

	はまだ	じゅんじ
氏 名	濱 田	純 次
授 与 学 位	博士 (工学)	
学位授与年月日	平成14年4月10日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項	
最 終 学 歴	平成4年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了	
学 位 論 文 題 目	斜杭式栈橋の大地震時挙動と耐震性能設計に関する研究	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 杉村義広	東北大学教授 山口育雄
	東北大学教授 風間基樹	

## 論 文 内 容 要 旨

兵庫県南部地震(1995)以降, 港湾構造物は, 耐震性をより高める必要性が叫ばれると同時に, より低コスト, 短工期であることのニーズが高まってきている. 更に, 今後大型コンテナ船の増加に伴い大水深コンテナバースの需要も増加し, 地震時等の水平荷重に対して水平変位や杭頭曲げモーメントを小さくできる斜杭式栈橋の需要は非常に大きい.

しかし, 斜杭式栈橋は, 斜杭の引抜き抵抗が保持できなくなった後, 杭に曲げモーメントが発生する過程, 地盤の支持力喪失の過程, ひいては斜杭の破壊, 栈橋全体の崩壊といったメカニズムが複雑である. これらメカニズムが未だ解明されていないため, 大地震の際, 斜杭式構造は設計者が安心して設計できる構造には必ずしもなっていない. そして, 斜杭は, 杭頭部に発生する曲げモーメントを小さくすることによって, 合理的な構造となっているが, 杭の靱性を考慮した設計を行うに当たっては, 軸力で破壊した場合の杭靱性の評価の問題や, 杭の引抜き抵抗, 地盤の支持力等の大きさにより破壊パターンが異なるという問題がある.

設計法として, 日本では, 直杭式栈橋に関しては, 実験および解析を通じ, 1999年4月の港湾基準の改定によりレベル1およびレベル2地震動に対する耐震性能の照査方法が確立・導入されている. しかし, 斜杭式栈橋については, 性能設計の際, レベル1, レベル2地震動に対して何をクライテリアにすべきかが定まっておらず, 地震応答特性・破壊形式など現象解明に基づき, かつ直杭式栈橋との整合性を考慮した耐震設計法の導入が強く要請されている.

杭材料に関しては, 海外では, 古くから港湾・海洋構造物の基礎として既製コンクリート杭(PC杭, PHC杭)が比較的多く利用されてきたものの, 国内においては鋼管杭が主であり, コンクリート杭は殆ど見られない. 直杭式栈橋では, 水平荷重により杭頭部に大きな曲げモーメントが発生し, また施工性の点からも鋼管杭の方が有利である場合が多い. しかし, 斜杭式構造とすることにより地震時などの水平力に対して杭の軸力で抵抗し, 杭頭に発生する曲げモーメントを小さくできるため既製コンクリート杭を有効に使える可能性がある. これらに対して明確な設計法を確立させることにより, 安価な杭を安心して使え, 設計の自由度も増すものと期待できる.

斜杭式構造を採用するにあたって, 施工性の問題も設計者の関心事の一つと思われる. しかし, 近年, 杭打設船の能力とハンマーの改良により施工性の問題は少なくなっており, この構造は, 今後益々,

大水深、高耐震性の栈橋に採用されるものと思われる。

以上のように斜杭式栈橋の利点・需要は高いものの、大地震時の挙動が明らかにされておらず、性能設計法としても未完成である。本論文では、斜杭式栈橋の耐震性について、模型振動実験および弾塑性解析により検討し、斜杭式栈橋の振動特性に及ぼす地盤震動の影響、地盤剛性の影響、杭の傾斜角の影響、引抜き抵抗の影響、杭材料の影響を明らかにしている。さらに、設計方針として地盤震動の影響を適切に評価し設計法に取り入れることとし、2質点3ばねモデルを用いて地盤震動の影響を設計に取り入れる方法を提案している。以下に、各章の主要な内容を要約する。

第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、道路橋、鉄道橋、港湾構造物やエネルギー施設が独自の考え方で設計法が確立されており、各設計法の特徴について調査し、既往の研究についてもレビューしている。また、杭の傾斜角の有効範囲を示している。得られた主な結論を以下にまとめる。

斜杭の被災は地盤変位により生じており、上部工の振動のみによる被災例は見られない。そして、海外での斜杭の被災例は、杭頭部の接合部でひび割れ、破壊が生じるメカニズムとなっている。その被災の原因は、設計時には考慮されていなかった地盤変位による曲げモーメントが作用したためと考えられる。また、斜杭式構造物の振動特性は、地盤震動の影響を受けている。しかし、地盤震動の影響を考慮した設計法は、動的解析による方法以外殆ど見られない。

斜杭式構造は、水平力に対して杭頭曲げモーメントや水平変位は小さくなるものの、常時荷重である鉛直力に対して杭頭曲げモーメントが発生し、傾斜角を大きくすることが必ずしも有利な構造ではない。施工性も考慮すると杭の傾斜角25度程度が有効な最大傾斜角と考えられる。

第3章では、斜杭式栈橋の模型振動実験について述べている。実験は、1/30に縮尺した杭の傾斜角25度の模型を用いて行っている。実験の結果より、斜杭式栈橋の動的応答特性を把握し、線形応答スペクトル法を設計法として採用する際の設計震度を算定している。また、地盤変位が杭に及ぼす影響を把握している。得られた主な結論を以下にまとめる。

斜杭式栈橋の上部工の応答は、斜杭式栈橋自身の固有周期と地盤の固有周期の影響を受けている。杭頭軸力と上部工加速度、杭頭曲げモーメントと地表面変位に強い線形関係が見られる。その結果、杭に発生する応力は、主に軸力による影響が大きいが、地盤が大きく揺れる振動モードでは、曲げモーメントによる応力が大きくなる。

第4章では、線形解析により実験結果のシミュレーションとパラメトリックスタディを行い、杭断面応力や上部工応答に及ぼす杭の傾斜角の影響、地盤変位の影響、地盤剛性の影響、地震波スペクトルの影響について検討している。また、地盤の影響を考慮して斜杭式栈橋の応答スペクトルを求める

ことができる2質点3ばねモデル(図-1)を提案し、詳細モデルによる動的解析と比較している。得られた結論は以下の通りである。

杭頭部の曲げモーメントは、上部工の慣性力ではなく、地盤変位に影響される。そのため、杭の傾斜角を変化させると、上部工の加速度応答や、斜杭に発生する軸力は変化するものの、傾斜角15度以上では、杭頭曲げモーメントは、地盤変位が変化しな

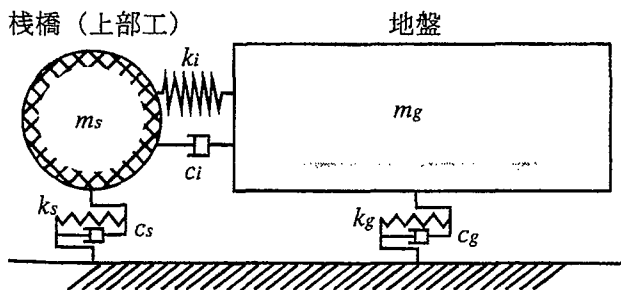


図-1 2質点3ばねモデル

いのであまり変化しない。静的解析結果からも、上部工変位と杭頭曲げモーメントは、極めて高い相関が見られ、重複反射理論などを利用して、自由地盤の最大変位を算定すれば、杭頭曲げモーメントを推定することができると考えられる。それに比べて、杭頭軸力への地盤変位の影響は小さい。斜杭式栈橋にとって地盤変位の曲げモーメントに対する影響は、直杭式栈橋の2倍程度である。

また、地盤の固有周期が栈橋の固有周期より短い場合、あるいは地盤と杭の周面摩擦が小さい場合には、上部工の応答加速度が、1質点系の加速度応答スペクトルにより推定できるが逆の場合には、地盤もモデル化した2質点3ばねモデルを用いないと、上部工の応答加速度を精度よく推定することはできない。地盤と栈橋の位相差は、入力地震波周期と地盤の固有周期および栈橋の固有周期の関係で決まり、入力地震波周期が栈橋と地盤の固有周期の間であれば逆位相となる。その位相差も2質点3ばねモデルで求めることができる。

第5章では、弾塑性解析により、杭および地盤が破壊に至るパターンとその条件について検討している。検討する杭材料は、鋼管杭とPHC杭であり、破壊パターンが異なることを考察している。また、地盤変位の影響を考慮したプッシュオーバー解析結果と動的弾塑性解析の結果の比較を行っている。得られた結論を以下にまとめる。

鋼管杭の場合、地盤変位を有していても杭材の曲げ耐力に余裕があるため、杭頭のみ載荷した場合とよく似た破壊形態を示すが、PHC杭の場合、地盤変位の有無により破壊形態が異なる。動的弾塑性解析による斜杭式栈橋の水平剛性は、引抜きが生じる前までは、地盤変位を考慮したプッシュオーバー解析結果と極めて似通っているが、引抜きを伴う大地震時の破壊形態は、地盤のみ載荷したプッシュオーバー解析結果（地盤の震動モード）に近い。また、線形動的解析結果をニューマークのエネルギー一定則を用いて、プッシュオーバー解析の塑性時に換算することによって、動的弾塑性解析の上部工水平変位、水平加速度をある程度、算定することができる。

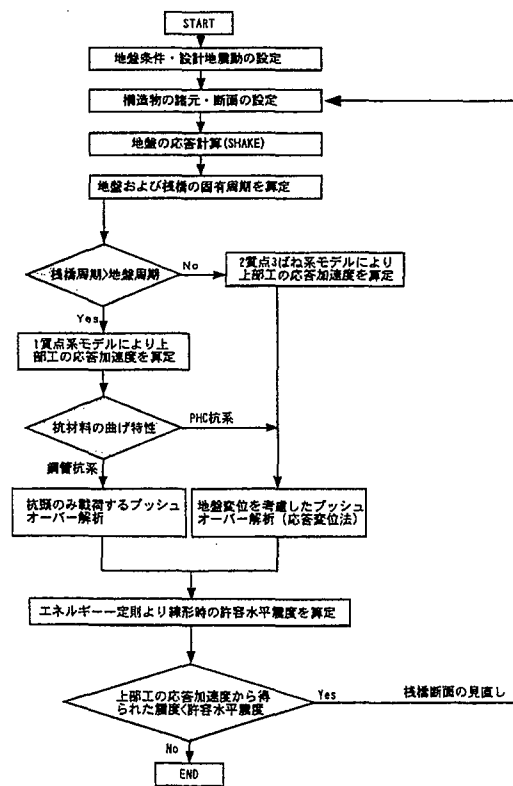


図-2 設計フロー

第6章では、斜杭式栈橋の耐震性能設計法として、2質点3ばねモデルを用いた応答スペクトル法と応答変位法を組み合わせた簡便な設計方針を示している。主な結論を以下にまとめる。

提案する設計フローを図-2に示す。斜杭式栈橋の耐震性能照査をする際、栈橋の固有周期が地盤の固有周期より長い場合、慣性力が主体となるであろうから、従来通りの1質点応答スペクトルを用いて上部工の応答加速度を算定しても良いものとする。しかし、地盤の固有周期の方が栈橋の固有周期より長い場合、地盤震動の影響が大きいと考えられるので、2質点3ばねモデルによる応答スペクトルを用いるものとする。

また、杭部材が曲げ変形性能がそれほど高くないPHC杭などの場合、地盤変位によって杭が降伏する可能性が高いと考えられるので、応答変位法などにより杭断面の検討を行うものとする。

第7章では、以上を総括し結論としている。

## 論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	濱 田 純 次
論 文 題 目	斜杭式栈橋の大地震時挙動と耐震性能設計に関する研究
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 杉村 義広      教授 山口 育雄 教授 風間 基樹

### 論文審査結果の要旨

兵庫県南部地震（1995）の経験以来、港湾構造物はより高い耐震性を持つことが必要であると指摘されており、今後大水深コンテナバースが増加する状況にある中で、地震時に生ずる杭の応力や変位を小さく留めることができる斜杭式栈橋の需要は非常に大きくなっている。しかし、この構造は地盤の支持力喪失を含む崩壊メカニズムが複雑で、かつ未解明であるため、大地震の際に設計者が安心して採用するまでには必ずしも至っていない。さらに、1999年の港湾基準の改定では、直杭式栈橋にはレベルに応じて耐震性能の照査方法が導入・確立されているのに対して、斜杭式栈橋については触れられておらず、同格の耐震設計法の導入が強く要請されている現状にある。

本研究はこの点に鑑み、大地震時を想定した模型振動実験と弾塑性解析を通じて地盤との相互作用を考慮した斜杭式栈橋の挙動を解明するとともに、その設計法を提案したもので全編7章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、既往の設計法について考察し、道路橋、鉄道橋、港湾構造物、エネルギー施設などは、それぞれ独自の考え方で設計法が確立されていることをレビューし、それぞれの分野における斜杭に関する研究の特徴と問題点を比較検討している。また、以降の考察の予備段階として傾斜角が杭の応力や変位に対する影響について検討し、本論文で対象とすべき最大傾斜角を $25^\circ$ と見出し出している。

第3章では、斜杭式栈橋の模型振動実験について述べている。その結果、栈橋上部工の応答は地盤の影響を大きく受けること、傾斜角が $25^\circ$ の斜杭の場合にはほとんど軸力のみで抵抗していること、杭頭軸力は上部工の加速度と、杭頭曲げモーメントは地表面変位と強い線形関係があること、など新しい知見を得ている。

第4章では、線形解析により第3章の実験のシミュレーションを行うとともに、パラメトリックスタディによって、杭の応力や栈橋の応答に及ぼす杭傾斜角の影響、地盤変位の影響、地盤剛性の影響、入力地震波の影響などについて検討している。とくに簡便な2質点3ばねモデルを新たに提案し、地盤の影響を考慮した斜杭式栈橋の応答スペクトルが求められることを示し、詳細モデルによる動的解析ともよく対応する結果が得られることを検証することで提案モデルの有効性を確認している。

第5章では、杭種や傾斜角を変化させた弾塑性解析によって斜杭の引抜き抵抗が保持できなくなった後に杭頭曲げモーメントが増大して破壊に至るメカニズムを考察している。また、4章で提案した2質点3ばねモデルを非線形モデルに拡張して、地盤変位の影響を考慮しながら杭の引抜きを表現できる有効な解析法であることを検証している。

第6章では、以上までに検討してきた結果から、簡便な設計法として2質点3ばねモデルによる解析を設計法として提案している。

第7章では、総括的に結論を述べている。

以上要するに本論文は、斜杭式栈橋の大地震時挙動を実験および解析によって明らかにし、簡便な2質点3ばねモデルが地盤震動の影響を適切に考慮して上部工の応答を評価できることを示すことで耐震性能設計法として提案したものであり、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。

### 学力確認結果の要旨

平成14年3月18日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は耐震工学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

## 論文審査結果の要旨

兵庫県南部地震（1995）の経験以来、港湾構造物はより高い耐震性を持つことが必要であると指摘されており、今後大水深コンテナバースが増加する状況にある中で、地震時に生ずる杭の応力や変位を小さく留めることができる斜杭式栈橋の需要は非常に大きくなっている。しかし、この構造は地盤の支持力喪失を含む崩壊メカニズムが複雑で、かつ未解明であるため、大地震の際に設計者が安心して採用するまでには必ずしも至っていない。さらに、1999年の港湾基準の改定では、直杭式栈橋にはレベルに応じて耐震性能の照査方法が導入・確立されているのに対して、斜杭式栈橋については触れられておらず、同格の耐震設計法の導入が強く要請されている現状にある。

本研究はこの点に鑑み、大地震時を想定した模型振動実験と弾塑性解析を通じて地盤との相互作用を考慮した斜杭式栈橋の挙動を解明するとともに、その設計法を提案したもので全編7章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、既往の設計法について考察し、道路橋、鉄道橋、港湾構造物、エネルギー施設などは、それぞれ独自の考え方で設計法が確立されていることをレビューし、それぞれの分野における斜杭に関する研究の特徴と問題点を比較検討している。また、以降の考察の予備段階として傾斜角が杭の応力や変位に対する影響について検討し、本論文で対象とすべき最大傾斜角を $25^{\circ}$ と見出ししている。

第3章では、斜杭式栈橋の模型振動実験について述べている。その結果、栈橋上部工の応答は地盤の影響を大きく受けること、傾斜角が $25^{\circ}$ の斜杭の場合にはほとんど軸力のみで抵抗していること、杭頭軸力は上部工の加速度と、杭頭曲げモーメントは地表面変位と強い線形関係があること、など新しい知見を得ている。

第4章では、線形解析により第3章の実験のシミュレーションを行うとともに、パラメトリックスタディによって、杭の応力や栈橋の応答に及ぼす杭傾斜角の影響、地盤変位の影響、地盤剛性の影響、入力地震波の影響などについて検討している。とくに簡便な2質点3ばねモデルを新たに提案し、地盤の影響を考慮した斜杭式栈橋の応答スペクトルが求められることを示し、詳細モデルによる動的解析ともよく対応する結果が得られることを検証することで提案モデルの有効性を確認している。

第5章では、杭種や傾斜角を変化させた弾塑性解析によって斜杭の引抜き抵抗が保持できなくなった後に杭頭曲げモーメントが増大して破壊に至るメカニズムを考察している。また、4章で提案した2質点3ばねモデルを非線形モデルに拡張して、地盤変位の影響を考慮しながら杭の引抜きを表現できる有効な解析法であることを検証している。

第6章では、以上までに検討してきた結果から、簡便な設計法として2質点3ばねモデルによる解析を設計法として提案している。

第7章では、総括的に結論を述べている。

以上要するに本論文は、斜杭式栈橋の大地震時挙動を実験および解析によって明らかにし、簡便な2質点3ばねモデルが地盤震動の影響を適切に考慮して上部工の応答を評価できることを示すことで耐震性能設計法として提案したものであり、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。