292
ISSN 0386－5878
土木研究所資料第3109号

土 木 研 究 所 資 料

大都市地域における地震防災技術の開発に関する調査報告書

平成4年3月

建設省土木研究所

Copyright © (1992) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は，土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって，本報告書の全部又は一部の転載，複製は，土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3109号1992年3月

大都市地域における地震防災技術の開発に関する調査報告書

建設省土木研究所

地震防災部	部長	佐々木　康
企画部	地下開発研究官	水谷敏則
地質化学部地質研究室	室長	中村康夫
〃	主任研究員	稲崎富士
機械施工部動土質研究室	室長	古賀泰之
〃		鷲田修三
地震防災部振動研究室	室長	常田賢一
〃	主任研究員	田村敬一
〃	研究員	松本秀應
地震防災部耐震研究室	室長	川島一彦
〃	研究員	杉田秀樹

要　旨

本報告書は，平成4年度建設省総合技術開発プロジェクト新規要求課題「大都市地域における地震防災技術の開発」に関して，平成3年度に実施した同研究会における調査・検討の成果を取りまとめるものであり，今後の大都市地域における地震防災に関する技術開発の効果的な実施に資することを目的とする。

キーワード：都市，地震防災，軟弱地盤，地震動，ゾーニング，震害対策，耐震設計，波及

まえがき

近年、大都市地域の開発はウォーターフロントに代表される軟弱地盤地帯に広がるとともに、土地利用の高度化のため、橋梁と建築物が一体的な構造を構成するような複合構造物といった新しい構造物が計画されつつある。

そして、これまで以上に道路を始めとするライフライン施設及びそれらが構成する都市機能の耐震性や防災性の向上、及び新たな構造形式の構造物に対する耐震技術が要求されるに至っている。

このようなことから、大都市地域における軟弱地盤の地震動特性や強度特性を考慮した地盤の耐震性評価技術及び震害対策技術の開発、また軟弱地盤上に構築される構造物の耐震技術、さらに震災の発生特性を考慮した地震防災対策技術の開発が期待されている。

本報告は、「大都市地域における地震防災技術の開発」について、総合的な防災技術の一層の向上を目的として、既往の研究成果及び関連技術を整理するとともに、今後の研究の方向並びに技術開発課題を明らかにしようとしたものであり、平成３年度に土木研究所内において設置した研究会の調査成果をとりまとめたものである。

平成４年３月

目　次

まえがき　　担当研究室

1．概説 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1　振動研究室

2．調査の目的及び方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
　2．1　研究開発の背景 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2　振動研究室
　2．2　調査の体制 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5　振動研究室
　2．3　調査課題の体系 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6　振動研究室

3．調査の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
　3．1　軟弱地盤の耐震性評価技術 ・・・・・・・・・・・・ 7
　　3．1．1　軟弱地盤の地震動特性 ・・・・・・・・・・・ 7　振動研究室
　　3．1．2　軟弱地盤の評価技術 ・・・・・・・・・・・・ 14　地質研究室
　　3．1．3　軟弱地盤のゾーニング技術 ・・・・・・・・・ 29　振動研究室

　3．2　軟弱地盤の震害対策技術 ・・・・・・・・・・・・・ 37
　　3．2．1　地盤震害の評価技術 ・・・・・・・・・・・・ 37　振動研究室
　　3．2．2　耐震地盤改良技術 ・・・・・・・・・・・・・ 44　動土質研究室

　3．3　軟弱地盤における構造物の耐震設計技術 ・・・・・ 54　耐震研究室

　3．4　都市特性を考慮した地震防災対策技術 ・・・・・・ 64　耐震研究室

4．まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 74　振動研究室

参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78

巻末資料　1．　研究会開催経過 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 83
　　2．　提出資料リスト ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 87
　　3．　討議要旨及び議事録 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 91
　　4．　参考資料等 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・113

1．概　説

本報告書は、平成4年度建設省総合技術開発プロジェクトの新規要求課題である「大都市地域における地震防災技術の開発」の研究遂行に際して、研究内容，研究成果等についての意見交換，情報交換の場を提供し、研究の効果的な進展を図ることを目的として設立された「大都市地域における地震防災技術の開発研究会」において、平成3年度に実施した同研究会における調査・検討の成果を取りまとめたものであり、今後の大都市地域における地震防災に関する技術開発の効果的な実施に資することを目的としている。

２．調査の目的及び方法

２．１　研究開発の背景

建設省では、昭和６０年に「建設技術開発会議」の中に「地震防災技術開発部会」を設け、地震防災技術の研究開発のあり方と今後の方向、今後重点的に研究を実施すべき重要地震防災技術の研究計画等について調査、検討を行ってきた。その結果、平成２年３月に「重要地震防災技術の研究開発について」と題して部会報告がとりまとめられ、今後重点を置くべき地震防災技術について、研究開発の進捗が相対的に遅れている分野や最近重要性の増した分野等を考慮して、次の８分野が分類された。

１）地震予知関連技術

地震による災害の防止及び軽減を図るために、地震の発生を予知する研究開発を進める必要がある。

２）河川堤防・道路盛土等の地震防災技術

最近の地震被害の様相や被害を受けた場合の社会的影響の質的変化等を考慮すると、河川堤防、道路盛土等の地震防災技術の研究開発を進める必要がある。

３）住宅宅地・地盤の地震防災技術

地盤の良否とその上に作られる構造物の震害とは、密接に関係しているが、人口の都市集中に伴い、住宅宅地や土木施設の立地する地盤条件は劣悪になりつつあるため、住宅宅地・地盤の地震防災技術の研究開発を進める必要がある。

４）都市防災関連技術

都市における各種地震防災対策に関しては、基礎的研究、技術開発がまだ十分ではなく、さらに、国際化、情報化、高齢化等による都市構造の変化に対応した新たな都市防災対策の必要性も高まっているため、都市防災関連技術の研究開発を進める必要がある。

５）津波、土砂災害等の監視、避難誘導システム及び災害復旧の迅速化技術

津波や地震により生じる大規模斜面崩壊のもたらす災害は、通常の防災施設で完全に防ぐことは難しい。しかし、津波や崩壊土砂の流下などの現象は、地震発生から時間的な遅れをもって襲来するため、適切な監視及び避難行動により人的被害を軽減することができる。したがって、そのための研究開発を進める必要がある。

６）災害危険度に対応した地震防災技術

これまでの我が国の地震防災技術は、主として個々の施設の耐震性を向上させ、被害を軽減させるための技術開発を中心に進められてきたが、施設の重要度に応じた耐震性能の設定法など新しい観点からの研究開発を進める必要がある。

7）災害情報の収集・伝達システム

地震による被害の拡大防止、2次災害防止のために、災害に関する情報の的確かつ迅速な収集・伝達に関する研究開発を進める必要がある。

8）震災復旧関連技術

震後の混乱状況の中で復旧に必要な対策を迅速かつ的確に行うための研究開発を進める必要がある。

ここで、課題の設定にあたっては、ロマプリータ地震やフィリピン地震等における被害形態、南関東地域直下における地震発生の切迫性、国際防災の10年などの社会的状況並びに地震防災技術および関連技術の研究の進展状況などの地震防災をめぐる最近の状況を踏まえ、部会報告に揚げられた個別課題をベースに、ここ数年内に着手すべき研究開発課題が選定されている。その際、部会報告の個別課題で不足していた部分については、適宜研究内容を追加するとともに、研究内容のバランス、ハード分野とソフト分野の技術の組み合せなどに配慮し、総合的な研究課題となるように配慮されている。

さらに、上記部会では、一層効率的に地震防災技術の研究開発を進めてゆくために、近年の地震防災をめぐる状況を勘案しながら、部会報告に掲げられた重要地震防災技術の個別課題の再整理、再構成を図りつつ、実現性のある研究課題を設定するとともに、その課題の実現にあたって留意すべき方策が検討されてきている。

そして、早急に取り組む研究課題として、大きく分けて、首都圏等の大都市地域における地震防災対策の向上という視点と構造物の新耐震技術の開発という視点から5つの研究課題が分類されている。

（1）首都圏等の大都市地域における地震防災対策の向上

大都市地域は人口、社会機能、経済機能が集積し、それらが複雑に関係を持ちながら、都市の機能が維持されている。ひとたび大地震が発生すれば、個々の施設の被害が相互に絡み合い、都市全体の機能に甚大な影響を与えることが懸念される。

特に首都圏は、日本の政治、経済等において多大な影響力を持っており、地震等による都市機能の混乱・停滞は、日本社会全体に影響を及ぼすばかりでなく、広く世界経済にも影響を与える恐れがある。さらに、近年、地震そのものの規模としては比較的小さいものの、局所的には大きな被害の予想される首都圏地域直下型の地震発生の可能性が指摘されており、大都市地域の地震防災対策の一層の向上が必要となっている。

①短期的地震予知技術の高度化

首都圏を中心とする南関東地域においては、M7クラスの直下型地震の発生が、ある程度の切迫性をもっているといわれている。しかしながら、東海地域で予想されているM8クラスの巨大地震と異なり、事前現象の発生が微小であると同時に、都市活動などに伴うノイズの発生により、その適切な

観測が難しいと考えられ、現在のところ予知が困難とされている。

また、地震予知の実用化のためには、蓄積されたデータをもとに、事前現象と地震発生との関連付けを行う必要があるが、従来の地殻変動観測は主として時間的にみて不連続に行われていたため、事前現象の発生時点を短期的に特定することが困難であった。

このため、ＧＰＳを中心とする高Ｓ／Ｎ比地殻変動連続観測システムを開発するほか、地震予知観測ネットワークのための最適観測手法の検討及び地震予知情報の総合的解析処理システムの開発を行う。

②軟弱地盤における耐震対策技術の向上

首都圏においては、厚い沖積層の上に埋立られた地域にも市街地が広がっているとともに、若令埋立地であるウォーターフロント地域の開発が進展しつつある。このような地盤の軟弱な地域では、地震動の局所的かつ過大な増幅、液状化の発生等が予想され、そのような現象に対する対策技術の整備が要請されている。

このため、軟弱地盤における地震動の増幅特性、液状化等の地盤変状及び構造物に及ぼす影響を明らかにして、新設および既設の構造物に対する軟弱地盤に起因する地震災害の軽減・防止のための合理的な対策技術の向上を図る。

③震災の波及構造を考慮した地震防災対策技術の開発

諸機能が集中している都市においては、個々の施設の被害が他の施設の被害とも関連しあって、地域全体の社会経済活動の停滞へとつながってゆく。都市の規模が大きくなるほど、その影響の仕方が複雑になっていくため、部分的な被害が都市機能全体の被害へと拡大し、さらにそれが国内外の他の地域に与える間接的な影響も大きくなり易い。

このため、大都市地域において震災が発生した場合の被害の波及構造を明らかにしてゆくとともに、そこから浮かび上がる現在の震災対策の弱点を抽出し、バランスの取れた総合的な震災対策が図られるよう、地震防災対策の体系化を検討する。

④震災復旧・復興関連技術の研究

災害に見舞われ被害を受けた場合は、迅速な被害復旧が必要なことは言を待たないが、大都市圏では、地震による広域的な被害を受けた場合、復旧活動には様々な困難が予想される。また、復興を行うにあたっても、迅速な計画策定及び秩序ある事業実施が復興期の混乱防止のために必要である。

このため、復旧に必要な資器材の供給方法、被災者の収容手段、廃棄物の処理方法などを検討するとともに、迅速かつ的確な復興計画の策定方法等の検討を行う。

（２）構造物の新耐震技術の開発

総合技術開発プロジェクトの「新耐震設計法の開発」の成果は、建築基準法、道路橋設計指針等各種の基準に反映され、構造物の耐震性の向上に大きな役割を果たしている。しかし以来、すでに10年以上が経過し、この間耐震技術は目覚ましく進展し、また、さらなる構造物の多様化、高度化に対応

した研究開発が進められている。

このため、耐震設計に関する新しい技術に関する検討を行い、耐震設計法のグレードアップを図る。

本報告では、以上の早急に取り組む５つの研究課題に対して、特に緊急性が要求される課題として、「大都市地域における地震防災技術の開発」を取り上げ、その研究開発の現状を整理し、さらに今後の技術開発の方向並びに開発課題を抽出し、今後進めるべき研究の方向を明確にすることとした。なお、上記の５研究課題の内、ここで対象とした「大都市地域における地震防災技術の開発」に関係する課題は、「（１）首都圏等の大都市地域における地震防災対策の向上」における「②軟弱地盤における耐震対策技術の向上」及び「③震災の波及構造を考慮した地震防災対策技術の開発」の２課題、さらに「（２）構造物の新耐震技術の開発」の一部であり、早急に取り組む研究課題を横断的に結び付ける課題となっている。

２．２　調査の体制

本調査では、土木研究所内に地震防災部長を座長とする「大都市地域における地震防災技術の開発研究会」を設置して、関係者、関係研究室の参画の下で実施したが、平成３年７月から１２月にかけて計５回の研究会を開催することにより、大都市地域における地震防災技術の開発に関する既往の研究成果及び関連技術を整理するとともに、今後の研究の方向並びに技術開発課題を明らかにしようとした。

当開発研究会の調査体制は、以下の通りである。

座　長：地震防災部長

副座長：地下開発研究官

委　員：地質研究室長、動土質研究室長、振動研究室長及び耐震研究室長

また、研究委員会の開催経緯は下記の通りである。

第１回：平成３年　７月２９日（月）

［議題］調査方針、スケジュール等

第２回：平成３年　９月　９日（月）

［議題］技術の現状と課題（地質研究室、振動研究室）

第３回：平成３年１０月１４日（月）

［議題３年］技術の現状と課題（動土質研究室、耐震研究室）

第４回：平成３年１１月１１日（月）

［議題］技術の現状と課題（地質研究室、振動研究室）

第５回：平成３年１２月　９日（月）

［議題］技術の現状と課題（動土質研究室、耐震研究室）

２．３　調査課題の体系

本調査では、「大都市地域における地震防災技術の開発」に関する課題を表－２．３．１のような中課題に分類し、各中課題毎に調査担当を決めて調査を実施した。なお、これらの課題の背景となる事象は、表－２．３．２のように整理できる。

表－２．３．１　大都市地域における地震防災技術の開発に関する課題

研究開発課題（中課題）	課題分類＊	担当研究室
１．軟弱地盤の耐震性評価技術の開発	（１）②	地質研究室 振動研究室
２．軟弱地盤の震害対策技術の開発	（１）②	振動研究室 動土質研究室
３．軟弱地盤における構造物の耐震設計技術の開発	（２）	耐震研究室
４．震災の波及構造を考慮した地震防災対策技術の開発	（１）③	耐震研究室

注）＊は２．１で選定された早急に取り組む研究課題の分類との対応を示す。

表－２．３．２　研究開発課題の背景となる事象

研究開発課題	背景となる事象
大都市地域における地震防災技術の開発	・広範囲な地域 ・人、施設の集中、集積 ・多種、多様な構造物、施設 ・軟弱地盤での立地の拡大
１．軟弱地盤の耐震性評価技術の開発	・複雑な地盤構成 ・多様な地震動の発生 ・多様な耐震性をもつ地盤の分布 ・地盤震害による構造物被害の多様化
２．軟弱地盤の震害対策技術の開発	・地盤震害の多様化 ・地盤震害による構造物被害の多様化 ・多種、多様な耐震対策
３．軟弱地盤における構造物の耐震設計技術の開発	・構造物の多様化、複合化 ・地盤震害による構造物被害の多様化
４．震災の波及構造を考慮した地震防災対策技術の開発	・多種、多様な都市機能と相互依存 ・震災の空間的・時系列的な波及

３．調査の成果

３．１　軟弱地盤の耐震性評価技術

地盤の軟弱な部分及び地盤条件の変化部において地震動が大きく増幅されることが指摘されており、大都市が立地しているような地域での軟弱地盤における地震動の１次元及び２次元的増幅特性を明らかにし、大都市地域における地震防災対策を構ずる際に考慮すべき設計入力地震動の設定法を開発する必要がある。また、軟弱地盤における地震動の増幅特性や構造物被害の発生程度が、軟弱地盤の土質及び土層構成の分布特性により大きく異なるため、原位置での地盤耐震性の計測・評価法、入手可能な限られた地盤情報から局所的土質分布特性を加味した軟弱地盤の空間的な分布特性の評価法、さらに軟弱地盤の耐震性の合理的な設定法の開発、並びに軟弱地盤の地震動の増幅特性及び地盤変状などの地盤震害に対する耐震性を総合的に評価するためのゾーニング法を開発する必要がある。

そのため、軟弱地盤における地震動の増幅特性及び液状化等の耐震性に基づいて、軟弱地盤の耐震性を総合的に分類・評価するゾーニング技術を開発するために、土木構造物の構造特性を考慮した軟弱地盤の地震動特性の評価技術の開発、及び軟弱地盤の耐震性の評価及びゾーニング技術の開発を行おうとするものである。

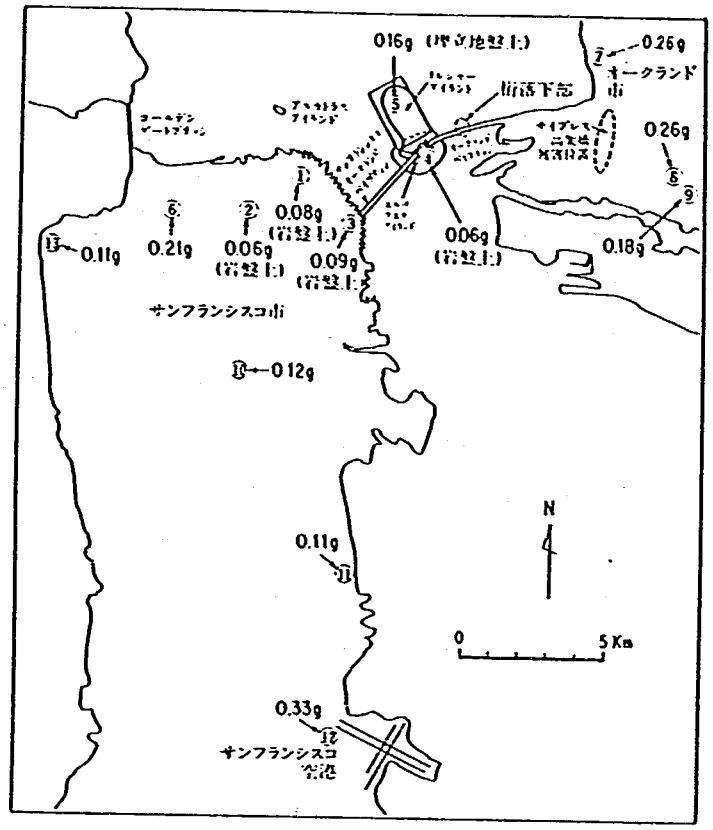
ここでは、「軟弱地盤の地震動特性」，「軟弱地盤の評価技術」，「軟弱地盤のゾーニング技術」に大別し、技術の現状と検討課題等について述べる。

３．１．１　軟弱地盤の地震動特性

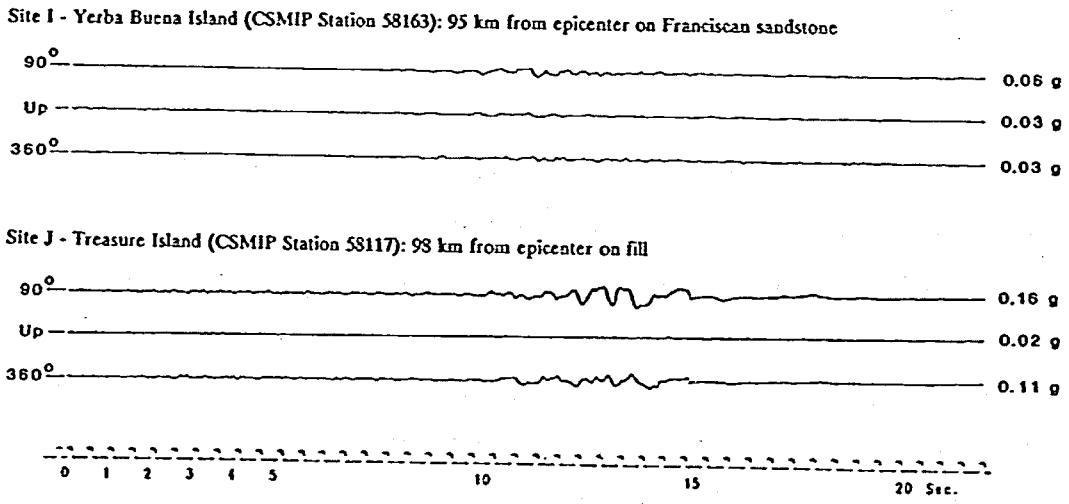
（１）ニーズ

大都市地域においては、厚い沖積層の上に埋立てられた地域にも市街地が広がっているとともに、若齢埋立て地であるウォーターフロント地域の開発が発展しつつある。このような地盤の軟弱な地域では、地震動の局所的かつ過大な増幅、地震時の液状化の発生等が予測され、そのような現象に対する対策技術の整備が要請されている。

例えば、図－３．１．１は1989年ロマ・プリエータ地震によるサンフランシスコ周辺の地盤上もしくは建物一階床上で得られた最大加速度（水平２成分のうちいずれか大きい方）の分布を示したものである[1)]。岩盤上に位置する①～④地点の最大加速度は0.06Ｇ～0.09Ｇであり、それ程大きくはない。一方、ベイ・マッドと呼ばれる軟弱な粘土層上に位置する⑦、⑧地点、厚い埋立て地盤である⑫地点の最大加速度は0.26Ｇ～0.33Ｇであり、岩盤上に比べて３～５倍程度に増幅されていることがわかる。観測波形の一例として、図－３．１．２にエルバ・ブエナ島（④地点）とトレジャー島（⑤地点）の加速度波形を示す[2)]。両地点の震央距離はエルバ・ブエナ島が95ｋｍ、トレジャー島が98ｋｍであり、ほぼ等距離とみなすことができるが、岩盤上に位置する前者に比べて埋立て地上の後者の最大振幅は明らかに大きくなっている。



図－３．１．１　サンフランシスコ湾岸地域の最大加速度

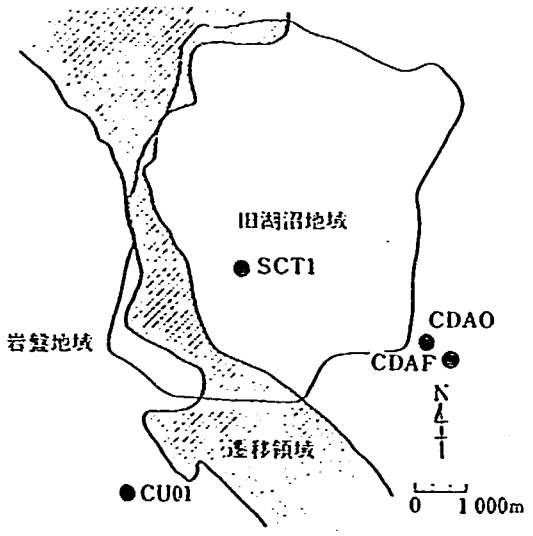


図－３．１．２　エルバ・ブエナ島（上段）とトレジャー島（下段）の加速度波形

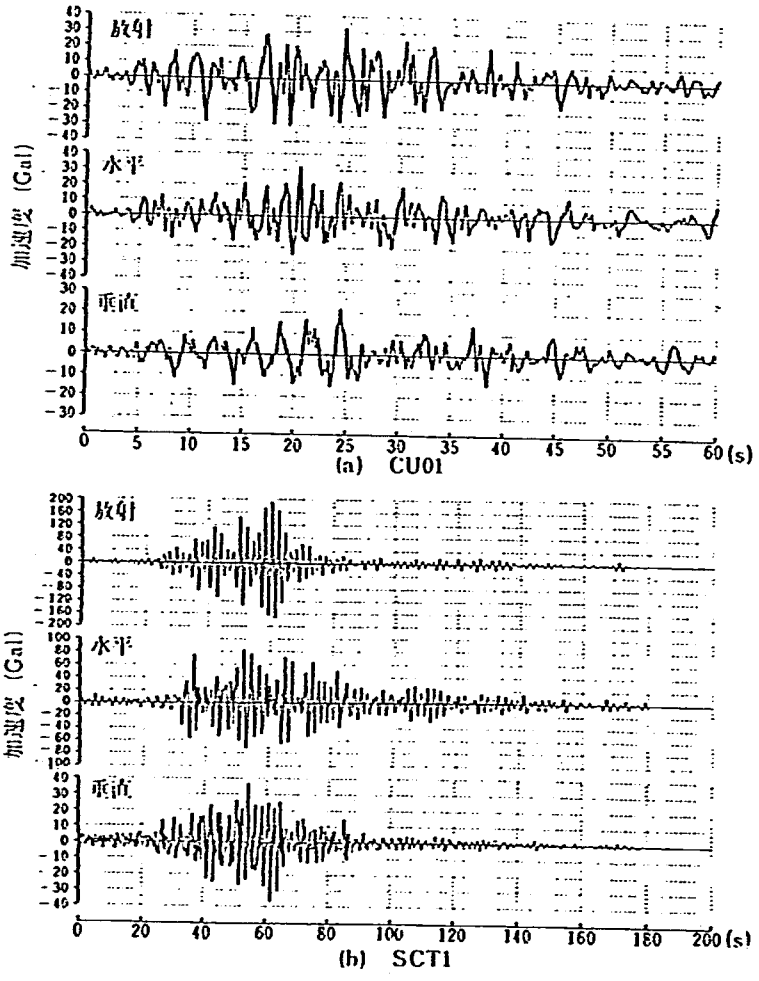
軟弱地盤上で地震被害が大きくなることは従前より指摘されてきたところではあるが、最近の最も顕著な事例としては1985年メキシコ地震があげられる。この地震では震央から 400ｋｍ近くも離れているメキシコ市で甚大な被害が生じた。メキシコ市は湖沼埋立て地上に立地した都市であるが、被害

は軟弱な旧湖沼地域に集中し、周辺の岩盤地域の被害は軽微であった。図－３．１．３にメキシコ市内の強震観測点の位置を示す。強震記録の例として、旧湖沼地域のＳＣＴ１および岩盤地域のＣＵ０１の加速度波形を図－３．１．４に示す[3)]。図－３．１．４からわかるようにＳＣＴ１での記録波形はＣＵ０１に比較して、振幅が大きいだけではなく、継続時間が非常に長く、かつ特定の周期成分（２秒程度）を卓越して含んでいることが特徴的である。このような地震動特性の差異が軟弱地盤と岩盤地域で、被害程度が大きく異なっていたことの主たる原因と考えられる。なお、メキシコ市については軟弱な地盤が盆地状に基盤層の上に堆積しているという地盤の不整形性が地震動特性、ひいては被害程度に大きく影響したという指摘もある。

以上のように、一般に軟弱地盤では地盤による増幅作用で地震動が大きくなるものと考えられる。我が国の大都市の多くが河口部の沖積平野上に発達していること、また、近年湾岸部における埋立てが活発に進められている事例に鑑み、軟弱地盤の地震動特性の解明は大都市地域における地震防災技術の開発において急務である。



図－３．１．３メキシコ市の強震観測地点

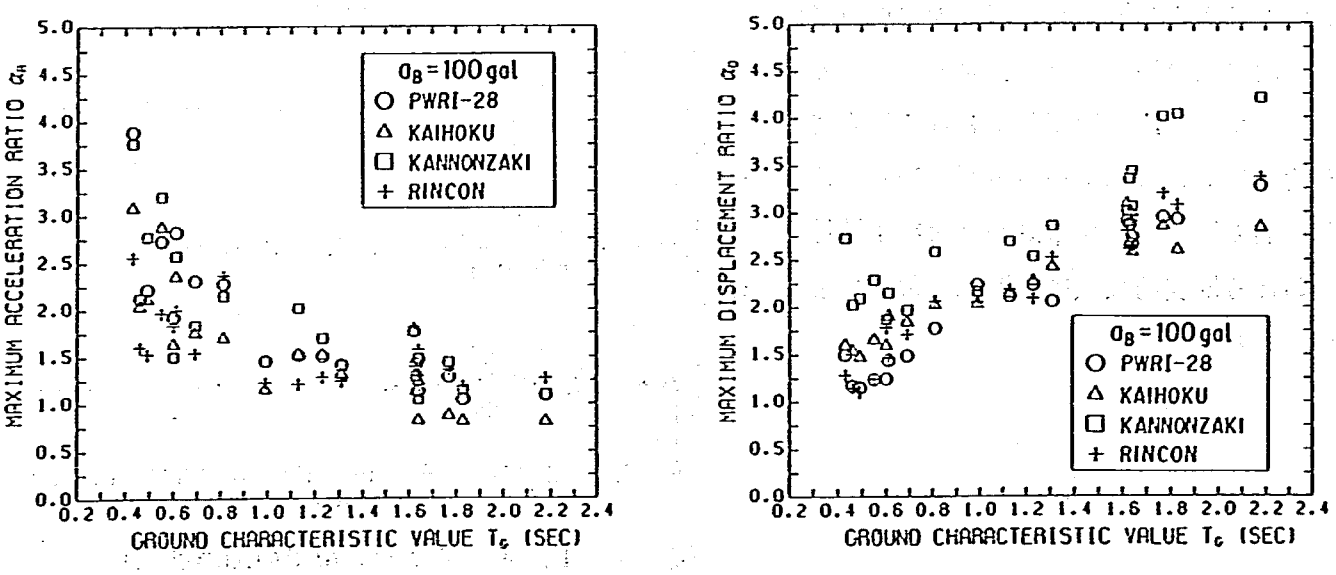


図－３．１．４　メキシコ市での加速度波形

（２）技術の現状

上記（１）ニーズに示したように、一般には軟弱地盤ほど地震動は大きくなるものと考えられているが、この問題についてはいまだに多くの議論があるのが現状である[4]。図－３．１．５は東京湾沿岸の埋立て地を対象として地盤の一次元応答解析を行い、最大加速度および最大変位の増幅率（＝地表面／基盤面）と地盤の特性値T_Gとの関係を示したものである[5]。図中の記号の違いは入力波形の別を表している。基盤面における最大加速度は50、100、150gal の３種類に変化させたが、ここでは100galの場合のみを示している。図－３．１．５からわかるように、最大加速度についてはT_Gが長くなるほど、すなわち地盤が軟弱になるほど増幅率は低下する。従って、基盤面上において同じレベルの加速度が入力しても、地表面では地盤が軟弱なほど加速度レベルは低いことになる。一方、最大変位については最大加速度の場合とは反対に地盤が軟弱なほど増幅率が増大していることがわかる。表層地盤内の地震動の増幅の問題に限っても、①対象とする地震動特性（例、加速度、変位…）、②対象とする地点の地盤条件（硬軟に限らず、層厚等も含めた）、③入力地震動特性、等を総合的に検討する必要がある。

現行の多くの設計技術基準類では、地震動特性が地盤条件に強く影響を受けること、並びに実務上の便宜を考慮して、地盤条件をいくつかの種別に分類して地盤種別ごとに設計用入力地震動を定めているのが通常である。しかしながら、これらの基準類では一般に軟弱地盤は細分化せずに、一つの区分としている。これは、極めて軟弱な地盤における強震動特性に関する情報が十分ではないこと、また、そのような地盤上に構造物が建設される事例が従来比較的少なかったこと、等の理由による。例えば、道路橋示方書耐震設計編では、地盤の特性値T_G[s]に応じて、$T_G<0.2$をⅠ種地盤、$0.2\leq T_G<0.6$をⅡ種地盤、$0.6\leq T_G$をⅢ種地盤の３種類に地盤条件を区分しており、Ⅲ種地盤の範囲が広く設定されている。

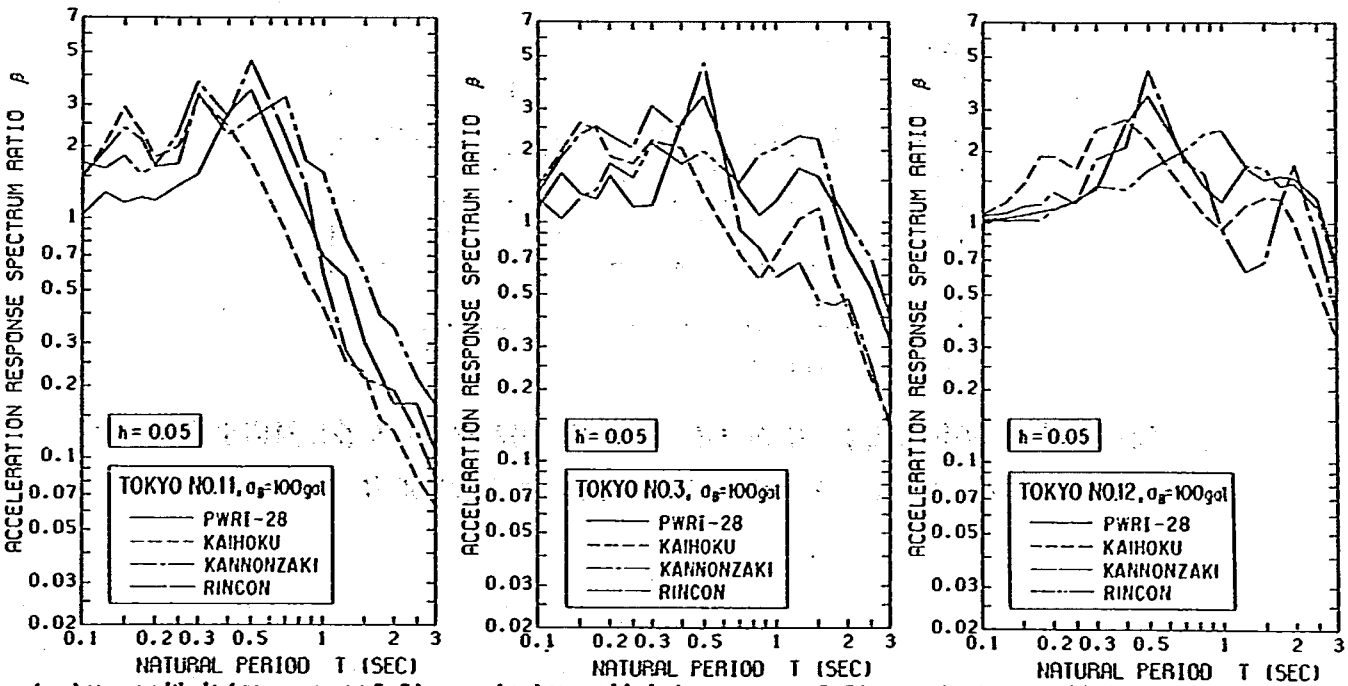


（ａ）最大加速度　　（ｂ）最大変位

図－３．１．５　最大加速度および最大変位の増幅率

図－３．１．６は、図－３．１．５で解析対象とした地点のうち、T_Gが0.61秒（No.11地点）、1.23秒（No.３地点）および1.83秒（No.12地点）の３地点について地表面上の加速度波形から算出した減衰定数0.05の加速度応答スペクトル倍率を示したものである。これら３地点は、道路橋示方書によればすべてⅢ種地盤に分類される。３地点の加速度応答スペクトル特性の差異は、特に、固有周期１秒程度以上の長周期領域において顕著であり、No.11地点ではスペクトル値が急激に低下するのに対して、No.３地点では固有周期 1.5秒付近から、また、No.12地点では固有周期２秒付近からスペクトル値が低下する。３地点における加速度応答スペクトルを概ね包絡すると、図－３．１．７に示すようになる。同図より、T_G ＝1.23[s]のNo.３地点とT_G＝1.83[s]のNo.12地点とでは著しい差はないものの、これらの２地点に比較してT_G ＝0.61[s]のNo.11地点では加速度応答スペクトル特性が異なっていることがわかる。図－３．１．６および図－３．１．７の結果は、現行の設計技術基準では単一の地盤種別とされている軟弱地盤でもその軟弱さの程度により地震動特性が異なることを示唆しているものと考えられる。

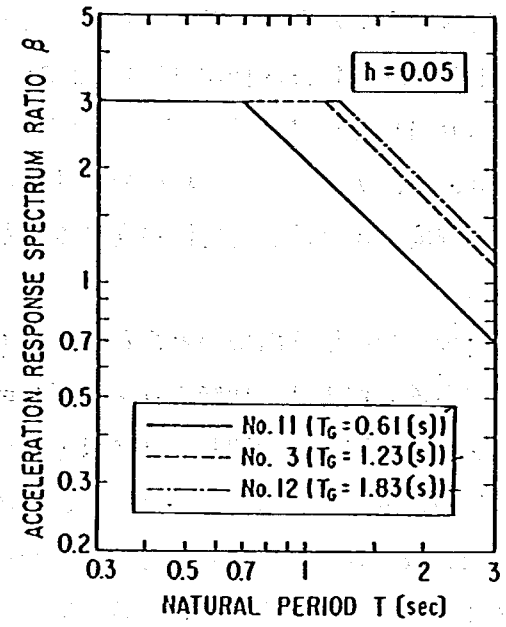
軟弱地盤の地震動特性については地震動の地盤内増幅と合わせて、不整形地盤、地盤条件の変化部における地震動特性の問題が重要である。例えば、1989年ロマ・プリエータ地震により米国カリフォルニア州オークランド市内のサイプレス高架橋が崩壊し、40名以上もの多くの死者を出したが、同橋はその高架区間全体（約２ｋｍ）にわたって崩壊したのではなく、崩壊区間はサンフランシスコ湾岸のベイ・マッドを埋立てた地域に概ね限られていた[1]。一方、崩壊を免れた区間はよく締まった洪積砂層上に建設されていた。僅か２ｋｍの区間内で構造条件もほぼ同一であるのにもかかわらず、被害程度に著しい差異が生じた原因としては、地盤条件により地震動のレベルが異なっていたことが考えられる。ここでは、サイプレス通りに沿う地盤条件の変化に注目して地盤の２次元地震応答解析を行



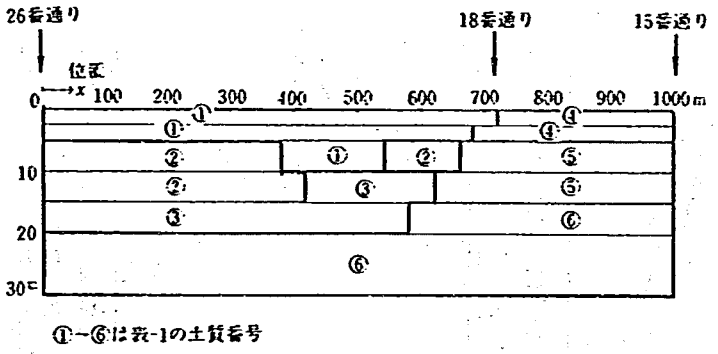
(ａ)No.11地点(T_G＝0.61[s])　(ｂ)No.3地点(T_G＝1.23[s])　(ｃ)No.12地点(T_G＝1.83[s])

図－３．１．６　加速度応答スペクトル倍率

った結果を示す[7]。解析モデルは図－３．１．８に示すとおりであり、崩壊区間は、図中では26番通り（Ｘ＝０ｍ）から18番通り（Ｘ＝ 700m）に相当する。図－３．１．９は最大加速度の分布を示したものであり、地盤の軟弱な部分および地盤条件の変化部において大きな加速度が生じたことがわかる。しかしながら、どのような地盤条件により、地震動がどの程度増幅されるかという定量的な評価手法については確立されていないのが現状である。

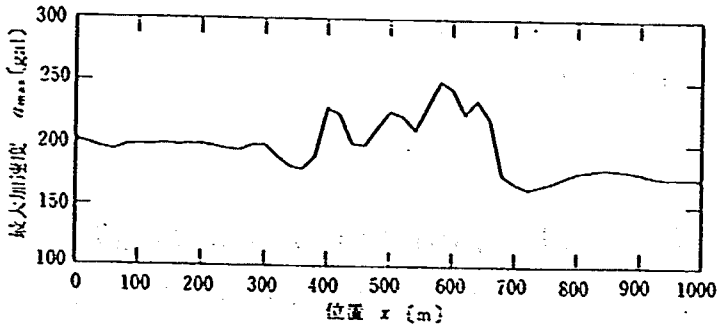


図－３．１．７　加速度応答スペクトル倍率の包絡線



①～⑥は土質条件の別を表す。①がベイ・マッド、④が締まった砂に対応する。

図－３．１．８　サイプレス通りの２次解析地盤



図－３．１．９　サイプレス通りにおける最大加速度（計算値）の分布

（３）研究開発事項

１）入力地震動の設定技術の開発

①地震動特性の指標（例、加速度、変位、スペクトル他）の別と、それぞれの地盤内増幅特性の検討

②対象構造物とその耐震性を検討する上で適切な地震動の指標との関係の検討

③地盤種別分類法の検討

上記①、②の検討結果をもとに、対象構造物の特性に応じた地盤種別分類法を提案する。

④地盤および構造物の振動特性を考慮した入力地震動の設定法の提案

２）局所的な地震動の評価技術の開発

①地盤条件の変化部における地震動の変動特性の検討

１）の①に示した地震動特性の指標別に検討する。

②地盤条件の変化と地震動の変動の関係の定量的な検討

③地盤条件の変化部における設計用入力地震動の設定技術の開発

３．１．２　軟弱地盤の地域的評価技術

(A)軟弱地盤の地域的地質特性の評価

はじめに

国内の大都市地域の殆どは、主として厚い沖積層からなる軟弱地盤上に立地している。関東平野の臨海部に位置する首都圏はその典型であり、最大層厚約70mに達する沖積層が広範囲に分布している。このような軟弱地盤の分布域では、地震時の地震動の増幅度や液状化の発生等に局所的な不均質性があることが知られており、軟弱地盤の内部構造、土質特性の地域性を反映したものと解されている。したがって大都市域の地震防災技術の向上及び新たな開発にあったては、これらの軟弱地盤の地域的特性を的確に評価することが求められる。しかるに多くの都市地域、とりわけ首都圏においては、軟弱地盤をその地震動特性にしたがって評価・分類する 段階には至っていない。この原因として、首都圏の軟弱地盤に対する地質工学的な整理が進んでいないことがあげられよう。首都圏の沖積平野下に化石谷と呼ばれる埋没谷地形が覆在していることは、震災復興局の調査によって知られたことであるが、化石谷の正確な位置、規模、構造等については未だ不明な点が多いのが現状である。加えて軟弱な地盤の内部構造が地震動特性としてどう出現するのか、という点に対する検討が充分でないことも指摘される。

本節では、首都圏に分布する沖積層を主とした軟弱地盤を対象とし、その地震動特性を特徴づける軟弱地盤の空間的分布、内部構造、動的特性の３項目について、その評価技術の現状と課題について整理する。

１）首都圏における軟弱地盤の地域特性

〈分布の特徴〉

首都圏に分布する軟弱地盤の地域特性として最も特徴的な点は、その層厚が局所的に大きく変化することであることは前述したとおりである。

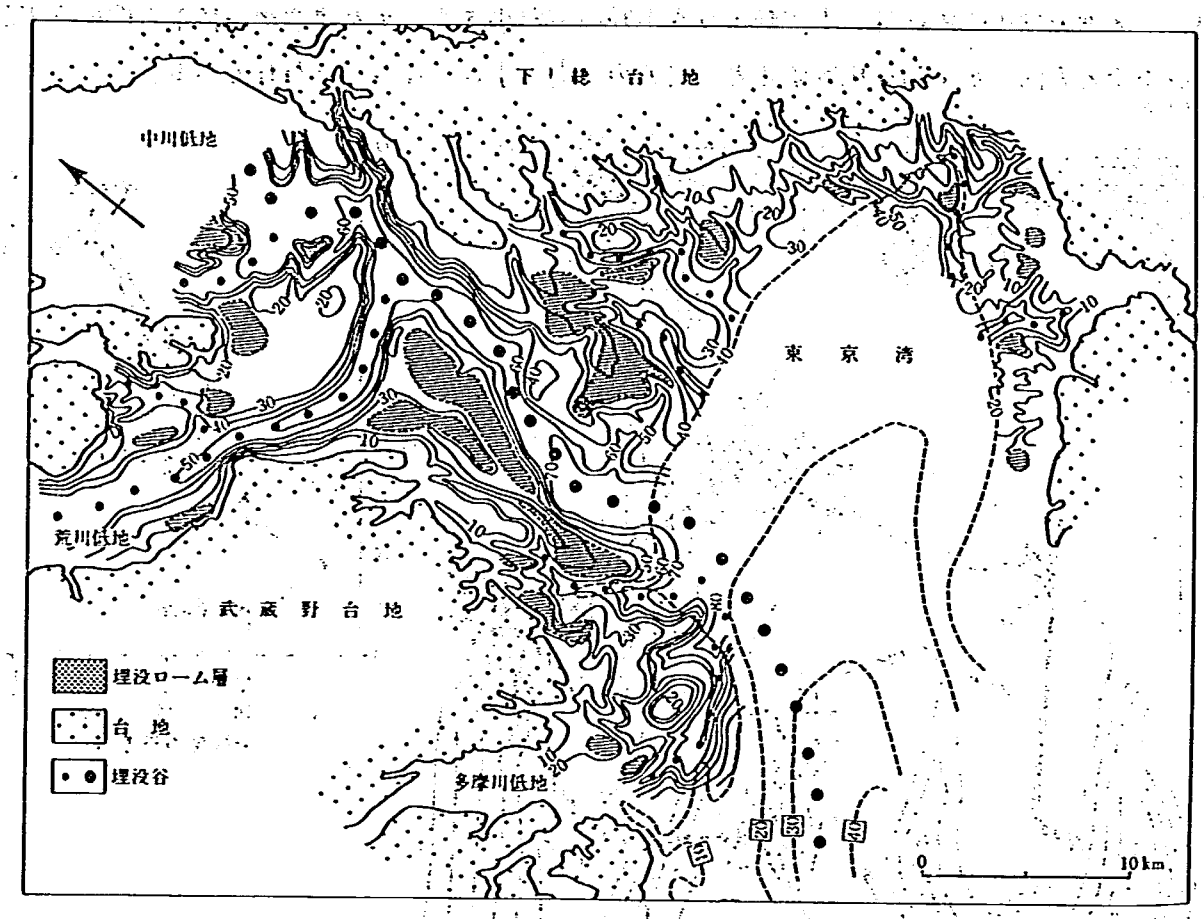
図－３．１．１０は、首都圏の沖積層基底等高線を示したものである。軟弱地盤は一部洪積層の泥層を含むものの、主として沖積層と現世の表土・盛土等のいわゆる弱令地盤から構成されるので、地表標高と同図の沖積層基底標高との間が軟弱地盤として分類されると見なしてもよい。

同図からは、最大層厚約70mに及ぶ軟弱地盤が古東京川（古荒川及び古中川）の埋没谷に沿って平野内域まで深く入り込んでいること、またその支谷が埋没段丘を開折していること、いくつかの段丘面を有する埋没段丘が分布すること、等を読みとることができる。また、大局的な地盤変化のオーダーは、数km程度であることが示されているが、埋没段丘を開折する支谷部では100m程度で沖積層厚が大きく変化している（図－３．１．１１）。

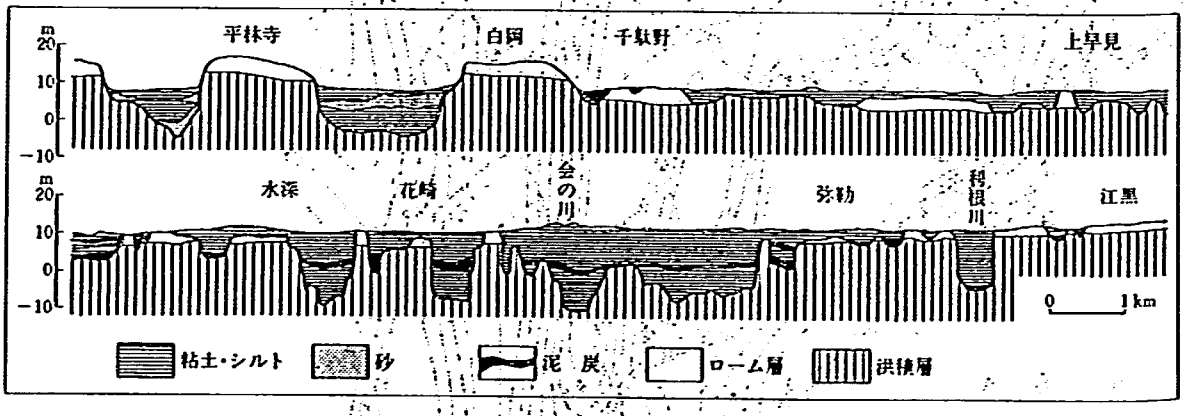
〈震害との関連〉

このような沖積層厚の変化がその地震動特性にどのように関連しているかを示したのが図－３．１．

１２である。同図には、関連地震の際の木造家屋の倒壊状況が沖積層厚と密接に関連していることが示されている。



図－３．１．１０　首都圏南部の埋没地形と沖積層基底等深度線図[8]



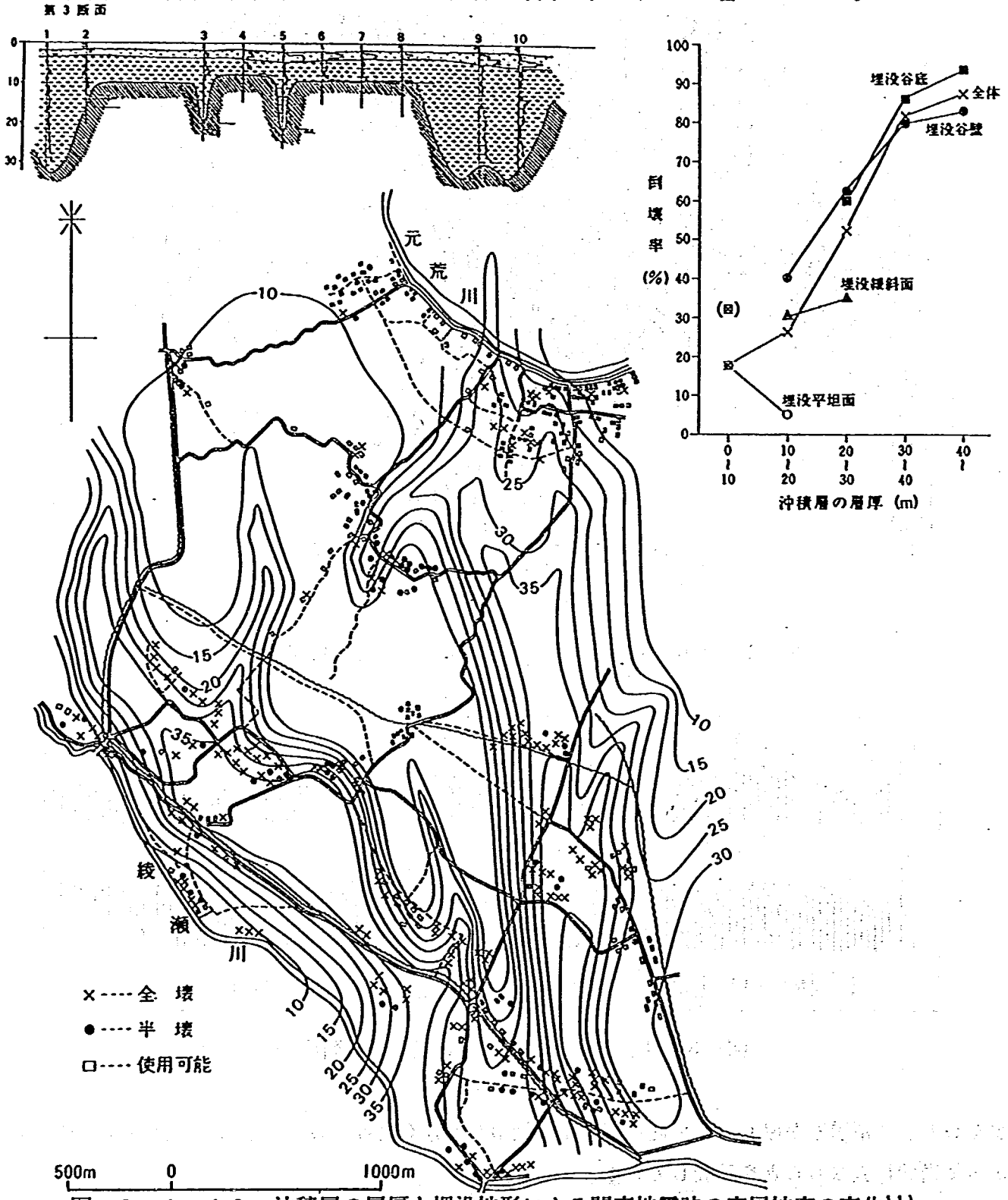
図－３．１．１１　加須低地付近の地質断面図[9]

すなわち、沖積層厚が厚くなるに従って家屋倒壊率が大きくなるものの、その傾向は埋没地形分類によって微妙に異なることを示唆している。

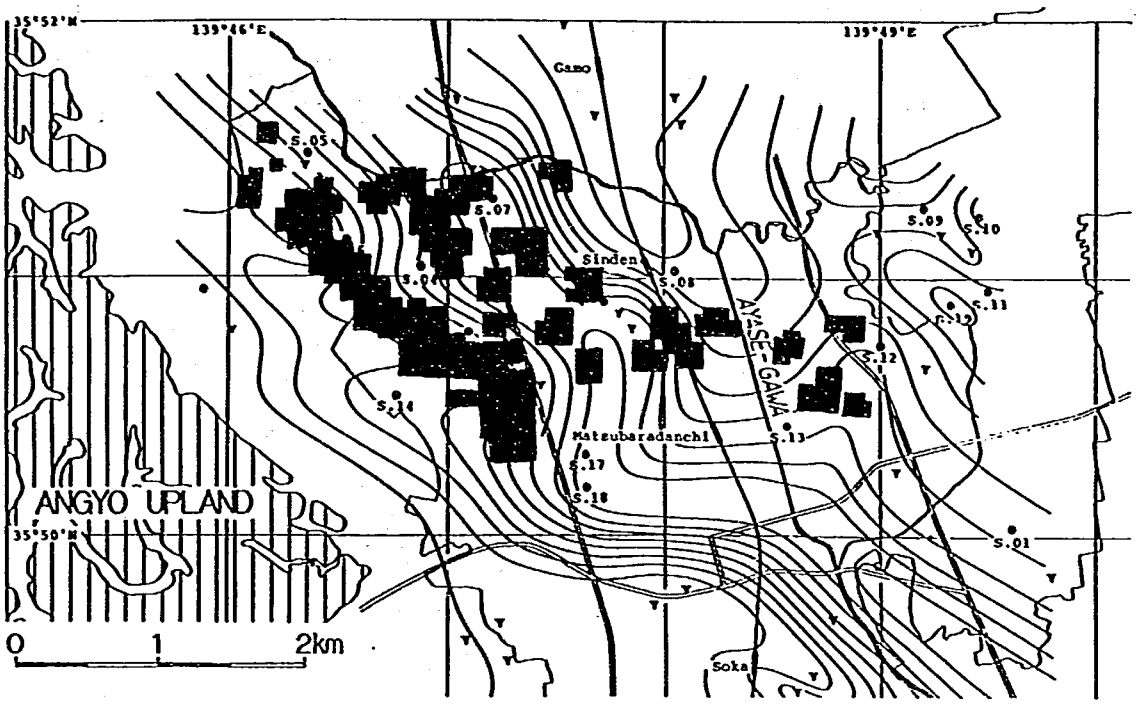
同様の報告を角田ほか(1981)[10]も行なっている。彼らは旧新田村、現草加市松原団地付近の地盤資

料と家屋の倒壊状況を調査し、埋没谷底及び谷壁斜面において全壊率が上昇していることを指摘した。（図－３．１．１３）。

一般に、木造家屋の耐震性は、上下動より水平動の方が小さく、また建造物の長手方向の水平動とそれに直交する方向の水平動を比較すると、後者の方向で小さくなると言われている。



図－３．１．１２　沖積層の層厚と埋没地形による関東地震時の家屋被害の変化[11]



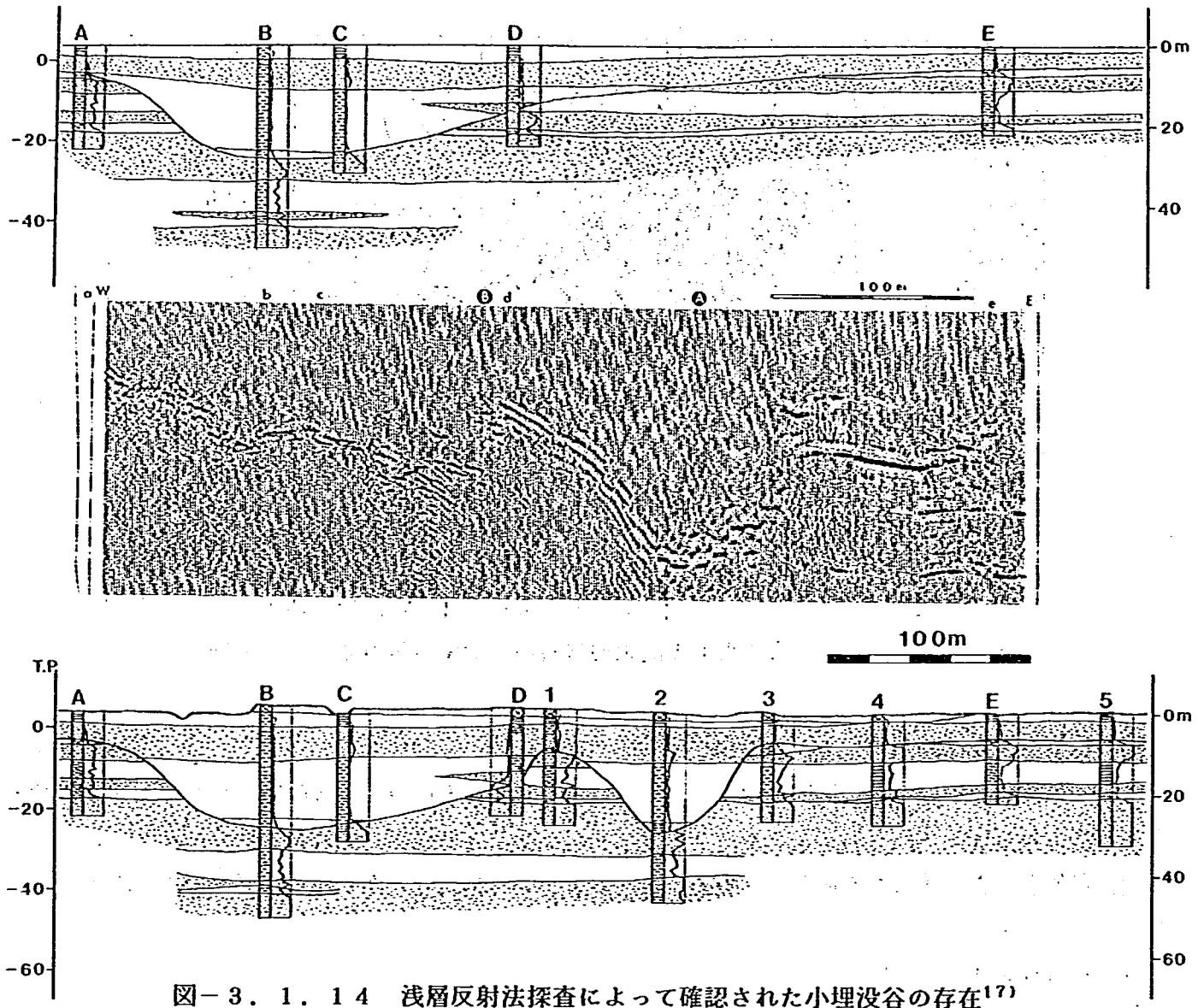
図－３．１．１３　埋没地形と関東地震時の全壊家屋集中域との関係[18]

上述の報告は、いずれもこのような建造物の耐震異方性について考慮しておらず、また入力地震動の卓越方向に対する埋没地形の影響についても検討されていないものの、地盤の地震動特性を表す指標として木造家屋倒壊状況が利用できること、また一次的な沖積層厚データによる地盤モデルではなく、空間的な軟弱地盤の構造も考慮した２次元・３次元モデルが地震動特性の分類に必要であることを示している。

〈不均質性のオーダー〉

首都圏の軟弱地盤は局所的に大きく構造が変化し、それが地盤の地震動特性と深く関連していることを示したが、われわれが考慮すべき局所性の変化オーダーが如何ほどであるかが、大きな問題であろう。図－３．１．１２，１３では、その不均質性のオーダーが主谷部で１km程度、支谷部近傍では100m以下のオーダーで倒壊率が大きく変化していることが示されている。すなわち軟弱地盤をその地震動特性に従ってゾーニングする場合、少なくとも100m程度のメッシュで地盤分類すべきである。地盤構造の局所的変化は線状構造物として特徴づけられる多くの土木構造物の調査・耐震設計においても重要な問題となる。図－３．１．１４は、自動車専用道の高架部における地盤調査結果を示したもので、当初、東西方面に約500mの調査区間内でＡ～Ｅの５地点でボーリング調査がなされ、地盤構造が推定された（同図(a)）。それに対し、同区間での浅層反射法探査結果（図(b)）では区間内に２箇所の埋没谷の存在を明らかにした。この結果を受けて新たに５本のボーリングが追加され、当該部に幅100m未満ではあるが比高約20mを有する埋没谷の存在が確認された（図(c)）。

以上の報告は、軟弱地盤の局所的構造変化を正しく評価するには50m間隔程度でのボーリング・データ収集・解析が必要であることを示している。



図－３．１．１４　浅層反射法探査によって確認された小埋没谷の存在[17]

２）軟弱地盤のゾーニングの課題

軟弱地盤の地震動特性には、上述のように局所的構造変化を反映した不均質性がある。このため軟弱地盤をゾーニングする場合、その不均質性を考慮することが求められている。それと同時にゾーニングをどのような構造物を対象に行なうのか、と言う対象についての整理と、ゾーニングのための地盤情報を何に基づいて整理するかと言う点についての検討が必要である。例えばゾーニングの対象を建築構造物とした場合、それらの基礎地盤は概ね一様と見なすことができるから、地盤を一次元で記述することで足りる。一方土木構造物は線状構造物として特徴づけられ、地盤の局所的構造変化を無視できないため、２次元で地盤を記述することがもとめられる。さらに個々の構造物ではなく、都市域という種々の構造物の複合体を対象とする場合には、空間的に拡がりを有する領域に対して地盤の広域的な構造とその局所的不均質性をも考慮しなければならないであろう。

一方軟弱地盤を広域的に、地震防災の観点からゾーニングする場合、基礎データとして利用できるのは、現状ではボーリング資料しか考えられないが、その必要量は、データから局所的な不均質性を

復元できるだけの情報密度を有していることが条件となるであろう。

東京都土技研では、東京都における地盤の総合的な情報システムである「東京都地盤情報システム」の整備を進めているが、局所的な地盤構造を評価するための目安値としてデータ密度で100本/km² 程度、都下全域で10万本のデータ収集量を設定している[13]。

建設省においても地質検索システムを整備し、ボーリングデータの登録を進めてきているが、その密度は関東平野域で約1万本、比較的データ量の多い1/5万「東京東北部」図幅を例にしても800本/400km²程度であり、地盤構造の不均質性を再現するのに充分な量とは言い難い。ボーリングデータを独自に整理している全地連（全国地質調査業協会連合会）によれば、関東平野域における潜在的データ量は約40万本/1万km²と言われているので、他機関の保有している資料を含め、広範囲なデータ収集・解析が地盤の局所性を考慮したゾーニングに不可欠であると言えよう。

3）研究開発の進め方

上述の課題に応えるための研究開発を、以下の手順で進める。なお、最終的には首都圏のサイズミック・ゾーニングマップとしてとりまとめが期待されるが、そのためには行政的な対応と組織的な取り組みを必要とするので、本総プロでは、モデル地域を設定し、その手順を整理することを主眼とする。すなわち、研究目的としては、

軟弱地盤をその耐震性・地震防災の観点から広域的かつ局所的に分類評価する。またその手順を整理する。という点に置き、

研究目的として

i)モデル地域のケーススタディを行ない、その地域の地質特性を分類・評価したゾーニングマップを作成する（結果）

ii)地域地質特性を評価・分類する示標を明らかにする（方法）

iii)示標の整理とそれに基づく地域分類の手順を整理する（過程）

また研究方法については、軟弱地盤をどのように分類評価するか、という点が問題となるが、この点については振動研究室の協力を得て、以下の手順で進める計画である。

①軟弱地盤の構造・物性がどのような地震動特性となって現れるのかについてのモデル解析の実施

②軟弱地盤の地震動特性を特徴づける地盤構造・物性パラメークの抽出

③軟弱地盤をその地震動特性に応じて区分・ゾーニングする。

軟弱地盤を、入力地震動をINPUTとし、地表での地震動特性、あるいは地震被害をOUTPUTとする一種のFILTERとして考えると、

①は、FILTERの特性を明らかにすること

②は、FILTERを記述すること

③は、OUTPUTによってFILTERを分類・区分することに対応するであろう。

方法論として今一つの問題は、モデル解析の結果を如何に実地盤に結びつけるかという点にある。広域的な軟弱地盤をゾーニングする場合、考えられる方法としては利用し得るデータの制限から、

①軟弱地盤の地震動特性を震度分布、あるいは木造家屋倒壊率等を指標に定性的評価する。

②地盤のモデル化とボーリングデータから地域的な地盤評価を行なう。

①の方法では、震度が表層地盤の違いを反映しやすい遠地地震、深発地震時のデータを利用するか、あるは関東地震の際の調査資料を利用するとか考えられるが、いずれにしろ疾学的な方法であり、データ収集が困難であるとともに手法的に帰納法的調査であって、裏付けとしての地盤資料に基づく分類が必要となる。　②の方法での問題点はゾーニングのために膨大な量のボーリングデータを収集する必要があることである。関東地域を対象とした場合、数10万本、モデル地域として1/5万「東京東北部」を設定したとしても、同地域内で５万本程度のデータを収集する必要があり、それにかなりの経費および時間が要するものと予想される。

(B)軟弱地盤の原位置評価技術の開発

軟弱地盤の地質構造・物性が局所的に大きく変化すること、そのオーダーが水平方向に数10m以下となる地点があることを前述した。この不均質性は地震時の増幅度の変化のみならず液状化などの地盤被害に特徴的に反映され易い。日本海中部地震および千葉県東方沖地震の際の液状化被害が、ある広がりを有する地域の中で“ランダム”に発生したことはよく知られている。

また、最近の首都圏における高分解能の反射法探査結果では、軟弱地盤内あるいはその下部に断層が予想以上に覆在しており、これまで埋没段丘等の旧地形面の違いと解されていたボーリングデータの局所的な不一致が、断層活動によるくい違いである可能性も指摘されている。

既設構造物の耐震性を再評価する場合、あるいはボーリングデータ等から推定された地盤構造の局所的変化部を把握することが求められる場合、軟弱地盤を原位置において調査する必要があり、その技術的確率、適用性の検討を進めることが求められている。次項では、軟弱地盤の調査法として有望ないくつかの方法について、その概要および適用性についてレビューする。

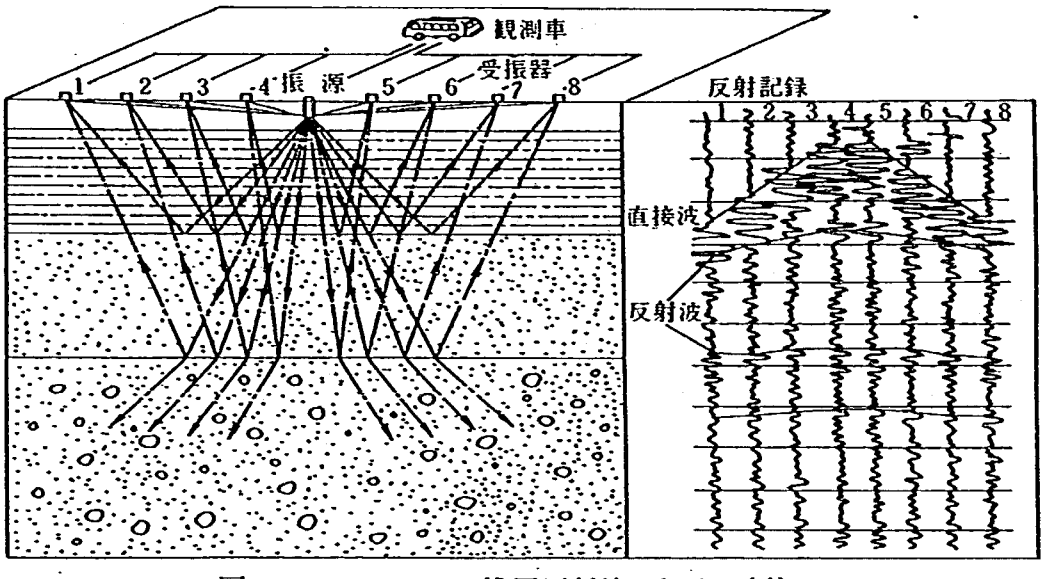
(1)軟弱地盤の原位置評価法

(a)浅層反射法

〈浅層反射法の概要〉

反射法とは、地下音響インピーダンス不連続面で反射してきた波を適当な振源・受振点配置－展開－により観測し、得られた記録を計算機で処理し、地下の地質構造を推定するものである。

一般に、浅部地盤では密度変化に比べて速度変化の方が著しく、またそれはおおむね層相の変化、地質時代の変化に対応している。したがって、音響インピーダンスの変化は地質構造の変化を示していると考えてよい。図－３．１．１５に示されるように、地表に設置された受振器では、振源から直接的に伝搬してくる直接波と、地下の境界面で屈折または反射してきた屈折波や反射波が観測される。反射波は直接波、屈折波より後の相として出現し、多くの雑音、特に振源に起因する妨害波に埋もれて観測されるので、その測定は初動だけを読みとればよい屈折法のように単純ではない。後述するようにその解析には複雑なデータ処理を必要とする。

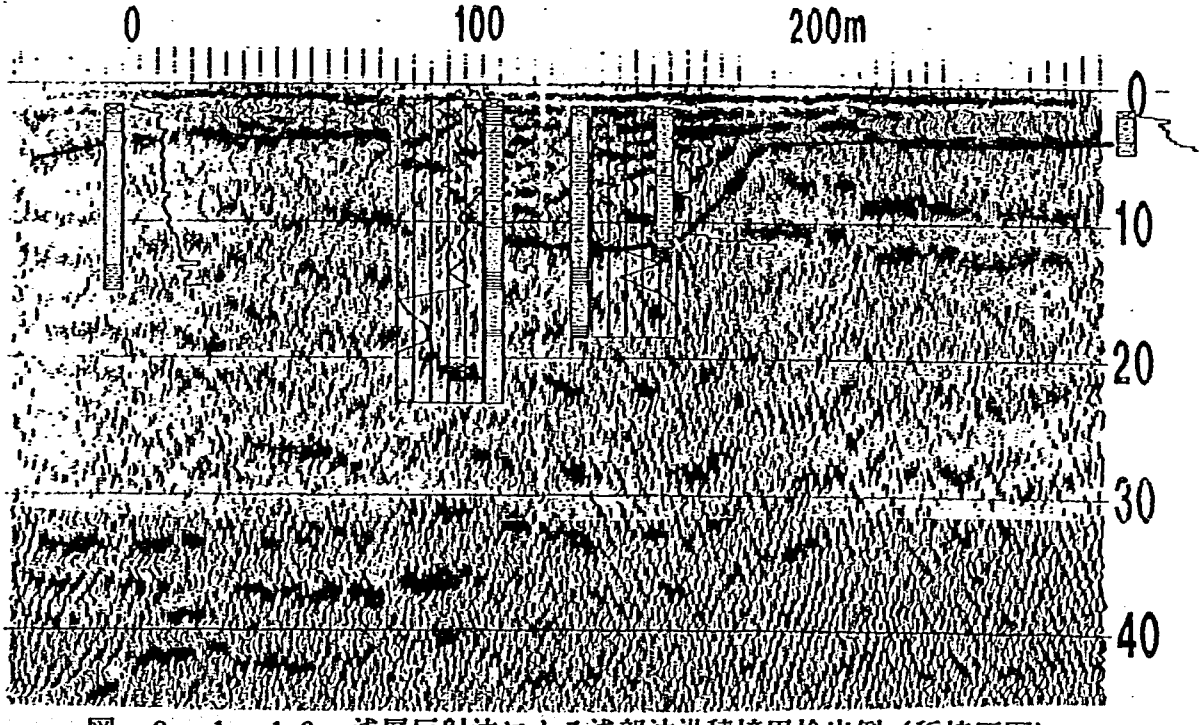


図－３．１．１５　浅層反射法の概念図[14)]

したがって現場においては、反射波信号のS/N比改善に努力するとともに、全波形をひずませることなく記録することが要請される。

〈軟弱地盤への適用例〉

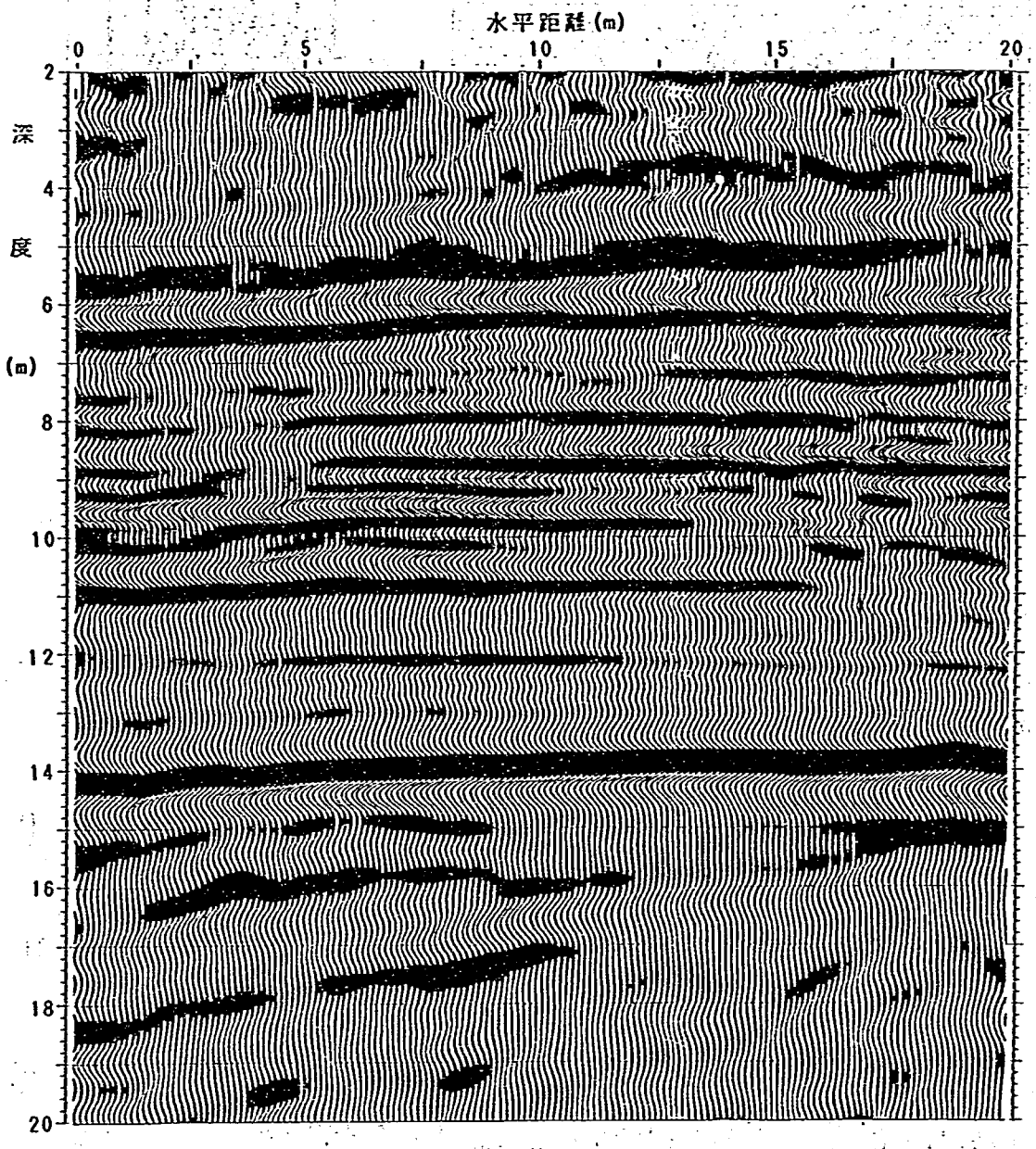
深さ約30mの埋没支谷の検出例を図－３．１．１４に示したが、より浅い深度にある沖洪積層境界を検出した例を図－３．１．１６に示した。



図－３．１．１６　浅層反射法による浅部沖洪積境界検出例（稲崎原図）

この探査例では、深さ約10m、幅100m程度の浅い埋没谷が捉えられている。また深度約４m付近にある沖洪積境界面も捉えられている。

図－３．１．１７は高密度のSH浅層反射探査結果で、深度約15mの沖洪積層境界や、沖積層内の細かな構造が再構成されている。



表層地盤の細部構造（Ｓ波による反射記録）

図－３．１．１７　高密度の浅層反射法探査例（阪神コンサルタンツ社資料）

〈軟弱地盤調査への適用性〉

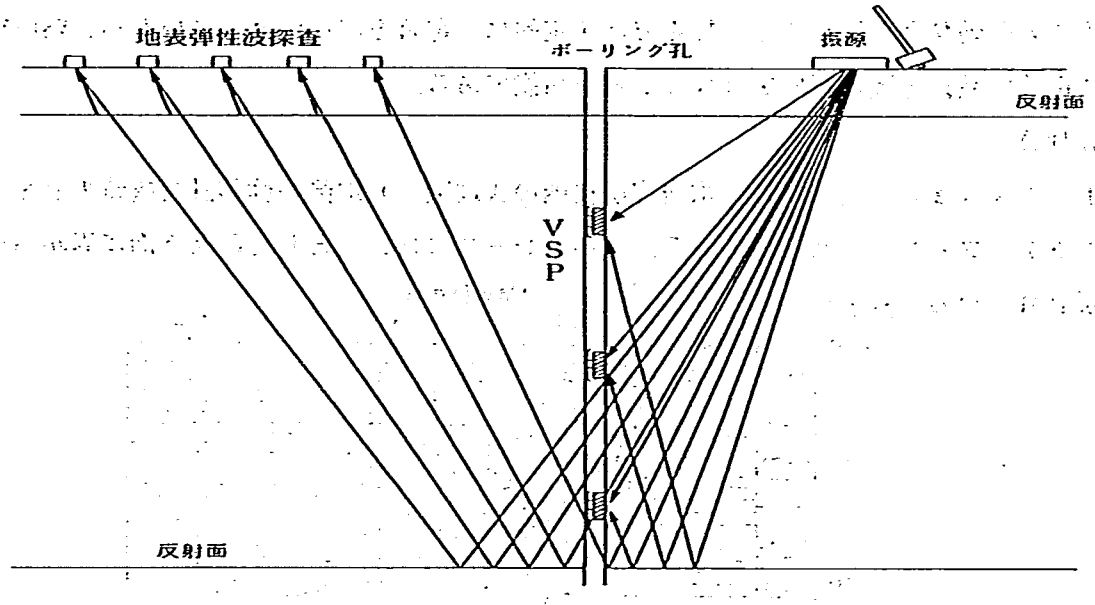
軟弱地盤の局所的構造を評価しうる調査法として、最も実用段階に近いレベルにあるのは 浅層反射法であろう。同法では、線状の探査測線の調査で疑似地質断面を得ることが可能である。同法では、

地盤内の音響インピーダンスの変化情報を映像化しているが、沖洪積境界は一般に工学的にも弾性的にも大きな変化を示すので、軟弱地盤の構造（＝境界面深度）を効果的に捉えることができる。また図－３．１．１６，１７の例では、沖積層内に多くの反射境界が認められる。これらの境界が地質学的に何と対応しているのか、現段階では不明であるが、実証的検証を進めて行けば、沖積層内の液状化砂層の分布・層厚を検出できる可能性を強く示唆している。

(b)ＶＳＰ

〈ＶＳＰの概要〉

ＶＳＰ(Vertical Seismic Profile)とは、地表に設置した震源で発生した弾性波を、多くの深度でボーリング孔の孔壁に地震計を圧着して記録する測定方法である。通常の屈折法・反射法弾性波探査では、振源・受振器とも地表に設置されるのに対し、ＶＳＰでは図－３．１．１８に示される様に、90°方向が異なっていることが特徴である。この受振器系の配向の違いは、受振器の応答の変化をもたらすことになる。すなわち、地表に設置された受信器では、地中から地表に向かってくる上向波（Upgoing Waves:一次反射と層間多重反射波）しか観測されないのに対し、ＶＳＰでは下向波（Downgoing Waves:震源からの直達波および層間多重反射波が含まれる）も観測することができる。



図－３．１．１８　ＶＳＰ法の原理[12)]

上述のようなＶＳＰの探査法および取得データの特徴から、我々は種々の情報を引き出すことができる。稲崎ほか（1990）[12)]よりその内容を以下に引用する。

(1)境界面の深度

地表面で実施される弾性波探査では、地下の情報は走時として時間軸上で間接的深度情報として得られるに過ぎないがVSPでは、走時－深度の関係を情報として得ることができるので、境界面の深度を

直接確認することができる上、地表での弾性波探査の解釈をより正確なものにすることができる。

(2)ボーリング孔近傍の地質構造

通常のzero offset VSPに加えてoffset VSPを実施すれば、ボーリング孔近傍での地質構造の変化を解析することが可能である。平野部に広がる沖洪積地盤では、数10mのオーダーで水平方向に地盤構造が急激に変化する場合があることが知られてきており、ボーリング調査間隔の適正化をはかる上でも効果的であろう。

(3)地盤の伝達特性

VSPで観測される下向波・上向波は、地盤内の境界面で反射・透過を繰り返した波群であり、これらを解析することで、境界面の位置とその反射・透過特性、すなわち地盤の伝達特性を評価することができる。

(4)区間速度

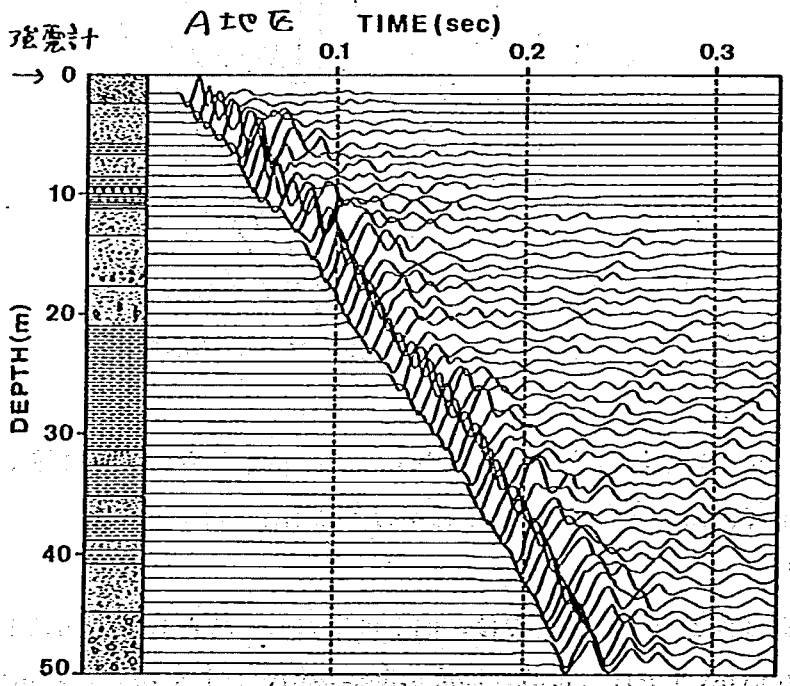
従来のPS検層と同様に、初動部分の走時解析によって、地盤内の区間速度を求めることができる。

(5)減衰定数の原位置測定

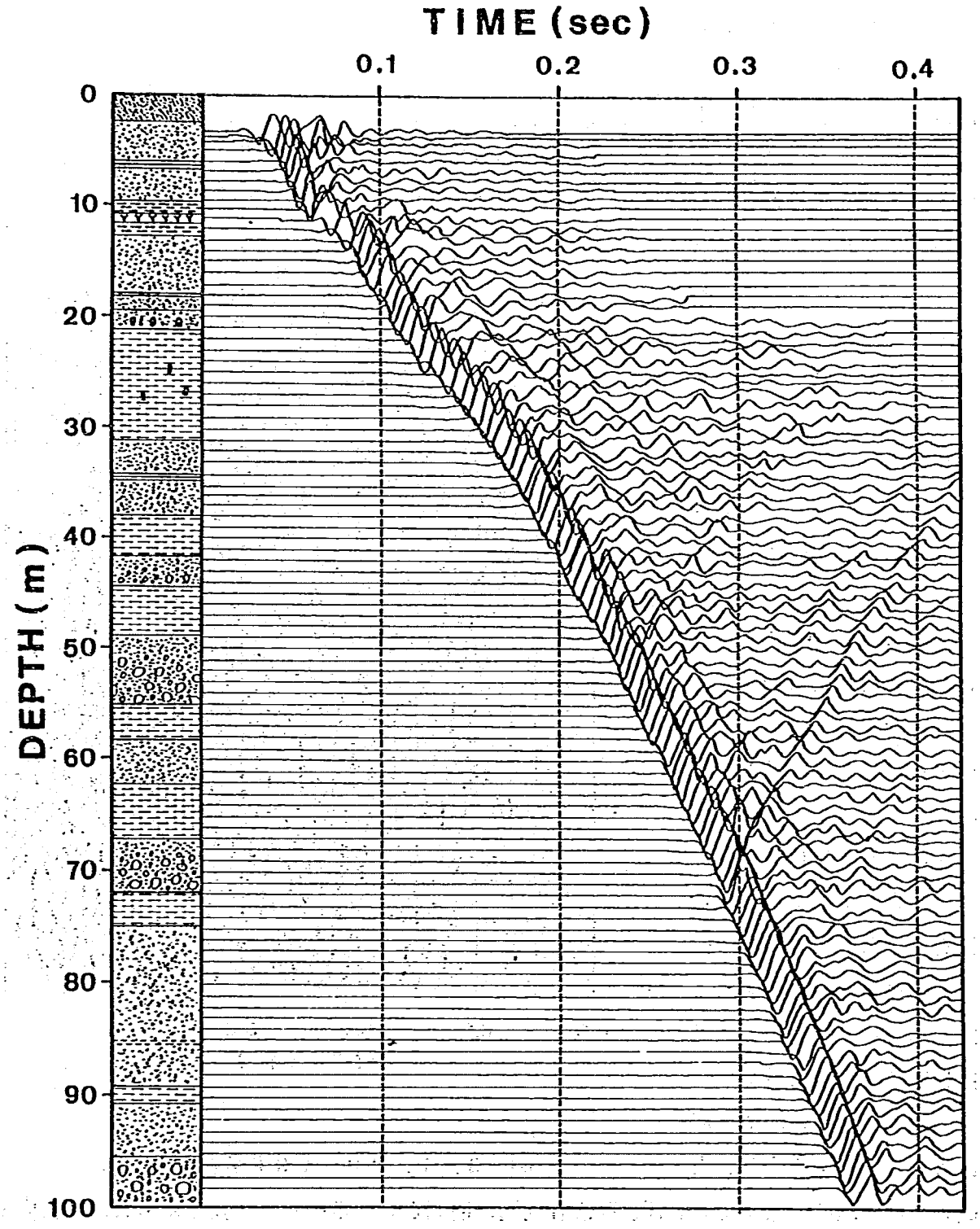
深度に対する観測波形の変化に着目すれば、VSPデータから地盤の減衰定数を観測することができる。しかしそのためには、広い周波数帯域での記録と地盤の働きを忠実に記録することが必要不可欠である。地盤の減衰定数は、その贈幅特性を評価する上で大変重要なパラメータであるにもかかわらず、従来、現位置での有効な調査法がなく、計算では便宜的に一定値を用いたりしていたが、VSPデータの解析によって正確な減衰定数の評価を行なうことが可能である。

〈VSPの適用例〉

図－３．１．１９（ａ），（ｂ）は土木研究所構内のＡ地区、Ｂ地区の強震計設置時のＰＳ検層の記録をペーストアップしなおしたものである。このトレースには、主として礫層下面境界からの上向波が明瞭に現われている。



図－３．１．１９（ａ）　土木研究所Ａ地区ＰＳ検層記録再解析結果（稲崎原図）

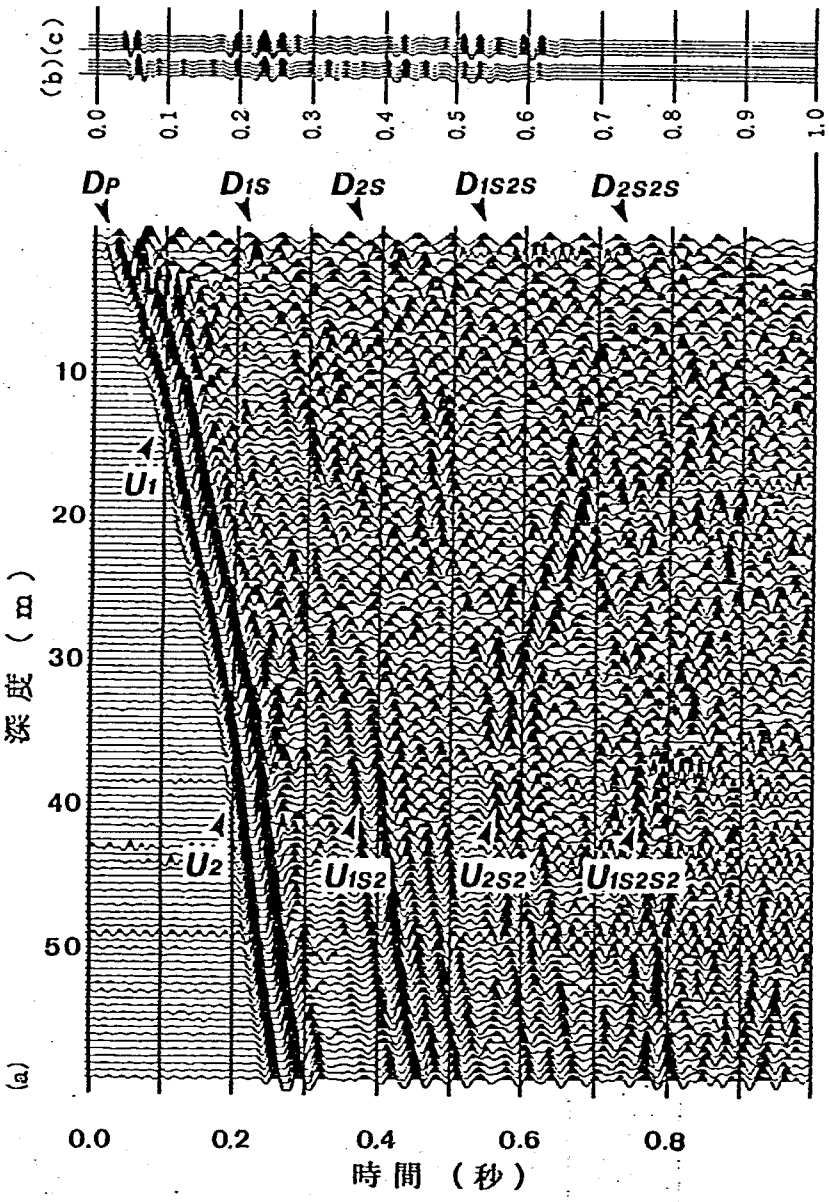


図－３．１．１９（ｂ）　土木研究所Ｂ地区ＰＳ検層記録再解析結果（稲崎原図）

同じく図－３．１．２０は土木研究所構内地質野外実験場の観測孔でのＶＳＰ処理結果であるが、デイジタルデータに対してＡＧＣ処理を実施したものである。この図には上向波が地表で全反射し、下向波として伝搬していること、また層間で多重反射を繰り返している様子が明瞭に認められる。これはまさしく表層地盤での重複反射であり、それを時間－深度領域で実体視しているということである。

〈ＶＳＰの適用性〉

表層地盤の増幅特性を計算で求めようとする場合、従来は主としてＰＳ検層の解析結果に基づいて層区分を行ない、地盤モデルを作成していた。しかし、モデル解析の結果は一般に実測結果と適合せず、層区分＝地盤モデル化の適正化を如何に行なうかが課題となってきた。それに対しＶＳＰを利用すれば、層区分を容易にかつ客観的に行なうことができるとともに減衰特性を含めた地盤の増幅特性を時間－深度領域で、実測することが可能である。ＶＳＰでは現状では、数10Hzの周波数帯域で、また10^{-5}レベルのひずみ領域での解析ではあるが、振源を工夫し、大振幅で低周波数帯域の起振ができれば、強震計観測の補間としてボーリング孔さえあれば高密度で直接的な地盤増幅特性評価を行なうことが可能となる。



図－３．１．２０　ＶＳＰ解析結果[15]

(c)その他の調査法

軟弱地盤の構造・物性の調査法として適用性が高く有望な手法として、浅層反射法とVSP法について

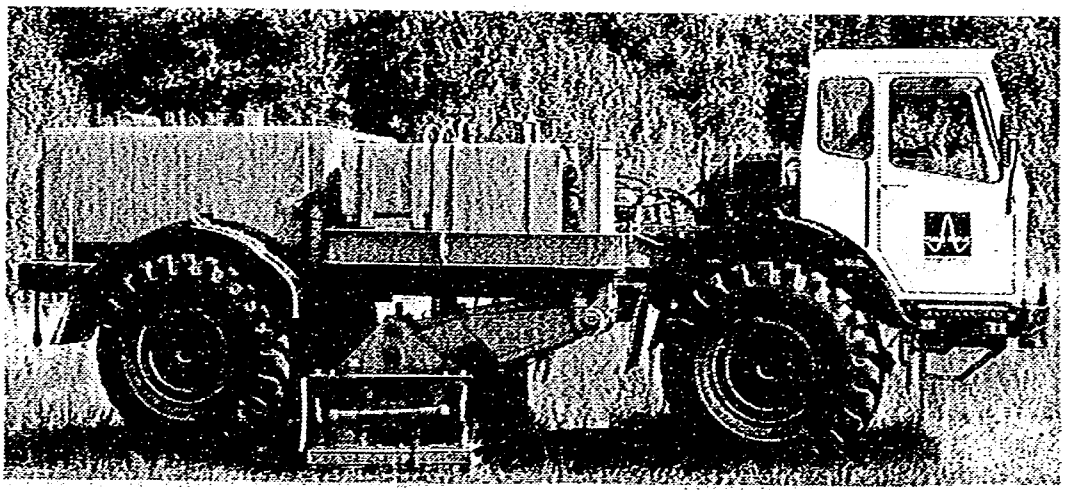
概述した。その他にも表面波探査法、電気探査法、地下探査レーダー、電磁探査法等、資源探査や特殊な土木地質調査で用いられている方法も検討の対象としたが、可探深度、探査精度、分解能（検出精度）、都市域ノイズへの対応性等の面ではいずれも限界があり、適用性は低いと判断した。

2）研究開発の進め方

選択した調査法、すなわち浅層反射法およびVSPは一般には概成した原位置調査手法であると言えるが、軟弱地盤の微細内部構造・物性を評価するという特化した目的に対応するためには、以下の点での検討を加える必要がある。

まず第一に、これまでの探査結果に認められる沖積層内の多くの反射境界が地質工学的にどのような物性境界として位置づけられるのか、という点での現地実験データの検討が必要であろう。これは探査法の結果解析の段階の課題であり、本質的かつ重要な物性境界がどのように捉えられるのか、またその最適な取得法はどうであるか、という点での整理につながる。また浅部に出現する潜在的に液状化の危険性を有する砂層の層厚変化・分布・粒度特性等のパラメータの推定を行なう上でも必要となる。

次の課題としてデータ取得時の観測装置の機能向上についての検討があげられる。振源装置については、浅層反射法探査の場合、現在人力に頼っている板たたき法にかわり、高出力・高周波成分が卓越し、また繰り返し起振の容易な機械式振源を開発する事が求められている。また、VSPでは、自然地震に類似した低周波成分の卓越した起振が望ましいが、そのための特殊な装置として既に開発されているSH波起振機（図－３．１．２１）の適用性の検討が求められる。同起振器は重量2650kgの反動重錘を、トラックマウントされた200kw程度のエンジンで振動させ、最大170KNの起振力を発生させることができ、数Hz～数10Hzのスウィープ振動を地盤に加えることができる。同起振器はしかし、国内では稼働しておらず、その検討には困難が予想される。



図－３．１．２１　ＳＨ波起震機の外観

測定用地震計については、VSPの場合、孔内の所定深度に設置して、低周波～高周波領域までの波形を広帯域で歪ませることなく取得できることが条件であり、孔内地震計の設置条件、すなわち孔壁＝地盤とのカップリングがどの様に波形観測に影響するかを検討し、最適な測定装置・測定方法を見いだすことが大きな課題となるであろう。

データ処理・解析技術の課題としては、VSPの結果から軟弱地盤の贈幅特性を直接適に求める手法の確率とその理論的裏付けが挙げられる。VSPの結果から地盤の減衰特性の分布を評価することが可能であることは前に指摘した[16]。この課題は、その結果の発展として位置づけられる。

3．1．3　軟弱地盤のゾーニング技術

（1）研究の背景

近年、地震動の増幅特性や液状化に代表される地盤災害の発生可能性を、マクロな形で評価・ゾーニングすることが行われるようになり、地域レベルの広範囲にわたる耐震性の評価に際して、参考となる情報の提供が行えるようなゾーニング技術の段階に達している。

しかし、軟弱地盤における地震動の増幅特性や構造物被害の発生程度が、軟弱地盤の土質及び土層構成の分布特性により大きく異なることが指摘されており、これまでのゾーニング技術・ゾーニングマップの精度と密度は、十分なものとはいえない。そのため、より詳細な地盤に関する情報の収集・推定を目的に、原位置での地盤耐震性の計測・評価法、入手可能な限られた地盤情報から局所的土質分布特性を加味した軟弱地盤の空間的な分布特性の評価法の開発が必要とされているとともに、①軟弱地盤や対策後の地盤の耐震性の合理的な評価法、並びに、②軟弱地盤の地震動の増幅特性及び地盤変状などの地盤震害に対する耐震性を総合的に評価できるゾーニング技術の開発が必要とされている。

（2）技術の現状

ゾーニング技術の現状として、現在作成されている耐震地図（ゾーニング）の概要を以下に示す。

1）既往の耐震地図の概要

これまでに研究所や県単位で、地震被害想定や震害発生の可能性を把握することを目的に各種の耐震地図が検討・作成されてきている。これらの内の一部については、「2）既往の耐震地図の内容」にその概要を示す。

これら既往の耐震地図の内容としては以下の事項（地図）があげられる。

①地盤の地質的な特徴を分類

②地震動の増幅特性を分類

③予測される地表加速度，震度による分類

④液状化の発生可能性を分類

⑤斜面災害の可能性を分類

⑥津波による被災可能性を分類

また、これらの分類作業に用いられる手法としては、

a．過去の震害事例に基づき震度や被害想定を行う

b．地盤情報と数値モデルから震度や液状化の予測を行う

に大別される。これらの内、bの場合には入手可能な（作業に使用した）N値等の地盤に関する情報が、これまでの耐震地図の作成作業では 1 km^2当り数本程度の場合が多く、地図をメッシュ（1 km ＊1 km程度）に分割し、メッシュ単位での地盤や予測計算・予測結果の整理が行われてきた。

近年は、コンピュータを利用することにより大規模な地盤情報に関するデータベースを使用し、地

盤の分類や地震動の増幅特性の分類をより細かなメッシュ（０．１ｋｍ＊０．１ｋｍ程度）で行ったり、微地形や過去の被災箇所等の複数の情報を重ね合わせることにより、地盤や地域の耐震性を検討・分類することも行われ始めている。

２）既往の耐震地図の内容

以下に、既往の耐震地図の内容として

①神奈川県地震被害想定調査報告書[18]　（昭和６０年３月）

②千葉県大規模地震被害想定調査報告書[19]（昭和５７年３月）

③静岡県東海地震対策土地条件図録集[20]　（昭和５９年２月）

④東京都総合地盤図　東京都地質図集３[21]（昭和５２年９月）

⑤神奈川県地盤地質図[22]　（昭和４６年３月）

を対象に、地図の内容，地図の作成方法（ゾーニング手法）の概要について述べる。

①神奈川県地震被害想定調査報告書　（昭和６０年３月）

ａ．地図の内容

・表層地質図

・地層断面図

・浅層砂質土層分布図

・第二次地盤分類図

・地表加速度予測図

・震度ランク予測図

・卓越周期予測図

・液状化判定図

（想定地震は東海地震、南関東地震、１００年期待値）

ｂ．資料の収集・整理

◆地質関係

約20,000本のボーリング柱状図資料及び地質文献資料を収集、整理した。

（神奈川県の面積約2,834Km^{2}で除するとボーリング柱状図の密度は約8本／km^{2}程度）

◆地震関係

過去に発生した神奈川県下の影響地震に関する資料調査を行い、想定地震の設定を行った。ここで設定した想定地震は東海地震、南関東地震及び100年に一度の割合で発生すると推定される100年期待値の３種類で、東海地震と南関東地震については断層モデルの設定を行った。

ｃ．現地調査

県内16ヶ所を新たに設定し、地盤のＳ波伝播速度（Ｖｓ），砂の液状化強度など、動的特性に重点をおいたボーリング調査を実施した。

d．地盤解析

◆地質解析

既存資料の収集整理及び現地調査結果に基づいて、県内地質地盤の分布状況を取りまとめた各種地盤図の作成を行った。ここで作成した各種地盤図は次の通りである。

・表層地質図：県内の表層地質の分布状況、沖積層の等層厚線図及び主な活断層を表した。

・地質断面図：東西方向、南北方向ともに 5km間隔の測線に沿って地質断面図を作成し、地下浅層部の分布状況を表した。

・浅層砂質土質分布：液状化の検討対象となるGL-20m以浅に分布する沖積砂層及び砂礫層の累計層厚の分布状況を表した。

◆物性解析

地表地震動を予測するための応答計算に必要な地盤の数値モデル化を行うために物性解析を実施した。ボーリングの際に行った標準貫入試験の結果であるＮ値をパラメータとし、各地盤ごとの密度（ρt）、Ｓ波速度（Ｖs）、動的変形特性（Ｇ／Ｇo～γ，h～γ）を設定した。

◆地盤分類

おもに表層地質の類似性に着目した第一次地盤分類と、これを地盤の増幅特性の類似性によりさらに集約した第二次地盤分類に分類した。県全域を東西方向経度にして22.5"（約600m）、南北方向を緯度にして 15"（約450m）のメッシュに分割し、各メッシュを代表する地盤パターンの抽出と集約を行った。

e．震度の予測

◆基盤地震動の評価

県下の地震基盤を Vs=700m/s以上の層に設定しこの地震基盤における加速度の大きさとその分布状況を求めた。

◆入射波形の検討

想定地震の規模と震央距離が類似している昭和43年に発生した十勝沖地震の八戸で観測された地震波を選定した。

◆表層地盤の増幅特性の評価

第二次地盤分類により集約された各地盤パターンについて、ＳＨ波の重複反射理論を基本とした等価線形法により、地震時の地盤の挙動を求める応答計算を行い、各地盤パターンの増幅特性を求めた。

◆震度の予測

地盤パターンの増幅特性と基盤加速度とを各メッシュごとに掛け合わせて地表加速度の分布を求めた。

また、気象庁震度階を基にした震度ランク分布も求めた。

◆卓越周期の予測

基盤加速度に対応した卓越周期の検討を各メッシュごとに行い、その分布を求めた。

f．液状化の判定

F_L法により深度ごとの液状化の抵抗率（F_L）を求め、これを深さ方向の重み係数を考慮して積分し、各地点での液状化の評価を行うP_L法を用いた。

g．長周期地震動の予測

巨大構造物に大きな影響を与える長周期地震動の検討を行うために、地震基盤を Vs=3000～3500m/s程度の位置に設定し、この深部までの地質構造を調査するために、県内の３地点を爆破点とする人工地震による基盤構造の探査を行った。

h．常時微動測定

地盤タイプ別に観測点を選定し、県内の 143ヶ所での短周期微動測定と、25ヶ所での長周期微動の測定を行った。短周期微動測定については、スペクトルパターン分類のマイクロゾーニングにおける地盤分類への適用性の検討を行った。

②千葉県大規模地震被害想定調査報告書　（昭和５７年３月）

a．地図の内容

・推定震度分布図
・液状化危険度評価
・斜面災害危険度図
・津波伝幡図
・地盤種別図

（想定地震は関東地震、元禄地震、東海地震）

b．資料の収集・整理

◆地質関係

「土質ボーリング資料」，「内湾臨海部土質調査資料集」(1974)，「葛南地域の地盤特性」(1969)等より資料の収集整理を行った。

◆地震関係

主な過去の斜面災害、津波災害などの地震災害に関する資料を収集し、その中から関東地震(1923)、元禄地震(1703)、東海地震の３種類の地震を想定地震として設定した。

c．地盤解析

地質文献及びボーリング柱状図より地表地質図、東西・南北約 5kmごとの断面図、軟弱地盤分布等を求めた。また、N値及び土質試験より地盤の動的特性の推定も行った。

HASKELL らによるマトリックス法を用いた重複反射理論により、表層地盤の地震動の増幅度及び卓越周期を求めた。

地表地質図、増幅度、卓越周期をもとに地震動に対する挙動を基準にして地盤の区分を行い、地盤種別図を作成した。

d．震度の予測

◆入射波形の検討

基盤に入力波として入れる波形は、エルセントロ地震波(1940)と十勝沖地震(1968)の八戸で観測された地震波を選定した。

◆震度の予測

表層地盤の増幅特性等より地表加速度分布を求め気象庁震度階に換算し、震度分布図を作成した。

e．液状化の判定

「昭和56年度千葉県地震地盤特性図作成業務」のボーリングデータより、シードの方法と岩崎・龍岡の方法の２つの方法で液状化の判定を行った。なお、岩崎・龍岡の方法では平均粒径D_{50}には平均的な値として 0.25mmを採用し、地下水位は0mと仮定した。また、P_L法により液状化危険度評価図を作成した。

f．斜面崩壊危険度の予測

過去の斜面災害に関する資料より想定地震ごとの崩壊分布予測を求め、斜面災害危険度図を作成した。この時地震によって起こる斜面崩壊に関係する外的要因として、谷密度，起伏量，岩石の硬さ，断層の長さ，人口斜面の長さ，地表面最大加速度を考慮した。

g．津波の予測

過去の津波災害の解析と、コンピューターシミュレーションの組合せによる浸水域の予測を行った。

◆津波災害資料の収集

遡上高，浸水域，旧汀線，土木構造物の被害，人的被害，耕地被害等の資料を収集した。

◆津波災害資料による津波遡上高の算定及び浸水域分布図作成

収集した資料を基にして、津波の遡上高の抽出及び浸水分布図を作る。

◆海底表形の把握

海上保安庁水路部による海図を基に、海底地形を把握する。

◆断層モデル

断層モデルを基にして、地震時の海底地盤の昇降量を求めて津波の規模を推定する。

◆津波伝幡計算

津波に関する基礎方程式を差分方程式に変換し数値積分を行う。

◆海岸付近の波高の抽出

海岸付近の波高をメッシュごとに求める。

◆潮位データー・海岸構造物・海岸付近の人工改変地等の資料の収集

◆推定浸水域分布図の作成

上記の資料及び海岸付近の波高をもとに推定浸水域分布図を作成する。

③静岡県東海地震対策土地条件図録集　（昭和５９年２月）

a．地図の内容

・地震対策地質条件図

・液状化危険度図

・人工改変地分布図

・木造建物被害率から推定した地表最大加速度図

・安政津波浸水域推定図

b．地震対策地質条件図

家屋を含む一般構造物に対する検討のために地表から5m程度下までの表層の地質を表してある。また、大規模構造物に対する検討のために軟弱層の等層厚線図もあわせて画いている。

c．液状化危険度図

県下約11,000本（静岡県の面積7,323km^{2}で除するとボーリング密度は約1.5本／km^2）のボーリング柱状資料を基に、液状化を起こす危険加速度を計算によって求め、各地点ごとに記入してある。これは、地層のちょっとした違いによって液状化を起こす危険加速度が大きく変化してしまうため、大まかにメッシュごとに平均した数値も併せて示してある。この方法によれば、地震の加速度が分かればどの地域で液状化が発生するかが推定できる。

d．人工改変地分布図

埋立，盛土，切土等土地を人工的に改変した箇所を航空写真等から拾い出し、図示した物である。また、谷の埋立について旧谷線の位置の記入も行った。

e．木造建物被害率から推定した地表最大加速度図

地形・地質分類と断層線からの距離の違いによる木造建物の被害率、および地表加速度の関係を関東大地震の被害を参考に求め、東海地震を想定した静岡県に適用した。各メッシュの推定加速度は、木造建物の全壊率と墓石などの転倒による推定加速度の関係に論拠を置くものである。

f．安政津波浸水域推定図

安政津波に関する古文書等から海岸への打ち上げや、川の逆上などによる最悪の条件を想定した浸水危険地域を推定した。

④東京都総合地盤図　東京都地質図集３　（昭和５２年９月）

a．図の内容

・地質調査位置図

・支持層分布図（Ｎ値）

・地盤種別図

・地盤断面図

・地質柱状図集

・土質試験結果一覧表（ボーリング資料3,499本、東京都の面積2,144km^{2}で除するとボーリングの

密度は約1.63本／km^2)

⑤神奈川県地盤地質図　(昭和４６年３月)

a．図の内容

・神奈川県地質図
・神奈川県沖積層及びローム層，下限等深線図，等層厚線図
・横浜，川崎臨海工業地帯ボーリング位置図
・神奈川県地質断面図索引図
・神奈川県地質断面図凡例
・神奈川県地質断面図（東西断面図）
・神奈川県地質断面図（南北断面図）
・沖積層基底等深線及び関東ローム層の厚さの等値線図
（ボーリング資料約5,000本、神奈川県の面積2,384km^{2}で除するとボーリングの密度は約2本／km^2)

（３）今後の検討課題

既往の耐震地図の多くは、マンパワーにより分類・作成され、地図としてペーパー上に印刷された形でとりまとめられてきた。そのため、耐震地図作成の第一段階としては、地震の想定や地表加速度（震度）等の想定を行い、これらの震度に対する耐震性の検討・分類を行い、耐震地図としてきた。この様にして作成された耐震地図は、想定地震に対しては被害想定を直読できるメリットを有するが、想定地震と異なる震源や規模の地震に対してはその予測精度は低下してしまう。そのため、コンピュータや大規模な地盤情報に関するデータベースの利用によるオーダーメイド式の耐震地図の作成技術の開発が望まれる。

また、これまでの被害に関連する耐震地図としては、液状化の発生可能性やPL値による分類地図が多く作成されてきたが、これらはあくまで液状化の影響の可能性を分類したもので、構造物への影響や構造物の被災可能性を直接分類したものではない。そのため、地盤や構造物の被災特性（被災のメカニズムや現象そのもの）を考慮した耐震地図の作成技術の開発が、より精度の高い被災度の判定のためには必要である。

さらには、地盤に関する情報の整理や管理においては、地質情報の整理作業に携わる熟練者により、少ない地盤情報から代表地盤データの抽出や補間を行ったり、コンピュータを利用し地盤情報の密度を高めることにより、地盤の面的な評価を行うことが試みられてきているが、熟練者の育成と地盤情報の高密度化には多くの労力を必要とする。そのため、熟練者のノウハウを取り込んだ地盤情報の処理・管理技術の開発が必要とされている。

また一方、地盤そのものの耐震性の評価手法の土台となっている土の強度特性は、軟弱な地盤や液状化を生じるような緩い沖積砂層が対象となって研究開発されたものであり、改良地盤のような締め

固まった地盤や固結した地盤の耐震性の計測・評価技術の開発も、近年の都市域の耐震性の評価に際しては必要となっている。

（4）研究開発事項

「（1）研究の背景」及び「（3）今後の検討課題」より、本総プロにおいて研究開発を進めてゆくべき具体的事項をまとめると、以下のようになる。

1）地盤の耐震性の評価技術の開発

・軟弱地盤の被災特性に結びついた土（シルト質土，密な砂，軟弱・弱齢粘性土）の強度特性の把握

・軟弱地盤の被災特性を考慮した地盤の耐震性の評価技術

2）地盤の耐震性のゾーニング技術の開発

・地盤の耐震性の空間分布に基づいた地盤の被災可能性の評価手法

・地盤の震害特性と構造物被害の関係の解明

・地盤・構造物の被災可能性を考慮した耐震性のゾーニング技術

３．２　軟弱地盤の震害対策技術

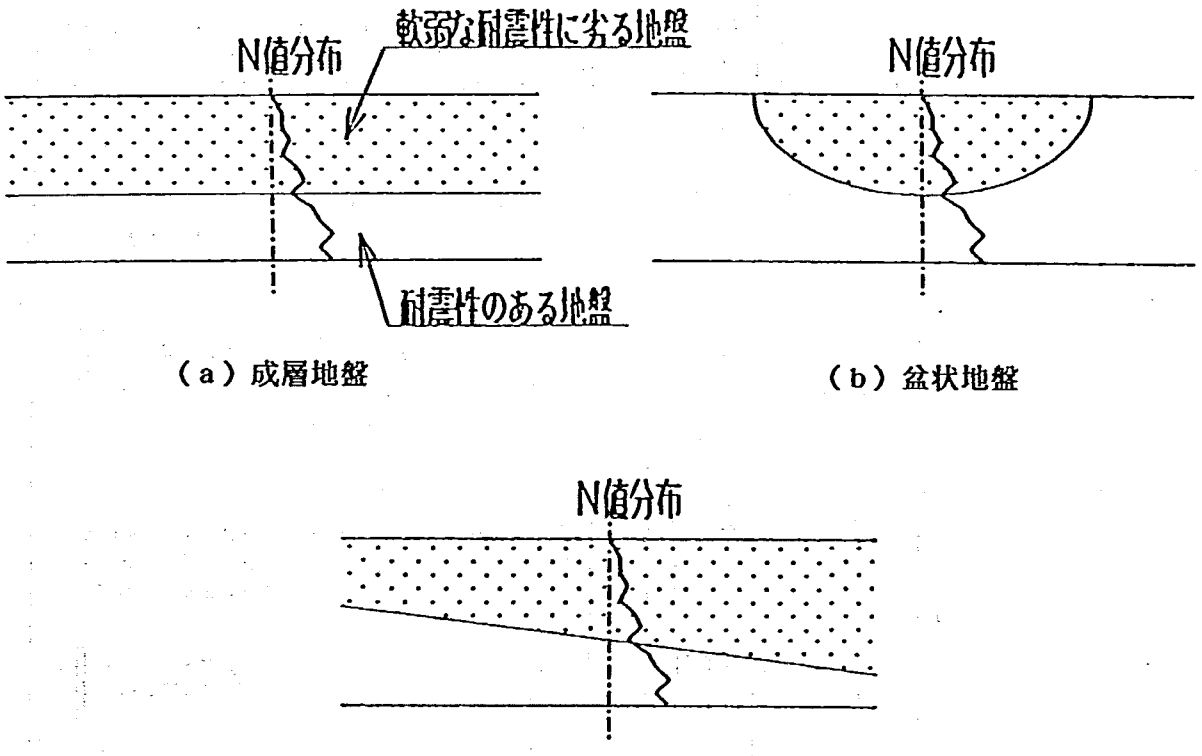
軟弱地盤に構築される構造物の耐震対策のために、地盤及び構造物の変状形態、震害特性を考慮した合理的な震害の発生可能性の評価技術の開発を行う必要がある。また、震害対策技術として、構造補強や地盤改良による対策工法の設計法の開発を行い、さらには、対策規模（範囲，程度）の設定法、対策効果の評価指標の分類、計測法・試験法の開発を行うことにより、総合的な軟弱地盤の震害対策工法の設計・評価技術の開発を行おうとするものである。

ここでは、「地盤震害の評価技術」と「耐震地盤改良技術」に大別し、技術の現状と検討課題等について述べる。

３．２．１　地盤震害の評価技術

（１）研究の背景

これまでの地盤震害や構造物の耐震性の評価は、点での評価であったり構造物周辺のごく限られた地盤を含めた評価手法であるため、図－３．２．１のような地質・地形的な条件の異なる地盤であっても、（ａ）図のような一様な地盤として評価を行ってしまい、（ａ）のような一様な地盤の場合には正確な耐震性の評価が可能であるが、（ｂ），（ｃ）のような地質・地形的な違いがある地盤に対しては、（ａ）と等しい耐震性があると評価してしまう欠点がある。



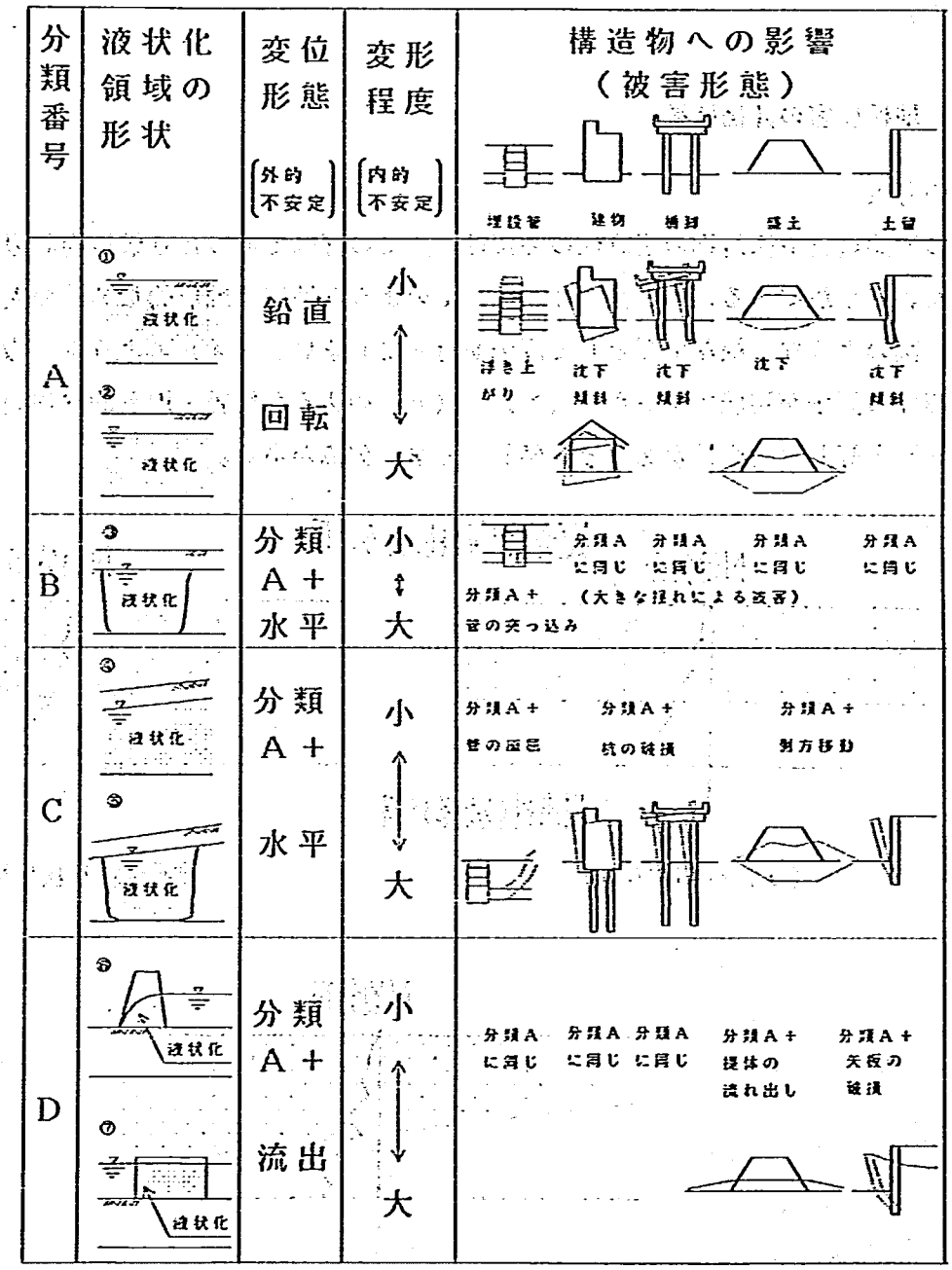
（ａ）成層地盤　　（ｂ）盆状地盤

（ｃ）基盤が傾斜

図－３．２．１　現状の地盤の耐震性の評価法では同一と評価してしまう地盤の例

また、地震時に生じる地盤震害や構造物への影響は、軟弱地盤の分布状態や地形的な違い，構造物の特性が密接に関わって生じるため、耐震性の評価や対策の検討・設計に際してこれらを考慮する必要がある。図－３．２．２は、地質・地形的パターンと構造物の被災メカニズムの関係を整理した一例である。

そのため、地盤震害に対するより合理的な構造物の耐震性評価技術を開発するためには、地盤震害のパターンとその被害箇所における地質・地形的なパターンとの相関性について検討し、耐震性の評価において想定すべき地質・地形のパターン分類法と、そのパターンと構造物に対する耐震性の評価法を明らかにする必要がある。



図－３．２．２　地質・地形パターンと構造物の被災メカニズムの関係

（２）技術の現状

震害の発生可能性の評価おいて必要となる地震動強さの評価法と、地盤そのものの強度の評価手法については、実務において使用できる手法にまで整理・検討がなされている。

具体的な例として道路橋示方書に規定されている方法をとりあげると、地盤の違いによる地震動の増幅特性を地盤の特性値T_G（地盤の固有周期に対応するもの）により分類し、その増幅程度の違いを設計震度の地盤別補正係数として表現している。表－３．２．１は、道路橋示方書に示されている地盤の分類法と、各地盤に対する地震動の増幅度の違いの評価に関する部分を抜き出したものである。

また、地盤そのものの耐震性の評価法として液状化の判定をとりあげると、原位置において実施された標準貫入試験のＮ値等から、液状化強度を直接推定し、液状化発生の可能性を評価する手法が提案されている。表－３．２．２は、道路橋示方書に示されている地盤の液状化可能性の評価方法に関する部分を抜き出したものである。

表－３．２．１　耐震設計上の地盤種別と設計水平震度の評価法（道路橋示方書より）

３．６　耐震設計上の地盤種別

耐震設計上の地盤種別は、原則として式（３．６．１）で算出される地盤の特性値T_Gをもと表－３．６．１により区分するものとする。地表面が基盤面と一致する場合はＩ種地盤とする。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^{n} \frac{H_i}{V_{si}} \quad \cdots\cdots (3.6.1)$$

ここに、

T_G　：地盤の特性値（ｓ）

H_i　：ｉ番目の地層の厚さ（ｍ）

V_{si}：ｉ番目の地層の平均せん断弾性波速度（ｍ／ｓ）

値は式（３．６．２）によるものとする。

粘性土層の場合

$$V_{si} = 100 N_i^{1/3} \quad (1 \leqq N_i \leqq 25)$$

砂質土層の場合

$$V_{si} = 80 N_i^{1/3} \quad (1 \leqq N_i \leqq 50) \quad \cdots\cdots (3.6.2)$$

N_i　：標準貫入試験によるｉ番目の地層のＮ値

ｉ　：当該地盤が地表面から基盤面までｎ層に区分されるときの、地表面からｉ番目の地層の番号。基盤面とは、粘性土層の場合はＮ値が２５以上、砂質土層の場合はＮ値が５０以上の土層、もしくはせん断弾性波速度が３００ｍ／ｓ程度以上の地層の上面をいう。

表－３．６．１　耐震設計上の地盤種別

地盤種別	地盤の特性値T_G（ｓ）

Ⅰ　種	$T_G < 0.2$
Ⅱ　種	$0.2 \leqq T_G < 0.6$
Ⅲ　種	$0.6 \leqq T_G$

4．2　設計水平震度

設計水平震度は式（4．2．1）により算出するものとする。ただし、式（4．2．1）による値が0．1を下回る場合には0．1とする。

$$k_h = C_Z \cdot C_G \cdot C_I \cdot C_T \cdot k_{h0} \quad \cdots\cdots (4.2.1)$$

ここに、

k_h ：設計水平震度（小数点以下2けたに丸める）
k_{h0}：標準設計水平震度（0．2とする）
C_Z ：地域別補正係数　（0．7～1．0）
C_G ：地盤別補正係数　（表－4．3．2による）
C_I ：重要度別補正係数　（0．8～1．0）
C_T ：固有周期別補正係数

表－4．3．2　地盤別補正係数　C_G

地盤種別	Ⅰ　種	Ⅱ　種	Ⅲ　種
補正係数 C_G	0．8	1．0	1．2

表－3．2．2　耐震設計上土質定数を低減させる土層（道路橋示方書より）

3．7．2　液状化する砂質土層

（1）液状化の判定を行う必要のある土層

地下水位面が現地盤面から10m以内にある沖積層で、かつ現地盤面から20m以内の範囲における平均粒径D_{50}が0.02㎜以上 2.0㎜以下である飽和砂質土層は地震時に液状化の可能性があるため、（2）項によって液状化の判定を行わなければならない。

（2）液状化の判定

液状化の判定を行う必要のある土層に対しては、液状化に対する抵抗率F_Lを式（3．7．1）により算出し、この値が1．0以下の土層については液状化するものとする。

$$F_L = R / L \quad \cdots\cdots (3.7.1)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad \cdots\cdots (3.7.2)$$

$$L = r_d \cdot k_s \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \quad \cdots\cdots (3.7.3)$$

$$R_1 = 0.0882 \frac{N}{\sigma_v' + 0.7} \quad \cdots\cdots (3.7.4)$$

$$R_2 = \begin{cases} 0.19 & (0.02\text{mm} \leqq D_{50} \leqq 0.05\text{mm}) \\ 0.225\log_{10}(0.35/D_{50}) & (0.05\text{mm} < D_{50} \leqq 0.60\text{mm}) \\ -0.05 & (0.60\text{mm} < D_{50} \leqq 2.00\text{mm}) \end{cases} \cdots\cdots (3.7.5)$$

$$R_3 = \begin{cases} 0.00 & (0\% \leqq F_c \leqq 40\%) \\ 0.004F_c - 0.16 & (40\% < F_c \leqq 100\%) \end{cases} \cdots\cdots (3.7.6)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x \cdots\cdots (3.7.7)$$

$$k_s = C_Z \cdot C_G \cdot C_I \cdot k_{so} \cdots\cdots (3.7.8)$$

$$\sigma_v = \{\gamma_{t1} h_w + \gamma_{t2}(x - h_w)\} / 10 \cdots\cdots (3.7.9)$$

$$\sigma_v' = \{\gamma_{t1} h_w + \gamma_{t2}'(x - h_w)\} / 10 \cdots\cdots (3.7.10)$$

ここに、

F_L ：液状化に対する抵抗率
R ：動的せん断強度比
L ：地震時せん断応力比
R_1 ：N値と有効上載圧σ_v'の関数で表される動的せん断強度比Rの第1項
R_2 ：平均粒径D_{50}の関数で表される動的せん断強度比Rの第2項
R_3 ：細粒分含有率F_cの関数で表される動的せん断強度比Rの第3項
r_d ：地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数
k_s ：液状化の判定に用いる地表面での水平震度
σ_v ：全上載圧（kgf／cm²）
σ_v' ：有効上載圧（kgf／cm²）
N ：標準貫入試験から得られるN値
D_{50} ：土の平均粒径（mm）
F_c ：細粒分含有率（%）
x ：地表面からの深さ（m）
C_Z ：地域別補正係数（0.7～1.0）
C_G ：地盤別補正係数（0.8～1.2）
C_I ：重要度別補正係数（0.8～1.0）
k_{so} ：液状化の判定に用いる標準設定水平震度（0.15とする）
γ_{t1} ：地下水位面より浅い位置での土の単位重量（tf／m³）
γ_{t2} ：地下水位面より深い位置での土の単位重量（tf／m³）
γ_{t2}' ：地下水位面より深い位置での土の有効単位重量（tf／m³）
h_w ：地表面から地下水位面までの深さ（m）

3．7．4　土質定数を低減させる土層とその取扱い

（1）3．7．2により液状化すると判定された砂質土層は、液状化に対する抵抗率F_Lの値に応じて耐震設計上土質定数を低減させるものとする。この場合の土質定数は、その土層が液状化しないものとして求めた土質定数に表－3．7．1の係数D_Eを乗じて算出するものとする。

なお、D_E＝0の場合の土層を耐震設計上土質定数を零とする土層とする。

表－3．7．1　土質定数に乗じる係数D_E

F_Lの範囲	現地盤面からの深度x（m）	土質定数に乗じる係数D_E
	$0 \leqq x \leqq 10$	0

$F_L \leqq 0.6$	$10 < x \leqq 20$	1／3
$0.6 \leqq F_L \leqq 0.8$	$0 \leqq x \leqq 10$	1／3
	$10 < x \leqq 20$	2／3
$0.8 \leqq F_L \leqq 1.0$	$0 \leqq x \leqq 10$	2／3
	$10 < x \leqq 20$	1

以上に示したように、地盤や構造物の耐震性の有無として、液状化の発生可能性を評価し、液状化すると判定される地盤中に構造物を建設しようとする場合には、耐震性の低い地盤（液状化を生じる可能性の高い地盤や極軟弱な地盤など）の支持力や強度を低下、あるいは無視した状態での構造物の安定性を評価することが行われている。

また、地盤の耐震性の有無が構造物に与える影響の考慮の方法においては、橋梁や建築物のように地盤の支持力の不足や変形が問題となるような場合には、地盤の変形や強度に基づいた耐震性の評価方法が用いられ、地中構造物のように地震時の浮き上がりが問題となるような場合には、地盤内に生じる過剰間隙水圧の発生量や地盤のせん断強度の低下割合に基づき、耐震性の評価が行われている。

（３）今後の検討課題

「（２）技術の現状」に述べたように、地盤や構造物の耐震性の評価について、実務において用いられるまでにまとめられ方法も幾つか存在する。

しかし、例えば地震動の評価においては、地質・地形の空間的な変化（地表面や基盤の傾斜等）や、盛土，構造物等の存在が地震動の増幅特性に与える影響について考慮できるまでには至っていなし、さらには、地盤や構造物の被災メカニズムに結び付いた地震動の影響、言い換えれば加速度が被災形態・程度と密接に関係するのか、あるいは速度や変位が被災形態・程度と相関が高いのかといった、震害の評価において考慮すべき最良の地震動強さの指標についても体系化されるには至っていない。

また、液状化強度についても、研究の出発及び対象が水平成層地盤であったことや、自然堆積の沖積地盤に代表される、N値の小さな液状化強度の小さな地盤を対象に研究が進んで来たため、地表が傾斜していたり盛土等の構造物周辺のような初期せん断力の作用している地盤の液状化強度や、地盤改良等により締固められたN値の大きな地盤や薬液等により固結させた地盤の液状化強度については、その評価方法が提案されるには至っていない。

そのため、地質・地形的パターンの違いが、地震動特性や地盤ひずみの発生特性に与える影響を明らかにし、地震動や地盤ひずみの発生特性の違いを評価するための、軟弱層の強度や軟弱層の空間的な分布状況のパターン分類の方法について検討する必要がある。また、地盤震害のパターンを被害形態・程度，被災メカニズム（地盤の変形，支持力の低下，地震動の増幅等）の面から行い、被災箇所における地質・地形的なパターンに基づき、地盤震害や構造物の耐震性を評価する手法を開発する必

要がある。

また、液状化に伴って生じる地盤の流動現象（大変位）については、過去の地震において大規模な地盤の変形（地盤流動）が生じていたことが確認され、震害事例の分析や模型実験等により、その大変形の発生のメカニズムや発生する地盤の流動量の推定法について検討が開始されいくつかの成果が得られ始めたばかりであり、具体的な耐震設計上の配慮の方法や、地盤流動の防止や対策技術については未だ明らかにされていない課題が多い。

（4）研究開発事項

「（1）研究の背景」及び「（3）今後の検討課題」より、本総プロにおいて研究開発を進めてゆくべき具体的事項をまとめると、以下のようになる。

1）地盤震害の評価技術の開発

・地盤震害の発生メカニズムの解明

・地盤震害による構造物の被災特性の解析手法の検討

・地盤震害による構造物の耐震性の評価手法

・地盤震害を考慮した構造物の耐震性の評価技術

2）構造補強による地盤震害防止技術の開発

・構造補強による地盤震害対策効果の検証

・構造補強による液状化，軟弱地盤対策の設計法

3．2．2　耐震地盤改良技術

（1）研究の背景

我国の大都市の多くは、河川の河口部に堆積した軟弱な沖積低地やその延長に埋立てを行った地盤に位置している。一般に各種構造物の地震時被害は地盤の良否に大きく影響され、過去の被害地震において構造物被害は軟弱地盤において多くなっている。このような被害を軽減するための方策として、1）ある施設が被害を受けたときに代替機能を果す施設を整備する、2）地震被害を生じないように構造的に補強を行う、3）地盤を強化し軟弱地盤としての影響を軽減することが考えられる。

このような背景を受け、上記3）の項目を目的とした耐震地盤対策に関する研究開発が必要とされる。ここでは、まず建設省関連の技術指針や事業において、どのように耐震地盤対策を扱い実施しているかを整理する。

1）関連指針等における耐震地盤対策の取扱い

都市内に建設される建設省所管の盛土構造物や地中構造物を対象とした現行技術指針等において、耐震地盤対策に触れたものとして以下のようなものがある。

・「道路土工－軟弱地盤対策工指針」[23]では、以下の事項について概略の記述を行っている。

①軟弱地盤における盛土の地震による被害の特徴

②砂質地盤の液状化現象に対する注意の換起、影響因子

③砂質地盤上の盛土の地震時安定検討法、対策工法一般

④粘土地盤上の盛土の地震時安定検討法、対策工法一般

⑤液状化地盤における掘割道路の浮上り検討法、対策工法一般

・「道路土工－のり面工・斜面安定工指針」[24]では、軟弱地盤以外も含めて、以下の事項について概略の記述を行っている。

①盛土における安定検討のフロー（地震時安定検討を行うかどうかを含めて）

②盛土の地震時安定検討を行うべき条件の例示

③盛土の地震時安定検討法

・「共同溝設計指針」[25]では、以下の事項について記述を行っている。

①周辺地盤の液状化の判定法

②浮上がりに対する検討法

③液状化の詳細判定を行うべき条件

④液状化対策一般

・「道路震災対策便覧（震前対策編）[26]では、以下の事項について記述を行っている。

①平地部盛土、山岳部盛土の簡易耐震調査法。平地部盛土では、軟弱粘性土地盤、ゆるい砂質土地盤が不安定な地盤と見なされている。

②掘割道路についても簡易耐震調査法が述べられており、この中で周辺地盤の液状化に注目を

している。

③盛土の耐震検討法及び耐震対策工法の一般的考え方ならびに想定される一般的工法及び具体例の概略が示されている。

④掘割道路の浮上り検討法及び耐震対策工法例が一般的に示されている。

・河川堤防の地震対策として、具体的な技術指針は確立されていないが、河川でも地震にも強い堤防を作る方向が目ざされており、具体的に実施される場合の安全度評価法及び耐震対策工の例が提案されている。

以上の現行技術指針等では、「共同溝設計指針」を除き、いずれも現場の技術者の参考とするのに留められており積極的に事前耐震対策をすべきと強制するには至っていないと考えられる。これには現行指針に対して以下のような理由が考えられる。

①地震による被害は個々の地点では非常に稀にしか生じないため、事前に耐震対策を行うよりも、震災後に速やかに復旧をする方が経済的であると考えられている。

②耐震検討をすべき個所の抽出基準にかなり恣意性があること。

③耐震地盤対策は一般にかなり工費を増大させること。

④既設構造物に対しては、原形を保ち、かつ、供用をはかりつつ効率的な対策工を行うことがかなり困難であること。

⑤耐震地盤対策工の設計法が具体的に記述されていないこと。

2）建設省の関連事業における耐震地盤対策の実態

1）に上述した関連指針類は、各々の構造物に対する耐震地盤対策の基本的考え方を述べたものであるが、ここではもう少し具体的に近年の建設省の関連事業において耐震地盤対策がどのように実施されつつあるかを述べる。

・道路局、都市局では道路構築物の震災点検を実施しているが、平成3年度の点検の中で軟弱地盤上の橋梁取付盛土の安定、並びに液状化性地盤中の共同溝の浮上りが点検されるようになっている。これらを受けて、今後、対策が実施されていくことになる。なお、この点検を先行的に実施した既存の共同溝並びに現在建設中の共同溝の中で、詳細に検討を行い矢板締切り工法による対策を実施しつつある例[27]がある。

・液状化の恐れのある地盤上に建設される道路盛土について、地盤をサンドコンパクションパイルによる締固めによる安定化がはかられた例[28]がある。

・河川堤防は大都市内部では既に一応の断面で建設されているが、上述した耐震性向上の一環として、既にいくつかの河川で検討が行われ、ある河川では深層混合処理による対策が試験的に実施され始めた。

これらの例の検討から、次のような工法が要請されている。

①既設構造物に適用できるものであること。

②都市内でも用いられる工法であること。

③設計法が確立していること。

3）都市内、関連企業体における耐震地盤対策

都市内において重要な公共施設は、建設省のみならず、他の諸官庁、地方自治体、各種企業体によっても建設、管理され、各所において液状化対策の検討が行われている。このような動きは、まだ詳細には把握していないが、これらの内、地中埋設管に限って言えば、ガス、電力、電気通信、上水道、下水道等における具体的な対策例等が、文献7）にとりまとめられており、参考とすることができる。

ただし、対策を実施するにあたっては、①液状化に対する施設の考え方、②液状化判定法・施設への影響の評価法、③②を踏まえた液状化対策の実施の判定基準、④①～③に関する規定、⑤具体的な対策工等が必要とされ、今後、これらに関する調査が必要である。

（2）関連技術の現状

1）我国における既往技術、最近の動向

液状化による被害防止・軽減のための地盤改良工法（以下、耐震地盤改良工法と呼ぶ）については、従来より各所において調査研究が、さらには実施が進められている。その原理は、通常、表－3．2．3のように分類される。これらについては、従来の経験に基いて、適用性等が整理されている[30)31)]。これらの多くは、ほぼ類似したものである。

これらを再整理して、同種の表を作成することも可能であろうが、現時点では、むしろ、これらに基いて、各種、構造物の種類、条件毎に、現時点で適用可能な工法、今後の開発が期待される工法等を整理することとしたい（表－3．2．4）。なお、この表を作成するにあたって、後述する2）海外における技術をも参考にしている。

既往技術も完成されたものではなく、以下のような問題点のあるものがある。

①実行可能であっても工費が高い。　例えば、深層混合処理による全面改良

②有効性の検証が未だ不十分。　例えば、締切工法

③効果が完全でない（ある程度は液状化が抑制されるが、多少の亀裂、沈下、浮上りが生ずる）。　例えば、グラベルドレーン

④設計法が確立していない。

⑤ねばりが小さい（設計地震動以上の地震動に対して対して被害が急増する）。　例えば、グラベルドレーン

⑥工事の効果の現場における評価が難しい。　例えば、グラベルドレーン、締切工法

新規技術の開発にあたっては、これらのことや、地震時のみならず、常時状態に対しても効果のあるものであるように配慮すべきである。

液状化対策に関しては急速な展開を望むことは困難であるが、近年我国で以下のような新しい工法の研究が行われている。

①排水鋼材

これは、鋼管杭や鋼矢板に、有孔性の通水部材を取り付けたもので、本体の剛性に加え、液状化時の過剰間隙水圧の消散を図るドレーン効果を兼ねるもので、複合的な機能をねらったものである。

②石灰パイル

これは、石灰パイルが、給水によって膨張をし、周辺地盤を高密度化させることを期待したものである。

これは、従来からある振動や衝撃による地盤締固め工法に比べて振動・騒音がはるかに少なくできると考えられる。

③事前混合

これは、埋立地や埋戻しに用いる盛土材料に、セメント等を添加することにより、盛土後に液状化をしない安定な材料となるようにするものである。

上述した表－３．２．４においては、このような開発途上の新しい対策工法も意識したものとなっている。

２）海外（米国）における技術

米国においては、ＡＳＣＥ、ＮＳＦ等において、しばしば、諸分野について技術・研究の現況、今後の方向等に関して、ワークショップ等で総括的にまとめられることがある。（耐震）地盤改良に関連するものとして、文献32)33)34)35)がある。

10）は、基本的には、常時を対象とした地盤改良を対象としたもので、この中で、将来技術開発の必要性・可能性の評価をも述べている（1976年時点）。

11）は、土質地震工学における、研究ニーズ、優先順位、必要予算等に関する議論をとりまとめたものであるが、耐震地盤対策のことは触れられていない。

12）は、ＷＥＳの所管する既存のアースダム、ポンプ場、閘門が液状化性地盤にある場合に適用するための工法を調べたものである（ただし、本文はほとんどアースダムを対象にしたものである）。この報告書においては、地盤改良工法が参考資料１のようにまとめられている。さらに、これらの工法の組合せの提案、個々の工法の特徴、改良効果の検証法、必要な調査研究が述べられている。調査研究項目として、①グラウト、混合土の動的性質②wickドレーン等が挙げられている。

13）は、地震対策を目的とした地盤改良・基礎補強に対するワークショップとしては米国内では初めてのものと思われる。

このワークショップでは、以下の４つの災害討議グループ、５つの工法討議グループが設けられた。

災害：液状化、地盤振動、基礎破壊、斜面・擁壁破壊

対策：高密度化、排水、物理・化学対策、挿入、基礎補強

この中で、挿入（inclusion）は、いろいろな範囲を含んで用いられることがあるが、この討議グループでは、押し込み杭、ソイルネイリング、補強土、コンパクション・グラウト、締固め砂（グラベ

ル）ぐい等を含むものとされた。

討議の中で、特徴的な事項として以下のようなことが挙げられる。

①排水工法（グラベルドレーン工法）について

・米国では、Seed-Bookerの理論のように地震時の過剰間げき水圧低下のみに期待する狭義のグラベルドレーン工法に対しては、依然、確信を持っておらず、グラベルドレーンを用いる場合にも、締固めを行うのが原則であり、液状化対策効果の評価としては、締固め効果のみを見るのが通常のようである。すなわち、締固めを伴わないグラベルドレーン工法はまだ用いられていない。このような不安材料の一つとして、仮に水圧が低減しても沈下量を減少させることはできないからということであった。

・したがって、都市内、既設建物の近傍で、新規施工を行う場合には、振動の少ない締固め機械を用いる。

したがって、既設構造物そのものの対策に、我国のようにグラベルドレーンが用いられるということはなく、グラウト工法（特にコンパクション・グラウト、グラウトで地盤を締固めるもの）が用いられるとのことであった。

・しかし、沈下が許容しうる所では、日本式グラベルドレーン工法もこれからは用いられる可能性があるので、その研究が必要であると認められた。

②その他

・研究ニーズには、各グループから様々なものが挙げられたが、グループ毎に、その数等がかなりまちまちで、必ずしも研究の緊急性に対する認識は一様でないと思われた。

・シルト混じり砂の締固め時の効果の評価法、各締固め工法の適用範囲を明確にする。

・物理化学的対策では、セメント固化による壁工法が一つの可能性である。

・物理化学的対策の内、グラウト工法は、処理範囲の確認等が大きな課題である。ジオトモグラフィーも可能性があるが、微妙な差の違い等の評価にはまだ困難な点がある。

・遠心力試験は種々の可能性のある方法であるか、異物を挿入した場合の実験にはまだ困難な点がある。

・ロマ・プリエタ地震のときに、いくつかの対策工が施工されていた箇所があり、それらには特に被害がなかったと言われており、近々報告される予定である。

なお、これら以外にも、大きな国際会議（ICSMFE,又は、その地域会議、その他）では、地盤改良は大きな１つの分野であり、ほぼ毎回ＳＯＡペーパーや General Reportが提出されており、これらの中からも、最近の地盤改良の事例や方向（主として常時）がうかがわれる。

３）改良効果の評価法

地盤改良を施した場合には、その改良効果の評価には大別して次の２通りがある。

①地盤の改良効果を直接的に評価できる場合：

対象地盤を全体的に締固めた場合のように、地盤の高密度化等を貫入抵抗等により調査できる場合。この方法にも、貫入抵抗と地盤強度の関係、改良範囲が対象構造物の安定に対して十分かといった点に関しては、データの蓄積・解析法等が必要であるが、改良効果はかなり直接的に評価しうると見なせよう。

この場合に属する他の例としては、対象地盤を全面的に置換したり、セメント安定処理をしたりする場合があげられる。

②地盤の改良効果を直接的に評価できない場合：

対象地盤の一部分に砕石ドレーン工を施工した場合のように、残された未改良地盤との相互関係により、対象地盤全体の改良効果が定まる場合で、この場合には、改良工の品質管理自体のみで改良効果を確認することはできない。したがって、改良効果の確認に対しては、当面、設計法の確からしさの検証及び設計仕様に対する実際の施工状態の調査（施工管理）によらざるを得ない。長期的には、実地震時の挙動から対策効果を確認する必要がある。

この場合に属する他の例として、地中構造物を矢板で締切った場合等があげられる。

以上は、通常の設計法にしたがって改良仕様を定めて、その状態が現地で施工されているかどうかといった観点からの評価法についてである。一方、地盤改良によって地震時の被害がどの程度軽減されるかは、基本的には改良仕様を定めた設計法中に含まれているはずであるが、設計法は一般に現象をかなり単純化したものであり、多くの場合、安全率によって安定・不安定の区別をするもののみであり、地震時被害を定量的に予測するのにはやや不十分である。このため、具体的にどのような変状を生ずるかを予測するための解析法の研究が各所で行われている。

4）土木研究所における既往の関連研究

土木研究所動土質研究室においては、自体研究や民間会社との共同研究において、各種構造物、各種工法について研究を行ってきた。これらを現時点でまとめると表－３．２．５のようになる。

（３）当該分野における研究課題

以上のような耐震地盤改良工に関して以下のような研究課題がある。

1）耐震地盤改良工法の設計に用いる地震力（盛土、地中構造物）

・無対策時の構造物安定の合理的評価法

液状化地盤強度、震度、地盤強度・震度の組合せ、安定解析法、許容安全率、変形による予測法

・対策工と構造物安定の合理的評価法

震度、地盤強度・震度の組合せ、安定解析法、変形による評価

・対象構造物設計と地盤液状化判定のための震度設定

2）剛改良体・壁体に作用する荷重

・地震時液状化に伴う土水圧の評価法

3）地盤流動時の地中構造物・基礎構造物への設計荷重

4）軽量地中構造物の浮上り判定のための地盤液状化の評価法

・共同溝指針における平均 F_L による方式、$r_u = F_L^{-7}$ の適用性

5）ドレーン系対策による地盤沈下の予測・構造物への影響評価

6）剛改良体の安定評価法

・地中転倒・支持力検討の意義

7）排水鋼材による抵抗増加、作用荷重等の評価法

8）浸透グラウトの注入特性、効果評価法

9）圧縮グラウト、石灰膨張ぐいの効果

10）広域地下水位低下に伴う影響把握

なお、このように多様な課題に対しては、本総プロ以外の研究課題も合わせて研究を実施する。

（4）研究開発のポイント

本題における研究目標は以下のようである。

1）都市内施設の耐震地盤対策の進め方の確立

このためには、以下の事項の明確化が必要である。

①都市内施設の耐震性の目標水準の明確化

・当該施設が個別施設として、又は、他施設との関連において震後にどのような機能を果たすべきか。

・想定地震規模の明確化

②①の目標を前提として、当該施設がこれから建設される場合の耐震設計法・耐震対策の選定法の確立

耐震対策の選定において考慮すべき要因は後述するが、以下のようなものが重要である。

・耐震対策を行うことによる被害軽減の定量的予測

・耐震対策のためのコスト

③②に対応して、既存の当該施設の耐震化手順の確立

・一般に、都市内における施設は既に多く建設されており、周辺環境構造物も高密度化・輻奏している。また、単純な上部工の補強とは異なり、地盤対策工の施工は容易ではない。したがって、既存施設に耐震性が不足することが見出されたとしても、耐震化対策にはかなりの工費・年月がかかる。したがって、この場合に、どの箇所から耐震化を進めるべきかの手順の考え方を確立することが必要である。

2）従来より、必要とされながらも効果的な工法のなかった構造物・条件に対する液状化対策工法を開発すること。

このためには、どのような条件（構造物、地盤）に対して、効果的な工法がないのかを明確にす

ることが必要である。また、この場合に各方面での最近の動向を把握することも必要である。

対策工法の開発内容としては、必要に応じて下記のものが含まれる。

①設計法（仕様・改良範囲を含む）

②施工法

③対策工の評価法・効果の判定・調査法

3）各種工法の開発とともに、各種工法の選定フローを作成すること。

選定フローにおいて考慮すべき要因には下記の事項が含まれる。

①構造物の地震時目標水準

②対象とする被害の形態、被害防止、軽減の目標水準

③地盤条件

④構造物条件

⑤地震力条件

⑥各工法のメカニズム、各工法による被害軽減度合・信頼性

⑦施工条件

⑧工費

⑨工期

表－3．2．3　液状化対策工法一覧表

改良原理	工法名
密度の増大	サンドコンパクションパイル工法 ロッドコンパクションパイル工法 バイブロフローテーション工法 動圧密工法 バイブロタンパー その他（転圧、爆破、群杭）
間隙水圧の抑制・消散	グラベルドレーン 人工材料によるドレーン
粒度の改良	置換
	混合
固結	深層混合処理工法
	注入固化
	生石灰パイル
飽和度の低下	地下水位低下
有効応力増大	遮水
せん断変形の抑制	シートパイル締切
	連続地中壁締切
	深層混合処理壁締切

表－3．2．4　液状化対策工法の適用性（見直し中）

構造物種別	液状化による被害形態	新設構造物を対象（施工環境上制約なし）		構造物に隣接した新設構造物を対象（振動・騒音・地盤変位に配慮）		既設構造物を対象（一般に構造物直下施工は不可）	
		既往技術	新規技術	既往技術	新規技術	既往技術	新規技術
地盤造成・広域盛土	沈下、すべり、水平移動	・良質材料利用 ・締固め	・事前混合処理	――	――	余盛	地下水位低下
くい基礎（橋、建築物）	水平移動、くいの破損 上部工の破損	・基礎本体を大きくする ・締固め等との組合せ	・排水鋼ぐい	・くい（低振動施工） ・深層混合処理等との組合せ	深層混合処理等による地盤改良	増しぐい	注入、排水鋼ぐい
直接基礎	沈下、水平移動、傾斜 上部工の破損	・締固め ・くい基礎に変更	――	・深層混合処理 ・低振動締固め ・くい（低振動施工）	石灰膨張ぐいによる締固め		注入
地中構造物 ・線状構造物（共同溝等） ・池状構造物	浮上り、水平移動、躯体破損、継手部離脱 連結配管部の破損	・締固め・くい支持 ・伸縮継手 ・地中壁による締切 ・グラベルドレーン	・新素材ドレーン ・排水鋼矢板締切	・深層混合処理壁による締切（土留兼用） ・グラベルドレーン ・くい（低振動施工） ・伸縮継手	排水鋼矢板締切、石灰膨張ぐい	地中壁による締切（矢板・深層混合処理）、グラベルドレーン	注入、排水鋼矢板締切
盛土（堤防・道路盛土等）	沈下、すべり、側方移動	・締固め		・深層混合処理 ・鋼矢板締切（圧入）	石灰膨張ぐい	地中壁による締切（矢板・深層混合処理）	注入

表－3．2．5　動土質研究室における耐震地盤改良に関する既往の研究

研究種別	対象構造物・工法	研究段階		
		室内実験	解析	設計法
自体研究	地中構造物に対するグラベルドレーン	○		○
	地中構造物に対する締固め工	○		○
	既設盛土に対する矢板締切工	○		
	盛土に対する地盤締固め工	○		
	押え盛土	○		
	ジオテキスタイル補強盛土	○	○	○
民間会社との共同研究	一様地盤に対するグラベルドレーン工	○	○	○
	地中構造物に対するグラベルドレーン工	○	○	○
	地中構造物に対する締固め工		○	○
	盛土に対するグラベルドレーン工		○	○
	盛土に対する地盤締固め工		○	○
	既設地中構造物に対する深層混合処理工	○	○	○
	既設盛土に対する深層混合処理工	○	○	○
	鉄筋挿入による液状化対策	○		
技術指導等	共同溝に対する矢板締切工		○	○
	既設河川堤防に対する深層混合処理工		○	○

主な工法：グラベルドレーン
　　締固め工
　　矢板締切
　　深層混合処理

３．３　軟弱地盤における構造物の耐震設計技術

（１）ニーズ

わが国の土木構造物の耐震設計は、大正１２年関東大震災による甚大な地震被害を契機として開始された。それ以後、今日までの震災経験や地震工学の進展を取入れながら、順次、耐震設計法の整備が図られてきた。これにより、今日では、道路橋をはじめとする耐震設計された土木構造物では、関東大震災当時にみられたような致命的な構造物の崩壊は生じないと考えられている。

しかしながら、現在までの著しい耐震技術の進歩にもかかわらず、近年、大都市地域で建設されたり、また、今後建設が予想される構造物の中には、新たな耐震設計技術の開発が必要と考えられる構造物が多数存在する。研究開発の必要な項目に応じてこれらを挙げると、以下のようになる。

１）大規模地震に対する耐震性の確保

昭和３０年に入り戦災復興が本格化し、近代的な大都市が建設されてから、大都市地域がマグニチュード８クラスの大規模地震の洗礼を受けた経験はない。大都市地域に限れば、マグニチュード８クラスどころか、ほとんど地震の洗礼を受けていないところが大部分だといっても過言ではない。一方、都市機能の集中にともない、地震後といえども大都市地域が果たすべき役割は格段に一刻も中断を許されないなど、大都市地域の重要性は高まっている。したがって、構造物の重要性に応じて、大地震に対しても耐震性を確保できる新しい耐震技術の開発が必要とされている。

従来のわが国の耐震設計は、静的横力法と許容応力度法を組み合わせた震度法によっている。こうして耐震設計しておけば大規模地震時にも許容応力度等に含まれた安全率のせいで致命的な崩壊をすることはない、というのが従来の考え方である。これは、現在の目からみれば、許容応力度に含まれた部材強度に対する安全率というよりも、むしろ構造部材に適度なじん性があれば部材としてのねばりを発揮し、致命的な崩壊をしなかったと解釈することができる。しかし、従来のように許容応力度法によっていれば、ほぼ自動的にじん性も確保された構造物はよいが、問題は、大都市地域のように、構造物の設置スペースや地盤条件等の制約から断面を絞ったり、十分なじん性が確保されない構造物が出現していることである。したがって、大地震時の構造物の耐震性を確保するためには、非線形域における部材の動的特性や変形特性を考慮した新しい動的な耐震設計法の開発が必要とされる。

２）軟弱地盤上の構造物の耐震性の確保技術の開発

わが国の大部分の大都市地域は、軟質な沖積地盤や人工造成地盤上に建設されている。こうした地盤上の構造物は、地震時に大きな地震力を受け、また、地盤の抵抗が小さいため、きわめて厳しい条件で耐震性を確保しなければならない。また、造成地盤の縁に建設される構造物や液状化にともなう地盤流動が生じる地盤上に建設される構造物では、地盤の破壊にともない大きな被害を受ける可能性がある。したがって、このような場合には、許容応力度法のように力のつり合いだけを考えた耐震設計ではなく、地盤との連成振動や地盤の変形、さらには、地盤の破壊を考慮した耐震設計法を開発することが必要とされる。

また、従来の地震被害を見てみると、同じ様な構造物が同じ様な地盤上に建設されているにもかかわらず、片一方が被災し、もう片一方は被害を免れたという事例が結構多い。これは、現在までも地盤条件や構造条件に応じて地震力を変えているが、こうした従来の設計では捉え切れていないわずかな地盤条件や構造条件の違いが、結果として構造物の被災に大きな違いをもたらしたことを意味している。

特に、軟弱地盤では、地盤の固有振動特性がはっきりしているため、地盤の固有周期に近い固有周期を有する構造物に特に大きな地震力が選択的に作用する可能性がある。したがって、こうした違いを設計の段階で考慮できれば、構造条件や地盤条件に応じてさらにきめ細かい設計が可能となり、耐震性を向上させることができる。

3）新形式の構造物に対する耐震技術の開発

現在までの耐震技術が、地震工学の進歩を取り入れて逐次整備されてきたが、地震力と部材耐力のバランス等最終的な設計体系の決定は既往の震災経験に基づき経験的に定められたものが多い。しかしながら、大都市地域では、従来震災経験のない新形式の構造物の建設が進められつつある。したがって、こうした新形式の構造物に対しては従来の耐震計算法を盲目的に適用するのではなく、構造特性に見合った耐震設計法を開発していく必要がある。新形式の構造物として主要なものを挙げると、以下のようになる。

a）不静定次数が低く、じん性の低い構造部材によって支持されている構造物

- 1本柱形式の鋼製橋脚
- 張出しがあり、偏心曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート橋脚及び鋼製橋脚

b）じん性が期待できない構造部材によって支持されている構造物

- 吊橋や斜張橋の主塔が良い例であるが、こうした部材自身はじん性が十分あると考えられるが、構造系全体の挙動から考えると、こうした部材に大きな非線形応答が生じることは許されない。このように、じん性を期待しにくい部材が主部材となる構造系の耐震設計上の取り扱いを検討しておく必要がある。

c）異なった振動特性を有する複数の構造コンポーネントから構成される構造物

- 橋と建物の一体整備

4）重要性に応じた耐震性確保水準の評価

現在の道路橋の耐震設計では、重用度に応じて設計地震力に20％の違いを許しているが、土木構造物の中で構造物の重要度を考慮して設計地震力のレベルを変えているものは比較的少ない。しかしながら、全体としてはある程度の耐震性が確保されるようになってきた現在、構造物の種類によっては構造物の重要度に応じて適切に耐震設計のレベルを変え、国全体としての資源の有効利用が求められている。これは、耐震性を下げるというだけでなく、特に大都市地域の重要構造物のように耐震性をもっと上げる必要があるのではないかとの指摘に答えるためにも重要である。

構造物の重要性を考慮する上で重要と考えられるのは、その構造物の持つ重要性や復旧に要する費

用だけでなく、その構造物の機能が失われることによる影響である。特に、大都市地域では、構造物自身の復旧に要する費用よりも機能が失われることによる影響の方が非常に大きい場合が多いため、こういう観点から構造物の重要性を検討し直すことが重要である。このような検討の結果、現状よりも耐震性を向上させるべき構造物と耐震性を低めてもよい構造物が浮かび上がってくると考えられる。

（２）技術の現状

大都市地域の軟弱地盤上の構造物の地震防災の向上に関して、上述した４項目ごとに技術開発の現状を示すと、以下のようになる。

１）大規模地震に対する耐震性の確保

土木構造物の耐震設計は、従来震度法一本槍であったが、平成２年２月に出された道路橋示方書Ｖ耐震設計編では、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査の規定が取り入れられた。これは、大正１２年の関東大震災級の大規模地震が生じても、ＲＣ橋脚の損傷が、最大耐力付近で安定していた水平耐力が低下し始める程度の損傷にとどめることを照査することをねらったものである。

ＲＣ橋脚に地震時保有水平耐力の照査では、図－３．３．１のフローに従いＲＣ橋脚のねばりを考慮した保有水平耐力を照査する。曲げ破壊する場合には保有水平耐力及びじん性率は次式で算出される。

$$P_a = P_y + \frac{P_u - P_y}{\alpha} \qquad (3.3.1)$$

$$\mu = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \delta_y} \qquad (3.3.2)$$

ここで、

P_u, δ_u：ＲＣ橋脚の終局水平耐力及び終局変位

P_y, δ_y：ＲＣ橋脚の降伏水平耐力及び降伏変位

α：安全係数（＝１．５）

一方、地震時保有水平耐力の照査に用いる等価水平震度は、以下のように算出する。

$$k_{he} = \frac{k_{hc}}{\sqrt{2\mu - 1}} \qquad (3.3.3)$$

$$k_{hc} = c_Z \cdot c_I \cdot c_R \cdot k_{hc0} \qquad (3.3.4)$$

ここで、

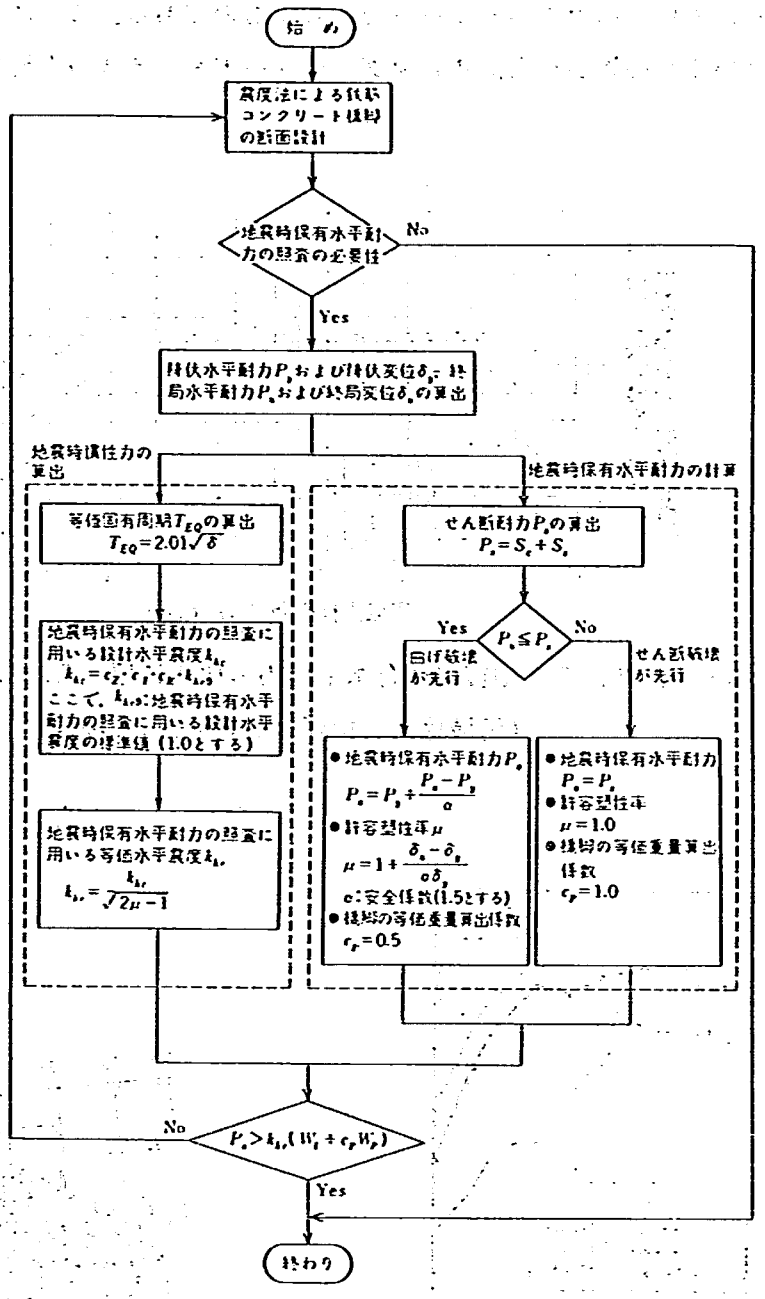
k_{he}：地震時保有水平耐力の照査に用いる等価水平震度

k_{hc}：地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度

μ：許容塑性率

c_Z、c_I、c_R：地域別補正係数、重要度別補正係数、振動特性別補正係数

k_{hc0}：地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度の標準値（＝１．０）

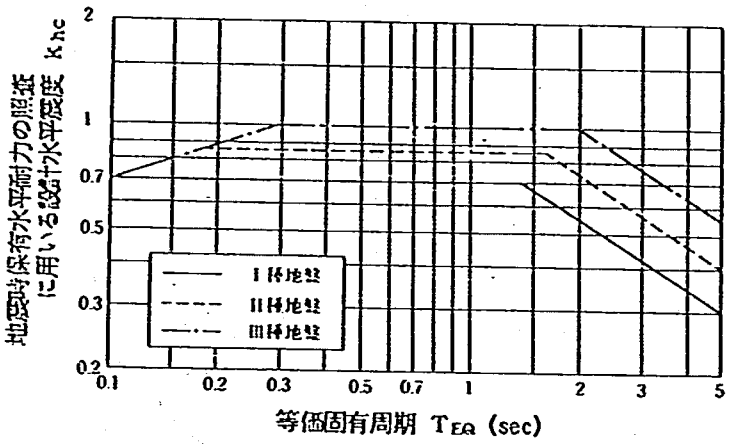


図－３．３．１　鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査の流れ

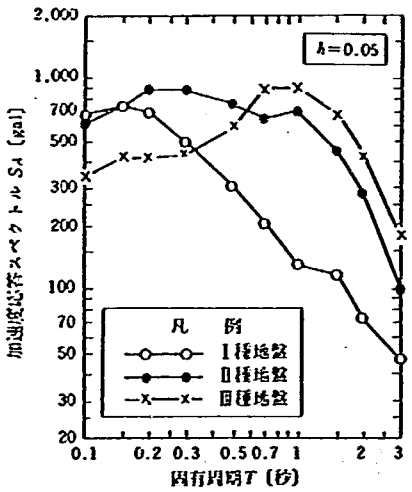
いま、ｃｉ＝ｃｚ＝１．０として、式（３．３．４）により地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度Ｋ$_{hc}$を算出すると、図－３．３．２のようになる。式（３．３．４）で、地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度の標準値Ｋ$_{hc0}$が１．０とされたのは、関東大震災に代表されるマグニチュード８クラスの大規模地震を想定すると、図－３．３．３に示す加速度応答スペクトルの距離減衰式から推定される橋の振動特性や、既往の震災状況に関する各種の研究成果を総合すると、橋には弾性応答にして１ｇ程度の最大加速度応答が生じることを考えておかなければならないことによる。

図－３．３．４は、わが国の地震発生特性を工学的に判断していくつかの地域に分け、それぞれご

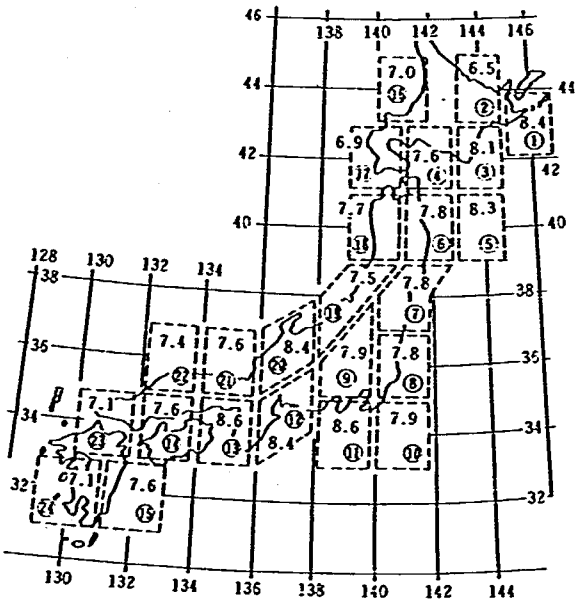
とに過去に生じた最大地震のマグニチュードを示したものである。これによれば、太平洋沿岸の大都市地域においてはいずれの地域にも過去にマグニチュード８クラスの大規模地震が生じていることがわかる。



図－３．３．２　地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度
（地域係数、重要度を1.0とした場合）



図－３．３．３　マグニチュード８の地震が震央距離50Kmの位置に生じた場合の加速度応答スペクトル



図－３．３．４　わが国に生じた地域ごとの既往最大地震のマグニチュード

地震時保有水平耐力の照査では、式（３．３．１）、（３．３．３）より、次式を満足するようにＲＣ橋脚の断面を決めなければならない。

$$P_a > k_{he}W \qquad (3.3.5)$$

ここで、

P_a：ＲＣ橋脚の地震時保有水平耐力

k_{he}：地震時保有水平耐力の照査に用いる等価水平震度

Ｗ：等価重量

このように、平成２年２月の道路橋示方書には、ＲＣ橋脚に対して地震時保有水平耐力の照査が盛り込まれ、大規模地震時の橋の耐震性を具体的に照査できるようになったが、これが可能なのが、現在の所、１本柱形式のＲＣ橋脚だけであり、今後、設計体系を整えて行くためには、以下の構造部材に対する照査体系、特に、地震時保有水平耐力の推定法と剛体基礎の動的安定照査法を開発していく必要がある。

① ラーメン形式の鉄筋コンクリート橋脚、及び、ラーメン橋の照査法

② １本柱形式でもＬ字形に大きく張り出した鉄筋コンクリート橋脚の照査法

③ 鋼製橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発

④ 基礎構造物の地震時保有水平耐力の照査法の開発

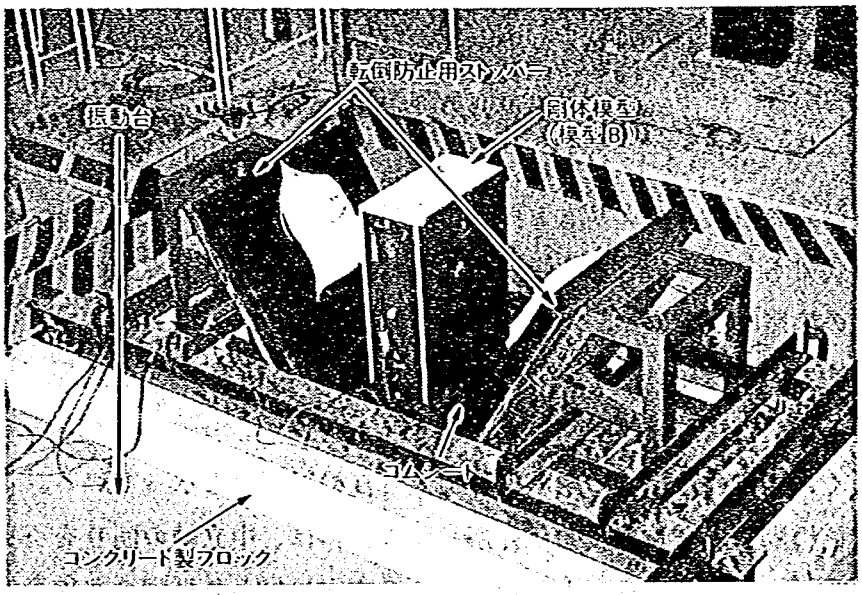
⑤ 剛体基礎の動的安定照査法の開発

この中でも、とくに、②は、橋脚の耐震設計上大きな検討項目となっている。これは、張り出し形式のある橋脚では、橋脚に大きな地震力が作用した場合には、中立軸の回りを正負同じように振動するのではなく、死荷重による偏心荷重が作用している方向にばかり橋脚の非線形応答が偏る可能性があると考えられるためである。また、③については、従来からの実験で、薄肉の鋼構造部材は、地震力を受けて面板の一部に局所座屈を生じると、その後の耐力が期待できないことが指摘されている。このため、大型供試体を用いた定量的な実験データの収集が現在行われている。

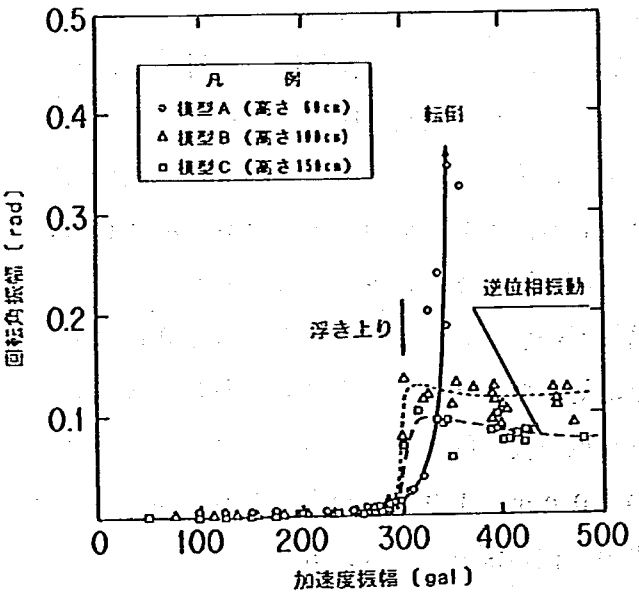
次に、剛体基礎の動的安定照査法であるが、これについては、まず、動的転倒照査に対して、現在、本州四国連絡橋に関連して各種の技術開発が行われつつある。現在の転倒の照査は、重力と地震力の合力が基礎底面以内にあるかという物部による静的な転倒照査法によっている。静的な転倒照査法では、構造物の形状が重要であり、形状が同じであれば縦２ｃｍ，横１ｃｍのサイコロも、縦８０ｍ、横４０ｍの大型剛体基礎も同じ地震力を受ければ同じように転倒すると判定される。しかし、実際には、同じ地震力を受けても、縦２ｃｍのサイコロが容易に転倒することはあっても、縦８０ｍの大型基礎の一端が４０ｍ近くも持ち上がって転倒することは絶対にないといってよい。これは、両者の回転慣性とロッキング周期が異なるためである。このような点を実験的に実証するために、写真－３．３．１に示すように、振動台上に形状は同じで、高さが６０ｃｍ，１００ｃｍ，１５０ｃｍと３通りのコンクリート製剛体基礎模型を置き、加振した。結果の一例は図－３．３．５に示す通りであり、同じ加振加速度を加えても、小さな模型は転倒するが、大きな模型は回転振動するだけで転倒しない。大きいといっても高さ１５０ｃｍしかないが、これが、もし高さが４０ｍもあれば、全く振動しないといってもよいであろう。

このような点を解析的に検討するため、剛床上に置かれた剛体基礎から出発して、弾性床上の剛体基礎、弾塑性床上の剛体基礎と順次解析法の高度化が図られてきた。現在は、基礎底面地盤が一様で

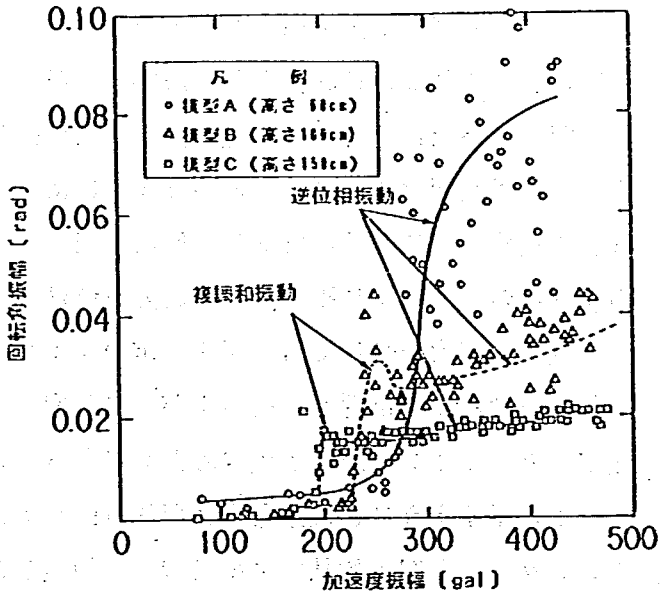
はなく、地盤の剛性や降伏耐力が違う場合の影響、回転してつま先立った場合に、つま先部分に地盤の降伏が生じた場合の影響、等が検討中である。したがって、このような転倒に対する動的安定照査法をさらに耐震設計に使いやすくまとめ直しをすると同時に、滑動、支持力に対しても同様に動的なセンスの入った照査法を開発していくことが必要とされる。



写真－３．３．１　剛体基礎模型の加振実験



(a)　加振振動数 1.5 Hz の場合



(b)　加振振動数 3 Hz の場合

図－３．３．５　正弦波加振からみた寸法効果

2）軟弱地盤上の構造物の耐震性の確保技術の開発

もともとわが国では、地盤条件が軟質な場所で地震被害が著しかったため、こうした場所の耐震技術の向上が図られてきた。しかしながら、現在必要とされているのは、造成地盤等の従来にないタイプの軟弱地盤上に建設される構造物や液状化に伴う地盤の流動が生じるような場所に建設される構造物の耐震性の確保技術であり、こうした点に関する研究は従来あまり行われていない。

まず、地盤の変形を考慮した基礎構造の耐震設計としては、応答変位法に基づく耐震計算法が開発されており、すでに一部で実用化されている。ただし、基礎構造物の寸法、形状、地盤との相対変位に応じた地盤バネ定数の設定にまだ問題を残している。

地盤の破壊時の基礎の耐震性の確保に関しては、これから新しい研究が必要とされる。液状化に伴う地盤流動のメカニズム、流動量の推定に関しては、浜田らの先駆的な研究がある。また、流動地盤中の基礎構造物に作用する動土圧に関する実験的な研究が行われている。人工地盤の縁や運河、河川等との境に建設される基礎が、そこに生じる地盤破壊によってどのように影響を受けるかといった研究は、まだほとんど行われていない。

現在の耐震設計では、地盤の種別や構造物の固有周期に応じて設計地震力を変えているが、地盤との共振という点にもっと踏み込んだ研究が必要とされている。道路橋示方書では、地盤の特性値T_Gによって地盤種別を決めている。これは、せん断弾性波速度が３００m程度の地盤を耐震設計上の基盤と見なし、その上の表層地盤の微小ひずみ時の固有周期を算出するものである。しかし、大規模地震時の地盤動に卓越する周期は、地盤の特性値T_Gとは別のもっと長い周期かもしれない。現在までの強震観測結果によれば、軟弱地盤では、地震の特性によってあまり地震動の周期特性は影響されず、いつもほぼ同じ様な周期が卓越することが知られている。したがって、軟弱地盤では、構造物の固有周期によっては選択的な共振が起こりやすいと考えられている。

3）新形式の構造物に対する耐震技術の開発

新形式の構造物に対する技術開発としては、現在までに、ＣＡＢ，シールドトンネル、地下式駐車場等に対して行われてきた。大都市地域で今後検討が必要とされているこの他の構造形式としては、鋼製橋脚等じん性の低い構造部材によって支持されている橋梁、斜張橋の主塔等、じん性を期待しにくい主部材によって支持されている橋梁、建物と橋梁の一体的整備のように振動特性が異なる構造コンポーネントなら成る構造物がある。

このうち、鋼製橋脚のじん性に関しては、模型を用いた動的載荷実験や振動台加振実験が行われ、基礎的な実験データの蓄積が図られつつある。また、こうした部材の耐震性を検討する上では、非線形域に入った後の２次剛性の勾配が重要であり、２次剛性が負になると残留変位が大幅に増えることから、非線形域において、２次剛性が小さくても正にするような構造的配慮が重要なことがわかりつつある。

また、建物と橋梁との一体整備に関しては、建築基準法、同施行令と道路橋示方書等、土木構造物系の技術基準との比較検討が行われている。

4）重要性に応じた耐震性確保水準の評価

構造物の重要度を計量化するためには、構造物の復旧費用や再建費用だけではなく、大都市地域においてはその構造物の機能の喪失が与える影響を正しく認識しておく必要がある。ある特定の構造物の機能喪失がどのような社会的影響を与えるかについては、まだ、十分な検討が行われていないが、これよりももう少し広く地震による直接被害がどのように間接的な経済被害をもたらすかについては検討されてきた。この結果、間接被害は直接被害よりもはるかに大きい場合があることが明らかにされている。したがって、大都市地域では、構造物そのものの復旧費用や再建費用よりも、その構造物の機能の喪失がどのような影響を社会に与えるかという観点から、構造物の重要性をとらえて行くことが重要であると考えられている。

（3）今後の検討課題

以上に示した点から、前節に示した4つの項目毎に大都市地域における地震防災技術を向上させる上で軟弱地盤上の構造物に対して今後に検討が必要な研究開発項目を示すと以下のようになる。研究項目は、相互に関連しているため内容に重複があるものもある。

1）大規模地震に対する耐震性の確保

① じん性を考慮した構造部材の耐震設計法の開発
- 不静定部材（ラーメン形式の橋脚、及び、ラーメン橋）
- 鋼製橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発
- くい基礎の地震時保有水平耐力の照査法の開発

② じん性を期待しにくい構造部材の耐震設計法の開発
- 偏心曲げモーメントを受ける構造部材
  たとえば、L字形に大きく張り出した橋脚（RC，鋼製）の照査法
- 特殊形式（たとえば、吊橋、斜張橋）の主塔

③ じん性と強度のバランスの検討
- 変位、変形制限の検討

④ 剛体基礎の動的安定照査法
- 動的転倒照査
- 動的滑動照査
- 動的地盤支持力照査

⑤ 構造部材間のじん性・強度と構造全体系の耐震性の向上技術
- 損傷メカニズムの検討

2）軟弱地盤上の構造物の耐震性の確保技術の開発

① 地盤の変形を考慮した基礎構造物の耐震設計法

② 地盤破壊時の基礎構造物の安定照査法

③ 地盤との共振を考慮した耐震設計法

3）新形式の構造物に対する耐震技術の開発

① 不静定次数が低く、じん性が乏しい構造部材によって支持されている構造物

・ 鋼製橋脚

・ 偏心曲げモーメントを受ける構造部材

② じん性が期待できない構造部材によって支持されている構造物

・ 斜張橋、吊橋の主塔

③ 異なった振動特性を有する複数の構造コンポーネントから構成されている構造物

・ 建物と橋の一体整備

4）重要性に応じた耐震性確保水準の評価

① 構造物の機能損傷が都市機能に与える影響の評価法の開発

② 重要性の評価法の開発

③ 現状よりも耐震性を向上されるべき構造物

④ 現状よりも耐震性を低めてもよい構造物

（4）研究開発事項

（3）に示した今後の研究課題の中から、現状の技術水準、研究開発の優先度、5か年間の研究達成度等を総合的に考慮して、本総プロの中で研究開発すべきと考えられる項目を示すと、以下のようになる。

1）じん性を考慮した構造部材の耐震設計法の開発

・ 不静定部材（ラーメン形式の橋脚、及び、ラーメン橋）

・ 鋼製橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発

・ くい基礎の地震時保有水平耐力の照査法の開発

2）じん性を期待しにくい構造部材の耐震設計法の開発

・ 偏心曲げモーメントを受ける構造部材

たとえば、L字形に大きく張り出した橋脚（RC，鋼製）の照査法

・ 特殊形式（たとえば、吊橋、斜張橋）の主塔

3）剛体基礎の動的安定照査法の開発

・ 動的転倒照査

・ 動的滑動照査

・ 動的地盤支持力照査

4）地盤との共振を考慮した耐軟弱地盤上の構造物の震設計法の開発

5）構造物の重要性の評価法の開発

3．4　都市特性を考慮した地震防災対策技術

（1）調査目的

大都市域への人口・社会活動の高度な集積が進むのにともない、地震災害は構造物の被害を中心とする「震害型」から、構造物の被害に起因する二次災害（火災、水害、ライフライン施設の機能損傷等）が複合して発生し、これによる機能障害が都市の内外に波及する「都市型」へと変化している。このような「都市型」震災を防止、軽減するためには、単に個々の構造物の震災対策だけではなく、大都市域における機能損傷の波及プロセスを考慮して都市全体としての防災性を高める震災対策を適切に実施する必要がある。

「都市型」震災における機能損傷の波及プロセスを明らかにし、これを構造化できれば、震災に対して脆弱な都市の構造部分に対する効果的な地震防災投資を行うことが可能になると考えられる。

このため、本調査では、大都市域における震災対策の高度化を図ることを目的として、「都市型」震災の空間的・時系列的な波及構造を明らかにするとともに、震災対策を加えることによる震災の軽減効果の評価方法を開発しようとするものである。

（2）技術の現状

「都市型」震災の大きな特徴は、図－3．4．1に示すように、交通、ライフライン、金融、経済等非常に多種、多様な機能が複雑に相互依存しており、ある特定の被害や機能損傷が次々とまわりに影響を及ぼしていく点である。このため、一見なんでもないような被害が、まわりまわって想像もつかないような被害をもたらす。こうした事象が大量かつ複雑に、また、一度に生じることが「都市型」震災そのものといってもよい。ここに、当該分野の研究は、このような「都市型」震災の複雑多岐な現象をどのような切り口から研究すべきかが定まっていないため、国内外とも非常に少ないのが現状である。しかしながら、１９８９年１０月のロマプリエータ地震を契機に、複雑な都市機能の相互作用及び機能損傷の波及構造にメスを入れていこうという機運が我国でも高まっている。

土木研究所においては、これまでに、地震の影響を広い立場から捉えることを目的として、比較的計量化しやすい経済的影響を産業連関分析手法を用いて評価する方法を開発している[36]。これは、地震による直接被害が波及して間接的な損害をもたらす原因として以下の３つの要因を考え、

1）生産・販売基盤損失による生産性の低下

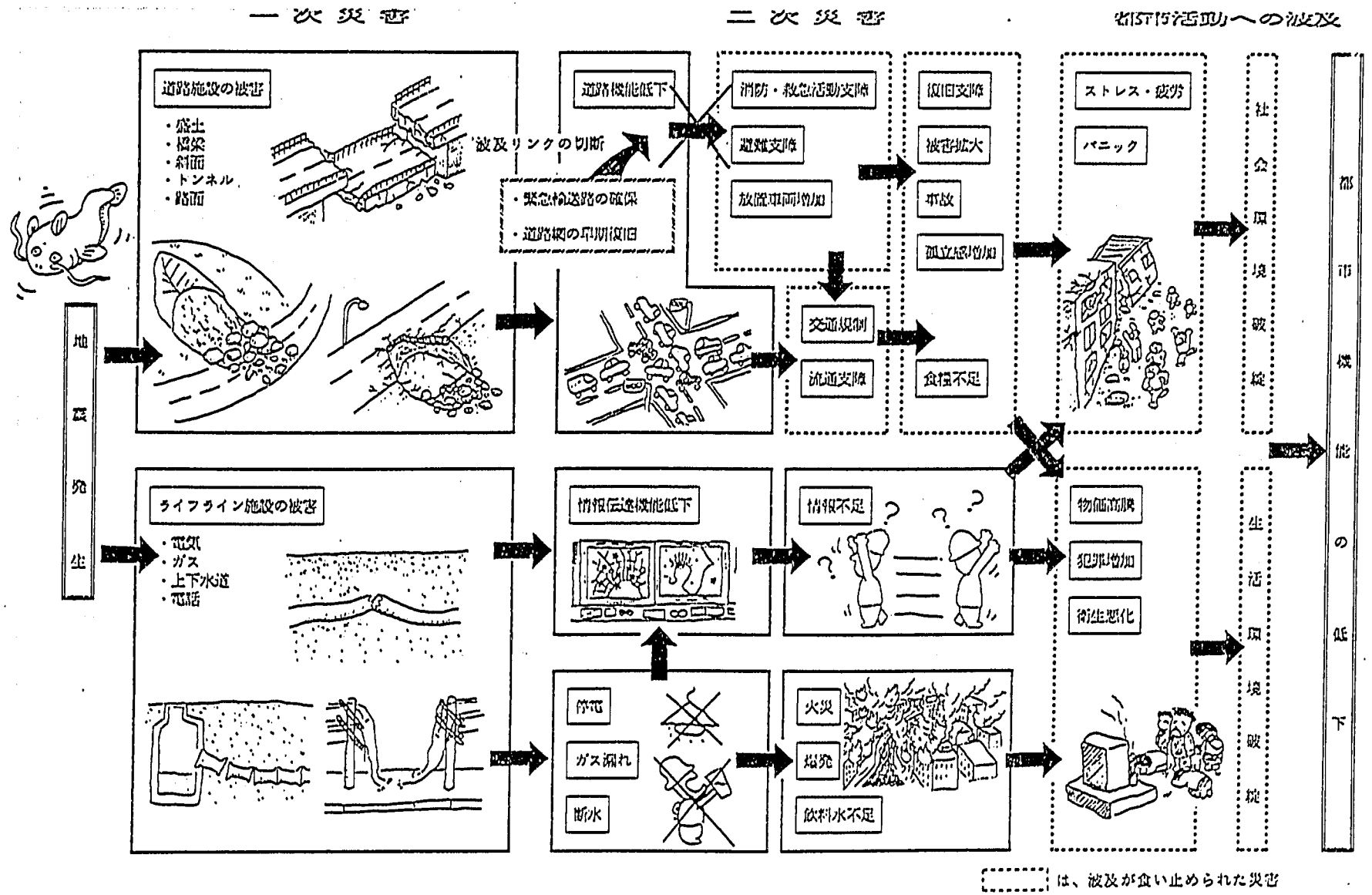
工場、商店、機械、公益施設等の生産・販売基盤が損傷を受けることにより、当該施設における生産・販売が低下する影響。

2）輸送基盤損失による生産性の低下

道路、港湾、鉄道等の損傷により、輸送活動が低下する影響。

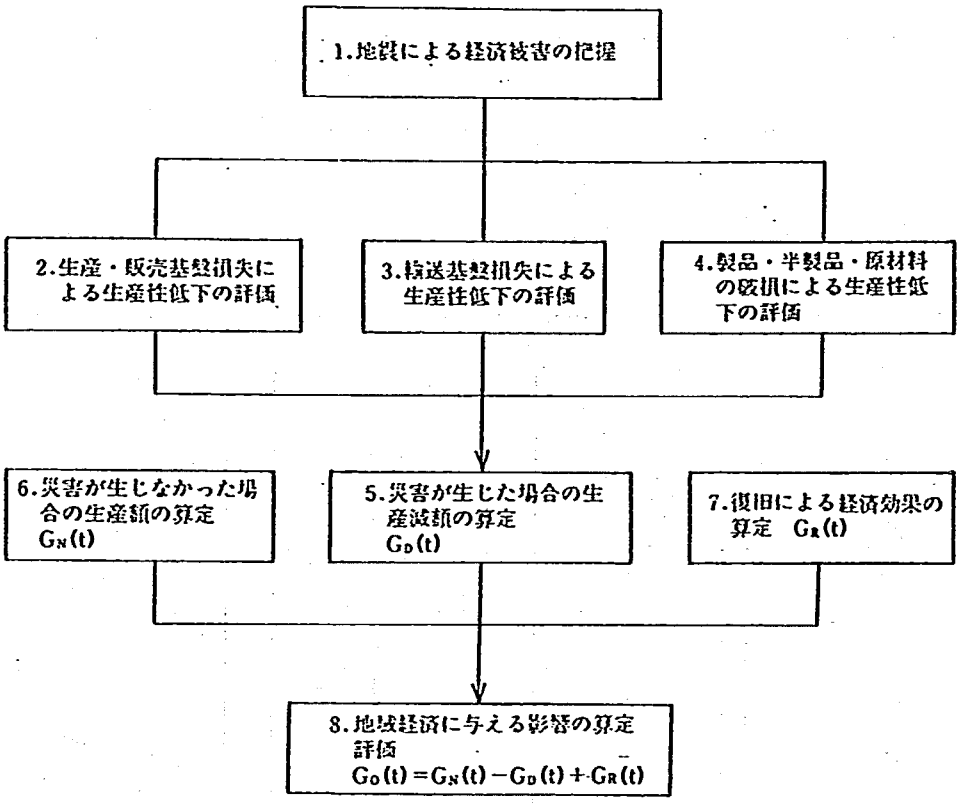
3）製品・半製品・原材料の破損による生産性の低下

製品や半製品、原材料が損傷し、これに生産を依存している産業の生産量、販売量が低下する影響。



図－３．４．１　大都市域における震災の波及

３つの要因に起因する生産性低下を個々に評価し、図－３．４．２に示すフローに従って、式(3.4.1)により間接損害を評価しようとするものである。



図－３．４．２　震災が地域経済に与える影響の評価方法

表－３．４．１　宮城県及び秋田県における生産減少額の比較

単位［億円］

	昭和５３年宮城県沖地震における宮城県の経済被害（情話５３年度価格）	昭和５８年日本海中部地震における秋田県の経済被害（昭和５８年度価格）
直接被害額	２，６８８	１，４８２
間接被害額	４，１６５	３，６２７
間接被害額の直接被害額に対する比率	１．５５	２．４５

$$G_\theta(t) = G_n(t) - G_d(t) + G_r(t) \qquad (3.4.1)$$

ここに、

$G_\theta(t)$：間接損害を評価しようとするクローズされた地域（県程度の大きさ）における地震後の時間 t の生産額

$G_n(t)$：地震が生じなかったとした場合の当該地域における生産額

$G_d(t)$：地震を受けたことによる生産減少額

$G_r(t)$：震災復旧に伴う生産額の増加

開発された手法を用いて、昭和５３年宮城県沖地震における宮城県の生産減少額、及び、昭和５８年日本海中部地震における秋田県の生産減少額を試算した結果を示すと表－３．４．１の通りである。宮城県沖地震による宮城県及び日本海中部地震による秋田県の直接被害額は、それぞれ、２，６８８億円（昭和５３年価格）及び１，４８２億円（昭和５８年価格）と報告されており、これに伴う間接損害は、宮城県では４，１６５億円、秋田県では３，６２７億円と算出される。したがって、地震による直接被害額に比較して間接被害額は、宮城県では１．５５倍、秋田県では２．４５倍ということになり、地震による間接的な影響は、従来把握されてきた直接被害額を大きく上回ることがわかる。これは、公共施設の建設費や復旧費の大小よりも、その公共施設の機能損傷が他の産業に及ぼす影響の方がはるかに重要であることを示すものである。

本検討は、しかしながら、定量的な評価を行いやすい経済的影響のみに着目したものであること、また、地震が間接的な影響をもたらす要因を限定していること等、不完全な点を多く含むものである。大都市域では間接損害が非常に大きくなると考えられるため、複合的な機能損傷の発生メカニズムにさらに踏み込んでいくことが求められている。

（３）研究開発事項

本調査では、「都市型」震災の特徴を踏まえた、大都市域における震災対策技術を開発することを目的として、表－３．４．２に示すフローに従って研究開発を行う。

１）大都市における震災波及構造の評価技術の開発

i）機能損傷の実態に関する検討

１９７８年宮城県沖地震、１９８３年日本海中部地震、１９８９年ロマプリエータ地震等、既往の震災事例をもとに、大都市を構成する各種施設に生じ得る一次災害（直接被害）、及び、一次災害に起因して生じる二次災害（施設被害の拡大）を調査する。さらに、大都市域における基本機能を生活機能、経済機能、情報機能に分類し、それぞれ二次災害に起因して生じ得る生活機能損傷、経済機能損傷、及び、情報機能損傷を抽出する。

ii）機能損傷の動的相互作用に関する検討

大都市域における機能損傷の波及を、ある施設の被害が別の施設に影響する一方向動的相互作用、及び、施設間で相互に影響を及ぼし合う双方向動的相互作用に分類し、 i）で検討した各種機能損傷相互の連関を検討する。

iii) 震災波及構造の評価手法の検討

ＩＳＭ法（Interpretive Structural Modeling）、ＦＳＭ法（Fuzzy Structural Modeling）、ニューラルネットワーク法、及び、ＧＩＳ法（Geographical Information System）等の統計解析手法を基本として、各種施設の直接被害から生活機能損傷、経済機能損傷、情報機能損傷に至る被害の波及構造を評価できる手法を検討する。

２）震災による間接的被害の評価技術の開発

i) 間接的被害の定量的な評価手法の検討

大都市域における生活機能損傷、経済機能損傷、情報機能損傷を、それぞれ定量的に評価するための指標（例えば、被害額、時間増等）を検討する。さらに、各種施設の直接被害を入力として与えた場合に、各種機能損傷を定量的に評価できる手法を開発する。

ii) 震災対策による被害の軽減効果の評価手法の検討

震災対策を施した場合に、機能損傷間の一方向動的相互作用及び双方向動的相互作用を切断することにより軽減される間接的被害の評価手法を開発する。

３）波及構造及び間接的被害を考慮した震災対策手法の開発

１）で検討した震災波及構造及び２）で検討した間接的被害の評価手法に基づいて、大都市域における震災波及を軽減・防止する上で優先的に震災対策を実施すべき都市の構造部分、及び、震災対策による被害の軽減効果が高い都市の構造部分を抽出するとともに、大都市域における合理的な震災対策手法を開発する。

表－３．４．２　研究開発フロー

調査開発項目	4	5	6	7	8	備考
大都市における震災波及構造の評価技術の開発 1)機能損傷の実態に関する検討 2)機能損傷の動的相互作用に関する検討 3)震災波及構造の評価手法の検討						
震災による間接的被害の評価技術の開発 1)間接的被害の定量的な評価手法の検討 2)震災対策による被害の軽減効果の評価手法の検討						
波及構造及び間接的被害を考慮した震災対策手法の開発						

ここで、大都市域における震災波及構造を解析する上で有効と考えられる統計解析手法としては、以下のものがある。

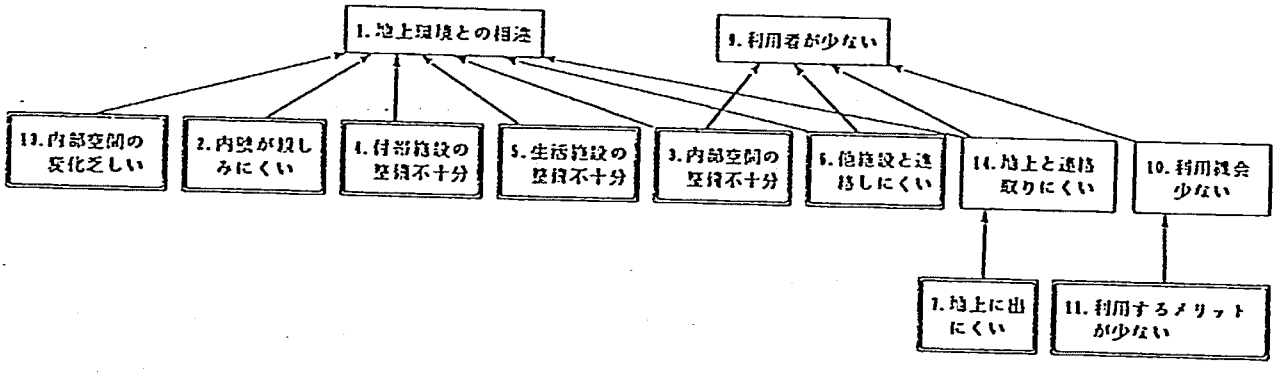
1）ＩＳＭ法（Interpretive Structural Modeling）

大都市域における各種機能損傷相互の因果関係を、構造モデルとして表現するためのシステム分析手法であり、特徴をまとめると以下のようになる。

a)震災により大都市域に生じ得る全ての機能損傷について、一対比較法により、相互の関連度合を０（全く関係がない）または１（密接な関係がある）で評価する。

b)グラフ理論を用いることにより、機能障害相互の因果関係を多階層の有向グラフとして表現する。

ＩＳＭ法によるシステム分析の一例として、大規模な地下道路を建設した場合に、利用者が地震に対して抱く潜在的な不安感を構成する要因を解析した結果を示すと図－３．４．３のようになる。



図－３．４．３　大規模地下道路の利用者が地震に対して抱く不安感の構造をＩＳＭ法により解析した例（特に、地下道路の環境に関する不安要因を示す）[37]

2）ＦＳＭ法（Fuzzy Structural Modeling）

ＩＳＭ法と同様に、各種機能損傷相互の因果関係を構造モデルとして表現するためのシステム分析手法であり、特徴をまとめると以下のようになる。

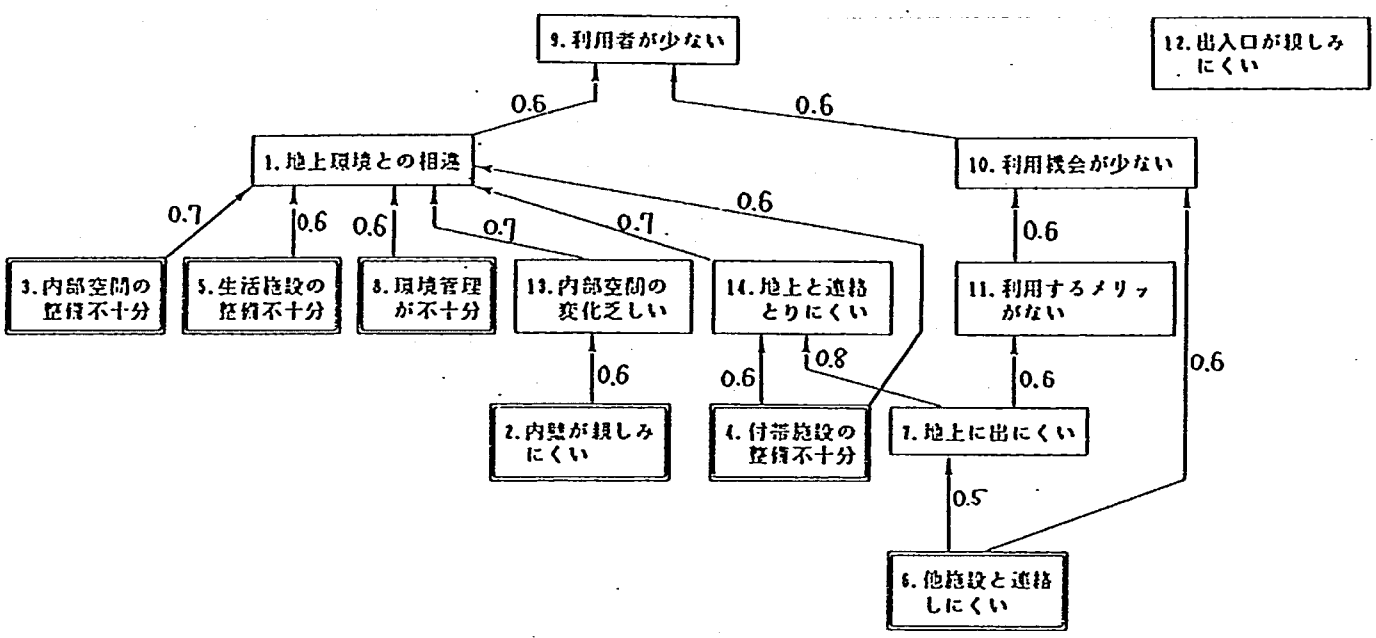
a)機能損傷相互の関連度合にファジィ理論を導入し、相互関係を０（全く関係がない）から１（密接な関係がある）の連続した数値で評価する。

b)グラフ理論及びファジィ代数を用いることにより、機能障害相互の因果関係を多階層の有向グラフとして表現する。

c)ＩＳＭ法に比べて柔軟性を持った構造モデルが同定でき、有向グラフには機能障害間の影響の程度を表現することができる。

ＦＳＭ法によるシステム分析の一例として、大規模な地下道路を建設した場合に、利用者が地

震に対して抱く潜在的な不安感を構成する要因を解析した結果を示すと図－３．４．４のようになる。



図－３．４．４　大規模地下道路の利用者が地震に対して抱く不安感の構造をＦＳＭ法により解析した例（特に、地下道路の環境に関する不安要因を示す）[37]

３）ＦＴＡ法（Fault Tree Analysis）、ＥＴＡ法（Event Tree Analysis）

ある一つの機能損傷に着目して、この機能損傷に起因して生じる損傷（ＦＴＡ法）、あるいは、この機能損傷をもたらす損傷（ＥＴＡ法）を、段階的に抽出するためのシステム分析手法である。ＩＳＭ法やＦＳＭ法のように大都市域における機能損傷の関連を網羅的に捉えることはできないが、個々の現象をより詳しく検討するのに適している。

一例として、火災の発生を原因とする被害拡大のプロセスをＦＴＡ法により解析した結果、及び、交通機能の麻痺をもたらす原因をＥＴＡ法により解析した結果を、それぞれ図－３．４．５及び図－３．４．６に示す。

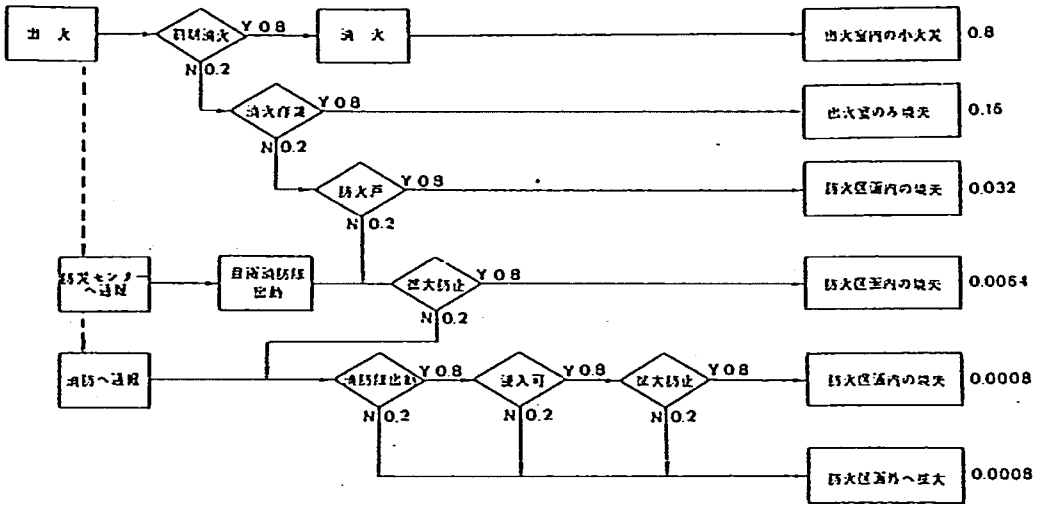
４）ニューラルネットワーク法

大都市域における震災状況を各種機能損傷から構成されるネットワークとして表現し、施設の直接被害（一次災害）に応じて現出する震災状況のパターンを、ネットワークメカニズムによる高度並列分散型情報処理を用いて解析する手法であり、特徴をまとめると以下のようになる。

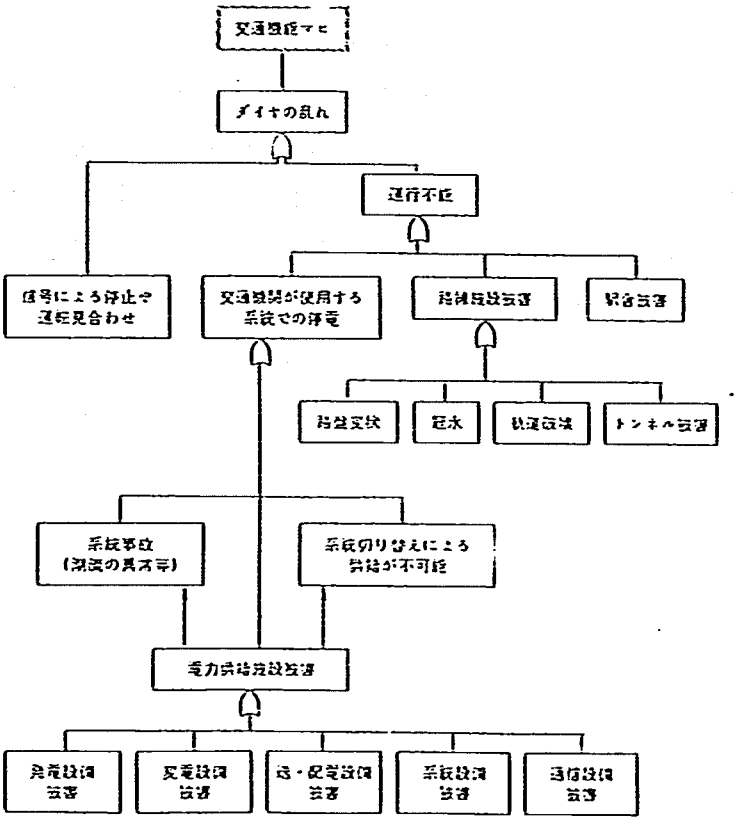
a)震災状況を相互結合ネットワークで表現することにより、一次災害から二次災害及び機能損傷といった一方向のみの波及ではなく、機能損傷から一次災害及び施設被害へのフィードバック等を考慮することができる。

b)簡単な機能損傷の波及パターンを学習させることにより、複雑な波及構造をシミュレートすることが可能となる。

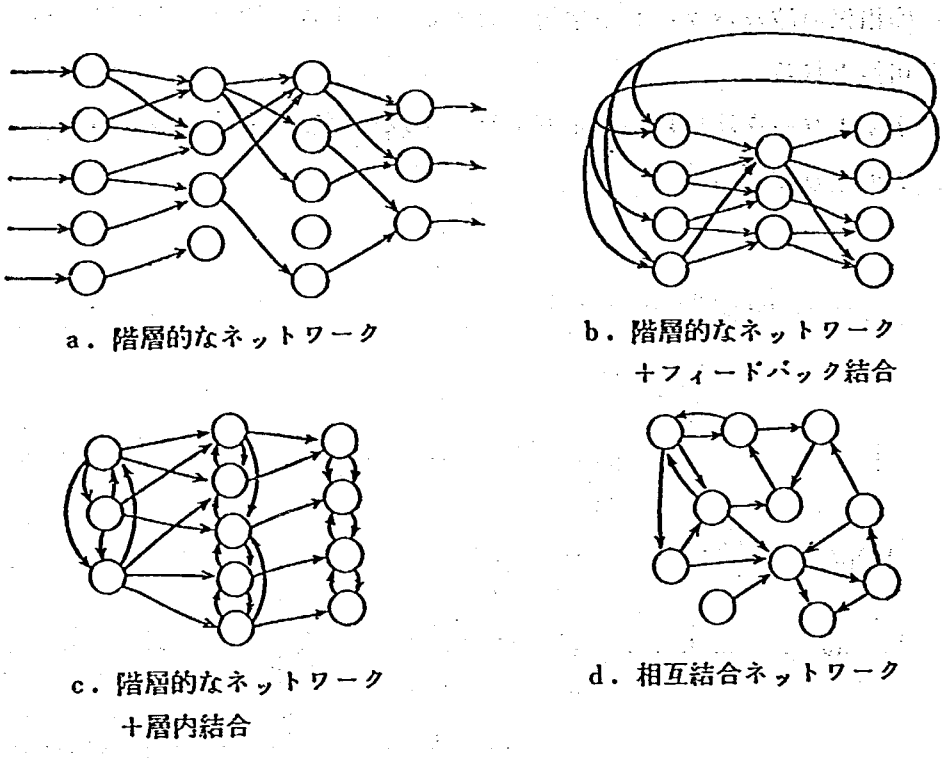
ニューラルネットワーク法に用いるネットワーク及び高度並列分散型情報処理の流れを示すと図－３．４．７の通りである。



図－３．４．５　火災の発生を原因とする被害拡大のプロセスをＦＴＡ法により解析した例[38)]



図－３．４．６　交通機能の麻痺をもたらす原因をＥＴＡ法により解析した例[38)]

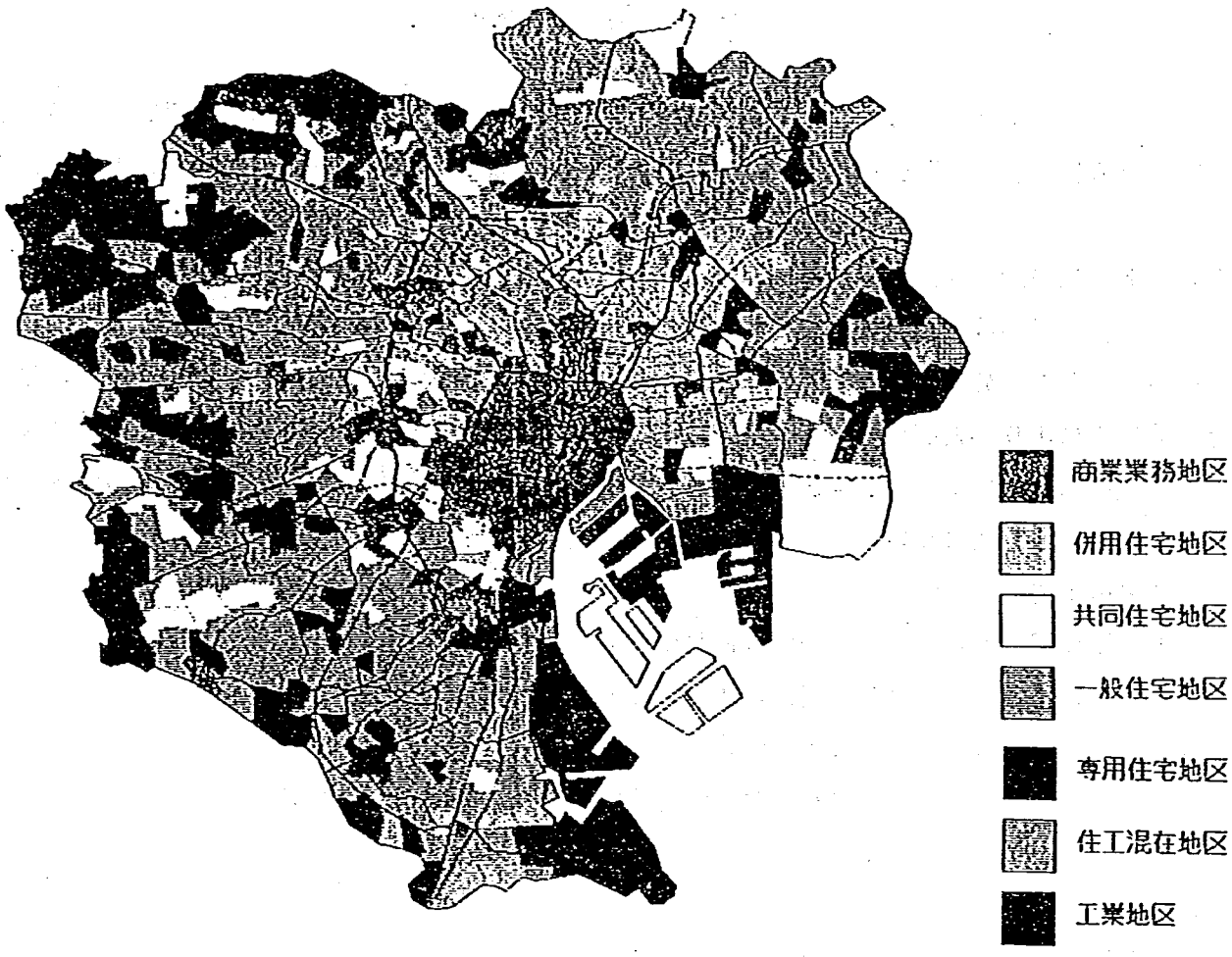


図－３．４．７　ニューラルネットワーク法に用いるネットワーク及び情報処理の流れ[39]

５）ＧＩＳ法（Geographical Information System）

道路網、建物分布、人口分布、危険物分布など地域特性に係わる情報をデータベースとして整備しておくことにより、ワークステーション等を用いて、機能損傷の波及過程を視覚的・定量的にシミュレートするための手法である。大都市域における特定地区を対象として、地震被害想定やシナリオ型被害予測など、震災による影響をかなり定量的に把握するのに適している。

ＧＩＳ法を利用したシステム分析の一例として、首都圏の用途別地域区分、及び、火災による延焼拡大予測図を示すと、それぞれ図－３．４．８及び図－３．４．９の通りである。



図－３．４．８　首都圏の用途別地域区分[48]

図－３．４．９　火災による延焼拡大予測図[48]

4. まとめ

本調査の結果によれば、今後、大都市地域における地震防災技術の開発に必要な研究・開発課題について、その目的、研究開発テーマ及び具体的な成果は当面、以下のように整理することができる。

1）軟弱地盤の耐震性評価技術の開発

－軟弱地盤の地震動特性の把握－

地盤の軟弱な部分及び地盤条件の変化部において地震動が大きく増幅されるが、ここでは強震記録の分析等により、大都市地域での軟弱地盤における地震動の伝播特性並びに1次元及び2次元的増幅特性を明らかにするとともに、大都市地域における地震防災対策を講ずる際に考慮すべき設計入力地震動の設定法について検討する。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（1）既往記録の収集及び軟弱地盤における地震観測

（2）超軟弱地盤における地震動の増幅特性の評価技術の開発

（3）地盤条件の変化部における地震動増幅特性の評価技術の開発

（4）地盤の動的特性に基づく地盤条件（地盤種別）の分類手法の開発

である。

具体的成果としては、

①軟弱地盤における地盤種別分類法

②構造物特性を考慮した設計用入力地震動の設定法

③地盤条件の変化部における設計用入力地震動の設定法

等があげられる。

－軟弱地盤の評価技術・ゾーニング技術の開発－

軟弱地盤における地震動の増幅特性や構造物被害の発生程度が、軟弱地盤の土質及び土層構成の分布特性により大きく異なるため、ここでは原位置での地盤耐震性の計測・評価法、入手可能な限られた地盤情報から局所的土質分布特性を加味した軟弱地盤の空間的な分布特性の評価法、さらに軟弱地盤の耐震性の合理的な設定法、液状化被害の評価を明らかにするとともに、軟弱地盤の地震動の増幅特性及び地盤変状などの地盤震害に対する耐震性を総合的に評価するためのゾーニング法の研究調査・分析を行い、地震危険度評価の尺度、方法について解明する。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（1）軟弱地盤の原位置評価技術の開発

（2）軟弱地盤の局所的土質分布特性の評価技術の開発

（3）軟弱地盤の耐震性の評価技術、液状化被害の評価技術の開発

（4）地盤の耐震性のゾーニング技術の開発

である。

具体的成果としては、

①軟弱地盤の土質構造の原位置簡易計測法

②軟弱地盤の局所的土質分布特性評価マニュアル

③軟弱粘性土及び締め固めた砂質土の動的強度の評価法

④地盤の震害危険度のゾーニング法

等があげられる。

2）軟弱地盤の震害対策技術の開発

－土木構造物のための地盤震害対策技術の開発－

軟弱地盤に構築される構造物の耐震対策のために、地盤及び構造物の変状形態、震害特性を考慮した合理的な震害評価技術の開発を行う。また、震害対策技術として構造補強や地盤改良による対策工法の設計法の開発を行う。さらに、対策規模の設定法、対策効果の評価指標の分類、計測法・試験法の開発を行うことにより、総合的な軟弱地盤の震害対策工法の評価技術の開発を行う。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（1）地盤震害の評価技術の開発

（2）構造補強による地盤震害防止技術の開発

（3）既設構造物に対する耐震地盤改良工法の開発

（4）新設地盤・構造物に対する耐震地盤改良工法の開発

である。

具体的成果としては、

①地盤震害に対する構造物の耐震性評価法

②構造補強による地盤震害対策工法

③既設構造物に対する耐震地盤改良工法

④新設地盤・構造物に対する耐震地盤改良工法

⑤各種対策工法の適用条件、設計法と評価項目の統一マニュアル

等があげられる。

3）軟弱地盤における構造物の耐震設計技術の開発

－土木構造物の耐震設計技術の開発－

軟弱地盤に建設される新形式の構造物の耐震設計技術の開発を行う。新形式の構造物としては、橋と建物の一体整備に代表される新しいタイプの構造物や異なった振動特性を持つ構造物が複合化した構造物の耐震計算法を開発する。また、地盤との動的相互作用を考慮した基礎構造物の耐震照査技術を開発する。さらに、非線形域の損傷程度を基本として、構造物に許容できる損傷と構造物の重要性の関係を明らかにする。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（1）新形式の構造物の耐震計算法の開発

（2）剛体基礎の動的安定照査法の開発

（3）くい基礎の動的安定照査法の開発

（4）重要性に応じた耐震性確保水準の評価法の開発

である。

具体的成果としては、

①複合構造物の耐震計算法

②剛体基礎の滑動，ロッキング，支持力に関する動的安定照査法

③くい基礎の動的安定照査法

④構造物の重要性に応じた耐震性評価法

等があげられる。

4）都市特性を考慮した地震防災対策技術の開発

－震災の波及構造を考慮した地震防災対策技術の開発－

大都市圏の震災の特徴は、被災に伴う施設の機能損傷が相互に影響し合い、このため従来の震災経験から予想しがたい影響を受ける可能性を有することにある。このため、大都市域における各種施設の地震被害が、他の施設の被害や住民生活，復旧活動等に与える波及構造を明らかにし、震災対策の高度化を図る。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（1）大都市における震災波及構造の評価技術の開発

（2）震災による間接的被害の評価技術の開発

（3）波及構造及び間接被害を考慮した震災対策手法の開発

である。

具体的成果としては、

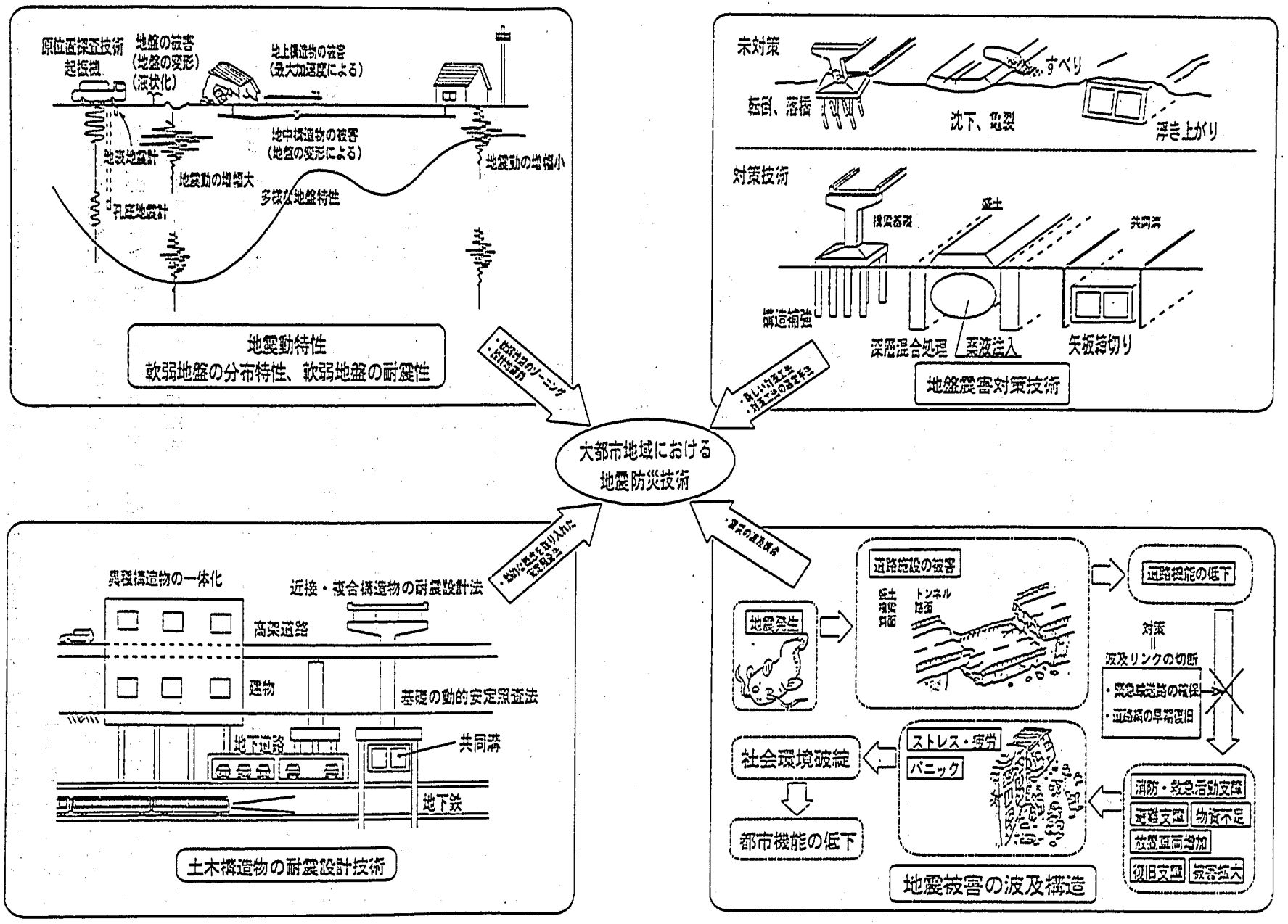
①大都市における震災波及構造の評価法

②間接的被害の評価法

③震災対策による震災の軽減効果の評価法

等があげられる。

なお、本研究開発の概念は図－4．1のように例示することができる。



図－４．１　大都市地域における地震防災技術の開発イメージ図

参考文献

1）岩崎敏男他：米国ロマ・プリータ地震調査速報、土木技術資料，第３２巻，第２号，平成２年２月

2）Lew,H.S.編：Performance of Structures During the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989, NIST Special Publication 778,National Institute of Standards and Technology, United States Department of Commerce,1990年1月

3）土木学会編：動的解析と耐震設計，第２巻　動的解析の方法，技報堂出版，平成元年７月

4）山崎文雄：軟弱地盤はよく揺れるか揺れないか，土木学会第４５回年次学術講演会，第Ｉ部門，平成２年

5）建設省土木研究所：湾岸埋立て地における地震動の増幅特性に関する解析的検討，土木研究所資料第3084号，平成４年２月

6）日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ｖ耐震設計編，平成２年２月

7）田村敬一：ロマ・プリエータ地震によるサイプレス通りの地震動特性　土木技術資料，第３３巻，第７号，平成３年７月

8）遠藤邦彦(1986)：関東平野の完新統、（３）荒川・中川および東京低地，日本の地質，３，「関東地方」，pp194-196

9）堀口万吉・清水康守(1986)：関東平野の完新統、（１）関東平野の完新統の概要，日本の地質，３，「関東地方」，pp191-193

10）角田史雄・海野芳聖・坂本久美子(1981)：沖積層の層厚変化と地盤の強震動との関係について，埼玉大学教養部紀要，vol.17，pp209-238

11）相原輝雄(1990)：埼玉県南東部における沖積層と関東地震による家屋被害－旧出羽村付近の埋没地形と家屋被害－，地質調査所月報，vol.41，pp455-468

12）稲崎富士・長沢政和・阿部昌彦(1990)：沖洪積層を対象とした物理探査（その２）－ＶＳＰ法の開発とその浅部地盤評価への適用，土木研究所資料，第２８６３号，p52

13）石村賢二・中山俊雄・笹岡弘浩・石井求(1991)：地盤情報システムの現状と課題，東京都土木技術研究所年報，１９９１年度，pp241-248

14）稲崎富士(1983)：Ｓ波を利用した浅層反射法探査の実験的考察，土木技術資料，vol.25，pp61-66

15）稲崎富士・神保悟・阿部昌彦・長沢政和(1989)：沖洪積層を対象とした物理探査（その１）－土木研究所地質野外実験場における総合的調査，土木研究所資料，第２７５９号，p61

16）土家輝光・稲崎富士(1989)：ＶＳＰデータによるＱ値解析，物理探査学会第８１回学術講演会講演論文集，pp118-123

17）Inazaki,T(1990)：High-resolution shallow seismic reflection surveys using SH-waves, Proc. 6th Intl Congress IAEG, vol.1 pp953-958

18) 神奈川県：神奈川県地震被害想定調査報告書（地質地盤），昭和60年
19) 千葉県：千葉県大規模地震被害想定調査（第１次調査），昭和57年
20) 静岡県地震対策課：静岡県東海地震対策土地条件図録集，昭和59年
21) 東京都土木技術研究所：東京都総合地盤図Ⅰ　東京都地質図集３，昭和52年
22) 神奈川県：神奈川県地盤地質図，昭和46年
23) 日本道路協会：道路土工　―― 軟弱地盤対策工指針、昭和61年
24) 日本道路協会：道路土工　―― のり面工・斜面安定工指針、昭和61年
25) 日本道路協会：共同溝設計指針、昭和61年
26) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震前対策編）、昭和63年
27) 藤井弘造他：既設共同溝に対する鋼矢板締切による液状化対策工法の設計法，第２１回地震工学研究発表会，平成３年
28) 例えば、田中弘三：日高自動車道における液状化対策工法について　第１９回日本道路会議論文集　1991年
29) 日本科学技術協会：地中埋設管の液状化による被害の実態とその対策、佐武正雄他編、昭和63年
30) 土質工学会・地盤の液状化防止策に関する研究委員会：地盤の液状化対策に関するシンポジウム、平成３年
31) 東京都港湾局：東京港埋立て地における液状化対策手引書、平成元年
32) Committee on Placement and Improvement of Soils of GTED of ASCE : Soil Improvement-History, Capabilities, and Outlook, ASCE, 1978.
33) Univ. of Texas and NBS : Research Needs and Priorities for Geotechnical Earthquake Engineering Applications, Ed. by Lee, K.L. et al, prepared for NSF, 1978.
34) Ledbetter, R.H. : Improvement of Liquefiable Foundation Conditions Beneath Existing Structures, Technical Report REMR-GT-2, prepared for Dept. of Army, US Army Corps of Engineers, 1985.
35) NSF Workshop on Soil Improvement and Foundation Remediation with Emphasis on Seismic Hazards, held at Univ. of Washington, 1991.
36) 川島一彦、杉田秀樹、加納尚史：地震による間接的な経済被害に関する研究、土木研究所報告、第186号、平成3年12月
37) 川島一彦、杉田秀樹、加納尚史：震災対策が大規模地下道路利用者の不安感に与える影響、土木研究所所報、作成中
38) 能島暢呂、亀田弘行、岩井哲、北原昭男：都市震害のシステム分析モデルに関する基礎的研究、京都大学防災研究所、都市耐震センター研究報告、昭和63年4月
39) 麻生英樹：ニューラルネットワーク情報処理、産業図書、昭和63年6月
40) 損害保険料算定会：地域特性を考慮した地震被害想定に関する研究、地震保険調査研究、平成3年10月

巻 末 資 料

1．研究会開催経過

2．提出資料リスト

3．討議要旨及び議事録

4．参考資料等

１．研究会開催経過

１．研究会開催経過

第１回研究会

日　時：平成３年　７月２９日（月）　１３：１０～１５：００

場　所：地震防災部輪講室

出席者：佐々木，水谷，稲崎，古賀，古関，鷲田，川島，常田，田村，松本

議　題：調査方針、スケジュール等

第２回研究会

日　時：平成３年　９　月９日（月）　９：３０～１２：１５

場　所：６２８会議室

出席者：佐々木，水谷，稲崎，古賀，鷲田，常田，田村，松本

議　題：技術の現状と課題（地質研究室、振動研究室）

第３回研究会

日　時：平成３年１０月１４日（月）　９：３０～１２：００

場　所：地震防災部輪講室

出席者：佐々木，水谷，稲崎，古賀，鷲田，川島，常田，田村，松本

議　題：技術の現状と課題（動土質研究室、耐震研究室）

第４回研究会

日　時：平成３年１１月１１日（月）　９：３０～１２：００

場　所：５３１会議室

出席者：佐々木，水谷，稲崎，鷲田，川島，常田，田村，松本

議　題：技術の現状と課題（地質研究室、振動研究室）

第５回研究会

日　時：平成３年１２月　９日（月）　９：３０～１２：００

場　所：６２７会議室

出席者：佐々木，稲崎，古賀，鷲田，常田，田村，川島

議　題：技術の現状と課題（動土質研究室、耐震研究室）

２．提出資料リスト

2．提出資料リスト

資料１－１　技調よりの参考資料（委託費の要求内容について）
資料１－２　概算要求資料（様式－Ａ，Ｂ）
資料１－３　既往の耐震地図の内容と課題（振動研究室）
資料１－４　概算要求資料の修正日程について

資料２－１　各種説明書　（８月１９日付け）
資料２－２　参考資料　　（８月２０日付け）
資料２－３　追加説明資料（９月　４日付け）
資料２－４　第１回勉強会議事録（案）
資料２－５　既往の耐震地図の内容と課題　　（振動研究室）
資料２－６　軟弱地盤の分布・構造とその評価（地質研究室）
資料２－７　勉強会提出予定課題　　（動土質研究室）

資料３－１　第２回勉強会議事録（案）
資料３－２　耐震地盤改良工法の現状と課題（動土質研究室）
・土質工学会，地盤の液状化防止策に関する研究委員会：液状化対策工法一覧表
・東京都港湾局：東京湾埋立地における液状化対策　手引書
・ASCE：Soil Improvement
・RESEARCH NEEDS AND PRIORITIES FOR GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING APPLICATIONS, 1978
・WES：IMPROVEMENT OG LIQUEFIABLE FOUNDATION CONDITIONS BENEATH EXISTING STRUCTURES
資料３－３　大都市における地震防災技術の開発（耐震研究室）
資料３－４　Ｖ耐震設計編（耐震研究室）
・川島一彦：Ｖ耐震設計編，橋梁と基礎，VOL.90，No.5，PP.15-21，1990
資料３－５　鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査（耐震研究室）
・川島一彦：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査，基礎工，PP.36-47，1990.6
資料３－６　地震に対する剛体基礎の回転振動の解析（耐震研究室）
・川島一彦，運上茂樹：地震に対する剛体基礎の回転振動の解析，土木技

術資料，VOL.32，No.10，PP.60-66，1990.10

資料３－７　基礎地盤の変形と軟化を考慮した剛体基礎の動的な転倒解析法（耐震研究室）

・川島一彦，運上茂樹：基礎地盤の変形と軟化を考慮した剛体基礎の動的な転倒解析法，土木技術資料，VOL.33，No.3，PP.54-59，1991.3

資料４－１　第３回勉強会議事録（案）

資料４－２　軟弱地盤の地震動特性について（振動研究室）

資料４－３　ロマプリエータ地震によるサイプレス通りの地震動特性（振動研究室）

・田村敬一：ロマプリエータ地震によるサイプレス通りの地震動特性，土木技術資料，VOL.33，No.7，PP.51-55，1991.7

資料４－４　震災復旧のための情報支援システムの開発（振動研究室）

・佐々木康，常田賢一，松本秀應，宮川朝一，野口正：震災復旧のための情報支援システムの開発　－情報のビジュアル化－，土木技術資料，VOL.33，No.1，PP.50-55，1991.1

資料４－５　軟弱地盤の耐震性評価技術研究の課題（地質研究室）

資料４－６　報告書の取りまとめ方針について（案）（地下開発官）

資料５－１　第４回勉強会議事録（案）

資料５－２　軟弱地盤の震害対策技術（動土質研究室）

・古関潤一，古賀泰之：液状化地盤の地震時土圧に関する模型振動実験，土木学会第46回年次学術講演会，PP.224-225，1990.9

資料５－３　都市特性を考慮した地震防災技術の開発（耐震研究室）

・川島一彦，杉田秀樹，加納尚史：地下道路の地震時不安感を解消するための方策，土木学会第46回年次学術講演会，PP.1176-1177，1990.9

・新納格，堀田浩，栗林栄一：地震災害危険度評価及び震災復旧手順決定へのニューラルネットワークモデルの適用，JCOSSAR'91論文集，PP.562-566

・川島一彦，杉田秀樹，加納尚史：地震による間接的な経済被害に関する研究，土木研究所報告，第186号-1，1991.12

・東海銀行：南関東地域地震と日本経済，調査月報，No.498，PP.24-26，1989.1

資料５－４　報告書の取りまとめ方針について（案）

3．討議要旨及び議事録

3．討議要旨及び議事録

第１回研究会

［討議要旨］

＜概算要求資料について＞

・様式－Ａには総合計欄を設ける。

・様式－Ｂ（要求様式－３）には項目別に担当研究室を明記する。

＜軟弱地盤の耐震性評価技術の開発について＞

・地質研の成果が、本総プロの他の課題とどう関連するのか明らかにして欲しい。

・地質学的なノウハウに関する検討はどうなったのか。

・地盤の耐震性のゾーニングについては５年度からとりかかる。

＜軟弱地盤の震害対策技術の開発について＞

・「地盤震害］，「震害モード」等の用語は、素人にも内容がわかるような用語に改める。

・注入試験は空間分布の把握であり、注入中の時系列的な検討ではない。

・砂質土に対する注入事例も既にいくつかあるはずだ。

・実務上は、注入処理地盤の設計法，注入処理の効果確認法の開発が必要であり、検討項目と設計へのつながりに配慮が必要。

・実務上はバラツキの多い状況から、どう注入効果を確認，設計するのかが欲しい。

＜軟弱地盤における構造物の耐震設計技術の開発について＞

・杭基礎を倒立させ杭への載荷実験を行い、杭とフーチングの接合部，固定条件の影響を検討する。

・地盤との動的相互作用や地盤のバネについては、本総プロではやりきれない大きな問題であり、ここでは扱わない。

＜全体について＞

・実験等の業務委託の内容の説明図やメモを作成する。

・総プロとして産官学として動いていることがわかるように委託費を本省は設けたい。

・予算額の減少に対する対応が研究室間で異なるが、Ⅲの小課題を４本残しておくのは労力のロスではないか。

＜研究会の活動方針＞

・９月より原則第２月曜日の９：３０より２時間程度の時間で研究会を開催していく。

・１回の研究会では２研究室が話題提供の担当となり、以下のように予定が確認された。

９月　９日：振動，地質

１０月１４日：耐震，動土質

１１月１１日：振動，地質

１２月　９日：耐震，動土質

＜既往の耐震地図の内容と課題について＞

・ゾーニング，耐震地図が広く利用されない理由がどこにあるのかを明らかにしておくことにより、本総プロの課題と関連する問題が明らかにされよう。

第２回研究会

［討議要旨］

＜各種説明書について＞

・謝金（講演対象者）には、地震防災部会の委員も含め見直しを行う。各自、追加すべき人物の推薦をＡまでお願いしたい。

＜今後の状況について＞

・「地震による地盤災害とその防除方策」に関するW/Sの状況を、Ｅ室長より次回紹介して頂きたい。

・「国際ゾーニング会議」の際のステイト・オブ・ジ・アーツについてＧよりコピーを各研究室へ配布する。

・「国際地震サミット」が開かれるが、関連情報が出てくれば紹介してほしい。

＜既往の耐震地図の内容と課題について＞

・日本の各自治体がどんな耐震地図のシステムを持っているか整理してほしい。

・総プロでは処理技術までで、日本中の耐震地図を作成することは行政的な課題である。

・構造物の被害推定手法については、後５ヶ年でまとめあげられるのか？研究スケジュールの検討、どうアプローチするのかが重要な問題である。

・現時点の耐震地図の研究・実務の状況に関して、所要の精度等について整理し、次々回研究会で紹介する。

・建設省と国土庁の共同研究で、ゾーニング技術を調査しようとする動きが有るが、その内容について把握する。

＜軟弱地盤の分布・構造とその評価について＞

・今回は現状の紹介であり、今後どう実務にいかしていくのか、ニーズの把握等の課題に展開していくことが必要である。

・次々回、地盤の３次元的な評価手法について紹介してほしい。

・Ⅱ２の調査法以外の方法についてもレビューが必要である。個別に各調査法の調査分解能、適用限界、コストや長・短所をレビューしておいてほしい。

・適用限界や特性の評価（土質分類や粒土分布の推定まで）含めて比較してほしい。

・コンピュータにデータベース化する内容についても検討が必要。データベースを使う立場から必要な情報が網羅されているか。

＜勉強会提出予定課題について＞

・動土質として本総プロで取り組む課題内容も合わせて説明して欲しい。

・電力やガスについても入手できる範囲で紹介してほしい。

＜その他＞

・次回勉強会は１０月１４日　９：３０～
・話題提供担当は耐震研究室，動土質研究室

［議事録］

Ａ：建設省の地震防災部会のメンバー等が含まれていない。１２月の資料作成までに手を入れてゆきたい。リストアップしておきたいメンバーがいれば連絡してほしい。

Ａ：8/19～21にワシントン州シアトルにおいて国内技術者を集めた「地震による地盤災害とその防除方策」に関するW/Sが開催された。次回にでも紹介して頂きたい。

8/26～29にスタンホード大学、国際ゾーニング会議が開催された。ステイト・オブ・ジ・アーツについてコピーを作成し各研究室へ配布してほしい。

10/8～9東京都が事務局となり「国際地震サミット」が開かれる。関連情報が出てくれば紹介してほしい。

Ｂ：コンピュータを使う方面の動きは

Ｂ：自治体が主に耐震地図を作ることになろう。

長野県　６１～６２年　７０００本程度　コンピュータを使ってリアルタイム処理を実施。震源モデルの想定に問題があるかも知れないが表示をできるシステムはできあがっている。福井県もやっているのではないか。神奈川県では、温泉地学研究所が主体となって、やはりコンピュータ化を進めている。

Ｂ：日本の各自治体がどんな耐震地図のシステムを持っているか整理してほしい。

Ｃ：道路防災で震災点検関連で調べたことがある。地図作成方法（メッシュ、エリア）も異なり、液状化の判定分類方法もまちまちである。

Ｃ：自治体ではボーリングデータの収録は実施できるが、その後の震度や液状化の予測方法といった処理プロセスについての検討までは実施できていない。

Ｃ：本総プロでは、この処理プロセスの開発・改良が必要である。例えば面的な液状化判定方法や被害程度の推定方法等。

Ｄ：総プロでは処理技術までで、日本中の耐震地図を作成することは行政的な課題である。

Ｂ：構造物の被害推定手法については、後５ヶ年でまとめあげられるのか？研究スケジュールの検討、どうアプローチするのかが重要な問題である。

Ｄ：加速度が良い指標でないことの事例として発破振動では、人は加速度、構造物は速度との相関が高かった。構造物によって振動の影響の受け方が異なるのは当然であろう。

B：現状の地盤データベースは点としての情報の管理であり、面的，地質的構造の評価とはなっていない。

C：耐震地図の使われ方については、今の地盤情報の密度ではマクロ的評価しかできず、各地図の使用限界、適用限界を明らかにする必要がある。「耐震地図は万能ではない」ことを確認する。

D：メッシュを小さくすることを要求するのか？行政的、技術的に実現できるメッシュやボーリング密度がおのずと決まってこよう。どの程度の「密度」のイメージを持っているのか？　線状の長い構造物、大規模構造物になると十分耐震性の検討をしているだろうから、このよな物にひっかからない構造物を対象としてやる必要があろう。

地盤情報を無限に入手できるわけではないので、地質研の補間の技術が重要となってくる。

D：現時点の耐震地図のメッシュ割の状況で、その推定精度がどうだったか次回勉強会で紹介する。どういう使い方をするから○○のメッシュが必要か。

E：即時耐震地図の即時とは？

F：地震直後に各地の震度や被害想定が行えることである。

B：震源モデルの改良や、地盤情報の密度の補足に対する耐震地図の再作成が即時に可能なことである。

E：地震直後に耐震地図の作成を利用するような事があるのか？十分な精度が有れば利用のメリットも生まれるのか？

D：耐震地図を作成する場合、地震を想定する作業そのものが十分解明できていなかろう。震源の想定の際にも、規模と震源位置にも確率的な分布を含めて各地の被害想定を検討すべきだ。

「即時」についてはBさんの言った様な使い方が主で、おまけとして地震直後の利用があるのだろう。地震前に種々の地震を想定し各地の耐震性を評価、検討しておくことが第一である。直下型の小中規模地震への評価も可能となろう。

C：直下型地震となると震源や地震動の増幅特性、地盤の耐震性の評価技術そのものの見直しも必要である。

E：資料１－３は本総プロのどことかかわるのか

F：①は地質研、②は地震動、③はゾーニングの課題と関連する。

E：ゾーニング技術を統一しようとする動きが有るということを聞いたような気がする。国土庁かな？

B：面的なゾーニングの必要性が取り出された過程は？

C：構造物の形態から線、面的評価が必要である。また、増幅特性や流動を確認するには面的評価が必要。

A：地質研として埋没谷の影響が有ることが明らかとなったのなら、それをどう本総プロに結びつけていくのか。

B：振動研の方に、不整形地盤での地震動特性の検討を進めていただきたい。

A：埋没谷の影響をどうゾーニングに取り込むのか？

B：今解答を持っていない。

A：今回は現状の紹介であり、今後どうゾーニングにいかしていくのか、課題に展開していくのかが宿題である。また、説明図は２次元の図ばかりで３次元となっていないが？

B：３次元的な調査法はまだ研究段階である。ボーリングは点であり整理も２次元止まりであり、熟練者のノウハウが３次元的な解釈に必要となる。

A：３次元的評価はなぜ今までできなかった、していないのか。

B：資源深査の分野では種々の断面をとって評価を行う３次元的な評価をしている。しかし地質の分野ではペイしきれない。

A：次回にその３次元的な評価手法について紹介してほしい。

E：Ⅱ２の調査法以外の方法についてもレビューが必要である。Bさんの実施したデータは貴重であろうが、その他の調査法も含めて分献としてまとまったものはないか。個別に各調査法の調査分解能、適用限界、コストや長・短所をレビューしておいてほしい。

C：適用限界や特性の評価（土質分類や粒土分布の推定まで）含めて比較してほしい。

D：コンピュータにデータベース化する内容についても検討が必要。データベースを使う立場から必要な情報が網羅されているのか？液状化判定に必要となるデータを地質研に伝え、それらを調査する方法を地質研より説明して欲しい。

A：地質学的常識から埋没谷には砂があるのか？整理を行う上での縮尺はいかほどが最適か？

C：埋没谷の規模や地形的スケールを教えて欲しい。振動研よりどの程度の地形的規模から地震動に影響が生じるのか境界を示してほしい。

B：谷壁の傾斜の影響についても示して欲しい。その場所で、どんな波がでるか分からない。

G：どんな波が生じるかまでは検討していない。

D：埋没谷のスケールから地震動の評価に考慮すべき規模を明らかにしてもえれば、ゾーニング時に考慮すべき規模が分かろう。

A：10/14のレビューの時に各対策工法がどういったレベル，水準で用いられているのかも説明して下さい。

D：動土質研究室として本総プロで取り組む課題内容も合わせて説明して欲しい。

A：電力やガスについてもふれられますか。入手できる範囲で紹介してほしい。

A：ゾーニングについては新聞に載っていた。建設省と国土庁が共同研究を開始した。住宅局あたりで取り組んでいるようだ。

第３回研究会

［討議要旨］

＜耐震地盤改良工法の現状と課題＞

・対策工法については現状がどうなのか整理を行い、対策工法の実績については建設省所管の実績をフォローする必要がある。

・工費の評価については直接の工事費だけではなく、対策を実施したことによる常時や地震時のメリットも含めた、費用便益の評価が必要である。

・これからの一年間にやるべきことは、表－２の中から研究すべき，研究する価値のある工法を選択することである。

・事業者の基準を見直したり、委員会の構成員を選定する際に事業担当者を含むように配慮する必要がある。

・地盤改良工法は種々雑多に提唱されているが、どの工法を選択すべきか選択フローが明きらかとなっていない。

・地下水位低下は、小規模構造物の被害低減には大きく影響を与え、地域全体の防災を考える時に有効な技術であり、表－２の最上段に「地域」という欄が追加できよう。

＜大都市における地震防災技術の開発＞

・ロッキングに関して、原子力（電中研）ではどんなことを研究しており、どのレベルにまできているかのか勉強会の場でフォローしてほしい。

・外力から強度，設計上の扱いまで含めた実理象に合った正しい照査法へと進む必要がある。

・本総プロで全てを対象とすることは無理だろうが、構造物と土の動的相互作用については、地道に研究を進めていかねばならない問題である。

・耐震研究室分は新しい概念の波及効果を明確にして、そのソフトの部分について始めて聞く人にも理解し易く説得できるよう準備を進めてほしい。

＜その他＞

・他の課題も含めて、オブジェクティブばかりが提示されている。ゴールに関する情報についても提示してほしい。

・５年間及び５年後のゴールとターゲット、特にゴールを明らかにしてほしい。

・また、４研究室のつながりについてもまとめてほしい。

・企画で若干の印刷費が用意されている。次回に金額　と印刷可能頁数、目次構成案（Ｃさんと相談）を提案、提示したい。

・次回勉強会は１１月１１日　９：３０～

・話題提供担当は振動研究室，地質研究室

[議事録]

<耐震地盤改良工法の現状と課題>

A：表－２は、勉強会の場としては、プロジェクトの内容に密着した詳しすぎる内容である。

１頁の対策工法の開発内容について、現状がどうなのかといった討議が必要である（共同溝の対策とか）。８頁以降の対策工法の実績については、建設省所管の実績をフォローする必要がある。

工費の評価については、直接の工事費だけではなく、対策を実施したことによる常時や地震時のメリットも含めた、費用便益の評価が必要である。

表－２を作成した時に、工法選定時に必要な評価項目の検討がなされたと思うが、考慮した評価項目を箇条書きにまとめられないか。

盛土　→　一時的地下水位低下は、暗渠等により長期的な対策として実施可能である。

地中構造時（広く剛な物）　→　底版折損は被害形態であり対策ではない。

D：工法選定フローの一部として表－２が含まれるのか。新規技術が本総プロで対象とする対策工法となり、注入，排水鋼杭，石灰膨張ぐい，排水鋼矢板締切等が主になるのか。

A：これら４工法については、既存の技術が無いので十分研究をする必要があると言う認識か。

D：これからの一年間にやるべきことは、表－２の中から研究すべき，研究する価値のある工法を選択することであり、表－２からはどの工法が最重点課題なのかまでは読み取れない。　どの様なプロセスを経て、これら４工法に集約したのかが大切である。

D：長い剛な物と管状構造物の差異はなにか？　電話の場合にも十分な対震性が必要であるということを聞いたが。

E：長く剛な物の方は規模の大きいものを対象に考えている。ＮＴＴについてはヒアリングの印象から継ぎ手だけで対処していることを感じた。

H：ＣＡＢの場合にもケーブルの曲がりや継ぎ手の開きにも制限があり、事業者の基準を見直したり、委員会の構成員を選定する際に事業担当者を含むように配慮する必要がある。

A：他の課題も含めて、オブジェクティブばかりが提示されている。ゴールに関する情報についても提示してほしい。

H：他の研究者，事業者がどうしているかのフォローをするならコンサルタントで十分であろう。わからない事項であるからこそ、土木研究所が技術的問題を解決していく必要があり、それが本総プロの研究内容となろう。

D：本資料には、開発技術を何にするのかを選択するための情報の整理が行われており、対策工の開発を行うことが本総プロの目的となっている。本日の資料は勉強会用の資料として、動土質研の持っ

ている情報の一覧を提示頂いたのだろう。

E：どの工法にとびつくのかはまだ明確とはなっていない。

D：地盤改良工法は種々雑多に提唱されており、どの工法を選択すべきか明きらかとなっていない。カタログ、メニューはあっても選択フローが無い。

<大都市における地震防災技術の開発>

A：本研究の目標は何か。

H：フーチングや杭の動的照査法を提案することだ。

D：本テーマの内容は軟弱地盤とどう結び付くのか。

H：軟弱地盤では杭基礎が主となるので、杭基礎の動的照査法が必要である。
ケーソンについては直接基礎と同様に扱えるため、本動的照査の流れについて考え方に差はない。

A：耐震設計の中に動的な考え方が含まれていなかったのに対処するのが、本課題の役割である。

E：周辺地盤の影響を解析上考慮しているのか。

H：資料３－７の図－１のように考慮している。
また、水圧（負圧）については考慮していなのだが、大きい問題であろう。

D：杭頭部の結合の影響が大きいのではないか。

H：杭の場合にもどこかにピンが形成され、ＲＣピアと同様の現象が生じるだろう。しかし、ヒューム管では杭体が中空であることが影響するであろう。

A：資料３－６の図－１５を回転慣性等でわかりやすく表現できないか。

H：Ｔｃは回転角の関数であり、容易に算出できるようになっている。

A：転倒については、動的な考えを入れる必要性がインパクトを持って提示されたが、土についても円弧すべり法を越える、土のような連続的な物への動的照査法が必要である。

E：耐震研だけでは難しいが、動的支持力について十分研究する必要がある。

H：土で言えば液状化について、軸ひずみ両振幅５％が構造物にとってどのような影響を生じさせているレベルなのか，0.15という震度で妥当なのか検討が急務である。

A：ロッキングに関して、原子力（電中研）ではどんなことを研究しており、どのレベルにまできているかのか勉強会の場でフォローしてほしい。

H：外力から強度，設計上の扱いまで含めた実理象に合った正しい照査法へと進む必要がある。「そもそも論」から始めた研究が必要である。

E：深層混合については他でやっていないのなら、土木研究所で研究を始めていきたい。

D：本総プロで全てを対象とすることは無理だろうが、構造物と土の動的相互作用については、地道に研究を進めていかねばならない問題である。今だに地盤反力係数の係数が３／４乗というのも本当なのだろうか。

H：弾性論からはなれた、実現象を見据えた研究が必要である。

A：５年間及び５年後のゴールとターゲット、特にゴールを明らかにしてほしい。
　また、４研究室のつながりについてもまとめてほしい。
　特に耐震研究室分は新しい概念の波及効果を明確にして、そのソフトの部分について始めて聞く人にも理解し易く説得できるよう準備を進めてほしい。

＜その他＞
A：研究会の最後として、どのようにまとめていくか議論を始める時期だろう。

D：企画で若干の印刷費が用意されている。次回に金額と印刷可能頁数、目次構成案（Ｃさんと相談）を提案、提示したい。

D：都市の地下水の取扱についても問題が出てきている。地下水の汲み上げが減少したことにより、地下水がもどってきて水位が上昇してきている。
　ある地域については、意図的に水位を低下させて都市規模の耐震性向上が図れようし、動土質の方で参考になるような情報を提示してもらえないか。

E：地球の温暖化による水位上昇による、液状化領域の増加については振動研究室の試算がある。
　また、地下水位の上昇により液状化領域が増加するという東京都の試算もある。

A：地下水位低下は、小規模構造物の被害低減には大きく影響を与える。地域全体の防災を考える時に有効な技術であろう。

D：表－２の最上段に「地域」という欄が追加できよう。

第4回研究会

[討議要旨]

＜軟弱地盤の地震動特性について＞

・今、入手可能な軟弱地盤における実測の地震動記録にどのようなものがあるのかリストアップしておき、総プロの研究に活用できるよう準備しておいてほしい。

・地震動レベルを何で表現するかは大きな問題であり、ＳＩ値やスペクトル強度等の指標について検討を進める必要がある。

・超軟弱地盤の区分と、その区分に対する地震動（加速度だけではなく、速度や変位，地盤ひずみによる提案を含み）の提案が急務である。

＜軟弱地盤の耐震性評価技術研究の課題について＞

・振動研からは、地質研に複数のボーリングから代表ボーリングを選択する手法や、ボーリングの無いメッシュを地質学的に補間する手法，ボーリング密度に合ったメッシュ割の工夫，ボーリング間を補足できるような地盤探査手法を提示してほしい。

・地質研からは、振動研に地盤構造の変化と地震動の関係を明らかにしてほしい。

・振動研と地質研の間で問題点や改善方向について打ち合せを行い、両研究室において何を検討すべきか調整・議論し、役割分担を整理した結果を次回紹介してほしい。

＜報告書の取りまとめ方針（案）について＞

・報告書は土研資料として公開の扱いとしたい。

・３章の項の下の構成を、「１．ニーズ」，「２．技術の現状」，「３．研究開発事項」のように統一してはどうか。

・報告書の内容は、勉強会でわかったことを中心に記述し、総プロでやるべき事項，検討課題として残された重点項目を明確にする。

・添付資料としては勉強会の議事録を含むこととし、出版物からの資料についてはタイトル等の出典だけを議事録に明記し、添付資料には含めない。

・そのため、議事録の記名及び内容については調整が必要。

＜その他＞

・報告書のページ数、目次項目についての意見をＦまで事前に集約して次回の打ち合せに提出する。

・次回勉強会は１２月９日　９：３０～

・話題提供担当は耐震研究室，動土質研究室

[議事録]

＜前回議事録（案）について＞

Ａ：議事録（案）のＰ３の１行は「詳しくよくまとめられている」の意味であり議事録（案）を修正する。

＜軟弱地盤の地震動特性について＞

Ａ：公害研の研究者と話をした。地下水位を３０ｍ程度下げると地球環境上空気が不足する状況が生じ、液状化対策を検討する上で配慮が必要であるという話を聞いた。

Ｄ：空気不足については本当だろうか？　地下水低下による温熱環境の問題は生じると考えられるが。

Ａ：解析対象の11番地点では港研の地震記録がないか？また、東京大学の実測記録や東京工業大学との共同研究に関連して地震動の実測値として参考となるものはないのか。実測値の収集に努めて欲しい。

Ｄ：東京港トンネルの地震計は地盤も観測しているのではないか。15,16番に相当する地点である。

Ａ：報告書には今、手に入る情報（地震動）がいかほどのものなのかリストアップしておき、総プロの研究に活用できるよう関連づけておいてほしい。

Ａ：Ｐ４の地震動レベルとは何を用いるのか？

Ｐ２の加速度は右下がりとなり実感と合わない。入力する地震動の特性が大きく影響しているのではないか。

Ｇ：地震動レベルを何で表現するかは大きな問題と認識している。

Ａ：ＳＩ値による分析や、地盤の特性をT_Gで表現すること等の工夫はないのか。

Ｃ：スペクトル強度は地形の影響を表現するのに有力な指標となりそうである。

Ａ：良い指標のアイデアは何かあるのか？研究期間の５年間はすぐ終わってしまうので見通しが必要である。

例えばＳＩ値を用いる場合の地盤の分類法、ＳＩ値と構造物被害の関係を結び付ける手法はいかようか。

Ａ：不整形の影響についてはゾーニングに結び付けていくということだったが、どう結びつけるのか。

Ｇ：今までは、資料４－４の紹介でもあったように500ｍメッシュ内では一様として地盤を扱ってきた。そこで、不整形性を表現する指標を明かにし、不整形性による地震動の割増しを行う２段階の利用を考えている。

A：200m程度の距離では不整形性を考慮するような状況にはならないのではないか。

C：今の地震動の設定は資料４－４のように点での評価であるため、地域としての不整形性，不均質性を考慮した地震動の評価手法を提案したい。

A：密に地盤の情報を得ることは難しく、施設の設計においてそこまで厳密にやるだけの違いがあるのか？また、その違いを利用する際の精度とのバランスを考える必要がある。

D：Ｐ１のボーリング位置はどう決定したのか。

G：埋立年代と埋立分類、またT_Gを広く分布させるように設定した。

D：Ｐ２のT_Gの図をみると、本総プロで対象としている軟弱地盤とはどのレベルに対応するのか。

G：道示では0.2ｓ，0.2～0.6ｓ，0.6ｓ以上の３区分に分類しており、0.6ｓ以上は一区分として扱っている。

B：T_Gで区分しているのだから、最大加速度比ではなくT_G付近での増幅率で検討すべきではないか？

G：加速度については短周期が大きくきいてくる。そのため実現象では必ずしもT_Gに近いところで最大の加速度を生じるわけではない。

H：メキシコでは長周期が大きく増幅されているが、このような現象についても本総プロでは対象とするのか。

道示についても地盤種別を３区分として施設が建設されてきている。早く超軟弱地盤の新たな区分と、それに対する地震力（力の設計ではだめで変位、速度か→設計の考え方そのものの提案までつなげて）はいかほどかといった提案が急務である。

A：またＳＩ値、スペクトル強度等の他の指標の検討が重要である。

H：資料４－２には現象の分析のみで、設計をどう変えていくのかといった方向付けが感じられない。

メキシコの例でも特定の周期における地震動が増幅されており、周期がそれれば地震動は小さくなる。しかし、周期を特定することが困難なことから設計上は大きめの値を設定することが行われている。平均ではなく１σプラスのジャジか。

H：不整形地盤の２次元解析は大学等の研究としてでやることである。土木研究所としては実測の強震記録を持っている強みを生かし、多点入力の設定手法を提案すべきだ。

B：私はＰ４の解析を是非やってもらいたい。これは鉛直入射で解析するのか？表面波の影響は小さいのか？

G：被害に結び付くのは実態波であろうから鉛直入射を解析対象とする。

B：P１は東京の二重底構造まで考慮しているのか。

G：考慮していない。

B：サイプレスの解析ではポアソン比が小さすぎないか。
　粘性土なら0.48程度はあると思うが。

G：0.45とかこの程度のレベルになるとポアソン比が地震応答に与える影響は小さい。

H：ガス導管等では表面波的な水平に伝播する波で設計する指針が提案されており、硬い地盤の方が楽だという変な現象が生じる。
　土木研究所としては、表面波の影響はなく、地盤ひずみの重要性を提示する必要がある。「地盤ひずみ」の問題は重要である。

＜軟弱地盤の耐震性評価技術研究の課題について＞
H：地質研が担当するのはどの部分か。

B：P１の３の２）、３）である。

H：地盤構造・物性のパラメータとは何か。何を検討していくのか。

B：地盤の不均質性を明らかにする手法、地盤の特性を表現する良い指標を提案する。

D：先ほどの説明では地質研と振動研の分担割合が不明確であり、地質研として振動研にどうインパクトを与えていくのか。２）、３）の内容については振動研の説明でも出てきている。地震動特性に地盤構造や物性がきくことが振動研、耐震研から提示された事に対して、地質研としてどう対応していくのかが担当分であろう。
　本総プロとして500mメッシュということで研究を進めていくこととなるのであれば、50m規模のメッシュの話は外に出ていかなくなり、注意喚起のみとなる。

H：設計にきくのは何かを明らかにするのが先である。「こういう被害があるから研究する」でなければならない。「こうではないかなから研究する」では先が長すぎる。
　ニーズを認識してからの研究が必要である。

D：全国展開するに際して、ボーリングが密に得られない地域も多くあり、地質学上のノウハウを用いれば、例えば500mメッシュ程度までは持ってこれるのではないか。
　また、メッシュが何m程度になるのかについて、皆さんが共通認識を持って議論する必要がある。

B：現在用いている地質の物性や応答解析は精度面から不十分である。

H：しかし、精度が悪いかもしれないが実務では用いている。物性や地質構造を精度良く求める手法はいかようか。

B：まずはボーリングを集める。次に地下総プロで研究しているような地質学的考察を加味してボーリング間の地質の補間を行う。

H：例えば東京では地質学的な研究がどこまで進められており、本総プロで何を追加するのか。

B：ローカルな地盤構造が地震動に与える影響を明らかにする。

C：振動研としては、複数のボーリングから代表ボーリングを選択する手法を提示してほしい。また、ボーリングの無いメッシュを地質学的に補間する手法。ボーリング密度に合ったメッシュ割の工夫の提案。ボーリング間を補足できるような地盤探査手法を提示してほしい。

B：地質研からは、被害事例より谷壁のような地盤の変化が地震動に影響していることが読み取れるので、地盤構造の変化と地震動の関係を振動研で明らかにしてほしい。

D：着手するにあたって、どこの切口から手を入れていくか継続検討が必要である。
　現存の地盤の評価技術やゾーニング技術に対して、どんな問題点があるのか、どう技術を改める必要があるのかの提案がないと自己満足の行為となってしまう。振動研と地質研の間で問題点や改善方向について膝詰談判していただきたい。両研究室で何が必要で、どうすべきかを調整・議論していただきたい。→「宿題」結果を次回紹介してほしい。

＜報告書の取りまとめ方針（案）について＞
H：３章の項の下の構成を統一してはどうか。
　「１．ニーズ」，「２．技術の現状」，「３．研究開発事項」
　勉強会でわかったこと以外が、総プロの検討課題になるといった記述の仕方か。

D：勉強会でわかったことは総プロでやる必要は無いし、総プロでやるべき事項、重点項目を明らかにすればよい。勉強会でわかったことを中心に記述する。

H：１年間でやれたことといえば、整理だけであり、わかったことよりも残された問題の方が多かろう。
　添付資料はどういうイメージか。

D：版権の問題もあり、土技資や文献のコピーの取り扱いに注意が必要である。
　レポート類は目次だけの掲載でもよかろう。

H：厚くするのは望ましくない。議事録があるから出版物の資料についてはタイトルの掲載だけでよかろう。（土技資Vol○○NO.○○とか、手書き資料等）

D：議事録と資料のリスト程度を添付としてはどうか。次回には内容やページ数について意見を出してほしい。土研資料は公開として扱いたい。そのため議事録の記名及び内容についての調整が必要である。

体裁については振動研より案を提出する。

ページ数、目次項目についての意見を幹事まで事前に集約して次回の打ち合せに提出する。

第5回研究会

［討議要旨］

＜軟弱地盤の震害対策技術について＞

・対策技術の動向について、どこまでわかっていて、どこはわかっていないかを載せてはどうか。

・液状化対策について、動土質研究室と振動研究室の仕分けを調整する必要がある。特に周辺条件の整合をとる必要がある。

・過剰間隙水圧の発生量γ_Lについては検討していきたい。

・現有の都市機能を保持するという点から、既設構造物の対策に重点を置く。

＜都市特性を考慮した地震防災対策技術の開発について＞

・都市機能の構成要素について整理を行う。まず個人レベルに着目して整理を行う。

・震害の波及を立ち切るために、どこを補強しておけばよいかという検討がいるのではないか。

＜報告書の取りまとめ方針（案）について＞

・報告書は公表とする。

・内容として、ニーズ，技術の現状等については研究室毎にまとめる。

［議事録］

＜前回議事録（案）について＞

A：P２　A、D　空気→酸素

　　A　大橋→大町

E：「P４　ガス導管　硬い地盤の方が楽」というのはおかしくないか。発言者に確認する必要がある。

A：報告書の取りまとめ

複数の研究室が担当する節（例えば３．１節）では、ニーズ、技術の現状等はその節全体として書くのか。

C：各研究室の担当分の中で、ニーズ、技術の現状等を書く。

＜軟弱地盤の震害対策技術について＞

A：３．２．２（１）１）河川砂防技術基準、国土センター（H３年３月）の報告書がぬけている。ただし、これは非公開資料と思われるので報告書に入れる際には注意されたい。

３．２．２（１）３）動向程度はつかんでいないか。どこまでわかっているのか。どこはわかっていないかを載せてはどうか。

A：P．２　圧縮注入工法は日本では注目されていないというが、下水道では使われている。

P．2　右側のダムの高さは１５フィート程度か？　確認願いたい。

P．4　改良体そのものの安定性の考え方はどうなのか。

Ｗｅｓｔｅｒｇａｒｄ←→側方境界の影響について考慮する必要があり。

Ａ：Ｐ．１　３．２．２（３）９）影響だけでなく、効果についても検討するのがよい。永久変位に対する対策はどこに入っているのか。

Ｅ：明記していないが、意識している。

Ａ：液状化対策について、動土質と振動の仕分けはどうなるのか？　特に周辺条件の整合をとる必要がある。

Ｈ：Ｐ．１　（４）１）既設だけではなく、新設に重点を置くべきではないか。

Ｅ：新設については、現状の技術でかなりできると思う。

Ｈ：現状の液状化対策技術は十分なのか？　設計法、工法の提案を新設にすれば、既設についても同様に扱えないのか。現状についても十分整理されていない段階ではないか。なぜなら、示方書に具体的に示されていないのが実状ではないか。

Ａ：整理されている。しかし、Ｐ．１（１）研究の背景に触れているように、土工指針は専門外の人には分かりにくいのではないか。

Ｅ：土工指針でも書かれていないわけではない。

Ｈ：こうしなさいという記述がないと現場では使えない。

Ｈ：どういう場合に地盤改良を行うのか。もしくは構造的に対処するのか。浮上りに対する長て方向の抵抗はどう取り扱うのか。

Ｅ：矢板や共同溝につめを付けること等についても検討したい。

Ｈ：浮上りについては地盤改良ではなく、構造的に対処する方が経済的ではないか。どの工法が一番効果的で、経済性が高いのか？

Ｈ：間隙水圧の推定式の$\gamma_L = F_L^{-7}$については信頼できるのか。F_Lの次数の７乗は敏感すぎるのではないか。設定根拠がはっきりしていないのではないか。

Ｅ：実験データに基づいて設定されている。

Ｈ：指針に入れたのが早すぎたのではないか。推定値に余裕は入っているのか。

Ｅ：γ_Lついては検討したい。

H：F_Lはすでに広く使われていることを考慮して、F_Lをベースにγ_Lを安全側に評価してはどうか。

B：①既設構造物、新設構造物のどちらに重点を置くのか。②（2）3）判定基準は何なのか。動土質では基準値を明らかにするのか。施工管理技術を含めるのか。

E：①現有の都市機能を保持するという点からは既設に重点を置く。②施工管理は別であろう。

＜都市特性を考慮した地震防災対策技術の開発について＞

A：都市機能の構成要素は整理されているのか。

H：これから行う。まず個人レベルに着目する。

A：生活の質の向上とは何か。そのために何をしたらよいのか。

A：ネットワーク，用途地域の設定の仕方が震災波及にどう影響するのか検討できないか。

H：そのような大きな問題はこの場では扱えないだろう。

C：P．1　国土利用波及を立ち切るために、どこを補強しておけばよいかという検討がいるのではないか。

A：国土計画ハンドブックという本がある。同書の中には防災の項目がある。水害、土砂害等。

C：間接損害、避難路、人命はどう扱うのかも考えていた方がよいのではないか。

H：本課題中では考える必要はなかろう。

＜報告書の取りまとめ方針（案）について＞

A：報告書は公表ということでよいか。

公表の場合、河川関係の基準という固有名詞の扱いには注意が必要である。

ニーズ、技術の現状等は研究室毎にまとめる。

技術開発会議の報告の提言事項を各研究室に入れるようにしてはどうか。

4．参考資料等

建設省総合技術開発プロジェクト
大都市地域における地震防災技術の開発

1　研究の目的

大都市地域には人口，社会機能，経済機能が集積し、それらが複雑に関係を持ちながら都市機能が維持されている。ひとたび大地震が発生すれば個々の施設の被害が相互に絡み合い、都市全体の機能に従来経験したことが無い難しい形態で甚大な影響を与えると考えられる。また、大都市地域においては、厚い沖積層やその上に埋立てられた地域にも市街地が広がっている。また、若齢埋立て地であるウォーターフロント地域の開発が進展しつつある。このような軟弱な地盤地域では、地震動の局所的ではあるが顕著な増幅作用、液状化の発生等が予測され、そのような現象に対する対策技術の整備が要請されている。

このため、本研究では、震災の波及構造を考慮した地震防災対策技術の開発を進めるとともに、軟弱地盤における地震動の増幅特性、液状化等の地盤変状及び構造物に及ぼす影響を明らかにして、軟弱地盤の耐震対策を図るとともに構造物の耐震性向上技術を開発し、大都市域の地震防災対策の一層の向上を図ることを目的とするものである。

2　研究開発計画

本プロジェクトは、平成４年度から平成８年度までの５か年で、次のような大都市地域における地震防災技術の開発を行うものである。

２．１　軟弱地盤の耐震性評価技術の開発

軟弱地盤における地震動の増幅特性及び液状化等の耐震性に基づいて、軟弱地盤の耐震性を総合的に分類・評価するゾーニング技術を開発するために、土木構造物の構造特性を考慮した軟弱地盤の地震動特性の評価技術の開発、及び軟弱地盤の耐震性の評価及びゾーニング技術の開発を行う。

2．1．1　軟弱地盤の地震動特性の評価技術の開発

地盤の軟弱な部分及び地盤条件の変化部において地震動が大きく増幅されるが、ここでは大都市が立地しているような地域での軟弱地盤における地震動の1次元及び2次元的増幅特性を明らかにするとともに、大都市地域における地震防災対策を構ずる際に考慮すべき設計入力地震動の設定法を提案する。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（1）超軟弱地盤における地震動の増幅特性の評価技術の開発

（2）地盤条件の変化部における地震動増幅特性の評価技術の開発

である。

具体的成果としては、

①軟弱地盤における地盤種別分類法

②構造物特性を考慮した設計入力地震動の設定法

③地盤条件の変化部における設計入力地震動の設定法

等があげられる。

2．1．2　軟弱地盤の耐震性の評価技術及びゾーニング技術の開発

軟弱地盤における地震動の増幅特性や構造物被害の発生程度が、軟弱地盤の土質及び土層構成の分布特性により大きく異なるため、ここでは原位置での地盤耐震性の計測・評価法、入手可能な限られた地盤情報から局所的土質分布特性を加味した軟弱地盤の空間的な分布特性の評価法、さらに軟弱地盤の耐震性の合理的な設定法を明らかにするとともに、軟弱地盤の地震動の増幅特性及び地盤変状などの地盤震害に対する耐震性を総合的に評価するためのゾーニング法を提案する。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（1）軟弱地盤の原位置評価技術の開発

（2）軟弱地盤の局所的土質分布特性の評価技術の開発

（3）軟弱地盤の耐震性の評価技術の開発

（4）地盤の耐震性のゾーニング技術の開発

である。

具体的成果としては、

①軟弱地盤の土質構造の原位置簡易計測法
②軟弱地盤の局所的土質分布特性評価マニュアル
③軟弱粘性土及び締め固めた砂質土の動的強度の評価法
④地盤の震害危険度のゾーニング法
等があげられる。

2．2　軟弱地盤の震害対策技術の開発

2．2．1　土木構造物のための地盤震害対策技術の開発

軟弱地盤に構築される構造物の耐震対策のために、地盤及び構造物の変状形態、震害特性を考慮した合理的な震害評価技術の開発を行う。また、震害対策技術として構造補強や地盤改良による対策工法の設計法の開発を行う。さらに、対策規模の設定法、対策効果の評価指標の分類、計測法・試験法の開発を行うことにより、総合的な軟弱地盤の震害対策工法の評価技術の開発を行う。

ここでの主要な研究開発テーマは、
（1）地盤震害の評価技術の開発
（2）構造補強による地盤震害防止技術の開発
（3）既設構造物に対する耐震地盤改良工法の開発
（4）新設地盤・構造物に対する耐震地盤改良工法の開発
である。

具体的成果としては、
①地盤震害に対する構造物の耐震性評価法
②構造補強による地盤震害対策工法
③既設構造物に対する耐震地盤改良工法
④新設地盤・構造物に対する耐震地盤改良工法
⑤各種対策工法の適用条件、設計法と評価項目の統一マニュアル
等があげられる。

2．2．2　建築構造物のための地盤震害対策技術の開発
（建研担当）

2．3　軟弱地盤における構造物の耐震設計技術の開発

2．3．1　土木構造物の耐震設計技術の開発

軟弱地盤に建設される新形式の構造物の耐震設計技術の開発を行う。新形式の構造物としては、橋と建物の一体整備に代表される新しいタイプの構造物や異なった振動特性を持つ構造物が複合化した構造物の耐震計算法を開発する。また、地盤との動的相互作用を考慮した基礎構造物の耐震照査技術を開発する。検討のポイントは、大規模地震を受けた場合の非線形域の応答を考慮した耐震性照査法の開発である。さらに、非線形域の損傷程度を基本として、構造物に許容できる損傷と構造物の重要性の関係を検討する。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（1）新形式の構造物の耐震計算法の開発

（2）剛体基礎の動的安定照査法の開発

（3）くい基礎の動的安定照査法の開発

（4）重要性に応じた耐震性確保水準の評価法の開発

である。

具体的成果としては、

①複合構造物の耐震計算法

②剛体基礎の滑動，ロッキング，支持力に関する動的安定照査法

③くい基礎の動的安定照査法

④構造物の重要性に応じた耐震性評価法

等があげられる。

2．3．2　建築構造物の耐震設計技術の開発

（建研担当）

2．4　都市特性を考慮した地震防災対策技術の開発

2．4．1　震災の波及構造を考慮した地震防災対策技術の開発

大都市圏の震災の特徴は、被災に伴う施設の機能損傷が相互に影響し合い、

このため従来の震災経験から予想し難い影響を受ける可能性を有することにある。このため、大都市域における各種施設の地震被害が、他の施設の被害や住民生活，復旧活動等に与える波及構造を明らかにし、震災対策の高度化を図る。

ここでの主要な研究開発テーマは、

（１）大都市における震災波及構造の評価技術の開発

（２）震災による間接的被害の評価技術の開発

（３）波及構造及び間接被害を考慮した震災対策手法

である。

具体的成果としては、

①大都市における震災波及構造

②間接的被害の評価法

③震災対策による震災の軽減効果の評価法

等があげられる。

２．４．２　都市化と土地条件を考慮した地震防災対策技術の開発（建研担当）

３　研究実施体制

本プロジェクトは土木研究所及び建築研究所を中心に実施するが、産・学とも連携をとって研究開発を進めるため、（財）国土開発技術研究センターに「大都市地域の地震防災技術開発委員会」を設置するほか、関係団体と共同研究を実施する。

Table 2

Improvement of Liquefiable Soil Foundation Conditions

Method	Principle	Most Suitable Soil Conditions/ Types	Maximum Effective Treatment Depth	Economical Size of Treated Area	Ideal Properties of Treated Material*	Applications**	Case†	Relative Costs††
			In-Situ Deep Compaction					
(1) Blasting	Shock waves and vibrations cause limited liquefaction, displacement, remolding and settlement to higher density	Saturated, clean sands; partly saturated sands and silts after flooding	>40 m Solymar (1984)	Any size	Can obtain relative densities to 70-80%; may get variable density; time-dependent strength gain	Induce liquefaction in controlled and limited stages and increase relative density to potentially nonliquefiable range	2 3	Low ($2.00-$4.00/m^3)
(2) Vibratory probe (a) Terraprobe (b) Vibro-rods (c) Vibro-wing	Densification by vibration; liquefaction-induced settlement and settlement in dry soil under overburden to produce a higher density	Saturated or dry clean sand; sand	20 m routinely (ineffective above 3-4 m depth) >30 m sometimes Mitchell (1981) Vibro-wing-40 m Broms and Hansson (1984)	>1000 m^2	Can obtain relative densities of 80% or more. Ineffective in some sands	Induce liquefaction in controlled and limited stages and increase relative density to potentially nonliquefiable range. Has been shown effective in preventing liquefaction	2 3	Moderate ($6.00-$13.00/m^3)
(3) Vibro-compaction (a) Vibroflot (b) Vibro-Composer system (c) Soil Vibratory stabilizing method	Densification by vibration and compaction of backfill material of sand or gravel	Cohesionless soils with less than 20% fines	>30 m Solymar et al. (1984)	>1000 m^2	Can obtain high relative densities (over 85%), good uniformity	Induce liquefaction in controlled and limited stages and increase relative densities to nonliquefiable condition. Is used extensively to prevent liquefaction. The dense column of backfill provides (a) vertical support, (b) drains to relieve pore water pressure and (c) shear resistance in horizontal and inclined directions. Used to stabilize slopes and strengthen potential failure surfaces or slip circles	1 2 Δ‡	Low to moderate ($6.00-$9.00/m^3)
(4) Compaction piles	Densification by displacement of pile volume and by vibration during driving, increase in lateral effective earth pressure	Loose sandy soils; partly saturated clayey soils; loess	>20 m Nataraja and Cook (1983)	>1000 m^2	Can obtain high densities, good uniformity. Relative densities of more than 80%	Useful in soils with fines. Increases relative densities to nonliquefiable range. Is used to prevent liquefaction. Provides shear resistance in horizontal and inclined directions. Useful to stabilize slopes and strengthen potential failure surfaces or slip circles	1 2 3	Moderate to high
(5) Heavy tamping (dynamic compaction)	Repeated application of high-intensity impacts at surface	Cohesionless soils best, other types can also be improved	30 m (possibly deeper) Menard and Broise (1975)	>3300 m^2	Can obtain high relative densities, reasonable uniformity. Relative densities of 80% or more	Suitable for some soils with fines; usable above and below water. In cohesionless soils, induces liquefaction in controlled and limited stages and increases relative density to potentially nonliquefiable range. Is used to prevent liquefaction	2 3	Low ($0.40-$6.00/m^3)

(Continued)

* SP, SW, or SM soils which have average relative density equal to or greater than 85 percent and the minimum relative density not less than 80 percent are in general not susceptible to liquefaction (TM 5-818-1). D'Appolonia (1970) stated that for soil within the zone of influence and confinement of the structure foundation, the relative density should not be less than 70 percent. Therefore, a criterion may be used that relative density increase into the 70-90 percent range is in general considered to prevent liquefaction. These properties of treated materials and applications occur only under ideal conditions of soil, moisture, and method application. The methods and properties achieved are not applicable and will not occur in all soils.

** Applications and results of the improvement methods are dependent on: (a) soil profiles, types, and conditions, (b) site conditions, (c) earthquake loading, (d) structure type and condition, and (e) material and equipment availability. Combinations of the methods will most likely provide the best and most stable solution.

† Site conditions have been classified into three cases; Case 1 is for beneath structures, Case 2 is for the not-under-water free field adjacent to a structure, and Case 3 is for the under-water free field adjacent to a structure.

†† The costs will vary depending on: (a) site working conditions, location, and environment, (b) the location, area, depth, and volume of soil involved, (c) soil type and properties, (d) materials (sand, gravel, admixtures, etc.) equipment, and skills available, and (e) environmental impact factors. The costs are average values based on: (a) verbal communication from companies providing the service, (b) current literature, and (c) literature reported costs updated for inflation.

‡ Δ means the method has potential use for Case 3 with special techniques required which would increase the cost.

(Sheet 1 of 4)

Table 2 (Continued)

Method	Principle	Most Suitable Soil Conditions/ Types	Maximum Effective Treatment Depth	Economical Size of Treated Area	Ideal Properties of Treated Material	Applications	Case	Relative Costs
(6) Displacement/compaction grout	Highly viscous grout acts as radial hydraulic jack when pumped in under high pressure	All soils	Unlimited	Small	Grout bulbs within compressed soil matrix. Soil mass as a whole is strengthened	Increase in soil relative density and horizontal effective stress. Reduce liquefaction potential Stabilize the ground against movement	1 2 3	Low to Moderate ($3.00-$15.00/m^3)
			Compression					
(7) Surcharge/buttress	The weight of a surcharge/ buttress increases the liquefaction resistance by increasing the effective confining pressures in the foundation	Can be placed on any soil surface	---	>1000 m^2	Increase strength and reduce compressibility	Increase the effective confining pressure in a liquefiable layer. Can be used in conjunction with vertical and horizontal drains to relieve pore water pressure. Reduce liquefaction potential. Useful to prevent movements of a structure and for slope stability	2 3	Moderate if vertical drains used
			Pore-Water Pressure Relief					
(8) Drains (a) Gravel (b) Sand (c) Wick (d) Wells (for permanent dewatering)	Relief of excess pore-water pressure to prevent liquefaction. (Wick drains have comparable permeability to sand drains.) Primarily gravel drains; sand/wick may supplement gravel drain or relieve existing excess pore water pressure. Permanent dewatering with pumps	Sand, silt, clay	Gravel and sand >30 m Depth limited by vibratory equipment Wick >45 m Morrison (1982)	>1500 m^2 Any size for wick	Pore-water pressure relief will prevent liquefaction	Prevent liquefaction by gravel drains. Sand and gravel drains are installed vertically; however, wick drains can be installed at any angle. Dewatering will prevent liquefaction but not seismically induced settlements	Gravel and sand 2 Δ‡ Wick 1 2 3	Sand and gravel 0.3 m diam ($11.50-$21.50/m Wick $2.00-$4.00/m) Dewatering very expensive
			Injection and Grouting					
(9) Particulate grouting	Penetration grouting - fill soil pores with soil, cement, and/or clay	Medium to coarse sand and gravel	Unlimited	Small	Impervious, high strength with cement grout. Voids filled so they cannot collapse under cyclic loading	Eliminate liquefaction danger. Slope stabilization. Could potentially be used to confine an area of liquefiable soil so that liquefied soil could not flow out of the area	1 2 3	Lowest of grout methods ($3.00-$30.00/m^3)
(10) Chemical grouting	Solutions of two or more chemicals react in soil pores to form a gel or a solid precipitate	Medium silts and coarser	Unlimited	Small	Impervious, low to high strength. Voids filled so they cannot collapse under cyclic loading	Eliminate liquefaction danger. Slope stabilization. Could potentially be used to confine an area of liquefiable soil so that liquefied soil could not flow out of the area. Good water shutoff	1 2 3	High $75.00-$250.00/m^3
(11) Pressure-injected lime	Penetration grouting - fill soil pores with lime	Medium to coarse sand and gravel	Unlimited	Small	Impervious to some degree. No significant strength increase. Collapse of voids under cyclic loading reduced	Reduce liquefaction potential	1 2 3	Low $10.00/m^3

(Continued)

‡ Δ means the method has potential use for Case 3 with special techniques required which would increase the cost.

(Sheet 2 of 4)

Table 2 (Continued)

Method	Principle	Most Suitable Soil Conditions/ Types	Maximum Effective Treatment Depth	Economical Size of Treated Area	Ideal Properties of Treated Material	Applications	Case	Relative Costs
(12) Electrokinetic injection	Stabilizing chemicals move into and fill soil pores by electro-osmosis or colloids into pores by electro-phoresis	Saturated sands, silts, silty clays	Unknown	Small	Increased strength, reduced compressability, voids filled so they cannot collapse under cyclic loading	Reduce liquefaction potential	1 2 3	Expensive
(13) Jet grouting	High-speed jets at depth excavate, inject, and mix a stabilizer with soil to form columns or panels	Sands, silts, clays	Unknown	Small	Solidified columns and walls	Slope stabilization by providing shear resistance in horizontal and inclined directions which strengthens potential failure surfaces or slip circles. A wall could be used to confine an area of liquefiable soil so that liquefied soil could not flow out of the area	1 2 3	High $250.00- $650.00/m^3
			Admixture Stabilization					
(14) Mix-in-place piles and walls	Lime, cement, or asphalt introduced through rotating auger or special in-place mixer	Sand, silts, clays, all soft or loose inorganic soils	>20 m (60 m obtained in Japan) Mitchell (1981)	Small	Solidified soil piles or walls of relatively high strength	Slope stabilization by providing shear resistance in horizontal and inclined directions which strengthens potential failure surfaces or slip circles. A wall could be used to confine an area of liquefiable soil so that liquefied soil could not flow out of the area	1 2 3	High $250.00- $650.00/m^3
			Thermal Stabilization					
(15) In-situ vitrification	Melts soil in place to create an obsidianlike vitreous material	All soils and rock	>30 m Verbal from Battelle Laboratories	Unknown	Solidified soil piles or walls of high strength. Impervious; more durable than granite or marble; compressive strength, 9-11 ksi; splitting tensile strength, 1-2 ksi	Slope stabilization by providing shear resistance in horizontal and inclined directions which strengthens potential failure surfaces or slip circles. A wall could be used to confine an area of liquefiable soil so that liquefied soil could not flow out of the area	1 2 3	Moderate $53.00- $70.00/m^3
			Soil Reinforcement					
(16) Vibro-replacement stone and sand columns (a) Grouted (b) Not grouted	Hole jetted into fine-grained soil and backfilled with densely compacted gravel or sand hole formed in cohesionless soils by vibro techniques and compaction of backfilled gravel or sand. For grouted columns, voids filled with a grout	Sands, silts, clays	>30 m Limited by vibratory equipment	>1500 m^2 Fine-grained soils >1000 m^2	Increased vertical and horizontal load carrying capacity. Density increase in cohesionless soils. Shorter drainage paths	Provides: (a) vertical support, (b) drains to relieve pore water pressure, and (c) shear resistance in horizontal and inclined directions. Used to stabilize slopes and strengthen potential failure surfaces or slip circles	1 2 Δ‡	Moderate $11.00- $70.00/m^3

(Continued)

‡ Δ means the method has potential use for Case 3 with special techniques required which would increase the cost.

(Sheet 3 of 4)

Table 2 (Concluded)

Method	Principle	Most Suitable Soil Conditions/ Types	Maximum Effective Treatment Depth	Economical Size of Treated Area	Ideal Properties of Treated Material	Applications	Case	Relative Costs
						For grouted columns, no drainage provided but increased shear resistance. In cohesionless soil, density increase reduces liquefaction potential		
(17) Root piles, soil nailing	Small-diameter inclusions used to carry tension, shear, compression	All soils	Unknown	Unknown	Reinforced zone of soil behaves as a coherent mass	Slope stability by providing shear resistance in horizontal and inclined directions to strengthen potential failure surfaces or slip circles. Both vertical and angled placement of the piles and nails	1 2 3	Moderate to high

(Sheet 4 of 4)

大都市地域における地震防災技術の開発に関する調査報告書

ISSN 0386－5878
土木研究所資料第3109号
平成4年3月　(1992)

佐々木　康　水谷　敏則　中村　康夫　稲崎　富士
古賀　泰之　鷲田　修三　常田　賢一　田村　敬一
松本　秀憲　川島　一彦　杉田　秀樹

要　旨

本報告書は，平成4年度建設省総合技術開発プロジェクト新規要求課題「大都市地域における地震防災技術の開発」に関して，平成3年度に実施した同研究会における調査・検討の成果を取りまとめるものであり，今後の大都市地域における地震防災に関する技術開発の効果的な実施に資することを目的とする。

キーワード：都市，地震防災，軟弱地盤，地震動，ゾーニング，震害対策，耐震設計，波及

郵便はがき

41円切手をはって下さい

305-□□

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部振動研究室　御中

No. 292

No. 292

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第　3109　号　　部

大都市地域における地震防災技術の
開発に関する調査報告書

上記のとおり受領しました。

所　　属(住所)

氏　名　　印

土木研究所資料第3109号

大都市地域における地震防災技術の
開発に関する調査報告書