

地下空間と地上構造物の地震時の 相互影響に関する基礎的検討

Fundamental study on mutual influence between underground
Space and surface structure during earthquakes

有賀 義明¹・浅賀 裕之²

Yoshiaki ARIGA・Hiroyuki ASAKA

Confirmation and securing of earthquake safety for urban facilities is very important subject in earthquake countries. A dynamic interaction between underground space and surface structure will have a mutual influence on each other during earthquakes. In this study, the mutual influence between underground space and surface structure during earthquakes was examined by a two-dimensional dynamic analysis. As for an underground space, a large tunnel with 16 m diameter was set for an analytical object. The main results are as follows. When a surface structure is situated just above an underground space, the dynamic response of the structure will be comparatively decreased. However, the dynamic response of ground surface will be relatively increased in the area at a short distance from the structure. A non-symmetry concerning a propagation of earthquake motion will appear more clearly for the vertical component than the horizontal component. In order to improve a performance of earthquake disaster prevention of urban area, it is necessary to take a dynamic interaction between underground space and surface structure into consideration.

Key Words : underground space, surface structure, dynamic interaction , earthquake disaster prevention, urban environment, dynamic analysis

1. はじめに

「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が2001年4月に施行され、都市の再生、都市交通網の整備、都市水害の予防施設等に関連して、適正かつ合理的な地下空間利用が図られるようになりつつある。世界有数の地震被災国である我が国では、人々が安全に安心して生活を送るためには、地上空間、地下空間を問わず、大地震時の安全性の確認と確保が極めて重要である¹⁾。一般論として、地上に比べて、地下では地震動の振幅が小さい傾向があり、地下空間は耐震上有利と考えられているが、地盤や構造物の動的相互作用の影響によって、地震動が局所的に増幅したり、また減衰したりする現象が予想される²⁾、³⁾。すなわち、地下空間と地上構造物の動的相互作用によって、双方の地震時安全性がお互いに影響を及ぼし合う可能性があると予想される。そこで、大断面トンネルが地下浅層に存在する場合を想定して理想化した解析モデルを設定し、二次元動的解析により地下空間と地上構造物の地震時の相互影響について検討した。そして、解析結果に基づき、地下空間と地上構造物の地震時の相互の影響、地下空間と地上構造物の位置関係による相互影響の出現傾向、今後の都市の地震防災を考える際の留意点について考察した。

キーワード：地下空間，地上構造物，動的相互作用，地震防災，都市環境，動的解析：

¹フェロー会員 博(工) 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究所 上席研究員(副部長)

² 株式会社 JP ビジネスサービス 社会環境部

2. 目的

我が国では、特に大都市圏において、地下街、地下鉄、地下道路、地下河川等、様々な地下空間利用が進んでいる。地下空間の基本特性は、隔離性であり、この基本特性から様々なメリットやデメリットが派生する。物を貯蔵したり設備を設置したりする、物的な地下空間利用では、恒温性、恒湿性、気密性、遮断性、耐火性等のメリットを列挙することが可能である。一方、人間の活動空間としての地下空間利用では、万が一の事故や災害の際に、空気、光、水、火、煙、有毒ガス、パニック等、人間の生命を直接的に脅かす潜在的危険要因が顕在化する危険性があるので、隔離性がかえって大きなデメリットになり得ると考えられる。巨大地震を想定した場合には、強震動による被害、液状化や地盤変状による被害が発生し、電力、ガス、水道の供給停止、地下空間への有害ガスや水の流入等が発生することも想定される。したがって、人間の活動空間として地下空間を利用して行くためには、想定される如何なる事象に対しても、地下空間の潜在的危険要因が顕在化しないような配慮と工夫が必要である。

非常に大きな地震に襲われた場合の都市施設の地震時安全性の問題に関しては、既存の地上構造物の下に新規の地下空間を建設した場合には、地盤と構造物の相互作用の影響を受けて、地震動の伝搬特性が変化し、地下空間の存在によって、地上構造物の揺れが増大したり、逆に減少したりすることが予想される。そこで、ここでは、地下浅層に大断面の地下構造物を配置した場合を想定して、新設の地下空間が既設の地上構造物にどのような動的影響を及ぼすかについて、二次元動的解析により基礎的な検討を行った。検討に際しては、地下空間の健全性や地震損傷に関する応力評価の視点ではなく、主として、地盤内での地震動の増幅・減衰特性、地上構造物の動的応答特性に与える地下空間の影響、地下空間と地上構造物の位置関係の非対称性の影響に着眼した。主な着目点は、つぎの通りである。

- ① 地下空間の存在による地盤内の地震動伝搬特性の変化
- ② 地下空間の存在による地上構造物の動的応答の変化
- ③ 地下空間と地上構造物の位置関係による非対称性の影響
- ④ 地上構造物の動的応答に対する地下空間のメリットとデメリット

3. 想定する地下空間と地上構造物の位置関係

限られた都市空間の有効活用、近年増加傾向にある都市型水害の予防等の視点から、将来に向けて大都市における地下空間の有効利用が図られて行くものと思われるが、ここでは、新設の地下空間と既設の地上構造物の位置関係として図-1に示したような場面をイメージした。

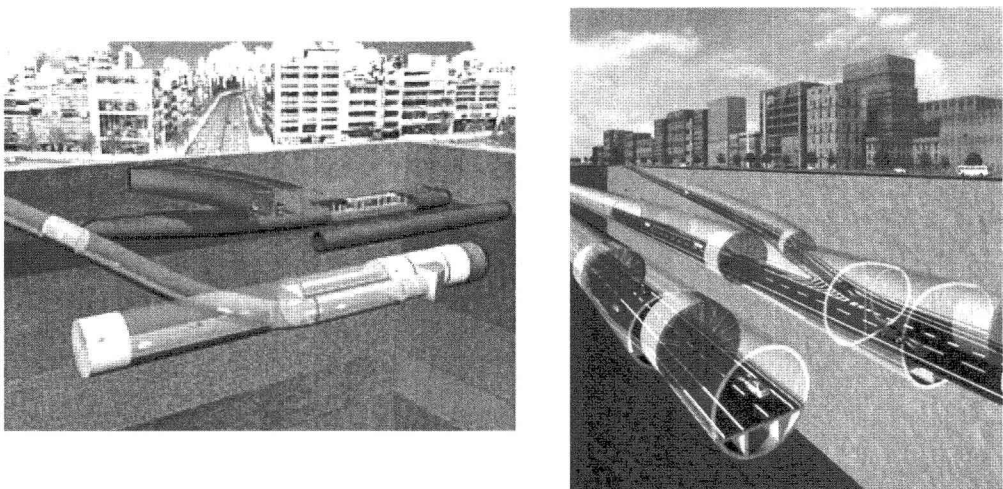


図-1 地下空間と地上構造物の想定イメージ 4), 5)

4. 二次元動的解析

(1) 概要

地下空間として直径 16m の円形の大断面トンネルを地下 20m に建設した場合を想定して、地下空間の存在が周辺地盤での地震動の伝搬や地上構造物の地震時挙動にどのような影響を及ぼすかについて、二次元動的解析によって検討した。

(2) 想定した地下空間

都市の堆積地盤に建設される地下自動車道や地下河川を念頭に置き、図-2 に示したような直径 16m の円形トンネルを検討対象として設定した。シールドトンネルでは、シールドセグメントや付帯設備（スラブや桁）が構造要素として存在するが、ここでは、地震動の伝搬に対する地下空間の影響の把握が第一の目的であること、線状の地中構造物は一般的に周辺の地盤と同様の変位挙動を示すと考えられることから、これらの構造要素は省略して直径 16m の円形の地下空間としてのモデル化を行った。

(3) 想定した地上構造物

堆積地盤中に大断面の地下空間を建設した場合、地下空間の存在によって、地盤内で地震動の増幅や減衰が生じること、地震時に地上構造物が大きく揺れるようになること、あるいは逆に揺れが小さくなること等の可能性が想定される。想定されるこうした現象は、震度VI、震度VIIといった、大規模な地震災害が懸念される地震の際には、地下空間の安全性のみならず、地上構造物の安全性にも影響を及ぼす可能性があると考えられる。また、震度IVや震度Vの、大規模な地震災害の可能性は低い揺れに関する心理的インパクトが大きい地震の際には、都市環境の視点から地上構造物の居住性や快適性に影響を及ぼすことも想定される。これらの点を念頭に置き、ここでは、図-3 に示したような、高さ 25m 地上構造物（5 階程度の建物）を検討対象として想定した。地上構造物は、ここではソリッド要素でモデル化した。地上構造物の固有周期に関しては、5 階建ての建物の 1 次固有周期は、概ね 0.3 秒⁶⁾程度と考えられるので、解析モデルの 1 次固有周期が 0.3 秒になるように動的物性値を設定した。表-1 に使用した動的物性値を示す。なお、解析モデルの下端は、コンクリート基礎に固定されている構造としている。

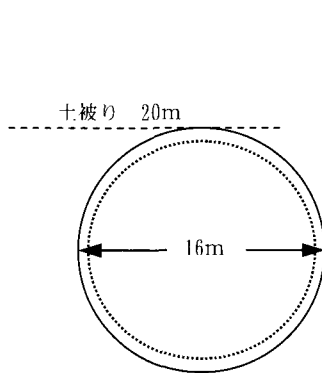


図-2 想定した地下空間(円形トンネル)

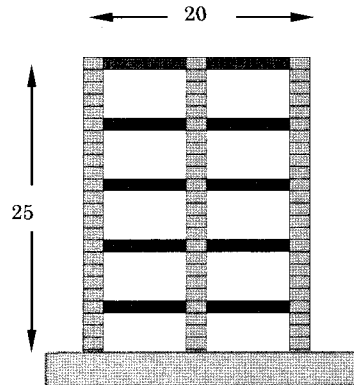


図-3 想定した地上構造物(建屋モデル)

表-1 建屋モデルの動的物性値

項目	建物	基礎
弾性係数 : E (N/mm ²)	16,000	21,500
せん断剛性 : G (N/mm ²)	6,700	9,000
ポアソン比 : ν	0.20	0.20
密度 : ρ (g/cm ³)	2.0	2.3
減衰定数 (材料減衰)	0.03	0.03

(4) 想定した地盤構成

東京、名古屋、大阪等の、大都市の堆積地盤を想定し、水平の成層地盤を検討対象とした。地上構造物については、既存の建物を念頭に置き、直接基礎構造として想定したため、地盤に関しては、表層地盤のS波速度が400m以上であることを基本条件とした。図-3に示すように、深さ100mまでの水平地盤をモデル化し、表-2に示すような地盤構成と動的物性値を設定した。なお、建物の一次の固有振動数は3.3Hz、地盤の主要な卓越振動数は1.3Hzと2.2Hzである。

表-2 想定した地盤構成と動的物性値

地盤構成	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	せん断剛性 G (N/mm ²)	密度 ρ (g/cm ³)	ポアソン比 ν	減衰定数 h
地盤1層	3.0	400	320	2.00	0.495	0.05
地盤2層	4.0	400	340	2.10	0.40	0.05
地盤3層	4.0	400	340	2.10	0.40	0.05
地盤4層	10.5	500	560	2.20	0.35	0.05
地盤5層	4.5	600	840	2.30	0.35	0.05
地盤6層	4.0	600	840	2.30	0.30	0.05
地盤7層	70.0	700	1,250	2.50	0.25	0.03

(5) 想定した地震動

入力地震動は、「土木学会コンクリート標準仕方書耐震性能照査編」⁷⁾に示されているレベル2地震動を用いた。図-4に、レベル2地震動「L2地震動基盤波(L2スペクトルII)」を示す。最大振幅は、749.6galである。この地震動は、工学的基盤表面で定義されているので、解析プログラムSHAKEを用いて解析モデルの下方基盤まで引戻した後に入力波として使用した。下方基盤における入力波を図-5に示す。解析では、この波形の9秒から24秒までの波形を使用した。

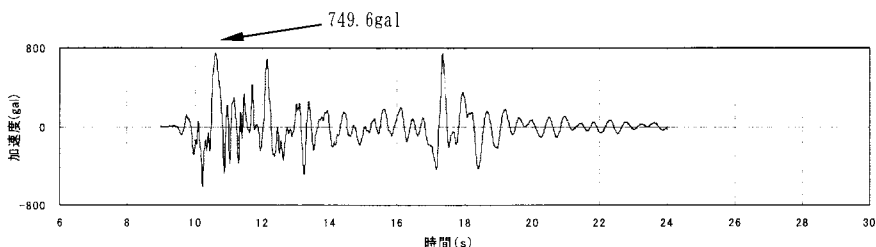


図-4 入力地震動 (レベル2地震動：工学的基盤)

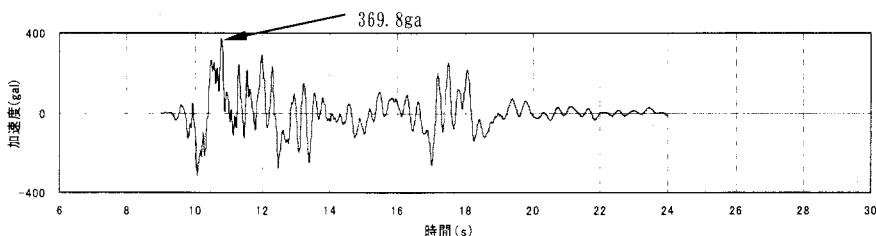
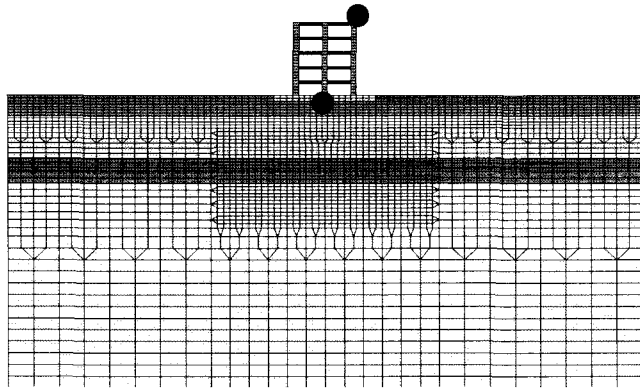


図-5 下方基盤における引戻波

(6) 二次元解析モデル

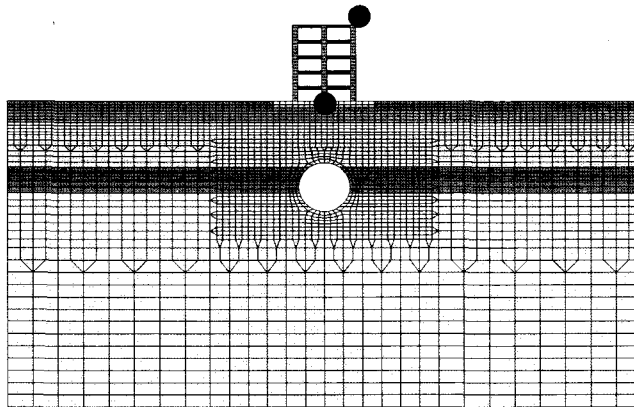
地下空間と地上構造物の動的相互作用について比較検討するために、三種類の解析モデルを作成した。第一のモデルは、地下空間が建設される前の、地盤－地上構造物連成モデルである。第二のモデルは、直径16mの地下空間を地上構造物の真下に設けた、地下空間－地盤－地上構造物連成モデルである。第三のモデルは、地下空間を地上構造物の真下から水平方向に16m移動させた、地下空間－地盤－地上構

造物連成モデルである。これら3種類の解析モデルを図-6～図-8に示す。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。解析プログラムは，筆者らが開発したUNIVERSE[®]（地盤-構造物-水連成系の非線形三次元動的解析プログラム）を使用した。地盤の動的物性値に関しては，基本的には，せん断剛性および減衰定数の非線形性を考慮すべきであるが，ここでは，地盤の非線形効果の影響の把握解明よりも，主として，地下空間と地上構造物の動的相互作用の把握解明に主眼を置いているため，影響要因をシンプルにするため，線形解析として実施した。



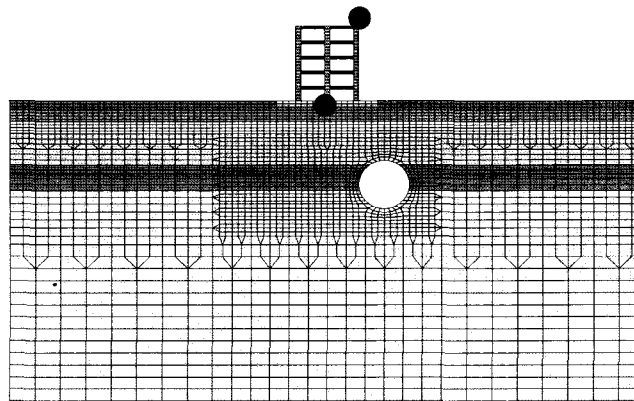
地盤：幅 100m, 深さ 100m
地上構造物：高さ 25m
●：代表出力点

図-6 解析モデル1 (Case-1: 地盤と地上構造物の連成モデル)



地下空間：直径 16m
(地上構造物の直下に位置)
●：代表出力点

図-7 解析モデル2 (Case-2: 地上構造物の真下に直径 16m の地下空間を設けたモデル)



地下空間：直径 16m
(直下から右へ 16m 移動)
●：代表出力点

図-8 解析モデル3 (Case-3: 地下空間を地上構造物の真下から 16m 水平右方向に移動したモデル)

(6) 解析結果

a) 最大加速度分布

三つの解析ケースに関して、最大加速度応答の水平成分の分布を図-9 (Case-1)、図-10 (Case-2)、図-11 (Case-3) に示す。同様に、鉛直成分の最大加速度応答の分布を図-12 (Case-1)、図-13 (Case-2)、図-14 (Case-3) に示す。図-9 より、Case-1 では、地上構造物の重量によって揺れが抑えられているため、地上構造物直下の地盤内の水平方向の加速度応答が周辺地盤に比べて小さくなっていることが分かる。また、図-12 より、鉛直方向の加速度応答は、地上構造物の底部中央部でゼロに近い数値であるのに対して、ロッキング現象の影響によって、地上構造物の両端部では大きくなっていることが分かる。

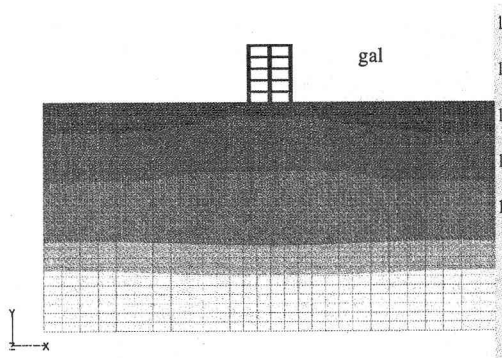


図-9 解析モデル 1 (Case-1) の水平加速度応答

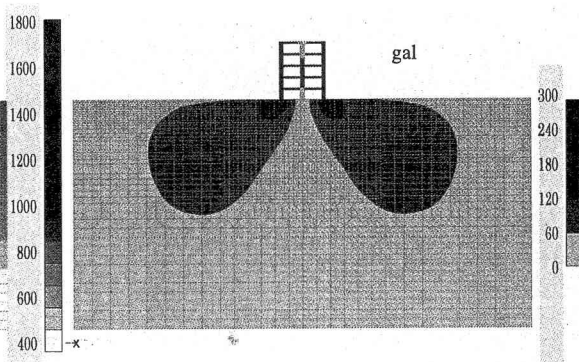


図-12 解析モデル 1 (Case-1) の鉛直加速度応答

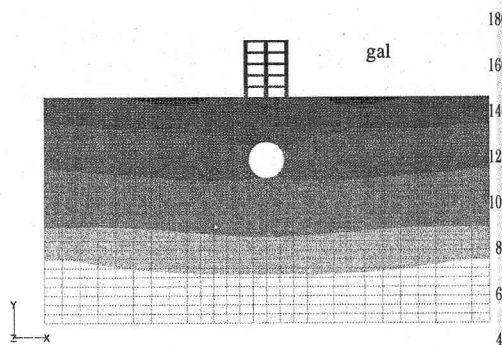


図-10 解析モデル 2 (Case-2) の水平加速度応答

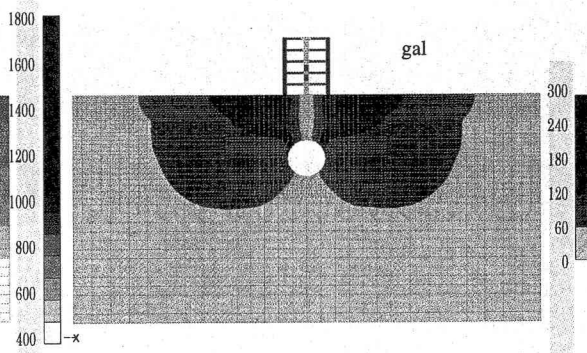


図-13 解析モデル 2 (Case-2) の鉛直加速度応答

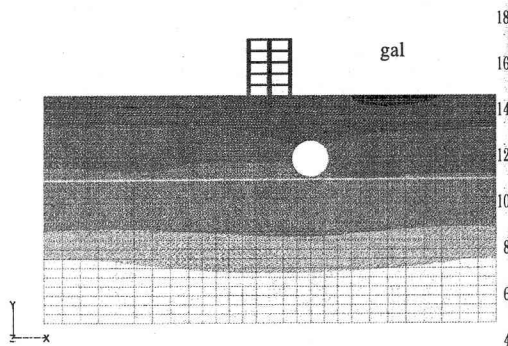


図-11 解析モデル 3 (Case-3) の水平加速度応答

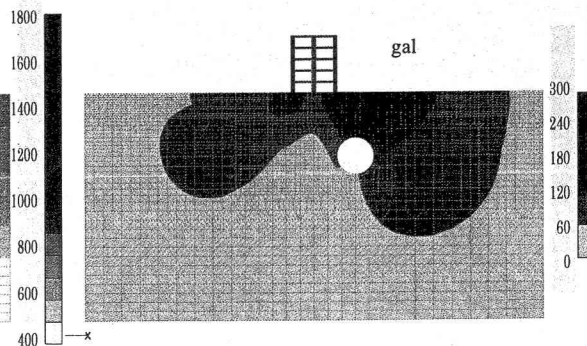


図-14 解析モデル 3 (Case-3) の鉛直加速度応答

Case-2は、地上構造物の真下に地下空間を設置した場合であるが、図-9と図-10の比較から、地上構造物の頂部の最大水平加速度応答は、地下空間がないCase-1に比して、地下空間の存在によって約20%小さくなっていることが分かる。一方、地上構造物の中心から左右に30m程度離れた地表部では、地下空間の存在によって、水平加速度応答が逆に増大していることが分かる。地上構造物のロッキングの影響範囲は、図-12と図-13の比較から分かるように、地下空間の存在によって拡大する傾向があることが分かる。

表-3 地上構造物頂部の最大加速度の比較

解析ケース	最大加速度 (gal)	発生時刻 (秒)
Case-1	1,805	4.47
Case-2	1,527	4.63
Case-3	1,861	4.48

図-11 (Case-3)は、Case-2の地下空間の位置を16m右方に水平移動した場合であるが、地上構造物頂部の水平加速度応答は、地下空間が存在しないCase-1とほぼ同等の値になっている。図-12と図-13の比較から、鉛直加速度応答に関しては、水平加速度応答に比して応答値は1/6程度の数値であるが、非対称性が著しいことが良く分かる。地下空間と地上構造物の位置関係が、地盤内の地震動伝播、地上構造物の地震時挙動に大きな影響を及ぼすことが分かる。これらの結果から、地下空間の位置によって地上構造物の地震時応答が大きく変化することが理解できる。

b) 加速度応答波形

加速度応答波形を比較するために、地上構造物の頂部右端(図-6参照)の加速度時刻歴を図-15 (Case-1)、図-16 (Case-2)、図-17 (Case-3)に示す。同様に、地上構造物の直下中央の加速度時刻歴を図-18 (Case-1)、図-19 (Case-2)、図-20 (Case-3)に示す。想定した地盤構造モデルがシンプルであったため、最大加速度振幅は解析ケースによって大きく変動したが、波形に関して大きな変化は見られなかった。

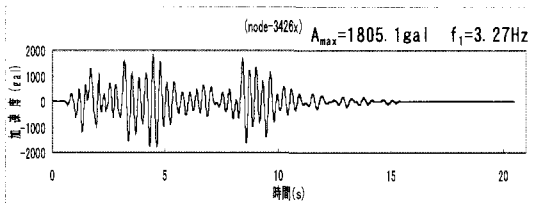


図-15 Case-1の地上構造物頂部右端の水平加速度波形

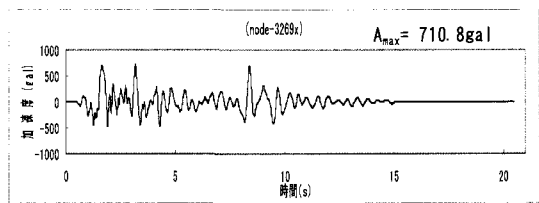


図-18 Case-1の地上構造物直下中央の水平加速度波形

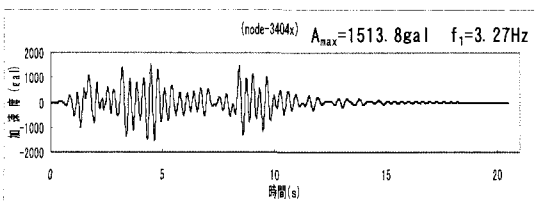


図-16 Case-2の地上構造物頂部右端の水平加速度波形

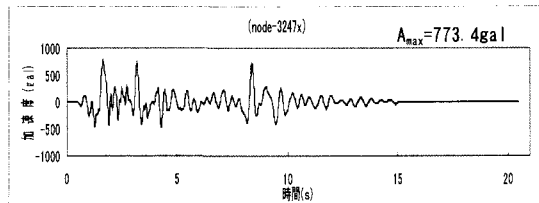


図-19 Case-2の地上構造物直下中央の水平加速度波形

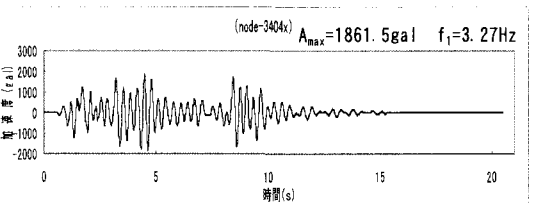


図-17 Case-3の地上構造物頂部右端の水平加速度波形

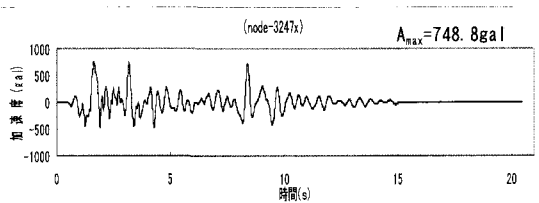


図-20 Case-3の地上構造物直下中央の水平加速度波形

c) 応答波形の周波数特性

地上構造物の頂部右端の加速度応答波形の周波数特性を図-21 (Case-1), 図-23 (Case-2), 図-25 (Case-3) に, 地上構造物直下中央の加速度応答波形の周波数特性を図-22 (Case-1), 図-24 (Case-2), 図-26 (Case-3) に示す。これらの図から, 地上構造物の頂部では, 地上構造物の一次固有周波数に相当する 3.3Hz 近傍の周波数が卓越していること, 地下空間が地上構造物の直下に位置するケースの Case-2 では地上構造物の周波数応答が小さくなっていることが分かる。また, 基礎地盤の揺れに関しては, 1.3Hz と 2.2Hz の地盤の卓越振動数に由来する成分と 3.3Hz の地上構造物の固有振動数に起因する成分がピークを形成していることが理解できる。なお, 応答波形の周波数特性については, 地下空間の存在によって, 地盤と地下空間と地上構造物の動的相互作用の影響のひとつとして, 長周期化の影響(低周波数成分の増幅)があるのでは推察されるが, 今回の比較解析では, このような現象は見られなかった。

地盤と地下空間と地上構造物の地震時の相互作用は, それぞれの幾何学的形状・寸法, 動的変形特性の構成・組合せ, 地盤と構造物の固有振動特性, 入力地震動の周波数特性等によって複雑な影響を受けるものと推察されるが, こうした影響について, 今後, 更に検討を深める必要がある。

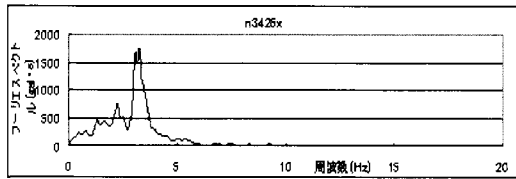


図-21 Case-1の地上構造物頂部右端の水平加速度時刻歴のスペクトル

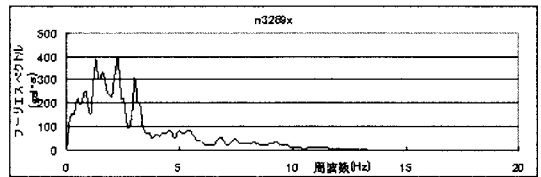


図-24 Case-1の地上構造物底部中央の水平加速度時刻歴のスペクトル

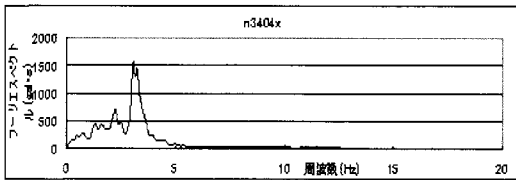


図-22 Case-2の地上構造物頂部右端の加速度時刻歴のスペクトル

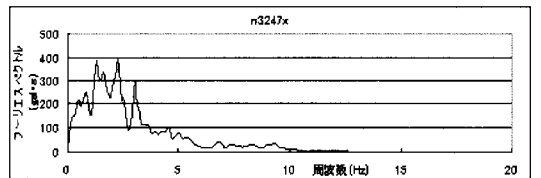


図-25 Case-2の地上構造物底部中央の水平加速度時刻歴のスペクトル

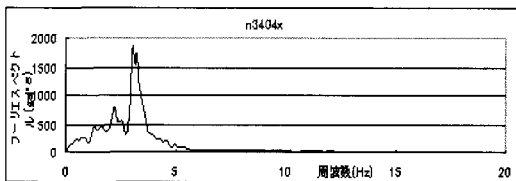


図-23 Case-3の地上構造物頂部右端の加速度時刻歴のスペクトル

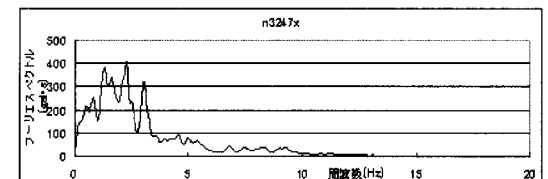


図-26 Case-3の地上構造物底部中央の水平加速度時刻歴のスペクトル

5. 結論と考察

大都市の堆積地盤の中に, 直径 16mの円形トンネルを配置した場合を想定して, 理想化したシンプルな解析モデルを作成して二次元動的解析を行い, 地下空間と地上構造物の地震時の相互影響について検討した。主な結果は, つぎのとおりである。

- ・地上構造物の真下に地下空間を配置した場合, 地上構造物の加速度応答は, 地下空間の存在によって低減する傾向がある。これは, 地上構造物の真下に配置された, 波動インピーダンスが極めて小さい地下空間の影響が大きく, 波動インピーダンスの低い地下空間が, 地震動の伝播に影響を及ぼした結果で

はないかと考察される。

・一方、地上構造物から少し離れた地表部では、地下空間が存在することによって、かえって加速度応答が増大するエリアが出現する可能性があるものと予測される。波動インピーダンスの低い地下空間の影響は複雑であり、加速度応答を増大させる側面と加速度応答を低減させる側面を併せ持つ点に留意することが必要であると考察される。

・地上構造物の真下に地下空間が存在する場合、地下空間の存在は、地上構造物のロッキングを低減する傾向があるが、地盤に対するロッキングの影響範囲は拡大する傾向がある。

・地下空間が地上構造物の真下から少し水平方向にずれた場合は、地上構造物のロッキングは非対称となり、地盤内の地震動の増幅、減衰もロッキングの影響を受けて非対称性が強くなる。非対称性の影響は、水平加速度応答ではあまり目立たないが、鉛直加速度応答において顕著になる。地下空間と地上構造物の位置関係によって、地上構造物の地震時挙動の非対称性が強まり、地盤内の地震動の増幅特性も非対称性が強まるので、こうした現象について留意することが必要であると考えられる。

・地盤と地下空間と地上構造物の地震時の相互作用は、それぞれの幾何学的形状と寸法、動的変形特性の構成や組合せ、地盤と構造物の固有振動特性、入力地震動の周波数特性等によって複雑な影響を受けるものと考えられるので、こうした影響について、今後、更に定量的な検討を行うことが必要である。

6. あとがき

世界有数の地震被災国である我が国では、地下空間、地上空間を問わず、地震防災性能の向上が、大変な課題である。また、国土が狭小で可住地面積が少ない我が国では、地下空間は、貴重な国土空間のひとつのとして、将来に向けた有効活用が期待されている。地震災害は、突発性と広域性に大きな特徴があると考えられるが、いついかなる時にも、安心して安全に地下空間を利用することができるためには、万が一の事態が発生した場合でも、人的被害が発生しないように、念には念を入れた、安全・安心、防災に関する配慮と対策が必要不可欠である。巨大地震時には、地下空間と地上構造物は、動的に相互の影響を及ぼす可能性がある。そのため、地下空間の安全性の視点からも、地上空間の安全性の視点からも、地下空間と地上構造物との地震時相互作用を考慮して、都市の防災性能の向上を図って行くことが大切であると考えられる。

地下空間と地上構造物の地震時相互作用に関しては、未だ研究事例が少ないので、今後、より複雑な地盤構造の影響、三次元性の把握解明、実地震記録の収集と分析等について更に検討する予定である。

参考文献

- 1) 有賀義明：防災の視点から見た地下空間の特質について、土木学会第 10 回地下空間シンポジウム論文報告集, Vol. 10, p. 161-166, 2005. 1
- 2) 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, p. 221-224, 1989. 7
- 3) 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, p. 996-997, 1988. 10
- 4) 大林組：地中ディパーゼンス工法, 2004
- 5) 鹿島建設：道路トンネルシールドシステム, 2004
- 6) 建築単位の辞典研究会：建築単位の辞典, 彰国社, 1992
- 7) 土木学会：コンクリート標準仕方書耐震性能照査編, p. 47, 2002. 12.
- 8) 有賀義明：三次元再現解析によるダムの動的変形特性の定量的評価に関する研究, 埼玉大学学位論文, 2001, 3