

1988年ネパール・インド国境地震の災害調査

藤原 悌三・佐藤 忠信
久保 哲夫・村上ひとみ

1. はじめに

1988年8月21日午前4時45分（ネパール時間）に、ネパールとインドの国境、北緯 $26^{\circ}7'55''$ 、東経 $86^{\circ}6'16''$ を震源とする深さ57 km、マグニチュード6.6の地震があり⁶⁾、インドの Bihar 州で死者282名、負傷者3,766名、被害家屋15万戸、ネパールの東部で死者721名、負傷者7,329名、被害家屋10万戸の被害があった。この地域はヒマラヤの造山運動に関係するインド大陸とアジア大陸の衝突が起っている地域であり、従来より、数多くの強い地震が発生して多数の死傷者、構造物の被害をだしている。今回の地震による建物の被害も1934年の Bihar-Nepal 地震による被害と同様、主として、被災地域の伝統的な住宅といわれる粘土をモルタル代わりに使用した石造住宅（mud-stone）、および、煉瓦造住宅に集中しており、鉄筋コンクリート造の建物や木造住宅の被害はあまり多くなかった。

本調査は文部省科学研究費（特定研究）の援助により行ったもので¹⁾、調査の主要な目的は以下の諸点にある。

- (1) 建築物の被害調査と耐震診断
- (2) 都市災害と復旧に関する調査
- (3) 震災後の医療活動
- (4) 余震記録に基づく断層域の推定と表層加速度の評価
- (5) アンケート調査による被災地の震度推定
- (6) 液状化した砂の分析と震度推定
- (7) 被災地域の耐震化対策

調査活動は1988年10月3日から7日までの5日間をインド国内、7日から13日までの1週間をネパール国内で行った。インド側の被災地は東部の Bihar 州に限定されており、ネパール国境に近い Madhubani, Darbhanga とガンジス河川敷にある Munger などの

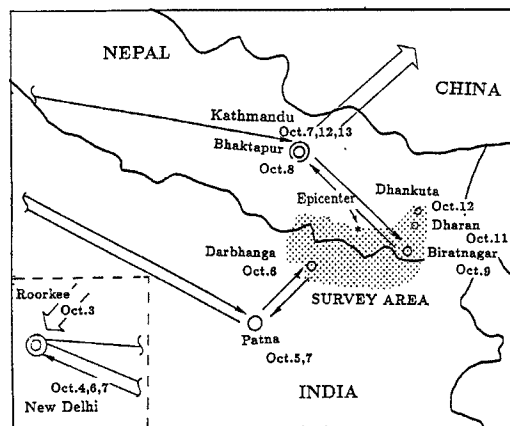


Fig. 1.1 Outline map of survey area.

地区に建物の被害が多い。今回は日程上の制約もあって被害調査は Darbhanga 地区に限り、Patna 州政府や Roorkee 大学などでの資料収集に努めた。一方、ネパール側の被害は震源近傍に当たる Sagarmatha Zone, ネパール東部の Mechi Zone, Kosi Zone 一帯および Kathmandu 峡谷にある古都 Bhaktapur など広領域に広がっている。震源から約150 km離れた Bhaktapur (Narayani Bagmati Zone)、震源域といわれている Udayapur (Sagarmatha Zone) および震源から東方70–80 kmの Biratnagar, Dharan, Dhankuta (Kosi Zone) などの地域を調査の対象とした。その間、ネパール政府鉱山地質局を訪れ、余震記録を収集、Dharan では統計資料や設計図などの資料を入手した。調査地域の概要を Fig. 1.1に示す。

調査期間が短期間であったことや現地の社会や習慣に対する認識不足、情報通信連絡が適切でなかったこ

となどにより、十分な資料が得られたとは云い難いが、本報告では、地震および地震被害の概要を紹介するとともに、地震資料や建物詳細の得難い地域での被害調査の一つの方法として、種々の方法による震度の推定を行う。さらに、それらの比較検討結果と被害建物の耐震上の問題点についても述べる。

2. 地震活動

ヒマラヤ山脈の北側にインド大陸とユーラシア大陸の衝突によって生まれた Indus-Tsangpo Suture Zone があり、ヒマラヤ山脈の生成とともに、その南面に Main Central Thrust (MCT), Main Boundary Thrust (MBT), Himaraya Frontal Thrust (HFT) など数多くの断層が形成されている²⁾。最近の破壊的地震は、主として MCT に沿って起こっている。1905 Kangra 地震 ($M=8.6$), 1934 Bihar-Nepal 地震 ($M=8.4$), 1935 Quetta 地震 ($M=7.9$), 1950 Assam 地震 ($M=8.7$) などはこの地域に発生した巨大地震である³⁾。特に、1934 Bihar-Nepal 地震の震源は今回の地震とほぼ同じ位置の比較的浅いところにあり、多数の被害があったと報告されている⁴⁾。

ヒマラヤ弧と南チベットは、東西 2,400 km, 南北 500 km の広がりを持ち、弧に平行な20余りの地質帯で構成されている。その南縁は亜熱帯のガンジス平原であり、インドの Bihar 州、ネパールの東南部 Biratnagar などはこの地域に属する。その北側に、標高 200—1,200 m のシワリク丘陵があり、モラッセ堆積物と呼ばれる砂礫、シルトで構成されている。ネパールの Kathmandu, Bhaktapur, Dhankuta などはこの地域に属する。その背後にある小ヒマラヤ山地は標高 1,000—4,000 m の山々で、その北縁に MCT がある²⁾。今回の地震による被災地は、主に、ガンジス平原、シワリク丘陵とそれらの境界に集中している。

Table 3.1. Damage statistics by district in Bihar (Bihar Relief Commissioner).

District	No. of Deaths	No. of Injured	No. of Houses Damaged		Total	Population
			Mud Built	Brick Built		
Darbhanga	83	992	25706	27178	52884	2008000
Madhubani	99	659	21747	16686	38433	2325000
Saharsa	21	435	18955	7367	26322	1989000
Samastipur	21	158	4217	1248	5465	3161000
Munger	16	932	18210	10230	28440	2546000
Sitamarni	6	75	836	963	1799	1932000
Khagaria	9	238	940	588	1528	768000
Begusarai	4	155	455	161	616	1456000
Madhopura	9	30	295	155	450	964000
Muzaffarpur	5	19	112	—	112	2357000
Nalanda	1	20	60	34	94	1641000
Bhagalpur	3	24	29	—	29	2621000
Sahebganj	—	5	1	—	1	1079000
Giridih	1	1	1	—	1	1731000
Purnea	3	17	1152	8	1160	3595000
Gopalganj	—	3	—	—	—	1362000
Jehanabad	1	—	—	—	—	800000
Saran	—	3	—	—	—	2084000
Total	282	3766	84716	64618	149334	69914732

3. 被害の概要

今回の地震はマグニチュードが6.6とそれほど大きくない地震であったが、インドの東方ネパールとの国境域にある Bihar 州の Darbhanga, Madhubani, Munger などの地区で死者282名、被害家屋15万戸、ネパールの南東部にある Kosi Zone や Mechi Zone などでは死者721名、被害家屋10万戸の被害が発生した。Bihar 州対策本部の発表によるインド側の地区別被害統計を **Table 3.1** に、ネパール政府筋からの情報などによるネパール側の地区別被害統計を **Table 3.2** に示す。

アメリカ地質調査所の発表した震源はネパールの Sagarmatha Zone の Udayapur 地区近辺（北緯26°755，東経86°616）であり⁶⁾，インドでは，震源に近い Darbhanga (83)や Madhubani (99) では死者と建物被害がともに多く，Munger (16) は震源から 150 km 以上離れているが，建物の被害の多いのがめだつ。一方ネパールでは，Sunsari (138)，Panchthar (99)，Dhankuta (93) の順に死者が多く，Khotang, Panchthar, Illam の順に建物被害は多い。死者の多い Sunsari 地区の建物被害は以外と少ないが，Sunsari

Table 3.2 Damage statistics by district in Nepal (Letter from S. Malla, Nepalese Government).

Zone	District	Deaths	Serious injury	Minor injury	Private collapsed	Houses damaged	Census population
Mechi	Taplejung	3	7	28	767	293	120780
	Panchthar	99	261	311	5244	6804	153746
	Jhapa	—	19	11	31	163	479743
	Illam	73	129	312	5918	5538	178356
Kosi	Sankhuwa Sabha	12	46	1	1944	704	129414
	Terhathum	67	76	62	4481	3296	92454
	Dhankuta	93	154	724	7277	2384	129781
	Bhojpur	14	88	118	2956	3114	192689
	Morang	32	941	233	637	852	534692
	Sunsari	138	327	1790	2494	4466	344594
	Okhaldhunga	8	28	108	2162	3137	137640
Sagarmatha	Udayapur	82	70	453	5457	3933	159805
	Saptari	13	45	80	1263	1138	379055
	Siraha	8	41	—	76	1279	375358
	Khotang	26	140	275	7919	7143	212571
	Solukhumbu	—	4	—	297	341	88245
	Dhanusha	2	3	25	375	306	432569
Janakpur	Mahottari	1	2	18	26	4	361054
	Sindhuli	32	33	209	1670	1177	183705
	Dolakha	2	5	14	268	933	150576
	Ramechhap	2	1	32	589	1800	161445
	Bara	—	—	—	—	—	318957
Narayani	Kathmadu	—	—	3	—	200	422237
	Lalitpur	1	3	22	376	137	184341
	Bhaktapur	7	23	20	274	1477	159767
	Kavre	—	—	—	—	5	307150
	Sindhupalchok	2	4	30	711	478	232326
Total		721	2450	4879	53212	51102	

地区の死者の大半は Dharan 市内に於ける被害であり、この地域には2階、3階の建物が多いことが、死者数と被害家屋数の比を大きくしている原因と考えられる。震源から150 km以上離れている Bhaktapur では被害総数は多くないが、3階-4階建て煉瓦造建物の被害が顕著で、死者も7名でている。今回は、主に Darbhanga と Dharan (Sunsari), Dhakuta, Biratnagar (morang), Bhaktapur の各地区で建物の被害調査を、Darbhanga, Biratnagar, Dharan では救急医療の実態を、Udayapur, Biratnagar では液状化の調査を行った。

3.1 人的被害

今回の地震による死傷者率を Fig. 3.1 に示す。死傷者率は死傷者数と負傷者数の和の、その地域の人口に対する比によって定義しており、同図は各地区毎の被害度を表す。図中⊕印は震源、数字は人口10,000人当りの死傷者数を示している。インドとネパールでは同一の基準で負傷者数が発表されているとは限らないが、ネパール側で被害が大きく、特に、震源近くの Udayapur (38) と丘陵地と沖積層との境界に位置する Sunsari (65), Dhankuta (75), Illam (29), Panchthar (44) での被害が著しい。後述するように、死者に比して建物被害数はインド側の方が多く、地震動の強さの差の他にインド側では1階建ての組積造住宅が多く、軽微な損傷を受けたことなどもあり、建物種別や規模あるいは被害の判定基準なども考慮して死傷者数を比較する必要がある。

ネパールの英字新聞 Rising Nepal には、死者全員の性別、年齢が記載されており、死者数の半数以上は14才以下の子供で、次に老人の死傷者が多く、男女の差は少ない。この地域の建物は大部分が石ぞうや煉瓦造など脆性破壊しやすい建物であり、瞬時的な倒壊によって死傷者が増加したものと考えられる。

3.2 建物被害

ヒマラヤ地域一帯の伝統的な住宅の工法は地形・風土・気象条件によって3種類に分けられる⁷⁾。熱帯性モンスーン気候のテライと呼ばれるガンジス平原域では、暑さと蛇などの外敵から守るためにピロティ形式の木造住宅が多かったが、最近では、木材が少なくなり、より安い煉瓦造が普及してきている。床の厚さは50 cmに達することも多く、非常に重量の大きい建物となっている。ネパールの住民の50%は丘陵地に住んでおり、ここでは、暑さとともに豪雨や強風からも身をまもるために石造や日干し煉瓦、あるいは焼煉瓦の住宅が建てられ、壁の厚さは床と同様50 cmほどになることが多い。山岳地域では気候条件はさらに厳し

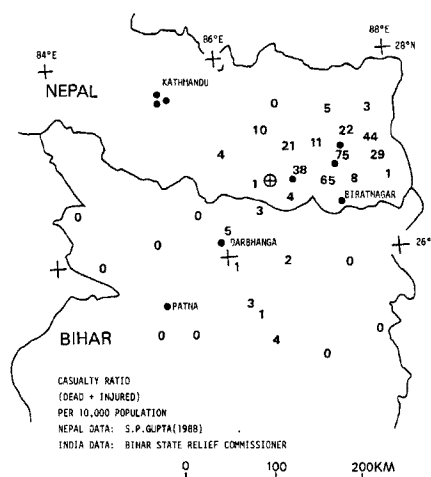


Fig. 3.1 Map of the effected region showing the casualty ratios.



Photo 3.1 Typical rural houses in Nepal.

く、石を積み上げ粘土で堅める方式の住宅が多いといわれている。この地域の伝統的な住宅の例を **Photo. 3.1** に示す。

今回の地震による各地域ごとの被害率を **Fig. 3.2** に示す。インド側の被害率には倒壊家屋から軽微な亀裂を生じた家屋までの数を含んでおり、ネパール側では倒壊から小破までの家屋数を含んでいる。この図から明かなように、被害率の大きい地域はネパール東部の丘陵地に集中している。ただし、建物の被害総数はインドの方が多く、Bihar 州で15万戸、ネパールでは10万戸と報告されている。建物の被害の多かった地域は、先述した死傷者の場合と符合しており、被害率(%)は Darbhanga (16)、Udayapur (35)、Morang (2)、Sunsari (12)、Dhankuta (45) などとなっている。被害を受けた建物の大部分は石造あるいは煉瓦造

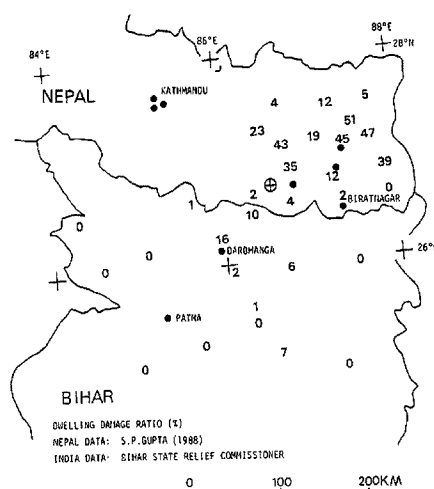
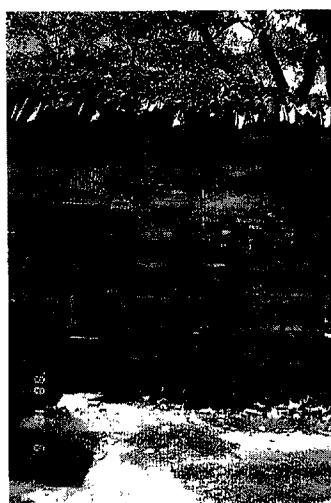


Fig. 3.2 Map of the effected region showing ratio of dwellings damaged.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Photo 3.2 Damage to houses in Darbhanga, Bihar.

などの組積造の民家であり、木造や鉄筋コンクリート造は軽微な被害しか受けていない。

以下に、各地域ごとの建物の被害状況を調査日程順に概説する。

(1) Darbhanga, Bihar, India (Photo 3.2)

Darbhanga は震源から約 86 km 南南西のガンジス平原にある人口約200万の都市であり、死者83名、負傷者992名、石造被害家屋25,000戸、煉瓦造被害家屋27,000戸と報告されている。

写真(a)は煉瓦造市庁舎のアーチ状の入口上部の被害であり、仮の補強を行った様子を示している。この建物は、壁や柱などかなりの亀裂が生じており、この建物内の倉庫では棚の書類の殆どが落下したといわれている。写真(b)は市庁舎の裏庭にある煉瓦造民家の被害状況であり、瓦屋根の落下と壁の亀裂がみられる。写真(c)は煉瓦造2階建ての医院の建物の入口の屋根の被害である。この写真に見られるように、防水工事または保全が不十分なために生じる鉄骨や鉄筋の腐食も地震被害を大きくする原因と考えられる。写真(d)は2階建て薬学専門学校の廊下部分の隅角部の被害で内部の壁にも亀裂がある。この建物は焼煉瓦によって建てられているが、鉄筋は使用されていない。隣接する平屋建て煉瓦造建物に被害は見られない。Bihar 州では、倒壊した建物は2階建てが多く、平屋の全壊数は少ないと言われている。写真(e)は増築予定のある建物で、屋上に鉄筋が露出しているのが見られる。この地域には、経済上の理由からか、増築を予定している建物が多く、建物の防水性、耐久性が耐震性に影響していることも考えられる。

(2) Bhaktapur, Bagmati, Nepal (Photo 3.3)

Bhaktapur はネパールの首都 Kathmandu の東方 10 km の傾斜地にあり、震源から約 165 km 西北西に



(a)



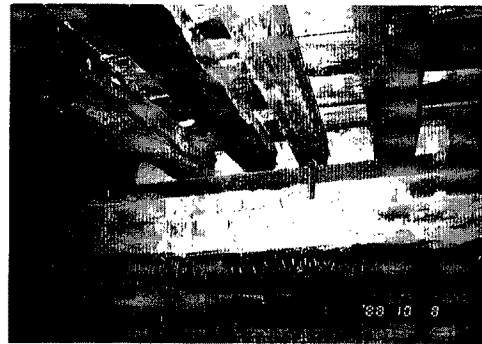
(b)



(c)



(d)



(e)

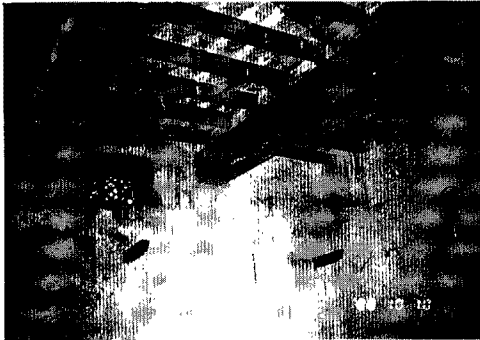
Photo 3.3 Damage to houses in Bhaktapur, Nepal.

位置する人口42万の古都である。ここでは、死者7名、負傷者43名、被害家屋1,750戸の被害があった。

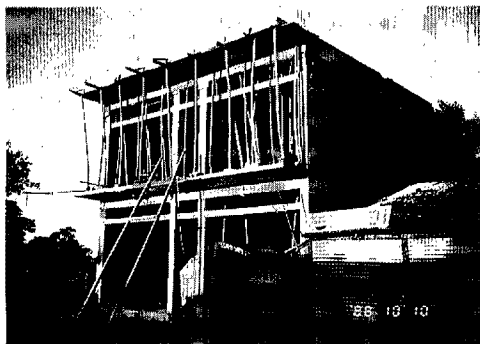
この地域には、写真(a)に見られるように4階または3階の煉瓦造建物が密集している。写真(b)は4階建て煉瓦造の道路に面する外壁が倒壊した状況を示している。写真(e)にあるように、この種建物の床構造は木造の梁の上に煉瓦を敷き、その上を厚い土で仕上げるという重量の大きい構造である。また、煉瓦壁の厚さも50 cm 以上あり、せん断力に対しては若干抵抗するものの、曲げ抵抗あるいは引張抵抗は小さいことが写真(c)、(d)の被害例から理解できる。木造の梁は煉瓦壁に支持されているが、水平移動に対しての拘束は写真(e)に見られるように非常に少なく、全くない場合もある。この地域の地盤の振動は、震源からかなり離れているため、大きくなかったと考えられるが、木造梁に直交する煉瓦壁は床位置での拘束がないため、面外の抵抗力が小さく、被害を大きくする原因となっている。1934年の Bihar-Nepal 地震では、Bhaktapur で6,000戸、Kathmandu で8,600戸の被害があったと報告されている⁴⁾。今回の地震による被害家屋は Kathmandu で200戸、Bhaktapur で1,751戸と圧倒的に Bhaktapur の被害が多い。首都 Kathmandu は、Bhaktapur より近代化が進んでおり、地震後に建て替えられた建物が多いためと聞いている。



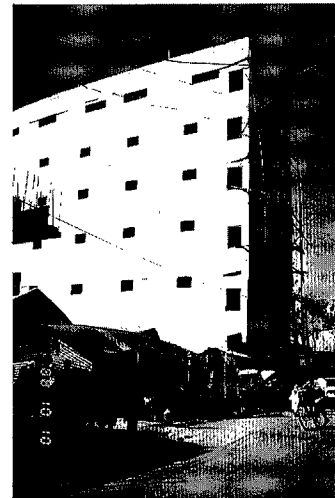
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Photo 3.4 Damage to houses in Biratnagar, Nepal.

(3) Udayapur, Sagarmatha, Nepal

Udayapur は Siwarik 丘陵からガンジス平原に広がる位置にある人口16万の地区であり、アメリカ地質調査所の発表した震源域にあたるため被害も多く、死者82名、負傷者523名、被害家屋9,390戸の被害があった。この地区には大きな都市がないため調査中に被害を確認することは困難であったが、妻壁が壊れた煉瓦造住宅や壁に被害を受けた石造住宅などが散見された。なお、同じ地区の Gaighat では、砂の液状現象がみられており、5.4節に示すように、地盤の振動はかなり強かったと思われる。

(4) Morang (Biratnagar), Kosi, Nepal (Photo 3.4)

Biratnagar は Morang 地区 (人口53万) の中心地であり、震源から約 75 km 東南東のガンジス平原上に位置する都市であり、Morang 地区全体で死者32名、負傷者941名、被害家屋1,489戸の被害があった。

煉瓦造平屋建て住宅が倒壊して6名の死者をだした被害跡には (写真(a)), 隣接する建物との接合部がみられず、安易に増築された疑いがある。倒壊していない側の建物の内部は写真(b)のような床構造になっており、壁面には小さな亀裂が見られる。写真(d), (e)は建築中の6階建て鉄筋コンクリート造ホテルである。地震により柱に曲げ破壊が生じたため、補強工事を行っているところで、柱断面を約2倍にし、既設の梁の下に新たに梁を増設している。地震前の柱断面は $30 \times 30 \text{ cm}^2$ であり、耐震設計された建物としては断面が小さいように思われる。この建物の耐力については、5.3節で検討する。写真(c)は鉄筋コンクリート骨組に煉瓦壁を埋め込んだ建築中の建物であり、同様の建物は被災地域で数多く見られる。コンクリート断面は20 cm 角程度と小さいが、床構造が鉄筋コンクリート造のため、煉瓦壁が有効に作用するこの種建物の被害は非常に少ない。

(5) Sunsari (Dharan), Kosi, Nepal (Photo 3.5)

Dharan は Sunsari 地区 (人口34万) の商業の中心地であり、震源から東北東 70 km の Siwarik 丘陵とガンジス平原の境界に位置している。

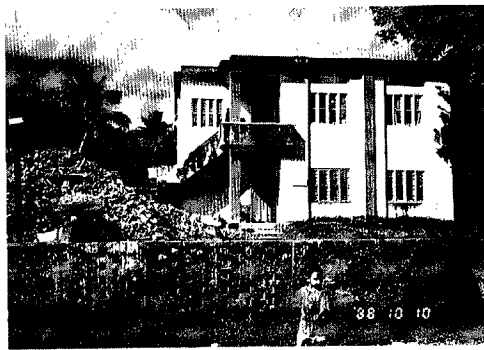
Dharan は、今回の地震による最も被害の大きかった町の一つであり、死者122名 (人口12万)、被害家屋4,275戸 (総建物数2万戸) の被害があった。Sunsari 地区全体の被害は、死者138名、負傷者2,117名、被害家屋6,960戸である。

この町は、今回、重点的に調査を行った地域であり、詳細については後述し、ここでは個々の建物被害について述べる。Dharan 地区病院は町の中心部にあり、同一敷地内に2階建て鉄筋コンクリート造診療所、2階建て煉瓦造の院長宿舎、平屋建て鉄筋コンクリート造病棟、鉄筋コンクリート造高架水槽、煉瓦造高架水槽、建築中の鉄筋コンクリート造建物などがある。このうち、煉瓦造の院長宿舎は写真(a)の左側に見られるように全壊したが、その建物で睡眠中だった院長夫妻は奇跡的に助かり、その後の救済活動を行っている。正面にある鉄筋コンクリート造の診療所の内部には被害は見られず、外部階段の手摺が壊れた程度である。2層鉄筋コンクリート造高架水槽は被害を受けなかったが、煉瓦造の高架水槽は30度以上傾斜している (写真(b))。平屋建て煉瓦造の病棟は軽微な亀裂にとどまっており、この病院での救急活動を可能にしている。経済上の理由からか、工事を中断している現場の柱は断面も大きく2方向で異なる配筋がされており、この種の重要な建物は耐震設計される方向にあるようである。写真(c)は病院の近くの煉瓦造住宅の被害である。この地区の壊れた建物の大部分は2階または3階建ての煉瓦造建物であり、写真(c), (d)からもこの種建物の破壊形式、床構造、壁構造の概要を知ることができる。1988年9月開校予定であった Tribhvan 大学工学キャンパスには煉瓦造2階建ての校舎が数多く建てられていたが、煉瓦壁のせん断破壊や短柱の被害など、通常、日本で観察されるような被害が見られた (写真(e), (f))。全体崩壊に至らなかったのは、床が鉄筋コンクリート造のため部分崩壊を生じなかったためと考えられる。

(6) Dhankuta, Kosi, Nepal (Photo 3.6)

Dhankuta は Dharan の北方 20 km、震源から約 80 km の山岳地にある町で、この地区では死者93名、負傷者878名、被害家屋9,661戸の被害があった。

この地区の被害の特徴は煉瓦造2-3階の妻壁の倒壊である。屋根は鉄板など軽い材料で葺かれているた



(a)



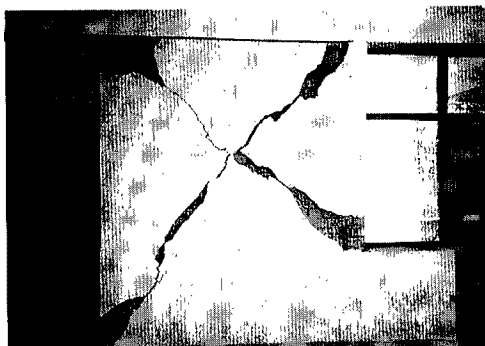
(b)



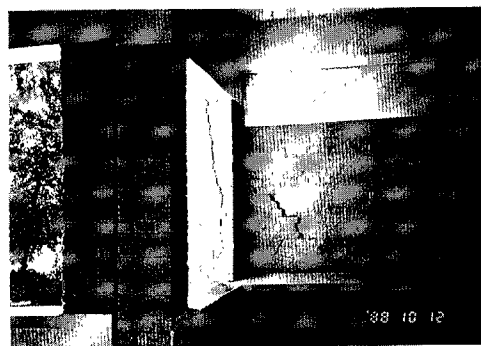
(c)



(d)



(e)



(f)

Photo 3.5 Damage to houses in Dharan, Nepal.



(a)



(b)

Photo 3.6 Damage to houses in Dhankuta, Nepal.

め、屋根の重量は小さい。桁行方向の壁は建物全自重を支えているため、曲げ抵抗が増すのに対して、妻壁は面外耐力が小さく壁自身の慣性力に耐えられなかったことが被害を大きくした原因と思われる。典型的な被害例を写真(a), (b)に示す。この種建物では、妻壁の周囲に臥梁などを設けて面外の抵抗を増す対策が必要であろう。この地区では、地区病院も倒壊しており、大破を免れた2階建て住宅の屋根瓦の落下も多い。鉄筋コンクリート造建物の被害はここでも見られない。調査中に石造住宅の工事現場をみる機会に恵まれた。石を積み上げるごとに丁寧に土で埋めているが、特殊な粘土を用いるのではなく、裏庭の土をこねて使用している。近所の人が助け合って施工しているようで、専門家が指導しているかどうかは明らかでない。倒壊した住宅と同じ工法を用いていると思われる。

4. 被害・救急・報道システムの分析

4.1 死傷者数と倒壊家屋数の関係

著者の一人村上は過去に起こった地震による被害統計を分析して死者と倒壊家屋との関係を明らかにしている⁸⁾。Fig. 4.1 には、縦軸に Lethality (死者数を倒壊家屋数と平均所帯数の積で除した値)、横軸に建物の被害率をとって、イタリア・トルコでの過去のいくつかの地震についての両者の関係を建物種別ごとに示している。震度が大きいほど被害率が大きく、Lethality も大きくなっていること、構造種別によって被害が異なることが解る。○印は今回の地震による値である。

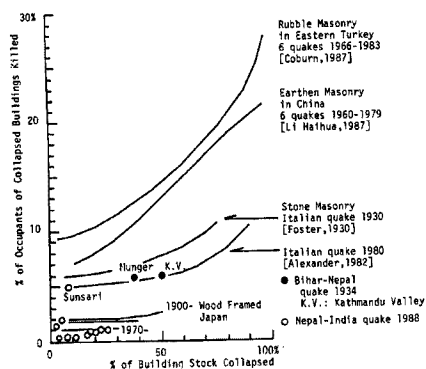


Fig. 4.1 Lethality index in Turkey and Italy.

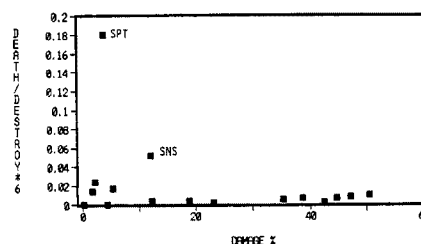


Fig. 4.2 Lethality index by district in Nepal.

今回の地震についての値を Fig. 4.2 に示す。ネパール全体の平均値は1.0%、標準偏差は1.3%であるが、Sunari (SNS) では5%と高い値となっている。その理由は、次節で示すように、この地域の煉瓦造に2-3階が多く、多数の死者がでたためと考えられる。Saptari (SPT) は死者数(13)、建物被害数(12)とも少なく、統計資料が少ないために数値が大きくなっていると思われる。

前述の Sunari 地区は今回の主要な調査地である Dharan Bazaar を含む最も被害の多かった地域の一つである。Dharan における同様の値(L)を、各区ごとの建物数が明らかでないため、被害を受けた建物数(D)に対する全壊建物数(C)の比を横軸にとってプロットすると Fig. 4.3 のようになる。この図で、5, 11, 14区の値は統計資料に疑問があるため除外すると、およそ次式の関係が成立し、この町の中心である1-4区の危険度が大きいことが解る。町の中心部には、2階、3階の煉瓦造建物が多かったのが主な原因と考えられる。

$$L = 0.0484 \times (C/D)$$

Dharan の危険度指標は平均1.5%であり、煉瓦造の被害が多かったトルコやイタリアの被害より小さい値となっている。

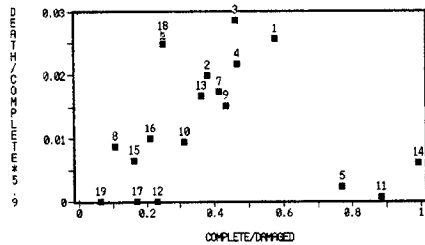


Fig. 4.3 Lethality index by ward in Dharan Bazaar.

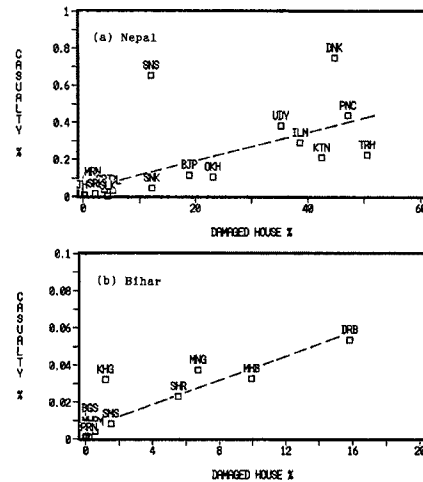


Fig. 4.4 Relation of the house damage ratio to the casualty ratio for Nepal and Bihar.

Table 4.1 Material and human loss caused by the 1988 Earthquake in Dharan Bazaar.

Population 118218
 No. Houses 20000
 No. Wards 19

Ward	Death	Damaged Houses	Damage Category		Loss 1000 Rs
			Complete	Partial	
1	20	229	132	97	28585
2	8	179	68	111	27592
3	23	294	136	158	15529
4	11	185	86	99	27790
5	1	95	73	22	9230
6	5	136	34	102	14251
7	8	189	78	111	21688
8	2	364	39	325	15379
9	7	180	78	102	18690
10	3	174	54	120	16398
11	1	293	259	34	4627
12	0	191	44	147	13029
13	12	338	122	216	27871
14	10	278	276	2	17268
15	3	478	78	400	4906
16	2	161	34	127	14492
17	0	176	30	146	1748
18	6	156	39	117	6020
19	0	179	11	168	3414
Total	122	4275	1671	2604	288507

Death Ratio = $122 * 100 / 118218 = 0.108\%$ Damage Ratio = $4275 * 100 / 20000 = 21.4\%$ Complete Damage Ratio = $1671 * 100 / 20000 = 8.4\%$

Rs = Rupees

1 Rupee = 5.2 Yen

死傷率と建物被害率の関係を **Fig. 4.4** に示す。両者は、ほぼ、線形関係にあり、ネパールとインドで統計基準が異なるが、ネパールの方が死者の割合が大きいことが解る。

4.2 ダーラン市内の被害の分析

Dharan は Sunsari 地区の商業の中心的な都市で、道路沿いに2階、3階の商店が立ち並ぶバザールである。この町は19の区で構成されており、各区ごとの被害統計を **Table 4.1** に示す。

この地区の死傷率は0.108%、被害率は21.4%と極端に大きく、被害総額は2億9千ネパールルピーに上っている。調査班は2班に分かれて南北に走る主道路沿いの建物全数の被害調査を行った。調査地域は **Fig. 4.5** に斜線で示されている1-5区の最も被害の多かった区域であり、3.2節に述べた地区病院は4区にあり、[H]印で示している。英軍キャンプは図中左下の18区にある。調査は、被害の軽微な、または、無被害の建物については外見により被害程度を判断し、全壊した建物については通訳を通じて住民から構造と階数を聞いた。調査した481棟の工法別、階数別の統計を **Table 4.2** に示す。この地域の建物の1/3は煉瓦造、1/3は木造の建物であり、残りが純鉄筋コンクリート造、または、煉瓦壁を含む鉄筋コンクリート造架構である。

同表および **Fig. 4.6** に示すように、3階建て煉瓦造の90%、2階建て煉瓦造の50%、煉瓦造平屋の30%が全壊している。木造の住宅で全壊したのは少なく5%程度であり、傾斜した住宅も20%あるが、かなり老朽化した建物も多く、地震が原因だとは考えにくい。鉄筋コンクリート造の建物については、軽微な亀裂は見られるものの倒壊したのは1棟のみである。煉瓦造の建物が日干し煉瓦か焼煉瓦かは明らかでないが、2階以上の建物には鉄筋コンクリートによって煉瓦壁の周囲を補強するなどして、床面の一体性を保つ配慮が

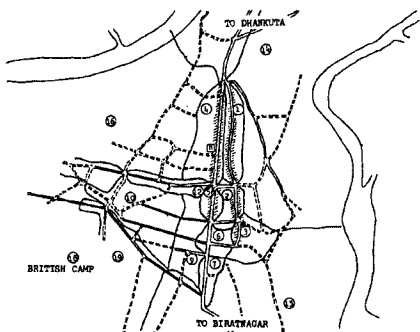


Fig. 4.5 Survey area in Dharan Town Panchayat, Sunsari, Nepal.

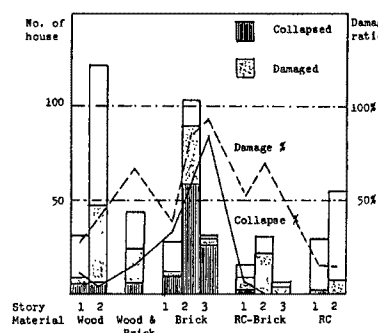


Fig. 4.6 Building classified as to construction material and number of stories.

Table 4.2 Statistics of Building Damage of Word 1-5 in Dharan Bazaar.

Damage	Wood		Wood & Brick	Brick			R/C Brick			R/C		Total
	1F	2F		1F	2F	3F	1F	2F	3F	1F	2F	
Total Number	30	122	34	28	103	31	15	30	6	29	53	481
Collapse	3	5	5	9	58	26	1					107
Half Collapse	1	16	10	1	24	3	1	5			1	62
Crack	1		7	1	7		6	16	3	1	6	48
Tilted	3	26	1									30
No Damage	22	75	11	17	14	2	7	9	3	28	46	234
Collapse Ratio	10.0	4.1	14.7	32.1	56.3	83.9	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	%
Damage Ratio	26.6	38.5	67.6	39.2	86.4	93.5	53.3	70.0	50.0	3.4	13.2	%

必要である。

4.3 救急・報道システムの分析

地震後の救急実態を把握するため、被災地にあるいくつかの病院を訪ねた。Kosi Zonal Hospital は140床が常設されているが、地震後560人の負傷者を受け入れている。負傷者の半分は同じ地区の住民で、他は別の地区から2、3日遅れてヘリコプターなどで運ばれてきた負傷者である。負傷者の数に男女の差はなく、建物の倒壊などによる手足の骨折が多い。Dharan District Hospital は25床しか常設されていないが、この地区は最も被害の大きかった地区であるため、地震当日に700人の負傷者の治療に当たっている。医者2名、医療補助者2名、看護婦3名の医療スタッフの他に十数名が応援に駆けつけている。合計1,359名が治療を受け、その内の39名が入院、85名がテントに収容されている。負傷者の10-15%は頭や背骨、骨盤の怪我、残りは四肢の骨折や怪我である。同じ Dharan 市内にある British Army Recruit Camp Hospital は施設が充実しており、ベッド数72に医者4名、医療スタッフ105名が常駐している。地震後250の緊急ベッドを用意し、医者、看護婦など60名以上がイギリスの香港病院から援助に来ている。約900名の治療に当り、その内256名が入院、8名死亡、300名以上の手術を行っている。上述のように、緊急時には収容人員を越える負傷者に対応することになるため、常時から負傷者の予測をたて、対処する方法を考えておくことが必要であろう。

インドには Hindustan Times、ネパールには Rising Nepal という英字新聞があり、地震直後からの関連記事を調べると以下のことが解る。ネパールの死者は721名とインドの2.5倍であったが、死者数を掌握するのに要した日数はネパールの方が短く7日間、インドでは10日間かかっている。また、Rising Nepal には1ヵ月以上の間に総計250の地震関連記事が掲載されているが、Hindustan Times では半月間に100の記事に留まっている。購読者層の相違も考慮する必要があるが、地震による損害がネパールで大きかったことを示している。記事の内容では、薬などの緊急物資、病院の対応、諸外国からの援助などが地震直後に多く、経済問題、復旧などがそれに続き、構造的被害や住宅政策、復旧方法など重要と思われる記事は以外と少ない。

5. 被害地域の震度の推定

インド・ネパールとも、今回の地震による各地の震度は報告されていない。インドでは被害を受けた地域に地震計が設置されていたと聞かされたが発表されていないようである。ネパールでは、Kathmandu 周辺以外に地震計が設置されていたとの情報は得ていない。そこで、種々の方法から各地の震度を推定し、被害との関係を明らかにすることを試みる。

5.1 断層破壊過程を考慮した震度の推定

統計解析に基づいたマグニチュード M と震央距離 Δ に関する地盤種別ごとの既存の最大加速度アテニュエーション則だけでは、ばらつきの大きい実際の最大地動の現象を捉えられないとの考えから、著者の一人佐藤は、断層の破壊過程を考慮し、小地震の震源スペクトルから大地震のパワースペクトルを計算して最大地動の期待値を推定する方法を開発した⁹⁾。そして、種々の断層パラメータの変化が最大加速度のアテニュエーション特性に及ぼす影響を明確にし、特に断層近傍での最大加速度が頭打ちとなり、その頭打ち現象に対応する震央距離が高々断層の長さ程度であることを示した¹⁰⁾。さらに、地震基盤から入射する地震波動の表層地盤による増幅特性および各地域ごとの Q 値を考慮することにより、これまでの日本周辺で発生した歴史地震について最大加速度分布を再現した^{11,12)}。ここでは、大地震を合成するための重ね合わせに有効な式を取り入れて合成方法を改良し、これを1988年のネパール・インド地震に適用して、震源域での地盤震動の強度がどの程度であったかを推定した。

(1) 大地震合成方法の改良

大地震の断層面を $n \times n$ 個の小断層に分割し、断層面上の小区域に小地震を対応させれば、断層の破壊過程にしたがって小地震を重ね合わせることで大地震を合成することができる。この場合、大地震の地震動

$g_L(t)$ は、小地震の地動 $g_s(t)$ を用いて次式で表される。

$$g_L(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n g_s(t - t_{ijk}) \quad (1)$$

ただし、 t_{ijk} は次式のように地震動の伝播による時間遅れ、断層面上を破壊が伝播するのに要する時間遅れ、そしてくいちがいによる時間遅れの項を加え合せた時間を表す。

$$t_{ijk} = \frac{(R_{ij} - R_0)}{v_s} + \frac{\xi_{ij}}{v_r} + \frac{k\tau}{(n-1)} \quad (2)$$

ここに、 R_0 は断層の破壊開始点から観測点までの距離、 R_{ij} は ij 要素の破壊開始点から観測点までの距離、 v_s は媒質の S 波速度、 ξ_{ij} は断層面上の破壊開始点から ij 要素の破壊開始点までの距離、 v_r は破壊速度、 τ はくい違いの立上り時間である。

式(1)による大地震の合成では、 $1/\tau$ より低周波の地震動で観測とよく一致する。しかし、この地震動のスペクトルは高周波領域で ω^{-3} の傾きを持ち、実際の観測から得られるような ω^{-2} の傾きとはならないので、一般に高周波領域で過小評価となる。

これに対し、本研究でこれまで用いた重ね合わせの方法¹³⁾ は以下のものであった。

$$g_L(t) = \sum_{i=1}^{n_D \cdot n_L \cdot n_W} g_s(t - \tilde{t}_{ij}) \quad (3)$$

ここに、 n_w , n_L , n_D はそれぞれ幅方向、長さ方向そしてくい違い量に関する重ね合わせ個数 ($n_w = n_L = n_D = n = (M_{0L}/M_{0S})^{1/3}$; M_0 : 地震モーメント) を表す。この方法は高周波領域で ω^{-2} の傾きを持ち、実際の現象をよく表現しうるが、式(1)からも分かるようにくい違いに関する項を長さに関する項に組み込んでいるため、小断層内では破壊の方向が決ってしまうという欠点を持つ。

Irikura¹⁴⁾ は高周波領域に有効な合成式として次式を提案している。

$$g_L(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n g_s(t - \tilde{t}_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{n} g_s(t - \tilde{t}_{ijk}) \quad (4)$$

この式は n^3 個の重ね合わせからなっているが、第一項のスペクトルは高周波領域で ω^{-2} の傾きを持ち、第二項は ω^{-3} の傾きを持つ。結局、高周波領域では第一項に従うため全体として ω^{-2} モデルになっている。本研究ではこの式を用いて重ね合わせを行った。式(3)、(4)の $\tilde{t}_{ij}$ と $\tilde{t}_{ijk}$ と式(2)の t_{ijk} との関係は文献13、14)に述べられているので、ここでは省略する。

大地震のパワースペクトルは、上述した合成手法を周波数領域で行い、これに共役複素数を乗ずることによって求めることができる。そして、Kiureghian¹⁵⁾ の方法を用いて次式より最大地動の期待値を決定する。

$$U_{max} = P(\lambda_m) \sqrt{\lambda_0} \quad (5)$$

ここに、 $P(\lambda_m)$ はピーク係数、 $\lambda_m (m=0, 1, 2)$ は m 次のスペクトルモーメントである。さらに、伝播経路の影響を忠実に表すための Q 値、および翠川²¹⁾ が提案した表層の増幅特性を導入することにより、震源、伝播経路、当該地盤の全ての影響を取り入れた最大地動の予測が可能となる。

(2) 内部減衰と増幅度の導入

本研究で提案した式の中では震源からの距離 R に反比例するいわゆる距離減衰のみしか考慮していないので、実際問題に適用するに当たっては内部減衰も考慮する必要がある。ある振動数に対する波の空間的な減衰は次式で表される¹⁶⁾。

$$A(R, \omega) = A_0 \exp \left\{ -\frac{\omega R_{im}}{2cQ} \right\} \quad (6)$$

ここに、 A_0 は Q 値を導入する前のスペクトル振幅、 R_{im} は震源から観測点までの距離、 c は S 波の伝播速度である。式(6)を用いることにより、指数関数で表される空間的な内部減衰量を導入することができる。本研究で対象とした波は S 波であり、減衰として扱う値はこの S 波減衰 (Q_s) が望ましい。しかし、 S 波減衰よりもこの後に続くコーダ部分の減衰、即ち S コーダ波減衰 (Q_c) の方が求めやすくこれに関する報告も多い。わが国における代表的な Q 値の周波数依存式を以下に示す。インド・ネパール国境地帯における Q 値のデータを収集することが困難であったので、ここでは式(7)を用いて解析を行った。

$$(i) \text{ 東北, 北海道地方 (日本海側)}^{17)} \quad \log(Q^{-1}) = -\log(f) - 2.00 \quad (7)$$

$$(ii) \text{ 東北, 北海道地方 (太平洋側)} \quad \log(Q^{-1}) = -\log(f) - 2.30 \quad (8)$$

$$(iii) \text{ 関東, 東海地方}^{18)} \quad \log(Q^{-1}) = -0.6 \cdot \log(f) - 2.4 \quad (9)$$

$$(iv) \text{ 近畿地方}^{19)} \quad Q_c = 230\sqrt{f} \quad (10)$$

$$(v) \text{ 四国, 九州地方}^{20)} \quad Q^{-1} = 9.3 \cdot 10^{-3} \cdot f^{0.6112} \quad (11)$$

ただし、(i)、(iii)は著者らが文献の図から回帰したもの、(ii)は Q 値の地域性から判断して(i)を参考に推定したもの、(iv)、(v)は文献から引用したものである。小林・翠川²¹⁾は過去の震害例から地質条件と地盤の増幅度との関係を定性的に指摘するとともに、地質条件と最大加速度に対する地盤の増幅度との関係も次式のように定量的に定めている。

$$\begin{aligned} G_A &= 5.5 \text{ (第4紀層)} \\ &= 5.0 \text{ (第三紀—第四紀層)} \\ &= 4.0 \text{ (第4紀噴出物)} \\ &= 3.5 \text{ (第三紀層)} \\ &= 2.5 \text{ (先第三紀層)} \end{aligned} \quad (12)$$

本研究では上述の手法によって得られた増幅度 G_A を用いて、地表面の最大加速度 $A_{max}(surf)$ を以下のよう定めた。

$$A_{max}(surf) = G_A \times A_{max} \quad (13)$$

(3) ネパール・インド地震の最大加速度分布

この地震は1988年8月21日、ネパール東部およびインド北東部を襲った。マグニチュードは6.7、震源は26.775°N, 86.616°N、深さ57 kmである。死傷者は数千人にも及び、特にインドではネパールとの国境沿いの Madhubani, Darbhanga, Saharsa などが大きな被害を受け、またネパールでも東部の Dharan Bazaar, Dhankuta, Biratnagar などの都市が被害を受けた。いずれも山脈の南側に広がる沖積層上に位置する都市である。

(a) 震源特性

U.S.G.S の速報⁶⁾によれば、Table 5.1 に示すように3種類の震源モデルが提案されている。各モデルには2つの断層面が与えられているが、どちらが本当の断層面であるかはこのデータだけでは判定できない。そこで、余震の分布を利用して実際の断層面を同定した。Fig. 5.1 は本震の発生から1ヵ月半後の10月3日までに記録された余震の震央分布を示したものである。図(a), (b), (c)は各々 P 波速度を6.0, 6.5, 7.0 km/sec と仮定したときの図である。本震の震央位置を考慮すると P 波速度を7 km/sec とするのが妥当であることがわかる。図(c)中の波線 AB, CD は U.S.G.S の断層モデルのストライク方向を示したものである。この断面に沿った余震の深さ方向分布が Fig. 5.2 に示されている。これから、AB が実際の断層のストライク (217度) であったことが判明する。また、ディップ角として54度の U.S.G.S. のモデルを採用する

Table 5.1 Fault Parameters of the 1988 Nepal-India Earthquake.

	strike (°)	dip (°)	slip (°)
P-wave	221	36	14
	120	82	125
USGS	217	54	-10
	312	82	+144
HRV	230	23	2
	137	89	113

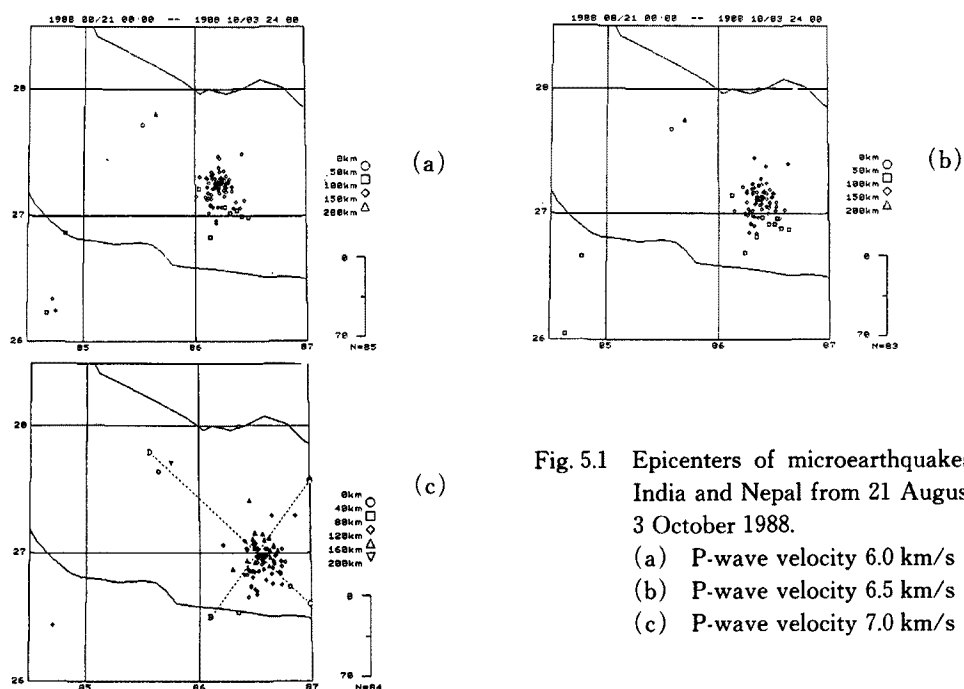


Fig. 5.1 Epicenters of microearthquakes in India and Nepal from 21 August to 3 October 1988.

- (a) P-wave velocity 6.0 km/s
 (b) P-wave velocity 6.5 km/s
 (c) P-wave velocity 7.0 km/s

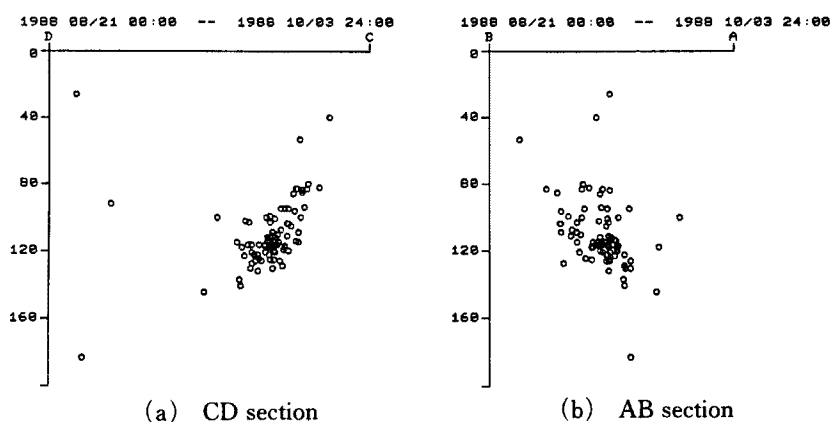


Fig. 5.2 Distribution of microearthquake depth in India and Nepal from 21 August to 3 October 1988.

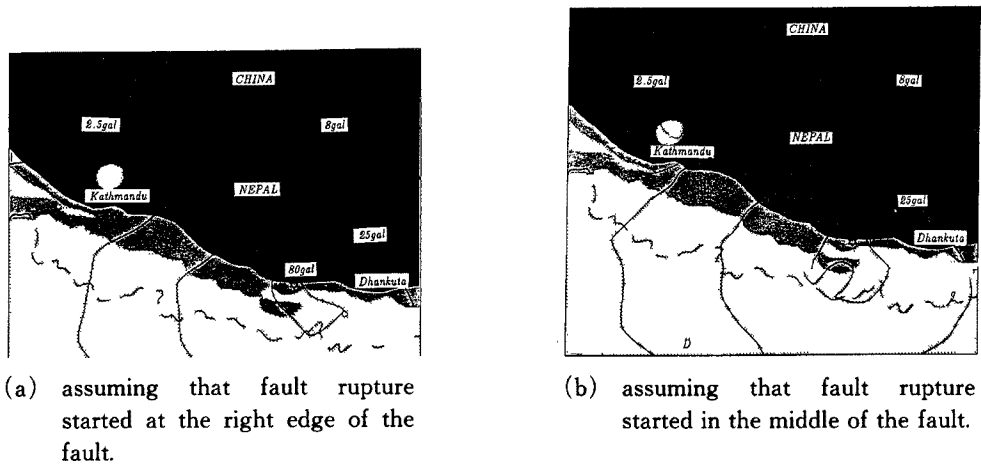


Fig. 5.3 Contours of maximum acceleration in the 1988 Nepal-India Earthquake.

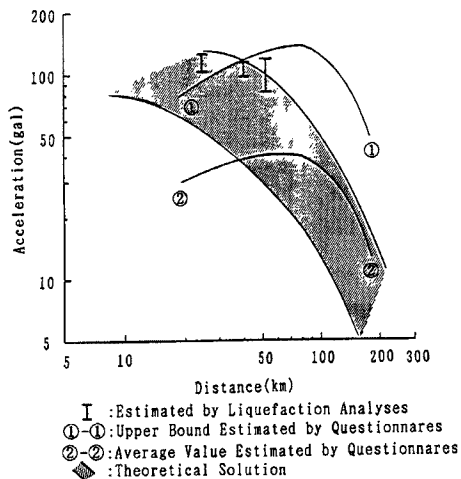


Fig. 5.4 Comparison of maximum ground intensities obtained by several methods.

のが妥当であることも明らかとなる。以下の解析では断層パラメータとして U.S.G.S. が決定した値を用いることにする。

(b) 最大加速度分布

Fig. 5.3 は推定した最大加速度の期待値の分布を示したものである。図(a)と(b)では断層上の破壊開始点が異なっており、前者は断層の右端から、後者は中央から破壊が開始したとして最大加速度の期待値を求めたものである。*印は震央を表し、図の濃淡は地質条件を示している。これより、大きな被害を受けた地域では最大 25~80 Gal の地動加速度が出ており、気象庁震度 IV 以上にはほぼ相当する揺れを受けたことになる。Fig. 5.3 は、図中の地域を208個の正方形に分割し、各編目の交点で最大加速度を計算しその等高線を描いた図である。**Fig. 5.4** は求められた最大加速度と震央距離との関係を Fig. 5.3(b)の結果について示したものである。震央距離が 25 km のあたりで最大加速度として 130 Gal 程度の値が見られる。全体的な傾向としては震央距離に反比例のアテニュエーション特性になっているが、断層の広がりやを考慮しているので、断層近傍では最大加速度が上限を有していることがわかる。図中には、現地で行ったアンケート調査結果ならびに液化現象から推定される最大加速度の値を示した。アンケートに基づく平均値は震央距離が短いときには計算値よりかなり小さくなるが、震央距離が 40 km 以上では計算値の中に包含されており、ほぼ妥

Table 5.2 Intensity questionnaire items

Question No Item	2	3	Intensity 4
8 Awaken			• Few
9 Vibration		• Light	• Moderate
10 Duration	• Sudden	• Short	
11 Frighten		• Not	
12 Human behavior			
13 Moving			• Easy
14 Animals			
15 Hanging objects		• Slight	• A lot
16 Windows, dishes			• Rattle
17 Liquids		• Little	• Lot
18 Shelf items			• None
19 Furniture			• No
20 Walls			
21 Chimneys			
22 Stone, brick wall			
23 Ground Cracks			
No. of Categories	1	5	8

当な推定結果が得られていることが分かる。また、液状化から推定される最大加速度の値は計算値のほぼ上限と一致していることも判明する。

5.2 アンケート調査による推定

地震記録のないところでの震度を推定する試みの一つとしてアンケート調査が従来から行われている²²⁾。住民の振動の感じ方、家具の揺れ方、建物の被害など従来用いてきた34項目の質問のなかから26項

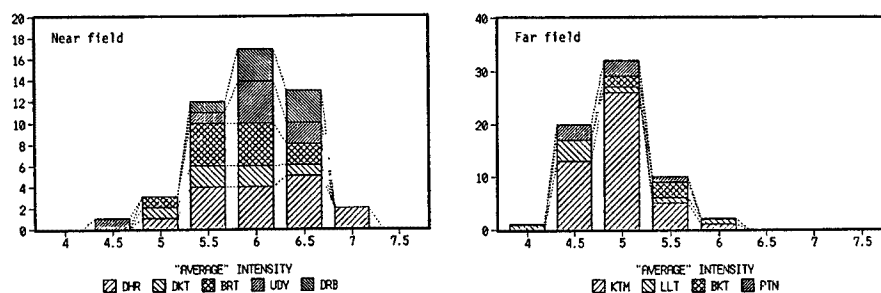


Fig. 5.5 Distribution of "average" intensity for near field and far field location.

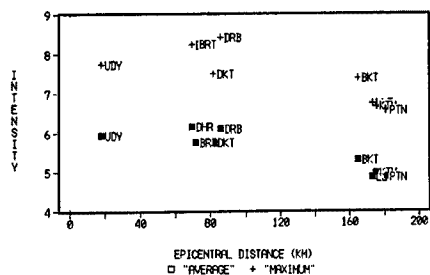


Fig. 5.6 Attenuation of "average" and "maximum" intensities along the epicentral distance.

and categories of responses.

Coefficients Based on MM Scale				
5	6	7	8	9
• Many • Strong • Long • Little	• All • Violent • Quite • Exit • Difficult • Ran out • Fell	• Very long • Couldn't • Broke • All • Damage • Large crk • Fell • Big crk • Few	• Panic • Fell down • Collapse • Most fell • Collapse • Many	• Ran, cry • Numerous
15	12	9	6	2

目を用意し、今回の調査全域9地区において113の回答を得た。個々の質問に対する回答内容を修正 Mercalli 震度階(2～9)に対応させたのが **Table 5.2** である。

回答方法は主に現地の通訳の協力を得て直接住民から回答を得る方法である。但し、Kathmandu では日本の建設会社の協力を得て回収した。**Table 5.3** に各地区ごとの回答数、震源からの距離とともに、アンケート結果から求められた平均震度および最大震度を示す。

調査地区を近距離(Dharan, Dhankuta, Biratnagar, Udayapur, Darbhanga)と遠距離(Kathmandu, Lalitpur, Bhaktapur, Patna)に大別すると、推定震度階は近距離で6.0、遠距離で5.0となる

Table 5.3 Sites of the questionnaire survey and preliminary intensity estimations.

Sites	Abbr.	No. of cases	"Average" intens. mean st. dev.		"Maximum" intens. mean st. dev.		Epicentral dist, km
Dharan	DHR	16	6.16	0.53	8.25	0.66	70
Dhankuta	DKT	6	5.76	0.53	7.50	0.76	82
Biratnagar	BRT	11	5.76	0.42	8.27	0.62	72
Udayapur	UDY	8	5.94	0.64	7.75	0.66	18
Lalitpur	LLT	8	4.85	0.66	6.75	1.20	173
Bhaktapur	BKT	5	5.30	0.23	7.40	0.80	165
Kathmandu	KTM	45	4.96	0.34	6.67	1.01	175
Patna	PTN	7	4.85	0.38	6.57	1.29	181
Darbhanga	DRB	7	6.11	0.32	8.43	0.73	86
Total		113	5.39	0.68	7.32	1.16	—

Epicenter: 26.7N, 86.6E

(Fig. 5.5)。修正Mercalli震度階5の強さは最大加速度 20–30 gal, 日本の気象庁震度Ⅲに相当する。

Fig. 5.6 は推定震度階の震源からの距離減衰を示している。最も被害が大きかったと言われる Dharan では, MM 震度階 7, 最大加速度 100 gal, 日本の震度Ⅴ程度, または, それ以上と推定されるが, アンケート調査の平均値では若干小さくなっている。その理由はアドベのような強度の低い煉瓦造と通常の煉瓦造とを同じ範疇に含めた定義の仕方にあると考えられる。

5.3 建物耐力による推定

調査期間中に入手した建物の図面は Dharan にある英軍キャンプ内の平屋建て鉄筋コンクリートブロック造の事務所棟のみである。単位面積当りの重量を 1 tf/m^2 と仮定して, 一枚の壁が負担する水平力を算出すると

$$Q = C \times 30.5 \times 6.8 \times 1.0 / 7 = 30 \times C \text{ (ton)}$$

となる。一方, ブロック壁の単位強度を 1.5 kg/cm^2 , 壁厚を 20 cm, 壁の有効長さを $508 \times 0.7 = 350 \text{ cm}$ とすると壁の水平抵抗力は,

$$Q_r = 1.5 \times 508 \times 20 \times 0.7 = 10,000 \text{ (kg)}$$

となる。2 式から係数 $C = 0.33$ を得る。この建物の今回の地震による被害は軽微で, 壁に小亀裂が生じている程度である(写真 Dharan) こと, および, 建物の増幅率を考慮すると地動加速度は 100 gal 前後ではなかったかと考えられる。

(2) 鉄筋コンクリート造

Biratnagar の建築中の 6 階建てホテル(写真 Biratnagar)は地震により, 柱, 壁に被害を受け, 補強工事中であったが, この建物は $20 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ の平面形である。単位面積当りの重量 1 tf/m^2 を仮定すると水平力は

$$Q = C \times 1.0 \times 20 \times 12 \times 6 = 1440 \times C \text{ (ton)}$$

となる。 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ の柱内に 13 mm の引張鉄筋があり, その柱の曲げ耐力は 9.3 tm, 曲げ破壊を仮定したときの水平抵抗力は

$$Q_r = 2 \times 9.3 / 4.0 \times 24 = 112 \text{ (ton)}$$

となり, 1 階のせん断力係数は約 $C = 0.08$ となる。この建物には煉瓦壁があり, 抵抗力は上記の値より増加することと応答増幅率を考えると地動加速度は 80 Gal 前後と予想される。ちなみに, Biratnagar に隣接するインドの Dhabhanga における設計せん断力係数は 0.08 と規定されている。

(3) 煉瓦造妻壁

煉瓦造妻壁の被害は Dhankuta, Dharan, Bhaktapur など至るところに見られた。被害の大半は壁の面外の破壊であり, 床面での拘束力の不足が主な原因と考えられる。ここでは, 煉瓦壁を独立した脚部固定の片持壁と考える。壁厚を t , 高さを h とすると, 壁脚の引張側応力が零になるときのせん断力係数は

$$C = t / (3 \times h) = 50 / 900 = 0.055$$

となり, $t = 50 \text{ cm}$, $h = 300 \text{ cm}$ と仮定すると単純に $C = 0.055$ の値で転倒することになる。Bhaktapur では, 4 階建て煉瓦造の被害があり, 増幅率は大いと考えられるから 20–40 Gal 程度と予想される。インドの規定では, 妻壁の周囲を鉄筋コンクリート造の部材で固めることを推奨している。

(4) 煉瓦造住宅

煉瓦のせん断耐力は小さく, 0.9 kg/cm^2 程度 (Indian Code) から 0.5 kg/cm^2 と言われる。住宅の単位面積を 30 m^2 , 単位面積当りの重量を 1 t/m^2 , 壁厚を 50 cm, 壁の有効長さを 350 cm と仮定すると水平力

は

$$Q = C \times 1.0 \times 30 \times N$$

水平抵抗力は

$$Q_r = (0.9, 0.5) \times 50 \times 350 = (15.7, 8.7) \text{ (ton)}$$

となり、せん断力係数は3階、2階、平屋の建物について、それぞれ、(0.17-0.09), (0.26-0.14), (0.52-0.29)となる。Dharan 市内の煉瓦造の2階建て以上が半数以上全壊したこと、Bhaktapur では4階建てに被害が多かったこと、および、応答増幅率を考えると地動加速度は Dharan, Dhankuta では70-150 Gal, Bhaktapur では50 Gal 前後と予想される。

以上の検討結果および各地区での被害状況を考慮して、調査地域の最大加速度を推定すると次のようになる。

Bhaktapur 20-50 Gal (4階建て煉瓦造妻壁破壊, その他被害小)

Gaighat 60-100 (2階建て石造煉瓦造被害)

Dharan 80-150 (2階建て煉瓦造倒壊, ブロック造亀裂)

Dhakuta 60-150 (1階建て煉瓦造妻壁破壊, 2階建て煉瓦造被害小)

Biratnagar 60-190 (6階建て R/C 造被害, その他被害小)

5.4 液状化に基づく震度の推定

震源域がヒマラヤ山塊がガンジス川の沖積平野へ遷移する地域にあったので、かなり広範囲にわたって液状化現象が見られた。3地点 (Gaighat, Bainigaon, Duhubi) で液状化で噴出した砂を採集した。Fig. 5.7 に粒度試験の結果を示した。いずれも、港湾構造物の設計基準では「液状化しやすい地盤」に分類されている。採取した砂に対して三軸試験を行って、相対密度と内部摩擦角との関係を求めたのが Fig. 5.8 であ

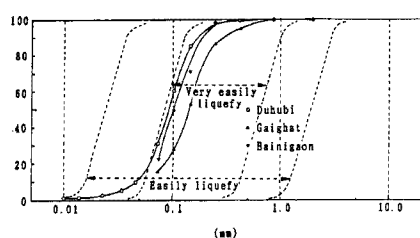


Fig. 5.7 Grain size distribution curve of sand samples from areas effected by the 1988 Nepal-India Earthquake.

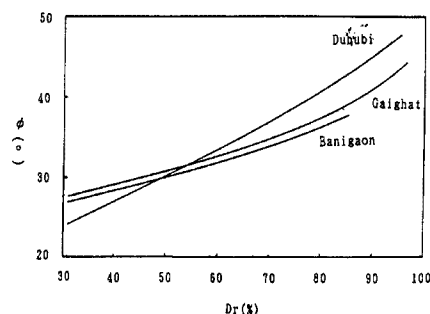


Fig. 5.8 Internal friction angle of the sand samples in terms of relative density.

る。以下では、液状化判定法の概略²³⁾を述べ、それに基づいて、液状化地点での最大加速度を推定する。

(1) 液状化判定法の概略

地震時に地盤内に発生する最大応力比 τ_{max}/σ'_v は次式で与えられる²³⁾。

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = \frac{\alpha_{max}}{G} \cdot r_d \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (14)$$

ここに τ_{max} は最大せん断応力, σ_v と σ'_v は深さ z (単位 m) での鉛直方向の全応力と有効応力である。 r_d は応力減少係数であり次式で定義されている。

$$r_d = 1 - 0.015 z \quad (15)$$

式(14)に含まれる α_{max} は最大水平加速度であり、 G は重力の加速度である。

一方、地盤が耐え得る繰返し応力比 $\tau_{max,i}/\sigma'_v$ は次式で与えられる。これは、繰返しせん断試験で20回の繰返しで5%の両振り軸ひずみを生ずる繰返し応力比 $\sigma_{di}/(2\sigma'_v)_{20}$ と静止土圧係数 K_0 の関数として決定される。

$$\frac{\tau_{max,i}}{\sigma'_v} = \frac{0.9}{0.55} \frac{1+2K_0}{3} \left(\frac{\sigma_{di}}{2\sigma'_v} \right)_{20} \quad (16)$$

ここに、 $\tau_{max,i}/\sigma'_v$ は最大応力比であり、 σ_{di} は軸応力の振幅、 σ'_v は初期拘束応力、 $K_0 = 0.5 \text{ tf/m}^3$ である。式(16)に現れる係数0.55は地震動波形の時間的な不規則性を考慮するためのものである。また、0.9はせん断応力の作用方向の不規則性を考慮するためのものである。

現位置での σ_{di} を推定するために、標準貫入試験の N 値と平均粒径 D_{50} を用いて、次式の様な関係式が与えられている²⁴⁾。

$$\left(\frac{\sigma_{di}}{2\sigma'_v} \right)_{20} = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} + 0.225 \log \frac{0.35}{D_{50}} \quad (17)$$

ここに、 σ'_v 有効上載圧である。

液状化の危険度を表す指標として F_i が次式で定義され、この値が1以下になると液状化の可能性が高い地盤と判定される。

$$F_i = \frac{\tau_{max,i}/\sigma'_v}{\tau_{max}/\sigma'_v} \quad (18)$$

(2) 地盤震動レベルの推定

$F_i=1$ を液状化の限界値とすれば、式(14)、(15)、(17)を用いることにより、液状化を起こすために必要な地震動強度 α_{max}/G の推定が可能である。現地では、 N 値のデータを収集することが出来なかったのので、次式で定義される内部摩擦角と N 値の関係を利用する。

$$\phi = \sqrt{12N} + 20 \quad (19)$$

Fig. 5.8 から明らかなように、内部摩擦角は相対密度の関数として与えられる。ここでは、相対密度 Dr を 50, 40, 30 と仮定した。相対密度が30は非常に緩く堆積した砂層であり、50はかなり密な場合を想定したものである。水位を 0 m とし深さ 5 m の位置で $F_i=1$ になる場合に対して、3地点における最大加速度の推定値を **Tabel 5.4** に示した。また、これまでの液状化地盤の調査結果によれば、 τ_{max}/σ'_v の値が0.15より小

Table 5.4 Estimation of maximum accelerations (Gal)
from liquefaction analyses.

		Gaighat	Bainigaon	Duhabi
Dr (%)	50	126	117	119
	40	116	109	99
	30	103	97	81
Lowest Intensity		75	77	75

さくなることは希である²⁵⁾と言われているので、この値を式(14)に代入して、最大加速度の最小値を推定したものを **Tabel 5.4** の最下段に示した。この表でみる限り、液状化が発生した地域では、75～130 Gal 程度の最大加速度が発生したことがわかる。

6. む す び

1988年ネパール・インド地震後、中国の雲南省、ソ連のアルメニア、タジクなどで相次いで地震があり、数多くの被害が報告されている。今回の調査は限られた期間に行ったものであり、被災地における伝統的な居住様式や経済事情など十分に理解していない面もあるが、調査の結果から以下の諸点が指摘できよう。

(1) 余震記録に基づいて解析した Udayapur, Dharan, Dhankuta, Darbhanga など震源近傍の震度は、修正メルカリ震度階にして、5～6の範囲、震源から 150 km 程度離れた Bhaktapur, Patna では 5 より小さい値となる。アンケート調査の結果、液状化した砂の実験結果あるいは建物の被害状況からも同程度の震度であったことが推察される。

(2) 関東大震災後、日本では限られた建物以外は煉瓦造の建物は建てられていない。その理由は、従来から指摘されているように、煉瓦造は非常に脆い破壊性状を示すことにある。今回調査したネパールやインドでは気象条件や施工システムなどの違いにより、煉瓦造が多用されている。これらの地域では、住民が直接施工しているため、地震に関する知識や耐震的な設計・施工法についての情報を住民に対して提供することが重要である。

(3) 煉瓦造建物の被害原因として、以下の点を指摘できる。a) 屋根および床板の施工法（床の重量が極めて大きい）、b) 床板と壁の接合法（壁の面外変形に対する拘束力が小さいため、壁がせん断抵抗部材として機能していない）、c) 煉瓦目地の材料強度（粘土を目地に使用しており、引張強度、せん断強度とも小さい）、d) 木造梁の拘束法（梁端部の抜け出しに対する拘束がない）。これらの被害原因を除去するためには、床板の軽量化、建物の一体性保持、壁周囲の鉄筋コンクリートなどによる補強、目地材料の再考、材料強度の改善などが重要であり、インドで出版されているマニュアルも参考になろう。

(4) 鉄筋コンクリート造の建物でも増築予定のために鉄筋を露出したまま放置している建物が見られる。被害原因の一つに鉄筋または鉄骨の腐食が考えられるため、防水工法の改善が必要である。この地域の地震活動度を考えると、一般に、耐震設計された建物であっても、水平せん断力係数（インドの規定によると $C=0.08$ ）が日本に比べてかなり小さいと考えられる。建物規模や重要度に応じて耐震性を高めるなどの配慮が必要である。

(5) ネパールには建物の耐震規定がなく、インドや英国など諸外国の規定を準用している。ネパールの実状に合った耐震規定あるいは推賞規準を整備することとともに、地震・耐震に関する教育を充実させることが急務であろう。さらに、ネパール東部においても、地震観測や地質調査など耐震設計の基礎となる資料の蓄積が待たれる。

謝 辞

今回の調査に際しては、国内、国外を問わず多くの方々からの協力を得た。インドでは Roorkee 大学地震工学部所長、V.K. Lavanja 教授はじめ同学部の教授と、今回の地震および地震被害とインドの耐震設計法に関する討論を行う機会を得た。Bihar 州政府の N.K. Singh 氏、Darbhanga 市の S. Nath 氏には被害資料の収集と現地調査について協力を得た。ネパールでは、鉦山地質局の M.R. Pandey 氏からは貴重な余震資料を頂いた。住宅局の S. Malla 氏には全期間にわたって被害調査に協力して頂き、帰国後も資料収集にご協力頂いた。S. Sharma, J. Satyal 両氏には現地住民との対話の通訳としてご協力頂いた。Dharan 市にある英軍キャンプでは、R.B. Gurung 氏から設計図、ボーリングデータ、救急医療実態など貴重な情報を得た。上記の方々およびご協力頂いたインド、ネパールの全ての方々に厚く御礼申し上げます。

現地では日本の方々にも絶大なご協力、ご支援を頂いた。ネパール大使有地一昭氏はじめ大使館の方々、

国際協力事業団インド事務所長倉林氏、ネパール事務所杉本氏、清水建設ネパール事務所長是枝氏と所員の方々には、不慣れな現地における両国政府との交渉、被災地域との連絡など調査に関連する全ての面でご協力頂いた。ここに、深甚なる謝意を表します。

本調査は文部省科学研究費特定研究（課題番号63115047）により行ったものである。文部省学術国際局大山超主任調査官、若林茂樹係長および自然災害科学総合研究班芦田和男京大防災研究所教授、伯野元彦東大地震研究所教授に心より御礼申し上げます。

最後になりましたが、今回の調査にご協力頂いた皆様に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Fujiwara, T., Sato, T. Kubo, T. and Murakami, H. O. : Reconnaissance Report on the 21 August 1988 Earthquake in the Nepal-India Border Region, Japanese Group for the Study of Natural Disaster Science, No. B-63-4 March, 1989.
- 2) 酒井治孝・本多 了：ヒマラヤ山脈の形成 I, 科学, 1988, pp. 494-508.
- 3) Khattri, K. N. : Great Earthquakes, Seismicity Gaps and Potential for Earthquake Disaster along the Himalaya Plate Boundary, Tectonophysics, Vol. 138, 1987, pp. 79-92.
- 4) Pandey, M. R. and P. Molnar : The Distribution of Intensity of the Bihar-Nepal earthquake of 15 January 1934 and Bounds on the Extent of the Rupture Zone, Journal of Nepal Geological Society, 6, 1, 1988, pp. 22-44.
- 5) Gupta, S. P. : Report on Eastern Nepal earthquake 21 august 1988, Damages and Recommendations for Repairs and Reconsyruction, asian Disaster Preparedness Center, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1988.
- 6) Preliminary Determination of Epicenters, Monthly Lising, U. S. Department of the Interior/Geological Survey, National Earthquake Information Center, August, 1988.
- 7) Boch-Isaacson, J. M. : Architecture & Construction Management in the Highland and Remote Areas of Nepal, Sahayogi Press, Kathandu, Nepal, 1987.
- 8) Ohta, Y., Goto, N. and Ohashi, H. : An Empirical Construction of Equations for Estimating the Number of Victims in an Earthquake, Jishin 2, No. 36, 1983, pp. 463-466.
- 9) 佐藤忠信：断層の広がり考慮した地震動のアテニュエーション, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, I-415, 1983, pp. 829-830.
- 10) 土岐憲三, 佐藤忠信, 清野純史, 松岡利一：断層破壊過程の影響を考慮した地震動のアテニュエーション, 第21回土質工学研究発表会, 1986, pp. 707-710.
- 11) 土岐憲三, 佐藤忠信, 清野純史, 松岡利一：断層破壊過程の影響を考慮した地震動のアテニュエーション, 第22回土質工学研究発表会, 1987, pp. 663-664.
- 12) 土岐憲三, 佐藤忠信, 清野純史, 齊藤太嘉志：断層破壊過程の影響を考慮した地震動のアテニュエーション, 第23回土質工学研究発表会, 1988, pp. 805-806.
- 13) Irikura, K. : Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions Duing Large Earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. Part 2, 1983, pp. 63-104.
- 14) Irikura, K. : Prediction of Strong Acceleration Motions Using Empirical Green's Function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 1986, pp. 151-161.
- 15) Der-Kiureghian : A Response Spectral Method for Random Vibration Analysis of MDF Method, Earthq. Eng. Struc. Dyn., Vol. 9, 1981, pp. 419-435.
- 16) Aki, K., Richards, P. G. : Quantitative Seismology, Vol. 1, 1980, pp. 168-169.
- 17) 岩田知孝, 入倉孝次郎, : 観測された地震波から震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震, 第39巻, 1986, pp. 579-593.

- 18) Tujiura, M. : Spectral Analysis of the Coda Waves from Local Earthquakes, Bull. Earth. Res. Inst., Univ. of Tokyo, 53, 1978, pp. 1-48.
- 19) 赤松純平：炭山地震観測室における地震観測(2),京大防災研究所年報, Vol. 23, 1980, pp. 107-114.
- 20) 千場充之：九州地方におけるコーダ Q^{-1} の地域変化, 地震学会予稿集, 1987.
- 21) 翠川三郎, 小林啓美：震源域及びその周辺での地表面最大加速度分布の推定, 日本建築学会論文報告集, 第290号, 1980, pp. 83-94.
- 22) Ohashi, H., T. R. Toppozada, and M. E. Durkin, "Seismic intensity questionnaire survey for 2 California earthquakes", presented at Annual Meeting of Seis. Soc. Amer., Santa Barbara, 1987.
- 23) Ishihara, K. : Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits during Earthquake, Soil and Foundation, Vol. 17, No. 3, 1977, pp. 1-17.
- 24) Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Tokida, K., Yasuda, S., Hirose, M., Imai, T. and Konno, M. : A Method for Estimating Undrained Cyclic Strength of Sandy Soils Using Standard Penetration Resistances, Soil and Foundations, Vol. 18, No. 3, 1978, pp. 43-58.
- 25) Shibata, T. and Wanchai Teparaksa : Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests, Soils and Foundations, Vol. 28, No. 2, 1988, pp. 49-60.

SURVEY REPORT OF THE 21 AUGUST 1988 EARTHQUAKE ON NEPAL-INDIA BORDER REGION

By *Teizo FUJIWARA, Tadanobu SATO, Tetsuo KUBO*
and *Hitomi Ohashi MURAKAMI*

Synopsis

The earthquake we have investigated took place in the Nepal-India border region in the early morning on 21 August 1988. This earthquake in the southeastern zone of Nepal close to the border of the State of Bihar, India registered 6.6 on the Richter Scale. Its focal depth was assumed to be 57 km. In Bihar State, India, 282 persons died, 3766 were injured and 150,000 houses were damaged. In Nepal, 721 persons died, more than 5000 were injured and 100,000 houses were damaged. Most the houses damaged had been constructed of stone cemented with mud mortar, unburnt bricks, or burnt brick masonry. There are many wooden houses and few reinforced concrete buildings in the effected area. We did not find any serious damage to those structures.

This is a survey report, in which the damage to human loss and the collapse of building structures done by the earthquake are introduced and discussed. We estimated the fault zone of this earthquake from the post-earthquake records. The intensity of ground shaking around the effected areas is discussed in terms of assumed fault parameters and the geological condition of the surface layer. We also prepared a questionnaire asking inhabitants. The intensity distribution estimated from their information is compared with the intensity derived from seismographic data. Based on our laboratory tests of sand specimens collected from riversides where liquefaction occurred during the earthquake, the maximum acceleration near the epi-center is also estimated. The strength of the structures in the effected areas is estimated and compared with the actual damage done. On the basis of our survey and analytical results we present some recommendations for the mitigation of earthquake disasters in these areas.