

大都市地域における地震防災技術の開発

保田雅彦¹・田村敬一²・中尾吉宏³

¹正会員 工博 建設省土木研究所耐震技術研究センター長(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²正会員 工博 建設省土木研究所耐震技術研究センター振動研究室長(同上)

³正会員 工修 建設省土木研究所耐震技術研究センター振動研究室研究員(同上)

建設省では、総合技術開発プロジェクトの一環として、大都市地域における地震防災技術の向上という視点から、「大都市地域における地震防災技術の開発」(平成4～9年度)を実施した。本プロジェクトは、軟弱地盤における地震動の増幅特性の評価、液状化に対する危険度評価及びその対策、都市構造物の耐震設計及び震前・震後対策、都市域直下型地震に対する危険度評価等の広範な分野における研究開発を目的としたものであり、本稿では、土木分野において実施された各研究開発の概要について紹介する。

Key Words: Urban Disaster Prevention, Seismic Design, General Technology Development Project

1. はじめに

建設省では、産学官の連携により総合的、組織的に研究を実施する総合技術開発プロジェクトを昭和47年度に創設し、これまでに地震工学分野では「新耐震設計法の開発」(昭和47～51年度)、「震災構造物の復旧技術の開発」(昭和56～60年度)及び「災害情報システムの開発」(昭和62～平成3年度)を実施してきたが、さらに、大都市地域における地震防災技術の向上という視点から、「大都市地域における地震防災技術の開発」(平成4～9年度)を課題として取り上げた。

我が国の大都市は厚い堆積層に覆われた地域に立地していることが多い上に、近年、ウォーターフロント等での開発が進められている。当初、本プロジェクトはこのような都市域の地盤条件を考慮した地震防災技術及び錯綜した都市空間における構造物の耐震設計技術の開発を主たる目標としたが、平成7年兵庫県南部地震による甚大な被災状況に鑑み、従来の目標に都市域直下型地震に対する対策技術の開発を加えた。本プロジェクトでは、土木研究所及び建築研究所がそれぞれ研究課題を担当したが、本稿では、そのうち、表-1に示す土木分野において実施された各研究開発¹⁾の概要を紹介する。

2. 軟弱地盤の地震危険度評価手法の確立

(1) 液状化による地盤の危険度評価手法の確立

本課題では、砂質土の液状化強度特性及びこれまでに地盤上で観測された地震動波形の繰返し特性について整理するとともに、地震動波形を載荷波形として用いた非排水繰返し中空ねじりせん断試験及び累積損傷度理論に基づく解析により、地震動波形の

表-1 研究開発課題の構成(土木分野)

- | |
|----------------------------|
| I. 軟弱地盤の地震危険度評価手法の確立 |
| 1. 液状化による地盤の危険度評価手法の確立 |
| 2. 地震動の増幅による地盤の危険度評価手法の確立 |
| 3. 都市域における沖積地盤の地質工学的調査法の開発 |
| 4. 地盤条件による強震動の増幅特性 |
| II. 軟弱地盤における構造物の耐震設計技術の開発 |
| 1. 都市構造物の耐震計算法の開発 |
| 2. 地下・基礎の耐震設計技術の開発 |
| III. 軟弱地盤の震害対策技術の開発 |
| 1. 液状化対策技術の開発 |
| 2. 地震時地盤流動に対する対策工の開発 |
| IV. 都市域直下型地震における地震危険度範囲 |
| 1. 断層調査法の開発 |
| 2. 震源近傍における地震動特性の評価法 |
| V. 都市構造物の震前・震後対策 |
| 1. RC構造物の地震時せん断耐力に関する調査 |
| 2. 地中構造物の被災度判定・補強技術の開発 |

繰返し特性を考慮した液状化強度の評価式を提案した。図-1に、プレート境界型地震及び内陸直下型地震による地震動波形に対する液状化強度の補正係数の算出結果を示す。

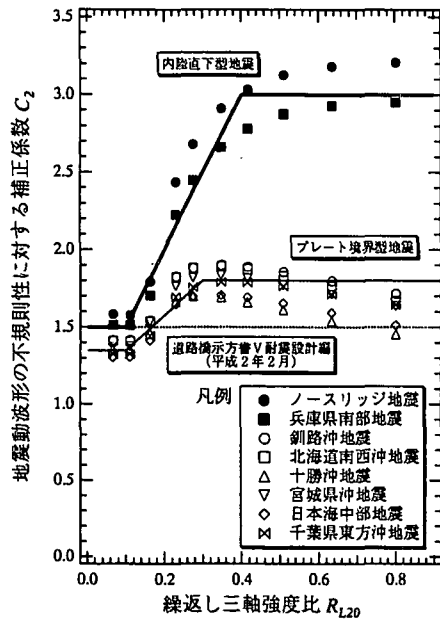


図-1 地震動波形の繰返し特性に対する液状化強度の補正係数

また、兵庫県南部地震における流動化による橋梁基礎の被災事例の逆解析を行うとともに、護岸構造物の移動に伴う流動化に関する振動台実験を行い、流動化に対する橋梁基礎の耐震設計法を提案した。

(2) 地震動の増幅による地盤の危険度評価手法の確立

本課題では、既存の資料を基に不整形地盤の形状・規模を類型化するとともに、それを参考に設定した不整形地盤モデルを対象に地震応答解析を行った。解析結果に基づき、成層地盤に比較した不整形地盤による地震動の増幅程度及び不整形地盤により特に増幅される地震動の周期帯を、地盤の不整形性を表す指標を用いて定量的かつ簡便に評価する手法を提案した。解析結果の一例として、硬質層と軟質層の境界が傾斜した不整形地盤について、硬質層のみの部分と軟質層が最も厚い部分における地盤の特性値の差 ΔT_G をパラメータとして、地盤の不整形性を考慮した場合としない場合の加速度応答スペクトル（減衰定数=0.05）の比（増幅率）を図-2に示す。

(3) 都市域における沖積地盤の地質工学的調査法の開発

兵庫県南部地震において、いわゆる「震災の帯」の分布と地下構造との関係が注目され、平野に発達した大都市地域の地震防災においては、その地下構造の把握が極めて重要であることが認識された。

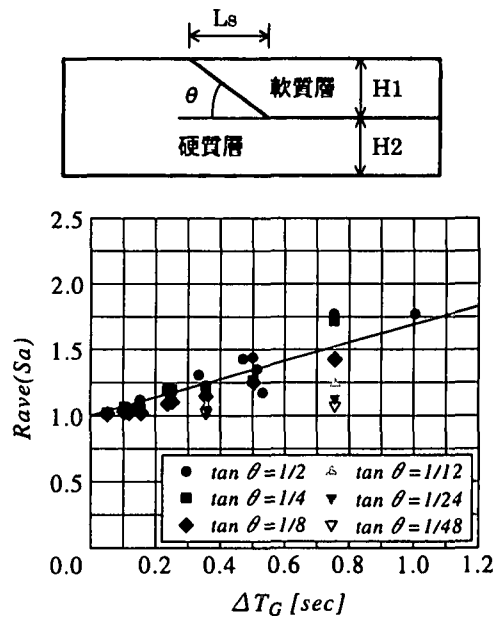


図-2 片側傾斜基盤の増幅率

本課題では、地震動予測に重要な地盤のS波速度構造を原位置で把握できる微動探査法について、都市域における深部から浅部までの地盤構造推定への有効性及びその適用方法の検討を目的として、神戸市東灘区において探査実験を行った。実験による地盤のS波速度構造をもとに、当該地域の地質構造区分の推定を試みた結果、既存資料と整合的な結果が得られた。また、測点配置、人工震動源の存在、測定機器の監視等に注意を払うことにより、都市域においても微動探査法を適用できることが示された。

(4) 地盤条件による強震動の増幅特性

兵庫県南部地震では、軟弱地盤において観測された最大加速度が比較的硬質な地盤に比して小さくなる現象や、軟弱地盤の地中における最大加速度の観測値が地表面における観測値を上回る現象が生じた。

本課題では、種々の地震応答解析により兵庫県南部地震で観測されたような地震動の地盤内増幅特性メカニズムの解明を図るとともに、軟質地盤の地震応答解析では全応力解析等の非線形解析が有効であることを示した。また、地盤条件が地震動の増幅特性に及ぼす影響について系統的に整理した。

3. 軟弱地盤における構造物の耐震設計技術の開発

(1) 都市構造物の耐震計算法の開発

建設用地等の制約から、大都市地域に建設される構造物は複雑なものとなり、従来の耐震設計の考え方が適用できない場合もある。このような観点から、本課題では大都市地域における近接構造と一体構造の建設事例に関する調査を行うとともに、調査結果

から採用事例が多いことが明らかになった図-3に示すような橋梁基礎と共同溝が近接する場合の耐震設計法の検討を行った。その結果に基づき、近接した橋梁の杭基礎がある場合の地下構造物の耐震設計における地盤反力ばねの算出方法を提案した。

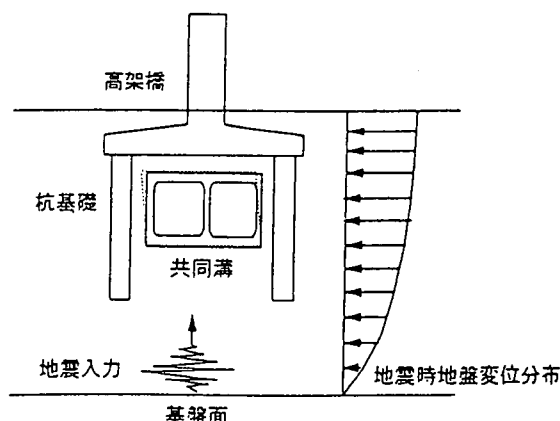


図-3 橋梁基礎と共同溝の近接構造

(2) 地下・基礎の耐震設計技術の開発

軟弱な地盤上に位置していることが多い我が国の大都市地域では、構造物の基礎構造として杭基礎が広く用いられているが、大規模地震時において地盤が大きく変形するとともに、杭体にも弾性域を超える応答が生じるような場合に対して、杭にどの程度の変形や損傷が生じるかは十分に解明されていない。

本課題では軟弱地盤中の杭基礎に着目し、大規模地震に対する耐震設計法（地震時保有水平耐力法）について検討を行った。軟弱地盤中の杭基礎の大規模地震時の動的応答特性、動的載荷実験による場所打ち杭と高強度プレストレストコンクリート杭の地震時保有水平耐力と変形性能を検討するとともに、杭体の地震時保有水平耐力とその変形性能の評価手法について提案した。

4. 軟弱地盤の震害対策技術の開発

(1) 液状化対策技術の開発

本課題では、大都市地域内の軟弱地盤地帯に位置する盛土及び地中構造物に適用可能な液状化対策工法の開発及び改良を行った。検討対象とした対策工法は、既存・新規を含め、地盤密度増加、地盤固化、排水、あるいは構造的補強など、広範な種類にわたっている。このうち新規に開発に取り組んだ工法として、通常のセメントに比べて粒径が小さい超微粒子セメントを用いて砂質地盤を固める注入工法、硬練りのセメントモルタルを地盤内に注入して周辺地盤を締め固めるコンパクショングラウチング工法、生石灰杭を用いた静的締固め工法などがある。これ

らの工法について、模型実験、数値解析等を実施した上で、設計法・施工法を提案した。

(2) 地震時地盤流動に対する対策工の開発

橋脚基礎の流動化対策工法としては、橋脚基礎の水際線側または内陸側に壁体を設け、地盤の変形を拘束する防護壁工法、杭基礎周辺地盤を例えば高圧噴射攪拌工法等により固め、杭基礎本体の変形を拘束する深層混合処理工法等が考えられる。

本課題では、深層混合処理工法を対象として模型振動台実験を実施した結果、対策工を実施した場合には無対策の場合に比べて、液状化層内の杭に発生する曲げモーメントは低減されるが、改良体と支持層の境界部において杭に大きなせん断力が発生することが明らかになった。また、防護壁工法を対象として動的遠心模型実験を行った結果、防護壁を橋脚基礎の内陸側より水際線側に設置した方が対策効果が大きいことが明らかになった。

5. 都市域直下型地震における地震危険度範囲

(1) 断層調査法の開発

大都市地域の地震防災を考える上で平野部地下の伏在断層調査は非常に重要であるが、土地利用の制約等により地下の地質構造を効率よく調査することは難しく、新たな手法の開発が望まれている。

本課題では、これまで都市域における探査事例がほとんどないCSAMT法について、長野県諏訪盆地において探査実験を行った。その結果、図-4に示すように、得られた比抵抗構造から当該地域の概略の地下構造を把握することができ、厚い盆地堆積物下に伏在するものを含めて8本の断層を推定することができた。本手法は、ある程度都市化の進んだ地域においても適用可能であり、また、断層調査の概査あるいは詳細調査を実施する前の予備調査として有効である。

(2) 震源近傍における地震動特性の評価法

本課題では、震源近傍を対象とした地震動の距離減衰特性及び断層モデルを用いた地震動推定手法に関する検討を行った。従来の距離減衰式では、回帰データとして規模の大きな地震による震源近傍の強震記録は限定されているため、本課題では、従来の強震記録に国内外で蓄積されつつある震源近傍の強震記録を加え、大規模な地震による震源近傍の地震動特性を推定する手法を提案した。

また、断層モデルを用いた地震動推定では多くの断層パラメータを設定する必要があるが、現在、これらのパラメータを十分な精度で評価、設定するこ

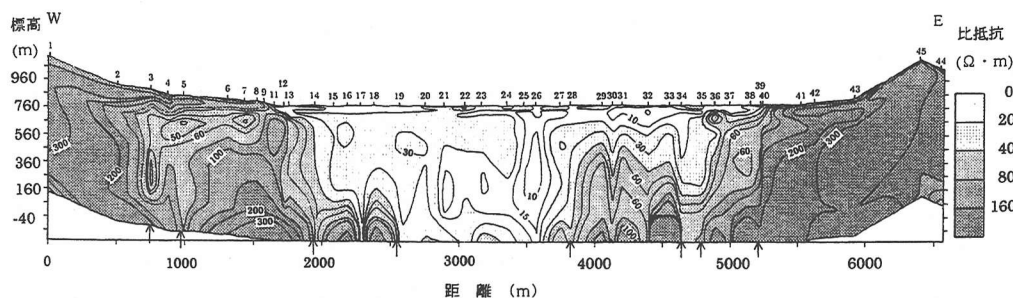


図-4 CSAMT法による諏訪盆地の二次元比抵抗解析結果
(↑は比抵抗から推定された断層位置、数字は地点番号)

とは不可能である。そこで、断層パラメータの変動幅を過去に発生した地震の断層パラメータから評価する手法を提案し、断層パラメータの変動が推定地震動に与える影響について系統的に検討した。

6. 都市構造物の震前・震後対策

(1) RC構造物の地震時せん断耐力に関する調査

本課題では、せん断スパン比の小さいRC部材を対象として、載荷試験に基づいて、正負交番荷重用時のせん断耐力について検討を行った。図-5に、荷重の繰り返し回数とコンクリートの負担するせん断力の関係の一例を示す。供試体No.2は供試体の変位振幅を $1\delta_y$ に固定したものであり、供試体No.3は各変位振幅における繰り返し回数を3回とし、順次段階的に変位振幅を増加させたものである。この結果、主鉄筋が降伏しない範囲で正負交番荷重が繰り返し作用しても、せん断強度の低下はあまり顕著ではないが、塑性変形が生じるような場合には、せん断強度が大きく低下することが明らかとなった。これらの結果に基づき、せん断スパン比の小さいRC部材のせん断耐力の評価法を提示した。

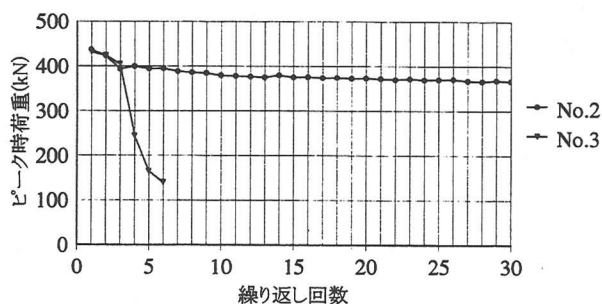


図-5 荷重の繰り返しとピーク時荷重低下の関係
(せん断スパン比=1.1、せん断補強鉄筋なし)

(2) 地中構造物の被災度判定・補強技術の開発

本課題は非破壊的な構造物の損傷程度判定法の適用性について検討するとともに、マイクロパイルによる補強法の確立を目的としたものである。地中レ

ーダによる構造物周辺地盤の空洞探査に関しては、1 GHzのレーダを用いることにより、ボックスカルバートでは鉄筋間隔150mm程度、ヒューム管では同65mm程度まで適用性が高いことが判明した。また、インテグリティ試験(図-6参照)に関しては、人為的に損傷を与えた模型杭に対する室内試験により損傷の程度と推定精度、フーチングの影響などを調査し、適用性を明らかにした。

マイクロパイルに関しては、実大杭に対する載荷試験の結果から、支持力の大部分がグラウト定着部の周面摩擦に依存していることが確認され、単杭の鉛直支持力特性を把握することができた。

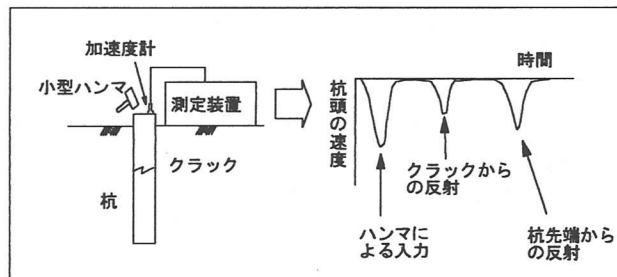


図-6 インテグリティ試験による杭の損傷調査

7. まとめ

本稿で紹介した研究開発成果の一部は、既に兵庫県南部地震後の設計基準類の改訂等に反映されているが、今後、さらに本プロジェクトの成果が各方面において広く活用されることが期待される。

謝辞：本総合技術開発プロジェクトは産学官の多大な協力により実施されたものであり、研究開発の実施に当たり御協力を頂いた各位に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 建設省：大都市地域における地震防災技術の開発 土木分野編 最終報告書、1998