「設計基準」の策定が望まれる。

日本の港湾施設の地震時被災要因として液状化現象が挙げられるが、今回調査した範囲では顕著な液状化による被害は津波による噴砂痕の流失もあり確認できなかった。護岸付近の杭構造物の側方流動による被害は確認されており、液状化が発生した可能性は少なからずあるものと想定される。

棧橋形式の場合、津波による損傷は比較的小さいものと考えられる。

今回、地震と津波の相互作用による被害について何らかの知見が得られないかと考えながら調査を実施したが、地震動による損傷が発生した後に津波が来襲するというタイムラグがあること、津波の破壊力が大きく地震動による損傷との区別を付けることが困難であることを再認識させられた。概念的には地震動による損傷が小さければ津波来襲時の損傷も小さくなるだろうと想像出来るが、現地調査の難しさに直面した感がある。

損傷の程度に関する方程式を考えると、

地震	津波	被災後	
軽微	+	無し	= 軽微 (1)
無し	+	軽微	= 軽微 (2)
軽微	+	軽微	= ?? (3)
中規模	+	軽微	= ?? (4)
軽微	+	中規模	= ?? (5)
??	+	??	= ?? (x)

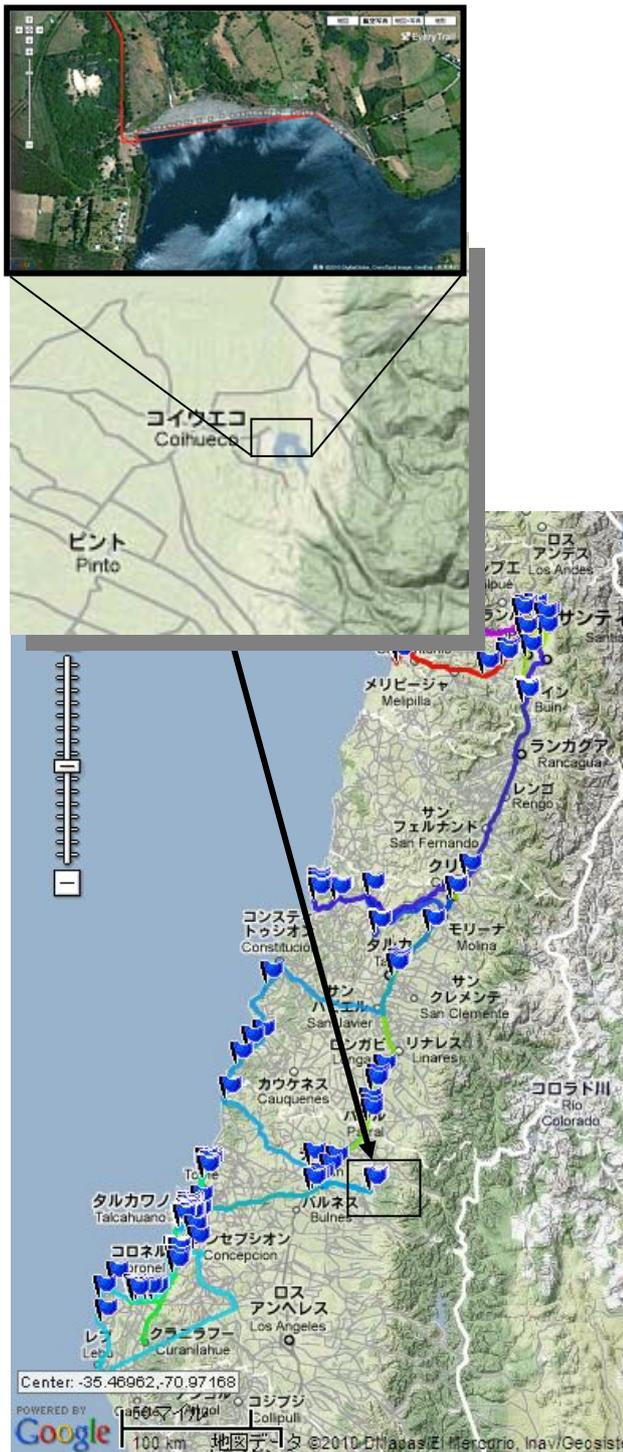
ハード面での経済的かつ合理的な対策を考える際に、被災後の損傷程度を制御できれば、最適解に近い施設整備が提案できる可能性があると考えている。恐らく施設の特性によっても、答えが変わるであろうし、単純な一次方程式にはならないものと想像される。今後は、被災調査に加えて、実験や数値解析によってこれらの関係を明らかにしていきたいと考えている。

8. ダムの被害

8.1 Coihueco (コイウエコ) ダム

大小2つのダムがほぼ連続する総延長 975m のゾーン型フィルダム（堰堤高さ：最大 31m、下流側斜面勾配：21°、上流側斜面勾配 19°、湛水域面積 226 万㎡）である（図—8.1）。以下は”Irrigation Management in Latin America”¹⁾の記述も参考にしている。

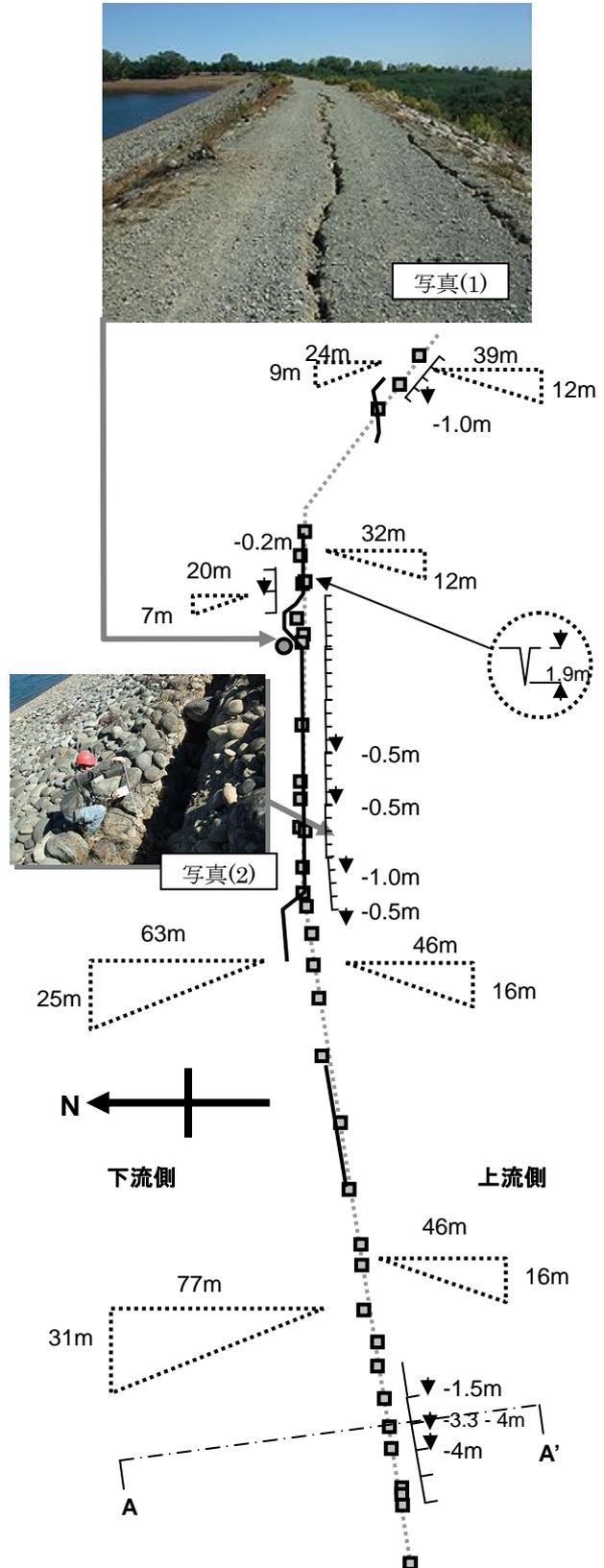
チリの灌漑は北から南に大きく 12 の管轄区域に区分されているが、Coihueco ダムはこのうち第7区域でおよそ 6500ha を灌漑する代表的なダムである。この区域はア



図—8.1 Coihuecoダムの位置

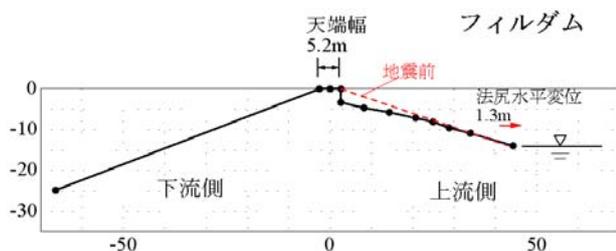
(左岸アバットメント位置：-36.63726,-71.7981)

ンドスから流下する雪解け水の恩恵を受け、このため灌漑は必要な時期に補助的に行われる。第7区域は 250,000 ha が稲作に充てられていて、チリの米の収量の 2/3 がこの地域で生産される。稲は粘性土地盤、旧湖沼地で栽培されていてこれが他の農作物耕作地との地盤条件を分けている。



図—8.2 ダム堤頂 (975m) に沿って確認された変状

チリでは、1915年に開発省の下に灌漑局が置かれ、水資源活用のためのインフラの計画、施工、管理が進められてきた。また公共事業省の水資源局は水利関係法案の実施機関として機能してきた。かつては国が深く関わった灌漑事業も1980年以降民活が大きく進み、農業者や水利用者は彼らの自立的組織である水利委員会（water communities）、運河協会（canal associations）、そして監視委員会（vigilance councils）などに関わる形でこれを利用している。ダムや運河、水路などの水利施設も、民間セクターへの売却、水利用者の株式取得などの形で民間への管理の移行が進んでいる。



図—8.3 ダム堤体断面（図—8.2中AA'断面）

ダムの被害は堤頂のほぼ全長に走る縦断亀裂と上流側斜面の貯水池方向への滑りである（図—8.2）。縦断亀裂は右岸近くで深さ1.9mに達する部分がある。堤頂コア部分の沈下はほとんど確認できない。上流側斜面の貯水池方向への目立った滑りは3箇所を確認できる。最も大きなすべりは左岸近く（図—8.2中AA'付近）で発生していて、この計測断面を図—8.3に示す。肩の部分が3.3m近く沈下し、貯水池側に大きくはらみだしている。この結果この断面の上流側斜面は他の健全な部分の 19° に対し 16° 程度に変化している。3.3mの肩部の沈下はダムの最大高さ31mの10%以上にも達している。

参 考 文 献

- 1) “Irrigation Management in Latin America, Present situation, problem areas and areas of potential improvement,” Colombo Sri Lanka, International Irrigation Management Institute, Translated from Spanish by Mira Fischer and others, 1990.

9. 鉱さい堆積場の被害

9.1 チリにおける鉱さい堆積場の埋立方法と過去の被災事例

チリは各種鉱物資源が豊富な国である。特に銅の埋蔵量は世界の約 27%、生産量は世界の 34%と世界一であり、チリ経済の主要な柱となっている。

銅や金などを産出する場合、まず、採掘した鉱石を粉碎し、粒度の分級をする。そして、適切な選鉱法を用いて有用鉱物を抽出する。最も広く行われているのは浮遊選鉱である。これは鉱山から産出された鉱石を大型のミルで粉碎し、スライム状にした上で捕収剤や起泡剤を添加して有用鉱物を泡の表面に濃集させて回収する。一方、残ったかすはスラリー状で鉱さいダムに堆積させる。この際、粗粒の砂状のものと細粒のシルト状のものを分け、前者を扞止堤（堤体）の材料として使い、後者をポンド（沈殿池）に捨てる。

後述する Veta del Agua（ベータ・デル・アグア）鉱さい堆積場におけるこの過程を示したのが写真—9.1～9.3 である。ここは銅の鉱山である。写真—9.1 は扞止堤、写真—9.2 はポンドを示し、写真—9.3 は鉱さいをスラリー状で第 4 鉱さい堆積場に流し込んで捨てている様子である。鉱さい堆積場の施工手順としては、まず扞止堤の基礎となる基礎堤を岩石または土などで築き、そのポンドにスライムを流し込む。ポンドが満杯に近くなってくる



写真—9.1 扞止堤建設の例 (Veta del Agua)



写真—9.2 ポンドの例 (Veta del Agua)



写真—9.3 鉱さいを流し込む方法 (Veta del Agua)

と、扞止堤を粗粒の鉱さいで嵩上げする。そして、ポンドの方に細粒の鉱さいを流し込む。また満杯近くなると、扞止堤を嵩上げする。この過程を繰返して、所定の高さになったらその堆積場は終了し、次の場所に移り、別の堆積場を造っていく。したがって、一地区で複数の堆積場が造られることが多い。

チリにはこのような鉱さい堆積場が数多く造られてきた。その中には現在も使用しているものと、満杯になるとか鉱山が閉鎖されて廃止されたものがある。

さて、チリでは過去の地震時にも鉱さい堆積場が崩壊し、犠牲者を出してきている。1985年には Valparaíso（バルパライソ）沖合を震源とする M=7.8 の地震が発生したが、その際、地震の影響範囲内に 16 の使用中鉱さい堆積場と 36 の廃止された鉱さい堆積場があった¹⁾。このうち、使用中の 2 つの鉱さい堆積場が破壊し、鉱さいが流出した。すべての使用中堆積場と多くの廃止された堆積場でスライムの液状化が発生した。いくつかは 70 年経ったものでも液状化した。ほとんどの堆積場でクラックがはいり、変位も発生した。崩壊した 2 つのダムは Veta del Agua の第 1 堆積場と Cerro Negro（セロ・ネグロ）の第 4 堆積場であり、流出した鉱さいは 8～10km に渡って谷沿いに流れだし、洪水を起こした。これらの鉱さい堆積場の震央距離は 120～140km であった。

なお、Veta del Agua の近くにある El Cobre（エル・コブレ）鉱さい堆積場では 1965 年に発生した地震の際に鉱さいダムが破壊し、200 名に及ぶ犠牲者を出している。

9.2 今回の地震による被災箇所数と Las Palmas（ラス・パルマス）の被害状況

今回の地震では図—9.1 に示す Veta del Agua, Florida（フロリダ）、Las Palmas の 3 箇所（箇所）の鉱さい堆積場が被災した。そして、Las Palmas では流出した鉱さいが家屋を襲い、一家 4 名（夫婦と子供 2 人）の命が奪われた。

今回の調査では、これらのうち Veta del Agua と Florida には時間が不足して調査に行けなく、Las Palmas のみ調査に行くことができた。Veta del Agua に関しては、Verdugo（ベルドゥゴ）教授に聞いたところ、五つの鉱さい



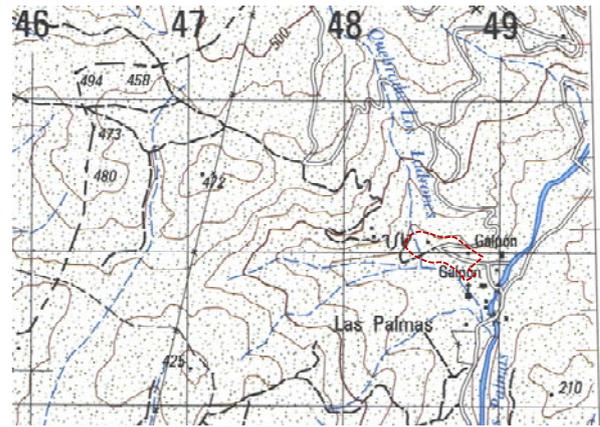
図—9.1 被災した鉱さい堆積場の位置

い堆積場のうちの 하나가崩壊したとのことであつたがそれ以上の詳細は分からなかつた。Florida に関しては Troncoso (トロンコーソ) 博士等に会い状況をお聞きしたところ、金の鉱山で、ここには新・旧の堆積場があり、そのうち新しい堆積場で液状化が発生して側方に孕みだしたとのことであつた。

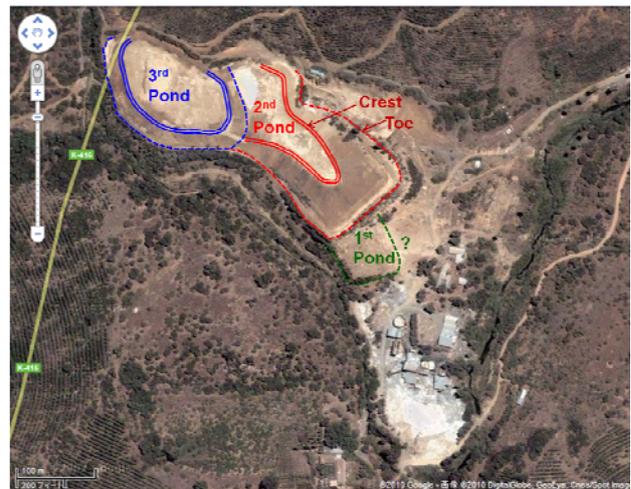
さて、Las Palmas 鉱さい堆積場は金の鉱山の堆積場で、Talca (タルカ) と Curico (クリコ) の中間の 5 号線から海岸方向にはいった山中にある。ただし、山と言っても丘が連なつたようなところである。図—9.2 に 1/50,000 の地形図(ただし鉱さい堆積場は示されていない)を示す。ここでは小さな沢が 2 本集まつた所に鉱さい堆積場が造られている。写真—9.4 に地震前の Google の写真を示す。住民の話によると、ここには 1981 年～1997 の間に三つの鉱さい堆積場が造られてきたとのことである。それらの位置は写真から判読すると、写真—9.4 に示した箇所に押止堤およびポンドがあつたのではないかとと思われる。ただし、第 1 堆積場の位置は良く分からない。なお、第 3 堆積場の西側では押止堤が崩壊せずに残っていたため、外法面の寸法を測つてみた。これが図—9.3 である。この位置では押止堤の高さは 14m で、外法面平均勾配は 1:2 となる。

筆者達は現地において、崩壊および鉱さい流出範囲を GPS によって調べた。その範囲を写真—9.5 に示す。写真—9.4 と比較してみると、今回の地震によって被災したのは三つの堆積場のうち、第 2 番目の堆積場と考えられる。流出長さはのり尻から流出範囲の端までと考えると水平距離で約 400m となる。また、鉱さいの崩壊・流出全範囲は長さ約 650m、最大幅約 250m となる。

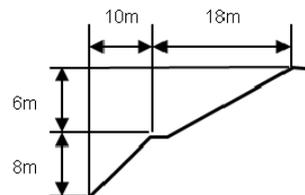
一方、レーザー距離計によって A-B-C 測線に沿つた数点の距離と高さを測定し断面も推定していた。これが図—9.4 である。滑落崖位置 B の高さを 0m として、各点の高さを表示してある。B から C に向かつては約 30m 下がっている。写真—9.4 と写真—9.5 を元に、第 2 堆積場ののり尻付近の距離を推定すると、この図の 250m 付近になる。この付近も流出した鉱さいで覆われていてその厚



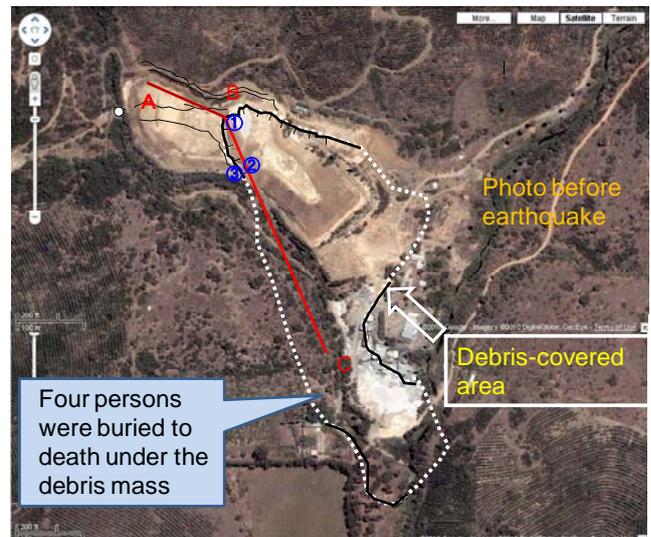
図—9.2 Las Palmas 鉱さい堆積場の位置



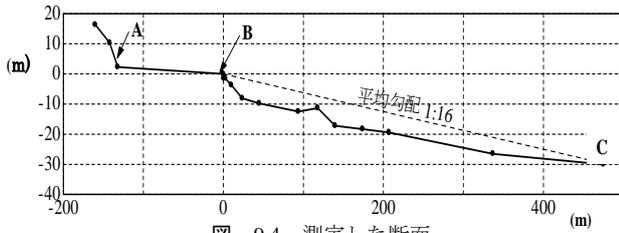
写真—9.4 被災前の堆積場の推定



図—9.3 測定した第 3 堆積場西側押止堤の形状



写真—9.5 測定した崩壊・流出範囲



図—9.4 測定した断面

さは分からないが、仮に 3m 程度と仮定すると第 2 扞止堤の高さは 25m 程度となる。また、写真—9.4 において第 2 扞止堤ののり面の水平距離は約 50m である。第 3 扞止堤と同じのり勾配の 1:2 であれば、第 2 扞止堤の高さはこれからも 25m 程度と推定される。これらより、第 2 扞止堤は第 3 扞止堤より高く 25m 程度あったのではないかと考えられる。

さて、今回の地震で発生した被害の写真を示したのが写真—9.6～9.15 である。まず写真—9.6 は第 3 堆積場のポンドから東の扞止堤に向かって撮影したものである。廃止された後山土で表面が覆われたため、表面は褐色の土で覆われている。ところが、その下の鉱さいは液状化して写真—9.7 のように表面に噴出していた。クラックも随所で発生していた。写真—9.8 は第 2 堆積場のポンド内の滑落崖を写している。第 2 堆積場も表面は山土で覆われているが、その下には白い鉱さいが見える。

次に、滑落崖に立って下流側を見たのが写真—9.9, 9.10 である。さらに下って、流出範囲の中間あたりから上流側を撮影したのが写真—9.11 である。この付近にも写真—9.12 のように噴砂跡があったが、これは崩壊後の余震の際にでも発生したものではないかと考えられる。

写真—9.13 はさらに下流から撮影したものである。そして、写真—9.14 が 4 名の犠牲者を出した家屋の位置から上流を見たものである。ここでは写真—9.15 に示すように流れ下ってきた鉱さいがまだ木の根元に残されていた。

ところで鉱さいを写真—9.5 の①～③の 3 箇所採取して粒度試験を行った。その結果を図—9.5 に示す。粒径が揃ったシルトであった。参考までに、日本の二つの鉱さい堆積場で採取して粒径を調べたデータ³⁾を図—9.6 に示す。この事例では神岡鉱山は鉛・亜鉛、宝鉱山は金の鉱山である。Las Palmas の鉱さいはこれらの中間の粒度となっていた。

9.3 廃止した鉱さい堆積場の地震の安定性に関する考察

今回被災した Las Palmas の鉱さい堆積場は廃止されてから 13 年経った堆積場である。鉱さい堆積場の特徴として、使用中は、ポンド内は地下水位が堆積面と同じか少し上であり、ポンド内の鉱さいは飽和している。これに対し、扞止堤内では浸潤線が内部にあり、その下部は飽和している。したがって、飽和した鉱さいが液状化しやすい状態にある。このため、扞止堤を嵩上げしていく際に、締め固めたり、のり面勾配を緩くするなりして、地震時の被害を防ぐように配慮されている鉱さい堆積場もある。



写真—9.6 第 3 堆積場のポンドから扞止堤をのぞむ



写真—9.7 第 3 堆積場ポンドにおける液状化状況



写真—9.8 第 2 堆積場の滑落崖



写真—9.9 滑落崖から下流を望む (その 1)



写真—9.10 滑落崖から下流を望む（その2）



写真—9.11 崩壊部中間から上流をのぞむ



写真—9.12 崩壊部中間に生じていた噴砂



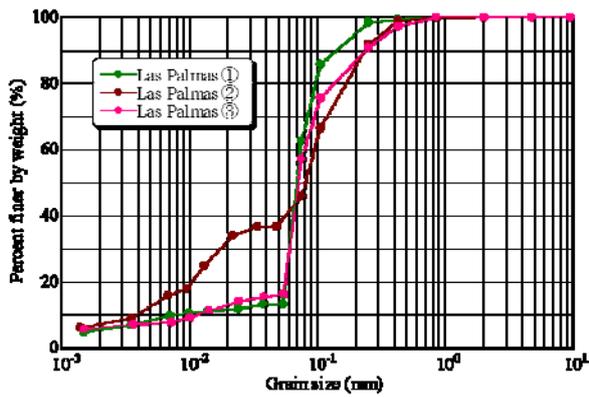
写真—9.13 崩壊下流部から上流部をのぞむ



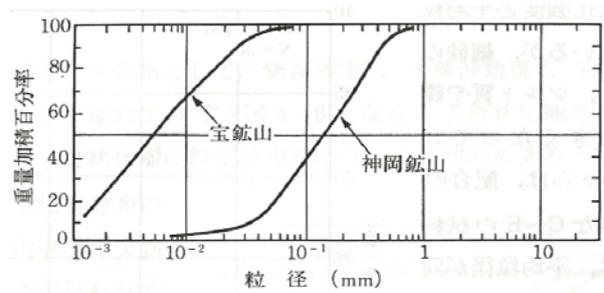
写真—9.14 犠牲者を出した箇所



写真—9.15 押し寄せた鉱さい



図—9.5 Las Palmas の鉱さいの粒径加積曲線



図—9.6 日本の鉱さいの粒径加積曲線³⁾



写真—9.16 Veta del Agua に設置した地震計



写真—9.17 Veta del Agua に設置した間隙水圧計



写真—9.18 Veta del Agua における土質調査

一方、廃止された鉱さい堆積場では水を流し込まなくなるので、徐々にポンドと押止堤とも地下水位が下がっていくのが一般的である。また、エイジング効果により鉱さいの液状化強度も上がっていく。したがって、使用中の堆積場に比べて地震時の安定性も一般に増していくと考えられる。ただし、今回のように廃止した後でも液状化が発生し、堆積場が崩壊する事例が発生した。チリのみならず、我が国においても廃止された鉱さい堆積場が山の中に多く存在し、しかも緑に覆われていたりして、そこが堆積場だったか分かり難くなっている所もある。地下水位を下げるためのメンテナンスや、万一崩壊しても下流の家屋などが被害を受けないようにするなど、我が国においても適切な対応が必要と感じられた。

なお、調査団の一人（安田）は20年前にチリの耐震設計研究協力プロジェクトでチリに専門家として半年ほど派遣された。その際に、前述した Veta del Agua の第4堆積場に写真—9.16 に示すように地震計を設置、間隙水圧計を写真—9.17 のように設置し、さらに写真—9.18 に示すように三成分コーンを用いて土質調査を行った。今回 Veta del Agua の堆積場が被災したとのことで、これらの計測器が作動してデータが録れたかのではないかと思います。残念ながら、これらの計測器は第5堆積場を造る際に取り除いたとのことである。

第9章の参考文献

- 1) Troncoso, J.H.: The Chilean earthquake of March 3, 1985: Effects on Soil Structures, *Proc. of Discussion Session on Influence of Local Conditions on Seismic Response, 12th ICSMFE*, pp.1-10, 1989.
- 2) 日本鉱業協会編：捨石・鉱さい堆積場建設基準および解説，1980.
- 3) 石原研而・安田進・横田耕一郎：Cyclic strength of undisturbed mine tailings, *Proc. of the Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, pp.53-58, 1981.

また、地下水位が下がるように底設暗渠を設けているものもある。

10. 海岸部の斜面崩壊および隆起

10.1 調査範囲内の斜面の状況

第2章で述べたように調査範囲内には地形的に海岸山脈と中央縦谷が存在する。アンデス山脈の主脈は東の遠方にあるので、今回の地震の影響範囲外になる。中央縦谷は広い平野になっており、自然斜面はほとんどない。また、人工的な斜面もほとんどない。一方、海岸山脈は新生代第三紀の中新世(Miocene)や暁新世(Palaeocene)の地層などで構成されており、山脈と言ってもなだらかな起伏を持つ丘が続いているような地形である。雨が少ない乾燥地帯なので深い谷もあまりなく、斜面勾配も緩い。写真-10.1に調査地内の北部地域の例として第9章で述べた Las Palmas(ラス・パルマス)の鉱さい堆積場から見た付近の山地の風景を示す。このようになだらかな丘が続いている。また、写真-10.2には調査地内の南部地域の例として Lebu(レブー)の東をヘリコプターで飛んだ時に撮った写真を示す。この一帯もなだらかな丘が続く地帯であった。さらに、写真-10.3に示すようにその尾根沿いに特に盛土・切土をせずうねうねと道路が造られており、道路沿いにも崩壊し易い斜面が造られていない。このようなことにより、調査して回った限りでは海岸山



写真-10.1 調査地内の北部の海岸山脈の風景 (Las Palmas)



写真-10.2 調査地内の南部の海岸山脈の風景 (Lebuの東)



写真-10.3 尾根沿いに造られている道路 (Lebu と La Laja (ラ・ラッハの間))

脈では大きな斜面崩壊はほとんど発生していなかった。また、調査に同行してもらった Verdugo (ベルドゥゴ) 教授からも海岸山脈での斜面崩壊の事例は紹介されなかった。

これに対し、海岸の段丘斜面ではいくつかの箇所で大規模な崩壊が見られた。ただし、地震動が $M=8.8$ と巨大であった割には海岸斜面の崩壊も少ないと感じられた。以下、筆者達が調査した箇所の崩壊状況に関して述べる。ただし、筆者達が調査していない海岸線、特に、Constitución (コンスティテューション) から San Antonio (サン・アントニオ)の間は良く分からない。

10.2 San Antonio における海岸斜面の変状

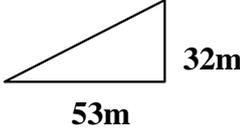
San Antonio では港の裏の海岸段丘斜面に変状が発生していた。図-10.1にその変状発生範囲を、また、写真-10.4に変状の状況を示す。ここは高さ32m、勾配約1:1.5の段丘斜面の表層がすべっていた。

10.3 Lota (ロータ)から Lebu (レブー) までの海岸斜面の被災状況

筆者達は Concepcion (コンセプション)からヘリコプターに乗り、Coronel (コロネール)→Lota (ロータ)→Arauco (アラウコ)→Tubul (テュブール)→Lavapié (ラバピエ) 岬→Carnero (カルネーロ) 岬→Lebu と海岸線を見て回り、その後、海岸山脈を北東に横切り、Biobio (ビオビオ) 川に出会ってから Biobio 川沿いに Concepcion に戻った。この間に見た斜面崩壊状況は以下の通りである。なお、以下の写真を撮影した位置を地質図上に印し、図-10.2に示す。

Lota から南に下がると海岸に崖が迫ってくる。これとともに小さな崖の崩壊がいくつか発生していた。そのうちの最大のもは Lota から 8km 南の Laraquete (ララクエテ) 岬で見られた写真-10.5に示す崩壊である。ここでは崖の崩壊土砂が鉄道に覆い被さっていた。

その南の海岸には砂浜が続き、Arauco から西に 8km ほどいった Las Peñas(ラス・ペニャース) で再び海岸に崖が迫ってくる。ここでは写真-10.6, 10.7, 10.8に示すように海岸に張り出した斜面が大きく崩壊していた。ここは北北東～南南西に向いた三つの平行した尾根が海岸に張



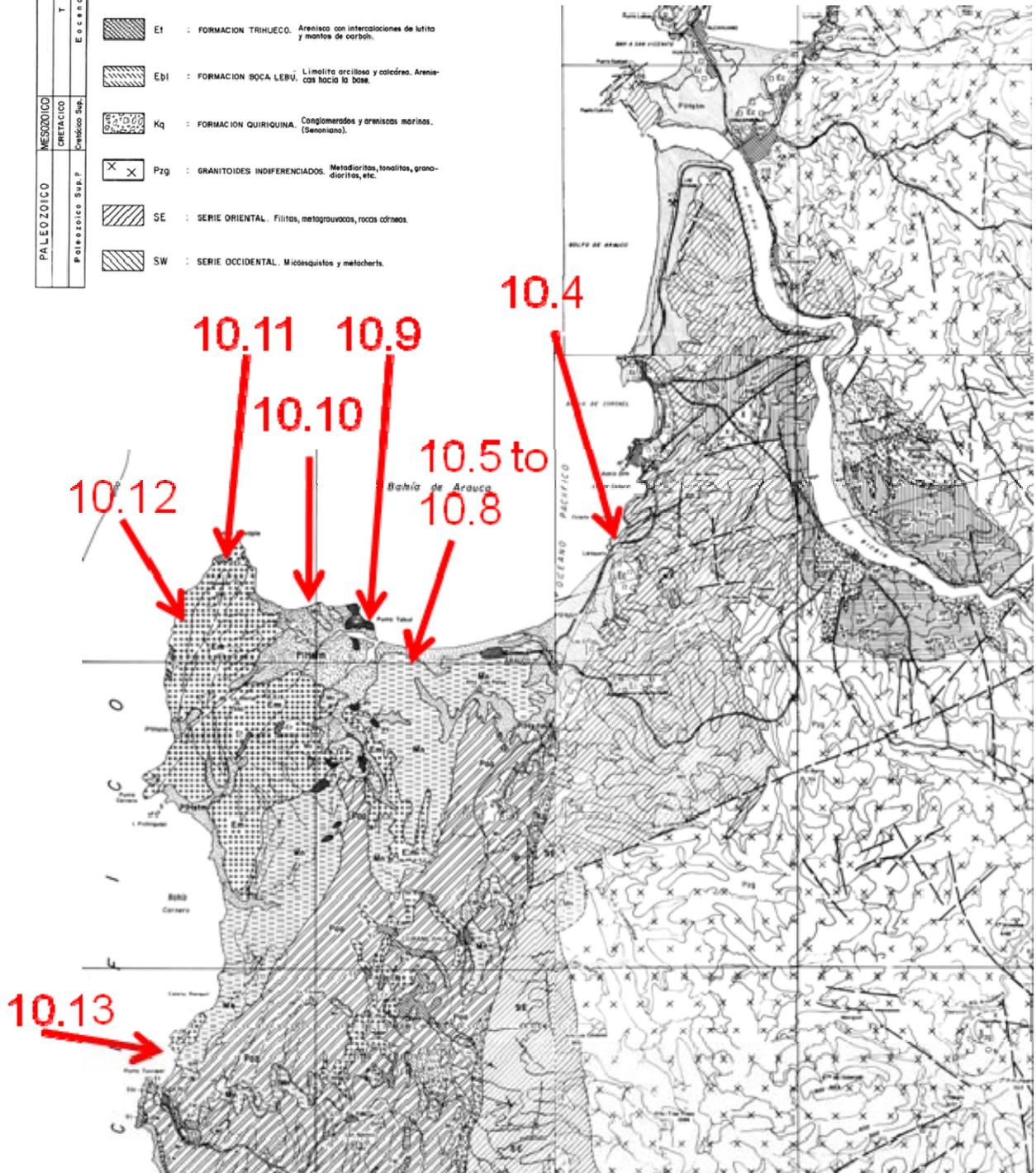
図—10.1 San Antonio で海岸段丘の変状が発生した箇所



写真—10.4 San Antonio の海岸段丘の変状状況

LEYENDA

PALEOZOICO		MESOZOICO		CENOZOICO		
Paleozoico Sup. P		Cretácico		CUATERNARIO		
		Paleozoico Sup. P		Holoceno		
		Paleozoico Sup. P		Plioceno		
		Paleozoico Sup. P		Mioceno		
		Paleozoico Sup. P		Eoceno		
		Paleozoico Sup. P		Terciario		
		Paleozoico Sup. P		Cuaternario		
					Hsva	: Arenas y gravas de valles actuales.
					Pihfm	: Sedimentos de terrazas marinas.
					Paa	: Areniscas y arcillas marinas.
					Pt	: FORMACION TUBUL. Areniscas y limolitas marinas.
					Mn	: FORMACION NAVIDAD. Areniscas tobáceas y limolitas marinas.
					Em	: FORMACION MILLONGUE. Limolitas con impresiones de flora fósil.
					Et	: FORMACION TRIHUECO. Arenisca con intercalaciones de lutita y mantos de carbón.
					Ebl	: FORMACION BOCA LEBU. Limolita arcillosa y calcárea. Areniscas hacia la base.
					Kq	: FORMACION QUIRIQUINA. Conglomerados y areniscas marinas. (Senoniano).
					Pzg	: GRANITOIDES INDIFERENCIADOS. Metadioritas, tonalitas, granodioritas, etc.
					SE	: SERIE ORIENTAL. Filitas, metagranovadas, rocas córneas.
					SW	: SERIE OCCIDENTAL. Micsquistos y metacherts.



図—10.2 Lota から Lebu までの海岸で斜面崩壊箇所や海岸隆起箇所の写真を撮影した箇所と写真の番号



写真—10.5 Laquete 岬で発生した斜面崩壊



写真—10.6 Las Peñas の斜面崩壊状況（東側より）



写真—10.7 Las Peñas の斜面崩壊状況（西側より）



写真—10.8 Las Peñas の斜面崩壊状況（正面より）



写真—10.9 Las Peñas の斜面崩壊状況（地上より）



写真—10.10 Aguile 岬東側の斜面崩壊



写真—10.11 Fraile 岬西の山崩れと海岸隆起



写真—10.12 Lavapié 岬東側に続く急峻な海岸斜面と海岸隆起



写真—10.13 Lavapié 南で海岸斜面に加えて海岸から 1km 程度内陸で発生していた斜面崩壊



写真—10.14 Lebu 北の海岸隆起状況

り出している特異な地形である。崩壊面の形状は断層地形の三角末端面のようなものであるが、隆起と海岸浸食などによってどのように形成されたのか良く分からなかった。なお、尾根は南西に向かって同じ高さで続いており、背後に高い山はない。この場所はヘリコプターに乗る前日に車で通っていた。この時に撮影した地上からの写真を写真—10.9 に示す。崩壊面の高さは約 100m で勾配は 1:0.5 程度であった。崩壊した岩は軽く白い軟岩で、Santiago (サンティアゴ) に持ち帰ってカトリカ大学の Van Sint Jan (ファン・シン・ジャン) 教授に見てもらったところ、堆積年代が新しい砂岩であろうとのことであった。

Tubul には Tubul 川および Raqui (ラクイ) 川によって形成された広大な低湿地が広がっているが、Tubul の町から 3km 北西の Aguila (アグエイラ) 岬東側の海岸斜面では写真—10.10 に示す大きな崩壊が発生していた。また、さらに約 5km 西の Fraile (フライレ) 岬西では写真

—10.11 に示す大きな山崩れが発生していた。この付近から海岸が隆起した形跡がはっきり見られるようになってきた。ここは平野が約 5km に渡って広く広がる海岸であるが、写真に示すように隆起を物語る黒いベルトが海岸に沿って続いていた。

半島先端の Lavapié 岬を南に回りこむと写真—10.12 に示すように海岸は急峻な崖が続いている。ここでは小さな表層の崖崩れが随所で発生していた。また、写真に見られるように海岸隆起も顕著に見られた。ヘリコプターでこの付近を飛んだ時は干潮に向かって潮位が下がっている時ではあったが、それでも平均潮位より 30~40cm 程度低くだけと考えられ、それだけを差し引いて見ても明らかに海岸が隆起しているとしてとれる。また、海岸斜面の崩壊だけでなく、海岸から 1km 程度内陸にはいった山の斜面も写真—10.13 に示すように少し崩壊しているようであった。ただし、この付近から南の海岸では急崖が続くにも関わらず、斜面崩壊は少なくなっていた。

さらに南に下って Quidico (キィディコ) 付近からは海岸に砂浜が拡がり、海岸斜面自体が存在しなくなってきた。そして、さらに南に下ると Lebu の 10km 位北からまた海岸斜面が形成されていて、ここでは表層のすべりがいくつか発生していた。また、Lebu の町の東側で一部の斜面が崩れていた。

なお、写真—10.14 は Lebu の町から 4km 北の海岸の状況であるが、ここに見られるように Lebu の町まで隆起が続いていた。

11. その他の被害

以上の第3章から第10章までに該当しない被害を以下に紹介する。

11.1 震動による建物の被害

(1) アドベ造の家屋

チリでは北部でアドベ造の家屋が多く造られているが、南になるにつれてその割合が減り木造が主体となる。今回の地震による影響範囲の中部地区ではアドベ造はあるもののそんなに多くはない。今回調査して回った中では、Curico (クリコ) でアドベの被害が目立った。写真—11.1 に被害例を示す。ただし、すでに地震から1ヶ月経っていたため、崩れたアドベは片付けられていた。

(2) 中層建物

中高層の建物被害は今回の合同調査団内では地震動・建築のグループで詳しく調査されている。地盤グループはSantiago市内とConcepción市内の建物しか見ていないので、それらの写真だけを示す。写真—11.2～11.5はSantiagoの西側に位置するMaipúにおいて大破した二つのアパートを示している。写真—11.2のアパートは奥の方に倒れている。横に戻ってみると写真—11.3のように下部が潰れているようであったが、それ以上分からなかった。これに対し、写真—11.4のアパートは奥の棟が潰れているが、右下には戻ってみると、写真—11.5のように1階の駐車場部分が潰れていた。柱は非常に薄いものであり、震動によって壊れ易かたのではないかと思われた。なお、この地盤は図—2.4の地質図からみるとパミスの可能性がある。

一方、写真—11.6はConcepciónで倒壊したビルである。通りすがりに撮影しただけであるが、地盤条件からはConcepción内では良いと思われる所に建っており、また、周囲のビルも壊れていなかった。

11.2 鉄道の被害

チリには昔から鉄道が広くはりめぐらされてきているが、近年道路交通が主体となり、路線の廃止も行われている。例えば、中部と南部を結ぶ幹線としてかつてはSantiagoからPuerto Montt (プエルト・モン) まで列車が走っていたが、現在ではTemuco (テムコ) までしか営業



写真—11.2 Maipú のアパートの被害 (その1)



写真—11.3 Maipú のアパートの被害 (その1の横)



写真—11.4 Maipú のアパートの被害 (その2)



写真—11.1 Curico のアドベ建物被害



写真—11.5 Maipú のアパートの被害 (その2の右下)



写真—11.6 Concepción の建物被害



写真—11.7 Logavi 川の鉄道橋の被害



写真—11.8 Lota Norte の鉄道盛土の被害



写真—11.9 San Antonio 南部で建物被害が集中した地区



写真—11.10 San Antonio 南部における建物被害



写真—11.11 Lo Gallardo 橋右岸下流の川岸の崩壊

していない。このようなことで、今回の調査においては鉄道の被害は調査してなく、5号線に平行して走る鉄道を道路沿いに観察したり、跨線橋から鉄道盛土を見ただけに過ぎない。このようなことでたまたま見かけた事例だけを示してみる。

写真—11.7 は Talca (タルカ) と Chillán (チジャン) の間の Longavi (ロンガービ) 川に架かっている鉄道橋の被害を示している。この付近は線路も多少浮いており、盛土の沈下もあるように見かけられた。

写真—11.8 は道路盛土の被害として第6章で前述した

Lota Norte (ロータ・ノルテ) の跨線橋の箇所の盛土被害である。盛土が2m程度沈下していた。

その他、第10章の写真—10.4 に示したように、Lota から Arauco (アラウコ) 間でトンネルの孔口付近の斜面が崩れて線路を埋めていた。

11.3 San Antonio (サン・アントニオ) の住宅地の被害および川岸の崩壊

写真—11.9 に示す San Antonio の南で Lo Gallardo (ロ・ガジャルド) 橋を渡る手前の一區画では、建物の被害が集中して発生していた。写真—11.10 に一例を示す。ここ

は地表面が 1° 程度の緩やかな勾配を持ったところで、道路面には横断クラックが多くはあったが、地震前から地震によって生じたものか分からない。地形的には写真—11.9 に示すように、空からは陥没したとか旧河道のような変わった地形にも見えるが、明らかでない。

Lo Gallardo 橋の右岸下流側では写真—11.11 に示すように、川岸が崩壊し、そこにあった家屋が被害を受けていた。噴砂の跡は分からなかったが、液状化して崩壊した可能性も考えられる。

12. チリ国とのセミナーの概要

今回の地震調査最終日の4月5日、Catolica 大学にて、“Seminario Sobre el Terremoto Chileno 2010” セミナーが開催された。在チリ特命全権大使林渉大使のあいさつの後、チリ側 8 名 (Sergio Barrientos, Christian Ledezma, Diego Lopez-Garcia, Carl Luders, Ernesto Cruz, Santa Maria, J.C. de la Llera, Patricio Winckler), 日本側 4 名 (安田進, 小林克巳, 川島一彦, 今村文彦) の調査報告があった。

セミナーでは、地震動、地盤工学、RC 構造、変電所工場等の建築構造被害、橋梁、免震構造、津波の順に報告がなされた。地盤工学分野では、ラス・パルマス (Las Palmas) の鉦さいダムの崩壊現場の調査結果が示され、廃棄された鉦さいダムの耐震性について、日本も同様の問題を抱えていることが指摘された。RC 構造の調査報告では、チリの設計コードはおおむね耐震性を満たしているが、施工上の問題点が指摘された。また、Coronel (コロネール) の火力発電所において建屋およびトランスの破損があったことが報告された。橋梁の調査報告では、落橋防止装置が機能しなかったこと、橋台が橋軸に対して斜めに位置している斜橋において特に落橋が多くみられたことが報告された。免震装置を設置した建造物のパフォーマンスは良好であったことが報告された。津波の遡上高調査の結果、Dichato (ディチャト) で 5.3-7.3m, Talcahuano (タルカワノ) で 2.8-6.4m, Constitución (コンスティトゥション) で 5.6-28.3m, San Antonio (サン・アントニオ) で 5.2m の遡上高であったことが報告された。報告後の質疑応答は、免震構造のパフォーマンスが主であった。最後に北川良和合同調査団団長から、今回の調査を無事終えることができたことに対し、チリ側カウンターパートに感謝の意が述べられた。



写真-12.1 Catolica 大学 Prof. Riddell と北川団長

13. あとがき

今年 (2010 年) にはいってチリ以外でも世界各地で地震被害が相次いでいる。1月12日にハイチで発生したマグニチュードが7.0の地震では約22万人ほどの死者が出て、4月14日には中国青海省玉樹で発生した地震では、マグニチュードが7.1にも関わらず、新華社通信によると死者2,203人、行方不明者73人ほど発生している。これらに比べ、今回の Chile Maule 地震はマグニチュードが8.8と巨大な割には、亡くなった方は802名に留まっている。また、建造物の被害もマグニチュードの大きさの割にはそんなにも甚大ではなかった。ただし、さすがに被災した範囲は約500kmの範囲に及び、マグニチュードの大きさを実感した。実際、毎日朝8時に出発し、夜9時~11時まで走りまくったが、それでも、十分に回れないほど広い範囲であった。

今回の地震ではマグニチュードが大きい割に津波による被害を除いて、一般に被害が甚大でなかったのはなぜか? 今回の現地調査を通して考えられる理由として以下のようなものが挙げられるであろう。

- (1) チリでは中層建物や港湾、橋梁などで耐震設計が行われてきており、主要な建造物では耐震性がかなり高かった
- (2) 首都の Santiago (サンチャゴ) 以外は人口が少なく、被災するような建造物が多くなかった。
- (3) 今回の地震による影響範囲内では軟弱な地盤が南部の方しかなく、全体に良好な地盤であり、液化化や大きな増幅をするような軟弱地盤が少なかった。
- (4) 降雨量が少ないことにも関係して海岸山地はなだらかで急峻な斜面があまりなく、また、道路も尾根伝いに造られており、崩壊が発生し易い斜面が少なかった。
- (5) 高い盛土をして建設した道路や宅地が少なく、崩壊し易い盛土のり面が少なかった。
- (6) 各地の地震記録はまだ完全には明らかにはなっていないが、これまでに分かっている記録では最大0.65G程度であり、地震動が極端に大きくはなかったようである。

ただし、本報告書は調査に出かけてから1ヶ月以内に書いているものであり、今後、調査、研究が進むと被害のより詳細な実態や、他の被災要因なども明らかになってくるものと思われる。

末筆であるが、今回の地震で犠牲になった方々のご冥福をお祈りする次第である。