

2001年インド西部地震における Gandhidham の建物被害

Building Damage in Gandhidham during Western Indian Earthquake of 2001

林 康裕¹, 澤田純男¹, サンジェイ・パリーク², 久田嘉章³

Yasuhiro HAYASHI, Sumio SAWADA, Sanjay PAREEK, and Yoshiaki HISADA

- 1 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.
- 2 日本大学工学部建築学科
Dept. of Architecture, College of Engineering, Nihon Univ.
- 3 工学院大学建築学科
Dept. of Architecture, Kogakuin Univ.

In order to investigate the cause of building damage concentration in Gandhidham city, the microtremor measurement on the soil surface and buildings are performed. None of the H/V spectra show a clear peak and the soil conditions cannot be accounted for the damage concentration from the microtremor measurements. However, from the survey it is inferred that the quality of construction and the number of stories may be related to the building damage. Furthermore, it is presumed that the earthquake motion intensity of Gandhidham was IX grade on MSK seismic intensity scale.

Key Words : Building damage, microtremor measurement, macro seismic intensity, damage ratio

1. はじめに

Gandhidham は、1947年に英国領からインド・パキスタンが分離独立し、パキスタン(旧シンド州)からの難民の再定住先として、Kandla 港、Adipur 等とともに建設された新しい都市(旧市街)である。旧市街には2階建ての店舗付住宅や専用住宅が多い(写真1)。その一方で、Gandhidham は、Buhj とともに、Kutch 地方の中心的都市の一つとして発展している。Kandla 港と Anjar, Buhj を結び、町の中央を東西に走るメインストリート沿いの新市街には4, 5階建てのRC造も多く見られる。

町全体の被災度は、震源付近の Bhachau 程の崩壊的な被害ではないし、旧市街には殆ど大きな建物被害が見られない

(写真1, 2)。これに対して、Kandla 港から Anjar, Buhj に抜けるメインストリート沿いに発展している新市街(写真3)では、中層建物の倒壊を含む甚大な被害が多く見られる。つまり、場所によって被災度に大きな差が見られた。Gandhidham の建物被害集中は、LANDSAT 衛星画像からも確認されている¹⁾。筆者等は、Gandhidham における建物被害集中の原因について調べるため、2日間にわたって調査を行った。調査内容は、以下の2種類である。

[調査A]

地盤の常時微動計測と周辺建物被災度調査

[調査B]

(旧市街から新市街を含む街区の)建物全数被害調査

ここでは、その結果を用いて、地盤条件や建物特性が被害集

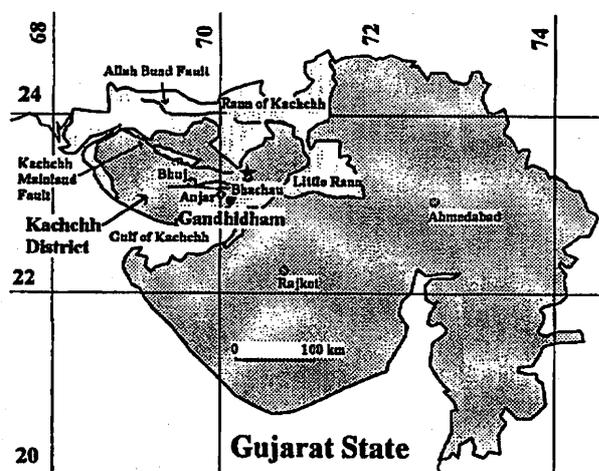
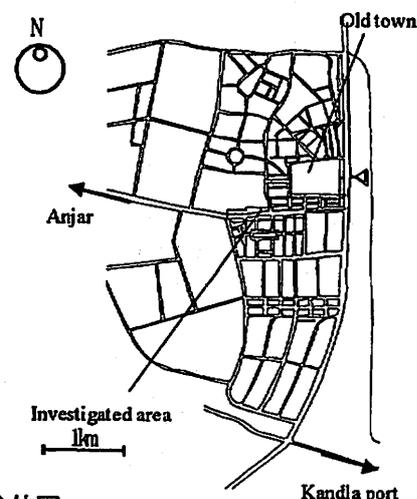


図1 Gandhidham の位置と市街全体図



中に及ぼした原因の考察、および建物被害から推定される Gandhidham の地震動強さについて記述する。

2. 地盤の常時微動計測結果と周辺建物被害調査

【調査A】の地盤の常時微動計測と建物被災度調査では、【調査B】の建物全数調査の調査対象ブロックを中心として、町全体の地盤の卓越振動数の変化や建物被害の全容が把握できる様に心がけて、調査地点を選定した。調査地点は表1と図2に示す17地点である。地点の選定には事前に入手できた都市計画地図を参考にし、GPSを用いて位置を特定している。周辺建物被害については、周辺建物の代表的な構造種別とその平均的な損傷度レベル(被災度:DL)、および被災度の判断に用いた建物の概数(Num)、階数(N)、および被害の特徴である。周辺建物損傷度の定義は、後でMSK震度の推定することも念頭におき、建物脆弱性分類(Vulnerability class)とともにEMS98²⁾に基づくこととした。構造種別は大別してRC(フレーム)造と組積造である。インドでは、公的な建物以外には設計基準が強制されていないので、RC造でもVulnerability classはCに分類されるものが殆どであろう。なお、RC造の骨組みの間に埋め込まれるインフィルは、コンクリートブロック、煉瓦、砂岩など様々であるが、ここでは区別しなかった。組積造に関しても、コンクリートブロックや自然石を用いたもの等、様々ではあるが、耐震性はかなり高い部類であると考えて、Vulnerability classはCと判定した。

常時微動観測点周辺の平均的な建物損傷度を表1と図2中に示す。なお、建物の損傷度はGrade 1(軽微相当)~Grade 5(倒壊)をそれぞれG1~G5と表記している他、無被害はG0、該当する建物が見あたらなかった場合には-印を記入している。

表1, 図2から明らかな様に、全般的にRC造の方が組積造に比べて損傷度が高いことが分かる。また、旧市街の南側に広がるメインストリート沿いの一帯(【調査B】の調査対象ブロック)で被害レベルが高いことが分かる。同時に計測した地盤の常時微動計測結果からH/Vスペクトルを算定し、図2中に示している。計測には、過減衰型加速度計、アンプ、電池、ロガーを一体化内蔵するアカシ製のGPL-6A3Pを用いた。そして、サンプリング周波数100Hzで5分間の連続計測を1~2セット計測した。計測は日中の交通量の多い時間に行っており、風もあった。そこで、計測データより40.96秒間のデータを1/2だけ重複を許して自動的に切り出し、その中から交通量や風の影響を受けずに安定している8~16箇所を選定し、平均化処理を行った。その際に、window幅0.1HzのParzen windowも併せて施している。図2を見ると、H/Vスペクトルに表層地盤の影響と考えられるピーク有する地点(例えば、Ga-10)もあったが、被害が大きかった街区と小さかった街区の被災度の差を説明できる様な明瞭な傾向は確認できなかった。すなわち、地盤の常時微動計測から得られたH/Vスペクトルを見る限りでは、Gandhidhamの地盤条件は全般的に良好で、建物被害がメインストリート沿いに集中したことを説明できなかった。また、写真4はGandhidhamにおける工事現場で撮影したものであるが、現地目で目視で確認した限りでは、基礎形式は直接基礎で、表層地盤も非常に



写真1 旧市街の中央を東西に走る通り
(台湾の住宅を彷彿とさせる。殆ど2階建て)



写真2 旧市街裏通り(連棟形式で壁量も多い)

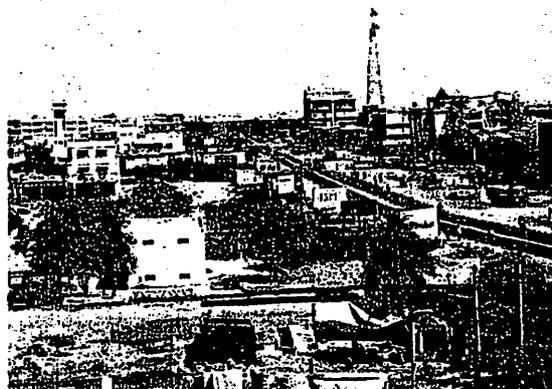


写真3 新市街メインストリート沿いの被害状況



写真4 組積造建物の基礎と表層地盤

良好であった。

なお、地盤条件が良好なのはGandhidhamに限ったことではない。Kandla港のような臨海部を除いて、低地部がカッチ湿原と呼ばれる河川の氾濫の危険性の高い地域であることから、台地上に町や村が形成されてきたと思われる。台地と低地の境界部分に形成された村でも、集落は台地上にあり、低地部には畑が広がっている場合が多い。

3. 建物の街区全数被害調査

調査地域は、図1, 2に実線で囲んで示した範囲であり、Gandhidhamの中央を東西に走るメインストリート沿いである。調査範囲の決定については、旧市街の南端(図3:D通)から新市街のメインストリートを挟む南側のブロック((図3:A通)までを南北にカバーできる様に配慮している。

調査は2人1組みで、2組み合計4人で1日で行っている。

表1 地盤の常時微動観測地点と周辺の被害状況

Site	Masonry		RC		Comments
	DL	Num.	DL	Num.	
Ga	-	-	G1	10+	RC造も殆ど2階建て(旧市街中心地:写真1, 2)
Ga-0	-	-	G3	1+	RC5FホテルG4
Ga-1	G0	10+	G3	1+	石張の家、隣のRC5F被害大
Ga-2	G0	10+	-	-	Dr. Shah宅
Ga-3	G2	1+	G3	1+	RC5Fの一階部分崩壊, Dr. Shah宅の南, 周辺RC2階建て有り
Ga-4	G1	1+	G4	1+	RC2F~4FでG3~G5
Ga-5	G2	1+	G3	1+	ビル倒壊跡, Type-2 G2~G5, RCビルG2~G5, 差が大きい
Ga-6	G2	1+	G4	1+	倒壊アパート跡(5階建て?)
Ga-7	G1	10+	-	-	Indian Railways宿舎前
Ga-8	G1	1+	G3	1+	RC5F倒壊, RC3F/G0
Ga-9	-	-	G1	1+	Gandhidham北東隅
Ga-10	-	-	G1	1+	Gandhidham南隅, 給水タンク部に被害アリ
Ga-11	-	-	G3	1+	郵便局(RC2F)
Ga-12	G1	10+	-	-	Gandhidham旧市街北側, 給水タンクには被害アリ
Ga-13	G1	10+	-	-	Gandhidham旧市街南側
Ga-14	-	-	G3	1+	RC5F/G5, RC3F倉庫/G1, RC2Fレンガ/G2, RC3レンガ事務所/G1
Ga-15	G2	1+	G4	1+	倒壊アパート跡(5階建て?)

DL: 平均的建物被害レベル

Num: 判断に用いた建物数のオーダー(1+は数棟、10+は10数棟程度)

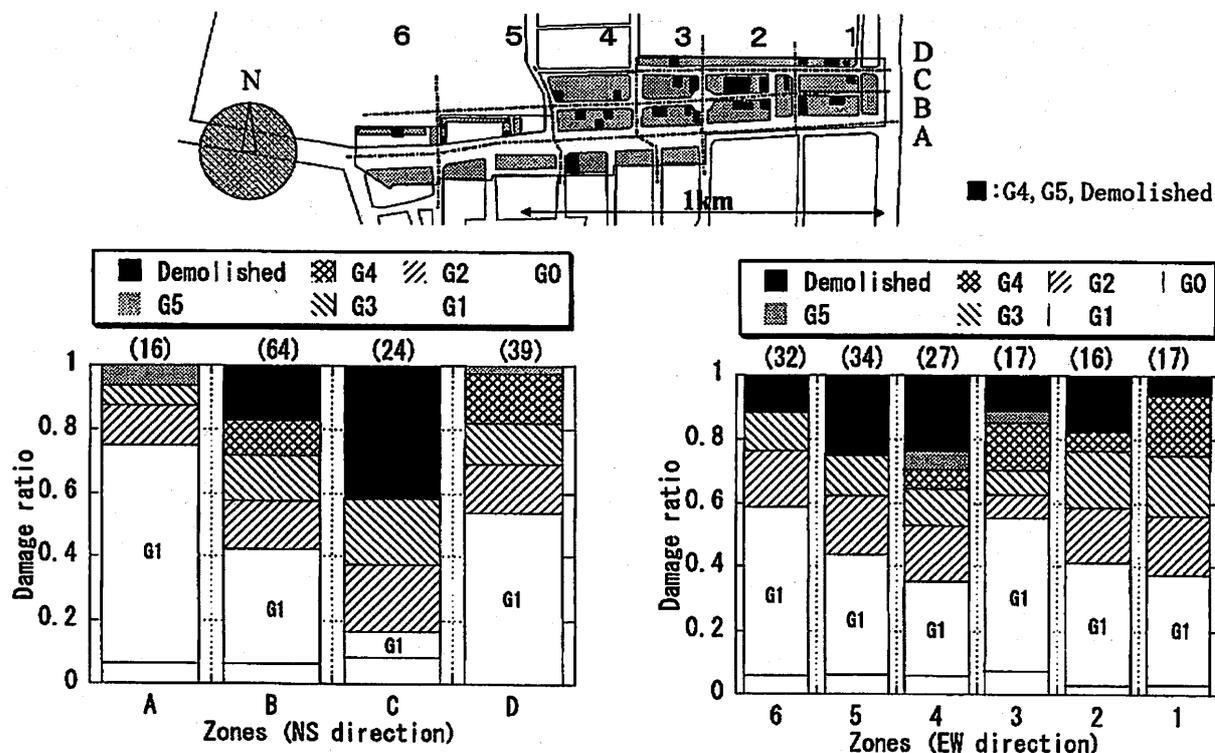


図3 建物の通り別被害 (()内は棟数)



(a) Sand stone(砂岩) (b) Solid brick(煉瓦)
写真5 RC(フレーム)造のインフィル



(c) Concrete block
(コンクリート・ブロック)



調査内容は、建物損傷度(方向別)、階数、建物用途、構造種別(RC造あるいは組積造)である。RC造の場合には、殆ど全てがRCフレーム造と判断されたので、フレーム内に配置されたインフィル壁の材料についても調査した。損傷度の定義は、EMS98によっている。基本的には外観調査ではあるが、補修中の建物や被害の大きな建物の場合には、内部の状況を確認できた場合も多いが、被害の小さな建物の確認は難しく、両者の構造的特徴の比較も十分に行えなかった。また、建築年代の特定は、聞き取り調査が困難な場合もあり、また時間の都合から省略した。調査総棟数は147棟である。

調査通り別の建物被害率を図3に示す。また、同図には、G4以上の被害を被った建物の場所についても示している。Gandhidhamの中で被害が大きかったと思われた調査地域ではあったが、その中でも特に、B,C通りで被害が大きかったことが分かる。前節でも述べた様に、地盤の常時微動計測からは建物被害集中を説明できなかつた。そこで、以下のような集計分析を行った。

まず、建物構造種別(組積造とRC(フレーム)造)と被害程度の関係について図4に比較して示す。図4からは、RC造の方がやや被害が多い事が分かる。

また、RCフレーム造の壁にインフィルとして使われている材料を砂岩(Sand stone:SS)、煉瓦(Solid brick:SB)、コンクリート・ブロック(Concrete block:CB)で分類して集計した。インフィル材料を写真5に示す。砂岩は恐らく近くの地表近くから切り出した風化岩と思われる。比較的古い建物に多い印象を受けた。煉瓦は、インフィル材料としては最も寸法が小さく、比較的新しい建物に多い。現場で用いられている煉瓦には同じマークが刻印されているので、工場生産品であろうと思われるが、決して品質は良くない。コンクリート・ブロックについては、一部の補修現場で穴空きのものが見られたが、殆どは穴が空いていない。コンクリート・ブロックの品質のばらつきは大きく、特にセメントが貧配合なために黄土色で砂岩と見間違えそうなものから、良質なまでのまで様々である。また、ペースト材についてもいろいろで、粘土、石膏、セメントなど様々であった。図5にインフィル材料と被害程度の関係について示す。同図から、G4以上の大きな被害の割合は、(砂岩)<(コンクリートブロック)<(煉瓦)の順に

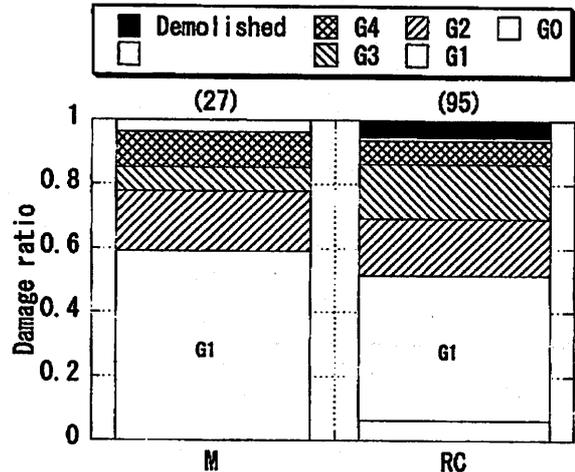


図4 建物の構造種別と被害(()内は棟数)

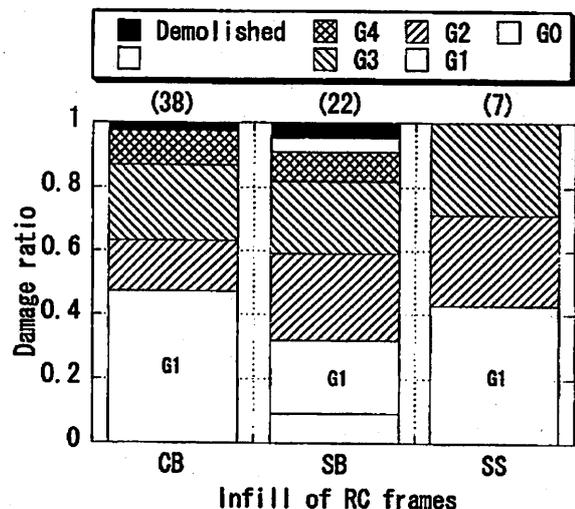


図5 RC造建物の Infill と被害(()内は棟数)

なっている。なお、被害が大きかった建物のインフィル材料とその施工の質が悪かったことは、4人の調査者の共通した感想である。

ここで、インドの(Gandhidham 以外も含む)RC造と組積造の建物の常時微動計測結果を建物損傷度毎に記号を変えて図6,7に示す。まず、損傷度がG2以下の比較的被害が小さかった建物の1次固有周期Tは、建物階数をNとすれば、 $T=0.07N$ 程度であり、日本のRC造建物と同程度である。しかし、G3以上の被害を被ったRC造建物は、 $T=0.1N$ よりも長くなることも多く、かなり長周期化している様に見える。また、組積造の常時微動計測結果は多くはないが、損傷が大きくなった時に周期が著しく増大する傾向なども含めて、RC造と大きな差は認められなかった。

次に、建物用途と被害の関係について図8に示す。ホテルでは5棟中3棟、オフィスビルでは23棟中9棟と半分近くがG3以上の被害になっており、被害が多かったことが分かる。ついで、住宅、商店の順番に被害は少ない。ここで、建物用途と階数の関係について、図9に示す。被害の少なかった住宅や商店は、殆どが2階建て以下であったのに対して、被害が大きかったホテルは全て3階建て以上である。ホテルについて被害が多かったオフィスビルも、2階建て以下だけでなく、3階建て建物も多い。

そこで、図10に建物階数と被害の関係について示す。図10より、G3以上の被害となった建物の割合は、2,3階建てで1/3以下であるのに対して、4,5階建てでは6割となっている。このことは、ホテルやオフィスビルに被害が多かったこ

とも整合している。さらに、解体された建物の中には、正確な階数は不明ではあるものの、解体現場の状況から3,4階建て以上であったことは確かな建物が多かった。即ち、階数が高い建物に被害が大きかったと言えよう。なお、組積造の殆どは2階建て以下で、3階建て以上はRCフレーム造であった。そして、2階建て以下のRC造と組積造の被害率には、殆ど差はなかった。

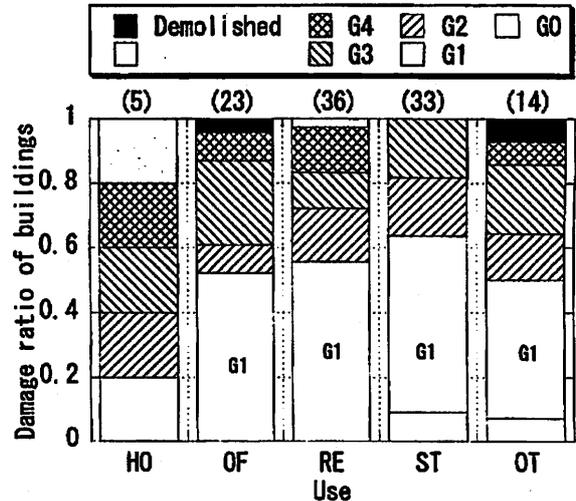


図8 建物の用途と被害 ()内は棟数

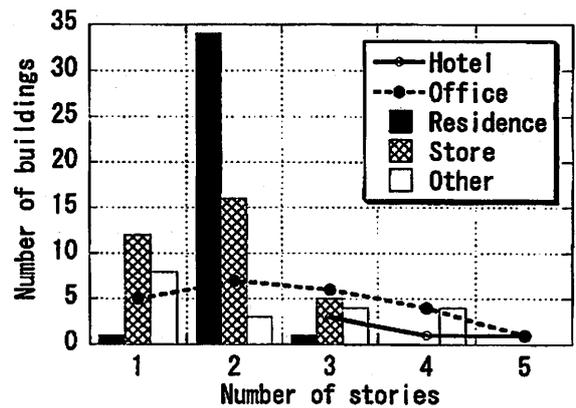


図9 建物の用途別階数

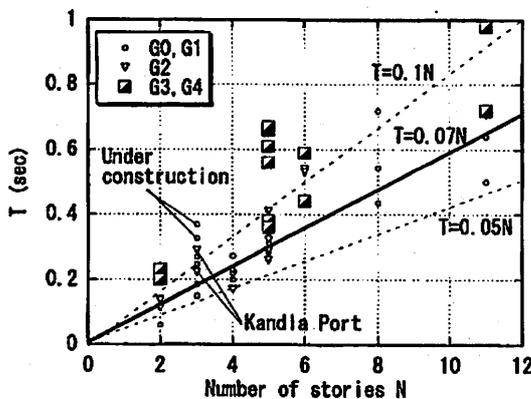


図6 RC造建物の常時微動による建物の1次周期

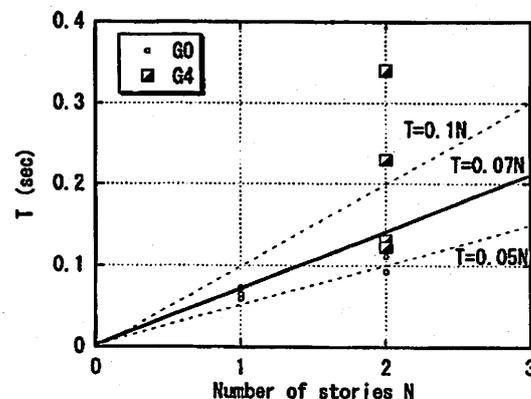


図7 組積造建物の常時微動による建物の1次周期

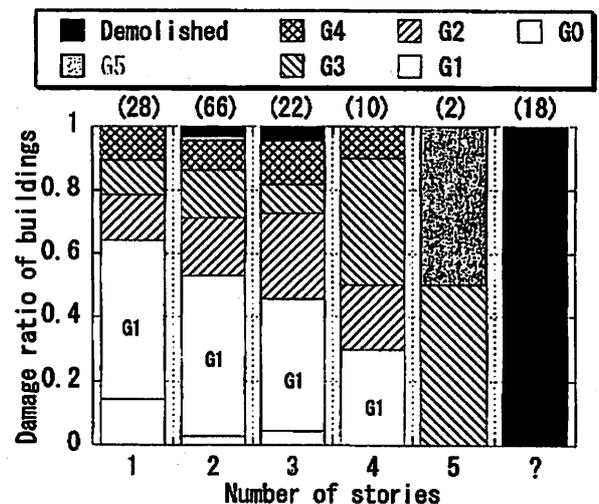


図10 建物の階数と被害 ()内は棟数

4. Gandhidham の建物被害からの教訓と推定地震動強さ

建物被害調査の結果明らかとなった高い建物程被害が増大する傾向は、インド西部地震に特有のものではない。1999年のトルコ・コジャエリ地震²⁾や台湾・集集地震、1995年兵庫県南部地震³⁾においても同様の傾向が見られた。参考のために、図11にはトルコ・コジャエリ地震の際に、ギョルジュクで調査された結果²⁾を示している。兵庫県南部地震においては、古い建物だけでなく、新耐震設計法によって設計された建物でも中破以上の被害を被った建物が多く見られた。

高い建物が倒壊した場合には、死傷者数が急激に増大するし、倒壊を免れたとしても集合住宅では大きな被害を被った場合に、利害関係の複雑さから再建が長期化することも少なくない。Gandhidham では全てのホテルが大きな被害を被ったことから、宿泊施設が不足している。

一方、Gandhidham では、街が発展して高層化が進んだことによって、被害率が増大したとも言えない。この点については、トルコ・ギョルジュクで、1986年以降に中層以上のRC造建物が多数建てられる様になり、これが大きな被害を被ったために、古い建設年代の建物よりも建設年代が新しい建物の方が被害率が大きくなったことを思い出させる²⁾。都市の発展と防災力の低下の関係について、貴重な教訓を示している様に思われる。

また、建物高さが高くなると被害率が増大するという傾向は、建物全数被害調査の対象地域内・外の被災度の違いを説明している様に思われる。即ち、メインストリート沿いに4階以上の建物が多く、被害の大きかった建物が多かったのは対照的に、旧市街も含めて2~3階建ての低層建物が多い地域では被害が比較的少なかったことと整合している様に見える。しかし、建物全数調査の対象地域内では、前述のように2階建て以下の組積造とRC造の被害率はほぼ等しく、多くの建物がG2~G3程度の被害を被っている。これを同じ2階建て建物が並ぶ旧市街の被災度(G0~G1)と比べると明らかに被害が大きい。この一因として以下の事が考えられる。

Gandhidham の街は1950年代から建設された街であることは、1章にも述べたが、1956年にAnjar地震があり、その影響を受けて地震に強い家づくりがなされたと考えられる。実際、旧市街地のお宅の中にもお邪魔したが、戸境壁に沿った1方向階段のまわりは分厚い壁で囲まれ、住戸の間口も狭いので極めて壁量は多かった。おまけにインフィルの材料の質も良い。そのお宅には、ごく軽微なひび割れが見られた程度で、構造上極めて健全であった。地震に備えた家(街)造りの大切さを再認識した。ところで、Gandhidham の新市街の建物の耐震性が他地域に比べて劣っているかという点、コンクリートやインフィル材料の材質を比較すると、むしろ良い方の部類であったことは確かである。ちなみに、被災度がG5であった5階建てホテルのコンクリートの材料強度は、コンクリートコアの圧縮試験の結果によれば23MPaであった。

最後に、以上の議論を踏まえて、Gandhidham の建物被害を基に推定される地震動強さについて記述する。EMS98によって評価する際には、多く(many:約10~50%の被害率)のVulnerability Class:Cの建物(例えば、unreinforced, with RC floorsかRC frame without earthquake-resistant design)について、損傷度をG3程度と考えて良いと判

断した(全数調査を行った地域の3階建て以下の被害率は、G3以上が約25%、G4以上が12%であった。また、旧市街の建物のVulnerability Classは、EMS98の分類とは異なるが、実質的に1ランク上のDと判断している)。すると、EMS98(図12)により、Gandhidham のMSK震度としてはIX程度と推定された。気象庁震度階で表せば、震度6強程度に相当すると推定される。この推定値は、広域で建物被害から推定したMSK震度階⁶⁾よりも若干高めの評価となっている。これは文献5)のMSK震度階評価の過程でGandhidhamでの低層建物の耐震性が優れていたことを考慮していないためである。

一方、1999年に台湾集集地震に見舞われた台湾の住宅はRCフレーム造+煉瓦インフィル壁とした建物が多く、耐震設計はなされているものの、階数は2~6階建てで、インドの建物に比べて高い建物が多かった。総合して判断すると、Gandhidhamでの被災RC造建物と比較して耐震性能は高いと考えられるが、Vulnerability Classで言えばC~D程度とそれ程大きな差はないと考えられる。集集地震における観測記録の地震動強さ指標と周辺建物被害率の関係⁶⁾によれば、最大地動加速度で400cm/s²以下、最大地動速度50cm/s以下、計測震度が5.5以下の観測地点周辺では、大破以上の被害を受けた2-5階建て建物は殆どなかった。従って、台湾集集地震における被害経験も含めて推定すると、Gandhidhamにおいても400cm/s²以上、50cm/s以上の地震動強さであったと考えられる。

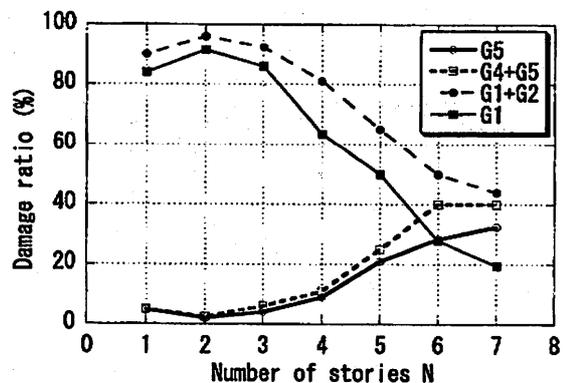


図11 建物の階数と被害率 (トルココジャエリ地震²⁾)

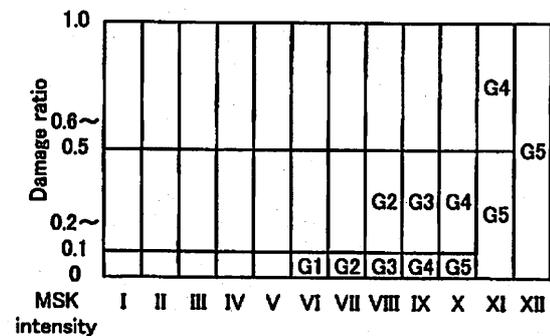


図12 被害率とMSK震度階(Vulnerability Class:C)

5. まとめ

Gandhidhamでは、場所によって建物被害に大きな差が見られた。そこで、その原因を調べるため、地盤の常時微動計測と被害が集中した街区建物全数被害調査を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 地盤の常時微動計測結果からは、建物被害と地盤条件の間に明確な相関が見られなかった。
- 2) 建物被害の差は建物の耐震性能の差による可能性が高く、その要因として以下のことが関係したと思われる。
 - ・都市形成時に生じた Anjar 地震の被害経験から、旧市街地では耐震性の強い家(街)造りがなされた。
 - ・新市街地に比較的最近建てられた4階以上の高い建物に被害が大きかった。

すなわち、Gandhidhamの被害には、地震被害経験を生かした耐震性の高い街づくりと、都市化・建物高層化に伴う建物耐震性の低下という二面性が垣間見られた。今後の都市防災への貴重な教訓と考えている。特に、後者に関係しては、インドと日本で建物の1次固有周期に明瞭な差が見られなかった。そして、10数階までの建物について、階数が高くなる程被害率も高くなる傾向は、近年の主要な被害地震での共通した傾向である。日本の都市防災にとって、どのような意味を有しているのか、さらに検討が必要と思われる。

最後に、Gandhidhamの地震動強さは、MSK震度階でIX(気象庁震度で6強)程度であったと推定された。

謝辞：

Gandhidhamの調査においては、地震発生後早期に現地に調査に入られた新井洋氏(地震防災フロンティアセンター)から、入手が非常に大変だったことが容易に想像できる地図を快くご提供をいただきました。また、建物の常時微動計測による建物周期は、掲載した半数以上が新井洋氏、年縄巧氏(明星大学)、上半文昭氏(東京大学)に提供いただいたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 新井洋：被害の概要、日本建築学会 2001年インド西部グジャラート地震被害調査報告会、pp.8-16、2001.5.
- 2) European Macroseismic Scale 1998 (Editor G. Grunthal), 1998.
- 3) 壁谷澤寿海、藤田香織：トルココジャエリ地震による建築構造物の被害の調査概要、建築防災、pp.33-39、2000.2.
- 4) 日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会：神戸市灘区および東灘区RC造建物全数調査、1995年兵庫県南部地震コンクリート系建物被害調査報告書、pp.2-37、1996.
- 5) 久田嘉章、目黒公郎：建物被害から推定される地震動分布、日本建築学会 2001年インド西部グジャラート地震被害調査報告会、pp.17-25、2001.5.
- 6) 林康裕：台湾・集集地震の活断層近傍における建物被害、第28回地盤震動シンポジウム、震源近傍の強震動と設計用入力地震動トルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震の経験を踏まえて、pp.53-62、2000.11.

(原稿受付 2001.6.11)