

地盤の S 波速度を変化させた場合の 地下街と高層ビルの地震時相互影響について

有賀義明¹・柿崎辰圭²・猪子敬之介³・竹内幹雄⁴・小黑明⁵・浅賀裕之⁶・依田昌宏⁷・竹原和夫⁸

¹弘前大学大学院理工学研究科教授

(〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

E-mail: y-a-arig@cc.hirosaki-u.ac.jp

²青森県企画政策部 (〒030-8570 青森県青森市長島 1 丁目 1-1)

E-mail: tatsuyoshi_kakizaki@pref.aomori.lg.jp

³札幌市水道局 (〒060-0041 札幌市中央区大通東 11 丁目 23 番地)

E-mail: keinosuke.inoko@city.sapporo.jp

⁴株式会社日水コン (〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-2-1)

E-mail: takeuti_m@nissuicon.co.jp

⁵株式会社日水コン (〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-2-1)

E-mail: oguro_a@nissuicon.co.jp

⁶株式会社 JP ビジネスサービス (〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

E-mail: asaka@jpbs.co.jp

⁷株式会社 JP ビジネスサービス (〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

E-mail: masahiro_yoda@jpbs.co.jp

⁸JIP テクノサイエンス株式会社 (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 1-2-5)

E-mail: kazuo_takehara@cm.jip-ts.co.jp

地下では地上に比べて地震動の加速度振幅が小さい傾向があるため、一般に、地下は地上よりも耐震上有利であると思われる。しかし、地上構造物と地下構造物の地震時の相互影響によっては、地震被害が連鎖し、両者の地震時安全性に大きな影響が及ぶ可能性があるとして推察される。そこで、地下に地下街があり、地下街の両側に高層ビルが建っている場合を想定して三次元動的解析を行い、地下街と高層ビルの地震時の相互影響について検討した。地盤の S 波速度を変化させた場合にどのような影響が生じるかを解析した結果、地盤が S 波速度を低く設定した場合、高層ビルの変位振幅は増大し、地下街と高層ビルの接続では地震時引張応力が増大するとの結果を得た。

Key Words : Seismic safety, mutual effects, 3-D dynamic analysis, underground shopping arcade, high buildings

1. はじめに

世界有数の地震被災国である我が国では、地上構造物のみならず、地下構造物の耐震性能の確認と確保が重要である。一般に、地上に比べて、地下では地震動の加速度振幅が小さい傾向があるため、地下は地上よりも耐震上有利であると思われる。しかし、地下の地盤構造によっては地震時の加速度や変位が特異な増幅を示すことが想定される¹⁾。また、従来の耐震設計では隣接する構造物間の影響を考慮することなく、個々の構造物毎に耐震設計が個別に行われるのが通例であるが、隣接する構造物間の地震時の相互影響によっては、それぞれの耐震性能に大きな影響が及ぶことも想定される²⁾。

このような観点から、地下構造物と地上構造物の地震時の相互影響を明らかにし、隣接する構造物の相互の影響を考慮した耐震性能照査技術と地震対策技術を確立することを目的として、地下に地下鉄と地下街があり、地下街の両側に高層ビルが建っている場合を想定して三次元動的解析を行い、地盤の硬さを変化させた場合の地下街と高層ビルの地震時の相互影響について検討した。

2. 研究の必要性和目的

地下構造物の地震被害事例としては、1995 年兵庫県南部地震による地下鉄大開駅の中柱の破壊が良く知られている³⁾。神戸高速鉄道大開駅では、鉄筋コ

ンクリート造の中柱が崩壊し、その上に位置していた、地表の国道2号線は約2m陥没した。

1985年メキシコ地震では、21階建の鉄骨造の高層ビルの倒壊事例が報告されている。このビルの直下には、地下鉄が走っており、ビルの地下部を貫通していた。このビルの倒壊原因は、下層階の組立ボックス柱における溶接不良による局部座屈であると報告されているが⁴⁾、地下街と高層ビルの相互影響の可能性もあったのかも知れないと推察される。

構造物の耐震設計は、従来、個々の構造物のみに着目して行われ、隣り合う構造物の間の相互の影響は考慮してないのが通例である。地上構造物と地下構造部の接続部は、地震時の応答特性や変位挙動特性が異なったり変化したりする部位に相当するため、地震時には応力集中や相対変位等によって損傷や破壊を受けやすい部位になるものと想定される。地下構造物と地上構造物の接続部の耐震性能照査法や地震対策法に関しては、まだ十分に確立されていないのが現状である。様々な地盤・構造物系の複合体として構成される、大都市の地震時安全性を向上させるためには、個々の構造物のみに着目した耐震性能照査ではなく、隣接する構造物間の相互の影響を考慮した耐震性能照査が必要になると考えられる。このような考えに基づき、本研究では、地下街と高層ビルの接触面の応力状態に着目し、三次元動的解析により、基礎地盤のS波速度を変化させた場合の地下街と高層ビルの強震時の相互影響について検討し考察した。

3. 三次元動的解析

(1) 概要

地下構造物と地上構造物の接続部での地震時の相互影響を検討するために、地下鉄と地下街と高層ビルを配置した解析モデルを作成し三次元動的解析を行った。地下街と高層ビルが地下で接続されている場合、地下街と高層ビルの接続部で発生する地震時応力は、高層ビルの地震時挙動によって変化するものと想定される。そこで、地震被害が発生しやすいと想定される、地下街と高層ビルの接続部に注目し、基礎地盤が硬質な場合と軟質な場合の比較解析を行い地盤の硬軟が地下街と高層ビルの相互影響にどのような影響を及ぼすかについて考察した。三次元動的解析には、解析プログラム DIANA を使用した。

(2) 三次元解析モデル

解析対象は、大都市の堆積地盤に建設された、地

下街と地下鉄と高層ビルを想定して図-1 に示した条件を設定した。

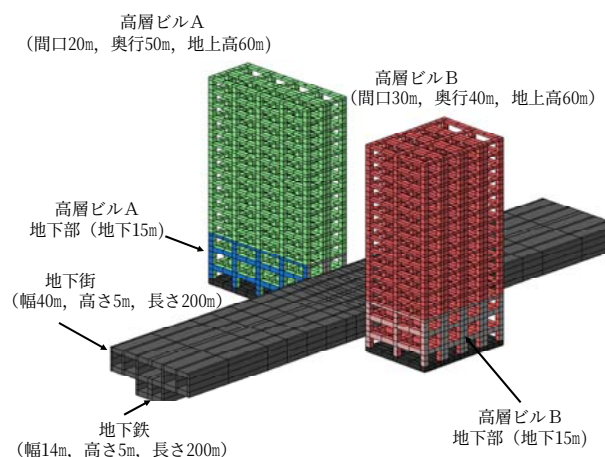


図-1 解析対象とした地下街と地下鉄と高層ビル

表-1 地下街と地下鉄と高層ビルの基本寸法

構造物	幅	高さ		奥行
		地上	地下	
高層ビル A	50m	60m	15m	20m
高層ビル B	30m	60m	15m	40m
地下街	40m	5m		200m
地下鉄	14m	5m		200m

地下構造物については、地表から土被り 5m の位置に地下街があり、その下に地下鉄が位置している条件を設定した。地上構造物については、地下街の両側に高さ 60m の地上 12 階建の高層ビルが建っている場合を設定した。地下街、地下鉄および高層ビルの主な寸法は、表-1 に示すとおりである。

一般に、高層ビルの固有周期は階数 $\times 0.1$ (秒)程度になると考えられるので、ここでは、高層ビルの短辺方向の一次固有周期を 1.2 秒と仮定した。地下街の両側に建つ 2 棟の高層ビルの平面形状と短辺方向を変えている理由は、2 棟の高層ビルの変位挙動の位相が複雑になるようにするためである。解析に用いた有限要素モデルは、図-2 (全体モデル) と図-3 (中央の横断面) に示したとおりである。高層ビルは、梁と柱によって構成される構造とし、地下街、地下鉄、高層ビルおよび地盤は、いずれもソリッド要素でモデル化した。高層ビルと地下街の接続部に関しては、地下街の側壁がない空間としてモデル化した。基礎地盤に関しては、4 層の水平成層地盤を仮定して、横 300m、奥行 240m、深さ 50m の範囲をモデル化した。解析モデルの側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤とした。解析モデルの節点数は 35,080、要素数は 30,880 である。

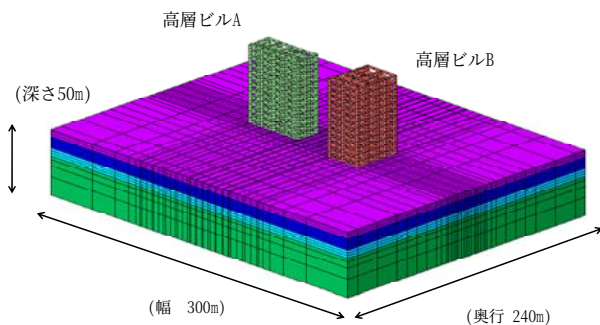


図-2 三次元動的解析に用いた解析モデル（全体図）

(3) 構造物の動的物性値

地下鉄と地下街と高層ビルの動的物性値は表-2に示すとおりである。地下鉄と地下街は、鉄筋コンクリート造を想定した。高層ビルの動的せん断剛性の値は、予備解析を行い一次固有周期が 1.2 秒になるように逆算的に設定した。減衰定数については、ひずみレベルを念頭に置いて、一般的な値よりやや大きな値として 3%を仮定した。

(4) 地盤の動的物性値

地盤の硬軟の影響を検討するために、地盤の動的物性値に関しては、硬質地盤モデルと軟質地盤モデルの2種類を設定した。硬質地盤モデルは、表-3に示したように、基盤の S 波速度を 700m/s、表層地盤の S 波速度を 400m/s とした。軟質地盤モデルは、表-4に示したように、基盤の S 波速度を 700m/s、表層地盤の S 波速度を 100m/s とした。いずれの場合も高層ビルは直接基礎を想定した。地盤の減衰定数については、強震時の非線形効果を念頭に置いて、一般的に想定される値よりもやや大きく 3~5%の値を仮定した。

強震時の動的解析では、動的せん断剛性と減衰定数のひずみ依存性を考慮した解析を行うことが望ましいが、ここでは、地下街と高層ビルの地震時の相互影響をより単純化して検討することに主眼を置き、解析は線形解析として行った。

表-2 地下および地上構造物の動的物性値

項目	高層ビル		地下街 地下鉄
	A	B	
せん断剛性 (N/mm ²)	6700	6700	9000
密度 (g/cm ³)	2.3	2.3	2.3
ポアソン比	0.2	0.2	0.2
減衰定数	0.03	0.03	0.03

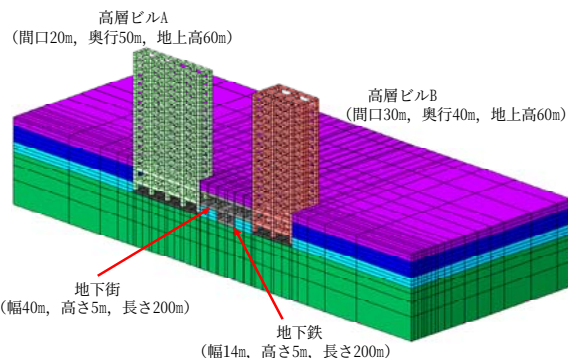


図-3 解析モデル中央の横断面

表-3 硬質地盤を想定した動的物性値
(硬質地盤モデル)

層 No.	層厚 (m)	S 波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰定数
1	5	400	2.1	0.40	0.05
2	9	500	2.2	0.35	0.05
3	6	600	2.3	0.35	0.05
4	30	700	2.5	0.25	0.03

表-4 軟質地盤を想定した動的物性値
(軟質地盤モデル)

層 No.	層厚 (m)	S 波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	減衰定数
1	5	100	1.7	0.45	0.05
2	9	200	1.9	0.45	0.05
3	6	300	2.0	0.40	0.05
4	30	400	2.1	0.40	0.05

(5) 入力地震動

入力地震動は、土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編⁵⁾に例示されている L2 地震動基盤波 (L2 スペクトル II) を使用した。図-4に示したように、波形の 0 秒から 15 秒までの区間を使用し、下方基盤から入力した。入力地震動の最大加速度振幅は、749.6gal である。地下街や地下鉄等の線状構造物に関しては、一般的に、長軸方向 (縦断方向) よりも短軸方向 (横断方向) の方が地震動の影響が大きいと想定されることから、ここでは、解析モデルの短軸方向 (横断方向) に地震動を入力した。

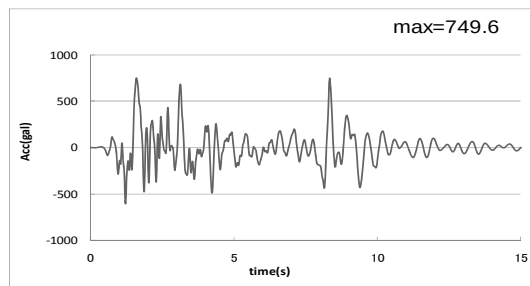


図-4 入力地震動

(6) 解析結果

地下街と高層ビルの加速度応答，高層ビルの変位挙動，地下街と高層ビルの接続部の地震時応力等に関する解析結果を以下に示す．加速度応答および変位応答の代表出力位置は図-5 に示すとおりである．

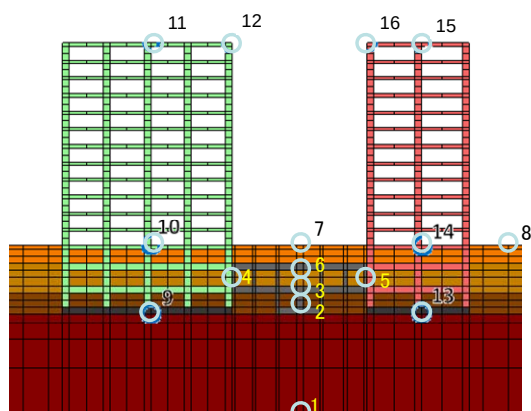


図-5 加速度および変位の代表出力位置

a) 最大加速度応答

地震動を地下街の横断方向に作用させた場合の代表出力位置の硬質地盤モデルと軟質地盤モデルの最大加速度の比較を表-5 に示す．高層ビル A の屋上中央（位置 11）の最大加速度応答は，硬質地盤モデルでは 3693.5gal であったが，軟質地盤モデルでは 2752.2gal となった．高層ビル B の屋上中央（位置 15）における最大加速度応答は，硬質地盤モデルでは 3083.0gal，軟質地盤モデルでは 3194.4gal となった．表-5 に示したように，加速度応答は，硬質地盤モデルに比べて軟質地盤モデルでは，概して地下で小さくなる傾向があるが，地表面（位置 7，8）と高層ビル B の屋上（位置 15，16）では軟質地盤モデルのほうが加速度が大きくなる結果になった．地表面（位置 7，8）に関しては，基盤から地表面に対する波動インピーダンス比が軟質地盤モデルの方が小さいため，また，高層ビル B の屋上（位置 15，16）に関しては，地震動の作用方向が短辺方向と一致したため増幅が大きくなったものと考えられる．硬質地盤モデルの地表面（位置 8）と高層ビル B の屋上中央（位置 15）の加速度時刻歴をそれぞれ図-6 と図-8 に示す．同様に，軟質地盤モデルの地表面（位置 8）と高層ビル B の屋上中央（位置 15）の加速度時刻歴を図-7 と図-9 に示す．

b) 高層ビルの変位挙動

代表出力位置の硬質地盤モデルと軟質地盤モデルの最大変位の比較を表-6 に示す．高層ビル A の屋上中央（位置 11）の最大変位は，硬質地盤モデルで 37.03cm，軟質地盤モデルでは 52.63cm となった．また，高層ビル B の屋上中央（位置 15）の最大変

表-5 硬質地盤モデルと軟質地盤モデルの代表出力位置の最大加速度

位置	硬質地盤モデルの加速度(gal)	軟質地盤モデルの加速度(gal)
1 下方基盤	749.6	749.6
2 地下の地盤内	1443.3	1234.9
3 地下の地盤内	1512.2	1348.0
4 高層ビルAと地下街の境界	1605.5	1461.7
5 高層ビルBと地下街の境界	1615.7	1466.3
6 地下の地盤内	1764.6	1597.2
7 地表面	1801.0	2062.6
8 地表面	2054.2	2965.3
9 高層ビルAの底面	1379.4	1164.6
10 高層ビルAの地表面位置	1797.4	1659.9
11 高層ビルAの屋上中央	3693.5	2752.2
12 高層ビルAの屋上右端	3761.3	2777.2
13 高層ビルBの底面	1381.9	1162.8
14 高層ビルBの地表面位置	1921.8	1689.3
15 高層ビルBの屋上中央	3083.0	3194.4
16 高層ビルBの屋上左端	3113.2	3218.5

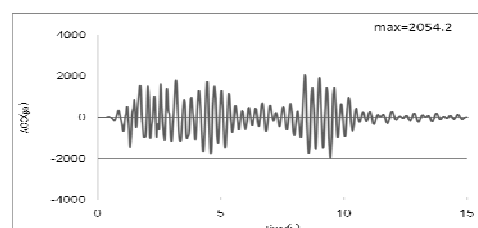


図-6 硬質地盤モデルの地表面（位置 8）の加速度時刻歴

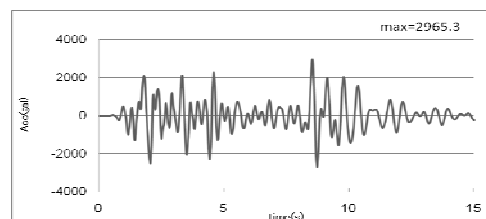


図-7 軟質地盤モデルの地表面（位置 8）の加速度時刻歴

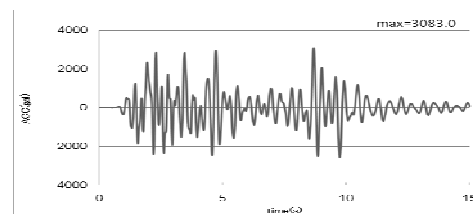


図-8 硬質地盤モデルの高層ビル B の屋上中央（位置 15）の加速度時刻歴

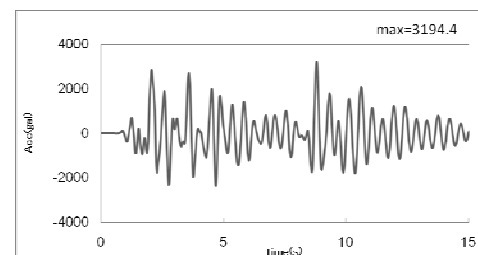


図-9 軟質地盤モデルの高層ビル B の屋上中央（位置 15）の加速度時刻歴

位は、硬質地盤モデルで 38.63cm，軟質地盤モデルでは 51.17cm となった。加速度応答とは異なり，変位応答は，硬質地盤モデルに比べて軟質地盤モデルでは大きくなる結果となった。高層ビル B の屋上中央の変位時刻歴は図-10（硬質地盤モデル）と図-11（軟質地盤モデル）に，高層ビル A と地下街の接続部の変位時刻歴は図-12（硬質地盤モデル）と図-13（軟質地盤モデル）に示したとおりである。

表-6 硬質地盤モデルと軟質地盤モデルの代表出力位置の最大変位

位置	硬質地盤モデルの最大変位(cm)	軟質地盤モデルの最大変位(cm)
4 高層ビルA側	3.45	8.64
高層ビルA地下街側	3.45	9.24
10 高層ビルA地表面位置	4.97	10.92
11 高層ビルAの屋上中央	37.03	52.45
12 高層ビルAの屋上右端	37.15	52.63
5 高層ビルB側	3.48	8.73
高層ビルB地下街側	3.48	9.49
7 地表面	4.50	11.55
15 高層ビルBの屋上中央	38.63	51.17
16 高層ビルBの屋上左端	38.73	51.28

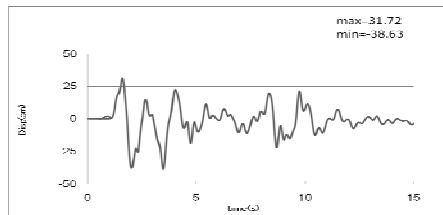


図-10 硬質地盤モデルの高層ビル B の屋上中央（位置 15）の変位時刻歴

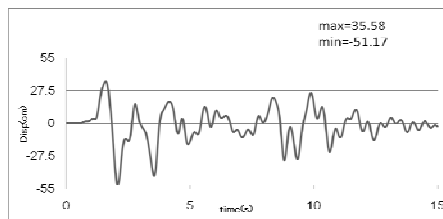


図-11 軟質地盤モデルの高層ビル B の屋上中央（位置 15）の変位時刻歴

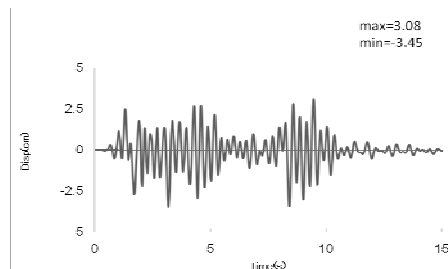


図-12 硬質地盤モデルの高層ビル A と地下街の接続部の変位時刻歴

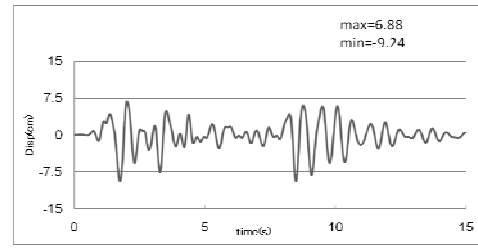


図-13 軟質地盤モデルの高層ビル A と地下街の接続部の変位時刻歴

c) 地下街と高層ビルの接続部の地震時応力

全時刻を通しての高層ビルと地下街の周辺の地震時の最大引張応力の分布を図-14（硬質地盤モデル）と図-15（軟質地盤モデル）に示す。また，図-16 に示した代表出力位置の最大主応力の値を表-7 に示す。図-14 と図-15 を対比することにより，硬質地盤モデルでは地下街周辺部での引張応力の発生が小さく，軟質地盤モデルでは大きいことが分かる。

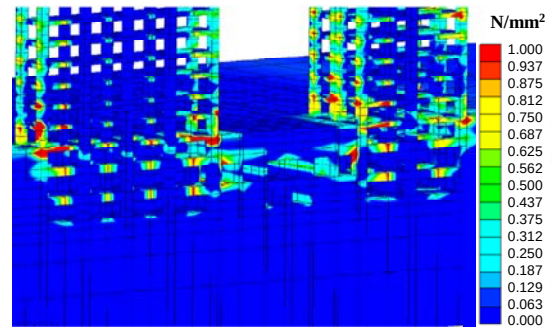


図-14 硬質地盤モデルの地震時の最大主応力分布

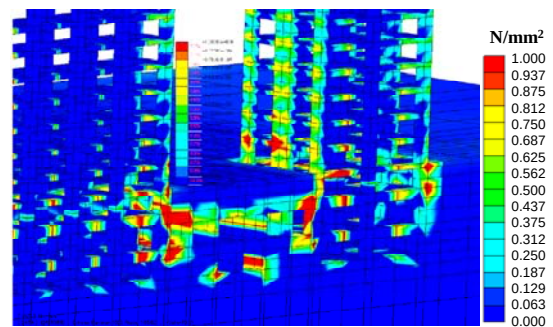


図-15 軟質地盤モデルの地震時の最大主応力分布

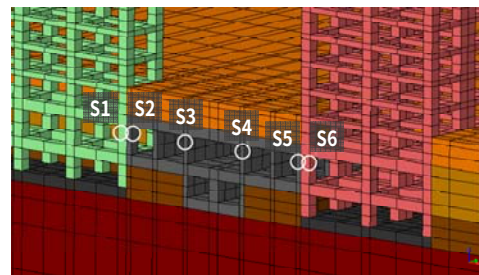


図-16 最大主応力の出力位置

表-7 硬質地盤モデルと軟質地盤モデルの地下街の代表出力位置での最大主応力

出力位置	最大主応力(N/mm ²)	
	硬質地盤モデル	軟質地盤モデル
S1	1.21	4.19
S2	2.91	3.63
S3	-0.30	2.02
S4	-0.23	0.91
S5	3.66	6.48
S6	1.63	3.76

(備考) 出力位置は図-16 参照。正は引張、負は圧縮

地下街と高層ビルの接続部に着目した場合、地下街と高層ビル A の接続部の最大引張応力は、硬質地盤モデルでは 2.91N/mm²、軟質地盤モデルでは 3.63N/mm² となった。地下街と高層ビル B の接続部でも、最大引張応力は硬質地盤モデルで 3.66N/mm²、軟質地盤モデルでは 6.48N/mm² となり、地盤が軟らかくなると地下街と高層ビルの接続部で地震時応力が増大する結果となった。

硬質地盤モデルと軟質地盤モデルの高層ビル B と地下街の接続部（位置 S5）の主応力時刻歴は、それぞれ図-17 と図-18 に示したとおりである。

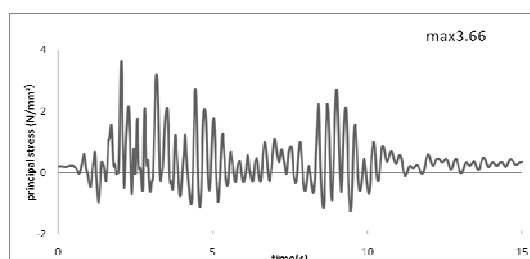


図-17 硬質地盤モデルの高層ビル B と地下街の接続部（位置 S5）の主応力時刻歴

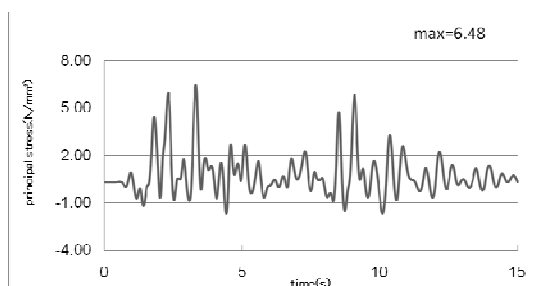


図-18 軟質地盤モデルの高層ビル B と地下街の接続部（位置 S5）の主応力時刻歴

4. 結論と考察

地盤の硬軟の影響を検討するため硬質地盤モデルと軟質地盤モデルの 2 種類のモデルを設定し、地下

街の横断面方向に地震動を作用させて比較解析を行った結果、地盤が軟質になると、加速度応答は地表面と高層ビルでは増幅すること、変位応答は地盤内および高層ビルで増大すること、地下街と高層ビルの接続部では地震時応力が増大する等の結果を得た。

地盤が硬質な場合は、地盤や構造物の加速度応答は大きくても変位振幅や地震時応力は小さくなる傾向があり、地盤が軟質な場合は、加速度応答は小さくても変位振幅や地震時応力は大きくなる。したがって、軟弱地盤に建設された、地下構造物や地上構造物の耐震性能を照査する際には、評価量として、加速度ではなく、変位挙動、相対変位、残留変位、地震時応力（引張応力、せん断応力）を重要視することが必要になる。

また、地盤が軟質になると、地上構造物と地下構造物の接続部では、地震時応力が増大すると想定される点に留意することが必要であると考えられる。地震時の引張応力やせん断応力に対しては、剥離・滑動といった非連続的挙動を許容する、免震ジョイントを構造物の接続部に活用することによって地震時の応力・ひずみを解放し、耐震性能を保持することが可能であるが、その有効性は、軟弱地盤の場合により高まるものと考察される。

我が国では、大都市の多くが軟弱な堆積地盤の上に位置している。S 波速度が低い軟弱地盤を想定した場合、大震時には、地上構造物の変位挙動の増大、地上構造物と地下構造物間の相対変位量の増大、地下構造物における地震時応力の増大等に加えて、地震動の長周期化・長時間化、地盤の破壊・流動等の現象が想定される。更に、これらの現象が複合的に作用した場合には、地震災害の連鎖が生じるものと想定される。そのため、軟弱地盤に建設された地上構造物と地下構造物の耐震性能照査と地震対策に際しては、これらの現象を考慮することが可能な解析評価が必要であると考えられる。

三次元動的解析では、地震動の作用方向と構造物の卓越振動方向等の影響を反映した解析を行うことが可能であり、地盤と地上構造物と地下構造物の地震時の相互影響を精度良く解析評価するためには、三次元動的解析の活用が有効であると考えられる。

5. おわりに

三次元動的解析の特長を活かして、今後の課題としては、地震動の作用方向の影響（横断方向加振と縦断方向加振の比較検討）、地下街と高層ビルの接続部の非連続的挙動の影響（剥離・滑動現象の考

慮), 構造物の形状・寸法の影響(ねじれ現象の考慮)等について検討を深めて行く予定である。

大都市では, 多種多様の構造物が高密度に建設されているため, 大地震の際には隣接する構造物や連結された構造物の間で様々な相互影響が発生する可能性があると考えられる。都市の地震防災を実現するためには, 隣接する構造物間や連結された構造物間の地震時の相互影響を定量的に評価し, それらの知見を踏まえて, 有用性の高い地震対策を実施して行くことが必要であると考察される。

参考文献

- 1) 有賀義明: 軟弱地盤を利用した免震効果の可能性について, 土木学会第 20 回地震工学研究発表会, No.56, pp.221-224, 1989
- 2) 有賀義明: 地下に低速度が介在する地盤の地震動伝播特性, 土木学会第 43 回年次学術講演会, I -473, pp.996-997, 1988
- 3) 中村晋: 地震被害程度の差異に着目した地下鉄の被害要因分析, 土木学会論文集 654 巻, I -52 号, pp.335-354, 2000
- 4) 和泉正哲: 1985 年メキシコ地震に関する調査研究, 自然災害特別研究突破突発災害研究成果 No.B-60-6, 1986
- 5) 土木学会: コンクリート標準仕方書耐震性能照査編, pp.47, 2002
- 6) 有賀義明, 平野悠輔, 猪子敬之介, 竹内幹雄, 小黒明, 浅賀裕之, 村上正明: 地下街の耐震性に対する高層ビルの地震時挙動の影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol66, No.1, 208-215, 2010

INFLUENCE OF SHEAR WAVE VELOCITY OF GROUND ON MUTUAL EFFECTS BETWEEN UNDERGROUND SHOPPING ARCADE AND HIGH BUILDINGS

Yoshiaki ARIGA, Tatsuyoshi KAKIZAKI, Keinosuke INOKO, Mikio TAKEUCHI,
Akira OGURO, Hiroyuki ASAKA, Masahiro YODA, Kazuo TAKEHARA

It is generally thought that the underground is safer than the ground, because the acceleration amplitudes of earthquake motions tend to be smaller in the underground. However, it is considered that the seismic safety of structures will be largely affected by the mutual effects between ground structures and underground structures during earthquakes. Then, we made 3-D dynamic analyses in regard to a coupled subway - underground shopping arcade - high building system in order to evaluate the influences of shear wave velocity on the mutual effects between high buildings and underground shopping arcade. As a result, it is considered that the displacement responses of structures and the dynamic stresses within structures tend to increase as the shear wave velocity of ground become slower. In order to realize earthquake disaster prevention in urban area, it is necessary to take a dynamic interaction among the adjacent structures.