地形と略算固有周期による建物基礎地震被害の分類

阪神淡路大震災の事例について

QUAKE DAMAGE TO BUILDING FOUNDATIONS AND CONFIGURATION OF
LAND AND ESTIMATED NATURAL PERIOD

—Case of Hanshin-Awaji quake disaster—

細野久幸*, 妹尾史郎**, 永井興史郎***

Hisayuki HOSONO, Shiro SEO and Koushiro NAGAI

75 cases of damage to building foundations, most of which are pile foundations, are arranged according to building or ground natural period estimated from building height or soil profile respectively in the area of the Hanshin-Awaji quake disaster. In the first place, it is shown that the estimated natural period of building T is consistent with long period, ${}_LT_e$ calculated from 26 detailed samples which contain informations on rigidity and mass of the buildings and that the short period, ${}_sT_e$ corresponds to $0.6T$.

Reclaimed land is separated from other soils at 0.3 or 0.4 sec. of estimated ground period, T_g . There are many cases of damage to foundations in the period of $0.4T < T_g < {}_LT_e$ in alluvial fans of "Disaster Band". In the period of $T_g < 0.4T$, building skeleton damage is found. Those building periods are 0.6sec-0.9sec. $T_g = 0.4T$ is characteristic line. There are typical cases of damage according to ground slip in hills and damage to piles according to liquefaction and flow of soils in reclaimed land.

Keywords : Natural Period, Configuration of Land, Building Foundation Damage,

Hanshin-Awaji Quake Disaster

固有周期, 地形, 建物基礎被害, 阪神淡路大震災

1. はじめに

阪神淡路大震災(兵庫県南部地震M7.2)では, 神戸市周辺の海岸と六甲山地の間に帯状に分布する種々の地形(埋立地, 沿岸低地, 扇状地, 丘陵)で, 木造以外の鉄筋コンクリート造(RC造)等耐震設計された建物の被害も多数記録された。文献1), 2)には, 杭基礎の事例がほとんどであるが, 主にRC造の建築基礎の被害事例が掲載されている。文献1)ではほぼ全事例に土質柱状図も添えられ, 建物の被災度についてもその概要が併記されている。これらの事例の統計等の概要はその後得られた情報も加えて文献3)にまとめられた。文献4)には, 震度VII地帯の事例で, 文献1)に含まれる8事例とその後収集された事例の詳細な資料26件が含まれている。

建物の被害と地盤特性の関係は, 木造住宅の被害率を始め, 震度VIIとされる「震災の帯」との関連について論じられている⁵⁾等ものが多い。建物基礎の被害は, 地盤との相互作用など震動が直接関係するものと, 液状化, 側方流動など地盤変状によるものに区分される。本報では, 文献1)に羅列された被害事例を基礎を主体とした建物の被害状況, 地盤・地形情報によって分類整理する。検討の対象とする文献1)の事例は, 大半が杭基礎である。杭で支持される建物の表層地盤特性を考慮した1次固有周期の提案式⁶⁾もあるが, 結果に大きな相違を生

じることはないので, 調査事例の情報からの推定が容易で, 上部構造の地震力設定に用いられる杭を含まない建物略算固有周期と表層地盤略算固有周期を独立に推定して指標とする。文献4)の資料による杭基礎と表層地盤を含めた連成系建物固有周期による考察は稿を改めて行う。

2. 基礎被害事例¹⁾の特性

基礎被害の目視は困難で, 地盤に変状があるなど基礎に被害が生じていると推定されたもの, 上部構造が大破, 中破したもののうち目視で全体傾斜が認められたもの等何らかの基礎被害が推定されたものについて調査した結果が収集されている³⁾。そのうち土質柱状図が添えられたものは82件であるが, ここでは混合構造や工事中の事例を除くRC造46件, SRC造14件, S造15件, 計75件を対象として分類を行う。地形, 構造種によって配列したその概要の一覧を表-1に示した。同表中の番号は, 文献1)における事例の配列順(西の垂水区から東の伊丹市へ)である。

建物の被災度判定には, 日本防災協会の判定規準⁸⁾を適用したものが多く, この被災度区分では「構造躯体の損傷」「全体沈下」「全体傾斜」の3項目についてその被災程度を判定し, その中の最も高い被災度をもって建物の被災度としている。すなわち, 建物の被災度は「構

本報は表-1の一部を文献4)に基づき修正するなど, 文献7)に加筆, 修正を加えたものである。

* ㈱三建構造

** ㈱能勢建築構造研究所

*** 摂南大学工学部建築学科 教授・工博

Sanken Structural Engineers, Inc.

Nose Structural Engineering Co.

Prof., Dept. of Architecture, Setsunan Univ., Dr. Eng.

表-1 文献1)の被害事例の概要

番号	所在地	構造種	地形区分	建物用途	杭種	液状化	側方 流動	建物 傾斜	躯体 破損	被災度	h	T	比較	T ₀	平均N値	杭頭 破損	杭中 破損	備考(被害状況等)
*64	芦屋市	RC	丘陵	保養所					○	大破	3.0	0.060	<	0.254	22.4			(傾斜地)1階せん断破壊、構造的問題
*70	西宮市	RC	丘陵	集合住宅			○	○		中破	9.5	0.190	>	0.035	29.0			(傾斜地)地滑り、石積擁壁崩壊、1/60
*74	西宮市	RC	丘陵	体育館	既製PC杭		○	○		中破	15.4	0.308	>	0.185	31.7	△	△	(傾斜地)杭頭、杭中ひび割れ
*79	西宮市	RC	丘陵	集合住宅	既製RC杭		○	○		中破	9.0	0.180	<	0.215	24.5	×		(傾斜地)杭頭破断、地滑り、石積擁壁崩壊、1/150
*27	神戸市北区	RC	丘陵	集合住宅	既製PC杭		○	○		中破未満	16.0	0.320	>	0.018	23.0	×		(傾斜地)杭頭圧壊、杭耐力定着力不足、1/40
*75	西宮市	S	丘陵	脱水処理場	既製PHC杭		○			なし	10.0	0.299	<	0.306	13.5	×		(崖近辺)杭破壊、地滑り
*82	宝塚市	RC	傾斜地	学校	場所打杭					中破	15.3	0.306	>	0.096	48.9			(傾斜地)異種基礎
*34	神戸市東灘区	RC	傾斜地	集合住宅			○	○		中破未満	30.3	0.606	>	0.062	37.3			(傾斜地)、1/300
*35	神戸市東灘区	RC	傾斜地	住宅			○	○		中破未満	5.7	0.114	<	0.209	23.2			(傾斜地)石積擁壁はらみ出し、1/80
*80	西宮市	S	傾斜地	体育館	場所打杭				○	中破	12.0	0.360	>	0.095	34.8	△		(傾斜地)ブレース座屈、杭ひび割れ
*6	神戸市中央区	RC	傾斜地	事務所					○	大破	30.0	0.600	>	0.055	48.5			4階層崩壊(4階までSRC)、付近大破多し、地下1階
*28	神戸市灘区	RC	傾斜地	集合住宅					○	大破	17.4	0.348	>	0.151	33.5			(傾斜地)1階ビロティ層崩壊
*69	芦屋市	RC	傾斜地	集合住宅	場所打杭					中破	14.9	0.298	>	0.189	19.7	×		傾壁ひび割れ、杭頭鉄筋破断、1/400~1/300
*60(21)	神戸市東灘区	RC	傾斜地	集合住宅	場所打杭					中破	31.8	0.636	>	0.312	33.1	×		建物下部被害大、杭頭剥離・破損
*3	神戸市長田区	RC	傾斜地	事務所	既製PHC杭			○		中破未満	10.8	0.216	<	0.305	14.4	×		高さ不明(3F)、杭頭破断、杭傾斜
*59	神戸市東灘区	RC	傾斜地	スポーツ施設	場所打杭				○	小破	15.0	0.300	>	0.179	27.4			高さ不明(5F)、1~4階壁ひび割れ、杭被害不明
*33	神戸市灘区	SRC	傾斜地	住宅	場所打杭				○	大破	22.8	0.456	>	0.100	40.1			1階ビロティ柱頭、耐震壁に大きな変形、杭被害不明
*8	神戸市中央区	SRC	傾斜地	店舗					○	大破	45.0	0.900	>	0.277	54.9			3~5階柱圧壊、地下2階(G.L.-12.5m)
*57	神戸市東灘区	SRC	傾斜地	集合住宅	場所打杭				○	中破	29.4	0.587	>	0.245	28.5	×		1階ビロティ柱曲げせん断ひび割れ、杭頭リングひび
*58	神戸市東灘区	SRC	傾斜地	店舗・住宅	場所打杭				○	中破	35.0	0.700	>	0.068	26.5			高さ不明(14F)、外壁クラック、地下1階
*73	西宮市	RC	谷底低地	集合住宅	既製PC杭				○	大破	19.9	0.398	>	0.086	22.2	×		(傾斜地)1,2階せん断破壊、杭頭圧壊
*55	神戸市東灘区	SRC	谷底平野	集合住宅	場所打杭				○	大破	30.0	0.600	>	0.204	27.5			1階ビロティ柱圧壊、耐震壁ひび割れ
*72(26)	西宮市	SRC	自然堤防	事務所	既製PHC杭			○		中破未満	29.9	0.597	>	0.284	19.3	×		杭頭圧壊、曲げせん断破壊、1/200
*76	西宮市	RC	天井川	集合住宅	既製PC杭	○	○	○		中破	17.5	0.350	>	0.246	21.4	△	△	(河川近液状化、杭頭中ひび、擁壁崩壊、躯体回転
*65	芦屋市	RC	天井川	学校	既製RC杭			○		中破未満	7.0	0.140	<	0.161	23.1	×		高さ不明(2F)、杭頭破断、石積擁壁崩壊土流出
*23	神戸市中央区	SRC	天井川	事務所	場所打杭				○	中破	30.3	0.605	>	0.184	38.6			1階損傷、1/280
*22(23)	神戸市中央区	RC	沿岸低地	集合住宅	場所打杭				○	大破	30.3	0.606	>	0.194	23.4	×		3階層崩壊、杭処理遅し主筋座屈・せん断ひび割れ
*48	神戸市東灘区	RC	沿岸低地	事務所	既製PHC杭			○		大破	20.0	0.400	>	0.317	25.4			上部構造大破、基礎被害不明、1/125
*17(25)	神戸市中央区	RC	沿岸低地	集合住宅	場所打杭				○	大破	30.4	0.608	>	0.269	32.9			1階せん断破壊、杭頭破断、基礎せん断ひび
*81	伊丹市	RC	沿岸低地	集合住宅	既製PC杭					中破	27.5	0.550	>	0.033	27.0	×		高さ不明(11F)、杭頭・基礎梁ひび割れ
*29	神戸市灘区	RC	沿岸低地	事務所		○		○		中破	20.0	0.400	>	0.221	23.1			液状化、地下1階、1/70
*9	神戸市中央区	RC	沿岸低地	集合住宅	既製RC杭				○	中破	14.8	0.296	>	0.128	24.7			1階柱せん断ひび割れ、杭頭被害なし地中梁ひび割れ
*5	神戸市兵庫区	RC	沿岸低地	集合住宅	既製PC杭			○		中破	11.6	0.231	<	0.322	21.1	×		杭頭圧壊・せん断破壊・傾斜、1/30
*44(1)	神戸市東灘区	RC	沿岸低地	集合住宅	既製PHC杭			○		中破未満	14.7	0.294	>	0.209	34.2	×		杭頭圧壊、1/120
*37	神戸市東灘区	RC	沿岸低地	集合住宅	既製RC杭	○				中破未満	12.3	0.246	<	0.246	20.0	△	△	液状化、沈下、杭頭杭中ひび割れ、地中梁ひび、1/80
*61(19)	神戸市東灘区	RC	沿岸低地	集合住宅	場所打杭					中破未満	23.7	0.474	>	0.237	29.3	△	△	杭頭・基礎梁ひび割れ、杭コンクリート剥離
*78(8)	西宮市	RC	沿岸低地	集合住宅	既製PHC杭			○		中破未満	26.7	0.534	>	0.210	21.7	×	×	杭頭、杭中破断
*7	神戸市中央区	SRC	沿岸低地	事務所					○	大破	45.0	0.900	>	0.054	51.3			中間層崩壊、地下3階(G.L.-14.7)、1/20
*30	神戸市灘区	SRC	沿岸低地	集合住宅	既製PC杭			○		大破	30.7	0.614	>	0.165	25.6			1,2階柱鉄筋破断座屈、2階耐震壁せん断破壊
*20(20)	神戸市中央区	SRC	沿岸低地	集合住宅	場所打杭				○	大破	34.2	0.683	>	0.179	30.8			変換4F層崩壊(強度的に弱い階)
*2	神戸市須磨区	SRC	沿岸低地	集合住宅	既製PC杭			○		中破	32.2	0.644	>	0.114	46.9	×		高さ不明(12F)、杭頭圧壊(杭耐力不足)、1/30
*51	神戸市東灘区	SRC	沿岸低地	集合住宅	既製PHC杭	○				中破	42.0	0.840	>	0.267	30.7	×		液状化、杭頭圧壊、1/16
*66	芦屋市	SRC	沿岸低地	集合住宅	既製PC杭	○	○	○		中破	30.3	0.606	>	0.352	26.2	×		杭頭圧壊
*24	神戸市中央区	SRC	沿岸低地	事務所	場所打杭	○				中破	31.0	0.620	>	0.374	23.7		×	液状化、杭中破断
*71	西宮市	S	沿岸低地	マリーナ		○	○	○		中破	9.0	0.270	<	0.295	5.3			建物水平移動、擁壁被害
*31	神戸市灘区	RC	埋立地	事務所	既製PC杭	○	○	○		中破	12.4	0.248	<	0.363	15.9	△		液状化、沈下、杭頭ひび、1/82
*43	神戸市東灘区	RC	埋立地	事務所	既製AC杭	○	○	○		中破	11.1	0.222	<	0.466	9.9	△		液状化、杭頭破断、1/50
*42	神戸市東灘区	RC	埋立地	事務所	既製AC杭	○	○	○		中破	15.3	0.306	<	0.468	9.8	×		液状化、沈下、杭頭破断、1/68
*67	芦屋市	RC	埋立地	学校	既製AC杭	○	○	○		中破	9.0	0.180	<	0.528	12.6	△		高さ不明(3F)、杭頭ひび、1/30
*47	神戸市東灘区	RC	埋立地	レジャー施設	既製PHC杭	○		○		中破	18.6	0.372	<	0.646	6.4			液状化、空隆、基礎調査なし、1/60
*62	神戸市東灘区	RC	埋立地	事務所	既製SC杭	○	○	○		中破	18.9	0.378	<	0.722	10.5		△	液状化、沈下、杭中ひび、1/100
*41	神戸市東灘区	RC	埋立地	事務所	既製PC杭	○	○	○		中破	10.7	0.214	<	0.753	5.3	△		高さ不明(2F)、液状化、沈下、杭頭ひび割れ
*10	神戸市中央区	RC	埋立地	事務所	既製AC杭	○	○	○		中破	7.8	0.155	<	0.782	9.6	△		液状化、沈下、杭頭座屈、1/30
*49	神戸市東灘区	RC	埋立地	事務所	既製PHC杭	○	○	○		中破	12.0	0.240	<	0.805	8.8			液状化、沈下、基礎調査なし、1/65
*25	神戸市中央区	RC	埋立地	事務所	ベジスタ杭	○	○	○		中破未満	25.0	0.500	>	0.276	21.5	×		液状化、沈下、護岸崩壊水平移動、杭傾斜
*14	神戸市中央区	RC	埋立地	事務所	既製PHC杭	○	○	○		中破未満	5.0	0.100	<	0.351	11.8	△		高さ不明(1F)、液状化、沈下、杭頭ひび、1/118
*1	神戸市垂水区	RC	埋立地	事務所	既製PC杭	○	○	○		中破未満	9.3	0.185	<	0.300	12.8	×		液状化、沈下、杭頭圧壊・傾斜、護岸水平移動、1/250
*63	芦屋市	RC	埋立地	寮		○	○	○		中破未満	12.6	0.252	<	0.446	8.6			液状化、沈下、躯体変形、護岸方流動
*13	神戸市中央区	RC	埋立地	事務所	既製AC杭	○	○	○		中破未満	16.6	0.332	<	0.561	7.9	×		液状化、杭頭圧壊、護岸破断、1/70~1/75
*39	神戸市東灘区	RC	埋立地	工場	既製PC杭		○	○		中破未満	30.0	0.600	<	0.628	10.2	×		高さ不明(6F)、水平移動、杭頭破断、地下1階
*11	神戸市中央区	RC	埋立地	事務所	既製AC杭	○	○	○		中破未満	6.0	0.120	<	0.759	9.6			高さ不明(2F)、液状化、沈下、空隆
*15	神戸市中央区	RC	埋立地	事務所	既製SC杭	○		○		中破未満	16.5	0.330	<	0.812	16.4			液状化、沈下空隆、pile cap破断、杭被害なし、1/273
*54	神戸市東灘区	RC	埋立地	学校	鋼管杭	○				なし	18.0	0.360	<	0.637	7.2			高さ不明(6F)、液状化、沈下、鋼管杭プレート損傷のみ
*18	神戸市中央区	S	埋立地	倉庫	鋼管杭	○	○	○		大破	9.0	0.270	<	0.825	11.0	×		(岸壁近)液状化、杭1/10曲げ変形、1/30
*36	神戸市東灘区	S	埋立地	事務所	既製RC杭	○	○	○		中破	8.1	0.243	<	0.335	8.1	×		(海岸近)液状化、沈下、杭頭露出傾斜、護岸崩壊
*12	神戸市中央区	S	埋立地	倉庫	既製PHC杭		○	○		中破	8.9	0.267	<	0.757	15.5			(岸壁近)岸壁移動、基礎移動および沈下、1/50
*38	神戸市東灘区	S	埋立地	工場	既製PC杭	○		○		中破	9.8	0.294	<	0.774	6.1			液状化、杭頭露出
*16	神戸市中央区	S	埋立地	倉庫	鋼管杭	○	○	○		中破	8.9	0.267	<	0.822	9.1	×		(海岸近)液状化、沈下、杭傾斜、護岸崩壊
*45	神戸市東灘区	S	埋立地	事務所	既製PHC杭	○	○	○		中破未満	8.5	0.255	<	0.794	11.2			(海岸近)液状化、沈下、水平移動
*21	神戸市中央区	S	埋立地	ホテル(附属棟)	既製PHC杭	○			○	中破未満	19.0	0.570	<	0.862	11.7	×		液状化、杭破断、支柱曲げ、護岸崩壊
*32	神戸市灘区	S	埋立地	倉庫	既製RC杭	○	○			なし	9.0	0.270	<	0.414	24.7	×		(海岸近)液状化、杭頭とフーチングずれ
*46	神戸市東灘区	S	埋立地	エレベータ塔	既製PHC杭	○	○	○		なし	26.2	0.786	>	0.465	16.0	×		(海岸近)沈下杭頭全数破断、護岸水平移動
*50	神戸市東灘区	S	埋立地	倉庫	既製PHC杭	○				なし	25.7	0.771	>	0.594	9.8		△	液状化、沈下、杭中破断
*77	西宮市	S	埋立地	事務所	既製PHC杭	○				なし	14.3	0.428	<	0.711	5.4	△		液状化、沈下、杭頭ひび割れ剥離
*40	神戸市東灘区	S	埋立地	倉庫	既製PC杭	○				なし	20.6	0.619	<	0.744	5.6	△		液状化、沈下、杭頭曲げひび、基礎梁せん断ひび

()内は文献4)での番号、付は1981年以前に施工開始、付きは不明

被災度：日本防災協会判定規準(本文参照)

○：あり

△：ひび割れ

×：破断・破断

特記なき勾配「1/40」等は建物傾斜を示す

造躯体の損傷」でその被災度が判定されたのか、地盤の支持力低下や杭など基礎構造が損傷することによる「全体沈下」「全体傾斜」で判定されたのか区別できない。表-1の備考欄では、文献1),3)に示された被害態様の記述から躯体被害、基礎・地盤被害等の区別を行っている。

同表の75件中、杭基礎は64件であり、既製杭の被害事例がその大半を占めている。杭種が空欄となっているものが直接基礎である。また同表には周辺地盤の液状化の有無なども示している。土砂流出、側方流動の見られた事例も記載しており、傾斜地6件、埋立地17件となっている。計測された建物傾斜角は1/16～1/400であるが、1/300以上を傾斜有りとしている。

3. 建物の略算固有周期 T と精算値 T_e

建物の略算固有周期 T (sec.)は、建物高さ及構造種別のみで基礎固定とした値を推定することとし、建物設計時に用いられる次式(昭和55年建設省告示第1793号第2)によって算出した。

$$T = h(0.02 + 0.01\alpha) \quad (1)$$

ただし、 h :当該建築物の高さ(m)、 α =[当該建築物のうち柱および梁の大部分が木造または鉄骨造である階(地階を除く)の高さの合計]/ h 、である。表-1には式(1)によって算定した T を示した。建物高さ h が不明な場合は、その建物用途に応じて階高を設定し、階数を乗じて算出している。

文献4)の詳細事例26件(表-1に()付番号で示した8事例を含む)は、全て杭基礎の事例であるが、地盤・杭の影響を無視し、建物の層剛性と建物重量をもとに基礎固定として固有値解析を行った。その結果得られた建物の固有周期の精算値 T_e と T の関係を図-1に示した。 T は一建物に一つであるが、 T_e は長辺方向と短辺方向の値が得られるので、長周期を ${}_L T_e$ 、短周期を ${}_S T_e$ とした。同一建物の周期であることを示すために、図-1ではこの両点を直線で結んでいる。また、被害状況を記号で示し、杭被害を生じたものの記号を塗りつぶしている。

同図の「9S」以外はRC,SRC造であり、壁式(事例番号の「W」付)を除いたコンクリート系建物では、 $({}_L T_e/T)$ と $({}_S T_e/T)$ の(平均,標準偏差)はそれぞれ(0.93,0.29)と(0.60,0.23)であり、さらに事例23,26の ${}_S T_e$ を除けば、後者は(0.53,0.17)である。平均すればほぼ ${}_L T_e \approx T$ で、表-1においても T は各事例の長周期側の値に近いと推定される。短周期側では、 ${}_S T_e \approx (0.36 \sim 0.70)T$ の事例が過半を占めると推定(平均の両側 σ 65%確率)される。参考までに図-1には、その下限に近い $T_e = 0.4T$ 他の直線と回帰式を示した。

4. 表層地盤の略算固有周期 T_g と常時微動の卓越周期

表層地盤の卓越周期は、1/4波長則に基づく簡略法として次式を用いる。この式から算出された値(卓越周期)をここでは表層地盤の略算固有周期 T_g とする。

$$T_g = \frac{4H}{V_s} \quad (2)$$

ただし、 H :表層地盤の層厚(m)、 V_s :平均せん断波速度(m/s)とする。上式に適用するせん断波速度 V_s は、標準貫入試験の N 値を用いて次式で推定する⁹⁾。

$$\text{粘性土:} \quad V_s = 100 \cdot N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 25) \quad (3)$$

$$\text{砂質土:} \quad V_s = 80 \cdot N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 50) \quad (4)$$

図-1 建物の略算固有周期 T と精算固有周期 T_e

図-2 地盤略算固有周期と常時微動計測結果

本報では、各事例の土質柱状図の N 値の平均を表層地盤の N 値とみなして上記の式(3),(4)に用いる。層厚 H としては、杭基礎の場合は基礎底から支持地盤まで、直接基礎の場合は基礎底から N 値が50以上の層までとし、式(2)によって算定した T_g を表-1に示した。ただし、16件については、近隣の土質柱状図を使っており、そのうち上記の深度まで N 値が示されていない4件については、判明している深度までの値を用いて集計している。

式(2)の V_s は地盤の微小ひずみ時のものとすれば、 T_g は地盤の初期剛性に対応する固有周期を表すと考えられる。この T_g の算出は層厚 H に依存するところが多い。また、土質柱状図は建物を支持する層まで示されていることが多いが、その支持層が工学的基礎とは限らない。そこで、本報で対象とする神戸市周辺の T_g と震災後行われた常

時微動測定結果^{10), 11)}にもとづく表層特性との対応を検討する。その明瞭に卓越する周期と T_g の関係を図-2に示した。地形ごとに左側に T_g 、右側に常時微動の卓越周期を示し、その卓越周期から想定されている表層厚を上の地形図に示している。

文献10)は、埋立地での常時微動計測結果と液状化の有無を検討したものであり、ポートアイランドと六甲アイランドにおける常時微動測定結果が示されている。表層地盤の卓越周期は様々な層の影響を受け、 H_1 (地表から埋立土層下端まで)で0.2~0.4秒、 H_2 (沖積粘土層(Ma13)または洪積互層まで)で0.6~0.9秒、 H_3 (第1洪積砂礫層および洪積粘土層(Ma12)まで)で1.1~1.6秒が現れていると推測している。埋立地の T_g は0.3~0.9秒と広範囲であるが、図-2の H_3 の示す周期には対応していない。

文献11)は、陸地部における常時微動の計測結果と、兵庫県南部地震での震度との関係を示している。表層地質が玉石地帯と砂州、本分類の緩扇状地から沿岸低地に相当する震度VIIの地域で、0.2~0.3秒の短周期のみが卓越する傾向があるが、同様の表層地質でも震度VII未満の地域では、多数の卓越周期が現れるとしている。緩扇状地と沿岸低地の T_g (<0.4 秒)は、ほぼ上記常時微動卓越周期を中心に分布している。また、JR神戸線以北の丘陵や扇状地にかけては、常時微動において1.0秒以上の卓越周期が見られ、表層特性には T_g の算定に用いている地層よりかなり深い構造が影響していると考えられる。

よって、埋立地盤と丘陵や扇状地では、常時微動で推定される表層特性には、 T_g の算定に用いた層より深い構造の影響が現れているが、「震災の帯」を含む緩扇状地や沿岸低地では、 T_g は概ね常時微動の卓越周期に対応していると考えられる。

5. 地震時地盤剛性の非線形化および連成系建物固有周期

兵庫県南部地震においては、表層地盤の震動は、その剛性の非線形化の大きい影響を受けているとされている¹²⁾。図-3には文献4)の事例について、同震災後の建設省告示第1457号(限界耐力法)に規定された波を基盤波とし、その等価線形化法によった地震時卓越周期 T_g と式(2)によって算出した微小ひずみ時卓越周期を、縦軸方向の線分の上下限として示した。同図の横軸方向の線分はSRSS法を用いて求めた建物・杭・地盤連成系の固有周期 T_l の長・短周期を結んだものである¹³⁾。

図-3 連成系建物と地震時等価固有周期関係の事例

同図によると、縦軸の微小ひずみ時卓越周期が0.3秒程度以上の場合に、地震時等価周期との差が大きい。横軸の T_l は地盤剛性が建物剛性に比べて大きい場合は基礎固定に近く、建物剛性が大きい場合には地盤剛性の非線形化が大きい程長くなることが分かっている¹⁴⁾。このように杭基礎の連成系としての周期には関連する剛性等の評価も含まれることとなり、軟弱な地盤程その影響は大きい。そこで、本報告では建物周期として基礎固定時の値(横軸 T)を用い、地盤剛性の非線形化による建物・基礎・地盤連成系としての周期への影響などは、地盤の略算固有周期の値(縦軸 T_g)に含めて区別するものとし、設計実務で用いられる指標の視点で整理する。

6. 略算固有周期 T 、 T_g による建物・基礎被害の検討

1) 構造種別による建物の被害分類

上部構造の構造種別(RC造、SRC造、S造)ごとに事例の概要を表-2にまとめた。構造種別毎に建設された表層地盤(T_g)、建物高さ(T)、用途等の傾向が現れている。図-4~6にその被害分布を表-1の事例番号も付して示した。各図の記号の意味は図-4に示した。記号が大きいほど被災度(小~大破)が大きいことを示している。ただし、杭被害が見られない事例には、杭基礎未調査、直接基礎を含んでいる。

表-2 収集された事例の概要(構造種別)

構造種別	T_g (s)	T (s)	用途(%)
RC	$T_g < 0.8$	$T < 0.6$	集合住宅(39), 事務所(37)
SRC	$T_g < 0.4$	$0.4 < T < 0.9$	集合住宅(50), 事務所(29)
S	$T_g < 0.9$	$0.2 < T < 0.8$	倉庫(40), 事務所(20)

表-3 収集された事例の概要(地形別)

地形	T_g (s)	T (s)	構造種別(%)	杭種別(%)
丘陵・扇状地	$T_g < 0.3$	$T < 0.6$	RC(89), S(21)	直接(40), 既製杭(40)
緩扇状地	$T_g < 0.3$	$0.1 < T < 0.9$	RC(56), SRC(44)	場所打(50), 既製杭(31)
沿岸低地	$0.2 < T_g < 0.4$	$0.2 < T < 0.9$	RC(58), SRC(39)	既製杭(63), 場所打(21)
埋立地	$0.3 < T_g$	$0.1 < T < 0.9$	RC(60), S(40)	既製杭(97), 直接(3)

表-1も参照すると、図-4のRC造建物の縦軸 $T_g > 0.3$ 秒では、1例以外は、地盤の液状化や側方流動、杭損傷などによる「全体傾斜」である。 $T_g < 0.1$ 秒の地盤でも、「全体傾斜」は傾斜地での地滑りや、擁壁の崩壊に起因している。「上部構造躯体の損傷」を生じた事例は、 $T_g < sT_e$ の場合に多く、液状化は見られない。 $T_g < 0.4T$ でも被災度が大きい事例がみられ、'81年前施工(表-1の*付)のものが多い。1階の損傷が多いが、直接基礎の場合も含めて T が大きい場合(事例6, 22)、上層でも損傷を生じている。 $T_g > T$ の躯体損傷の事例は、傾斜地であることや擁壁の崩壊に起因したものである。

図-5に示すSRC造建物の場合は、埋立地での傾斜が見られず調査事例もないため、比較的表層地盤のよいところに限られている³⁾。 $0.4T < T_g < sT_e$ では杭基礎の被害が見られるが、 $T_g < 0.4T$ では、躯体の被災度が大きく、建物の傾斜は杭の耐力不足が明らかな場合(事例2)と、やや軟弱な地盤での液状化に伴う既製杭の杭頭圧壊を生じた場合(事例51)に限られる。集合住宅のような建物の短スパン方向の被害

が多かったことと対応している。RC造の被害同様、 T_g が長い高い建物では上層での被害も見られる。事例7,8は直接基礎で、それぞれ地下3,2階を有し、 N 値50以上の層に根入れされていた。

S造建物の場合、図-6に示すように $T_g > 0.3$ 秒での被害が多い。傾斜地に建つ特殊な構造(事例80)以外は、地盤の液状化や擁壁・護岸などの崩壊による側方流動に起因する基礎被害が主体となっている。

2) 地形区分別に見た被害分類

表-3に地盤種別(丘陵・扇状地、緩扇状地、沿岸低地、埋立地)ごとの事例の傾向を示した。 $T_g = 0.3 \sim 0.4$ 秒を境に埋立地とそれ以外の地形に区分される。図-7-10にその被害分布を示した。

図-4 RC造被害分布

図-5 SRC造被害分布

丘陵・扇状地の事例を図-7に示した。丘陵6件、扇状地4件の計10件であるが、10件中9件が傾斜地、残る1件も崖近辺となっている。直接基礎の事例が他の地形よりも多く、直接基礎で建物の傾斜を生じたものが3件、杭頭被害4件となっている。その被害も地滑りを伴ったものが3件、擁壁崩壊を伴ったものが3件と地形による被害の特性がよく現れている。

緩扇状地・谷底低地・自然堤防などの事例を図-8に示した。緩扇状地10件、自然堤防など6件である。前述のように、 T_g は常時微動卓越周期と概ね一致していると考えられる。事例28は直接基礎、事例73は傾斜地での被害、事例59の杭被害が不明であることを考慮すれば、 $0.4T_g < T_b < 1.1T_g$ で主として場所打ち杭の被害が見られ、 $T_g < 0.4T_g$ では

上部構造躯体の損傷が見られることが特徴である。事例6はSRC造とRC造の切替え部である4階で層崩壊を生じており、それを除けば、 $0.4\text{秒} < T_g < 0.7\text{秒}$ では1階躯体被害、 $T_g = 0.9\text{秒}$ の事例8は、中間層(3~5層)に被害を生じている。この事例6,8は直接基礎でそれぞれ地下1,2階を有していた。

沿岸低地の事例を図-9に示した。前述のように、 T_g はこの地形でも常時微動卓越周期とほぼ対応している。事例2は杭耐力が不足、事例81は杭長とその支持地盤までの表層特性が不明、事例17は鋼管杭である。事例48は基礎被害が不明であるが、建物が大破しており、杭に

図-6 S造被害分布

図-7 丘陵・扇状地の被害分布

図-8 緩扇状地等の被害分布

図-9 沿岸低地の被害分布

図-10 埋立地の被害分布

も被害が生じている可能性がある。これらを考慮すると、主として $0.4T_g < T_g < L T_e$ で既製杭の被害が見られ、 $T_g < 0.4T_g$ では構造躯体の損傷が見られる。 T_g が大きい場合、上層での損傷が見られる。事例7は直接基礎で地下3階を有していた。

埋立地の事例を図-10に示した。ほとんどが、 $T_g > s T_e$ に分布し、28件で液状化が確認されており、残る2件も付近の岸壁などの移動が確認されている。建物の傾斜は25件であり、そのうち杭被害が確認されている17件の全てが既製杭である。事例21は、地盤改良された敷地に隣接するS造で、この付属建物に躯体損傷がある以外は、他の上部構造に目立った被害は見られない。全体的に建物固有周期に関係なく、液状化・側方流動による基礎の被害が多く見られる。

7. まとめ

兵庫県南部地震における建物基礎の被害と地盤(表層特性)との関係の概略を捉えることを目的として、杭の影響を含まない建物-地盤の略算固有周期 T_g 、 T_e を指標に検討を行った。収集事例建物の建設時の地盤情報から1/4波長則に基づいて得た表層地盤の略算固有周期 T_g によれば、神戸市とその周辺では、 $T_g = 0.3 \sim 0.4$ 秒を境にして埋め立て地とそれ以外の地形に分けられ、さらに各地形ではおよそ次のようであった。

$0.1 \text{ 秒} < T_g < 0.4 \text{ 秒}$: 沿岸低地

$T_g < 0.3 \text{ 秒}$: 丘陵・扇状地、緩扇状地

このうち、常時微動とほぼ対応するのは沿岸低地と緩扇状地のみであった。一方、建物情報の詳細な事例26件によって、コンクリート系建物の長周期側固有周期 $L T_e$ は、略算固有周期 T とほぼ一致し、短周期側固有周期 $s T_e$ とは $s T_e = 0.6 T$ の関係にあることが分かった。その結果、建物-基礎の被害態様の概略は図-11のようにまとめられる。

a) 「震災の帯」を含む緩扇状地、沿岸低地では、およそ $T_g = 0.4 T \sim T$ に分布する事例で基礎(前者では場所打ち杭、後者では既製杭)の被害が多い。

b) およそ $T_g < 0.4 T$ では構造躯体(沿岸低地では杭も)の被害が多い。集合住宅等の短スパン方向での被害、地下階を有する直接基礎建物の躯体損傷と対応している。

c) 丘陵・扇状地($T_g < 0.3 \text{ 秒}$)では、傾斜地で擁壁が崩壊するなど、建物を支持する地盤の地滑りなどによる被害であり、埋立地($T_g > 0.3 \text{ 秒}$)では、地盤の液状化・側方流動による杭基礎の被害を生じている。

図-11 略算固有周期を指標とした被害分類

謝辞

震災直後に、文献1),4)の資料の提供、収集、公開にご尽力頂いた日本建築学会近畿支部基礎構造部会の部会員の方々に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会(兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会):兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書,1996年7月
- 2) 二木, 上之園, 中田編:建築基礎の被災度区分判定指針及び復旧技術例, 建築研究所資料No.90, Aug.1997
- 3) 日本建築学会, 土木学会, 地盤工学会, 日本機械学会, 日本地震学会:阪神淡路大震災調査報告集, 建築編-4, 建築基礎構造, pp.266~293, 1998年3月
- 4) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会:基礎の調査・補強・耐震設計の課題, 日本建築学会近畿支部, 2000年12月
- 5) 石川浩次, 緒方信一, 馮少孔, 細谷卓志:兵庫県南部地震の被害分布と断層構造および地盤特性の影響, 土と基礎, Vol.47, No.2, Ser. No.493, pp.9~12, 1999年2月

- 6)大場新太郎:地震と基礎「その時どうなった」—兵庫県南部地震を踏まえて—シンポジウムテキスト,pp.33~49,1995年12月
- 7)妹尾,細野,永井:兵庫県南部地震における建物・基礎被害の略算固有周期による検討(その1,2),(その3,4),日本建築学会大会学術講演梗概集,1999.9,B-2. pp29-32,2000.9,B-2.pp53-56.
- 8)日本防災協会:震災建築物等の被災度判定規準および復旧規準指針(鉄筋コンクリート篇),1991年7月
- 9)日本道路協会:道路橋設計示方書・同解説,V耐震設計編, pp.43~48,1996年
- 10)土木学会関西支部:大震災に学ぶ—阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書—第1巻,pp.82~85,1998年6月
- 11)早川清,仲野貴裕:神戸市内の常時微動特性と地震被害との関係,土木学会「阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集」,1996年1月
- 12)林康裕,川瀬博:1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価,日本建築学会構造系論文集第481号,pp.37~46,1996年3月
- 13)細野,妹尾,永井:表層地盤を考慮した建物・杭・地盤連成系による兵庫県南部地震の被害検討(その1,その2),日本建築学会大会学術講演梗概集,2002.9,B-1. pp559-562,2002.9.
- 14)摩擦杭設計技術研究委員会:摩擦杭の設計-考え方と課題-,日本建築学会近畿支部,pp.76~126,2003年3月

(2005年8月24日原稿受理, 2006年4月26日採用決定)