

# 主論文の要約

論文題目 既設地中構造物・基礎杭に対する耐震対策  
のための作用と構造性能の評価の高度化  
(Advanced evaluation of load and  
structure performance for  
earthquake-resistance of existing  
underground structure and pile)

氏名 河村 精一

## 論文内容の要約

本論文は、一般の既設土木構造物に多い鉄筋比が比較的小さい鉄筋コンクリート製地中構造物や比較的軽量の線状の上部構造物の基礎杭を対象として、BCP/BCM 策定のための作用側の地盤評価と構造物の性能評価を高度化する方法を提案した。本論文は、全7章から構成される。

### 第1章

本章では、研究の背景、特に兵庫県南部地震以降の耐震性能評価手法の変遷と BCP/BCM の動きから、損傷した設備の地震後復旧性、使用性を考え地震前・中・後の対応策定を図るため、想定される地震動に対する設備の性能評価をより具体的に把握する研究の必要性が生じている状況を述べた。そして、鉄筋コンクリート製地中構造物や基礎杭の耐震性能評価における現状と課題を概括し、本論文の研究目的が、ハンドリング等から現実的に使用可能な解析ツールを用いて、対象設備の BCP/BCM 策定に必要な耐震性能評価を高度化することを述べた。

### 第2章

本章では、これまであまり検討されていない鉄筋比が比較的小さい鉄筋コンクリート製

地中ボックスカルバートを対象として、地震時損傷評価手法を検討した。部材の一部をモデル化した供試体による正負交番載荷実験を実施し、その繰返し荷重作用下の変形性能、ひび割れ発生状態、鉄筋ひずみの挙動および、ハンチ筋の力学的効果を明らかにした。対象とした構造物は、変形性能に富んだ挙動を示し、部材角 1/30（降伏変位の 10 倍）まで載荷した大変形時でも、耐力が大きく低下することはなかったこと、コンクリートの圧壊損傷はほとんど生じないという、地震時耐震性能照査にとって重要な知見を得た。したがって、地震後の機能確保という観点からは、鉄筋降伏を許容した評価が可能となる。しかし、ひび割れ幅はひびわれ分散性の高い鉄筋比の大きな部材の構造物より大きく、地震後補修せずに使用する場合、耐久性（塩害劣化）の面で不利である。

そこで、鉄筋コンクリート構造物の損傷状態まで考慮できる非線形有限要素法解析と実務で用いるファイバーモデルにより、耐久性（塩害劣化）を評価するための実構造物レベルの曲げひび割れ幅の検討を行い、部材高さ程度で分割した各要素のひずみを用いて、鉄筋コンクリート示方書のひび割れ間隔で積分し得られる変位をひび割れ幅として評価する方法を提案し、その妥当性を示した。

### 第 3 章

本章では、軟弱粘性土地盤に建設された杭を対象として、地震時の地盤応答がその杭に及ぼす極限地盤反力を検討した。現状では仮定を設けた理論解を用いて極限地盤反力を設定していた。そこで、地盤が単杭をすり抜ける際の 2 次元的挙動を模型実験で確認し、地盤反力度は杭径の約 10%程度の変位時点においてピーク（極限地盤反力度）となること、それ以降はほぼ完全塑性的挙動であり、非排水せん断強度の 12~13 倍程度であることを明らかにした。また、杭周辺地盤に設置した標点観察から、杭周辺地盤の回り込みやすり抜け変形を確認し、その変形する領域は杭中心から杭径の 2.5~3 倍程度の範囲であること、同様の結果を剛塑性有限要素法解析でも確認した。

そして、この解析手法でいくつかの数値実験を行い、フリクションカットにより杭周面がスムーズな場合、従来の設計方法で良いこと、杭打設により杭周辺地盤が強度低下すると、極限地盤反力度が大幅低下し、その感度が大きいことを明らかにした。さらに、群杭の極限地盤反力度は、杭中心間隔を 5.0D 離せば単杭と同等の値となること、群杭効果の感度は比較的小さいことを示した。設計・照査において安全側評価を行う観点からは、単杭の評価を行っておけば実務上十分であるという結論を提示した。

また、極限地盤反力度の既往設計基準類評価は、上部構造物に作用する地震時慣性力を杭が受け止める範囲に対して安全側評価となるが、それ以深の杭に関して杭に作用する土圧が小さくなるため、危険側の評価となるという耐震性能評価上重要な知見を得た。これには、非排水せん断強度の 12~13 倍程度の極限地盤反力度を設定することが安全側評価となることを提案した。

## 第4章

本章では、高強度プレストレストコンクリート杭を対象として、基礎に作用する地震時転倒モーメントにより発生するこれまで実験結果の少ない引張および低圧縮軸力下における終局せん断耐力について検討した。杭の地震時挙動を想定して、正負交番載荷を逆対称モーメント状態で実物大実験を行い、軸力が圧縮側に増加するにつれ初期剛性や最大耐力が向上する一方で、最大耐力時変形角が低下することを確認した。また、これまで同種の実験で計測されてこなかった鉛直変位の変化を分析することで、せん断ひび割れでなく最大荷重を終局せん断耐力と考えればよいことを示した。しかし、最大耐力や変形性能が正負交番載荷により小さくなることに注意が必要であること、地震時の地盤の応答変位を考慮した場合にみられる逆対称曲げモーメント形式で得られた終局せん断耐力は、これまで多く行われてきている単純梁形式で行われたものより小さくなる傾向があり注意が必要であることを示唆した。

一方、ひびわれ進展やポストピーク挙動を含む評価への適用性を確認した剛体バネモデルによる三次元解析による検討も行い、せん断スパン比の影響は、 $a/d=1.5$ を超えると、せん断破壊の場合と曲げ破壊の場合が混在するようになること、 $a/d=2$ では、曲げが支配的な挙動を示すが、軸圧縮力が大きくなるとせん断挙動が支配的となることを明らかにした。さらに、杭径を大きくしていくと、よりせん断破壊が支配的となる傾向であること、今回の諸元でのスパイラル筋は、せん断耐力に影響を及ぼさないことも示した。

以上の検討結果に基づき、既往の設計評価式は軸力の影響をやや過小評価しており、引張や低軸圧縮力下では安全余裕が少ないことに注意が必要であることを明らかにし、設計における軸力の効果に対し既往評価式を見直したせん断耐力評価式を提案した。

## 第5章

本章では、4章に引き続き高強度プレストレストコンクリート杭を対象として、杭周辺地盤による拘束効果による曲げ変形性能について検討した。地盤の拘束効果を模擬したエアバッグを用いて、正負交番載荷実験を実施し、軸力に対する性能を保持したうえで、拘束圧のレベルに応じて、軟化域の変形性能が向上することを確認、最終的な破壊モードは、PC鋼線の破断は生じず、コンクリートの圧縮破壊となるという知見を得た。また、脆性破壊する高強度コンクリートの拘束圧依存性を考慮したひずみ軟化特性を、新たに提案したPopovics式を硬化域と軟化域に分け、実験結果のフィッティングによって軟化域のポストピークパラメータを拘束圧との関係で明らかにした。そして、 $M-\phi$ モデルに基づいてテトラリアモデルを構築し、これを実務でよく用いられる汎用有限要素法解析コードの部材特性に軟化域を表現できる原点指向・武田混合型を新たに導入して解析した。その結果、実験結果を概ねシミュレーションでき、実務への適用性を確認できた。

さらに、4章で用いた剛体バネモデルを曲げ変形問題にも適用し、繰返し載荷回数ของポストピーク挙動への影響を検討した。その結果、10回繰返しを行っても最大荷重以前で

は繰返しの影響は現れないこと、一方、最大荷重以降は繰返し回数の影響が生じ、10 回繰返しを行うことにより 1, 3 回繰返しよりも定変位での荷重低下が著しいこと、荷重低下はあるところで一定値となる傾向にあることを示した。解析結果に基づき、繰返し载荷回数毎に提案したポストピークパラメータと拘束圧の関係式を作成し、地盤の拘束効果を考慮した曲げ変形性能を評価可能なモデルを提案した。

## 第 6 章

本章では、地震時に液状化が発生することが想定される既設構造物周辺地盤を対象とし、低コストで近年開発された砂圧入式静的締固め工法の施工による周辺地盤や近接既設構造物に及ぼす影響を、改良効果の地震応答解析への反映も念頭にして検討した。

まず、既往の施工時における周辺地盤への影響に関する計測実績を調査し、圧入した砂杭下端から 45° の範囲が影響することを見出した。そして、3次元弾塑性有限要素法による水～土連成解析を用いて、周辺地盤の変位に及ぼす影響について、地表面および地中発生変位の距離に伴う減衰(距離減衰)特性を把握、ゆるい砂地盤の場合には地表面が沈下、中密の場合には盛り上がる傾向を示した。さらに、施工域からの離隔距離が大きくなると盛り上り量は減衰する結果を示した。これに対し、実務で用いる弾性体を仮定した地盤の解析では、離隔距離が大きくなるにつれ減衰せず鉛直変位が大きくなり地盤は盛り上がる結果となり、既往の実測結果とは明らかに異なる結果を得、周辺地盤の弾塑性体による適切なモデル化の重要性を示した。

地盤を介して砂圧入時に近接構造物が地盤から受ける側圧に及ぼす影響は、離隔距離が増えると側圧は低減され、中密砂地盤では、離隔位置 1m で概ね拡張反力の 10%程度の側圧となることがわかった。また、改良効果の大きい範囲は、砂杭からその径程度であった。

本手法は、施工過程をできる限り再現して周辺影響を検討できるため、施工条件を解析的に照査できる可能性を示した。そして、本手法により改良後の地盤状態を推定すれば、既設構造物周辺での改良効果の空間分布を把握することが可能であり、これまで実務でよく用いている経験式等から実務で用いる地震応答解析に必要な液状化強度などの入力物性を推定する有用な資料を提供できることを示した。

## 第 7 章

本章では、本論文で得られた知見を整理するとともに、新たに提案できた手法について概括することで結論とした。

以上、本研究では、実験と最新の解析を組み合わせることで得られた結果を実務で使用できる形にまとめたもので、軟弱地盤に建設された既設地中構造物や基礎杭の耐震対策のための作用と構造性能評価の高度化に資するものである。