

## 2001年インド西部地震の特徴と課題

濱田 政則<sup>1</sup>, アイダン・オメール<sup>2</sup>, 清野 純史<sup>3</sup>

Masanori HAMADA<sup>1</sup> Aydan OMER<sup>2</sup> and Junji KIYONO<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> 早稲田大学理工学部
- <sup>2</sup> 東海大学海洋学部
- <sup>3</sup> 京都大学工学研究科

2001年1月26日現地時間午前8時46分ごろ、インド西部のグジャラート州カッチ地方ブジ市北東約20kmを震源とするMw7.7の地震が発生した。カッチ地方を中心にグジャラート州政府により確認された死者は20,005人、負傷者は166,000人以上に達している。建物被害としては、全壊家屋が370,000戸、半壊家屋が922,000戸にも及んでいる。また、建物の倒壊のみならず、道路、道路橋、港湾、ダム等の土木施設や、電気、水道、通信をはじめとするライフラインにも被害が発生した。本報告は(社)土木学会が派遣した調査団の調査結果を、著者らが「特徴と課題」としてまとめたものである。グジャラート州では今回のような大被害はほとんど経験していなかったため、各種構造物への対応(取り壊し、補強・補修など)の判断に苦労していた。このようなノウハウの移転は国際協力の一環として今後とも必要であろう。

### 1. 地震および地震被害の概要と調査目的

2001年1月26日現地時間午前8時46分ごろ(03:16 UTC)、インド西部の Gujarat 州 Kutch (Kachchh) 地方 Bhuj 市北東約20kmを震源とするMw7.7 (USGS, IMD)の地震が発生した<sup>1)</sup>(図-1<sup>2)</sup>)。震央は23.40°N, 70.32°W, 震源深さ17km (USGS<sup>1)</sup>)である。Kutch 地方(Fig. 2<sup>2)</sup>)を中心に Gujarat 州政府により確認された死者は20,005人(2/26現在)、負傷者は166,000人以上に達している。建物被害としては、全壊家屋が370,000戸、半壊家屋が922,000戸、また、被害総額は2126.2

億ルピー(約6000億円)にも及んでいる<sup>3)</sup>。

また、建物の倒壊のみならず、道路、道路橋、港湾、ダム等の土木施設や、電気、水道、通信をはじめとするライフラインにも被害が発生した。

(社)土木学会災害緊急対応部門は地震工学委員会との連携の下、日本の土木分野における地震災害に対する調査と、地震被害に対するこれまでの対応の経験を生かし、インド国被災地の今後の復旧・復興に貢献するとともに、インド国および広く社会に有用な情報を提供することを目的として、被害状況を専門的な見地から正確に把握するための調査団派遣を行った(付記

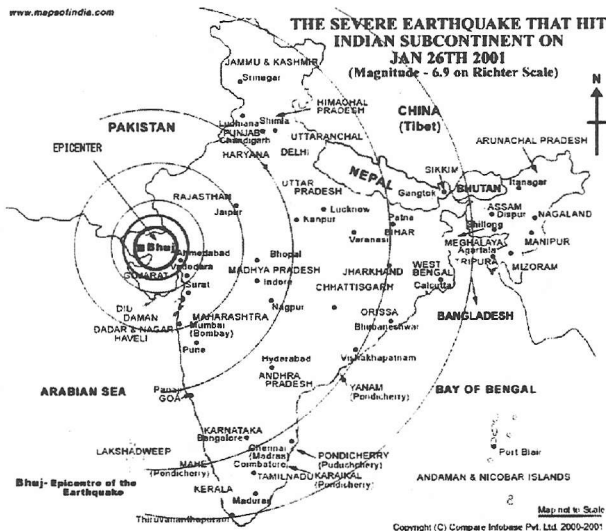


図-1 震央位置

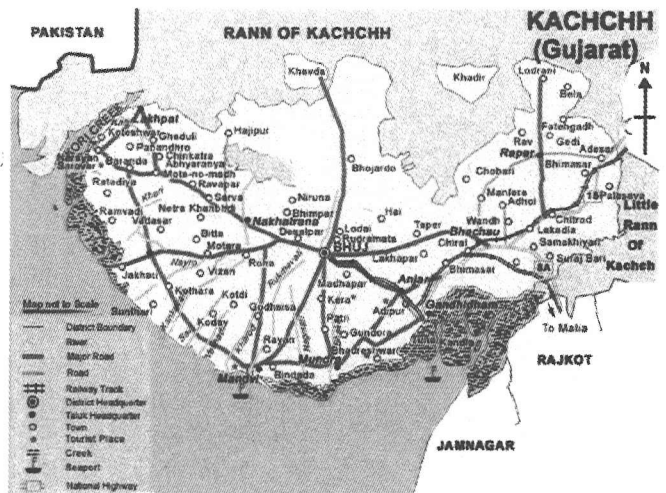


図-2 Gujarat 州 Kutch 地方の概略

参照). 本報では, 主に地震と土木構造物被害の概要および今後の課題について報告する.

## 2. 地形・地質および地震動

インドでは面積 3,287,263km<sup>2</sup>の中に10億2,700万人の人が住んでいる. その内, 今回の地震による被災の中心地である Gujarat 州最大の面積(45,612km<sup>2</sup>)を有する Kutch 地方(図-2)の人口は約135万人である. この地方は熱帯モンスーン気候に属し, 雨季(6月~10月)と乾季が明瞭に分かれている. 沿岸部 (Coastal Zone), 沿岸平野と山地・丘陵部 (Kutch Mainland), 海・河成堆積物や干潟部 (Banni Plains), そして砂漠部 (Rann of Kutch & Little Rann of Kutch: ただし雨季には氾濫原となる)の4つの地形から成り, これら4つの地形の境界にはほぼEW方向に南から Katrol Hill 断層, Kutch Mainland 断層, Allah Band 断層の3本の活断層が走っている.

図-3は Kutch 地方の地質<sup>4)</sup>示したものである. Kutch Mainland は主に Deccan Trap と呼ばれる玄武岩溶岩に挟まれたジュラ紀 (Jurassic) から第3紀始新世 (Eocene) の堆積岩で覆われ, その北部と南部一帯が第四紀の堆積物となっている<sup>5)</sup>. 良質の石灰岩も産出されており, 砂岩とともに構造材料になっている.

インドにおける過去の大地震は主にヒマラヤとチベットの境界に発生しており, Gujarat 州においては, 1819年に今回の地震の東部を震源とする, 約3,200人の死者を出した The Great Rann of Kutch Earthquake (M<sub>w</sub>=7.8)が最大級の地震である. また, 1956年には Anjar 北部で M<sub>w</sub>=6.1 (M<sub>L</sub>=7.0)の地震も発生しており, この時は Bhuj, Gandhidham, Kandla 等の町に被害が生じ, 少なくとも156人の死者が出ている<sup>6)</sup>.

各機関による震央位置と既存の断層位置を示したものが図-4である. また, Yagi&Kikuchiによるメカニズム解<sup>7)</sup> (model 1)によると, (Strike, Dip, Slip)=(78, 58, 81)であり, 23.4N, 70.32E, Depth=18kmの破壊開始点からパイラテラルに破壊が進行している. 最大くい違い量は7.5mと推定されている (図-5).

Gujarat 州には Roorkee 大学により10数台の簡易地震計が設置されていたといわれるが, 現在までに公開されているのは, Gujarat 州では州都の Ahmedabad の Passport Office 敷地内にある9階建てビルで観測された一連の記録だけであり, 地階で最大加速度0.11gが記録されている. その他は Delhi で観測された振幅の小さな記録である. 一方, インド気象局 (IMD) の Bhuj 観測所でも Kinematic 社の Direct Write Recorder によって変位記録が収録されている. また, 断層モデルを用いた数値計算によって推定された最大加速度分布

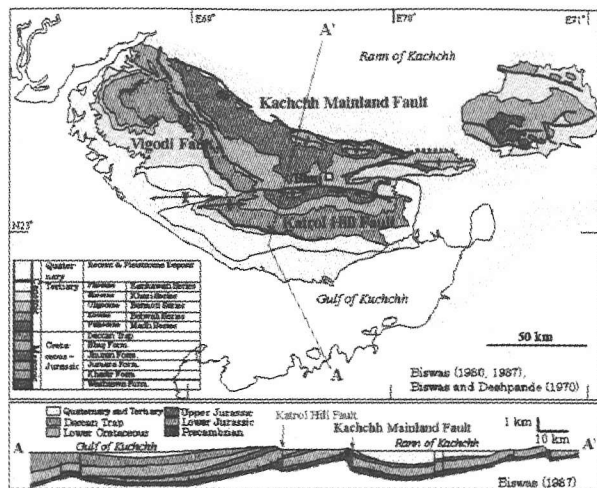


図-3 Kutch 地方の地質 (Biswas<sup>4)</sup> 1970, 80, 87)

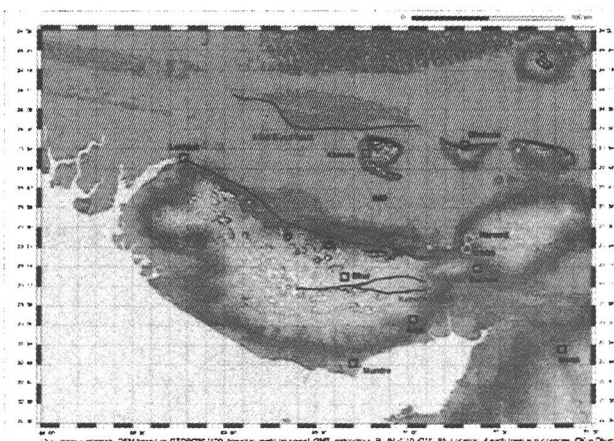


図-4 各機関発表の震央と既存の断層位置

を示したものが図-6であり, 700-800gal 近い加速度が推定された村々もある<sup>8)</sup>.

## 3. 断層運動に伴う地盤の変状

インドプレートの地殻の剛性に起因するためか, 地表面には全体像として明瞭に定義できる断層は現れていない. しかし, Kutch Mainland 断層 (ほぼ東西方向) に沿って道路や畑の中に現れているクラック<sup>9)</sup>により, 断層運動に伴う地盤変状を確認することができた.

写真-1 は応用地質 (株) の調査団<sup>9)</sup>が特定した Budarmora 村付近の畑の中の地盤の変状である. 畑の中に多数の平行したクラックや数十 cm の鉛直変位を持つ地盤変状が生じている.

ただし, 震央 (USGS) の 17km 北東方向の Manfera 村近郊ではほぼ南北方向に数 km にわたって地割れが生じており (写真-2), また Chobari 村近郊の畑に南北方向の地割れが生じているなど, 震源域では複雑な地盤

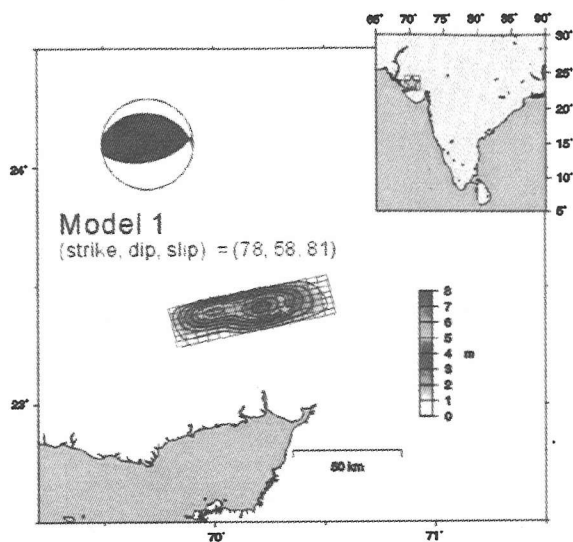


図-5 Yagi&Kikuchi によるスリップ分布のモデル<sup>7)</sup>

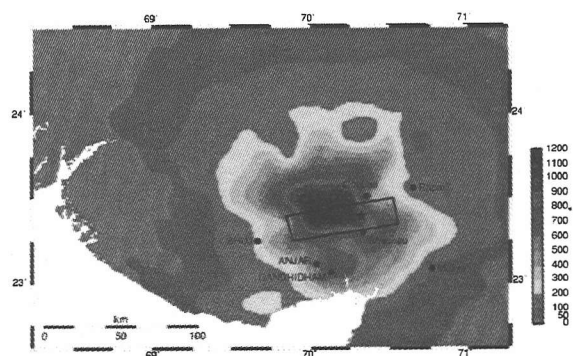


図-6 Kutch 地方の推定最大加速度分布<sup>8)</sup>

変状が地表に現れている。

#### 4. 土木構造物被害

##### (1) 道路・道路橋

調査時は乾季であったため、道路橋の下を流れるほとんどの川は干上がっていた。州都 Ahmedabad から被災地の Bachau や Bhuj へ向かう道路に架かる道路橋は、震源地に向かうにつれてその被災度が徐々に大きくなっていった。概して構造材料の質が悪く、多くの橋桁でコンクリートの剥落や床版両サイドのコンクリート製ガードフェンスの崩落、支承部の損傷が生じており、またアバット部の地盤の沈下や側方へはらみ出しも多数生じていた。

写真-3は震央から70km程離れた Maliya という町にかかる3径間のゲルバー橋である。支障部分、桁上部のガード部分が被害を受けており、周辺の土手には液状化跡と無数のクラックが走っている。Bachau 東方約40kmの Hadakiya Creek に架かる Hadakiya 橋(30径間、



写真-1 畑の中に生じているクラック

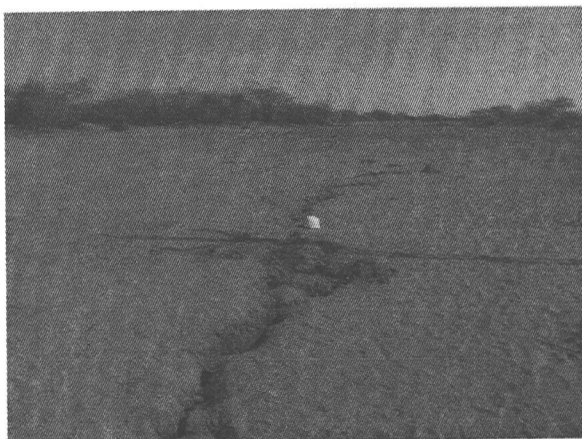


写真-2 Manfera 村付近の荒野の中の地割れ

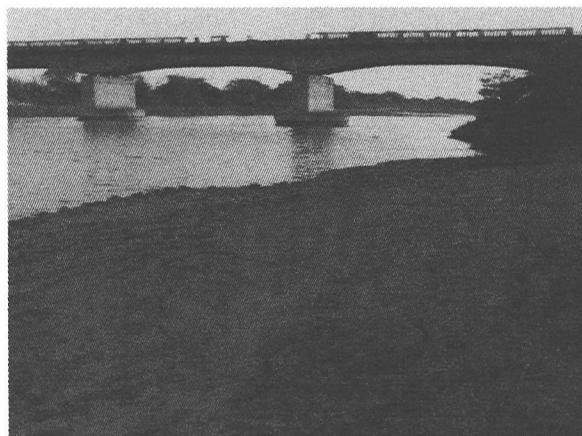


写真-3 橋周辺に生じているクラックと液状化跡

全長 1171.4m)は床版が波打っており、橋の取り付け部も約40cm程沈下している。橋脚の中には地盤の側方流動(写真-4)のために橋軸方向に移動しているものもあり周りには無数の液状化跡があった(写真-5)。

鉄道橋の被害もいくつか報告されていたが、主に組積造のスパン数の少ない古いアーチ橋であった。鋼製

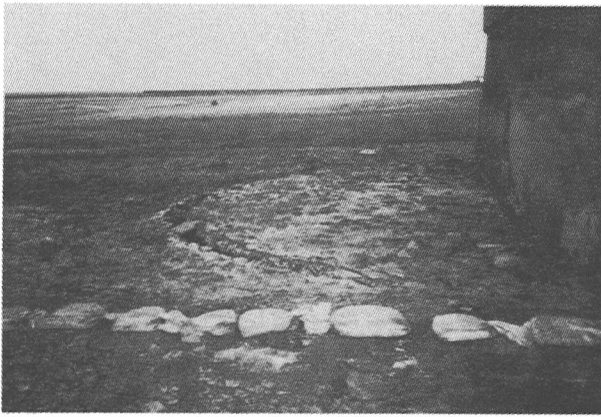


写真-4 地盤の側方流動の跡

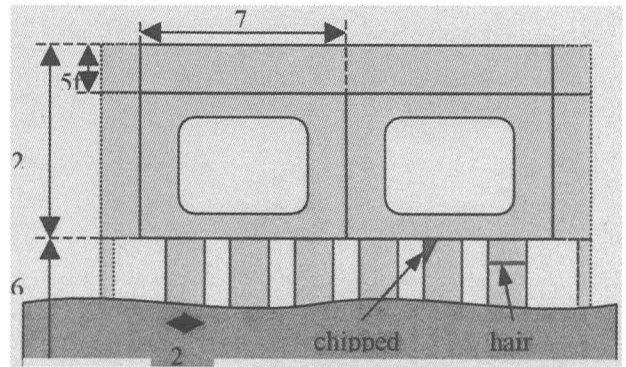


図-7 バース接岸部の被害

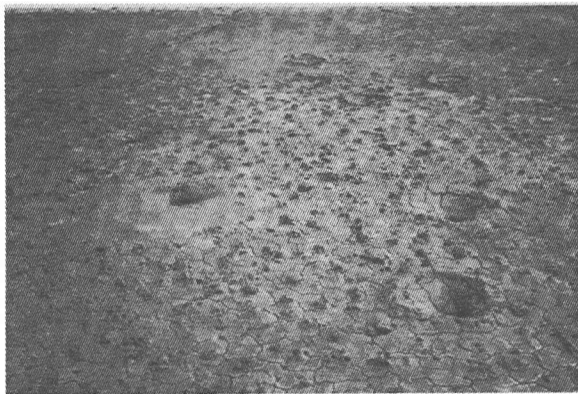


写真-5 橋の周辺の噴砂跡



写真-6 Kandla 埠頭のパイロン

桁を用いた鉄道橋はほとんど無被害であり、また同じレンガ組積造アーチでも無被害のものも多数存在した。鋼製桁は軽いためか橋脚自体に被害は見られず、また道路橋に比べ概して施工が良かった。

道路の被害は、特に Bhuj や Bachau 以北の村道で断層運動に伴う地盤変状によるクラックが多く見られた。

## (2) 港湾

Kutch 湾にはインド最大の貿易港である Kandla 港があり、これはガントリークレーンをもつ幅 45m、長さ 1.2km に及ぶ 8 つのバースを有する港である。

バースの接岸部は、英国統治下時代に設計・建設されたものである。パイロン部分は長さ 18m、直径 60cm の杭群であり、その上の部分の高さは約 6m である。コンクリートパイロンには曲げによるヘアクラックが生じているものが多数あるが(図-7)、構造的には全く問題にならない程度であった。ただし、常に海水と接しているので、腐食による劣化が進む可能性もあるので、早急な補修が必要である(写真-6, 7)。

埠頭裏側の埋め立て部分(海成粘土の上に 5m)は数十 cm 沈下した場所もあり、また液状化の跡も見られたが、あくまで局所的な被害であった。

港湾内の倉庫群には、開口部短柱に甚大な被害が生

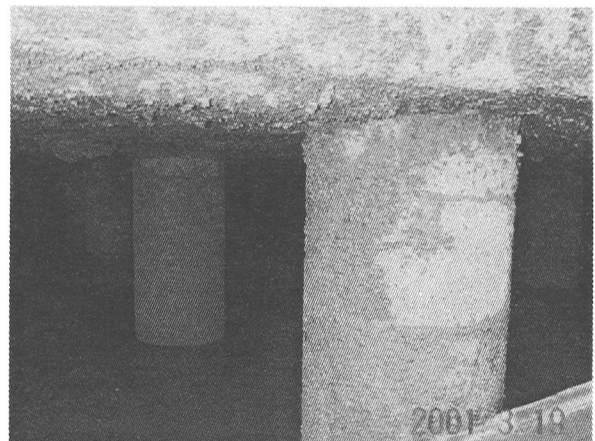


写真-7 杭に生じた曲げクラック

じたものもあった。通気のための壁面の開口部を中心に、その柱部がせん断破壊を起こし、鉄筋も座屈を起こしたものである。また、5階建ての港湾ビルは地盤の側方流動により、海側に1~2度傾斜しており、責任者は補修か取壊しかの判断を決めかねている状態であった。

栈橋の杭にも被害が出ており、この栈橋は鋼管(94本)がかなり腐食していた上に震動が加わったため、杭頭の部分で鋼管の損傷や、中込コンクリートの剥落などが生じていた。

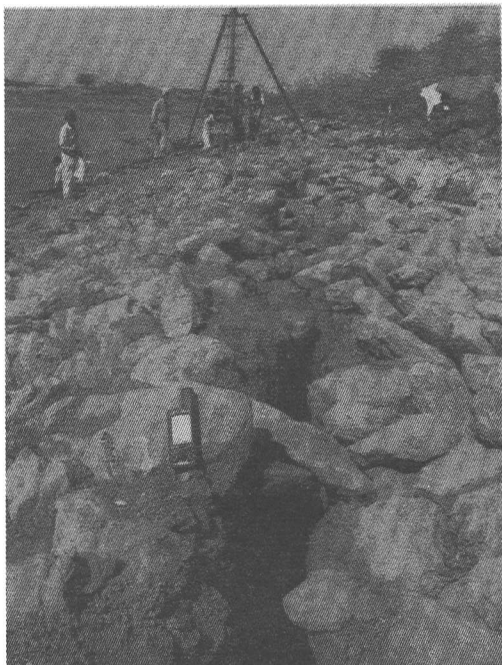


写真-8 堤体下部の側方流動によるクラック



写真-10 堤頂部の大被害



写真-9 堤頂部の沈下



写真-11 法面に生じたクラック

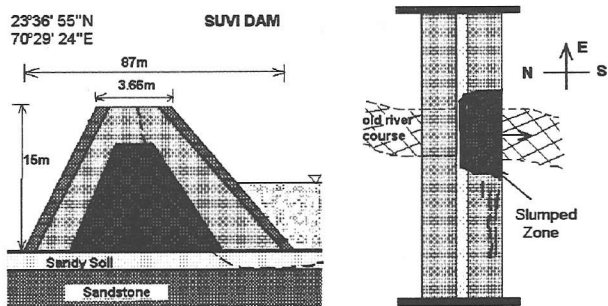


図-8 Suvi ダムの被害

### (3) アースダム

Kutch 地方に多く見られたダムは、灌漑用のアースダムである。

写真-8 は Rapar の東北東十数 km 程の所に位置するダム高 15m の Suvie ダム(1977 年完成)の湖岸側に生じ

たクラックである。L字型の堤体が約 2.7km 続き、その東西方向部分の中央付近の堤頂部(幅 3.7m)に沈下が生じていた(写真-9)。湖岸に残る液状化跡から判断して、液状化による側方流動と、損傷部分が旧河川上に位置したこと(図-8)が被害の理由であろう。

Rapar の南西約 20km, Nilpor 村の近くに位置する Chang ダムも堤体が大きく崩れ、堤頂部が数 m 沈下していた(写真-10)。また、上流側の法面には長さ 20m, 最大開口部 4.5m のクラックが生じていたが、これもダム湖底の液状化により堤体に側方流動が生じたためである。写真-11 に見られるように、法面が円弧状に滑っているため、水面に隆起した土塊が現れている。

Bhuj 北部約 10km の Rudermata 橋下流に位置する Rudermata ダムも、前者に比べ被害は軽微であるが、堤頂部や法面にクラックが生じ、レンガ造りの取水口にも損傷が認められた。

いずれのダムも調査時は乾季で水位が低かったため、堤体損傷による 2 次災害は発生しなかったが、雨季で水位が高い場合には滑りも発生しやすく、危険度はさらに高くなっていただろう。今後、雨季に向けて早急な補修・補強対策が必要である。

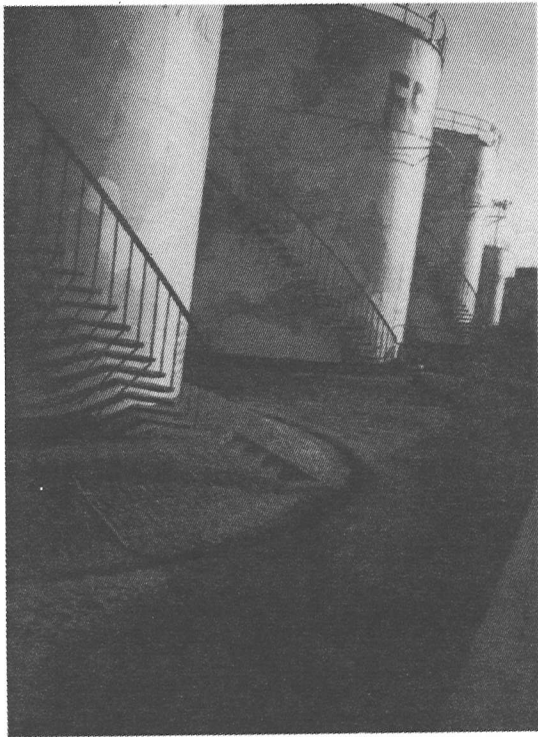


写真-12 Oil Indiaのタンクヤード

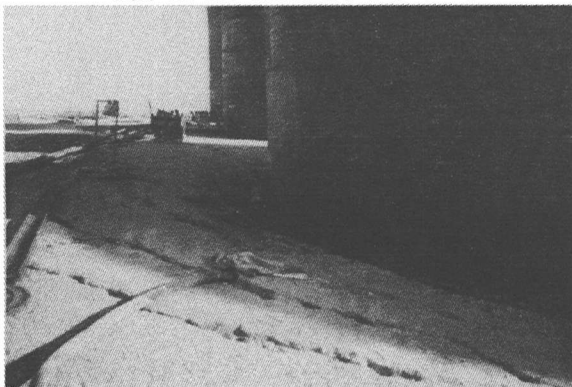


写真-13 Friends Group タンクヤードの被害

#### (4) 産業施設

Kandla 港には多くの備蓄タンクがあり、それに付随して数多くのパイプラインも走っている。

写真-12 は Kandla 港に隣接する石油化学関連のタンクヤード (Oil India) である。同じく隣接する Friends Group のタンクヤードにも直径 7-26m の中小タンク 66 基が埋め立て地盤上に設置されている。このうち、2 つのタンクが大きく沈下・傾斜し(写真-13)、バルブとパイプラインの継ぎ目が破損した。小規模な不等沈下や傾斜もいくつか見られた。20 年以上も前に建設されたものだが、これまで地盤沈下は生じていなかった。

写真-14 は Kandla 港のオイルパイプラインの被害である。他のパイプライン被害はほとんど報告されていないが、この場所のこのパイプラインに限り甚大な被



写真-14 鋼製架構から崩れ落ちたパイプライン

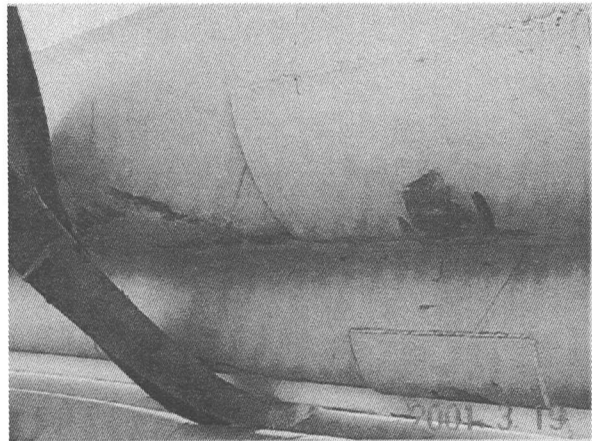


写真-15 下面に残された震動の跡

害が生じていた。鋼製の架構が座屈し、上部 3 本のパイプラインが落下して破損を受けていた。また、パイプラインの下面には震動に伴う傷跡が残されていた(写真-15)。南北方向に伸びる架構上の 3 本のパイプラインが南端で大きな曲率で曲がっているため、平行する 3 本の震動性状に違いが現れ、それが架構の面外振動に偏心を与えた可能性があるとともに、架構の震動中に過大な上下動が作用した結果、架構に座屈が生じこのような被害に至った等の理由が考えられる。

#### (5) 電力・水道

今回の地震で最も大きな被害を受けた町の一つである Anjar の変電所では、レールのついた変電設備が脱輪するとともに(写真-16)、サーキットブレーカーやアイソレータにも被害が生じた(写真-17)。ここでは、220kV を 132kV、66kV、11kV と変電しており、Kutch 地方には域内 45 の変電所から各需要家へと配電されている。本来の管理棟が倒壊したため、制御パネルは損傷を受けているコントロール室(写真-18)に設置されていた。送電線の被害は確認されていない。Bhuj では地震の翌日、Anjar では地震から 3 日後、Gandhidham



写真-16 レールから脱輪した変電設備



写真-19 Maliya の給水塔

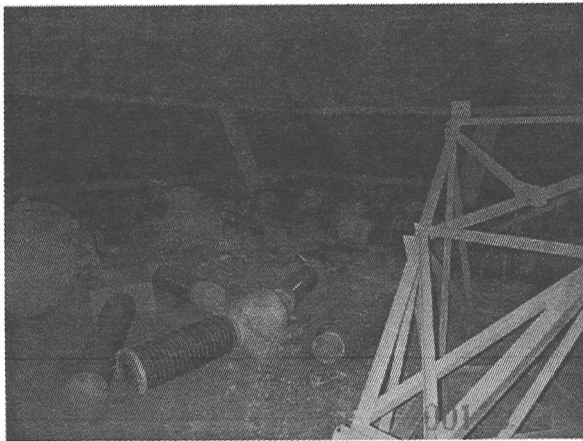


写真-17 ブレーカー等の被害

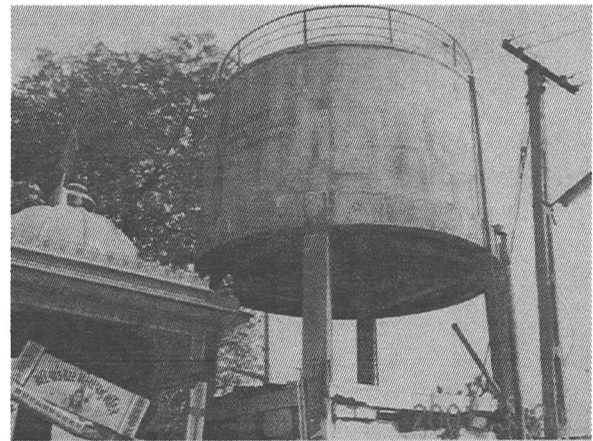


写真-20 Anjar の給水塔

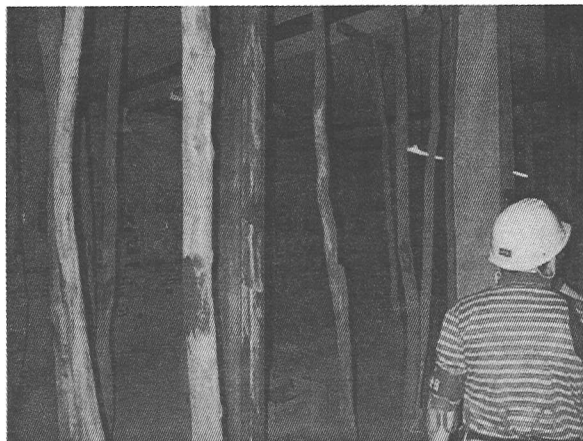


写真-18 コントロール室の天井を支える丸太



写真-21 Chobari の倒壊した給水塔

では2週間後には復旧したとの事であった。

多くの村では写真-19 (Maliya)や写真-20 (Anjar)のような給水塔を有しているが、軽微な被害のものが多かった。ただし、全壊率ほぼ100%のChobari村の給水塔は根元から倒壊していた(写真-21)。

## 5. まとめと今後の課題

- (1) 震源域で観測された地震動の記録がほとんどないため、被災地でどの程度の揺れが生じたのかが判断しにくい。インド気象局やRoorkee大学の記録はあるものの、それぞれ変位記録、震源から350km

離れたオフラインの加速度記録であり、今後強震動観測点の増設とオンライン化を視野に入れた整備が望まれる。

- (2) 道路橋においては、崩壊を伴うような大きな被害はほとんど生じていなかったが、コンクリート桁の被害が顕著であった。桁間衝突、沓座の損傷、桁コンクリートの剥落による鉄筋の露出など、低品質のコンクリートの使用や経年変化が原因と思われる被害が多く見られた。また、地盤の側方流動による橋脚の傾斜、移動なども見られたことから、地盤変状の正確な把握も必要である。
- (3) 港湾では、Kandla 港の主要埠頭下の杭には曲げクラックが生じているものもあり、また栈橋の裏込めの埋め立て地盤の沈下などの被害も確認された。また、オイルタンクの不等沈下やパイプライン被害も生じたが、いずれも局所的な被害であった。Kandla 港の主要埠頭のように、50 年前に建設されたものであってもきっちりとした設計・施工と材料の質の確保ができていれば被害は最小限に食い止められる。
- (4) 灌漑用のアースダムの被害が顕著であった。液状化による法面の側方へのすべり、それに伴う天端の沈下が主な被害である。これから雨季に向けて早急な復旧対策が必要である。
- (5) 建物被害としては、ピロティ形式の RC 構造物に被害が集中していた。RC フレームの壁はほとんどレンガ組積造であった。また、地方の村ではブロック間を泥で固めたようなレンガや地元石の組積造が多く、このような建物に被害が集中していた。
- (6) Gujarat 州では今回のような大被害はほとんど経験していなかったため、各種構造物への対応(取り壊し、補強・補修など)の判断に苦労していた。このようなノウハウの移転は国際協力の一環として今後とも必要である。

## 付記：調査団について

土木学会・地震工学委員会(委員長：片山恒雄・独立行政法人防災科学技術研究所理事長)は、地震発生後直ちに被害調査団派遣に関する検討に入り、土木学会災害緊急対応部門と協議の上、インド西部地震被害に関する調査団派遣を決定した。調査期間は 2001 年 3 月 15 日から 24 日(一部 3 月 4 日から 13 日)まで、濱田政則(団長：早稲田大学理工学部：地盤災害、液状化)、伯野元彦(東洋大学工学部：地震被害全般)、AYDAN Omer(東海大学海洋学部：地震動、地盤災害)、岩楯徹広(東京都立大学大学院工学研究科：地盤災害、基礎構造物被害)、荏本孝久(神奈川大学工学部：地盤震動、建築構造物被害)、清野純史(京都大学工学研究科：地盤震動、地震動)、目黒公郎(東京大学生産技術研究所：構造物被害、災害対応)、志毛宏次((株)土木技術サービス：土木構造物被害)の 8 名を現地に派遣し、調査を行った。

## 参考文献

- 1) USGS, <http://neic.usgs.gov/neis/eq/haz010126.html>
- 2) Mapsofindia.com, <http://www.mapsofindia.com/maps/mapnews/27012001.htm>
- 3) Government of India, <http://www.ndmriindia.nic.in/eq2001/eq2001.html>
- 4) Biswas, S.K.: Regional Tectonic Framework, structure and evolution of the western marginal basin of India, *Tectonophysics*, 135, pp.307-327.
- 5) Banerjee, A., Jha, M., Mittal, A.K., Thomas, N.J., Misra, K.N. (2000): The effective source rocks in the north Cambay basin, India. *Marine and Petroleum Geology*, 17, 1111-1129.
- 6) Amateur Seismic Center, <http://www.geocities.com/seiscenter/gujarat.htm>
- 7) Y.Yagi and M.Kiuchi(2000)Result of Rupture Process for January 26, 2001 Western India Earthquake (Ms7.9), <http://www.iceijp.tkyo.ac.jp/>
- 8) Junji KIYONO: エルサルバドル地震・インド西部地震調査会資料、日本地震工学会 pp.47-56, 2001.
- 9) 応用地質(株):2001年1月26日インド・グジャラート地区被害調査報告, <http://www.ojo.co.jp/service/taisyou/jsin/indo/index.html>