

1 4. 2008 年中国四川地震における半壊レンガ造住宅の応答特性の変化について

王欣・正木和明・倉橋奨・呉浩

1. はじめに

周波数領域における構造物の応答は振動モードの組み合わせと認められる。しかし、周波数領域の解析は建物基礎と地盤の動的な相互作用を含めるために、上部構造の応答特性を上部構造—基礎—地盤のような建物システムの振動から分離することは難しい。一方、時間領域における建物上部構造（基礎固定建物）の応答は建物の基礎から入射するせん断波（S波）と建物の床や屋根等により反射された反射波の組み合わせと認められる⁽¹⁾、⁽²⁾。したがって、S波伝播速度は建物のせん断剛性と関係しているため、建物上部構造の応答特性や耐震性能等を検討するために、S波伝播速度から把握することは適切である。建物の中にS波伝播速度を求める手法はおおむね二つがある。一つはインパルス応答関数 (impulse response function) 法⁽²⁾、もうひとつは deconvolution 法である⁽³⁾。インパルス応答関数法によって、求めた中間層 k のインパルス応答関数は反射波の影響があるために、基礎から入射したインパルスは k 層までの伝播時間は読み取りにくい場合が多い。しかし、deconvolution 法を用いて、参照層は建物の屋上（屋上の記録がとれない場合は最上層⁽⁴⁾）の場合に、求めた各層の deconvolved wave は一つの uncausal 入射波と一つの causal 反射波の組み合わせなので、入射波と反射波の時間差の読み取りはよりしやすい。

本研究は deconvolution 法によって、常時微動記録を用いて、2008 年中国四川地震における半壊されたレンガ造建物の中に S 波の伝播速度の評価を行った。

2. 常時微動観測した半壊レンガ造建物

四川地震被害地域においてはレンガ造建物が数多く使われている。地震時には、レンガ造の住宅や学校などが甚大な被害を受けた⁽⁵⁾。レンガ造の建物の被害指数は他の構造形式比べ最も高かった⁽⁶⁾。著者たちは二つの半壊状態な 6 階建てレンガ造住宅（住宅 A、B）を研究対象として常時微動測定を行った。測定した住宅は地震前の観測記録はないために、本研究では同じ階数と構造の健全な住宅（C）を選んで、常時微動を観測した。半壊レンガ造住宅 A と B の S 波伝播速度を健全な住宅 C の S 波伝播速度と比較した。

Deconvolution 法によって S 波伝播速度を抽出するために、建物の屋上と計算層の同時観測記録が必要である。しかし、測定した住宅の屋上の記録を取りにくいために、微動観測は屋上を代わり、最上階（6 階）で行った。最上階の記録を参照して、deconvolved wave を求める有効性を著者たちは文献 [4] に議論した。本研究は二つの地震計を使い、建物の最上層（6 階）は固定観測、1 階～5 階は 3 時間毎で移動観測を行った。微動記録のサンプリングレイトは 200Hz である。測定した二つの半壊状態な 6 階建てレンガ造住宅 A、B と健全な建物 C はそれぞれ写真 1 から写真 3 に示している。写真 1 から見ると、建物 A のレンガ壁には X 形のひび割れが見える。写真 2 に示す建物 B の外観から見ると、2 階にはレンガが散らしたような非常に大きい被害が見える。

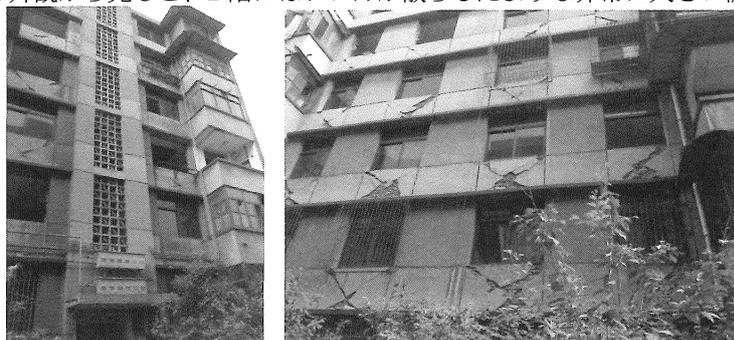


写真 1 半壊状態な 6 階建てレンガ造住宅 A



写真2 半壊状態な6階建てレンガ造住宅B



写真3 健全な6階建てレンガ造住宅C

3. S波伝播速度の解析結果

写真1から写真3に示している住宅A、B、Cの各階の deconvolved wave をそれぞれ図1から図3までに示している。図中 $t_{u, k}$ と $t_{d, k}$ はそれぞれ k 層の deconvolved wave の上昇波と下降波に対応する時間である。常時微動データのサンプリングレットは 200Hz なので、 $t_{u, k}$ と $t_{d, k}$ の精度は 0.05 s である。図1と図2から見ると住宅AとBともに、下降波と上昇波の時間差 ($t_{d, k} - t_{u, k}$) は長軸のほうが長い。住宅AとBの代表高さは大体同じなので、長軸のS波伝播速度は短軸より遅いことが分かる。したがって、住宅AとBは長軸の被害が短軸の被害より大きいと判断できる。この原因を究明すると、長軸方向の壁の量が短軸より少ないことと長軸方向の壁には窓口の数が多いためと思う。図3に示す健全な建物の各層の deconvolved wave の長軸方向と短軸方向の下降波と上昇波の時間差は同じである。

測定した住宅の各層の層間代表高さ (h_k) は 2.8 m である。式(1)によって、建物の各層におけるS波伝播速度が求められる。

$$c_k = \frac{2h_k}{(t_{d,k} - t_{u,k}) - (t_{d,k+1} - t_{u,k+1})} \quad (1)$$

しかし、より高い層の deconvolved wave の下降波と上昇波の時間は観測データの精度 (0.05 s) より小さい場合は、下降波と上昇波の時間差は 0 になる。言うまでもなく、この層より高い層の下降波と上昇波の時間差も 0 である。参照層の deconvolved wave はインパルスなので、時間差が 0 と考えられる。したがって、観測データの精度が時間差より低い場合は、式(1)によって、S波の伝播速度が求められない層がある。求めた建物A、BとCの k 層のS波伝播速度を表1に示している。

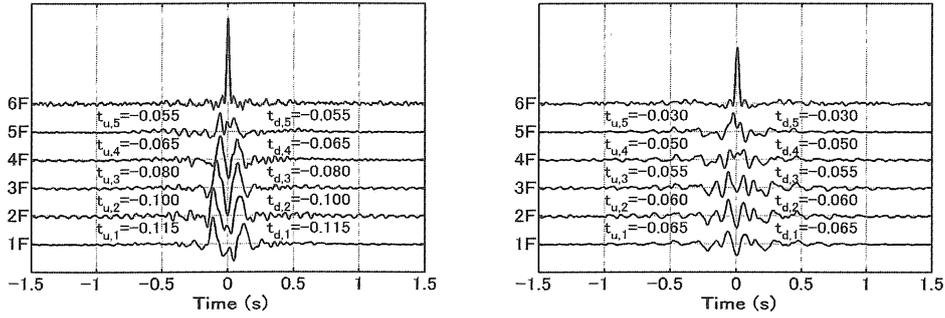


図1 住宅Aの各層の長軸（左）と短軸（右）の deconvolved wave

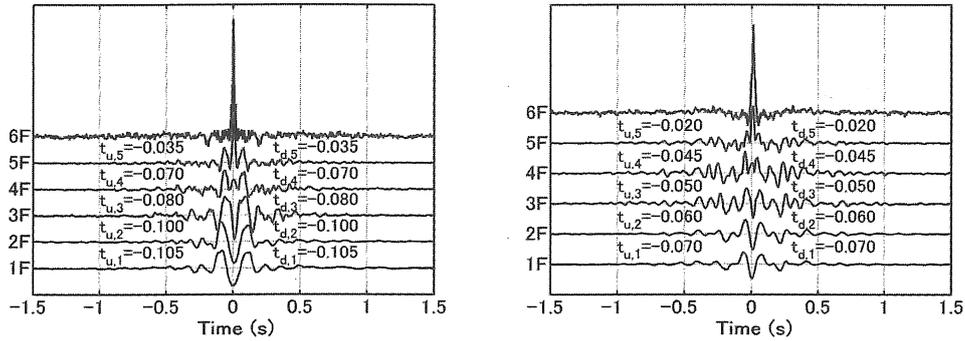


図2 住宅Bの各層の長軸（左）と短軸（右）の deconvolved wave

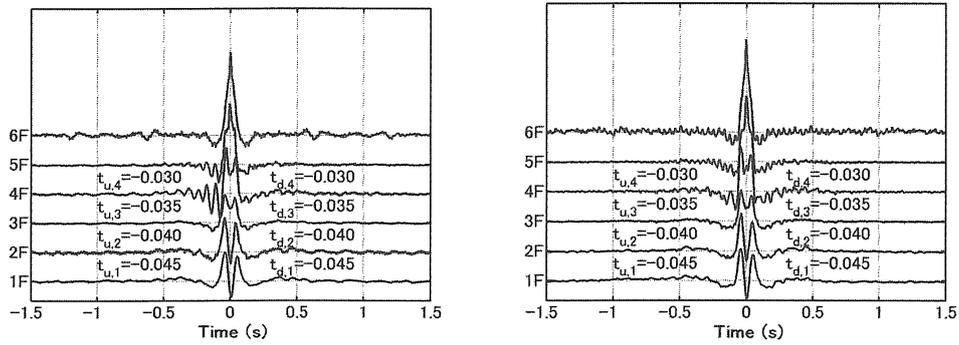


図3 住宅Cの各層の長軸（左）と短軸（右）の deconvolved wave

式(2)によって、建物1階から6階までのS波平均伝播速度 \bar{c} が求められる。

$$\bar{c} = \frac{H}{t_{d,1} - t_{u,1}} \quad (2)$$

式(2)中Hは建物1階から6階までの代表高さである。建物A、BとCのS波平均伝播速度 \bar{c} を表2に示している。

表1 建物A、BとCのk層のS波伝播速度 c_k (m/s)

建物	c_1		c_2		c_3		c_4		c_5		c_6	
	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S
A	188	560	142	560	188	560	282	142	*	*	*	*
B	280	280	140	280	280	560	80	112	*	*	*	*
C	564	564	564	564	564	564	*	*	*	*	*	*

* は下降波と上昇波時間差は 0 のために、式 (1) によって、求められない c_k である。L は建物の長軸方向、S は短軸方向を示している。

表 2 建物 A、B と C の 1 階から 6 階までの S 波平均伝播速度 \bar{c}

建物	\bar{c} (m/s)	
	長軸	短軸
A	146	258
B	168	240
C	376	376

4. まとめ

本研究では建物最上階の記録を参照して、deconvolution 法により常時微動記録から建物の各階における S 波伝播速度と 1 階から 6 階までの平均 S 波伝播速度を求めた。半壊レンガ造建物の各層の S 波伝播速度の低下は被害状況と合うことが認められる。被害が非常に甚大な層の、S 波伝播速度は健全な建物の約 1/4 に低下した。したがって、S 波伝播速度によって、建物のヘルスマモニタリングが実施できることが分かる。1 階から 6 階までの平均 S 波伝播速度は健全な建物より半分以下に低下することが分かる。

参考文献：

- [1]. Kanai, K. (1965). Some new problems of seismic vibrations of a structure, Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering, Auckland and Wellington, New Zealand, 22 January-1 February 1965, II-260-II-275.
- [2]. Todorovska, M. I. (2009b): Soil-structure identification of Millikan Library North-South response during four earthquakes (1970-2002): what caused the observed wandering of the system frequencies, Bull. Seismol. Soc. Am. 99, no. 2A, pp. 626-635, 2009.4
- [3]. Snieder, R., and Şafak, E.: Extracting the building response using interferometry: theory and applications to the Millikan Library in Pasadena, California, Bull. Seismol. Soc. Am. 96, no. 2, pp. 586-598, 2006.4
- [4]. 王欣, 正木 和明, 入倉 孝次郎: 四川地震の被害地における建物常時微動観測および被害建物の応答特性の抽出, 第 13 回日本地震工学会シンポジウム論文集, pp. 744-751
- [5]. Kabeyasawa, T., T. Kabeyasawa, K. Kusunoki, and K. N. Li (2008). An Outline of damages to school buildings in Dujiangyan by the Wenchuan Earthquake on May 12, 2008, in the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China. CD-ROM, S31-002.
- [6]. Zhang, M. Z. and Y. J. Jin (2008). Building damage in Dujiangyan during M8.0 Wenchuan earthquake, J. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 7, no. 3, 263-269.