

氏 名	ANAWAT CHOTESUWAN		
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)		
学位記号番号	博理工甲第 836 号		
学位授与年月日	平成 23 年 3 月 23 日		
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
学位論文題目	Seismic Behavior of Reinforced Concrete Bridge Piers and Foundations After Strengthening (耐震補強された鉄筋コンクリート橋脚と基礎の地震性状)		
論文審査委員	委員長	教授	睦好 宏史
	委員	教授	岩下 和義
	委員	准教授	齊藤 正人
	委員	准教授	牧 剛史

論文の内容の要旨

An effect of pier and foundation strengthening on response of bridge was clarified in this research. It was motivated by a fact that seismic retrofit of bridges in Japan was generally carried out by allowing enhancement of pier flexural strength. This corresponds to a higher load demand in their foundations. As a result, the foundations may get damaged, and there may be some bridges which require retrofitting of the foundations.

In this study, a method based on the pseudo-dynamic test (PSD test) was proposed for seismic performance evaluation of bridge pier and foundation. In this method, a bridge is idealized by three degrees of freedom (3-DOF) model, which is simple yet includes an interaction between pier and foundation. There are three terms of displacements considered in this model which are: 1) lateral displacement at pier top; 2) lateral displacement at footing; and 3) rotation of footing. In addition, the pier restoring force is represented by a pier spring, while sway and rocking springs are used to represent the restoring force of the foundation.

The proposed PSD test method was implemented to investigate behavior of a bridge with pier and foundation strengthening. Two foundations with different soil profiles were considered as representatives for foundations in hard and soft soil conditions. The PSD tests were firstly carried out using pier as an experimental part as to check a consistency of the developed system. The results confirmed the consistency as they agreed well to additional analyses where load-displacement relationships of the piers applied bi-linear models instead of conducting the experiments. In addition, the results also validated damages in the foundations if the piers were strengthened. Increases in both sway and rocking responses of the foundations were observed in both cases of bridges in hard and soft soil conditions. For soft soil case, the increase in foundation response only concentrated to its sway motion. This was according to a fact that foundations in soft soil normally applied lengthy piles which contributes to high load carrying capacity against rotation. On the other hand, increases in both sway and rocking movements were observed in the case of hard soil. Additionally, a simple

modification in the standard penetration value of the top soil strata showed that the ground improvement may be possible to mitigate seismic damage in foundations. However, higher pier response will be induced as a result of stiffer ground.

Other two PSD tests were carried out with experiments conducted on foundation specimens. A normal foundation and a strengthened foundation were the considering parameters in these tests. Two large scale piles of 0.30 m diameter were installed underneath each foundation specimen. Strengthening of foundation was carried out using a combination of sheet pile and soil improvement.

The test on the non-strengthened foundation simulated a condition of bridge with pier strengthening. A high level of pile curvatures confirmed the damage in piles. It was also observed that loading demand of the foundation is higher than that of the pier. In addition, another test on the strengthened foundation verified an effectiveness of foundation strengthening as extremely low curvatures were observed in the piles.

Parametric analyses were also carried out in order to understand the behavior of bridge with varying pier-to-foundation capacity ratios. The results showed that a sharp increase in foundation response initiates at the capacities ratio about 0.75 (pier-to-foundation capacity). In addition, the foundation started to suffer a higher damage than the pier since the ratio between their capacities of about 0.85. It is also found that the stronger the foundation capacity, the lower the damage occurred.

Another parametric analysis was conducted to clarify behavior of bridge with increasing foundation capacity. The results showed that there exists a bounding tendency of loading capacity demand for the foundation. It was also found from the results that the foundations completely bounded to their limited values since the capacity of foundations were twice that of the piers.

Two-dimensional finite element analyses of bridge piers and foundations were also carried out. It was observed that the hard soil condition yields a larger effective acceleration input to the footing than another case of soft soil. However, estimations of capacities showed that the previously used hard soil foundation is much stronger than the soft soil one. The dynamic analyses of whole bridge showed that the inertial interaction dominates the response of a bridge. The kinematic interaction contributed mainly to the pile response at large depth from ground surface. The results also showed that the soft soil foundation suffered more damage in its piles comparing the one with hard soil. In addition, the analyses confirmed an effectiveness of the foundation strengthening for soft soil foundation. However, a large increase in pier response which induced a large load in the foundation was observed in the hard soil case, which shows that attentions must be paid to balance between the capacities of pier and foundation.

The research concluded that foundation damage as a result of pier strengthening is really possible. To prevent such foundation damage, a ratio of the pier-to-foundation yield loads of 0.75 is recommended in a selection of a strengthened pier capacity. This condition was a point where foundation starts accelerating its response towards the increasing pier capacity. On the other hand, at least two times higher than the pier capacity is recommended for a capacity setup of a strengthened foundation. This was selected as a point where the bounding tendency is ensured in the response of foundation. However, it should be noted that ductility capacity of the pier must be confirmed along with the strengthening of foundation.

論文の審査結果の要旨

当論文の審査委員会は、平成 23 年 2 月 3 日に論文発表会を公開で開催した。その発表を含む論文審査結果を以下に要約する。

阪神淡路大震災以来、橋梁の耐震補強が精力的に行われてきた。鉄筋コンクリート（以下 R C）道路橋橋脚では、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」および同準用に関する参考資料（案）により耐震補強されてきた。これらによると、「橋脚躯体の地震時保有水平耐力を向上させると、大きな地震を受けた場合に、橋脚躯体から基礎構造物へ伝達される地震力も大きくなり、基礎も含めた大規模な補強が必要となる場合がある。したがって、基礎への影響を小さくするために、基本的にはできるだけ橋脚のじん性を向上させ、耐力が過度にならないような工夫が望ましい。」と記述されている。一般に、R C 橋脚の耐震補強は、曲げ耐力が増大しない構造となっているが、実際には、多くの場合、橋脚躯体の曲げ・せん断耐力が増大し、大きな地震が起きた場合には損傷が橋脚躯体から杭などの基礎構造物に生じ、甚大な被害が生じることが危惧されている。しかしながら、補強した R C 橋脚の基礎、地盤を含む全体系の地震応答性状および損傷部位とその程度などは解析あるいは実験的にほとんど明らかにされていない。場合によっては基礎の補強などが早急に必要となることが想定される。本研究は、補強された R C 橋脚が地震を受けた場合の応答性状を実験および解析的に明らかにするとともに、基礎にできるだけ損傷が生じない手法を提案し、検証することである。

本論文の概要と成果を示すと以下のようである。

第 1 章は、本研究の動機、背景、目的などが述べられている。

第 2 章は、地震動を受ける橋脚—地盤—基礎からなる構造系全体の地震応答を実験により求める手法（ハイブリッド実験）を開発した。すなわち、実験構造物が基礎の場合には、構造系を 3 自由度系に置換して、鉄筋コンクリート橋脚の復元力をモデル化する。地震波を入力してコンピュータにより 3 自由度系の地震応答解析を行い、基礎のスウェイとロッキングの変位を求めて、実験構造物に 2 台のジャッキで载荷を行う。次に実験から求まるスウェイとロッキングの復元力を用いてコンピュータで応答計算を行うものである。これにより、地震を受ける橋脚全体系の応答性状を逐一求めることができる。

第 3 章は、実験部材として、鉄筋コンクリート橋脚をモデル化した供試体を用い、基礎の復元力をモデル化した全体系の地震応答ハイブリッド実験を行った。その結果、耐震補強されていない橋脚では、橋脚に被害が集中するが、耐震補強され、橋脚の耐力が増大した場合には、基礎（杭）に損傷が移動することが明らかとなった。

第 4 章は、実験構造物を基礎とし、鉄筋コンクリート橋脚の復元力をモデル化してハイブリッド実験を行い、橋脚全体系の地震応答性状を求めている。実験構造物に直径 300mm、長さ 13m の実杭を 2 本施工し、その上に鉄筋コンクリート製フーチングを施工したものである。実験要因は、基礎の補強の有無の 2 ケースで、基礎の補強は、フーチングのまわりにシートパイルを打設して、地盤改良を行うとともに、フーチングをコンクリートで補強したものである。载荷方法は、2 台のジャッキを用いて、スウェイとロッキングの変位を制御して実験構造物に与えている。実験の結果、橋脚が補強され、基礎が補強されていない場合は、損傷は杭に生じ、その程度を定量的に把握することができた。一方、橋脚が補強され、杭が補強された場合には、杭には損傷が生じず、橋脚に塑性変形が生じることが明らかとなった。

第 5 章は、橋脚の耐力と変形性能、基礎の耐力と変形性能をそれぞれ変化させて地震応答解析を行い、地盤の硬軟により、橋脚と基礎の損傷程度を解析的に明らかにしたものである。これにより、橋脚と基礎の耐

力比により、損傷程度が明らかとなった。

第6章は、上述したハイブリッド実験結果と地盤、杭を2次元有限要素によりモデル化した解析結果とを比較し、解析精度などを検討した。その結果、両者は比較的一致することが明らかとなった。本解析手法を実構造物に適用して、地震応答解析を行い、橋脚と基礎の損傷程度を明らかにしている。

第7章は結論が述べられている。

本研究は、これまでほとんど明らかにされていなかった、耐震補強後の橋梁の地震損傷および橋梁全体の耐震性能を解析および実験により明らかにしたもので、本研究の成果は橋梁工学・地震関連分野において大きな一石を投じることが予想される。また、耐震補強のあり方についても警鐘をならすものであり、その意義は極めて大きいと考えられる。本研究成果は既に多くの学術論文集（Earthquake Engineering & Structural Dynamics、Proceedings of Japan Concrete Institute 等）に掲載予定あるいは掲載されている。

以上より、当審査委員会は本論文が博士（学術）の学位授与に十分値するものであると判断した。