

4. 地盤および基礎・地中構造物の破壊過程解明に関する調査

4.1 背景と目的

1995年に発生した兵庫県南部地震では多くの施設に甚大な被害を与え、6000名を上回る尊い人命が奪われた。これらの大地震が起こるたびに、それまでの耐震設計法の妥当性が問題視され、地震工学の新たな課題が露呈されている。特に地盤に関しては、1964年の新潟地震で顕在化した液状化現象に代表されるように、地震の度に新たな問題・課題が発生してきていると言ってよい。地震工学は、この中でも特に地盤に関連する部分は、このような大地震の経験と被害の教訓をもとに発展してきたものと言うことができる。

地震被害状況から分かるように、構造物を支える地盤の動的挙動特性は構造物の地震応答に大きな影響を与える。断層運動による地下深層部に発した地震動は、表層地盤を介して構造物に作用する。その表層地盤特性によって地震動が何倍も増幅する可能性がある。さらに地盤の破壊により地盤上に建設された施設が重大な損傷を受ける。過去の地震被害などから、多数の研究者が地震観測記録の分析、数値解析、振動実験等を通じて地盤の地震時挙動特性を解明しつつあるが^{1)、2)、3)}、地盤を構成する土の多様性と地形の複雑性、さらに解析手法と実験装置の制約から、現状では地盤の動的特性を構造物の設計に厳密に反映するまでには至っていない。

兵庫県南部地震を契機として、土木・建築などの構造物の耐震設計に関わる課題が検討され、土木学会をはじめとする学協会が検討委員会を設置し、いくつかの提言が発表された。特に、地震動については、内陸活断層によって引き起こされるような強い地震動強度を有するレベル2地震動を考慮することや、地形・地盤の特性を考慮した地震動の設定などが提案された⁴⁾。また、市街地と都市基盤の整備についても自然地形・地盤を考慮して実施することなどが提言された。

地盤に関する実験的な研究は、これまで三軸実験装置などによる土の要素力学特性の研究や小規模実験装置を用いた地盤の地震時挙動特性に関する研究が中心であり、いずれも要素実験に止まっている現状にある。しかしながら、模型実験などの要素実験が実地盤の挙動を忠実に再現するのは原理的には不可能である。一方、各種の地盤の動的特性に関する調査研究結果から、表層10m程度までの地盤の地震時挙動の解明が地盤災害の防止に極めて重要であると言われており、実大実験装置を用いた調査・研究が不可欠であると考えられる。

以上のことから、本調査は、過去の地震災害と研究の現状等を整理し、地盤および基礎・地中構造物等に係わる破壊現象を解明するために実施する実大三次元震動破壊実験施設完成までに解決しておくべき課題を抽出し、その課題を解決するための研究項目、研究方法および内容を提案することを目的とするものである。

4.2 過去の震災における被害実態および研究の現状

本節では、まず近代都市を襲い、大被害をもたらした兵庫県南部地震における地盤の被災状況を整理する。次に地盤の地震時挙動特性に関する研究の現状を簡単にレビューする。

4.2.1 兵庫県南部地震における被災状況

地盤の良否は地震災害を左右する極めて重要な要素である。過去の地震災害から耐震上問題の多い地盤としては、緩い砂質土地盤、軟弱粘性土地盤および急傾斜地盤などが指摘されている。兵庫県南部地震においてもこれらの地盤で大きな被害が発生した。地盤の視点から地震による構造物などの被害の原因を見ると、表層地盤での地震動の増幅と地盤の破壊によるものが考えられる。

(1) 地震動増幅による被害

兵庫県南部地震での建物の顕著な被害集中地域は既存断層と一致せず、六甲山麓に沿って南に約1キロ離れて幅1~1.5km程度の細長い帯状に南西から北東に分布している。すなわち、気象庁震度階Ⅶの地域である。この地域においては、地表面水平最大加速度は600~800galと推定される。その被害分布の特徴としては、

(a) 神戸市域を中規模地形分類に従って六甲山地、山麓部の段丘、それに続く複合扇状地、旧沿岸域ならびに埋立地域と大きく分類すると、建物全壊の被害分布は複合扇状地に分布する。これは地質分類では中~低位段丘層ならびに沖積層に相当する。

(b) この複合扇状地内での被害分布をさらに詳しく見ると、最終氷河期後半(約1.5万年前)までに形成された山麓に近い扇状地では被害は少ない。

(c) 旧沿岸地域と埋立地域では、地盤の液状化が見られたが建物の被害は比較的少ない。

などが指摘された⁵⁾。

兵庫県南部地震の後、大阪湾内や周辺地域で各省庁・自治体によって多くのボーリングや地下探査が実施された。建物の被害集中地域の基盤が典型的な逆断層の形状を有しており断層の南側は基盤岩が急激に深くなっていることが分かる(図-4.2.1)。この地盤構造をモデル化し地震動の数値シミュレーションを行った結果を図-4.2.2に示す。同図より、堆積層が急激に深くなる地域で、盆地端部での回折波と堆積層中を上昇するS波とが干渉することにより地震動振幅が大きく増幅されることがわかる。すなわち、地盤の不整形による地震動の増幅が地上構造物に大きな被害を与えることを同図は示している。

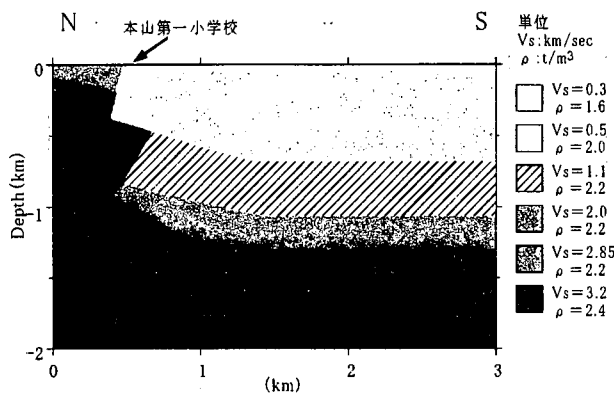


図-4.2.1 地盤の構造図⁶⁾

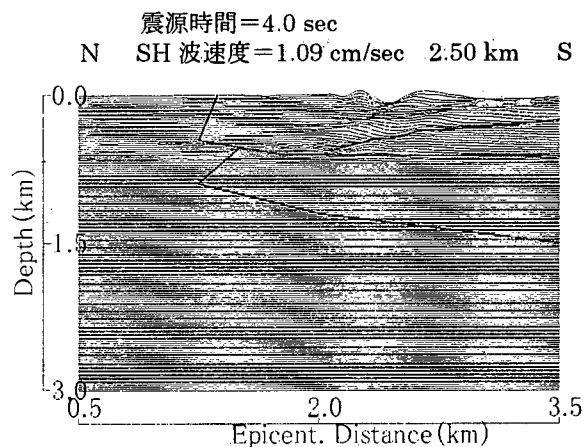


図-4.2.2 シミュレーション結果⁷⁾

(2) 地盤の液状化と流動による被害^{7), 8)}

旧沿岸域と埋立地域は、表層部の軟弱地盤の非線形特性や液状化の影響により、地震動がそれほど増幅されなかった。旧沿岸域と埋立地における構造物の被害形態は上述した地震動が大きく増幅された地域と異なり、液状化による地盤破壊により、護岸、基礎および地中構造物が甚大な被害を受けた。兵庫県南部地震における液状化の分布は神戸市の埋立地または海岸線に近い地盤を中心とし、須磨から新淀川付近までの海岸線に沿っている。液状化の程度は、ポートアイランド、芦屋浜シーサイドタウン、六甲アイランド等の埋立地で特に顕著であった。ポートアイランドでは、北埠頭、中埠頭および南埠頭はいずれもケーソン岸壁の滑動・沈下で傾斜し、背後のエプロンとヤードは陥没し、荷役機械も大きな被害を受けた。背後に埋立土のない南西隅部においても地盤の水平移動とケーソン沈下が見られた。六甲アイランドでは、コンテナヤードでの護岸の側方流動が大規模に起こり、南端護岸ではコンテナクレーンの倒壊が生じた。これら埋立地での護岸が海側へ大きく変位し、やや前傾して沈下しているのが特徴である。護岸の最大水平変位量は約 3m、護岸背後地盤の最大沈下量は約 1m に達していた。また、芦屋浜シーサイドタウンにおいては液状化によって地盤不等沈下を生じており、戸建住宅は約 6 割が半壊と判定された。

これらの埋立地の埋立材料は、ポートアイランドと六甲アイランドでは、それまで液状化しにくいと思われていたまさ土と泥岩質土である。芦屋浜シーサイドタウンの埋土は、淡路産の山砂と岡山産の海砂であるが、埋立層は上層、中層、下層から構成されており、上層地盤(深さ 4.5m)の N 値は 3~6 であった。既往の研究によれば、地表面から深さ 3m まで N 値が 3 以上の地層があれば(非液状化層)、その下の地盤は液状化の可能性が少ないとされており、当時は液状化が発生しにくい地盤と考えられていた。しかしながら、強震動のもとでは、従来液状化しにくいと思われた地盤も液状化が発生したことから、今後強震動下の地盤の液状化特性をより詳細に検討する必要がでてきた。

また、埋立地などの軟弱地盤地域の杭基礎の被害割合は他の地盤と比べて遙かに高いことが地震後の調査で明らかとなった。これは地盤の液状化により、上部構造物の周辺地盤の水平抵抗機能が失われるだけでなく、地盤の側方流動により基礎には側方流動圧が加

わり、地震時の基礎構造物にとって厳しい条件下におかれたためであると考えられる。図-4.2.3は兵庫県南部地震における橋脚の残留水平変位と橋脚周辺地盤の水平変位との関係を示したものである。同図より、橋脚の周辺地盤の変位の増大に伴い、橋脚自身の残留変位も大きくなっていることから、基礎構造物の挙動は地盤の残留変位に大きく依存していることが分かった。

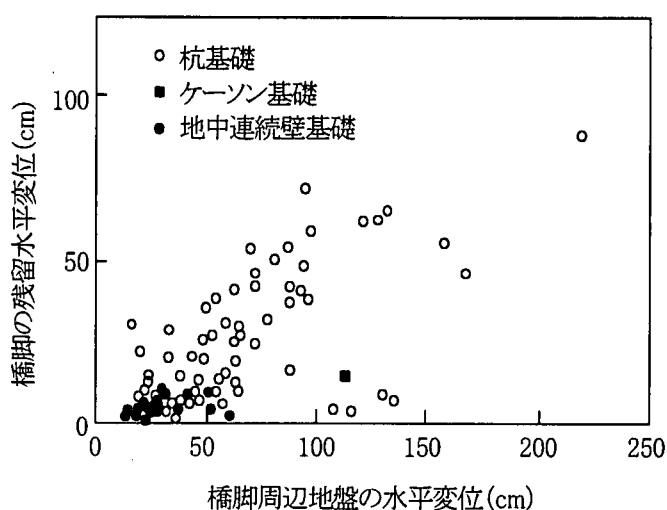


図-4.2.3 橋脚残留変位と周辺地盤変位との関係⁸⁾

兵庫県南部地震における地盤および基礎・地中・基礎構造物の被災状況から、地盤深層部の構造の解明、地盤不整形による地震動増幅予測法の確立、強震動下の地盤液状化の発生予測、地盤の側方流動量および基礎等の残留変位の予測法の開発などの課題が、地震防災の重要な課題であることが明らかになった。

4.2.2 研究の現状

地盤の地震時挙動、破壊、基礎・地中構造物との相互作用などの問題は、近年精力的に研究されてきたにもかかわらず、未解決の問題が多い。大地震が起こるたびに、軟弱地盤地帯で護岸やライフラインなどに同じような被害が繰り返され、その対策は対処療法的なものにとどまり、抜本的な解決策が提示されるに至っていないのが現状である。

今日までになされてきた研究は、次のような壁にぶつかっている。まず第一には、地盤を構成する土が微少な粒子の集合体であって、連続体のように変形解析になじみやすい物質ではないことがある。しかも、地中に存在する水がこれにからみ、土の挙動をいっそう複雑にして液状化のような問題を引き起こしている。そのため、地盤の地震応答をコンピュータによって予測することの信頼性がなかなか改善できないでいる。第二の限界は、土の研究の中心的位置を占めている三軸試験などの要素実験では30%程度のひずみしか起こすことができず、実際の地盤が破壊して極めて大きな変形を生じた時のふるまいが推定しにくいことがある。この問題に対しては模型実験というものが従来から行われてきた。しかし、使われてきた模型の寸法が実地盤よりかなり小さくならざるを得なかったことが、第三の限界点である。在来の振動台実験では、地盤の厚さがせいぜい1 m程度に過ぎず、実地盤よりかなり薄い。すると、発生している土かぶり圧力も小さく、それによって影響される土の応力～ひずみ挙動も、実地盤では異なるものになってしまう。また、遠心力載荷実験では、土かぶり圧力の問題が解決されてはいるものの、地盤寸法に比べて土粒子の直径が相対的に大きすぎ、これが破壊現象に影響している。

実際の被害例を精密に調べることができれば、上記の三つの限界はすべて解消できるだ

ろう。しかし、被害地点に入射した地震動ひとつ取っても、地震後に推定することはむずかしい。まして、地震前に土がどのような応力と密度を持っていたか、そして、土が振動中にどのように振る舞ったかを地震後になって推測することは不可能に近い。ここに実物大模型地盤の震動実験を行うことの意義がある。

実物大模型実験では、応力～ひずみ挙動のあらかじめ分かっている材料で地盤を造成することができる。そして、指定された地震動でこれを加振し、埋設してある計測器で土のふるまいを記録することも可能である。実物大であるから、土かぶり圧の問題も解決されていることは言うまでもない。現在、三木市に計画されている20m×15m寸法の世界最大の実大三次元震動破壊実験施設は、このような研究需要を満たしうるものである。しかし、そのような大きな模型地盤にはそれなりに特有の問題があり、たとえば巨大かつ均質な模型地盤の造成法一つとってみても、未経験の課題である。それらを振動台完成までに解決しておくことが、現在強く求められている。

4.3 研究すべき課題の整理と抽出

4.3.1 研究対象

本項では、地盤そのものの応答及び破壊現象、さらにそれが土木・建築構造物の基礎および地中線状・面状構造物などに与える影響、基礎、地中構造物、土構造物、抗土圧構造物の破壊過程の解明を研究の対象とすることとする。

4.3.2 解明すべき現象・過程等

地震時における地盤の挙動は古くから研究が行われ、多大な成果が得られている。当初は成層多層地盤の線形応答問題から始まり、地盤の地震時非線形性を考慮し、等価線形、非線形といった具合に研究が進展し、最近では等価線形計算による地盤の応答解析はほぼ実務レベルに浸透している。しかし、兵庫県南部地震においては、従来考えていたよりもはるかに大きいレベルの地震動が観測され、このような、おそらく相当強い非線形領域にある地盤の応答について、従来の解析手法の検証を含めて新たな研究が必要であることが明らかとなった。また、兵庫県南部地震のいわゆる震度Ⅶ地区の地表面の観察結果から地盤は破壊レベルに近い状態にあったことが明らかであり、このような状況についても応答特性と合わせて研究すべき課題である。さらに、このような強い地震動は地盤の不整形性にも大いに影響されているものと考えられ、地層構成が大きく変化する地盤、盛土や切土で造成された地盤などでの地盤の応答特性を研究する必要が出てきた。

地盤と基礎あるいは地中構造物の動的相互作用については、従来理論的あるいは解析的に多くの研究がなされてきた。しかし、これらの大部分は地盤および構造物が線形領域にとどまることを前提としたものであり、上で述べたような地盤が強い非線形性を示すような状態では、少なくとも理論解はなりたたない。兵庫県南部地震では、強震記録の解析から、自由地表面上の応答に比べ建物基礎上での応答が平均的に30%程度低減したとの報告

があり 4)、動的相互作用の一つである入力損失の問題が実証されたと言える。しかし、基礎・地盤間の力のやりとりを含めた相互作用全体の問題、すなわち、強い非線形下の地盤でしかも基礎が塑性領域に入るレベルではまだまだ多くの課題が残されている。

道路、鉄道あるいは河川堤防の盛土など土構造物の耐震問題はこれまであまり議論されてこなかった。これら構造物は、地震後の復旧が比較的容易なことから、一般に耐震設計がなされていないか、されていても簡易な剛体安定的な計算によるものであった。しかし、大規模な地震においては、広域にこれらの構造物が被害を受け、このような場合には、復旧も容易でないことから、土構造物についても耐震設計をしようという動きがある。この場合、従来の安定計算法の妥当性、限界を踏まえて、全く新たな、おそらく変形をベースとした計算法、設計法が必要となる。擁壁や護岸などの抗土圧構造物の場合もほぼ事情は同じである。河川や岸壁の護岸などでは、構造物が移動あるいは傾斜することにより、背後の地盤が流動する場合があります、その耐震設計は、非常に重要な課題となりつつある（後述）。また、近年、土構造物に対して人工材料により補強する補強土工法等が取り入れられつつあるが、これら工法の設計法も十分には確立されていない。

地盤の液状化問題については、とくに 1964 年新潟地震以来研究が進み、緩い砂の液状化発生の予測はかなりの精度で可能になってきているが、N値が 20 以上の締まった砂地盤が強い地震動を受けた場合の予測方法、細粒分を多く含む砂地盤や砂礫地盤の液状化強度特性の把握など、多くの課題が残されている。

液状化に伴う地盤の側方流動については、現状ではその発生機構そのものが明確ではない。したがって、流動の発生する条件やその大きさの予測手法は未だ確立されていないのが現状である。さらに地盤の流動化が基礎に及ぼす影響についても、兵庫県南部地震の事例分析に基づきとりあえずの形で設計基準類に取り入れられたものの、そのメカニズムから設計法にわたって解明されるべき課題は多い。

地下鉄や共同溝といった地下構造物は、兵庫県南部地震により始めて強地震動を経験したことになり、地下鉄駅崩壊のような大きな被害を受けた。特に地表面近くの地震動の増幅、この増幅に追従出来ない構造物の変形特性（つまり小さな変形追従能力しかなかった）がこのような大きな被害になったものと考えられており、地盤の増幅（変形）特性と合わせて、地中構造物の変形性能の把握、これらを考慮した設計法の確立が緊急の課題となっている。

一方、都市地震防災の観点から将来に発生しうる問題として、例えば、ゴミで海面を埋め立てた地盤や丘陵地の谷に造成したゴミの最終処分場の地盤の安定問題がある。これらの地盤は今後急速に増大するとともに、ここには都市施設が立地する計画が多い。このような地盤は（ここでは環境脆弱地盤と名付ける）、地震時においてその挙動が全くわからないことから都市施設の立地には問題が多い。また、ゴミの最終処分場が地震により崩壊した場合、周辺環境に影響を与えることが予想され、地震時の安定はきわめて重要である。

最近、建設コストの縮減に大きく貢献しうる構造として高補強土を用いた橋台・橋脚などまったく新たな発想の土構造物が構想され、実際に建設されている。しかし、これらは

まだ震災の経験がなく、その地震時の挙動特性が全くといってよいほど把握されていない。このような構造物の強震時の挙動、さらに破壊過程を解明するとともに、その設計法の確立が求められている。

以上の土に関連する課題を研究していくためには、先の研究の現状で述べた通り実験、しかも出来るだけ実物に近い振動実験が不可欠である。しかし、現状ではこのような大規模な実験はほとんど行われておらず、最も基本的な土槽の作成方法といった実験技術から、研究・開発を行う必要がある。

4.3.3 解明すべき課題の整理と抽出

地盤および基礎・地中構造物の解決すべき課題を抽出するに当たっては、飛躍的に科学技術の進歩に貢献することを念頭に置いて、以下の三つの視点をもって都市地震防災の重要性と緊急性を考慮しつつ整理することにした。

- 1) 地盤および地中・基礎構造物の解決すべき課題
- 2) 地盤および地中・基礎構造物との動的相互作用の解決すべき課題
- 3) 上述の課題を解決するための実験技術と解析手法の開発に関する課題

表-4.3.1 には研究対象の相互関連と着目課題の区分を示す。以下には表の分類に従い研究課題を列記して示す。

表-4.3.1 研究対象の相互関連と着目課題の区分

研究対象	地盤の状況		備考
	小変形 (弾性の状態)	大変形 (液状化、破壊など)	
地盤そのもの	A	→ B	現象の解明(非線形特性、液状化強度など)
地盤・構造系	↓ C	→ D	構造物の抵抗と構造物に作用外力の相互作用
実験技術	E	→ F	模型・実地盤の作成、土槽の設計など
解析手法	G	→ H	精度の良い3次元解析手法、破壊解析手法

→ : 課題の複雑性の増加を意味する。

(1) 地盤に関する研究すべき課題

a) 不整形地盤の地震動増幅特性－A－

洪積台地から沖積平野に急激に変化するような地盤に代表される地盤の不整形による地震動の増幅については、古くから指摘されていたが、その発生メカニズムはまだ究明されていない。兵庫県南部地震での「震災の帯」も基盤不整形によるフォーカシング現象と考えられる。地盤の地形的な影響を解析的に求めることは、境界条件の処理などの問題から現状では困難なことから、実大三次元震動破壊実験施設を用いて検討するのが有効な手段である。また、軟弱な粘性土層と砂質土層が互層になっているような複雑な地盤の地震時挙動特性も理論解析と実験研究を通じて解決する必要がある。

b) 密な砂・細粒分を多く含む砂、砂礫などの地盤の液状化の特性－B－

緩い砂の液状化問題は多数の研究がなされて、その成果は実務的な設計に取り込まれるようになった。しかし、兵庫県南部地震被害状況から強震動下においては密に締まった砂地盤、細粒分を多く含む砂地盤、あるいは砂礫地盤でも液状化が発生することが分かった。実大震動破壊実験などを通じて様々な地盤の液状化特性を明らかにして、その予測手法を開発する必要がある。

c) 液状化による地盤の流動特性とその対策工法－B－

過去の地震においては、液状化地盤の流動化によって基礎や地中構造物が大きな被害を受けた。地震動によって地盤が健全な状態から流動に至るまで、流動化後の動きのメカニズムを究明することは、地盤流動化の予測手法の確立と対策工法の開発に極めて重要である。また、地盤の流動化の発生は、地盤の不整形との関連が深いことから、実大震動実験による現象の解明が必要である。液状化による地盤の沈下、浮上と側方流動に対して、様々な対策工法が提案されてきたが、対策工法の選定や設計方法はまだ確立されていない。対策工法は、地盤変状の発生メカニズムに大きく依存しているので、地盤変状の発生メカニズム解明に伴って改良していくべきである。特に既設構造物に対する経済的な対策工法の研究・技術開発を進める必要がある。

d) 環境脆弱地盤(ゴミなどの新しいタイプの地盤)の地震時挙動特性－A、B－

近年廃棄物や建設発生土は増加の一途を辿っており、これらは、海面埋立てに利用されたり、山間丘陵地に最終処分されている。土地の有効活用の面から、これら地盤は、将来的に利用せざるを得ないと考えられる。しかし、現状ではゴミ地盤はまだ震災の経験がなく、また、その力学特性についてもほとんど研究されていない。ゴミ地盤が破壊した場合、自然環境を悪化させる恐れがあり、二次災害防止の観点からゴミ地盤の地震時の増幅、破壊などの特性を検討する必要がある。また、このように新しいタイプの地盤で、まだ震災の経験のない地盤が他にないかについても調査・検討す

る必要がある。

(2) 土構造物に関する研究すべき課題

a) 盛土や切土の地震時安定問題－A、B－

道路、鉄道、河川堤防等に用いられる盛土の安定問題は、古くて新しい問題といえることができる。これらの土構造物は、従来、耐震設計がなされないか、なされたとしても古典的な安定計算しか手法がなく、精度的に大きな問題があることがわかっている。強震時におけるこのような土構造物は、安定問題ではなく変形問題としてとらえられなければならない。このような研究はこれまでほとんど行われておらず、被害事例の分析からそれを受けた実験的な研究が、まずなされなければならない。

b) 補強土を用いた土構造物の地震時挙動特性－A、B－

地盤工学の発展に伴って補強土を用いた擁壁・盛土あるいは橋脚が建設されつつある。このような、いわば次世代土構造物は、経済性と占用面積が少ないことから、これから益々増えていくと考えられる。一方、補強土を用いた擁壁・盛土などの設計においては静的荷重による安定性が検討されるが、動的荷重による検討は、変形問題も含めてまだなされていない。補強土を用いた擁壁・盛土と橋脚などの地震時の挙動特性、破壊過程を明らかにして、耐震設計法を至急に整備する必要がある。

(3) 護岸などの構造物に関する研究すべき課題

a) 地盤の流動化による護岸の挙動特性と対策工法－D－

兵庫県南部地震では、地盤の流動化によって護岸などの港湾構造物が壊滅的な被害を受けた。さらに、国際競争の激化の中で港湾インフラ整備では構造的に未知である水深20mを越える岸壁の建設も必要となる。一方、護岸に代表される港湾施設に関する耐震設計法はまだ十分とは言えない。実大三次元震動破壊実験を用いた地盤流動化による港湾施設の被害の検証と地震時の挙動特性の解明および対策工法の開発は極めて重要である。

b) 擁壁・橋台の地震時の挙動特性と対策工法および補修・補強工法－C、D－

兵庫県南部地震では、擁壁・橋台の破壊によって鉄道や道路などが寸断され、緊急対応と復旧に重大な障害をもたらした。一方、既設の擁壁・橋台などの抗土圧構造物に対しての補修・補強工法はあまり検討されていない。これらの大量に存在する構造に対する経済的かつ効果的な補修・補強工法を開発することは、地震災害低減の重要な課題であると考えられる。また、強震時に作用する非常に大きな地震時土圧を軽減する工法としては、構造物の背後の裏込め材を軽量化あるいは固結化する工法等が検討されている。こうした軽量化、あるいは固結化した裏込めと構造物の地震時の挙動についてはまだ十分に解明され

ておらず、この点に関する検討を行う必要がある。

(4) 基礎構造物に関する研究すべき課題

a) 杭基礎と地盤の動的相互作用問題－C、D－

杭基礎と地盤の動的相互作用問題は古くから研究され、多数の知見が得られている。しかし、今までの研究は殆ど単純な地盤において弾性挙動の範囲内での研究が中心であり、実験的な研究についても実験装置の制限で小規模の模型実験しかできなかった。軟弱な粘性土層と砂質土層が互層になっているような複雑な地盤に位置する杭基礎と地盤との動的相互作用の問題は、実務上重要な要素であるにもかかわらず、これまでほとんど研究がされていないと言ってよい。このため、中小規模の実験による現象の把握と同時に実大三次元震動破壊実験施設を用いて複雑な地盤における杭基礎の破壊実験を実施し、単杭、群杭の相互作用の特性と杭の終局耐力を解明する必要がある。

b) 地盤液状化の発生過程と基礎の挙動－D－

過去の震災状況から液状化地盤においては、基礎構造物の被害は地上構造物の被害を遙かに越えていることが分かる。地盤の液状化の発生過程が基礎構造物にどのような影響を与えるかについてはあまり検討されていないが、液状化時における基礎構造物の被害予測法と対策工法を確立するために、実験研究と理論解析を通じて地盤液状化の発生過程と基礎の挙動との関係を明らかにする必要がある。

c) 液状化に伴う地盤の流動による杭基礎の地震時挙動と対策工法－D－

兵庫県南部地震では、液状化地盤における杭基礎は甚大な被害を受けた。その被害原因についてはまだ解決されていない。液状化地盤における杭構造系と地盤との相互作用の特性を解析的に求めると同時に、実大三次元震動破壊実験施設を通じて、地盤の流動による杭基礎の挙動メカニズムを解明し、耐震設計法と地震の対策工法を開発する必要がある。

d) 地盤変状による住宅基礎の挙動特性と補修・補強工法－D－

木造住宅基礎としては布基礎がよく使われる。兵庫県南部地震では、軟弱地盤上にある布基礎住宅は地盤の変状によって大きな変形を受けていた。国民の生活に密接な関係がある住宅基礎の地震時変形特性を大規模震動台で検証し、基礎の補修・補強工法を開発するのは都市地震防災の観点から非常に重要である。

(5) 地中構造物に関する研究すべき課題

a) 地盤変状による地中管路の挙動特性と対策工法－D－

電力、ガス、水道などをはじめとする地中管路の地震時挙動特性は地盤の変状に大きく

依存している。地盤の沈下・浮上、側方流動などの永久変位は管路施設に大きな被害を与えていることが明らかとなっている。このため、人工造成地や緩やかな傾斜地盤など、実際の地形・地盤を三次元的にモデル化し、この全体挙動を追跡し、埋設管等の被害挙動を解明する必要がある。

b) 液状化による地中構造物の浮上・沈下に対する対策工法の構築－D－

地震時マンホールなどの地中構造物が液状化により沈下・浮上するという現象が多く見られた。グラベルドレンなどの地中構造物の沈下・浮上の対策工法はまだ震動台での実証が十分に行われていない。実大三次元震動破壊実験施設を用いて地中構造物の浮上・沈下と周辺地盤の挙動特性の関連を明らかにし、有効な対策工法を開発する必要がある。

c) 地震時地下鉄駅や地下街などの地中構造物の挙動－D－

兵庫県南部地震では、神戸高速鉄道地下鉄大開駅が壊滅的な被害を受けた他、地下鉄、共同溝に大きな被害が発生した。各種の解析により、この被害原因の究明が行われ、そのメカニズムは概ね解明されたといえるが、実験的な検証は十分になされていない。この被害については、三次元的な効果の影響が非常に大きいと考えられ、三次元的な効果を解明するための解析的なシミュレーションを実施するとともに実大三次元震動破壊実験施設を用いた実験が必要である。

(6) 実験技術に関する課題

a) 地盤モデルの作成法－E、F－

今まで相似則などのいろいろな問題を抱えながら地盤震動実験を実施してきたが、大規模な実地盤を表現できる地盤作成法はまだ確立されていない。実大実験は相似則を満足できるが、いかに均質な地盤を作成するかが大きな問題となる。また、均質地盤だけではなく不整形地盤に対する震動実験がかなり期待され、地盤作成法の確立は地盤震動実験の生命と言っても過言ではない。また、地形による地盤流動特性の検討のためには、地形をマクロに表現するジオラマ実験を実施することが考えられるが、このような地盤の作成技術についても検討する必要がある。

b) せん断土槽の作成法－E、F－

地盤震動実験の課題においては、地盤作成法のほか、もう一つ大きな課題は実験土槽の作成である。半無限的な地盤を有限地盤にする際、如何に境界条件を精度よく表現できるかが非常に重要な課題である。また、現在よく用いられるせん断土槽は主に中規模な水平動を対象として開発されてきたが、強烈な鉛直動に対応できる三次元大型せん断土槽の開発が必要である。

(7) 解析手法に関する課題(構造物破壊挙動を解析できる手法の開発)－G、H－

今まで地震応答解析手法としては、基本的に微小変形理論に基づく有限要素法や境界要素法などがよく用いられている。レベル2などの強震動による地盤および地中・基礎構造物の耐震設計法は最終的に極限状態設計法を確立する必要があることから、大変形や破壊の問題まで解析可能な新たな解析手法を開発する必要がある。

4.4 研究課題および内容

地盤および地中・基礎構造物に関する研究すべき課題については、地盤そのものにおいても多くの課題があり、それに構造物が絡むとまた一段とその課題も多く、複雑化してくる。本来であれば、それぞれが持つ問題を単純化し、その要因に着目した地道な研究を行い、問題を解決することが必要であるが、ここでは、以下の基本方針に従い5つの研究課題を挙げることにする。ここで挙げる研究課題と4.3の抽出課題との関係を表-4.4.1に示す。

- ①複雑に絡みのある問題を一つの実験で対応できうるものを優先する。
- ②まだ震災の経験がなく、その地質特性と被害状況が未解明なものを優先する。
- ③環境問題やコスト縮減から社会的要請が高く、かつ社会基盤整備に対する貢献度の高いものを優先する。

4.4.1 地盤破壊のメカニズム解明と地盤破壊が構造物に与える影響に関する研究

(1) 目的と必要性

地盤破壊が甚大な被害を引き起こすということは周知の事実であり、過去の地震災害を振り返ると、このことは幾度となく繰り返えされていることがよく分かる。兵庫県南部地震も例外ではなく、ポートアイランドをはじめとした人工島の多くで、広範囲に発生した地盤の液状化によって、各種構造物に大きな被害を生じさせた^{7) 9)}。

強震時における地盤の挙動特性、およびそれが構造物に与える影響に関する研究は、これまで理論解析と実験的研究の両面から積極的に行われてきたが、微小変形理論に基づく解析手法と中規模の実験装置による要素実験では、地盤の破壊までを忠実に再現することはほとんど不可能である。また、地域特性と地盤災害との関係は事例調査による研究に止まり、理論的もしくは実験的な検証の段階に至っていない。さらに、強震時における地盤破壊のメカニズム、ならびに地盤破壊が構造物に与える影響、そして地盤災害の地域特性に関しては、未解明のものが多く残されている。

表一4.4.1 抽出項目と提案課題との対応

4.3.3の抽出項目		4.4の提案課題				
		(1) 地盤破壊のメカニズム解明と地盤破壊が構造物に与える影響に関する研究	(2) 杭基礎の破壊過程解明とその上部構造系に与える影響に関する研究	(3) 土構造物の破壊過程解明とその対策技術に関する研究	(4) 近代都市がもたらした環境脆弱地盤の耐震性に関する研究	(5) 大規模震動破壊実験を想定した試験土槽および地盤作成技術の開発
(1) 地盤に関する研究すべき課題	a) 不整形地盤の地震動増幅特性 -A-	○				△
	b) 密な砂・細粒分を多く含む砂、砂礫などの地盤の液状化の特性 -B-	△	△			△
	c) 液状化による地盤の流動特性とその対策工法 -B-	○	△		△	△
	d) ゴミ地盤などの新しいタイプの地盤の地震時挙動特性 -A, B-				○	△
(2) 土構造物に関する研究すべき課題	a) 盛土や切土の地震時安定問題 -A, B-	△				△
	b) 補強土を用いた土構造物の地震時挙動特性 -A, B-			○		△
(3) 擁壁や岸壁などの抗土圧構造物に関する研究すべき課題	a) 地盤の流動化による護岸の挙動特性と対策工法 -D-	△			△	△
	b) 擁壁・橋台の地震時の挙動特性と対策工法および補修・補強工法 -C, D-	△				△
(4) 基礎構造物に関する研究すべき課題	a) 杭基礎と地盤の相互作用問題 -C, D-		○			△
	b) 地盤液状化の発生過程と基礎の挙動 -D-		○			△
	c) 側方流動による杭基礎の地震時挙動と対策工法 -D-		○			△
	d) 地盤変状による住宅基礎の挙動特性と補修・補強工法 -D-	△				△
(5) 地中構造物に関する研究すべき課題	a) 地盤変状による地中管路の挙動特性と対策工法 -D-	△				△
	b) 液状化による地中構造物の浮上・沈下に対する対策工法の構築 -D-	△				△
	c) 地下鉄駅や地下街などの地中構造物の地震時挙動 -D-	△				△
(6) 実験技術に関する課題	a) 地盤モデルの作成法 -E, F-		○	○	○	○
	b) せん断土槽の作成法 -E, F-		○	○		○
(7) 解析手法に関する課題 (構造物破壊挙動を解析できる手法の開発) -G, H-		○	○	○	○	

○ ; 直接的に関連するもの
△ ; 間接的および実験対象として可能なもの

ところで近年、制御技術の進展に伴い超大型の振動台の建設が可能となり、振動台のテーブル寸法が20m×15mという世界最大の実大三次元震動破壊実験施設が、兵庫県三木市に建設される予定である。これを用い、実地盤をモデル化した震動実験を行うことにより、地盤破壊までの振動特性を定量的に評価することができるようになると考えられる。また、大変形時の地盤の応答解析手法が、この振動台を利用した実験結果との検証で確立されれば、このことは計算力学の飛躍的な発展にもつながり、大いに期待されている。

(2) 研究の内容・方法

1) 地盤の不整形などによる強震時の振動破壊と構造物に及ぼす影響に関する研究

(a)兵庫県南部地震での地中管路の被害分布から、地形などの地盤の地域特性は地中構造物に与える影響が非常に大きいことが指摘されてきている。兵庫県南部地震で大きな被害を受けた地域の地盤と地形を再現した模型に、人家やライフラインなどの施設も含めてモデル化し、立体ジオラマ実験を実施して、地域的な地盤の不整形による地震動の増幅特性と地盤破壊が地中構造物に与える影響を評価する。

(b)震動実験は検討できるケースに限りがあるため、地形的な影響をパターン化し、三次元有限要素法などの解析手法を用いて、地域特性の地盤の地震応答に対する影響について定量的な検討を行い、地震時地盤応答の予測手法を開発する。

(c)立体ジオラマ実験はあくまでも模型実験であることから、ジオラマ実験を効率的かつ合理的に実施するために、中規模の実験およびシミュレーション解析などにより、ジオラマ震動実験における不整形地盤や地中構造物などの作成法と妥当性について検討する。

2) 強震動下の地盤液状化の発生メカニズムと予測・対策方法に関する研究

(a)兵庫県南部地震では、現行の液状化判定法で液状化しにくいと思われていた地盤でも液状化が発生した。そこで、強震動下の地盤の液状化の発生メカニズムを検討するために、兵庫県南部地震で液状化した地盤に対して現場調査を行い、室内三軸実験と震動実験を用いて、強震時における土の動的特性と液状化発生との関連性を調べる。

(b)中規模振動実験の結果に基づき、強震動下の地盤の液状化発生特性を明らかにするとともに、新たな地盤液状化調査機器（現場において簡易に強度評価が可能なもの）を開発して、地盤液状化の調査・予測の方法を確立する。

(c)中規模実験は、地盤の相似則を完全に満足するわけではないので、最終的には実物震動実験を実施して、中規模実験の結果の妥当性を検討し、液状化地盤に対しての予測手法および対策工法を実証する必要がある。

3) 液状化に伴う地盤流動の発生メカニズムと構造物に及ぼす影響に関する研究

(a)振動台実験や遠心力実験などを実施し、地盤材料や地層構成などと液状化の発生ならびに地盤流動化との関連特性を検証する。要素実験で液状化に伴う地盤流動の発生メカニ

ズムと構造物に及ぼす影響を把握する(図-4.4.1 参照)。

(b)地盤の三次元的な流動特性などを検討するために、一つの実験で多数の研究課題を検討できるジオラマ実験の利点を利用して、不整形地盤の震動実験に用いた地盤を飽和させ、強震後地盤の流動化発生メカニズムと地盤永久変位の分布特性を定量的に評価する。

(c)ジオラマ震動実験を通じて地盤液状化発生過程と流動化の発生が構造物に与える影響、および地中・基礎構造物の終局状態を明らかにする。また、地形特性を考慮しうる地盤の液状化と流動化の対策工法を開発し、その有効性を検証する。

(d)大変形を受ける地盤の地震応答解析手法を開発し、パラメーターの解析によって地盤側方流動の発生を予測する方法を確立する。

(3)期待される成果

本研究の遂行に当たっては、地盤の破壊メカニズムと地盤の地域的な増幅、流動特性を明らかにすることができる。都市地震防災技術の向上に貢献するだけでなく、地盤工学の発展にも大いに貢献できるものと考えられる。

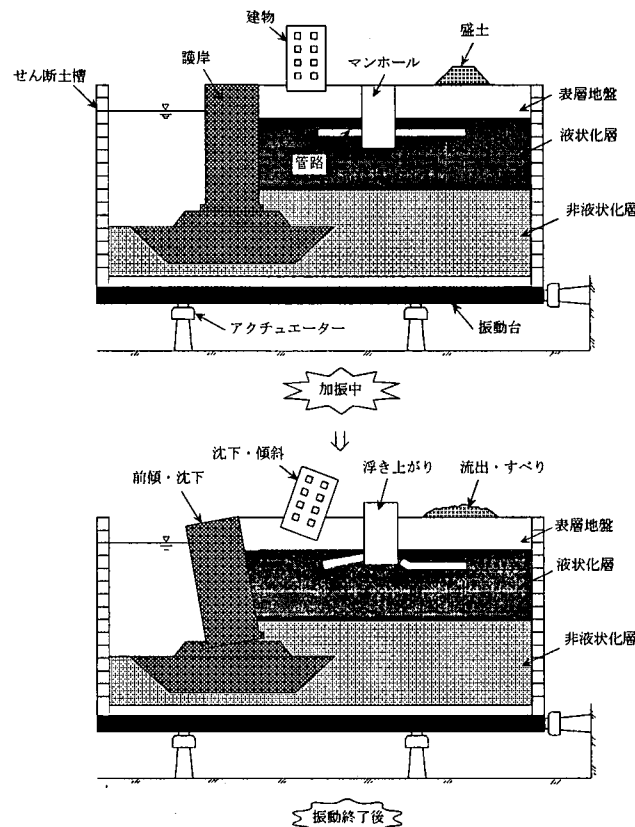


図-4.4.1 振動実験のイメージ図

4.4.2 杭基礎の破壊過程解明とその上部構造系に与える影響に関する研究

(1) 目的と必要性

1995年の兵庫県南部地震では、杭基礎に甚大な被害が発生した。その被害の特徴としては、地盤の液状化ならびにそれに伴う地盤の側方流動により、杭頭だけではなく、杭の中間部あるいは先端部でも多くの被害が発生しているものである¹⁰⁾。杭基礎の被害は、過去の地震においても問題にされながら、地中の構造物であるため、その被害の原因と実態はほとんど明らかにされていない。強震時には地盤が非線形応答を示すことは明らかであり、このことが杭基礎の地震応答特性にどのような影響を及ぼすかを十分に把握する必要がある。地盤の液状化ならびに液状化に伴う地盤の側方流動によって構造物がどのように応答するかについて、解析的に解明しようとする研究の重要性は、1995年の兵庫県南部地震による被害の甚大さからも明白であり、来たるべき次の大地震に備えるためにも、その緊急な研究開発が強く望まれている。杭基礎の地震時破壊過程のメカニズムの解明および杭基礎の終局破壊状況が確認できる地震応答解析手法の開発は今後の杭基礎の耐震設計を考える上できわめて重要である。

一方、杭基礎の被害低減を考えると、杭基礎の老朽化や被災程度などを精度よく調査できる方法を開発する必要がある。また、耐震性が十分でないと判定された既設杭の補強方法などについても研究する必要があると考えられる。

(2) 研究内容・方法

1) 杭基礎の地震時挙動特性の把握ための研究

(a) 杭基礎の地震時の被害の再発を防ぐために、過去の地震における杭基礎の被害に対して実態調査を行い、構造形式や地盤種別などに基つき杭基礎の被害をいくつかのパターンに分類し、被害原因を検討する。

(b) 1 G場での振動実験に加え、遠心力場での振動実験、ならびに起振機実験を実施することによって、液状化に伴う地盤側方流動時の杭の動的応答特性と杭が損傷するといった終局状態に至るまでのプロセスを解明する。また、ハイブリット振動実験を行い、上部構造系と杭基礎との相互作用関係を明らかにする(図-4.4.2参照)。

(c) 地盤の破壊と側方流動が評価できる解析法の開発を行い、開発した手法を用いて地震時における杭基礎の破損や終局の破壊状況などを定量的に評価する。

2) 杭基礎の耐震診断・補強および耐震設計に関する研究

(a) 杭基礎の非破壊損傷調査法について調査・整理するとともに、振動実験と数値解析を通じて杭頭だけでなく、杭の中間部あるいは杭の先端部の状況も把握できる信頼性の高い杭基礎の損傷度調査法を開発する。

(b) 振動実験と理論解析および GIS 手法を用いて杭基礎の振動性状と上部構造および地

盤特性との関係を明らかにし、補修・補強に関するエキスパートシステムを構築する。

(c)地盤変状と上部構造の慣性力がどのように杭に作用しているかを振動実験と理論解析で検証し、地盤変位と慣性力が杭応答に与える影響を解明する。これに基づき、地盤変状を考慮した合理的な杭基礎の耐震設計法を確立する。

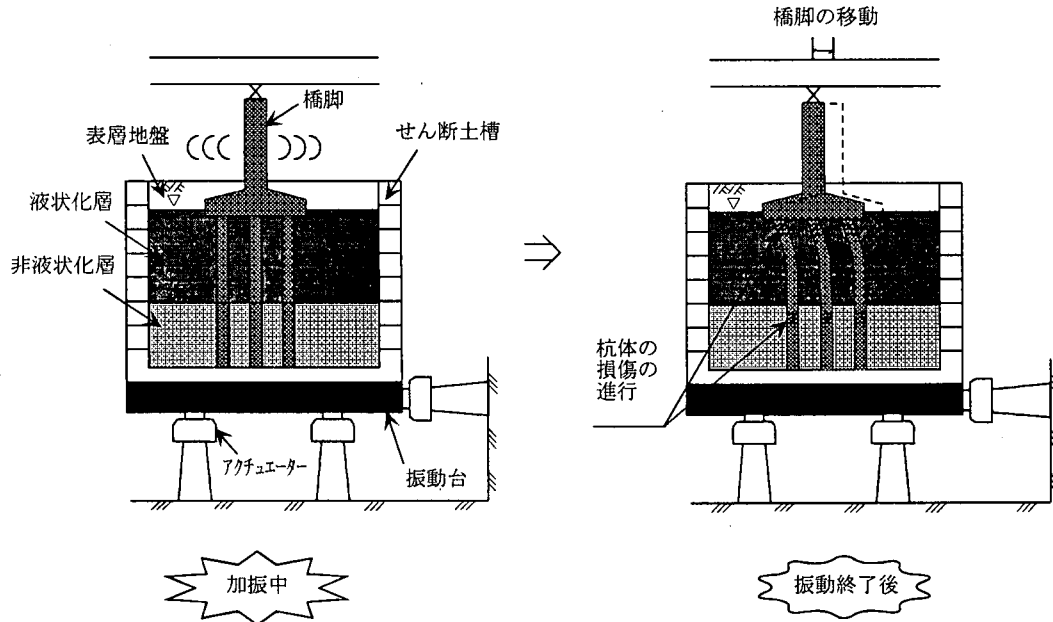


図-4.4.2 振動実験のイメージ図

(3) 期待される成果

地震時における杭基礎の破壊メカニズムと上部構造物に与える影響を解明することは、上部構造と基礎構造の耐震強度および限界状態を規定する性能規定型設計法につながり、杭基礎の耐震技術の発展に大きな役割を果たすことができる。また、来たるべき次の大地震に対して杭基礎の損傷による地震災害の低減に大きく貢献できる。

4.4.3 土構造物の破壊過程解明とその対策技術に関する研究

(1) 目的と必要性

近年、都市開発の進展により、盛土や切土自然斜面が急増してきた。それに伴い、盛土や切土自然斜面の地震時の崩壊による災害は急速に増えてきた。また、これらの崩壊あるいは部分的な地盤破壊により、建物やライフラインが被害を受けることが多くなってきた。地震時の盛土と切土自然斜面の破壊のメカニズムや予測対策方法はこれまであまり検討されていない。従って、実験や解析により早急に検討する必要がある。

さらに、盛土については、補強材を用いた新しい盛土工法が急速に開発されており、補強材を用いた橋脚も試験的に建設されるようになってきた。また、地震時土圧を軽減させ、より経済的に抗土圧構造物を建設する目的で、構造物の背後の裏込め材を軽量化あるいは

固結化する工法等も多く採用されはじめている。これらの補強土工法は、建設コストが大幅に縮減できることと盛土の占有面積を少なくできるという利点から、今後、同工法による土構造物が益々増加すると考えられるが、地震時の被害メカニズムや耐震設計法についての検討はほとんど行われていない。

兵庫県南部地震においては、盛土や切土自然斜面は各所で大きな被害を受けていること、また補強土工法による土構造物のニーズに対応し、これら土構造物の破壊過程モードを解明し、耐震計算法および対策工法の研究・開発が必要と考えられる。

(2) 研究の内容・方法

1) 盛土および切土自然斜面の崩壊過程の解明とその対策工法に関する研究

(a) 強震動を受ける盛土および切土自然斜面の崩壊過程を解明するために、過去に盛土と自然斜面の被害事例を調査・分類し、GISを用いて地盤条件や地震動の特性との関連を検証する。

(b) 大変形を考慮できる解析手法を開発し、斜面の傾斜角度や土の特性などと被害形態との総合的な関係を理論的に検証する。これにより、盛土および切土自然斜面の地震時安定解析および残留変位の予測手法を開発する。

(c) 中規模の震動実験を通じて解析手法の妥当性を検討するとともに、盛土および切土自然斜面の破壊過程とモードを解明し、対策工法を検証する。

(d) 実物の震動実験を実施して、破壊過程を定量的に評価し、開発した解析手法と中規模実験の精度を検証すると同時に、地震対策と予測手法を開発する。

2) 補強土による新たな構造物の動的特性とその耐震性に関する研究

(a) 室内試験で補強材の力学特性を検討するとともに、新たな補強材と構造物を開発する。また、補強材を用いた橋台、橋脚の設計・施工法を確立する。

(b) 補強材を用いた橋脚に対してハイブリット振動実験およびシミュレーション解析を行い、橋脚の地震時挙動特性と上部構造の相互作用特性を解明し、耐震設計法と補強対策工法を確立する。

(c) 擁壁や護岸などの構造物の実験体を作成し、中規模振動実験によって背後地盤が破壊しない場合と破壊する場合の動的挙動特性を検討し、背後地盤と擁壁や護岸などとの関係を明らかにする。

(d) 擁壁と護岸の背後に軽量化や固結化をした補強材を入れ、補強材を用いた場合の地震時挙動特性について(c)の場合との比較を行い、補強材を用いた構造物の動的特性を把握する。さらに、新たな補強材を開発する。

(e) 理論解析を実施し、補強盛土における補強材特性と構造物との関係が土構造物の破壊に与える影響および最適な構造形式を定量的に検討する。

(3) 期待される成果

盛土と切土自然斜面の被害予測法と対策工法の開発によって、都市においては宅地造成地などの防災、山間地においては道路・鉄道などの防災に役に立つ。また、補強土を用いると、建設工事費が大きく削減できるため、この新たな土構造物の開発は大幅な建設コストの削減に貢献する。

4.4.4 近代都市がもたらした環境脆弱地盤の耐震性に関する研究

(1) 目的と必要性

近年、各種廃棄物や建設発生土などのゴミは増加の一途を辿っている。廃棄物や建設発生土などで構成する環境地盤をいかに再利用するかは社会的な重要課題となってきた。近代都市がもたらした最終廃棄物などのゴミの処理については、山間部と臨海部の埋立がある。このうち特に、従来の山間埋立処分手法によるものは強震時地盤破壊を生じ、周辺の自然環境の破壊につながる可能性が高いと考えられる。一方、海岸の埋立地では都市の発展に伴い、ゴミで埋め立てた地盤の上に都市施設を建設せざる得ない状態になってきている。

しかしながら、近代都市がもたらした環境脆弱地盤の防災、およびそれが破壊した場合の周辺環境への影響に関する研究は全く実施されていない。また、廃棄物からなる環境脆弱地盤に対しては震災の経験が未だなく、地震時の応答特性すら解明できていない。したがって、廃棄物で埋立てられた新しいタイプの脆弱地盤の基本物性の把握に始まり、静的および動的な地盤特性の調査により破壊過程を解明し、耐震計算法や対策工法の研究・開発が必要と考えられる。

(2) 研究の内容・方法

1) 山間部ゴミ埋立地盤の破壊過程解明と環境に与える影響および対策技術に関する研究

(a) ゴミ地盤や他の震災の経験がない地盤などについて地盤の力学的性質、堆積状況などを調査し、地震時に危険なタイプの地盤を抽出する。

(b) ゴミ地盤が地震時に破壊した場合に、有害な物質の流出が周辺地域の環境に与える影響についてシミュレーション解析を行う。

(c) 遠心載荷実験と中規模三次元振動実験を行い、ゴミ地盤の破壊過程を解明する。また、ゴミ地盤の地震時における対策・改良工法を開発する。

2) 臨海部ゴミ埋立地盤の耐震性の解明とその有効利用に関する研究

(a) 臨海部ゴミ埋立地盤の種類・特性を調査研究し、分類・整理を行う。

(b) ゴミ地盤に関する室内要素実験を実施し、ゴミの動的力学特性を調べる。また、振動実験を行い、ゴミ地盤の振動特性および液状化などの破壊特性を明らかにする。

(c)耐震対策方法については理論解析と振動実験を行って、有効な対策工法を開発する。

(d)ゴミ地盤における超深水岸壁の実験を実施して、臨海ゴミ地盤の再利用方法の一つとしてゴミ地盤を改良して港湾施設を建設する可能性を検討する。

(3)期待される成果

環境脆弱地盤の破壊過程とその耐震性を解明することにより、大きな社会問題となるゴミ地盤の地震時安定性および破壊した場合の周辺地域の環境へ与える影響の定量的な評価が行える。また、ゴミ地盤の新たな利用方法を開発することもでき、社会的な貢献が大きいと考えられる。

4.4.5 大規模震動破壊実験を想定した試験土槽および地盤作成技術に関する研究

(1)目的と必要性

実大スケールの地盤震動実験は相似則を満たすことができるため、地盤の応答特性、地盤の液状化とそれに伴う流動、杭基礎の破壊メカニズム解明、擁壁等の耐震性の向上、地盤改良の検証等、地盤地震工学に係わる多くの問題を解決できる可能性をもつ。ただし、そのためには、コントロールされた均質な地盤で実験を行うことが大前提となる。もし、不均一な地盤で実験を行うなら、再現性に乏しく、実験を行うたびに結果が異なり、その信頼性は低いものとなる。さらに液状化実験においては、地盤が完全飽和であるか否かが極めて重要な意味をもつ。例えば飽和度が70%になると、完全飽和に比べて液状化強度が3倍になってしまう。しかし、現在の技術では、均質で、飽和度をコントロールした実大スケール地盤を作成することは、時間、コスト的に困難である。また、多次元入力、実大スケール地盤に対応できる土槽も未知の領域である。以上のような問題を解決しなければ、実大スケール地盤の震動実験は成立しないことから、実大スケール地盤の震動実験技術の研究開発が必要不可欠である。

(2)研究の内容・方法

1)実大スケール地盤作成法技術の開発

(a)乾燥砂において、均質で任意の相対密度の地盤を効率よく作成する手法を大型一次元振動台を利用して開発する。これを応用し多層地盤、不整形地盤の作成技術も含めて開発する。

(b)均質な飽和地盤を効率よく作成する方法を開発する。例えば、超音波等を利用した消泡・脱泡技術を応用することにより完全飽和な地盤を作成する手法を中規模土槽で開発し、大型一次元振動台により確認する。

(c)地盤の相対密度や飽和度を精度よく確認できる比較的簡易な管理手法を開発する。これにより地盤モデルの再利用手法を検討する。

2) 実大スケールせん断土槽の開発

(a) 三次元せん断土槽の作成法の調査・研究を行い、中規模振動台用のせん断土槽を作成する。これを用いて一次元、二次元、三次元の違いを比較検討し、三次元せん断土槽の必要性を検討する。

(b) 上記(a)の結果に対応した実大スケールせん断土槽の構造・材質、境界条件について調査・研究し、実大スケールせん断土槽の設計を行う。

(3) 期待される成果

精度の良い均質な地盤作成法と実大スケールせん断土槽を開発できれば、地盤の震動実験の適用範囲とその結果の信頼性が高まり、破壊過程解明のための地盤震動実験の飛躍的な発展につながる。

参考文献(4章)

- 1) 服部哲など：鉛直アレー観測記録より同定したQ値の周波数依存性に関する考察、第24回地震工学研究発表会講演論文集、Vol. 1、pp. 109～112、1997年7月
- 2) 田村敬一など：地盤の不整形性に起因する地震動増幅特性の評価方法、第24回地震工学研究発表会講演論文集、Vol. 1、pp. 129～132、1997年7月
- 3) 金谷守など：護岸構造物の地震時挙動に関する一斉実験・解析、地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集、pp. 159～192、1998年5月
- 4) (社)日本建築学会：建築および都市の防災性向上に関する提言－阪神・淡路大震災に鑑みて－(第三次提言)、建築雑誌、Vol. 113、No. 1418、pp. 9～24、1998年2月
- 5) 高田至郎など：地震動と被害特性、土木学会誌、Vol. 80、pp. 50～57、1995年6月
- 6) 入倉考次郎など：1995年兵庫県南部地震の強震動、大震災に学ぶ－阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書－、土木学会関西支部、Vol. 1、pp. 116～144、1998年6月
- 7) 藤井衛など：兵庫県南部地震の液状化地帯における戸建住宅の基礎の被害と修復、土と基礎、Vol. 46、No. 7、pp. 9～12、1998年7月
- 8) 松井保：基礎構造物の被害の全般的な特徴、阪神・淡路大震災調査報告書(土木構造物の被害：トンネル・地下構造物、土構造物、基礎構造物)、地盤工学会、pp. 237～244、1998年6月
- 9) 南荘淳など：兵庫県南部地震による埋立地盤の変状と橋梁基礎構造物の損傷、地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変位に関するシンポジウム発表論文集、pp. 281～286、1998年5月
- 10) 大震災に学ぶ－阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書－、土木学会関西支部、1998年6月
- 11) 阪神・淡路大震災調査報告書(地震・地震動、地盤・地質)、地震学会・地盤工学会など、1998年3月
- 12) 阪神・淡路大震災調査報告書(土木構造物の被害：トンネル・地下構造物、土構造物、基礎構造物)、地盤工学会など、1998年6月
- 13) 阪神・淡路大震災調査報告書(土木構造物の被害：港湾・海岸構造物、河川・砂防関係施設)、地盤工学会など、1997年12月