

氏名	いなだ ひろし 稲 田 裕
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成16年7月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和63年3月 東京大学工学系研究科船舶工学専攻修士課程修了
学位論文題目	炭素繊維を用いた構造健全性評価手法の開発と 杭の損傷検知への適用に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 杉村義広 東北大学教授 三橋博三 東北大学教授 井上範夫

## 論 文 内 容 要 旨

兵庫県南部地震(1995)では、建築物を始めとして上部構造のみではなく基礎構造についても多くの被害例が報告されている。特に、その後の詳細調査の結果、杭基礎の広範囲な損傷が確認された。その中には、上部構造には有意な損傷がないにも拘らず、杭基礎には重大な損傷を受けている例も見られた。また杭の損傷発生位置は、杭頭部に限らず、杭中間部における損傷が見出されたものもあった。杭の損傷程度の評価手法としては、掘削による目視確認が広く用いられているが、深い位置の損傷調査には膨大な時間と費用を要するので、必ずしも実現し得なかった例もあると言われている。さらに、適切な杭の損傷度判定基準自体がなかったことから、継続使用の判断が困難なものとなったことも指摘されている。このような基準の早急な整備とともに、視覚に頼らないで損傷を検知し、損傷程度を評価できる技術があれば、地震後の復旧活動における迅速性、経済性などのあらゆる点で格段の向上が望めることを強く示唆するものであった。本論文は、このような兵庫県南部地震の被害調査によって得られた教訓を契機として始めた研究により得られた成果をまとめたものである。研究の主な目的は、地震による杭の損傷検知を可能とする構造健全性手法の開発と実用化である。なお本論文は、杭の損傷検知への構造ヘルスマonitoring技術の適用、センサの開発とその性能評価、PHC杭の曲げ試験によるセンサの杭の損傷検知に対する特性評価、開発した健全性評価手法の実構造物への適用性の検討から構成されている。

本論文では杭の健全性評価のための損傷検知手法の開発に当たり、従来の非破壊検査とは異なる視点からの検討を行うこととして、構造ヘルスマonitoringの適用を図った。そして、モニタリングの観点から、地震による杭の損傷の特徴やモニタリングに求められる性能の検討を行った。はじめに、建築・土木分野のモニタリング技術の適用と杭の損傷及びその検知手法について、既往の研究の現状や課題について調査を行い、その結果を基に杭の損傷検知のためのモニタリング手法の基本的な考え方を設定した。本論文では、i) コンクリート杭、特に既製杭を主な対象とし、地中部で発生する損傷も検知できること、ii) 被災度を判定し、補修等の対策を決定する枠組みを構築できること、iii) 継続使用の可否や詳細検査の必要性の有無を判断できることの三点をモニタリング技術の開発方針と

している。また、センサの取付けや供用下の状態を考慮すると、センサに求められる特性として、a. 損傷検知性能、b. 長期耐久性、c. 施工性、d. 判定の容易さ、e. 経済性の5項目が重要となる。既往の研究の調査結果を基に、杭の損傷検知に適用が可能と思われるモニタリング手法の候補を挙げ、上で示した要求性能への適応性の評価を行った。その結果、本論文では長期的な安定性、計測や評価の容易さ等を考慮して、検知材として炭素繊維を用い、電気抵抗計測によって損傷を検知する手法を健全性の評価手法として用いることに決定した。

センサの開発では、はじめに検知材として選んだ炭素繊維の材料・強度特性、電気抵抗の変動特性の評価を行い、炭素繊維のセンサとしての性質・適用性を検討した。その結果、炭素繊維は引張荷重を受けると繊維束中の繊維が徐々に局所的に破断し、受けた荷重に応じた抵抗変化を示すこと、ある荷重を受けた後に除荷されても、受けた歪みに応じた残留抵抗変化が見られることが明らかとなった。また、動的な繰り返し載荷試験を行い、炭素繊維束の強度特性、抵抗変動特性は長期間繰り返し載荷条件下におかれても変化がないことを確認した。さらに、実験結果と既往の研究成果に基づいて、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)材として成形した炭素繊維の電気抵抗特性の評価モデルを検討し、抵抗変化の傾向が3つの段階で表されることを示した。本論文では大きな抵抗変化によって明確に損傷を判断することを目標に、その第三段階の繊維束の全面的な破断による大きな抵抗変化に注目し、繊維の破断伸びにより感度の調整を図っている。センサは破断伸びの小さいピッチ系の炭素繊維を用い、絶縁と保護を兼ねたビニールエステル樹脂(FRP)で挟み込んでシート状のCFRP材として加工したものである。センサの断面は幅2cm、厚さ2mmで、長さは自由に調節できるが実験や実構造物への適用では1~2m程度の長さのセンサを標準型としている。開発したセンサについては引張試験を行い、センサの強度や抵抗特性のばらつきは小さく性能が安定していること、センサは炭素繊維が破断伸びに達したときに抵抗変化を生じることを確認した。さらにばね鋼のケーシングにセンサを詰めた試験体の引張試験を行い、一様歪み場ではセンサは小さな歪み領域から残留抵抗変化を生じ、良好な記憶性能を持つことを示した。一方、コンクリート中のセンサの応答特性はセンサ単体の場合とは異なり、コンクリートとの付着やひび割れに対する局所的な応答を考慮することが重要である。論文では、ひび割れに対する抵抗変動特性を検討し、センサの抵抗変化の評価モデルを示した。そして、センサを埋め込んだ小型コンクリート試験体の両引き試験を行い、ひび割れ幅が0.4mm程度に拡がるとセンサの抵抗変化が始まること、ひび割れ幅発生時には10cm程度の有効長さの範囲の平均歪みに対して応答していることを明らかにした。

センサの杭の損傷検知性能評価では、以下のように予め杭の損傷度を分類し、損傷検知の要求性能を定義した。既往の研究成果とPHCの損傷度の実験的研究によって得られた成果を基に、杭の損傷度を1) 無傷または微小ひび割れ、2) 鉄筋に達する曲げひび割れまたは鉄筋等の降伏、3) コンクリートの圧壊または鉄筋等の破断の3つのレベルに分類した。センサの損傷検知性能としては、このうち第二レベルから変化を生じ、第三レベルに達する前に大きな応答を示すことを目標とした。そして、センサを取り付けた杭種や杭径の異なるPHC杭の曲げ試験を行うことにより、曲げモーメントによる杭の変形・損傷に対するセンサの抵抗変化の特性を評価した。その結果、センサの特性としてi) センサは杭中でコンクリートとの付着を確保し、PC鋼棒と同じ引張歪み生じていること、ii) 損傷程度が進展監視を求められる第二レベルに入るとセンサは応答を開始し、破壊に近づくとき大きな抵抗変化を示して明確なアラームを発すること、iii) しきい値と定義した履歴ひび割れ幅0.9mmとPC鋼棒の降伏の発生を超えた損傷レベルでのセンサの応答は安定しており、センサの残留抵抗変化率からの履歴荷重や履歴ひび割れの推定がある程度は可能であることが明らかとなった。そして得られた結果を

基に、センサの計測結果から杭の損傷度を判定し、維持補修の判断を行う手法の構築を図っている。さらにセンサの取り付け方法を工夫して、PHC 杭のせん断損傷検知への適用も図った。センサを杭の周方向に取り付けた PHC 杭のせん断載荷試験を行った結果、センサは杭のせん断損傷の検知に有効に働くことが分かった。せん断ひび割れに対するセンサの応答は、曲げによる損傷検知の場合に比較して同程度かやや大きい抵抗変化を示した。試験結果から、センサがせん断ひび割れ発生後には応答を開始すること、せん断耐力に達する前に明確なアラームを発することを確認することができた。また、開発したセンサが曲率を持った構造部材や部材の接合部のような屈曲部に対しても適用可能性を持つことが分かった。

最後に、開発したモニタリング手法の実構造物への適用を図り、実用化の可能性と課題を検討した。はじめに、一般的な基礎構造のモニタリングに対して有効な知見を得ることを目的に、センサの配置計画やセンサの設置・信号ケーブルの配線などの設置作業のフローをまとめ、留意点を整理した。センサの配置や信号ケーブルの配線に係わる計画・作業では、基礎工事の計画や作業の状況に対して十分な検討が必要である。そして、実際にセンサシステムの設置を行った幾つかの事例について計画や作業の内容と課題を整理した。さらに、基礎構造へのモニタリング技術の適用に係わる課題とその解決方法についてまとめを行った。杭製作時のセンサの取付けについては、提案するセンサは軽量かつ単純な形状のため、取り扱いが容易で、数人の作業者によって短い時間での取付けが可能であった。実証試験を通じてセンサの損傷は観察されず、センサの耐久性・頑丈さ、及び提案するモニタリング手法の実用性が確認できた。また、基礎躯体内の信号ケーブル配線では、被覆ケーブルや場合によっては保護管を利用することにより、破損への対策が十分可能であった。またテストを用いた導通テストにより、センサ・ケーブルの異常を容易にチェックすることができた。今後の展開としては、幾つかのモニタリングシステムや施工時計測や維持管理の検査システムと統合を図った総合的な監視システムの構築が有効であると考えられる。

開発した損傷検知手法は、取り扱い易さと計測・判断の容易さから、杭に限らない幅広いコンクリート構造への適用が期待される。このような用途の拡大を視野に入れた検討として、RC 橋脚への適用を図り、一般的な RC 部材の損傷検知性能に関する検討を行った結果も付録として示している。RC 橋脚の曲げ試験では、センサの応答開始荷重は鉄筋降伏の発生荷重と一致しており、RC 部材の鉄筋が降伏に達するような損傷はセンサにより十分検知が可能であることが分かった。また、センサの応答は局所的に生じるひび割れ等のように、ある一つの大きな変形・損傷の発生をきっかけに始まること、損傷が進展したときのセンサの抵抗変化、またその後の除荷時の残留抵抗変化は、センサ長さ内に発生する変形・損傷の合計によって決められることを明らかにしている。

## 論文審査結果の要旨

1995年兵庫県南部地震では、掘削調査によって杭基礎の損傷が少なからず確認されたことから、今後、目視に頼らない損傷検知手法や損傷判断基準の必要性が強く指摘されている。本論文は、炭素繊維を用いた構造ヘルスマニタリングとしてコンクリート杭の損傷検知手法を開発し、実用化を図ったものであり、全編6章より構成される。

第1章は序論である。

第2章では、建設分野におけるモニタリング技術の適用と、杭の損傷検知手法について既往の研究の調査を行い、基本的な考え方や損傷検知に要求される特性をまとめている。その結果、炭素繊維を検知材として用い、電気抵抗を計測することによって損傷を検知する手法が最適であることを明らかにしている。

第3章では、ピッチ系の炭素繊維を用いたセンサを開発し、安定した特性と良好な記憶性能を有することを引張試験によって確認している。また、コンクリート中でのセンサの抵抗変化に関する評価モデルを提案するとともに、ひび割れ幅が0.4mm程度に広がるとセンサは抵抗変化を生じること、10cm程度の有効長さの範囲の平均歪みに対して応答していることなどを実験的に見出ししている。

第4章では、杭の損傷度の分類と損傷検知の要求性能を定義し、センサを内蔵したPHC杭に対して曲げ試験を行い、損傷検知性能を確認している。すなわち、損傷程度が有意なレベルに達するとセンサは応答を開始し、破壊に近づくとき明確なアラームを発すること、残留抵抗変化率により杭の損傷程度の推定が可能であることを明らかにするとともに、杭の損傷度判定や、補修の必要性の判断基準の構築を図っている。また、せん断試験を行うことで、センサは杭のせん断損傷の検知にも有効であることを見出ししている。

第5章では、幾つかの実構造物へ適用した事例から得られた成果をまとめ、提案するモニタリング手法の実用性を確認している。またセンサの配置計画や設置作業のフローを整理し、基礎構造のモニタリングに関する考え方や留意点を明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は杭の損傷検知手法を開発し、その有効性を確認するとともに実用化したもので、地震時における基礎構造の安全性に資する上で建築構造学ならびに耐震工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。