

# 2001 年インド・グジャラート地震の 震源域を中心とした被害調査

年縄 巧<sup>1</sup>・田中仁史<sup>2</sup>・河野 進<sup>3</sup>・谷口 規子<sup>4</sup>・渡邊 史夫<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 明星大学助教授 理工学部土木工学科 (〒191-8506 日野市程久保2-1-1)

<sup>2</sup>Ph.D. 京都大学教授 防災研究所地震災害研究部門・構造物震害研究分野(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>Ph.D. 京都大学助手 工学部建築学科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>4</sup>工修 谷口建設 (〒869-0401 熊本県宇土市住吉町677)

<sup>5</sup>工博 京都大学教授 工学部建築学科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

2001 年インド・グジャラート地震の震源域を中心に、地盤被害調査、RC 建物の被災度調査及び微動観測、余震観測を行った。広範囲に渡ってステップ状に縦ずれを起こした地盤被害や数地点で液状化が確認されたが、地震の規模や深さから考えると、地盤被害は全体的にそれほど大きくない印象を受けた。これは地震発生が乾季であり、地下水位が低かったことが一因と考えられる。建物の被災程度は、原則的に EMS98 に基づいて判定した。建物屋上で得られた常時微動記録をスペクトル解析し、固有周期を推定した。建物高さで推定された固有周期の関係を調べると、日本の RC 中層建物の固有周期よりも長いこと、被災程度が大きい建物ほど固有周期が長くなることがわかった。これらのことから、インドの RC 建物の剛性は元々日本のものよりも低かったこと、被災によって剛性が更に低下したことが推察された。

**Key Words:** 2001 Gujarat earthquake, ground damage, pressure ridge, liquefaction, RC building, damage level, natural period

## 1. はじめに

2001 年 1 月 26 日午前 3 時 46 分 (GMT) にインド西部を襲ったインド・グジャラート地震は、2 万人を超す死者を出し、多くの建物が倒壊するなど、同州に大きな被害を与えた。著者等は 3 月 4 日～3 月 16 日に、震源域を中心に地盤被害調査、RC 建物の被災程度と構造の調査、及び微動観測・余震観測を行った。本稿では、震源域で確認した地盤被害、微動観測と余震観測から推定された被災建物の固有周期について概説する。

## 2. 地形・地質・地震の概要

図-1 にこの地震の震源域を示す。この地域は、南にカッチ湾、北にカッチ湿原を控え、標高が 500m 以下の丘陵が東西に広がり、都市・集落はこの丘陵上に発達している。この地域は、雨季になると北部

の湿原が水没し、この丘陵地が孤島となる。丘陵は、中生代白亜紀・ジュラ紀、及び新生代第三紀の比較的固い地質で構成され、北部湿原及び、海沿いの標高の低い地域は新生代第四紀の比較的柔らかい地質で構成されている。また、図中の実線及び破線は、この地域で確認されている活断層である。これらの活断層は、東一西ないし、西北一南東の走向を持っている。この地域を南北に縦断した地質断面<sup>1)</sup>によると、丘陵部の地層は南傾斜のセンスを持ち、南北に圧縮される応力によって、丘陵地が形成されたと理解できる。

今回の地震の、モーメントマグニチュード  $M_w$  及び震源深さ  $D(km)$  は、USGS<sup>2)</sup> 及び Yagi & Kicuchi (2001)<sup>3)</sup> によれば、それぞれ (7.5, 16), (7.6, 18) であり、内陸型地震としては規模が大きく、震源が浅い。Yagi & Kikuchi (2001)<sup>3)</sup> による本震の震央位置及び推定断層面を図-2 に★及び実線・破線で示す。この地震の断層面は、これまでに確認された活断層とは異なる位置に生じたことがわかる。

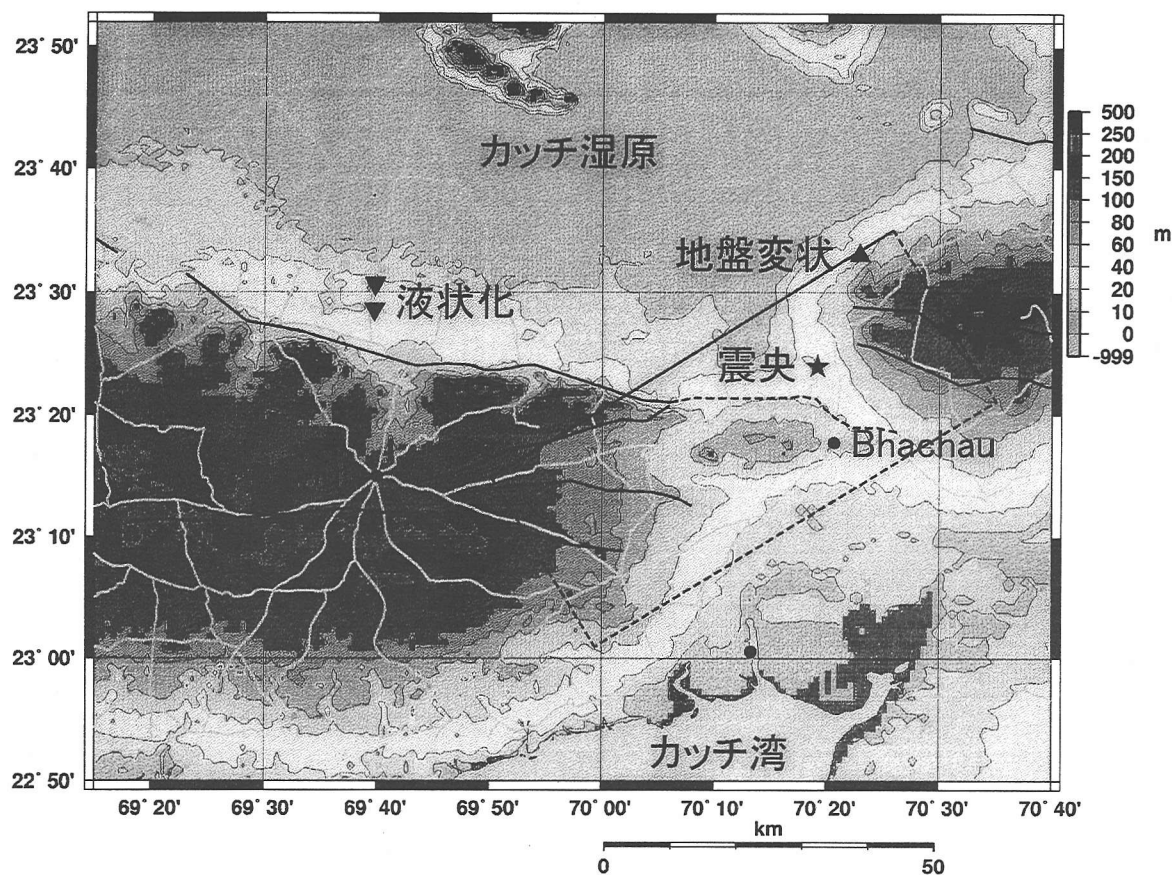


図-1 グジャラート地震の震源域

### 3. 震源域における地盤被害調査

2. で述べたように、この地震は規模が大きく、震源深さが浅いため、地表面に断層が現れることが予想された。また、震源域では、強い地震動によって広い範囲で液状化や斜面崩壊のような地盤被害が発生したことが予想された。ここでは、現地を確認したこのような地盤被害について述べる。

Bhachau から 30km 程北の位置(図-1 中、▲)に、ブロック状に破壊した大きな地盤変状を確認した。この地点では、広範囲に渡って地盤が圧縮されて盛り上がり、数 10cm 角のブロック状に地盤が割れ、それらのブロックがステップ状に上下方向にずれていた(図-2)。各ステップは 10~50cm 程度あり、トータルのずれは 1.5m ほどあった。この地盤変状は、ほぼ西北-南東に沿っており、図-1 に示した断層の走向とは一致していない。しかし、この地点の位置は、断層面が地表面に現れる位置(図-1 中、実線の部分)とほぼ一致し、この付近の直下で生じた断層の食い違いによって大きな圧縮応力が働き、地表面の弱線に沿って地盤が圧縮破壊を起こしたものと推察される。このような地盤変状は、震源域の他の場

所でも確認されている<sup>4),5)</sup>。

図-3 は、Bhuj から 30km ほど北に行ったカッチ湿原内で確認した液状化である(液状化を確認した地点の位置を図-1 に▼で示す)。地表面に噴出した土粒子の粒径は小さく、砂というよりむしろシルトに近い。この地方では、この土をレンガの材料に使用している。噴出口は、クレーター状の形状のものは少なく、直線状に伸びているものが多く、強い地震動によって間隙水圧が上昇し、地面の弱線に沿ってクラックが生じ、これを突き破って土粒子が地表面に噴出したものと考えられる。この噴出クラックの幅は、大きいものでは 30cm を超す。噴出した土粒子は白色を呈しており、この付近の土壌が塩分を多く含んでいることを示している。

このような液状化は、この地域では図-1 に示すように、数点で認められた。しかし、湿原のような液状化を起こしやすい地域で、填砂が見られた地点は限られていた。この原因としては、今回の地震がこの地域の雨季に発生したため地下水位が低く液状化が起こりにくい条件であったこと、湿原を覆う軟弱地盤によって地震動の振幅が減衰したこと、等が考えられる。

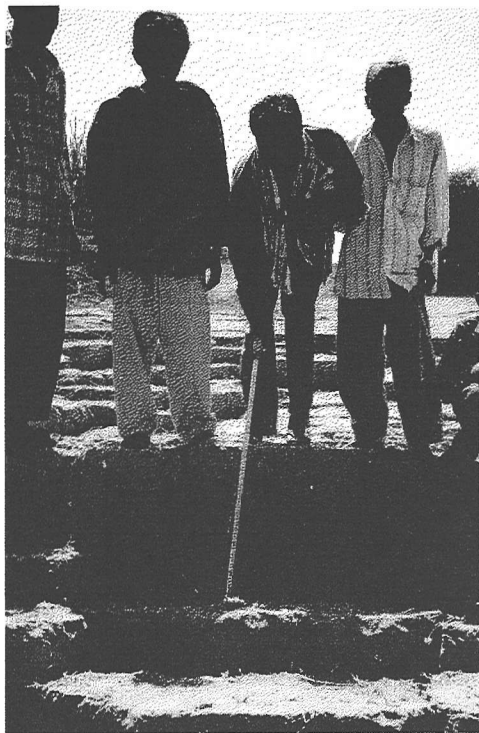


図-2 ステップ状に破壊した地盤

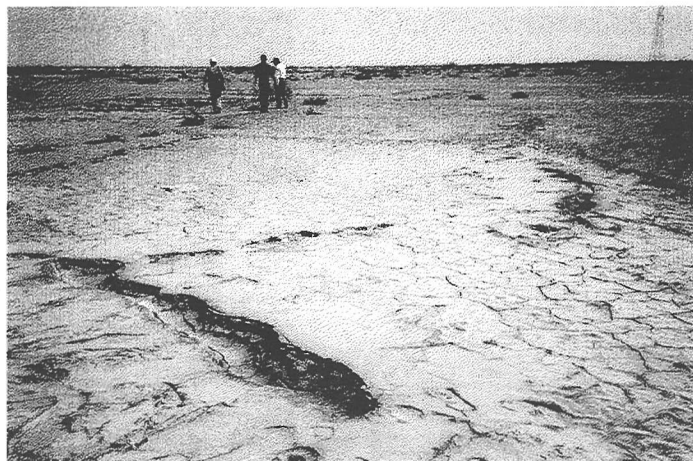


図-3 カッチ湿原で発生した液状化

#### 4. RC建物の被災度判定及び固有周期の推定

##### (1) RC建物の被災度判定

今回、被災度を調査した建物は合計 9 棟であり、そのうちの 6 棟(B1～B6)は震源域の都市、3 棟(B7～B9)は震源から約 400km 西方の大都市 (Ahmedabad)にある。また、このうち 7 棟(B3～B9)については、建物平面図も調査している。B2 以外の建物は、平面形状がほぼ長方形である。被災程度は、原則的に EMS98 による被災度判定に基づいているが、EMS98 では区別していないせん断亀裂と曲げひび割れについても、ここでは区別して評価を行った。従って、ここでの被災程度は以下のような基準で判断した。

- 1: 非構造体に小さな被害。構造体には被害がない。
- 2: 非構造体に中程度の被害。構造体に小さな被害。
- 3: 構造体に中程度の被害 (数本の柱の柱頭にせん断ひび割れ。残りの柱は柱頭に曲げひび割れ)。
- 4: 構造体に大きな被害 (ほとんどの柱の柱頭にせん断ひび割れ)。
- 5: 倒壊

##### (2) RC被災建物における微動観測

これらの 9 棟の建物において微動観測を行い固有周期を推定した。観測は、建物屋上において速度計を用いて 20.48 秒間の微動を 3 回計測して行った。

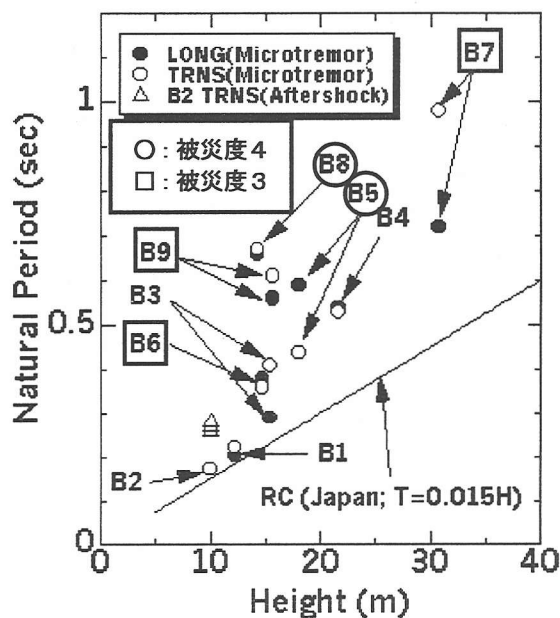


図-4 建物高さに対する推定固有周期

観測波形をフーリエ解析し、LONG 方向と TRNS 方向のそれぞれについてスペクトルの卓越周期を読み取り、これを固有周期と推定した。図-4 は、建物高さに対して、推定した固有周期をプロットしたものである (●: LONG, ○: TRNS)。図には、日本の RC 中低層建物の経験式<sup>6)</sup> (実線) も示している。図中、○と□は、それぞれ被災度が 4, 3 の建物を示す。

固有周期は、どの建物も日本のものよりも長く、特に B5 の LONG 方向、B7 の TRNS 方向、B8, B9 の LONG・TRNS 方向は、日本のものよりも 2 倍以上長くなっている。これらの建物は、被災程度が 3 または 4 であり、地震による損傷で構造体の剛性が低下し、その結果固有周期が伸びたものと考えられる。しかし、既往の研究<sup>7)</sup>によれば、被災後の RC 建物の固有周期は、被災前のものの 1.5 倍を超える例

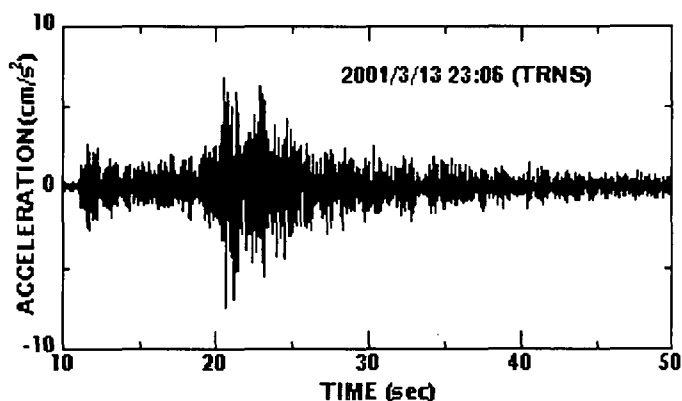


図-5 観測された余震記録の一例

はほとんどなく、被災のみで固有周期が2倍以上に伸びたとは考えにくい。従って、元々インドのRC建物は日本のものよりも剛性が低かったものと考えられる。

## 5. Bhuj の RC 建物における余震観測

調査期間中、Bhuj の RC 建物 (B2) において余震観測を行い、4 つの余震を観測した。余震観測は、微動を観測した棟とは棟続きの別棟の4階で行った。図-5に観測された余震記録の一例を示す。観測された余震記録のS波部分をスペクトル解析した結果が図-6 (TRNS 方向) である。4つの余震記録のスペクトルの他に、震動が終了した部分 (微動部) のスペクトルを図に破線で示す。いずれのスペクトルも0.27秒付近にピークを持っている。また、震動が大きくなるに従い周期が若干伸びる傾向があり、最も震動の大きい余震は微動に比べて10%程度卓越周期が長い。余震記録のTRNS方向の卓越周期を図-4に△でプロットする。余震観測を行った棟は、微動観測を行った棟よりも卓越周期が50%程度長く、この棟の被災度は高かったのかもしれない。

## 6. おわりに

2001年グジャラート地震の震源域において、地盤被害調査、RC建物の被災程度と構造の調査、及び微動観測・余震観測を行った。地震規模や震源深さから考えると地盤被害は比較的小規模な印象を受けた。これは地震が乾季に発生したため、地下水位が低かったことが影響しているのかもしれない。顕著な地表断層は認められなかったが、広い範囲に渡って発生した地盤変状は、圧縮力によって地表付近ま

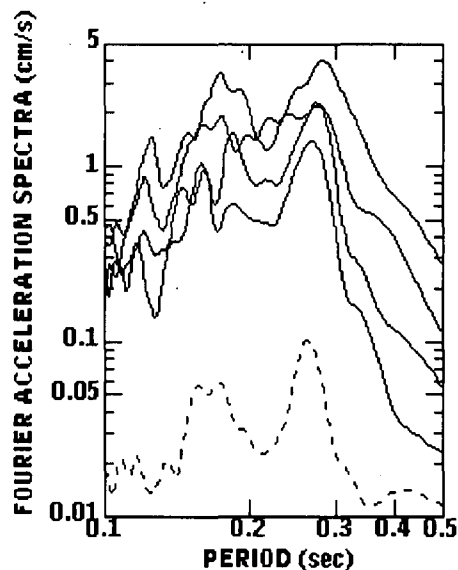


図-6 余震記録のフーリエスペクトル (TRNS 方向)

で大きな地層の食い違いが生じたことを示唆している。また、調査した建物の固有周期は日本のものよりも長く、被災によって建物の剛性が低下したこと、インドのRC建物は日本のものよりも元々剛性が低かったことが推察された。

謝辞： 本調査は、日本建築学会鉄筋コンクリート構造運営委員会の支援を得た。末筆ながら謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Biswas, S. K. : Regional tectonic framework, structure and evolution of the western marginal basins of India, Tectonophysics, 135, pp.307-327, 1987.
- 2) USGS: 2001 Significant Earthquakes of the World ;[http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/sig\\_2001.html](http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/sig_2001.html)
- 3) Yagi, Y. and Kikuchi, M. : Results of Rupture Process for January 26, 2001 Western India Earthquake (Ms 7.9); <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/southindia/index.html>
- 4) 応用地質株式会社: インド・グジャラート地震被害調査報告 ; <http://www.oyo.co.jp/service/taisyou/jisin/indo/index.html>
- 5) 中田 高・佐藤比呂志・今泉俊文・吉岡敏和 : インド西部地震調査－活断層調査班の結果－ <http://www.eprc.eri.u-tokyo.ac.jp/~satow/iindex.html>
- 6) 日本建築学会編: 建築物の耐震設計資料, 技法堂, 1981.
- 7) 阿部良洋・守研二・小川淳二・星道夫: 宮城県沖地震の前後に於ける常時微動の測定から見た建物の剛性低下について, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.437-442, 1979.