

杭支持高層建物の地震時挙動

清水 勝美

(技術研究所)

片岡 俊一

(技術研究所)

田 蔵 隆

(技術研究所)

佐武 直紀

(技術研究所)

横田 治彦

(技術研究所)

§ 1. はじめに

近年のウォーターフロント開発に伴って、臨海部の軟弱地盤に杭基礎を有する重要構造物の建設が増大している。地震時に杭は、地盤内を伝播する地震動を上部構造物に伝え、さらに上部構造物が振動することによって生ずる慣性力を地盤に伝える。このように、杭基礎構造物の地震時挙動は地盤・杭基礎・上部構造物の動的相互作用の影響に大きく支配されており、この動的相互作用現象を解明することが合理的な杭基礎構造物の耐震設計法を確立する上で重要である。

杭基礎構造物の地震時挙動の実態を知る最も直接的な手段として、地盤・杭基礎・構造物に対する地震観測が挙げられる。しかし、地震観測による研究は、理論的研究¹⁾、数値解析的研究²⁾、振動実験による研究³⁾と比較して規模が大がかりとなること、長期間の観測を必要とすること、および費用の問題などの理由で少ないのが実状である^{4)~11)}。

基礎杭の地震時曲げひずみに関して、筆者ら⁹⁾は道路橋橋脚に対する地震観測および解析から、杭頭部では上部構造物の慣性力の影響が大きく、杭先端部では地盤震動の影響が支配的となることを指摘した。また、小林ら¹⁰⁾は10階建て住宅に対する地震観測から、杭頭部の曲げ応力の波形は建物1階の水平加速度に似ていること、ならびに杭の曲げ応力は杭頭部および地盤剛性が急変する部分で大きくなることを示している。林田ら¹¹⁾による5階建て建物基礎杭の観測においても、地盤剛性の急変部で杭の曲げ応力が大きくなり、杭頭に慣性力を作用させて Chang の式から求めた杭の曲げモーメント分布と異なることを指摘している。

杭基礎構造物の地震応答に及ぼす動的相互作用の影響度に関して、筆者ら¹²⁾は上部構造物の質量および固有周期と地盤の固有周期との関係をパラメータとした地盤・杭基礎・構造物連成系モデルの解析を行ない、動的相互作用の影響による連成系の固有周期の伸びおよび応答倍

率の変化を検討した。その結果、地盤の固有周期に対して上部構造物の固有周期が短いほど動的相互作用の影響は大きくなり、また構造物の質量が大きいかほど動的相互作用の影響も大きくなるとの結論を得た。また、地震観測記録に基づく林田ら¹³⁾の検討では、地盤・杭基礎・建物連成系の固有周期は基礎固定としたときの建物の固有周期より大きく伸びているが、この建物の固有周期は地盤の固有周期より短い関係にあることから、上記の筆者らの検討結果¹²⁾と一致した振動特性を示しているものと理解できる。

筆者らは、杭基礎構造物の地震時挙動特性の解明、ならびに合理的な杭の耐震設計法確立のための基礎資料の提供を目的として、横浜市内の軟弱地盤に建設された12階建ての杭支持建物で地震観測を実施している¹⁴⁾¹⁵⁾。本報告は、地震観測システム、建物に対する常時微動測定結果およびこれまでの地震観測記録を紹介し、地震観測記録に基づいた建物および基礎杭の地震時挙動に及ぼす動的相互作用の影響に関する検討結果を報告するものである。

§ 2. 地震観測システム

地震観測を実施している建物の外観を写真-1に示す。建物は、横浜市の大岡川下流の軟弱地盤に建設されたS造、一部SRC造の地下1階、地上12階建ての事務所ビルで、構造寸法は長辺28.4m、短辺24.8m、高さ46.6mである。基礎杭は場所打ちアースドリル杭(杭径 $\phi=1700\text{mm}$ 、杭長 $l=34.9\text{m}$)で、合計20本の杭のうち、17本が先端拡底となっている。

地震観測は1989年12月から開始し、図-1の地震計配置図に示すように、加速度計を地盤および建物に、鉄筋計を2本の基礎杭に、間隙水圧計を地盤にそれぞれ設置している。加速度計はサーボ型加速度計で、地盤に対しては表層に3台(GL-2, -6, -20m)、支持層に1台

(GL-40m) の計 4 台を埋設し、建物に対しては地下 1 階 (B1F) に 3 台、7 階 (7F) と屋上 (RF) に各 1 台の計 5 台を設置している。加速度計の水平 2 成分の X, Y 方向は、それぞれ建物の長辺方向および短辺方向に一致させている。なお、各成分 (X, Y, Z) の正の方向 (+) は図一に示したとおりである。

鉄筋計は、建物コーナー部の杭 (A 杭) と建物中央部の杭 (B 杭) に、それぞれ深さ方向に 6 断面 (A1~A6, B1~B6), 1 断面当たり 4 台、合計 48 台設置した。各断

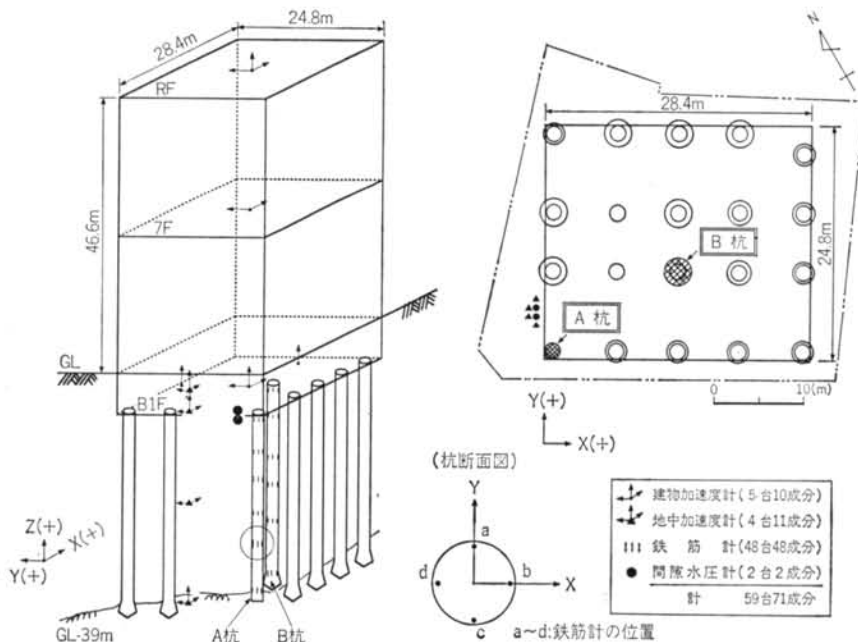


写真一 1

測定位置	設置位置	検出器	成分数	台数
基礎杭	A 杭 GL-8m(A1) GL-11m(A2) GL-15m(A3) GL-23m(A4) GL-31m(A5) GL-39m(A6)	鉄筋計	4	24
			4	
			4	
			4	
			4	
			4	
	B 杭 GL-8m(B1) GL-11m(B2) GL-15m(B3) GL-23m(B4) GL-31m(B5) GL-39m(B6)	鉄筋計	4	24
			4	
			4	
			4	
			4	
			4	
小計			48	48
地盤	GL-2m(G1) GL-6m(G2) GL-20m(G3) GL-40m(G4)	加速度計	3	1
			3	1
			2*1)	1
			3	1
	小計			11
	GL-6m(PP1, PP2)	間隙水圧計	2	2
建物	B1F 中央部(B1F-A) " 北側(B1F-B) " 東側(B1F-C) 7F 中央部(7F) RF 中央部(RF)	加速度計	3	1
			1*2)	1
			1*2)	1
			2*1)	1
			3	1
	小計			10
合計			71	59

(注) *1) 水平 2 成分の加速度計, *2) 上下 1 成分の加速度計

表一 地震計の設置位置および観測成分



図一 1 地震計配置図

面に設置した4台の鉄筋計の位置は、加速度計の観測成分の方向と同様にそれぞれ建物の長辺方向および短辺方向に一致させており、これら4台の記録から杭の軸ひずみ ε_m 、X軸回りの曲げひずみ ε_{mX} 、Y軸回りの曲げひずみ ε_{mY} が分離できる。

間隙水圧計は、GL-6m付近のシルト混り細砂層に2台設置した。なお、地中加速度計および間隙水圧計は、敷地の関係からA杭近傍の壁面より1.3~2.3m離れた地点に埋設されている。

表-1は、各地震計の設置位置および観測成分の一覧表を示したもので、本地震観測は合計59台71成分の同時観測となっている。地震記録のサンプリング時間は1/100秒であり、遅延時間は10秒間、起動後の収録継続時間は30秒間である。また、観測記録は磁気テープに収録されると同時に、テレメータ回線により全チャンネルの最大値および48秒間の記録が当社技術研究所にデータ伝送される。

図-2は、地盤の概要と地中加速度計、鉄筋計、間隙水圧計の設置深度との対応状況を示したものである。表

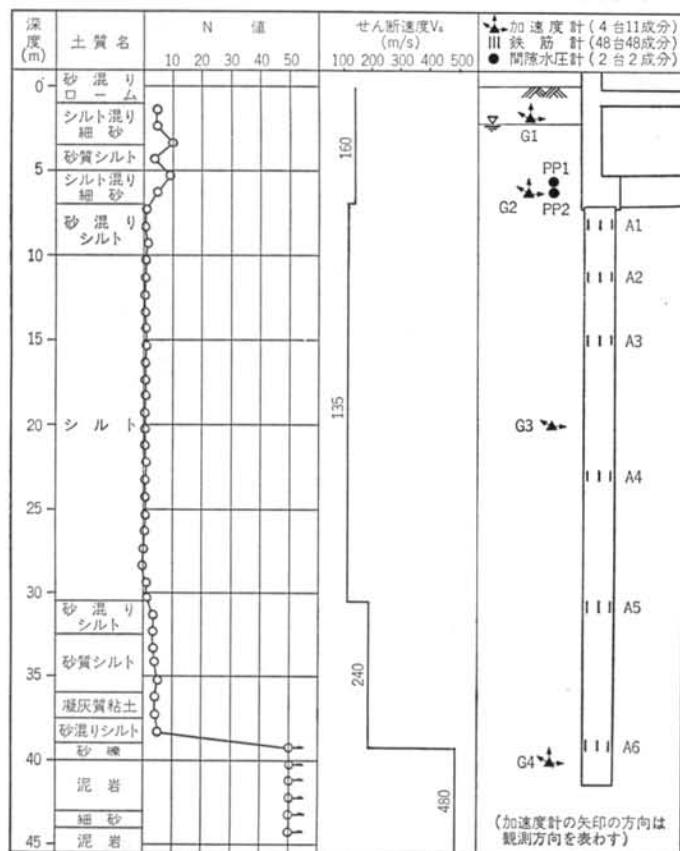


図-2 地盤概要と地中地震計の設置位置

層GL-39m以浅はシルト質の軟弱な地盤であり、GL-39m以深の支持層はN値が50以上の泥岩と砂岩の互層となっている。せん断波速度 V_s は、表層で $V_s=135\sim 240$ m/s、支持層で $V_s=480$ m/s である。

杭頭部および杭中間部の鉄筋計(A1~A4, B1~B4)の設置深度は V_s が135m/sのシルト層に対応しているが、杭先端部の鉄筋計(A5~A6, B5~B6)は V_s が変化する位置に設置されている。

§ 3. 建物の常時微動測定結果

建物の固有振動特性を把握するために、建物完成直後に常時微動測定を行なった¹⁴⁾。測定は各階に速度型微動計を配置して行ない、建物の並進、ねじれ、ロッキング振動が検出できるように、各階中央部で水平2成分(X, Y)、地下1階の各辺中央部で上下成分(Z)および屋上の各辺中央部で水平2成分の測定を行なった。なお、測定成分(X, Y, Z)の方向は、地震観測における加速度計の方向と一致させた。

表-2は、常時微動測定によって得られた建物の並進およびねじれモードの1次~3次の固有周期および減衰定数を示したものである。これより、建物の並進モードの1次固有周期はY方向(短辺方向)が1.19秒、X方向(長辺方向)が1.11秒であり、Y方向の固有周期はX方向より多少長いことが分かる。また、ねじれモードの1次固有周期(0.92秒)は、並進モードの1次固有周期と近接している。さらに、1次の並進モードの固有周期に対する2次および3次の並進モードの固

モード次数	固有周期 (sec)	減衰定数 (%)	モード種別
1	1.19	1.9	Y方向並進1次
2	1.11	1.5	X方向並進1次
3	0.92	—	ねじれ1次
4	0.38	1.1	Y方向並進2次
5	0.36	2.5	X方向並進2次
6	0.30	—	ねじれ2次
7	0.22	—	Y方向並進3次
8	0.20	—	X方向並進3次
9	0.18	—	ねじれ3次

(注) 減衰定数は1次および2次の並進モードのみ求めた

表-2 常時微動測定による建物の固有値

有周期の比を見ると、X方向およびY方向とも均質弾性体のせん断振動の固有周期比(1/3, 1/5)とほぼ対応した結果となっている。得られた振動モードの一例として、Y方向の1次～3次の並進モードを図-3に示した。

§ 4. 地震観測記録

4.1 観測記録の概要

地震観測開始以来、これまで50の地震記録が得られている。図-4は、観測地震の震央位置と地震観測地点との関係について示したもので、表-3はそのうち横浜で震度Ⅲ以上を記録した9地震の諸元、ならびに地表(GL-2m)および屋上(RF)の水平最大加速度を示したものである。地表で最も大きな加速度を観測した地震はNo.47地震(1992年2月2日、 $M=5.7$ 、 $D=90\text{km}$ 、 $\Delta=32\text{km}$)

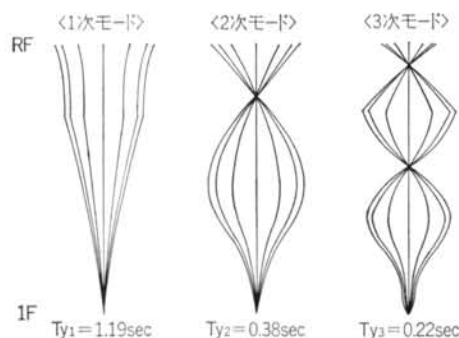


図-3 常時微動測定による建物の並進モード(Y方向、1次～3次)

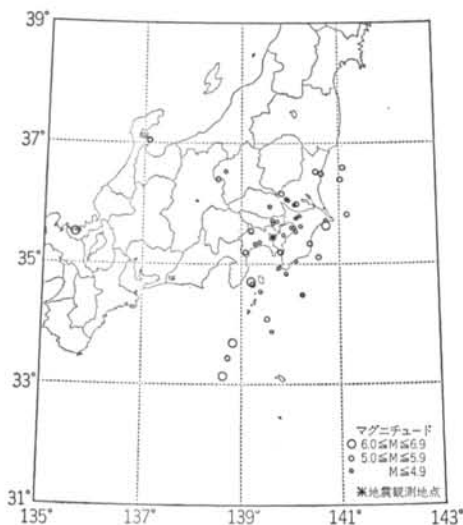


図-4 観測地震の震央位置

であり、地表および屋上の最大加速度はそれぞれX方向(長辺方向)で 46cm/s^2 および 102cm/s^2 であった。

本章では、No.47地震による観測記録に基づき、地盤、建物ならびに基礎杭の地震時挙動特性を検討し、基礎杭の地震時挙動と地盤および建物の地震時挙動との対応関係について考察する。

4.2 加速度記録および杭の曲げひずみ記録

図-5は、No.47地震による地盤(GL-2, -20, -40m)および建物(RF, 7F, B1F)の加速度記録を示したものである。地震の主要動は時刻20～25秒のおよそ5秒間であるが、屋上と7階の加速度記録には、時刻30秒以降にうなりのような応答が見られる。

図-6は、A杭(A1～A6)およびB杭(B1～B6)の軸ひずみ ϵ_n 、X軸回りの曲げひずみ ϵ_{mx} 、Y軸回りの曲げひずみ ϵ_{my} を示したものである。杭のひずみ記録も加速度記録と同様に時刻20～25秒の間で最大となっており、

地震番号	発震日時	震央位置	マグニチュード M	震源深さ $D(\text{km})$	震央距離 $\Delta(\text{km})$	横浜の震度	水平最大加速度 (cm/s^2)	
							地表	屋上
4	1990年2月20日15時53分	伊豆大島近海	6.6	20	92	Ⅳ	X: 18.9 Y: 16.1	X: 102.3 Y: 97.0
14	1990年6月1日10時22分	千葉県東方沖	6.0	50	102	Ⅲ	X: 13.2 Y: 10.0	X: 60.1 Y: 48.5
15	1990年6月5日22時43分	神奈川県中部	5.5	123	40	Ⅲ	X: 7.5 Y: 5.3	X: 21.6 Y: 13.1
19	1990年8月5日16時13分	神奈川県西部	5.1	14	56	Ⅲ	X: 9.2 Y: 14.0	X: 21.8 Y: 30.3
21	1990年8月23日8時47分	千葉県中部	5.4	50	70	Ⅲ	X: 8.6 Y: 11.4	X: 30.6 Y: 24.4
34	1991年7月14日14時23分	長野県東部	5.4	187	147	Ⅲ	X: 8.5 Y: 7.8	X: 22.2 Y: 16.3
45	1991年11月19日17時24分	東京湾	4.6	81	40	Ⅲ	X: 15.2 Y: 16.2	X: 18.4 Y: 19.3
47	1992年2月2日4時4分	東京湾	5.7	90	32	Ⅲ	X: 45.6 Y: 37.1	X: 101.9 Y: 70.3
48	1992年4月10日23時31分	東京湾東部	4.9	89	30	Ⅲ	X: 7.7 Y: 7.0	X: 13.1 Y: 13.6

表-3 観測地震の諸元および地表と屋上の水平最大加速度(横浜の震度がⅢ以上の地震)

加速度記録の主要動と対応している。軸ひずみは、建物コーナー部のA杭の方が建物中央部のB杭よりも大きな応答を示している。一方、曲げひずみはB杭の方がA杭よりも大きくなっているが、一般に杭の荷重分担は建物コーナー部の方が中央部よりも大きく、ここでの観測記録は逆の傾向を示している。これは、本建物以前の建物の基礎杭（木杭）がA杭近傍に存在しており、これによりA杭の曲げ変形が抑制されて曲げひずみが小さくなったものと考えられる。

杭のひずみと加速度の波形の形状を比較すると、軸ひずみ ε_n は屋上と7階の水平加速度に類似し、X軸回りの曲げひずみ ε_{mx} およびY軸回りの曲げひずみ ε_{my} は、それぞれ地下1階と地表のY方向およびX方向の加速度によく似ている。曲げひずみと屋上および7階の加速度記録との対応については、時刻30秒以降に見られるような波形の建物の応答が曲げひずみ記録には見られず、建物固有の振動が杭の曲げひずみに及ぼす影響は小さいと考えられる。

4.3 地盤および建物の地震時挙動特性

図-7は、地盤、建物、地盤・杭基礎・建物の連成系の卓越周期を調べることを目的として計算した周波数伝達関数である。基盤（GL-40m）に対する地表の伝達関数から、当該地盤の1次固有周期はX方向が1.00秒、Y方向が約0.9秒であることが分かる。また、地下1階に対する屋上の伝達関数より、地階を完全固定とした場合のX方向の1次周期は1.36秒、2次周期は0.45秒、Y方向の1次周期は1.40秒、2次周期は0.45秒であることが分かる。

これに対して、基盤に対する屋上の伝達関数より、地盤・杭基礎・建物連成系の1次周期としてX方向が1.39秒、Y方向が1.42秒、2次周期としてX、Y方向ともに0.45秒が読みとれる。建物の1次周期（X方向：1.36秒、Y方向：1.40秒）に対する連成系の1次周期（X方向：1.39秒、Y方向：1.42秒）の周期の伸びは、地盤・杭基礎系の動的相互作用の影響によるものである。

ところで、図-7の基盤に対する地表と地下1階の伝達関数はきわめて良く似ており、地表の伝達関数にも連成系の1次周期（X方向：1.39秒、Y方向：1.42秒）に対応する周期でピークが現われている。これは、図-1に示したように地表の加速度計が建物に近接して設置されているためであり、地表の加速度記録は建物の影響を受けていることが分かる。動的相互作用現象を議論する場合、地盤応答には建物の振動の影響を受けない自然地盤の応答を対象とする必要がある。そこで、ここでは地

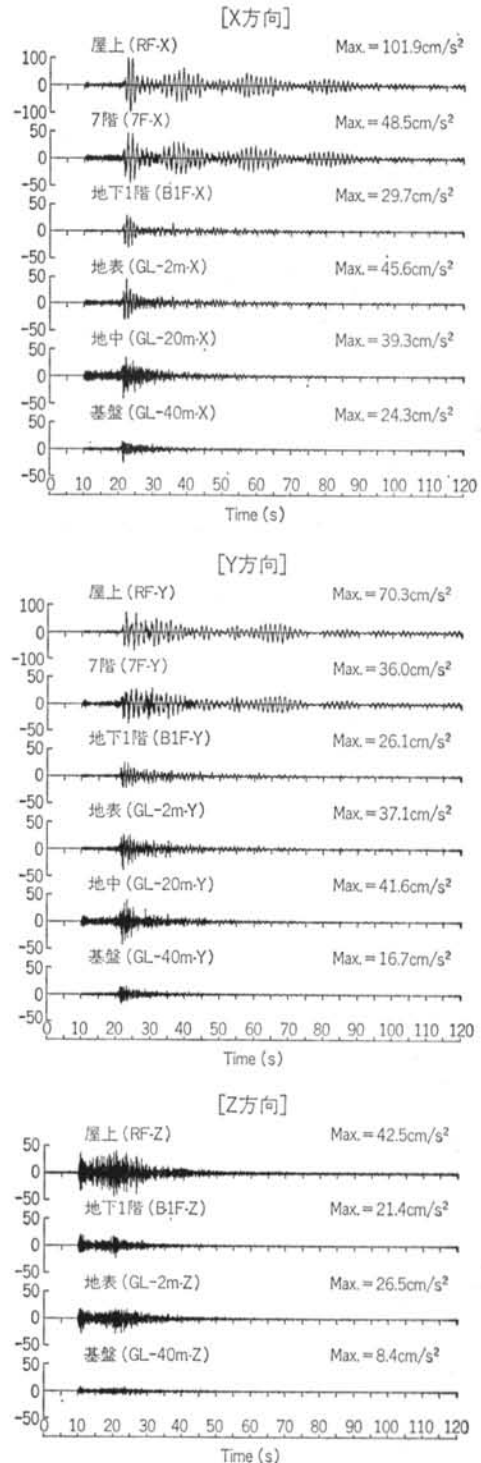
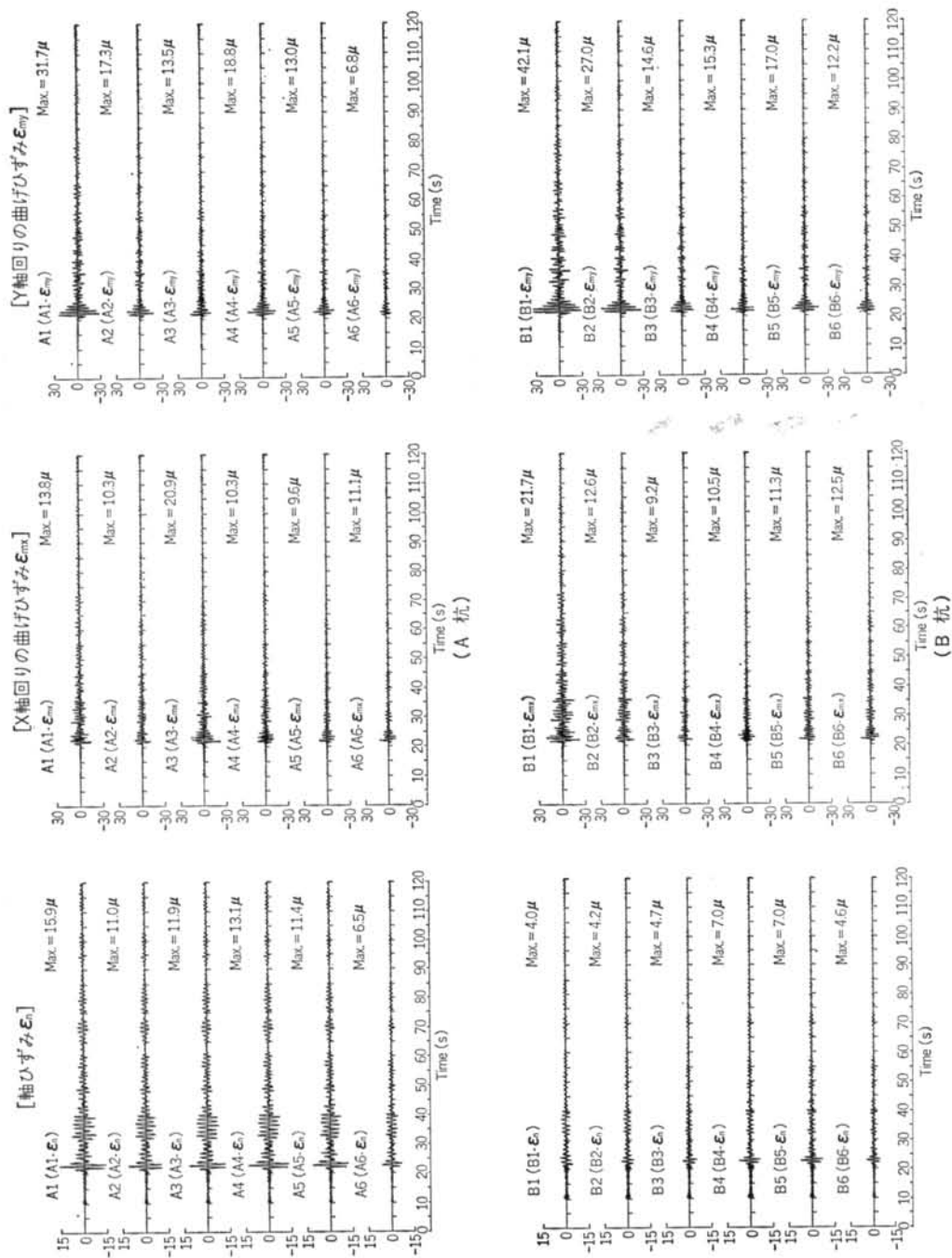


図-5 No.47地震 ($M=5.7$, $D=90\text{km}$, $l=32\text{km}$) による地盤および建物の加速度記録



図—6 No.47地震による杭の軸ひずみおよび曲げひずみ記録

盤応答を重複反射理論に基づく数値解析により推定し、これを用いて本建物の地震応答に及ぼす動的相互作用の影響を考察することとする。

図-8は、基盤に対する屋上の伝達関数(実線:屋上/基盤)および屋上と地下1階の伝達関数に、推定した地表の伝達関数を掛けて求めた結果(破線:屋上/地下1階×地表/基盤)を比較したもので、屋上の応答に関して前者は動的相互作用の影響がある場合、後者はそれ

がない場合の結果を表わしている。両者の差異について1次周期のずれに着目すると、動的相互作用の影響がある場合は、それが無い場合よりもわずかに長周期化した結果となっていることが確認できる。また、1次周期に対する倍率については、動的相互作用の影響がある場合の方が、無い場合より大きめの値をとっていることが分かる。

支持層まで39mと深い軟弱地盤に建設された建物であ

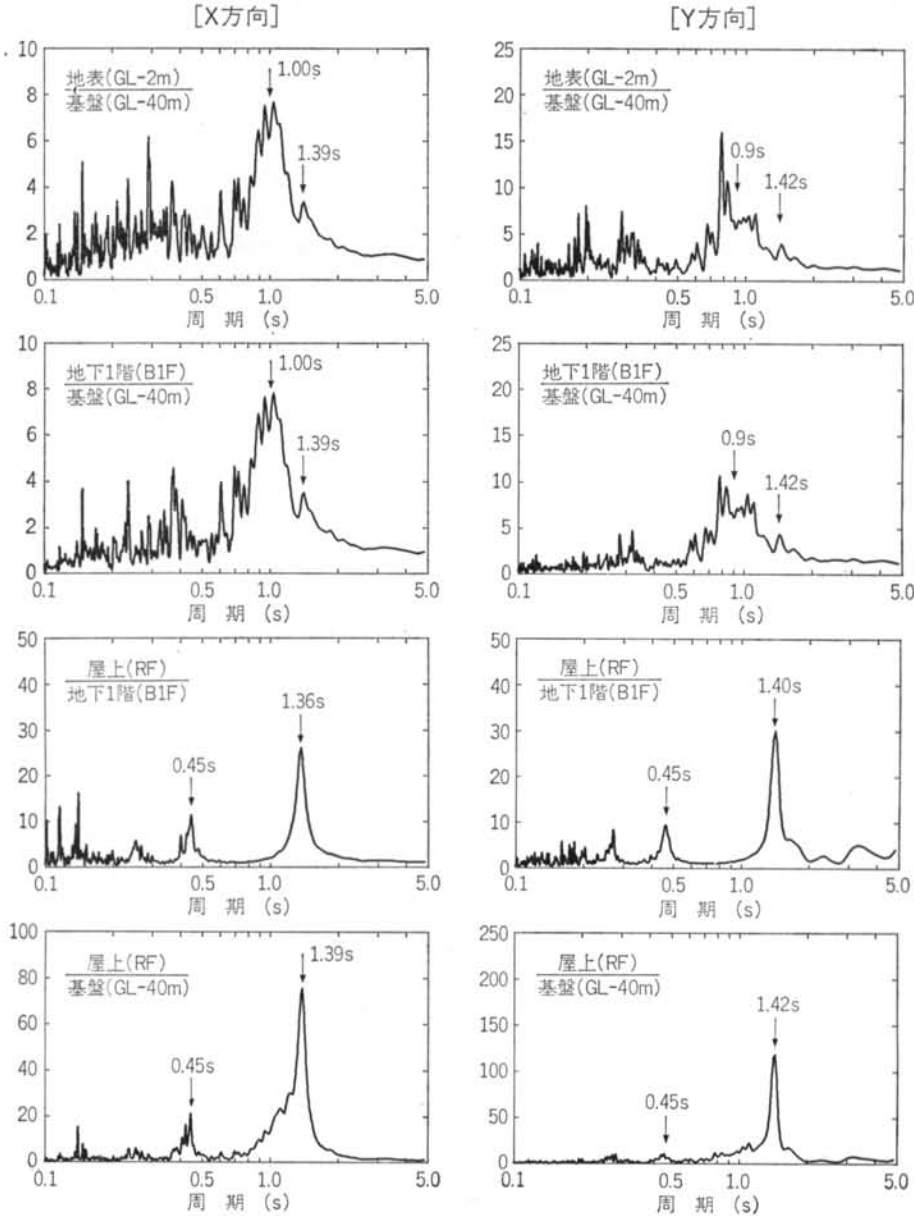


図-7 基盤に対する地表および建物の周波数伝達関数

るにもかかわらず、動的相互作用の影響による連成系の周期の伸びはX方向が0.03秒(周期の比は1.02)、Y方向が0.02秒(周期の比は1.01)とかなり小さい。これは、地盤の1次周期(X方向:1.00秒、Y方向:0.9秒)に対して建物の1次周期(X方向:1.36秒、Y方向:1.40秒)が長いことによるものであり、もしこの建物の1次周期が地盤の1次周期より短い場合、動的相互作用の影響による周期の伸びは0.03秒より大きくなる¹²⁾¹³⁾。一方、建物の2次周期(X、Y方向とも0.45秒)に対しては連成系に周期の伸びは見られず、高次モードになるに従い動的相互作用の影響は小さくなる事が分かる。

4.4 基礎杭の地震時挙動特性

図-9は、基盤の加速度に対するB杭の曲げひずみの周波数応答関数を示したものである。曲げひずみの周期特性は、杭頭部から杭先端部まで地盤の1次固有周期に対応する1.0秒付近でピークが見られ、その振幅は杭頭部(B1)と杭先端部(B5、B6)で大きく、杭中間部で小さい。また、杭頭部では地盤・杭基礎・建物連成系の1次固有周期に対応する1.4秒付近でも小さなピークが現われているが、杭先端部にはこの周期成分にピークは見

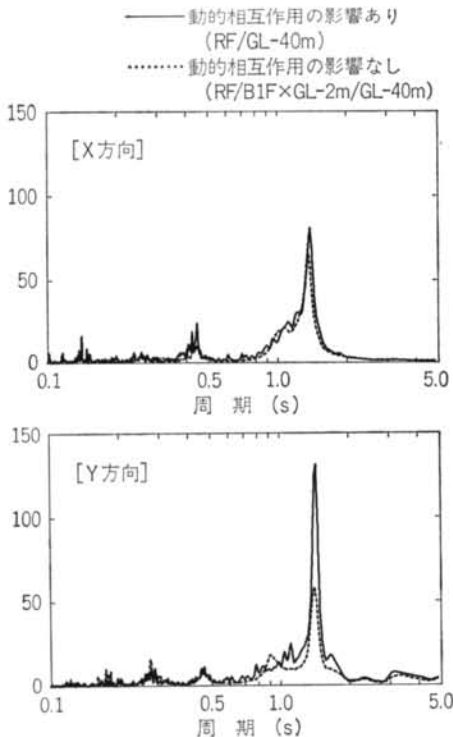


図-8 動的相互作用の有無の違いによる屋上の周波数応答関数の比較

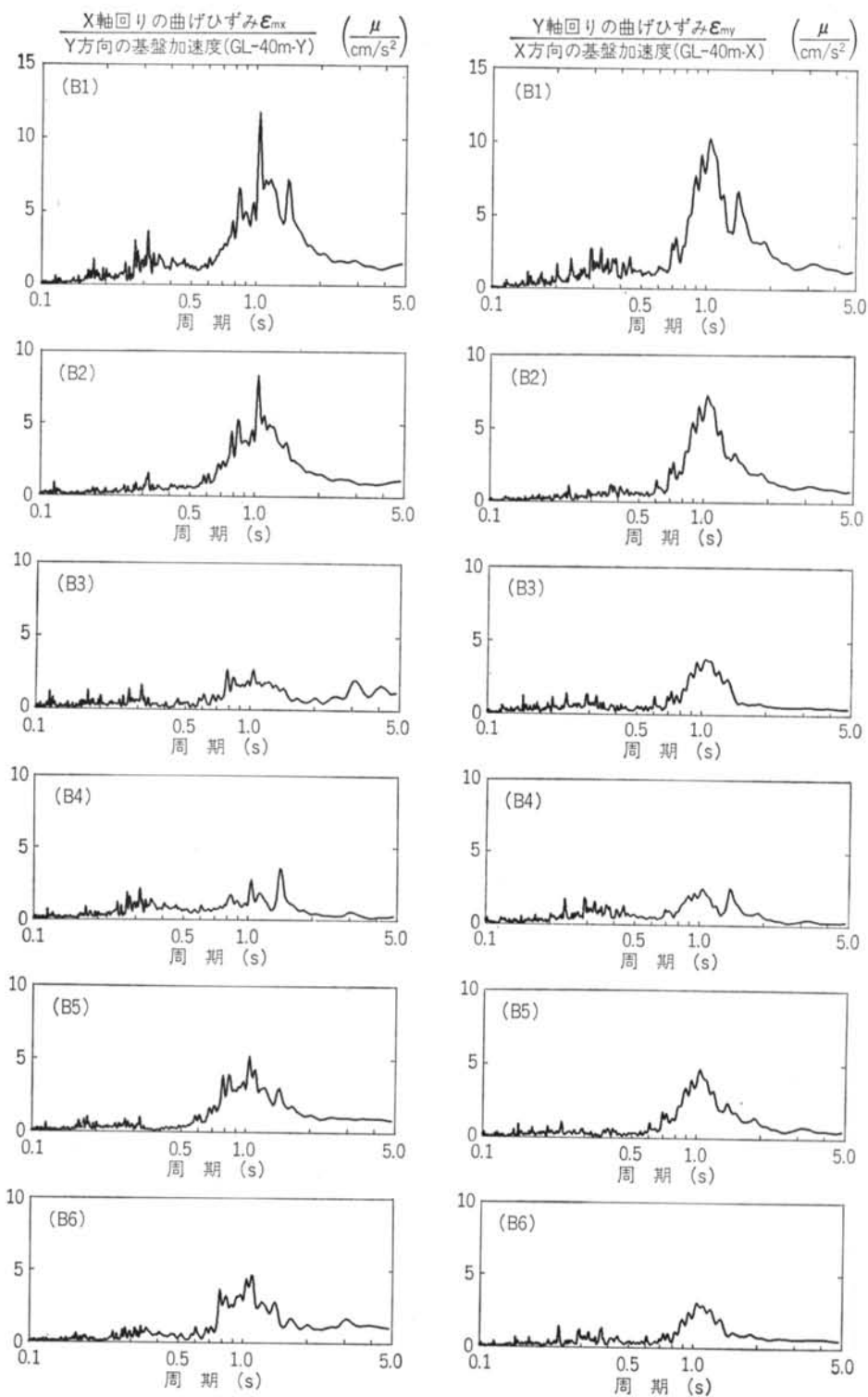
られない。これより、杭の曲げひずみは地盤震動に大きな影響を受け、杭頭部ではさらに建物の慣性力の影響が加えられているものと理解できる。

ところで、筆者らが軟弱地盤に建設された道路橋橋脚基礎杭で実施した地震観測によると、杭頭部の曲げひずみは地盤震動の影響が小さく、上部構造物の慣性力の影響が支配的であり⁹⁾、本地震観測による結果と異なっている。その理由として、本建物は地下階がGL-7mの深さまでであるのに対して、道路橋橋脚の杭頭位置はGL-2.5mと浅く、この構造物の埋込み深さの違いによって構造物の振動成分が地盤中に逸散する程度が異なるため、両者の地震観測結果に差異が発生したものと考えられる。

図-10は、杭頭部の軸ひずみと建物のロッキング動のフーリエスペクトルを比較したものである。X軸回りのロッキングは地下1階の北側(B1F-B)と中央部(B1F-A)の上下方向の加速度から変位を求め、その相対差を2点間の距離で除すことにより回転角を計算した。同様に、Y軸回りのロッキング動は地下1階の東側(B1F-C)と中央部(B1F-A)の上下動から求めた。図-10において、軸ひずみと建物のロッキング動はいずれも周期1.4秒付近で卓越し、スペクトルの形状も良く似ていることから、軸ひずみは建物のロッキング動の影響を大きく受けて発生している事が分かる。

図-11は、杭の深さ方向の軸ひずみおよび曲げひずみ分布の経時変化に関して、主要動の時刻20~25秒の5秒間について見たものである。軸ひずみは、建物のロッキング動の影響により、建物コーナー部のA杭の方が中央部のB杭より大きく、この傾向は杭先端部にまで及んでいる。A杭の軸ひずみとB杭のY軸回りの曲げひずみの分布形状について見ると、軸ひずみは杭頭部(A1)で大きく深さ方向に漸減することが分かる。これに対して、曲げひずみは杭頭部(B1)とせん断波速度 V_s が135m/sから240m/sに変化する地層境界(B5)で大きく、 V_s が変化しない杭の中間部(B2~B4)で小さくなり、途中でひずみの符号が反転することが分かる。

地震時において軸ひずみが深さ方向に漸減すること、ならびに曲げひずみが杭頭部と地盤剛性が変化する位置で大きくなるという傾向は他の地震観測事例^{9)~11)}と良く一致しており、軟弱地盤中の基礎杭の典型的な地震時挙動特性であるといえる。



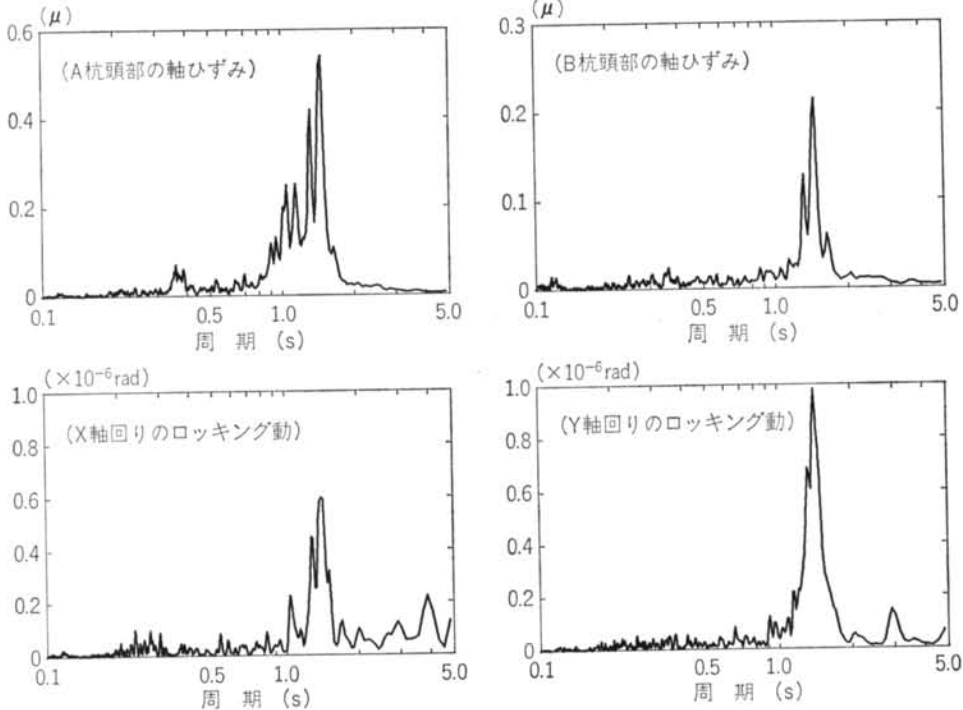
図一9 基盤加速度に対するB杭の曲げひずみの周波数応答関数

§ 5. 二次元有限要素法に基づく地盤震動による基礎杭の曲げひずみの検討

5.1 検討の概要

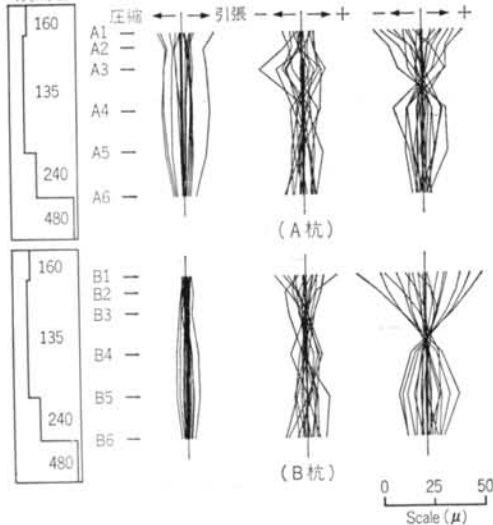
地震観測で得られた杭の曲げひずみ記録は、建物の慣

性力と地盤・杭基礎系の震動の両者の影響によって発生したものである。§ 4. で示したように、本建物では地盤震動の影響が建物の慣性力より大きいことが推定されたが、ここでは杭の曲げひずみ応答に及ぼす両者の影響の分離を試みる。検討は二次元有限要素法を用い、地盤・

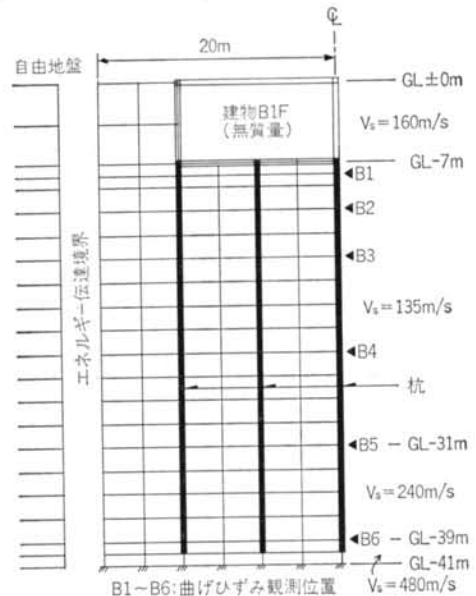


図—10 杭頭部の軸ひずみと建物のロッキング動のフーリエスペクトル

せん断波速度 V_s (m/s) 軸ひずみ (ϵ_x) 曲げひずみ (ϵ_{mx}) 曲げひずみ (ϵ_{my})



図—11 杭のひずみ分布の経時変化 (時刻20~25秒の5秒間の記録)



図—12 二次元有限要素法解析モデル

杭基礎系の震動による杭の曲げひずみ応答を算定し、解析結果と観測記録との差異を慣性力による影響とした。なお、解析はB杭のY軸回りの曲げひずみ ε_{my} に対して行ない、結果は基盤の加速度に対する杭の曲げひずみの周波数応答関数で考察した¹⁵⁾。

5.2 解析モデル

図-12は解析モデルを示したもので、X方向（長辺方向）の左側1/2をモデル化した。地下1階は無質量の剛な骨組構造とし、杭は奥行き4本分の質量および剛性を有する梁要素でモデル化した。境界条件として、地盤側方20mにエネルギー伝達境界を設け、地盤下方はGL-41mを完全固定とした。

なお、二次元有限要素法を地盤・杭基礎系の解析に適用する場合には、地盤の奥行き解析幅を適切に与える必要があるが、解析幅を一義的に決める方法がないことから、ここでは建物の奥行き幅24.8mを基本として、その幅の0.5倍(12.4m)、1倍(24.8m)、2倍(49.8m)、5倍(124m)の4ケースについて検討した。

5.3 解析結果および考察

図-13は、B杭のY軸回りの曲げひずみ ε_{my} の周波数応答関数について、解析結果と観測記録との対比を行なったものである。観測記録の卓越周期1.00秒と1.39秒は、それぞれ地盤および連成系の1次固有周期に対応している。観測記録と解析結果との差異を建物の慣性力に

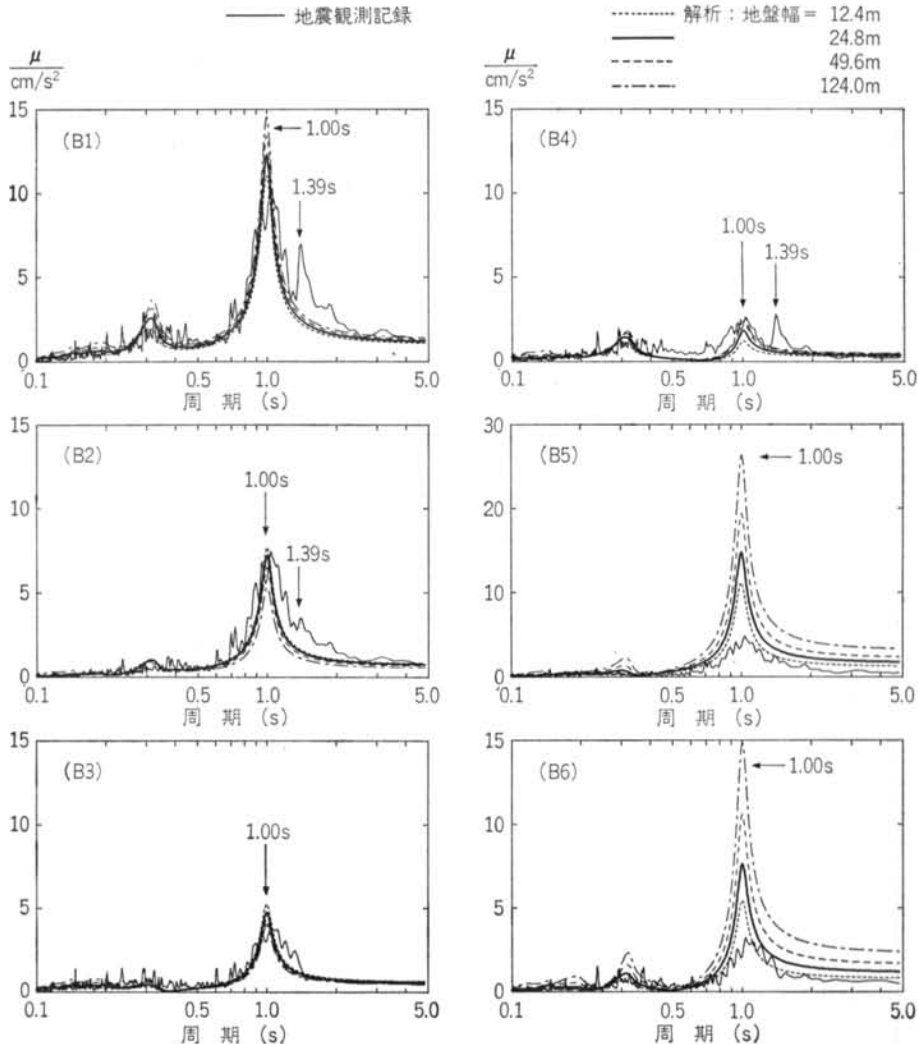


図-13 B杭のY軸回りの曲げひずみ ε_{my} の周波数応答関数（観測記録と解析結果の比較）

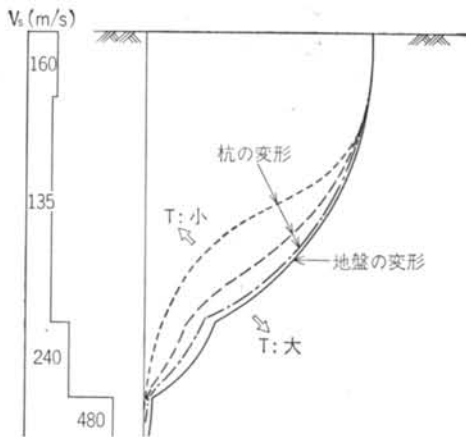


図-14 地盤奥行き解析幅 T と杭の変形の関係

よる応答と考えると、杭の曲げひずみ応答は殆どの周期領域で地盤震動の影響が支配的になっているといえる。

ところで、地盤の奥行き解析幅 T を変えるとすることは、杭と地盤の剛性比を変えることに相当し、 T を大きくすることは杭の変形に及ぼす地盤の影響度を大きくすることに等しい。図-14は、 T の大きさと杭の変形の関係を示したもので、地盤のせん断波速度 V_s が変化する杭先端部(B5, B6)では、 T が大きくなるに従い杭の変形は地盤の変形に近づくことになり、その結果杭の曲げひずみは増大する。一方、杭頭部の変形は地盤の変形に追随するため、曲げひずみは T の変化には大きく左右されない。

また、B5 および B6 の解析結果は観測記録より大きくなっていることが分かる。これらの位置(GL-31mとGL-39m)は V_s の値がそれぞれ135m/sから240m/s、および240m/sから480m/sに変化する地層境界であるが、実際の地層構成やせん断波速度は徐々に変化しているものと考えられる。地層の剛性が徐々に変化する場合、杭の曲げひずみは地層の剛性が急激に変化する場合と比較して小さくなるが、解析では地層の剛性を急激に変化させているため、観測記録よりも大きな結果を与えたものと考えられる。

<参考文献>

- 1) 例えば、田治見宏：“深い基礎を有する構造物の地震時応答について” 第2回日本地震工学シンポジウム講演集(1966年10月) pp. 255~260
- 2) 例えば、J. Penzien, C.F. Scheffery & R.A. Parmelee: “Seismic Analysis of Bridges on Long Piles” Journal of Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol. 90, No. EM3 (1964) pp. 223~254
- 3) 例えば、日本建築学会地震時杭委員会編：“杭基礎の水平抵抗および振動挙動に関する研究” 日本建築学会(1965年5月)

§ 6. おわりに

杭支持建物における地震観測および常時微動測定の記事に基づき、地盤、建物および基礎杭の地震時挙動特性を検討し、建物および基礎杭の地震時挙動に及ぼす動的相互作用の影響に関して考察を行なった。その結果、以下に示す結論を得た。

(1)建物の1次固有周期が地盤の1次固有周期より長い場合、動的相互作用の影響による地盤・杭基礎・建物連成系の周期の伸びは小さい。本建物では、建物と地盤の1次固有周期の比はX方向が1.36(1.36秒/1.00秒)、Y方向が1.56(1.40秒/0.90秒)であり、連成系の1次固有周期の伸びはX、Y方向それぞれ0.03秒および0.02秒であった。

(2)基礎杭の地震時曲げひずみは杭頭部と地盤剛性が変化する位置で大きく、両者の中間部で小さい。また、軸ひずみは建物のロッキング動の影響を大きく受け、建物コーナー部の杭で大きく、中央部の杭で小さい。

(3)本建物のように深い地下階を有する建物では、基礎杭の地震時曲げひずみは地盤震動に支配され、基礎の深さが浅い建物と比較して慣性力による影響は小さい。

軟弱地盤に建設される杭基礎構造物の耐震設計において、動的相互作用の影響をどのように評価するかによって、構造物ならびに基礎杭の耐震安全性の評価が大きく異なってくる。特に杭の耐震設計においては、現行の設計指針の殆どが地盤震動の影響を考慮していないのが実状であるが、本研究の結論から構造物の慣性力のみならず、地盤震動の影響を正しく評価することが必要不可欠であると考えられる。そのため、地盤震動の影響を杭の耐震設計法にいかにか簡便な形で反映させるかが今後の検討課題であるといえよう。

謝辞 地震観測を実施するに当たり、清水地所株式会社はじめ当社横浜支店および設計本部など、関係各位に多大な御配慮を頂いた。記して、感謝の意を表わす次第である。

- 4) 江刺靖行：“杭基礎の耐震設計法に関する基礎的研究” 東北大学学位論文（1979年）
- 5) 浜田政則，石田修，前田宏：“基礎杭の地震時ひずみの観測” 第15回地震工学研究発表会講演概要（1979年7月）pp. 185～188
- 6) 阿部康彦，大木紀通，杉本三千雄，鈴木善雄，慈道順一，速水浩，広松猛：“軟弱地盤一杭一建物の地震観測” 第6回日本地震工学シンポジウム講演集（1982年11月）pp. 1545～1551
- 7) 鈴木啓之，杉正：“LNG 受入れ配管橋基礎杭の地震時挙動観測” 第38回土木学会年次学術講演会講演概要集 第I部門（1983年9月）pp. 707～708
- 8) 志波由紀夫，石田修，泉博允，横山正義：“貯水槽基礎杭の地震時挙動観測” 第20回土質工学研究発表会発表講演集（1985年6月）pp. 777～780
- 9) 大平彰，田藏隆，中桢新，清水勝美：“軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究” 土木学会論文集 第362号（1985年10月）pp. 417～426
- 10) 小林勝巳，宗村美貞，山本稜威夫，野島博，平沢光春，鈴木敏夫：“10層住宅における地盤一杭一建物の地震観測（その2）地震時に杭に生じる応力について” フジタ工業技術研究所報 第24号（1988年）pp. 61～66
- 11) 林田敏弘，小駒勲，小嶋英治，川久保政茂，井手知良，豊嶋学：“杭支持低層建物の振動特性（その2）—上部構造物の加速度と杭の応力について—” 東急建設技術研究所報 No. 14（1988年）pp. 141～146
- 12) 田藏隆，清水勝美，佐藤忠信：“杭基礎・地盤系の動的相互作用現象の実証的把握” 第27回土質工学研究発表会発表講演集（1992年6月）pp. 1033～1036
- 13) 林田敏弘，小駒勲，小嶋英治，川久保政茂，井手知良，豊嶋学：“杭支持低層建物の振動特性（その3）—地盤，連成系の振動特性と杭の地震時応力ならびに力の伝達機構—” 東急建設技術研究所報 No. 15（1989年）pp. 115～124
- 14) 清水勝美，田藏隆，横田治彦，片岡俊一，佐武直紀：“軟弱地盤に建設された高層の杭支持建物に対する地震観測” 第25回土質工学研究発表会発表講演集（1990年6月）pp. 881～884
- 15) 清水勝美，田藏隆，横田治彦，片岡俊一：“建物基礎杭の曲げひずみ応答に及ぼす地盤震動の影響” 第27回土質工学研究発表会発表講演集（1992年6月）pp. 1037～1040

