

2003 年イラン・バム地震における被害分布と表層の地盤振動特性

飛田哲男¹, 宮島昌克², 幸左賢二³, 荒井幸夫⁴, 田崎賢治⁵, 宇野裕教³,
 Mohammad Reza Salamy⁶, Reza Alaghebandian⁷

- 1 京都大学防災研究所
- 2 金沢大学大学院
- 3 九州工業大学
- 4 飛島建設
- 5 大日本コンサルタント
- 6 土木研究所
- 7 テヘラン大学

概 要

2003 年 12 月 26 日イラン南東部に位置する人口約 12 万人の町バム市直下を震源域とする地震が発生した。著者らは、地震発生約 2 ヶ月後に第 1 次調査として、バム市内とその周辺に観測点を設け微動観測、アンケート震度調査、建物倒壊率調査を行い、市内各所において震度や被害分布が異なることを明らかにした。本報では、第 2 次調査として市内 10 点において行った弾性波探査結果を示すと共に、詳細なボーリングデータに基づいて実施した地震応答解析結果をもとに、表層の P 波速度構造と建物倒壊率との関係について考察する。

キーワード：バム地震，地震被害調査，2003 年 12 月 26 日，屈折法弾性波探査，速度構造

1. はじめに

2003 年 12 月 26 日午前 5 時 26 分（現地時間），イラン南東部の人口約 12 万人の町バム市近郊を震源とする地震（ M_w 6.6, USGS）が発生した（図 1）¹⁾。震源の深さは約 10km で，断層面において平均約 1m の食い違いが生じたものと推定されている^{2, 3)}。地震後の調査では，バム市東部の撓曲崖を横切る幹線道路に断層運動によるものと推測される亀裂が見つかったが，明瞭な断層運動の痕跡は確認されていない。ただし，バム市北方の砂漠地帯において幅 1～2cm 程度で左雁行する地表亀裂が認められたとの報告がある²⁾。その後の余震観測から，震源断層がバム市南方からバム市直下までの約 20km，バム断層から西へ約 3.5km に位置していることが明らかになっており⁴⁾，このことがバム市に被害が集中した原因のひとつであると考えられている。

地震発生が早朝であったこと，また市内の多くの家屋が日干しレンガ（アドベ）や焼成レンガを用いた無補強組積造であったことなどから，死者 26,700 人を超える激甚な災害となった^{5, 6)}。また，唯一の観光資源である要塞遺跡「アルゲ・バム」（バム城）も倒壊し，同市の経済に大きな影響を与えた。

本報告では，バム市内 10 点において行った弾性波探査結果を示すと共に，詳細なボーリングデータに基づいて実

施した地震応答解析結果をもとに，表層の P 波速度構造と建物倒壊率との関係について考察する。なお今回実施した調査（微動調査を含む）の詳細については，文献⁷⁾を参照されたい。

2. 地震概要

2.1 地形・地質

バム市は，ケルマン州の州都ケルマンの南東約 180km，ルート砂漠の南端，標高約 1,050m に位置する面積約 5,400ha のオアシスの町である。市街はバム断層西側に広がり，市の北部を Posht-e-rud 川が西から東へ流れている。

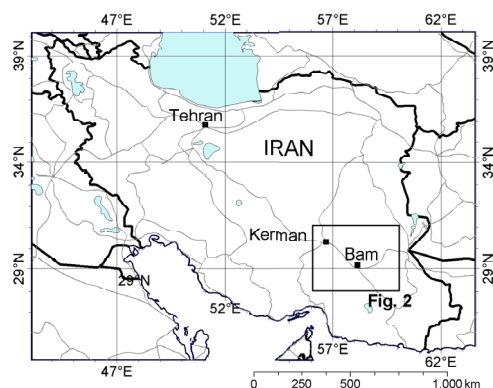


図 1 バム市の位置

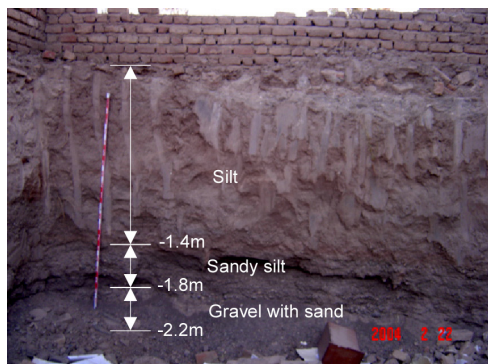


図 2 BHRC (観測点1) 付近における表層の地質構成

この川には、毎年 1-3 月頃の一時期、大量の流水があるとのことである。バム市周辺の地質は第四紀に堆積したものと推定される細砂とシルトからなる沖積層である¹⁾。河食崖および市内の開削面から (図 2)、表層の地質は主に赤灰色のシルト、シルト質細砂の表層 (ML)、その下に砂礫からなる河床堆積層により構成されていることがわかる。バム市庁舎におけるボーリングコアによると、地表面下約 20 から 30m においてもシルト質砂が堆積している⁸⁾。表層の乾燥固結したシルト質砂はとても固く、ハンマーでたたいても容易には崩れないが、湿潤状態ではやわらかく、やや粘性を持ち整形しやすいため当地で使われるレンガの原料となっている。

2.2 地震活動の概要

バム市北方、ケルマン市との間に位置する Gowk 断層、Shahdad 断層周辺で多くの地震が記録されているが (図 3)、バム断層付近では長年にわたり大きな地震は記録されてこなかった。しかし、中小の地震が発生していたことは、アルゲ・バムの補修を記した記録から推測される⁹⁾。バム断層はバム市の東約 2km に位置し、比高約 20m の断層崖が南北に走る右横ずれが卓越する逆断層である。また、断層に対し西に位置するバム市は上盤側、東に位置するバラバット市は下盤側に位置している。断層崖には断層線を横切る東西方向に雨水による浸食 (ガリー浸食) が多く見

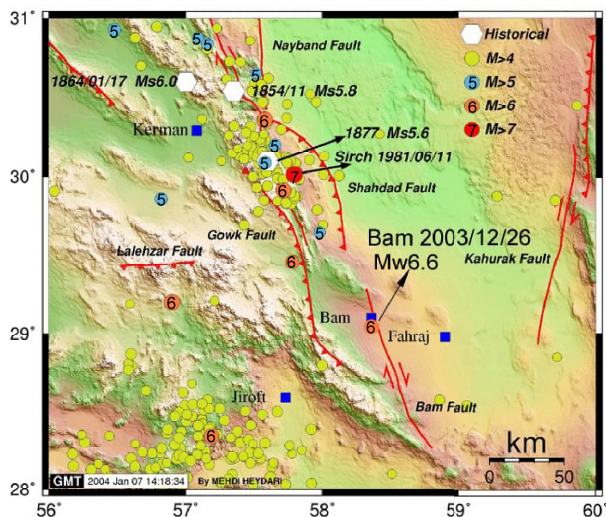


図 3 バム市周辺の地震活動 (文献1) に加筆

られる。これらの浸食谷の中には古いカナート (地下水路) が崩れたものもあるとのことである。

2.3 震源近傍の地震動特性と被害分布

イランでは BHRC (Building and Housing Research Center) が、イラン強震ネットワーク (Iran Strong Motion Network: ISMN) を整備しており多くの強震記録が得られている。図 4 に示す強震波形¹⁰⁾ (地震計: SSA-2) は震央距離 14km で観測されたものであり、最大加速度は上下動で約 9.9m/s^2 、東西約 8.0m/s^2 、南北約 6.4m/s^2 の水平動が記録されている。震動の継続時間は約 10 秒、卓越振動数は約 6 から 7Hz であるが、1 から 2Hz の振幅も大きい。東西成分 (N82W) の約 17 秒付近に断層の破壊過程を反映したパルス状の波形が記録されている。また上下動の加速度振幅も非常に大きい、今回の建物被害について上下動と建物の構造特性との関連 (例えばドーム状の屋根や Jack-Arch 式屋根の上下動に対する耐震性) について考察した研究は少ない¹¹⁾。強震計はバム市庁舎 (2 階建て補強組積造: 半壊) の 1 階の机の下に設置されており落下物の影響はなかったが、17.98 秒から 18 秒の東西成分の波形に半波のパルスが記録されている (図 5)。振幅は小さいが、南北成分にも同様のパルスが見受けられる。BHRC の担当者の証言によると、このパルスは近くにあったロッカーの転倒によるものであると推測される。ただし、その振幅 (6.1m/s^2) は波形の最大振幅よりも小さい。

図 6 に示す水平動の加速度粒子軌跡は、17.475 秒付近で釣り針を横にしたような形を描き、西から東へ方向を変え

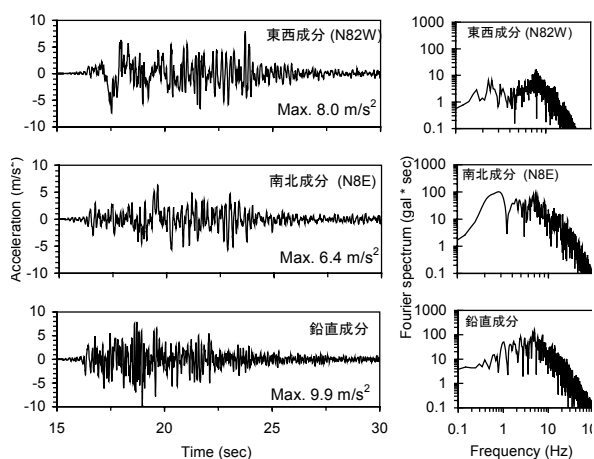


図 4 バム地震本震の加速度時刻歴¹⁰⁾

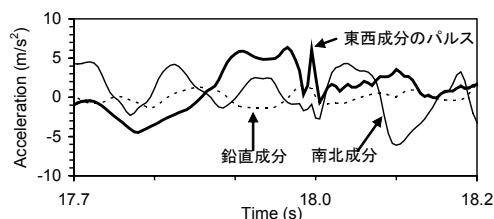


図 5 図 4 に示す時刻歴波形の 18 秒付近において東西成分に見られるパルス波形

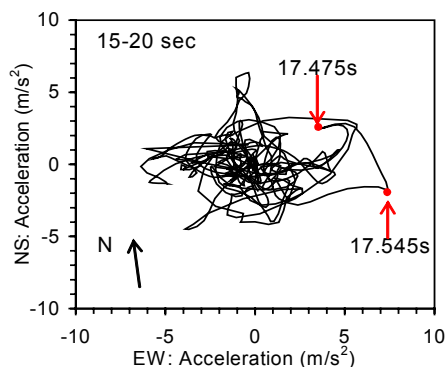


図 6 水平動の加速度粒子軌跡

ると同時に南へ大きく移動し 17.545 秒で最大加速度を記録している。また、現地調査における建物の倒壊方向の観察結果から、バム市街ではバム城を含め建物および塀の多くが東西方向に倒壊しており、特に市街中心部の被害の大きな地区では、建物の倒壊方向がほぼ一様に西向きであったことがわかっている。また、高さ約 20m の鉄筋コンクリート造の水タンクを支える柱には、鉄筋の座屈が西側、東側には引張りによるコンクリートのはく離が見られた¹²⁾。このこと、および図 6 に示す加速度粒子軌跡の卓越方向と図 4 の東西成分の卓越振動数が 1Hz 程度であることから、バム市内の建物に対して東西方向に大きな運動エネルギーが入力されたものと推測される。建物の倒壊方向は、入力地震動の卓越方向だけではなく建物の構造特性にも関係するが、本調査地域では固有周期の短い低層かつ剛な構造物が多く、そのため慣性力の作用方向（西向き）への倒壊が卓越したものと推測される。

次に断層からの距離と建物倒壊率の関係について考察する。図 7 に衛星写真判読から求められたバム市とバラバット市の建物倒壊率¹³⁾と第 1 次調査の際実施したアンケート震度

調査から求めた各観測点の気象庁震度階を示す^{14,15)}。同図より、倒壊率 80-100% の地区がバム断層とほぼ平行に位置し、その西側に倒壊率 20-50% の地区が位置している。一見すると断層から遠ざかるほど被害が減少する傾向にあるものと推察されるが、倒壊率 50-80% の地区の一部が倒壊率 80-100% の地区を分断していること、また、推定される震度階も上記の倒壊率にほぼ対応していることから、深部の地質構造の影響やサイト特性、建物強度の相違が倒壊率や震度に与えた影響も大きいものと考えられる。一方、断層を挟んで東側のバラバット市では、バム市と比較すると倒壊率はきわめて小さい。その後の調査研究から、今回の震源断層が地表に現れているバム断層ではなく、そこから西へ約 3.5km に位置する伏在断層であったことが明らかになっている^{4,16,17)}。したがって、震源域がバム市のほぼ直下に位置していたことが両市の建物倒壊率に大きな差を与えたものと考えられる。

3. バム市における屈折法弾性波探査結果

本節では、2005 年 9 月 23 日から 27 日にかけて、バム

表 1 本調査で弾性波探査を行った地点

Obs. Point		Latitude	Longitude
1	BHRC	N29°06'23.6"	E58°21'28.9"
2	Bridge No.1	N29°07'24.6"	E58°21'33.8"
3	Bridge No.2	N29°06'51.6"	E58°19'40.7"
4	Bridge No.3	N29°07'30.1"	E58°16'04.8"
5	Water tank	N29°06'23.6"	E58°21'09.9"
6	Mosque No.3	N29°05'08.3"	E58°21'47.2"
7	Mosque No.4	N29°06'09.9"	E58°21'26.2"
8	Mosque No.9	N29°06'08.4"	E58°19'00.1"
9	Telecom center	N29°06'01.9"	E58°22'10.3"
10	Aflatoonian Hospital	N29°05'37.2"	E58°19'05.2"

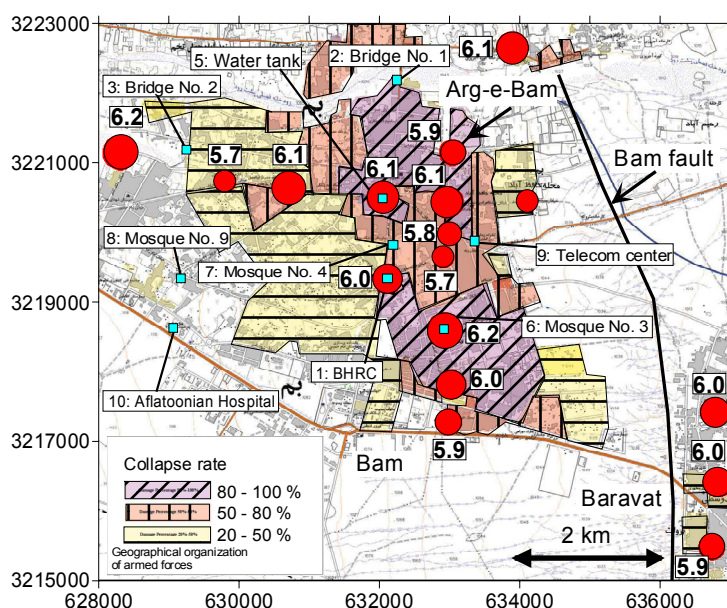


図 7 衛星写真判読による建物倒壊率¹³⁾と前回の調査におけるアンケート震度調査地点と推定される気象庁震度の分布（丸印と数字¹⁴⁾）、四角印は今回調査の観測点の位置を示す。

市内において実施した屈折法弾性波探査結果を示す。屈折法探査地点は表 1 及び図 8 (文献 17) に加筆) に示す 10 地点である。

3.1 屈折法弾性波探査

屈折法弾性波探査には、3 成分超小型サイズモグラフ (OYO : McSEIS-3) 1 台、ジオフォン 3 台 (間隔 7.3m)、起振用ハンマー (柄の長さ約 30cm) と板各 1 個 (現地調達) を用いた。試験実施状況を写真 1 に示す。計測は以下に示す手順で行った (図 9)。

STEP1 : G1 から 5.2m (任意に設定) 離れたところから起振

STEP2 : 起振点 S0 を G2 に移動し起振

STEP3 : 起振点 S0 を G3 から 5.2m 離れたところに移動し起振。STEP1 との往復走時を取得する。

STEP4 : G3 を起点に G1 と G2 を移動し、起振点 S0 を STEP1 の地点に戻し起振 (図 9 : STEP4-5)。

STEP5 : 起振点 S0 を STEP4 で移動した G1 から、
5.2m+7.3m+7.3m=19.8m 離れた位置に移動、STEP4 との往復走時をとる。

したがって、ひとつの観測点において、同じ起振点一観測点距離を持つ計測データ数は、往復観測による 2 点と、上記各ステップで重複して計測した 2 点の計 4 点である。P 波速度の算定には以上 4 点の記録を用いた。ただし、次章で示す弾性波探査の時刻歴波形はこれらのうちの 1 点であり、4 点の平均ではない。

走時曲線が得られれば、弾性波速度が得られるので、以

下の式(1)により、第 1 層の層厚が推定できる^{18, 19)}。

$$d_1 = \frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}} \quad (1)$$

ここで、 d_1 : 第 1 層の層厚、 x_0 : 臨界距離 (起振点から走時曲線が折れ曲がる点までの水平距離)、 v_1 及び v_2 : 第 1 層及びその下層の弾性波速度である。また、水平 2 層構造の場合は、以下の式(2)により第 2 層の層厚を推定することができる^{18, 19)}。

$$d_2 = \frac{x_0'}{2} \sqrt{\frac{v_3 - v_2}{v_3 + v_2}} - \frac{d_1(v_2\sqrt{v_3^2 - v_1^2} - v_3\sqrt{v_2^2 - v_1^2})}{v_1\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \quad (2)$$

ここで、 d_2 : 第 2 層の層厚、 x_0' : 臨界距離 (起振点から走時曲線の第 2 折れ曲がり点までの水平距離)、 v_3 : 第 2 層の下層の弾性波速度である。



写真 1 弾性波探査実施状況

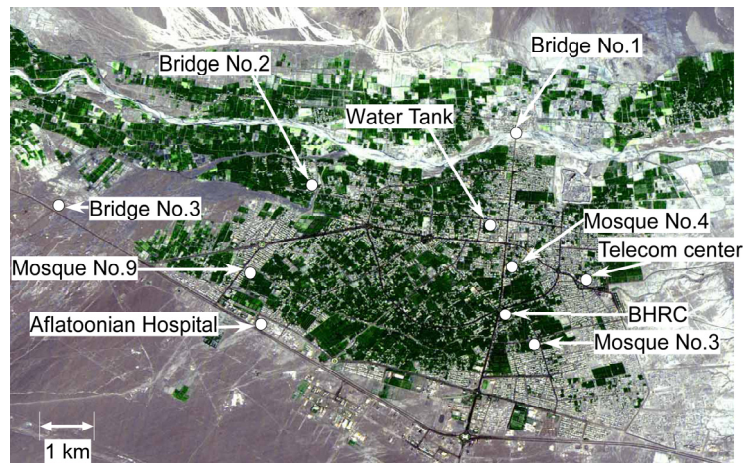


図 8 バム市の衛星写真と今回の調査地点 (文献17)に加筆)

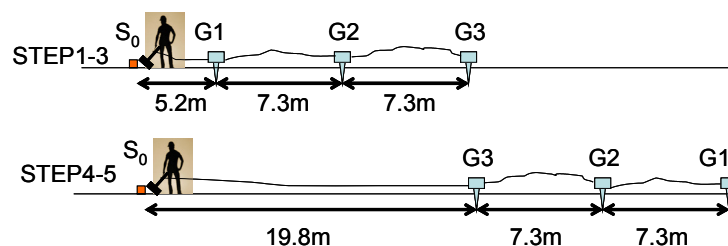


図 9 本調査で行った弾性波探査の起振点-感振点間距離

表 2 各観測点で推定される P 波速度と層厚

Obs. Point	Velocity (m/s)			Layer thickness (m)	
	V1	V2	V3	D1	D2
1	355	650	—	1.4	—
2	230	663	—	1.8	—
3	159	325	1,000	1.52	4.08
4	306	—	—	—	—
5	278	493	—	1.37	—
6	227	356	500	1.22	2.23
7	380	660	—	1.35	—
8	426	1,444	—	1.9	—
9	300	719	—	1.67	—
10	601	796	1,477	0.97	3.02

▲ 1. BHRC
 ■ 3. Bridge 2
 ◆ 5. Water Tower
 ▲ 7. Mosque4
 ◆ 9. Telecom Center
 ◆ 2. Bridge 1
 ● 4. Bridge 3
 ◆ 6. Mosque 3
 ● 8. Mosque9
 × 10. Aflatoonian Hospital

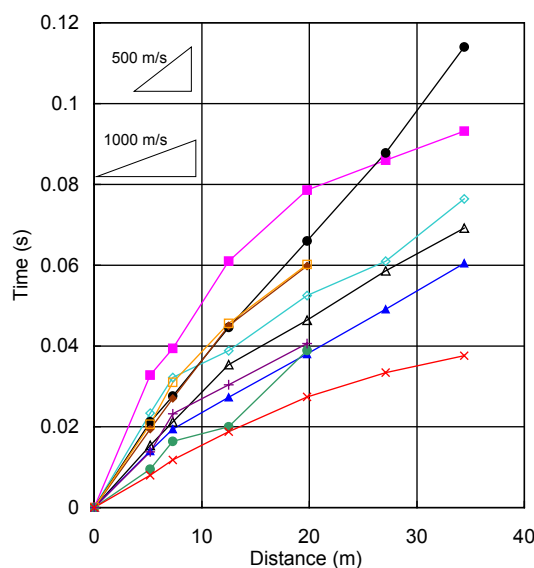


図 10 本調査により得られた10観測点の走時曲線

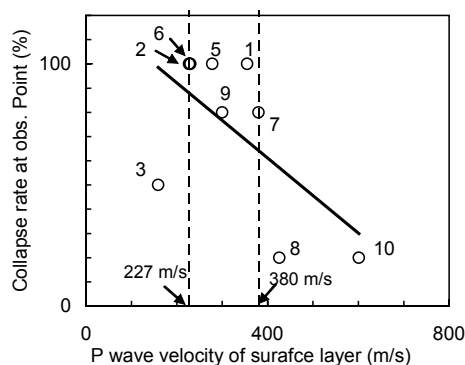


図 11 本調査で得られた P 波速度と倒壊率の関係。図中の番号は表1に示す調査地点に対応。

4. 調査地点の弾性波速度と地層構造

全調査地点における走時曲線をまとめて図 10 に、走時曲線から読み取った P 波速度と層厚をまとめて表 2 に示す。ここで、 v_1 、 v_2 、 v_3 は、それぞれ第 1 層、第 2 層、第 3 層の P 波速度、 d_1 、 d_2 はそれぞれ第 1 層、第 2 層の層厚であ

る。第 1 層の P 波速度について、最小値は観測点 3 において 159m/s、最大値は観測点 10 において 601m/s であった。第 2 層については、最小値は観測点 3 において 325m/s、最大値は観測点 8 において 1,440m/s であった。本調査ではジオフォン 3 台と小型の起振用ハンマーを用いたため、深部の地下構造を推定することはできず、最大深さが 5.6m (観測点 3) の地表ごく近傍の地層構造の推定にとどまった。しかし、図 11 に示すように建物倒壊率との関連で考察すると、倒壊率が比較的大きな観測点 5 (Water tower) や 6 (Mosque No. 3) については、第 1 層の P 波速度は、倒壊率のやや小さい観測点 7 (Mosque No. 4) や、倒壊率の小さい 8 (Mosque No. 9)、10 (Aflatoonian Hospital) のそれよりも小さい。同図からは、第 1 層の P 波速度約 400 m/s が倒壊率の大きく変化する境界値となっていることがわかる。ただし、倒壊率分布や震度分布は、深部の地質構造とも深くかかわっている可能性もあるため (例えばエッジ効果など)、上で述べた表層の P 波速度や層厚ですべてが説明されるわけではない。しかし、浅部に固い地盤が存在する場合には、表層のごく近傍の地盤特性が震度に大きな影響を与える可能性もある。以下では調査地点ごとに観測結果を示す。

(1) 観測点 1 : BHRC

当調査地点では、BHRC によってボーリング調査が行われており、地下 30m までの地質構造と P 波、S 波速度が得られている⁸⁾。このボーリングの位置は、2004 年 12 月 26 日の本震で強震記録 (図 4) が得られたバム市庁舎の敷地内である。図 12(a) に土質分類、同図(b) にダウンホール法による PS 検層結果、同図(c) に標準貫入試験結果を示す。

図 12(a) に示す土質分類によると、表層の地質には河床堆積物が多く含まれていることがわかる。調査結果の詳細図⁸⁾ から、地表面付近には厚さ約 0.2m の表土があり、その下 GL-2.5m 付近までは約 5% の細粒分を含むやや湿った礫混じりシルト質砂、GL-4.3m 付近までは、約 60% の礫と約 30% の砂を含むやや湿った粘土混じり砂質礫、GL-7.5m 付近までは約 70% の砂と 20% 程度の礫分を含むシルト混じり礫質砂、GL-14.5m 付近までは 70% の砂分、25% 程度の礫分を含むやや湿った礫質砂が卓越している。GL-14.5m から GL-30m までは、60-70% 程度の砂分に加え、5-10% 程度小石を含む湿潤な礫質砂と砂分の卓越したシルト質砂の互層になっている。

地下水位は明示されていないが、17m 以深の土層観察記録に "wet" とあるので、このあたりではないかと推察される。図 12 (a) に示す土層単位と同図(b) に示した速度記録とから、表層から GL-30m にかけて、S 波速度は 100m/s から 700m/s へとほぼ連続して増加していることがわかる。一方、P 波速度については、表層の約 200m/s から GL-22m の 1,200m/s までほぼ単調に増加しているが、GL-22m 以深においてやや頭打ちあるいはやや減少する傾向が見られる。

図 12(c) に示す標準貫入試験結果によると、S 波速度が

349m/s 以上となる GL-4.5m 以深の土層において、 N 値 50 以上を示している。図 13 に示す既往の N 値と S 波速度の関係から得られる以下の回帰式²⁰⁾

$$V_s = 91N^{0.337}$$

を用いて N 値を逆算して求めたところ 54 となった。このことから、今回調査を行った地点における土質に対しても、上で用いた回帰式の適用性が示された。

観測点 1 (BHRC) において観測された時刻歴波形 (図 14) と走時曲線 (図 10) より、第 1 層の層厚 1.40m, P 波速度 355m/s, その下部地盤の P 波速度は 650m/s であると推定される (表 2)。参考として、この結果を図 12(b)にあわせて示す (▲印)。 P 波速度 (355 m/s) は、 PS 検層結果 (264 m/s) よりもやや大きな値となっている。ただし、今回の屈折法探査地点と BHRC による PS 検層地点とは約 200m 離れていること、また屈折法探査地点が住居跡のため整地されており感振器のピンが容易には刺さらないほど締固まった地盤であったことなどから、屈折法探査結果がローカルな表層地盤特性を反映している可能性がある

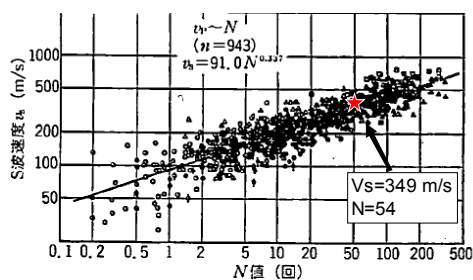


図 13 N 値と S 波速度の関係²⁰⁾

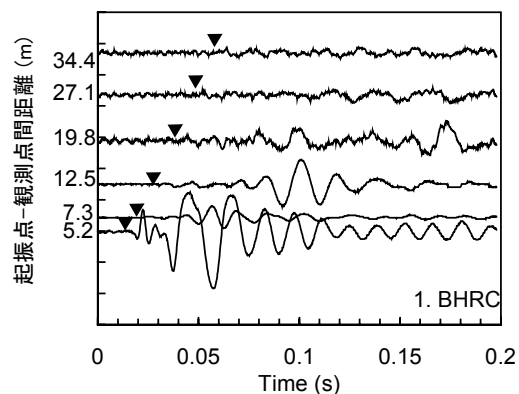


図14 弾性波探査により観測された時刻歴波形(BHRC)

ため、両者の結果を単純に比較することはできない。

(2) 観測点 2 : Bridge 1 (写真 2)

当地点は、アルゲバムの北に位置する Posh-e-rud 川を渡河する橋長 157m, 支間長約 12m の 14 径間単純 RC 床版橋付近の川原である。弾性波探査は両岸からほぼ等距離の地点で、小石、砂礫交じりの堆積物上で行った。



写真 2 観測点2: 弾性波探査実施地点(Bridge 1)

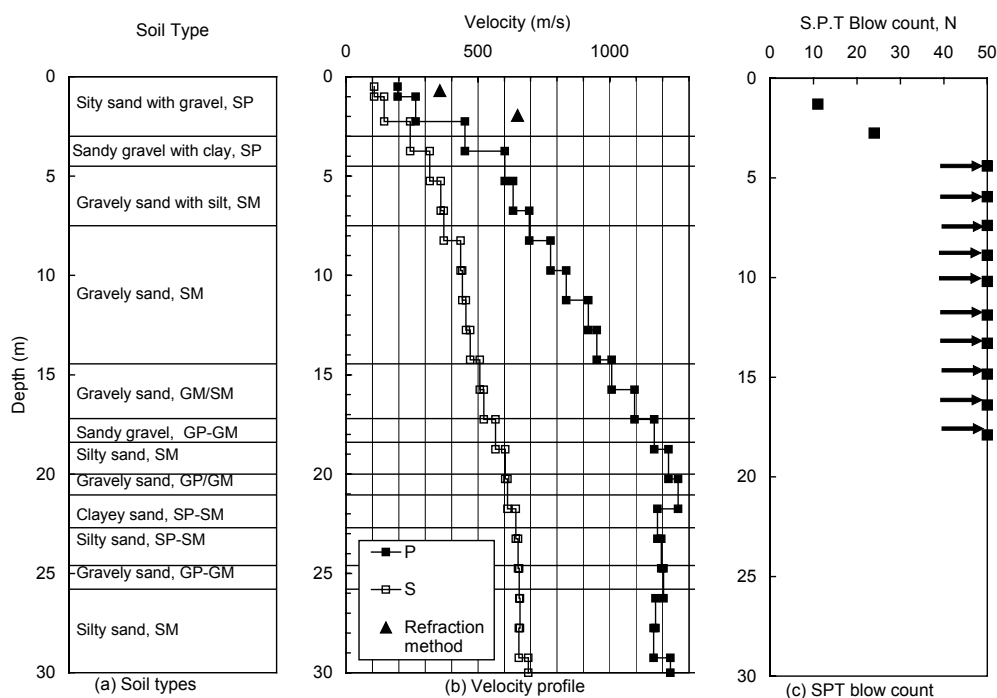


図 12 バム市庁舎におけるボーリング調査結果 : (a)土質分類, (b) P S 波速度, (c) SPT - N 値⁹⁾

本調査により観測された時刻歴波形（図 15）と走時曲線（図 10）から推定される第 1 層の層厚は 1.80m, P 波速度は 230m/s, その下部層の P 波速度は 663m/s である（表 2）。既往の調査結果¹⁾から、このあたりの基岩は浅いところに存在すると推定されているが、本調査では、それと推定されるほどの大きな P 波速度は得られなかった。

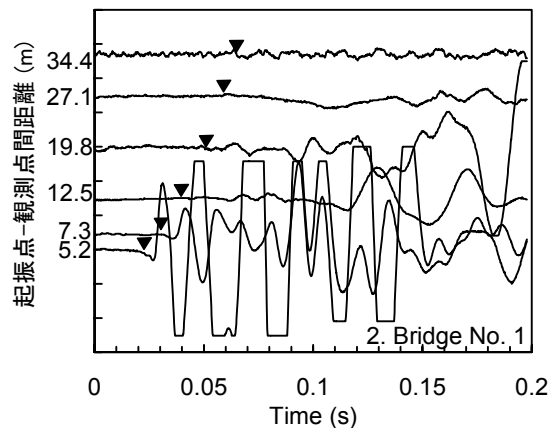


図15 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Bridge No. 1)

(3) 観測点 3 : Bridge 2 (写真 3)

当地点は、バム市西部に位置し、60 年ほど前に河道を北上させるために設けられた水路にかかる橋長 20.4m, 支間長 6.6-6.9m の 3 径間単純 RC 床版橋付近の河床である。水路兩岸はほぼ垂直に切り立った崖となっている。弾性波探査は橋梁南側の河床中央部のやや柔らかい堆積物上において実施した。

本調査により観測された時刻歴波形（図 16）と走時曲線（図 10）より、推定される第 1 層の層厚は 1.52m, P 波速度は 159m/s, 第 2 層の層厚は 4.08m, P 波速度は 325m/s, その下部層の P 波速度は 1,000m/s である（表 2）。第 3 層の P 波速度が大きく、浸食により基盤が浅いところに位置するものと推定される。



写真 3 観測点3：弾性波探査実施地点(Bridge 2)

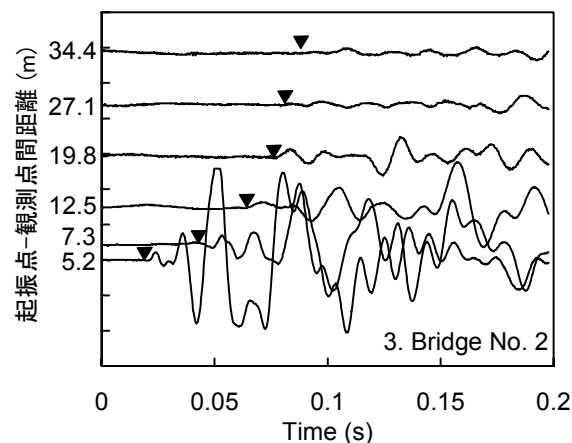


図16 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Bridge No. 2)

(4) 観測点 4 : Bridge 3 (写真 4)

当地点は、バム市の西方、ケルマンとバムを結ぶ主要道路にかかる橋長 105m, 支間長 14.5-15.8m の 7 径間の橋梁である。弾性波探査は、河床中央からやや左岸よりの河床堆積物上で、測線を上流から下流方向に張り実施した。

本調査により観測された時刻歴波形（図 17）と走時曲線（図 10）より、本地点には明瞭な第 1 折れ曲がり点が見られないため、第 1 層の P 波速度 (306m/s) のみが推定された。おそらく河床堆積物が厚く堆積しているものと思われる。



写真 4 観測点4：弾性波探査実施地点(Bridge 3)

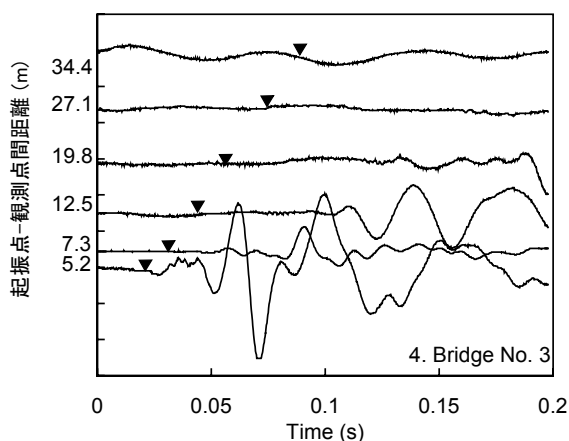


図17 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Bridge No. 3)

(5) 観測点 5 : Water tank (写真 5)

当地点は、バム市内中心部で最も被害の大きかった地域である。地震後の調査では給水塔の西側脚部に座屈、東側脚部に引張りによるコンクリートの剥離が見られたものの倒壊には至っていなかった。しかし、今回の調査時には撤去のため解体されていた。弾性波探査は、給水塔の西側約 5m 付近から北西-南東方向に張った測線に沿って実施した。

本調査により観測された時刻歴波形(図 18)と走時曲線(図 10)から推定される第 1 層の層厚は 1.37m, P 波速度は 278m/s, その下部層の P 波速度は 493m/s である(表 2)。



写真 5 観測点5：弾性波探査実施地点(Water Tank)

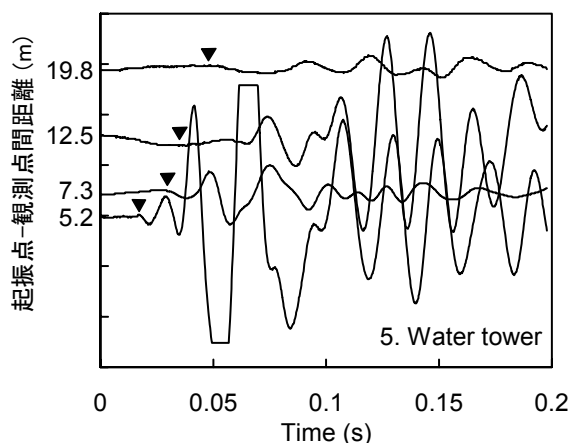


図18 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Water tower)

(6) 観測点 6 : Mosque 3

当地点は、バム市中央からやや東に位置する無補強組石造の倒壊率が大きかった地点である。モスクが位置する地域の建物倒壊率は 100% に近くバム市南部で最も被害の大きかった地点である。RC 構造の建物も損傷しているものが多く、解体、再構築されるものが多い。弾性波探査は、モスク周辺に側線が張れるほど開けた場所が見つからなかったこと、また交通量が多かったため、目測で 500m ほど南の公園内で実施した。公園の周囲を取り囲む塀による

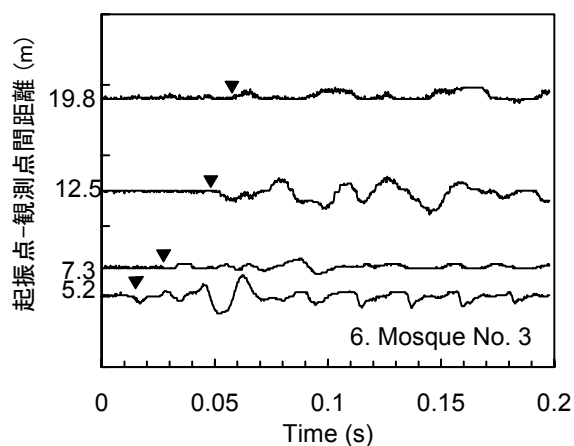


図19 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Mosque No. 3)

波動の反射が懸念されたが、得られた記録にはその影響は見られず、初動を読み取ることができた(図 19)。

本調査により観測された時刻歴波形(図 19)と走時曲線(図 10)から推定される第 1 層の層厚は 1.22m, P 波速度は 227m/s, 第 2 層の層厚は 2.23m, P 波速度は 356m/s, その下部層の P 波速度は 500m/s であった(表 2)。

(7) 観測点 7 : Mosque 4 (写真 6)

当地点は、バム市内中央に位置し、図 6 に示す倒壊率 50-80% の地域である。大通りに面した商店の損傷程度は比較的軽微である。これは、これらの商店が鉄骨造であるため軽いこと、大通りが南北に走っているため開口部が東西に向いており、東西に卓越する今回の地震動に対して抵抗できたことなどが原因であると考えられる。この地点のすぐ隣にバム市で最も大きなモスクが立っている。このモスクには高さ 41m の 2 本の塔が立っているが、この塔と共にとともにモスクは倒壊せずに残っている。弾性波探査は、モスクの北側のさら地で実施した。測線は東西方向である。

本調査により観測された時刻歴波形(図 20)と走時曲線(図 10)から推定される第 1 層の層厚は 1.35m, P 波速度は 380m/s, その下部層の P 波速度は 660m/s である(表 2)。



写真 6 観測点7：弾性波探査実施地点(Mosque 4)

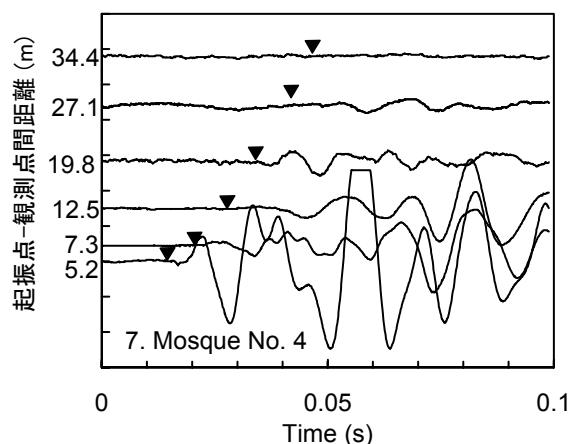


図20 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Mosque No. 4)

(8) 観測点 8 : Mosque 9

当地点は、バム市西部に位置し、本調査時点における建物倒壊率が約 60-70%程度の地区である。弾性波探査は、モスク裏手のナツメヤシの畑の中で南北に側線を張り実施した。

本調査により観測された時刻歴波形（図 21）と走時曲線（図 10）から、推定される第 1 層の層厚は 1.90m, P 波速度は 426m/s, その下部層の P 波速度は 1,444m/s である（表 2）。比較的浅部に P 波速度が大きな層が現れる結果となったが、畑を囲む塀の影響が懸念される。

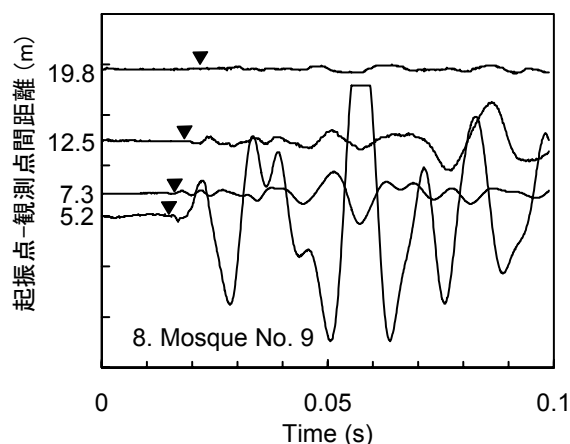


図21 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Mosque No. 9)

(9) 観測点 9 : Telecom Center (写真 7)

当地点は、図 6 に示されるバム市東部の倒壊率 80-100% の地域を二分する倒壊率 50-80%の領域に位置する。弾性波探査は Telecom Center 裏手のさら地において、北西-南東方向に測線を張り実施した。Telecom Center 前の道路に沿って 60 年ほど前には川が流れていたことが証言により判明している。当調査地点はその道路から北に少し坂を上った地点である。

本調査により観測された時刻歴波形（図 22）と走時曲線（図 10）から推定される第 1 層の層厚は 1.67m, P 波速度は 300m/s, その下部層の P 波速度は 719m/s である（表 2）。



写真 7 観測点9：弾性波探査実施地点(Telecom Center)

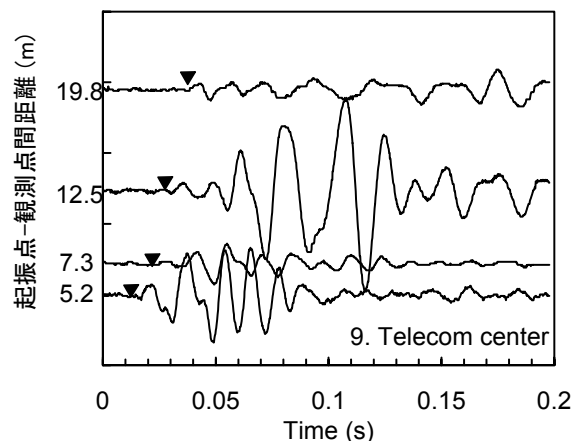


図22 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Telecom Center)

(10) 観測点 10 : Aflatoonian Hospital (写真 8)

当地点は、バム市南西部に位置し、ケルマン-バム間を結ぶ主要道路に近い。弾性波探査は、病院北側のさら地において行った。地表には小石混じりの砂礫が散乱しているが、表面は非常に硬い。掘削断面から観察される表層地質（写真 9）から、表層約 20cm が客土により整地されていることがわかる。その下部は、バム市内において共通して見られる砂礫混じり砂やシルトの卓越した地層となっている。

本調査により観測された時刻歴波形（図 23）と走時曲線（図 10）より、推定される第 1 層の層厚は 0.97m, P 波速度は 601m/s, 第 2 層の層厚は 3.02m, P 波速度は 796m/s, その下部層の P 波速度は 1,477m/s である（表 2）。GL-4m



写真 8 観測点10：弾性波探査実施地点(Aflatoonian Hospital)



写真9 弾性波探査実施地点表層の地質(Aflatoonian Hospital)

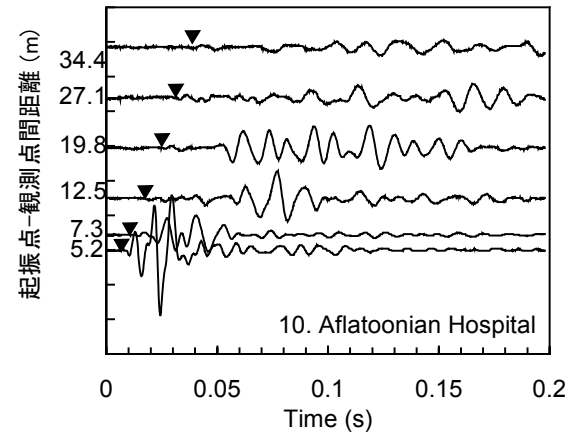


図23 弾性波探査により観測された時刻歴波形 (Aflatoonian Hospital)

において比較的大きな P 波速度となっている。

5. 表層の P 波速度構造の違いが地表面加速度に与える影響

本節では、BHRC（観測点 1）におけるボーリング調査結果に基づき GL-29.25m における本震の加速度記録を求め、それをを用いて、表層の P 波速度の違い、すなわち表層地盤の硬軟が地表面加速度に与える影響を調べ、建物倒壊率との関連について検討する。

5.1 解析方法

観測点 1 において詳細なボーリング調査結果及び本震の地表面加速度記録が得られていることから、等価線形解析により、ボーリング調査の最深部である GL-29.25m における加速度記録の推定を行う。地表面の加速度記録としては、図 4 に示すバム地震本震の東西成分を用いる。分割した層ごとの地盤パラメータとしては、表 3 に示す値を用いる。同表に示す S 波速度とせん断弾性係数の深さ方向の分布を図 24 (a)と(b)に示す。また、全層について図 25 に示す密な砂に対するせん断弾性係数と減衰率のひずみ依存曲線を仮定する²¹⁾。

次に、得られた GL-29.25m における加速度記録を入力と

表 3 等価線形解析に用いた地盤パラメータ

	Layer Number	Thickness of layer (m)	Maximum shear modulus G_{max} (MPa)	Total unit weight (kN/m^3)	Shear wave velocity (m/sec)
Surface	1	0.8	22.5	19.66	106
	2	↑	41.6		144
	3		118.3		243
	4		202.7		318
	5		258.3		359
	6		275.8		371
	7		377.5		434
	8		388.0		440
	9		414.9		455
	10		442.7		470
	11	1.5	515.2	↓	507
	12	↓	546.1		522
	13		642.0		566
	14		731.1		604
	15		750.6		612
	16		828.6		643
	17		852.0		652
	18		865.1		657
	19		870.3		659
	20		859.8		655
	21		956.9		691

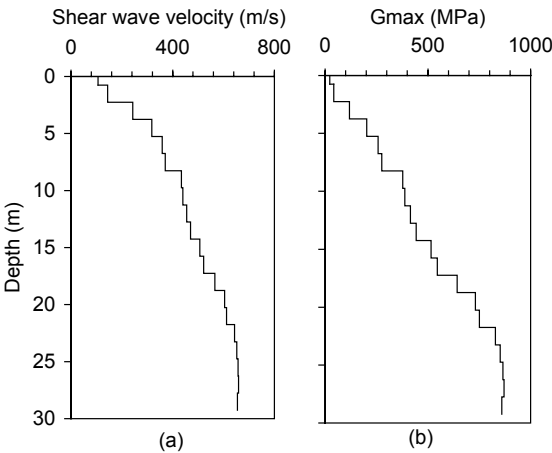


図 24 解析に用いた(a) S 波速度構造と(b)せん断弾性係数

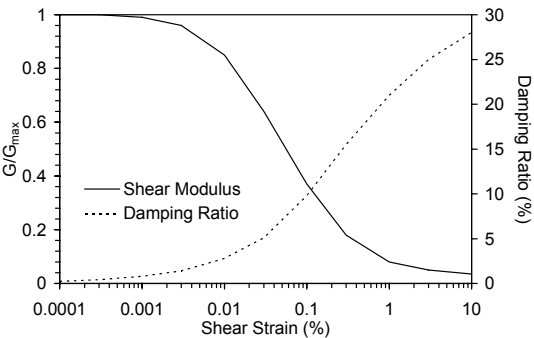


図 25 解析に用いたせん断弾性係数と減衰率のひずみ依存曲線²¹⁾

して、GL-3.8m 以浅の P 波速度を一律 380m/s と大きくした場合（S 波速度は 203m/s）と、一律 227m/s と小さくした場合（S 波速度は 121m/s）とについて、等価線形解析を行う。ここで、表層の P 波速度 380m/s は観測点 7、227m/s は観測点 6 における弾性波探査結果から得られた値であ

る(表2)。また、図12(c)より N 値が約4m以深で50以上となること、さらに観測点1, 6, 7が半径1km以内に位置しているため3.8m以深の地盤構造を均質であると仮定してGL-3.8m以浅のP波速度を変化させる。ただし、P波速度を変化させる層厚については、単純化のため一律3.8mとする。解析では、ポアソン比0.3を仮定し、設定したP波速度に対応するせん断弾性係数を求めることとする。なお、使用する等価線形プログラムはEERA(Equivalent linear Earthquake site Response Analysis)²²⁾である。本プログラムはSHAKE²³⁾をMS-Excel上で操作できるように改良したものであり、SHAKEと同一の結果が得られることが示されている。

5.2 解析結果

解析により得られたGL-29.25mにおける加速度波形を図26(c)に示す。また、同図(a)には、GL-3.8m以浅のP波速度が大きい場合、同図(b)には小さい場合の加速度時刻歴を示す。加速度振幅の最大値は、P波速度が大きい場合には 6.0m/s^2 、小さい場合には 5.9m/s^2 といずれも増幅傾向にあるが、増幅率は同程度である。また、同図(b)に示すように表層のP波速度が小さい場合には、波形に含まれる高振動数成分が少なくなっている。これは、地盤の非線形化による履歴減衰の影響を反映したものである。

次に、フーリエ振幅についてみると(図27)、表層のP波速度が 380m/s の場合には5から6Hz付近で増幅傾向が見受けられる。一方、P波速度が 227m/s の場合には、2から4Hz付近の増幅が著しい。次に、図27に示す地表面加速度のフーリエ振幅を入力のもので割って求めた伝達関数(図28)より、P波速度が 380m/s の場合、10Hz付近まではほぼ1から2倍の増幅率になっているのに対し、P波速度が 227m/s の場合には、3Hz付近に最大値約3.5倍の明瞭なピークが現れている。イランにおける建築物の固有振動数と建物高さとの経験的な関係²⁴⁾(図29)より、3Hz付近に固有振動数を持つのは8から13mの高さの比較的高階層の建物であり、今回の地震で大きな被害を受けた低中層の建物のそれは8から10Hz程度であったと推測される。倒壊率分布には、その地域が開発された年代、築年数や形式、深部の地質構造などさまざまな要因が考えられるため、建物倒壊率に表層の地盤特性が第一義的な影響を与えたかどうかは明らかではない。しかし、本研究で対象としたバム市のような地質構造を持つ場合には表層の地盤物性が振動特性に大きな影響を与えることが確認された。

6. まとめ

2003年12月26日にイラン南東部バム市近郊で発生した地震(M_w 6.6)後の調査において、市内各地点での震度や被害分布が異なることが明らかとなった。そこで、再度現地調査として屈折法による弾性波探査を行い、表層の地盤振動特性と建物倒壊率や震度との関係を調べることとした。本報告の内容をまとめると以下のとおりである。

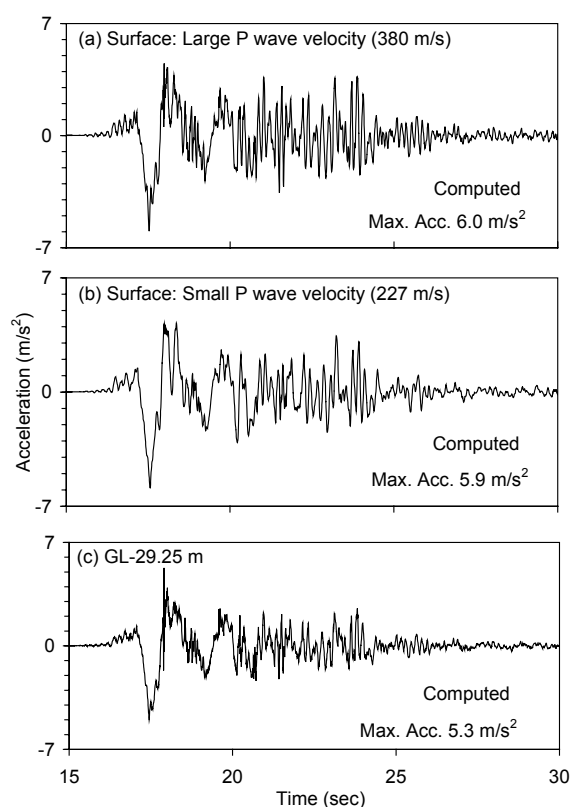


図26 表層と入力加速度時刻歴：(a) 表層GL-3.8m以浅のP波速度を 380m/s とした場合の表層の加速度時刻歴、(b) 227m/s とした場合、(c) 入力に用いたGL-29.25mにおける加速度時刻歴

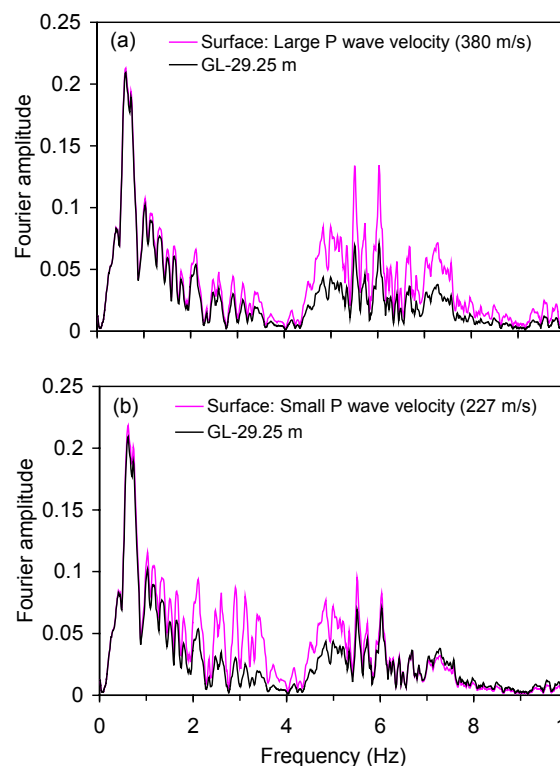


図27 フーリエ振幅：(a) 表層GL-3.8m以浅のP波速度を 380m/s と仮定した場合、(b)同P波速度を 227m/s とした場合

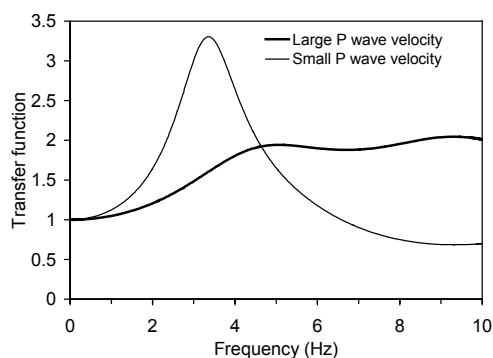


図 28 表層 GL-3.8m 以浅の P 波速度構造が異なる場合の伝達関数の比較

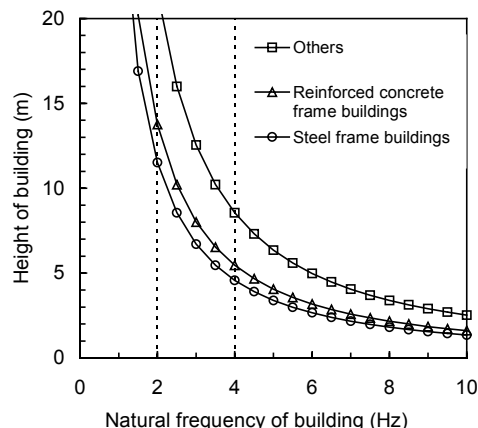


図 29 イランにおける建物の固有振動数と建物高さとの経験的な関係²⁴⁾

バム市における 10 地点において屈折法による弾性波探査を行った。本調査では、用いたジオフォンのわずか 3 台と、起振用ハンマーが小型であったため、深部の地下構造を推定するにはいたらず、最大深さが 5.6m (Bridge2) までの地表付近の地層構造の推定にとどまった。

本調査で得られた P 波速度と、直線距離で約 200m 程度離れた地点で別途実施された PS 検層結果とを比較すると、本調査で得られた P 波速度のほうがやや大きな値となった。ただし、今回の屈折法探査地点と PS 検層地点とは約 200m 離れていることなどから、屈折法探査結果がローカルな表層地盤特性を反映している可能性があるため、両者の結果を単純に比較することはできない。

BHRC におけるボーリング調査結果では、GL-4.0m 以深では N 値が 50 となっている。その他の調査地点においても、Bridge3 を除いて比較的浅いところで P 波速度が大きくなっていることから、今回観測を行った地点の地盤は一般的に良好な地盤であるといえる。

アンケート震度から推定される震度および建物倒壊率の大きなところでは P 波速度は小さいのに対し、震度および倒壊率の小さなところでは、比較的大きな P 波速度が観測された。浅部に N 値 50 以上の固い地盤が存在する場合には、表層のごく近傍の地盤特性が震度に大きな影響を与える可能性もある。このことについて検討するために、バム市庁舎における詳細なボーリング調査結果に基づきボーリング下端での本震の加速度記録を求め、それを入力に

用いて表層 (GL-3.8m 以浅) の P 波速度の違い、すなわち表層地盤の硬軟が地表面加速度に与える影響を調べ、建物倒壊率との関連について検討した。その結果、表層の P 波速度が小さい場合には、2 から 4Hz が増幅され、P 波速度が大きい場合には、5 から 7Hz 付近が増幅されることがわかった。イランにおける建築物の固有振動数と建物高さとの経験的な関係より、3Hz 付近に固有振動数を持つのは 8 から 13m の高さの比較的高階層の建物であり、今回の地震で大きな被害を受けた低中層の建物のそれは 8 から 10Hz 程度であったと推測される。倒壊率分布には、その地域が開発された年代や深部の地質構造などさまざまな要因が考えられるため、表層の地盤特性が第一義的な影響を与えたかどうかは明らかではない。しかし、本研究で対象としたバム市のように比較的浅い位置に硬い地盤が存在する場合には、表層の地盤物性が振動特性に大きな影響を与えることが確認された。次のステップとしては、それと建築物の固有周期との観点から倒壊原因を明らかにし、途上国における合理的な耐震対策を提案する必要がある。

謝辞

本調査は、平成 17 年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究 B (課題番号 17404007) (研究代表者：幸左賢二 九州工業大学教授) の助成金を受けて実施された。

参考文献

- 1) IIEES: http://www.iiees.ac.ir/English/Bam_report_english.html, 2003.
- 2) 吾妻崇：活断層研究センター, <http://unit.aist.go.jp/actfault/katsudo/news/no.33/azuma/topics02.html>, 2004.
- 3) Yamanaka, Y.: Seismological Note: No. 145, Earthquake Information Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/EIC145.html, 2003.
- 4) Suzuki, S., Aghda, S. M. F., Nakamura, T., Matsushima, T., Ito, Y., Sadeghi, H., Maleki, M., Gandomi, A. J. and Hosseini, S. K.: Temporal seismic observation and preliminary hypocenter determination of aftershocks of the 2003 Bam earthquake, Southeastern Iran, Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol. 79, No. pp. 37-45, 2004.
- 5) Ghafory Ashtiany, M.: Bam earthquake of 05:26:26 of 26 December 2003, Ms6.5, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Special Issue on Bam Earthquake, Vol. 5, No. 4 and Vol. 6, No. 1, pp. 1-3, 2004.
- 6) IFRC: One year later, memories still haunt survivors of the Bam earthquake, International Federation of Red Cross And Red Crescent Societies, 2004.
- 7) 幸左賢二(研究代表者): イラン・バム地震(2003 年発生)詳細調査-中間報告書, 平成 17 年度科学研究費補助金 (基盤 B : 課題番号 17404007), 2005.
- 8) Tabatabaei, S. H.: Geotechnical studies of Bam, BHRC, Personal communication, 2005.
- 9) Berberian, M.: The 2003 Bam urban earthquake: A predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut block, Southeast Iran, Earthquake Spectra, EERI, Vol. 21, No. S1, pp. S35-S99, 2005.
- 10) BHRC: バム市庁舎における強震記録, 2003.

- 11) Mahmoud, R. M.: Performance of building roofs in the 2003, Bam, Iran, earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. S1, pp. S411-S424, 2005.
- 12) Kosa, K. and Hakuno, M.: Damage to civil infrastructures, JSCE/JAEE Reconnaissance Report on the December 26, 2003, Bam Earthquake, Iran, pp. 75-80, 2004.
- 13) National Cartographic Center of Iran: Bam earthquake damage map, 2003.
- 14) Tobita, T., Miyajima, M., Fallahi, A., Alaghebandian, R. and Ghayamghamian, M. R.: Seismic intensity estimation through questionnaire survey and collapse rate of various building types of the 2003 Bam, Iran, Earthquake, *Earthquake Spectra*, EERI, Accepted, 2007.
- 15) Miyajima, M., Tobita, T., Fallahi, A. and Alaghebandian, R.: Questionnaire survey and microtremor measurements in stricken areas of the 2003 Bam earthquake, Iran JSCE/JAEE Reconnaissance Report on the December 26, 2003, Bam Earthquake, Iran, Vol. No. pp. 13-22, 2003.
- 16) Wang, R., Xia, Y., Grosser, H., Wetzel, H.-U., Kaufmann, H. and Zschau, J.: The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: Precise source parameters from satellite radar interferometry, *Geophysical Journal International*, Vol. 159, No. 3, pp. 917-922, doi:10.1111/J.1065-246X.2004.02476.x., 2004.
- 17) Talebian, M., Fielding, E. J., Funning, G. J., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parson, B., Priestley, K., Rosen, P. A., Walker, R. and Wright, T. J.: The 2003 Bam (Iran) earthquake: rupture of a blind strike-slip fault, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, No. 11, pp. L11611, doi:10.1029/2004GL020058, 2004.
- 18) 土と基礎の物理探査: 土質基礎工学ライブラリー21, 地盤工学会, 1981.
- 19) Stein, S. and Wysession, M.: *An Introduction to Seismology, Earthquake, and Earth Structure*, Blackwell Publishing, Oxford, 2003, 498pp.
- 20) N 値の話: N 値の話編集委員会, 理工図書, 1999.
- 21) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.*, Report EERC 70-10, 1970.
- 22) Bardet, J. P., Ichii, K. and Lin, C. H.: EERA: A computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits, A report to Department of Civil Engineering, University of Southern California, <http://geoinfo.usc.edu/gees>, 2000.
- 23) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE-A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley*, Report EERC 72-12, 1972.
- 24) BHRC: Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard No. 2800, 2nd Edition, Building and Housing Research Center, 1999, 129pp.

(2006. 8. 21 受付)

Surface ground condition and damage distribution after the 2003 Bam, Iran, Earthquake

Tetsuo TOBITA¹, Masakatsu MIYAJIMA², Kenji KOSA³, Yukio ARAI⁴, Kenji TASAKI⁵,
Hironori UNO³, Mohammad Reza Salamy⁶, Reza Alaghebandian⁷

1 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2 Department of Civil Engineering, Kanazawa University

3 Kyushu Institute of Technology

4 Tobishima Cooperation

5 Nippon Engineering Consultants CO. LTD

6 Public Works Research Institute

7 University of Tehran

Abstract

A destructive earthquake (M_w 6.6) occurred on December 26, 2003, at 7:56GMT (5:26AM local time), near the city of Bam located southeastern part of Iran. To investigate local site effects observed in the first reconnaissance, second investigation was conducted with seismic refraction method to study the relationship between surface ground condition and damage distribution. Results show that variation of P wave velocity structure near the ground surface may have some influence on damage distribution in the city.

Key words: Bam Iran Earthquake, Field investigation, December 26 2003, Refraction method, Velocity structure