

大規模地下構造物と近接建築物の地震時の動的相互作用

THE SEISMIC INTERACTION BETWEEN LARGE SCALE UNDERGROUND STRUCTURES AND NEIGHBORING BUILDINGS.

嶋村貞夫^{*}・松井 保^{**}・尾儀一郎^{***}・河西 寛^{*}

Sadao SHIMAMURA, Tamostu MATSUI, Ichiro OGI, Hiroshi KASAI

In big cities, overcrowding of urban function has extremely progressed so far in Japan, followed by sometimes constructing large-scale underground structures in deeper space. In this situation, it is essential to elucidate the seismic interaction between large-scale underground structures and neighboring buildings, because available structures might be affected by newly constructed underground structures, and vice versa. In this paper, dynamic response analysis, in which both non-linearities of ground and interface between structure and ground are considered, was carried out to discuss the seismic interaction above-mentioned. As the results, it was demonstrated that the interaction between them was not significant, and the deformation of surrounding ground and available structures were restrained by the large-scale underground structure.

1. はじめに

大都市では都市機能の過密化が著しく、空間を最大限有効に活用するため、市街地の道路下など既設構造物に近接して大深度・大規模な地下街が建設される機会が多くなってきている。このような場合、既設の建築物自体は耐震設計され、地震に対する耐力を十分に保有していたとしても、近接した大深度・大規模な地下街の建設により既設構造物の応答特性が変化し、設計時点では考えもしないような挙動が生じることが懸念される。

本論文では、大規模地下構造物の建設による地盤の応答特性の変化が近接建築物の地震時応答特性に及ぼす影響および、その逆の近接建築物が地下構造物に及ぼす影響を明らかにするため、幅50m×深さ50m程度の概ね矩形断面を有する大深度・大断面地下街（以降、大規模地下街と呼ぶ）が高層建築物に近接して新設される場合を想定し、地盤の材料非線形性および地下構造物と周辺地盤との剥離や滑動といった構造非線形性を考慮した地震応答解析を実施し、大規模地下街と近接建築物の地震時の動的相互作用について考察した。

2. 検討対象構造物と地盤構成

(1) 検討対象構造物の概要

検討の対象とした構造物は、図-1に示すような高層建築物とそれらに挟まれた地下街をイメージしたもの

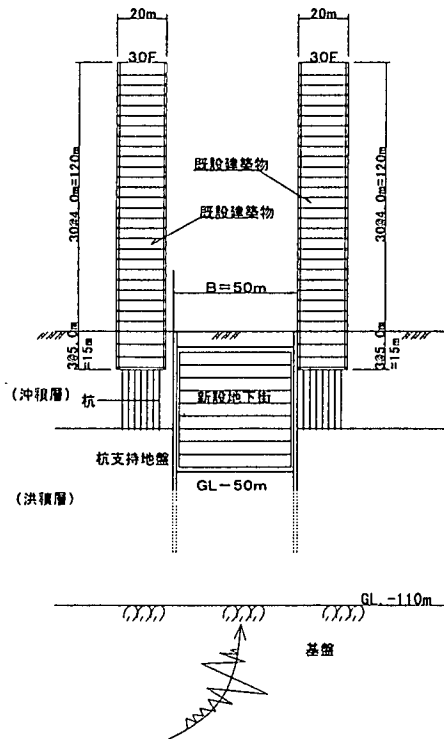
^{*}正会員 (株) 鴻池組 土木本部土木設計部

^{**}フェロー 工博 大阪大学教授 工学部 土木工学科

^{***}正会員 日本技術開発(株) 大阪支社環境防災部

のである。

地下構造物は幅 50m、深さ50m に及ぶ大深度・大断面の地下街で、壁厚2.0m、壁長110mのR C連壁が土留め壁として構築されている。地下街に近接する構造物は、地上30階、地下3階の高層建築物2棟を想定した。2棟の高層建築物の形状・構造は同一条件で、幅 20m、地上高120mで杭支持されている（支持層は、GL. -27 m の洪積砂礫層）。ただし、左右の建築物の近接の条件は離隔距離の違いによる影響を把握するために、右側は地下街と接しており、左側は地下街との間に5.0mの距離をおいている。



図— 1 検討対象構造物および地盤の概要

表— 1 地盤（平面ひずみ要素）

GL.(m)	柱状図	構成土質	密度 $\gamma(\text{kg/m}^3)$	ポアソン比 ν	地震時せん断弾性係数 G(MPa)	粘着力 C(MPa)	内部摩擦角 $\phi(\text{度})$
-5.5		砂	1,850	0.45	17.7	0.000	30
		粘土	1,650	0.49	80.4	0.026	0
			1,650	0.49	77.5	0.039	0
			1,650	0.49	72.6	0.053	0
			1,650	0.49	69.6	0.065	0
-24.0		シルト混り砂	1,850	0.45	98.1	0.000	40
-27.0		砂礫	2,000	0.45	166.7	0.000	45
			2,000	0.45	156.9	0.000	45
-36.0		粘土	1,700	0.49	107.9	0.147	0
-43.0		シルト混り砂	2,140	0.45	74.5	0.000	40
-50.0		砂・砂礫	2,170	0.45	176.5	0.000	45
-61.0		粘土	1,700	0.49	137.3	0.196	0
-72.0		砂	1,900	0.45	69.6	0.000	42
			1,900	0.45	63.7	0.000	42
-95.0		粘土	1,700	0.49	127.5	0.392	0
-110.0		基盤					

(2)地盤構成

検討の対象とした地盤は大阪の代表的な地盤を想定したもので、地表面より約30m までがN値2の粘土層を主体とした沖積層で、それ以深が洪積層で粘土層と砂層の互層構造になっている。表－1に実測データに基づいて設定した各地層の土質特性を示す。

3. 動的解析による地震時挙動の検討

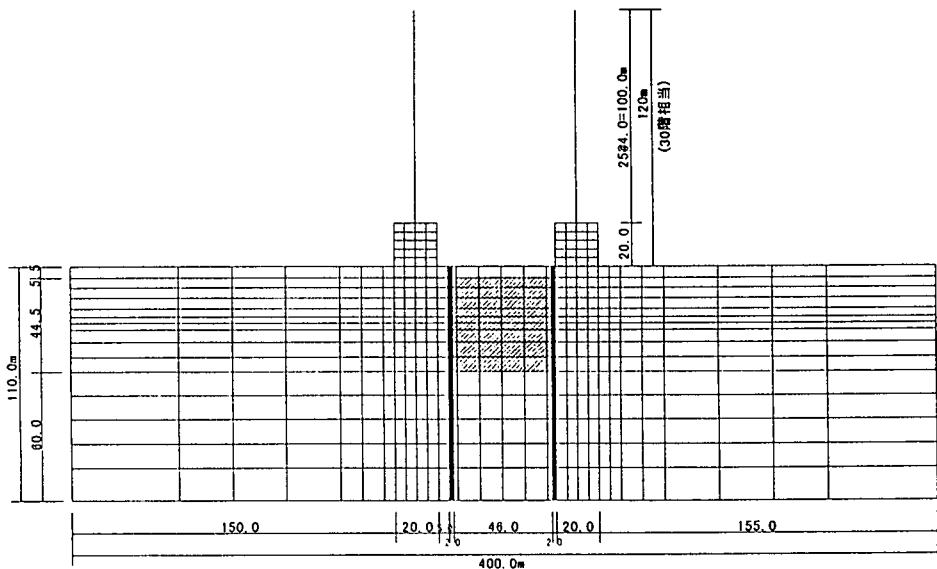
(1)解析手法

動的解析に使用したプログラムは、土岐らが開発した2次元非線形震動解析プログラム「7S-II」^{1)~2)}であり、このプログラムでは荷重伝達法により地盤の材料非線形性と地下街と周辺地盤との剥離や滑動といった構造非線形性を考慮した時刻歴応答解析が可能である。本論文では、大規模地下街と高層建築物の地震時の動的相互作用を明らかにするため、①地下街と高層建築物が近接して存在する場合、②高層建築物のみ存在する場合、③地下街のみ存在する場合の3ケースについて動的応答解析を実施した。

(2)解析モデル

解析領域は、GL. -110mの洪積砂層上面に設定した工学的基盤面より上部、地下街中心より左右それぞれ200mの範囲とした。図－2に地下街と高層建築物が近接して存在するケースの要素分割図を示す。基盤は剛基盤とし、側方境界は水平スライドとした。

地盤は、弾性－完全塑性体（降伏条件はモール・クーロンの破壊基準に従う）として扱い、平面ひずみ要素にモデル化した。地下街は平面ひずみ要素と平面骨組要素の複合構造（線形弾性体）にモデル化し、近接建築物は5階以下（地下部分を含む）を平面ひずみ要素（線形弾性体）、6階以上を解析自由度総数を減らすため一次元せん断梁（線形弾性体）にモデル化した。また、支持杭は平面骨組要素（線形弾性体）、RC連壁は平面ひずみ要素（線形弾性体）にモデル化した。地下街と周辺地盤との接触面、連壁と周辺地盤との接触面には、それぞれジョイント要素を配置し、構造物と周辺地盤との剥離や滑動現象を考慮した。



図－2 解析モデル

(3)入力物性値

表－1～表－6に解析に用いた地盤および構造物の諸特性を示す。近接建築物の諸特性は、同規模の実構造物を参考に設定したものであり、地上部分の1次と2次の固有周期はそれぞれ、3.39秒、1.12秒である。一方、仮想構造物である地下街の諸特性はこの近接建築物を参考に想定したものである。表－1に示す地盤のせん断弾性係数は等価線形解析（SHAKE）による地盤の地震応答解析結果の収束物性値で評価したもので、この条件での1次固有周期は2.06秒である。また、表－2～表－5に示す地下街および近接建築物の平面ひずみ要素と平面骨組要素の剛性は、コンクリート全断面有効として以下に示す考え方に基づいて設定した。

- a) 地下街の各階層に分布する壁・柱のせん断剛性は、平面ひずみ要素のせん断剛性でモデル化する(表－2)。
 - b) 5階以下の建築物における各階層のせん断剛性は平面ひずみ要素のせん断剛性でモデル化し、地下部分の側壁は軸剛性のみを考慮した骨組要素にモデル化する(表－3、表－5)。
 - c) 地下街の床と側壁、建築物の床は、軸剛性と曲げ剛性を考慮した骨組要素にモデル化する(表－4、表－5)。
- 表－2に示すRC連壁を表す平面ひずみ要素の弾性係数は、コンクリートのひび割れを考慮した曲げ剛性がコンクリート全断面有効時の50%程度と仮定し、壁体コンクリートの1/2の値とした。

なお、ジョイント要素の付着力、摩擦角は周辺地盤の粘着力および内部摩擦角で評価した。

表－2 地下街と連壁（平面ひずみ要素）

	密度 γ (kg/m ³)	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν
地下街部分	1,000	392	0.20
連続地中壁	2,500	13,729	0.20

表－3（1） 高層建築物（せん断梁要素）

階数	密度 γ (kg/m ³)	弾性係数 E (MPa)	断面積 A (m ² /m)	断面2次モーメント I (m ⁴ /m)
30F	400	98.1	20.0	1.07
29F～6F	200	98.1	20.0	1.07

表－3（2） 高層建築物（平面ひずみ要素）

階数	密度 γ (kg/m ³)	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν
5F～3F	200	12.3	0.25
2F	200	19.6	0.26
1F	200	29.4	0.27
地下	500	294.2	0.28

表－4 地下街の床版・側壁（骨組要素）

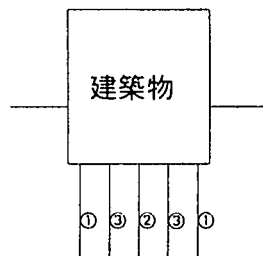
	弾性係数 E (MPa)	断面積 A (m ² /m)	断面2次モーメント I (m ⁴ /m)
床版 (GL-50m)	29,420	5.00	10.4
その他の床版	29,420	1.00	0.083
外壁	29,420	0.80	0.043

表－5 建築物の床版・側壁（骨組要素）

	弾性係数 E (MPa)	断面積 A (m ² /m)	断面2次モーメント I (m ⁴ /m)
2階以上	29,420	0.2	6.6×10^{-4}
1階	29,420	0.5	0.01
B1、B2	29,420	1.0	0.083
B3	29,420	3.0	2.25
外壁	29,420	0.6	≈ 0

表－6 建築物杭基礎（骨組要素）

杭番号	弾性係数 E (MPa)	断面積 A (m ² /m)	断面2次モーメント I (m ⁴ /m)
①	29,420	0.56	0.14
②		0.69	0.22
③		0.16	0.04



(4) 入力地震動および解析条件

工学的基盤面への入力地震動は、十勝沖地震（1968）の八戸記録のE W成分加速度波形を最大振幅150galに調整し、これを水平方向に入力した。応答解析はNewmark の β 法（ $\beta=1/4$ ）による時刻歴応答解析で、減衰定数は地盤の等価線形地震応答解析結果を考慮して10%に設定した。解析時間は $T=10.0$ 秒間であり、解析時間間隔は $\Delta T=0.005$ 秒とした。図-3に入力加速度波形を示す。

本論文では、地盤の降伏や接触面の剥離や滑動といった非線形問題を取り扱う為、地盤内あるいは接触面における常時の応力状態を算出し、この応力状態を初期応力として地震の外力を受けるという過程を経た。地盤およびジョイント要素の初期応力は、動的解析用モデルによる自重解析により算出した。自重解析では、地下水位（GL. -0.5m）以下の地盤および地下街の重量は水中単位体積重量を用い、建築物の重量は杭先端の節点集中荷重で与えた。また、地盤の自重が作用した状態で連壁が構築されるため、連壁と地盤の間には、ほとんどせん断応力が生じないと考えられる。これを表現するために、連壁の剛性はゼロに近い小さい値に設定するとともに、連壁両側面の節点は鉛直方向スライドとした。

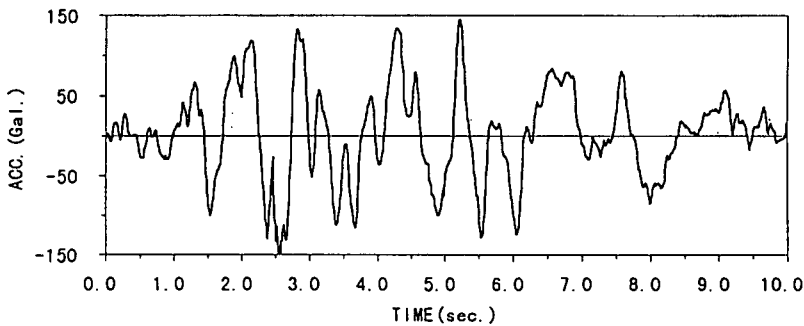


図-3 入力加速度波形

4. 大規模地下街と近接建築物の動的相互作用

(1) 地下街と近接建築物の応答変位

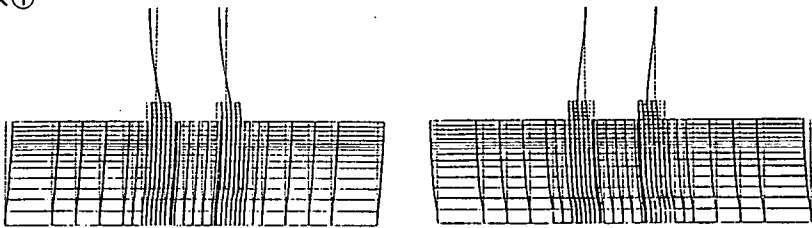
図-4は、地下街と高層建築物の有無をパラメータとした3ケースの解析結果より、地盤が右方向および左方向に大きく変形する時刻（(a)右方向： $t=3.00$ 秒、(b)左方向： $t=4.80$ 秒）における変形図を示したものである。この図より、地下街の変形は周辺地盤の変形とほぼ同一であり、地下街は周辺地盤の変形に支配された挙動を呈していることが分かる。この挙動の特徴は、高層建築物が近接して存在しても大きな違いは認められない。

高層建築物の地下部分も地下街と同様に周辺地盤と一体となって挙動しているが、高層建築物の地上部分は地盤の振動方向と逆の方向に振動している。このような挙動の特徴は地下街が近接して存在しても大きな違いは認められないようである。

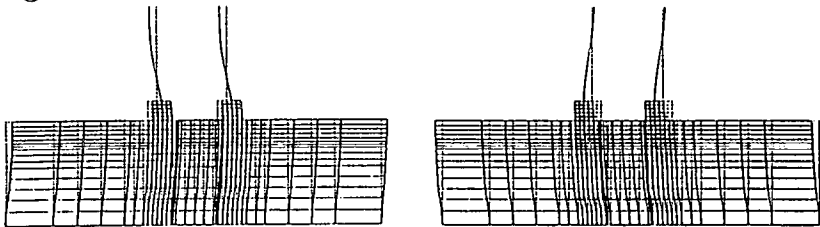
表-7は、地盤および構造物の代表的なポイントの水平方向最大応答変位量を示したものである。地下街周辺（建築物地表面、地下街上部地表面）の最大応答変位量は、地下街がある場合の方がない場合よりも若干ではあるが小さくなっており、地下街は地盤の変形を抑制する傾向にあることが伺える。このため、高層建築物の最大応答変位量も地下街がある場合の方がない場合よりも若干ではあるが小さくなっている。これは、周辺地盤よりも比重が小さく、剛性が大きい地下街が建設されることによって、地下街による変形拘束作用の影響で周辺の応答が低減したものと考えられる。

なお、今回の条件では、ジョイント要素の相対変位量は建築物と連壁天端との間で最大となったが、その大きさはズレ、開きともミリオーダーの小さい値であり、地下街や近接建築物の変形挙動に及ぼす影響は小さいと考えられる。

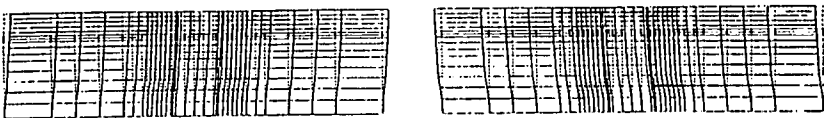
解析ケース①



解析ケース②



解析ケース③



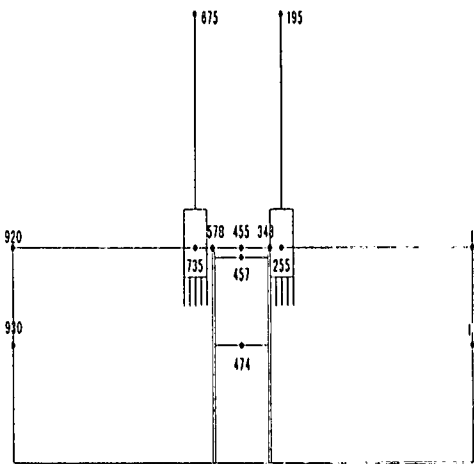
(a) t=3.00秒

(b) t=4.80秒

図－4 変形図

表－7 地盤および構造物の最大応答変位

位置	節点 番号	単位(cm)		
		地下街と建築物 解析ケース①	建築物のみ 解析ケース②	地下街のみ 解析ケース③
側方地盤	1	13.1	14.3	13.8
地表面	920	13.8	14.6	14.3
側方地盤	11	10.3	11.1	10.9
GL-50m	930	10.5	11.1	10.9
建築物天端	195	45.6	46.9	—
	675	45.3	46.4	—
建築物地表面	255	12.5	13.6	13.1
	735	12.4	13.7	13.3
地下街上部 地表面	455	12.5	13.8	13.0
地下街天端	457	12.4	—	13.0
地下街下端	474	10.5	—	11.0
連壁天端	343	12.5	—	13.2
	578	12.5	—	13.1



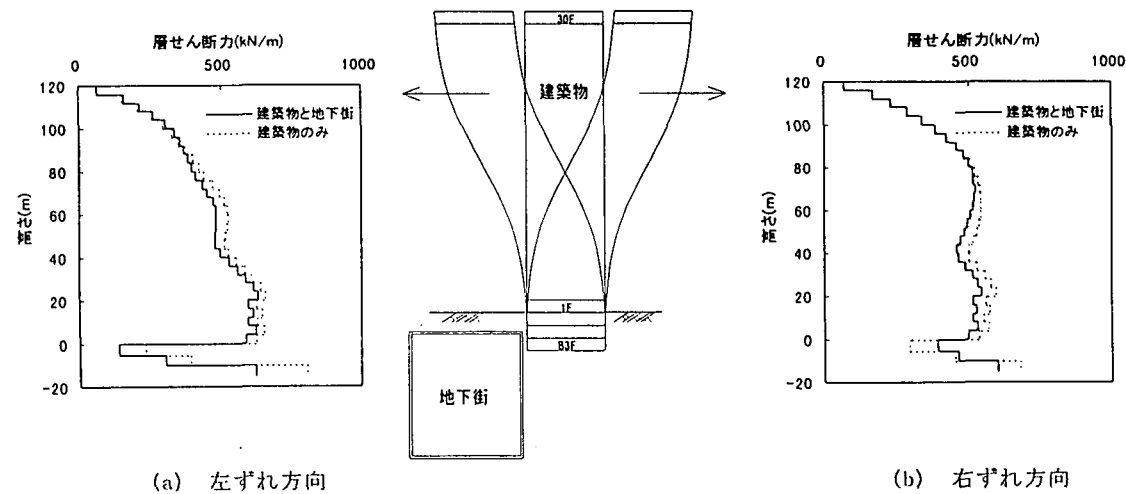
(2)地下街が近接建築物の地震時断面力に及ぼす影響

図－５～図－７は、地下街の有無による高層建築物の地震時断面力（本論文では地震動による常時断面力からの変化量を表す）を比較して示したものである。図－５は地下街と接する右側の近接建築物の各階に生じる地震時せん断力（以降、層せん断力と呼ぶ）の最大値の高さ方向分布であり、実線が地下街と高層建築物が近接して存在する場合、破線が高層建築物だけが存在する場合を表す。また、(a)が左ずれ方向の最大層せん断力の分布を、(b)が右ずれ方向の最大層せん断力の分布を表す。同様に、図－６と図－７は地下街に接する右側近接建築物の基礎杭（左端杭、中央杭および右端杭の３本）に生じる地震時最大曲げモーメントと最大軸力で、白抜きが地下街と高層建築物が近接して存在する場合、ハッチ付きが高層建築物だけが存在する場合を表す。また、曲げモーメントの符号は杭の右側面が引張りの場合を正、軸力は圧縮を正として表示した。

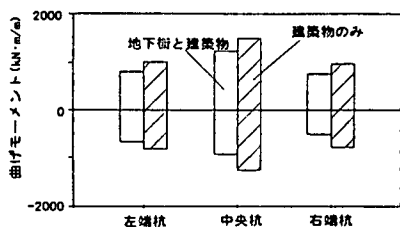
高層建築物だけが存在する場合の層せん断力は、図－５に示すように、地上部では２次モードの影響により12階付近で若干くびれた釣形分布を呈し、地下部分では１階の層せん断力の1/2～1/3程度に一旦減少した後、深さとともに増大する。これに対し、地下街が近接して存在しても層せん断力は増大することなく、全般的に小さくなる。減少の度合いは、地上部よりも地下部で大きく、また地上部では高さが低いほど大きくなる傾向を示す。これらの現象は、前述したように地下街が建設されたことによって、周辺地盤の水平方向の応答が低減したためと考えられる。

基礎杭の地震時曲げモーメントは、図－６に示すように地下街が近接して存在する方が１～２割程度小さくなる。一方、地震時軸力は、図－７に示すように地下街が近接して存在する方が２～３割程度大きくなる。これは、地下街が建設されることによって、周辺地盤の水平方向変位が減少したことにより曲げモーメントが減少するが、地下街のロッキングにより生じた周辺地盤の鉛直方向変位により軸力が増大したものと考えられる。

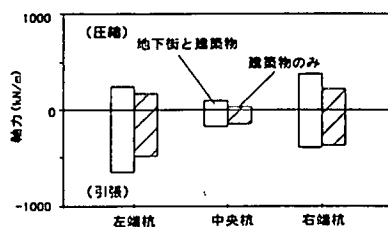
今回の条件では、地下街の左側建築物（地下街との離間距離5.0m）の層せん断力は、地下街と接する右側建築物と地上部で殆ど一致しており、地下部分において僅かな差異が認められる程度である。また、地下街の左側建築物の基礎杭の曲げモーメントも右側建築物とほぼ一致し、軸力も地下街に最も近い杭を除けばほぼ一致している。したがって、今回と同様な条件であれば、建築物と地下街との離間距離が5.0m程度以下の場合、近接建築物の地震時断面力に及ぼす離間距離の影響は小さいと考えられる。



図－５ 地下街が建築物の最大層せん断力に及ぼす影響



図—6 地下街が基礎杭の最大曲げモーメントに及ぼす影響

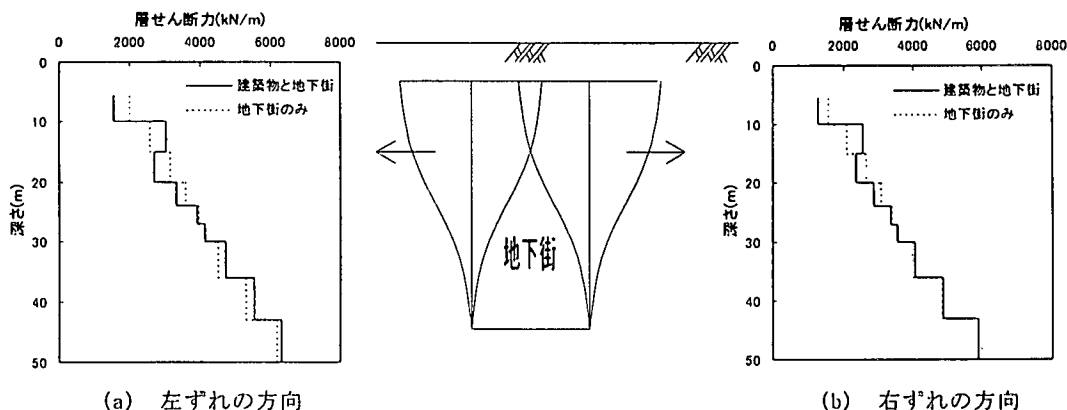


図—7 地下街が基礎杭の最大軸力に及ぼす影響

(3) 近接建築物が地下街の地震時断面力に及ぼす影響

図—8～図—12は、高層建築物の有無による地下街の地震時断面力を比較して示したものである。図—8は地下街に生じる地震時最大層せん断力の分布図で、実線が地下街と高層建築物が近接して存在する場合、破線が地下街だけが存在する場合であり、(a)が左ずれ方向の最大層せん断力の分布を、(b)が右ずれ方向の最大せん断力の分布を表す。同様に、図—9と図—10は近接建築物と接する地下街右側壁に生じる地震時最大軸力と最大曲げモーメントの分布で、(a)が引張軸力、側壁の内空側が引張りの曲げモーメントの場合、(b)が圧縮軸力、地盤側が引張りの曲げモーメントの場合を表す。地下街の床版に生じる地震時最大軸力の分布のうち、図—11が頂版(GL. -5.5m)の場合、図—12が底版(GL. -50m)の場合であり、ともに(a)が圧縮軸力を、(b)が引張軸力を表す。

地下街だけが存在する場合の層せん断力は、図—8に示すように深さにほぼ比例して増加し、最下層で最大となる特徴がある。これは、地下街が周辺地盤の変形に追従して挙動するため、地盤のせん断ひずみの分布に応じて層せん断力が発生したものと考えられる。建築物が近接して存在する場合の層せん断力は、GL. -15mの建築物底面深さよりも浅い部分で2～3割程度増大する場合も認められるが、これより深い部分は殆ど変化しない。同様に、図—11と図—12に示す地下街床版の軸力に関しても、建築物底面よりも浅い所にある頂版軸力(図—11)には変化が認められるが、建築物底面よりも35m深い底版軸力(図—12)には殆ど変化が認められない。これらの現象は、近接建築物による地盤の応答特性の変化によって、建築物底面深さよりも浅い部分の周辺地盤の変形が若干減少し、建築物底面よりも深い部分では、近接建築物の影響が小さく、周辺地盤の変形が殆ど変化しないためと考えられる。



図—8 近接建築物が地下街の最大層せん断力に及ぼす影響

一方、地下街だけが存在する場合の側壁の軸力と曲げモーメントは、図-9と図-10に示すように地下深部ほど大きくなる。特に、曲げモーメントは底版付近で急激に増加する特徴が認められるが、これは底版の曲げ剛性がその他の床版に比べると約125倍大きいため、側壁は底版を固定端とした片持ち梁的な状態になっているためと考えられる。建築物が近接して存在する場合、圧縮軸力と内空側が引張となる曲げモーメントは全般的に減少するが、引張軸力と地盤側が引張の曲げモーメントは逆に増加する傾向を示す。しかしながら、上記の層せん断力や床版軸力のような明確な深度による影響の違いは生じないようである。

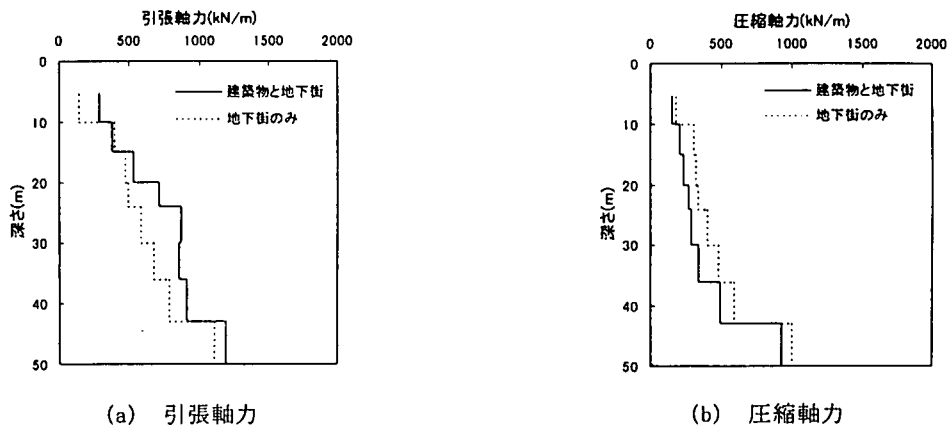


図-9 近接建築物が地下街右側壁の最大軸力に及ぼす影響

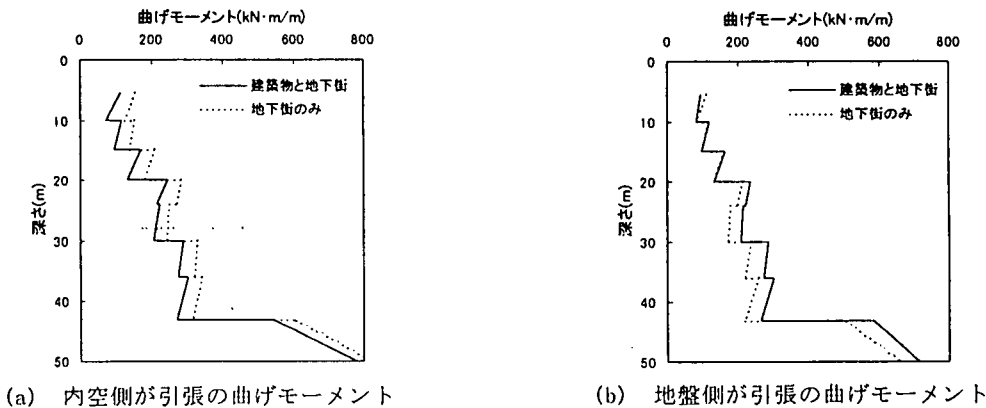


図-10 近接構造物が地下街右側壁の最大曲げモーメントに及ぼす影響

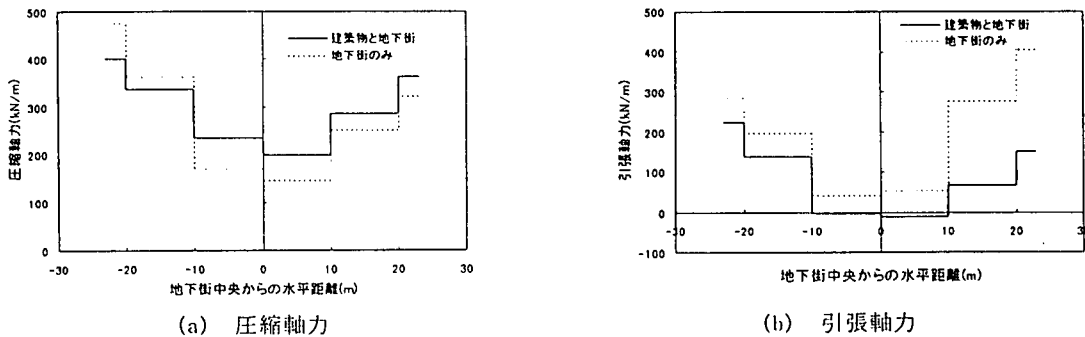
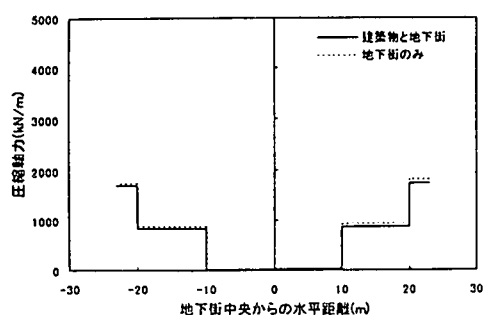
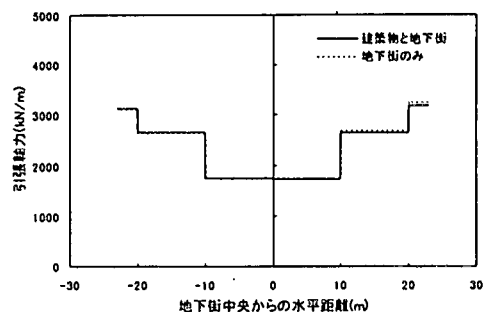


図-11 近接建築物が地下街頂版の最大軸力に及ぼす影響



(a) 圧縮軸力



(b) 引張軸力

図-12 近接建築物が地下街床底版の最大軸力に及ぼす影響

5. まとめ

本論文では、大規模地下街の建設による地盤の応答特性の変化が近接建築物の応答特性に及ぼす影響と、反対に近接建築物が地下街の応答特性に及ぼす影響について、地盤の材料非線形性と構造物と地盤との接触面における構造非線形性を考慮した2次元非線形震動解析により検討した。

この結果、既設高層建築物間に幅50m×深さ50m程度の大規模地下街を新設しても、動的相互作用による影響は小さく、近接建築物に特異な変形モードは生じず、かえって近接建築物の変形や層せん断力は減少する傾向にある。これは建築物の地下部分や地下街の地震時挙動は、周辺地盤の変位挙動に支配され、地盤とほぼ同程度の変形が生じるが、地下街は周辺地盤より比重が軽く、見かけの剛性が同程度～数倍程度高いため、周辺地盤の変形を抑制する傾向にある。このため、近接建築物の地下部分の変形を抑制するとともに、その結果として、地上部分の応答も若干小さくなるものであり、耐震上問題となることはなさそうである。しかしながら新設の地下街の施工時のように、周辺地盤より見かけの剛性が極端に低くなる場合は、近接構造物の応答が大きくなることが予想されるため、検討が必要と考えられる。

一方、新設の地下街は、近接建築物の存在により、特異な変形モードが生じることはないが、動的相互作用により、地下街の側壁や頂版の断面力が若干増加する部分もあり、耐震設計上配慮すべき場合も考えられる。

最後に、本論文は建設コンサルタンツ協会近畿支部「地盤と基礎研究委員会」の研究成果³⁾をとりまとめたものであり、非線形動的解析を行うにあたりご指導いただいた京都大学土岐教授と貴重なご意見をいただいた関係各位に謝意を表する。

6. 参考文献

- 1) 土岐憲三・佐藤忠信・三浦房紀：強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動，土木学会論文報告集，第302号，pp31～41，1980。
- 2) 土岐憲三・佐藤忠信：地震一構造物系の非線形地震時応答解析，土木学会論文報告集，第317号，pp. 61～68，1982。
- 3) (社)建設コンサルタンツ協会近畿支部：「地盤と基礎研究委員会」第2次報告書(その2)市街地における大規模地下構造物の事例研究(近接施工グループ/耐震グループ)，1992。