

氏 名	あさ の てる お 浅 野 照 雄
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 59 年 1 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 45 年 3 月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	ケーソン・橋脚の地震応答に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐武 正雄    東北大学教授 尾坂 芳夫 東北大学教授 倉西 茂    東北大学教授 柳沢 栄司

## 論 文 内 容 要 旨

橋梁基礎として、ケーソン基礎は杭基礎に次いで多く用いられる代表的な形式である。ケーソン基礎は一般に地盤が比較的軟弱であり、基礎を支持する地盤が比較的浅い場合、上部構造の総重量が比較的大きい場合に選択される。地盤が軟弱であるために地震波の増巾が大きく、かつ、地盤の支持力も小さいので、過去において、地震の際、ケーソン基礎の傾斜および橋脚・支承部の亀裂・破損等の震害が発生した。過去の震害を教訓として、耐震設計法がつくられ、改良が加えられて来たが、宮城県沖地震の被害例にもみられるように、未だ検討すべき問題が残されているように思われる。

従来、ケーソン橋脚の耐震設計では、地震時に基本モードが卓越するとして解析が行われていた。しかし、橋脚は質量の大きいケーソンと上部構の間にはさまれた構造体であり、両者の振動性状によって大きな影響を受けると考えられるから、ケーソン・橋脚の耐震性を解析するためには、是非とも、地盤および上部構の挙動を関連させた、ケーソン・橋脚の地震時応答特性を明らかにすることが必要であると思われる。

このような観点から、本研究は、実橋梁を対象に、地盤・ケーソン・橋脚・上部構の同時多点地震観測を行い、ケーソン・橋脚の地震時応答性状を調べ、特に、地盤・上部構との関連性を明らかにして、ケーソン・橋脚の応答解析のためのモデル化に関して新しい知見を得ることを第一の目的としている。また、有限要素解析における境界処理のために無限要素の応用などを検討し、ケーソン

ン・橋脚の地震応答解析について有用な知見を得ることを目的としている。

本論文は7章から構成されている。

## 第1章 序 論

本章では、本研究の意義と目的について述べている。

## 第2章 従来の研究

本章では、ケーソン・橋脚の振動性状に関する従来の理論的研究、実験・実測に基づいた研究、有限要素解析による研究などについての概要について述べている。即ち、ケーソン・橋脚の振動性状に関する従来の研究の多くは、定常振動を念頭において行われ、かつ、ケーソン基礎と地盤との動的相互作用に重点をおいていたため、上部構の振動特性を考慮した解析が少なかったこと等について述べ、本研究の位置づけを行った。

## 第3章 地震観測の概要

本研究においては、ケーソン・橋脚の地震時振動性状を明らかにするために、宮城県内の地盤・構造形式の異なる二つの橋梁について、地盤・ケーソン・橋脚・上部構の同時多点地震観測を行った。本章では、観測の対象にえられた新飯野川橋（3径間連続鋼床版箱桁2連、支間73.2m）および広瀬川水管橋（ランガー桁、支間103.25m）について、橋梁および周辺地盤の概要、および地震観測の概要について述べる。なお、新飯野川橋については、上部構架設前から観測を行い、上部構架設による下部構の応答性状への影響についての考察を行った。

## 第4章 ケーソン・橋脚の応答性状

本章では、地震観測によって得られた地盤・ケーソン・橋脚・上部構における地震記録について、フーリエスペクトル解析・相関解析などを行い、ケーソン・橋脚の地震応答特性、即ち、卓越周期・周波数伝達特性・減衰定数・最大加速度・振動モード・応答の経時変化などについて、地盤と上部構との関連性を検討しながら解析した。得られた主な知見は次の通りである。

- 1) ケーソンにおいては、地盤または地震波の周期特性を反映した周期特性を示すことが多いが、橋脚では、表層地盤の固有周期、および上部構の拘束が大きい場合には上部構と連成した固有周期が卓越し、これらの周期は地震波の周期特性によって選択される傾向があることが明らかとなった。地震波の周期特性は、一般に震央距離の大小によって変わると思われるが、橋脚で卓越する周期は、震央距離の大小で異なることが認められた。
- 2) 橋脚においては、上部構の拘束が大きい場合、上部構を含めた全体系の固有周期が卓越し、一方、ケーソンでは、地盤の地震波の周期特性を反映した周期が卓越するため、ケーソンと橋脚との卓越周期が異なる場合があり、このことは、地盤種別がⅡ程度で良質な場合に認められた。地盤種別がⅢ～Ⅳ程度の軟弱な地盤では、上部構の効果がケーソン底部にまで及ぶことが認められた。

- 3) 橋脚の応答において、基本モード以外も卓越することがあり、この傾向は、短周期成分の卓越する近距離地震の場合に生じ、橋軸直角方向において著しい。このことは、ケーソン・橋脚のモデル化において、上部構の振動特性をも考慮しなければならないとを示している。なお、現行の耐震設計法では、橋脚に対して卓越するモードとして、橋脚の基本モードを考えるように定めているので、橋脚において、高次モードが卓越する場合は、耐震設計法において検討すべき一つの課題であると思われる。
- 4) ケーソン・橋脚の周波数伝達特性は、基本モードに対応する周波数の増巾が大きいが、橋軸直角方向では、高次モードでも比較的大きな増巾を示すことが認められた。
- 5) ケーソンと橋脚の加速度応答倍率は、上部構の拘束のある場合、地震波周期特性によって若干異なり、遠距離地震（震央距離 120 km 以上）の方が、近距離地震より大きくなる傾向がある。これは、全体系の一次モードに相当する固有周期と地震波の卓越周期とが近い値となるためと思われる。
- 6) 橋脚において、橋軸方向と橋軸直角方向の最大加速度は、上部構の拘束の大きい場合、橋軸直角方向がやや大きくなる傾向を示す。
- 7) 橋脚の最大加速度  $a_p$  とケーソン底部の最大加速度  $a_c$  の間には、 $a_c$  が 50 gal 程度までの範囲では
 
$$\log a_p = \alpha + \beta \log a_c$$
 の関係が得られる。上部構の拘束の小さい場合の  $\beta$  はほぼ 1.0 となったが、上部構が連続桁である場合、橋軸直角方向の  $\beta$  は 0.84 となり、ケーソンと橋脚の加速応答倍率はケーソンの最大加速度に依存する非線形性を示すことが認められた。これらの結果は、地表地盤と橋脚の最大加速度に関する他の橋梁の例と比較し、ほぼ同一であることがわかった。
- 8) ケーソン底部とケーソン支持地盤の最大加速度を比較すると、ケーソン支持地盤の方が大きくなる傾向があり、地盤の加速度が 20 ~ 30 gal 程度で約 2 倍程大きくなることがわかった。
- 9) ケーソン・橋脚の卓越周期に対する地震のマグニチュードの影響は、同一震源区域の地震と比較すると、橋脚における全体系の固有周期に対応する周期のスペクトルにあらわれ、マグニチュードが大きくなると長周期のスペクトルが大きくなる傾向がある。
- 10) 上部構の拘束が大きい場合、ケーソン・橋脚、特に、橋脚において、一つの地震外力を受けて振動している間に、二つのモードに対応する周期が卓越してあらわれる場合があることが認められた。これは、地震波の周期特性の経時変化に対応して生ずる現象と考えられる。

## 第 5 章 上部構築による振動特性の変化の考察

本章では、ケーソン・橋脚の振動特性が上部構の架設前後でどのように変化するかについて、観測結果を述べ、一方、バネ・質点系 4 自由度モデルに基づく振動解析により考察した。その結果は次の通りである。

- 1) 上部構築により、ケーソン・橋脚の基本モードに対する周期は長くなる。
- 2) 上部構築により、ケーソンと橋脚の加速度応答倍率は僅かに小さくなる傾向がある。
- 3) 上部構築により、ケーソン・橋脚のフーリエスペクトル比から求めた減衰定数は若干増加し

た。この傾向は、従来、振動試験によって得られている傾向と異なっている。

## 第6章 ケーソン・橋脚の地震応答解析とその考察

本章では、ケーソン・橋脚の地震応答解析を有限要素法によって行い実測結果と比較した。また、解析の折、問題となる半無限地盤の境界処理などについて検討し、Bettessの提案した無限要素の導入を試み、無限要素のパラメータの性質に関する考察を行った。また、ケーソン基礎を有する橋脚の地震応答性状の特徴を杭基礎の場合と比較して考察し、地震被害との関連を検討した。主な結果は次の通りである。

- 1) ケーソン橋脚・地盤系の有限要素法による地震応答解析において、線形二次元平面歪問題として取扱った結果、ケーソン橋脚の固有振動が励起された場合、橋脚最大加速度は計算値の方が実測値より小さくなった。減衰は実測値によるものを用いており、共振時のケーソン・地盤の相互作用を充分反映したモデル化が必要であると思われる。
- 2) ケーソン橋脚・地盤系の有限要素法による地震応答解析において、Bettessの提案した無限要素を導入して解析を行った結果、橋脚の最大加速度は実測より小さくなったが、その他は、実測とよい一致を示し、無限要素の動的問題への適用の有効性が示された。
- 3) Bettessの提案した無限要素を6節点四角形要素とした場合、地盤の振動解析へ適用した結果、要素内の中間節点の座標や、形状関数に含まれる指数減衰長の大きさは、解析結果に大きな影響を与えることがわかった。即ち、6節度四角形の無限要素の性質は次の通りである。
  - a) 無限要素内の中間節点の座標はなるべく大きくとった方が、形状関数に含まれる指数減衰長の選び方による影響を小さくすることができる。
  - b) 中間節点の位置を変化させて地盤の固有振動数が厳密解と一致するようにした場合、中間節点の座標と指数減衰長との比は、中間節点の座標が大きくなると一定値に収束する。
- 4) ケーソン基礎を有する橋脚の地震応答解析により、橋脚の水平・鉛直の最大歪は、橋脚の基部で生ずる傾向があり、これは、震害が橋脚の基部で生ずる場合が多いことにより対応をしている。一方、橋脚の基部の水平最大伸び歪に対する鉛直方向の最大伸び歪の割合は、杭基礎の場合と比較し、ケーソン基礎を有する橋脚の方が大きくなる傾向がみられた。

## 第7章 結 語

本章では、本研究で得られた結果について要約している。

## 審 査 結 果 の 要 旨

ケーソン基礎をもつ橋脚は数多くつくられているが、その耐震設計の基礎となる地震時の振動性状・応答特性については、未だ十分に解明されているとはいえない。本研究は、実橋梁について地震観測を行って、ケーソン・橋脚の地震応答の性質を詳細に検討するとともに、地震応答解析のためのモデル化の問題点を考察し、ケーソン・橋脚の耐震設計に資することを目的としたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、従来の研究について述べ、この研究の背景と意義とについて述べている。

第3章では、この研究に関して行った二つの実橋梁における地震観測の内容を説明している。この観測では、ケーソン底部、橋脚頂部の他に、周辺地盤や上部構造においても同時観測を行い、応答の相関性を求めているのが特色である。

第4章では、地震観測によって得られた結果とその考察を述べている。すなわち、ケーソン・橋脚の卓越周期・周波数伝達特性・減衰定数・最大加速度・振動モード・応答の経時変化などについて詳細な検討を行い、地盤や地震の性質の影響を明らかにするとともに、上部構造の影響を分析し、その支持条件に依存する性状の差異を見出している。また特に、耐震設計計算に用いられる橋脚の卓越周期について、上部構造との連成モードを考慮する必要性とその条件を指摘している。さらに、ケーソン底部と橋脚頂部における最大加速度の間の関係式を与え、その非線形性などについて考察している。これらは重要な知見である。

第5章では、上部構造の架設によるケーソン・橋脚の振動特性の変化を、実測結果と質点系モデルによる解析との両面から検討し、卓越周期・加速度応答倍率などの変化の性状を明らかにしている。

第6章では、半無限地盤の中におかれたケーソン・橋脚系の応答計算について、モデル化に関する問題点を述べ、有限要素解析における「無限要素」の適用性について検討し、そのパラメーターを定める新しい手法を提示している。また、モデルによる応答波形を実測のものと比較して、モデル化の妥当性を示している。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文はケーソン・橋脚の地震応答について、詳細な実測結果に基づいて多くの新しい知見を得るとともに、応答解析についても新しい手法の有効性を示したもので、地震工学、土木工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。