

グラウンドアンカーにより補強した既設橋梁の 模型振動実験

梁 雨凡¹・清宮 理²・安 同祥³

¹学生会員 早稲田大学修士課程 大学院創造理工学研究科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
²フェロー 工博 早稲田大学教授 大学院創造理工学研究科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）
³正会員 工博 早稲田大学准教授 大学院創造理工学研究科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

橋梁は道路や鉄道網の重要な構成要素である。それらは地震によって損傷した場合には、地震の救援と復興に悪影響を及ぼす。特に、1995年に発生した兵庫県南部地震、2008年に発生した汶川地震、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震などが耐震設計された橋梁を含む多数のライフライン施設に深刻な被害をもたらした。地震被害を最小限に抑えるために、橋梁等の構造物の耐震性能を高める必要がある。既設橋梁は旧基準で設計されたので、現基準に要求された性能に満たさないケースが多く、耐震補強が急務となっている。

既設橋梁構造物の耐震補強は構造物の地震応答を低減する工法と構造物の耐力・変形性能を向上する工法がある。橋梁の地震応答を低減する工法として、固定支承や可動支承を弾性支承、免震支承に取り替え、またダンパー装置等を導入する工法がよく採用されている。橋梁の橋脚柱部材を鉄筋コンクリート、鋼板或いは繊維シート等で巻き立つ事によって橋梁下部構造の耐力・変形性能の向上を図られる。本研究では、上述二つ工法と異なる間接補強工法の適用

性について検証する。間接補強工法としてのグラウンドアンカー工法は、PCケーブルを用いてグラウンドアンカーと構造物をつなぎ、構造物の慣性力を直接地盤に伝達し、構造物の耐震性能を向上する工法である。グラウンドアンカーを基礎構造物に連結した場合は基礎構造物の耐力、橋脚柱に連結した場合は基礎構造物を含む橋梁下部構造の耐力、上部構造に連結した場合は支承を含む橋梁全体の耐震性能の向上を図られる。今までの数値解析結果によれば、PCケーブルが橋脚柱につないだ場合、基礎構造物を含む橋梁下部構造の応答変位が大きく低減した。また、PCケーブルが上部構造につないだ場合、支承・橋脚柱および基礎の地震応答値を大きく低減することが分かっている。

今回、この低減効果について、模型振動実験によって調べた。

2. 実験概要

(1) 対象橋梁

今回の対象橋梁は「道路橋の耐震設計に関する資料」（（社）日本道路協会1997.3）中の全長200m

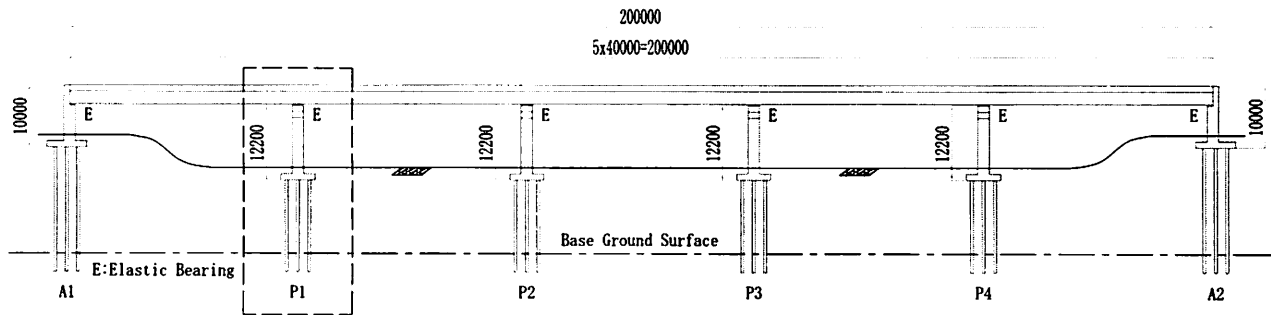


図-1 対象橋梁

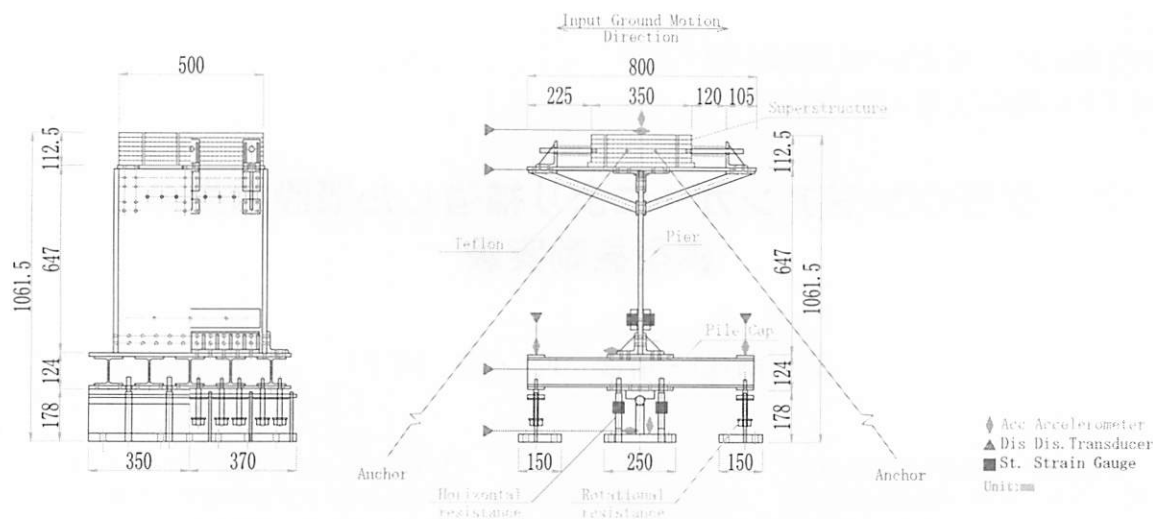


図-2 振動模型（正面図と側面図）

の五径間連続I桁橋である。構造物の全体の概要を図-1に示す。本橋は地震時保有水平耐力法にて設計されたB種橋で、架橋地区の地域区分はA地域である。上部構造は鋼桁、橋脚は鉄筋コンクリートで、基礎構造は場所打ち杭で、支承は水平反力分散型積層ゴム支承である。架橋地点の耐震設計上の地盤種別はⅡ種地盤である。

(2) 振動実験模型

本研究では、図-1に示す道路橋のP1橋脚とそれが支持する上部構造を対象とし、1/16の幾何縮尺で振動実験の模型を製作した。原型の剛性・質量に着目して、上部構造の重量は鋼板で、支承は6本のバネで、橋脚の柱部は鋼板で、フーチングは鋼板とH形鋼の連結で、杭基礎は8本の鉄棒と20本のバネで、アンカーとPCケーブルは4本のバネで振動模型を製作した。図-2に振動模型を示す。振動台と振動模型の全景を写真-1に示す。

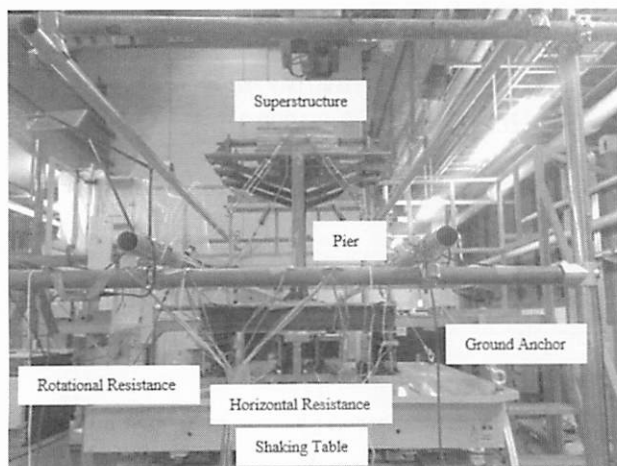


写真-1 振動台と振動実験模型の全景

摩擦抵抗を低減するため、上部構造と橋脚の間にテフロンを挿入した。支承の水平方向の剛性は6本のバネにより与え、 91.38 N/mm ($6 \times 15.23 \text{ N/mm}$) である。基礎の水平方向剛性が8本の鉄棒により与え、回転剛性が写真-1に示すようにフーチング両天端の下に配置された20本のバネにより 3232.8 N/mm ($20 \times 161.64 \text{ N/mm}$) である。補強した実験ケースで、4本のグラウンドアンカーをバネとしてモデル化した。アンカーの剛性は 22.564 N/mm ($4 \times 5.64 \text{ N/mm}$) であり、アンカーの水平剛性と支承の水平剛性の比は13% ($22.56 \times 0.521 / 91.38$) である。

(3) 入力地震波

模型実験によって本補強工法の補強効果を直接検証した。実験は重力場（1G場）でグラウンドアンカーによって補強したケースと補強していないケースにて行った。実験用入力地震波は二種類である。一つは正弦波であり、構造物の固有周期を測定した。もう一つは耐震設計基準に示された地震波形を兵庫県南部地震（1995、内陸直下型地震）により修正され、レベル2地震動であり、大阪ガス波という。入力地震動の最大加速度が736Galで、波形データのサ

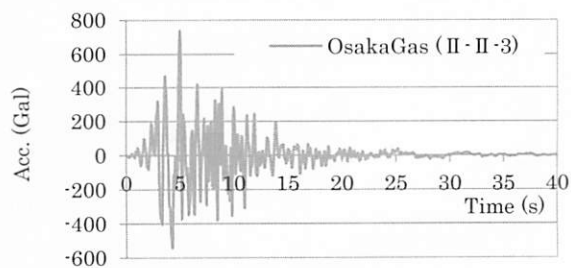


図-3 入力地震波（大阪ガス波）

ンプリングは100Hzで、記録時間が40sである。加振入力地震波を相似則に基づき周波数を調整した。データのサンプリングは400Hzであった。入力波形を図-3に示す。加速度応答スペクトルを図-4に示す。

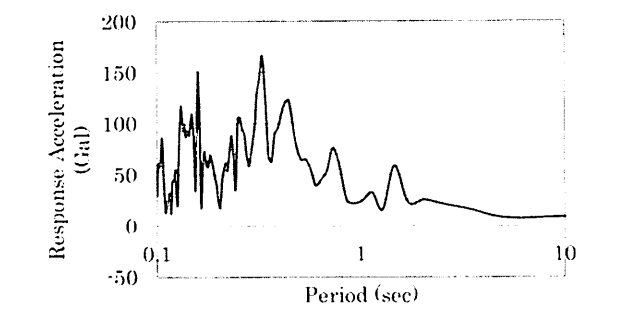


図-4 加速度応答スペクトル

実験では、大阪ガス波の振幅を50%，60%，70%，75%および80%段階的に増加して加振した。なお、本振動台実験における加振方向は、橋軸方向への一方向とした。

(4) 計測項目とデータの分析方法

模型の振動挙動および耐震性能を検証するため、加速度計・レーザー変位計・ひずみゲージを用いて、補強有無のケースにおいて応答値を計測した。測定項目は構造系の固有周期、上部構造の水平加速度・鉛直加速度・水平変位、柱上端の水平加速度・水平変位、柱下端のひずみ、下部構造天端の鉛直加速度・鉛直変位、フーチングの水平加速度・水平変位、基礎部材およびアンカー部の変形等とした。測定位置と項目は図-2に示す。

支承の変形は、上部構造水平変位と柱上端水平変位の差である。

柱下端の曲げモーメントは次式により求められる。

$$M = \varepsilon EZ \tag{1}$$

ここに、 M ：柱下端の曲げモーメント、 ε ：柱下端のひずみ、 E ：弾性係数、 Z ：断面係数である。

基礎の水平抵抗は8本の下端固定上端自由の片持ち鉄棒によって提供されており、基礎の水平変位は測定した鉄棒の変形から次式で求められる。

$$\delta = \frac{2\varepsilon L_1^2}{3DL_2} \tag{2}$$

ここに、 δ ：基礎の水平変位、 ε ：鉄棒下端のひずみ、 L_1 ：ひずみゲージ測定位置と鉄棒上端作用位置の距離（123mm）、 L_2 ：鉄棒下端と鉄棒上端作用

位置の距離（208mm）、 D ：鉄棒の直径である。
フーチングは剛と見做し、基礎の回転角が小さい場合、それが図-5に示すように、次式で求められる。

$$\theta = \frac{d}{L} \tag{3}$$

ここに、 θ ：基礎の回転角、 d ：フーチング加振方向端部での鉛直変位、 L ： d を計測する場所から基礎中心までの距離（365mm）である。

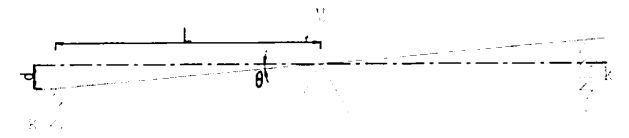


図-5 基礎の回転角について

3. 実験結果と考察

振幅50%，60%，70%，75%および80%の大阪ガス波の全ての入力ケースに対して、補強した構造の応答値が補強前の構造より低減された。ここで、一例として入力振幅が70%により得た構造の応答値について本補強工法の補強効果を示す。模型各位置の地震応答値の最大値を表-1に示す。また、各応答値の時刻履歴波形を図-6から図-11に示す。

表-1 補強有無の最大応答値

ケース 測定項目	補強無 Existing	補強有 Retrofitted	R/E
上部構造の水平加速度 (Gal)	839.96	594.65	71%
上部構造の水平変位 (mm)	43.98	42.40	96%
支承の変形 (mm)	46.81	44.72	96%
柱下端の曲げモーメント (kN・mm)	591.78	419.56	71%
基礎の水平変位 (mm)	0.032951	0.025796	78%
基礎の回転角 (°)	0.002079	0.001781	86%

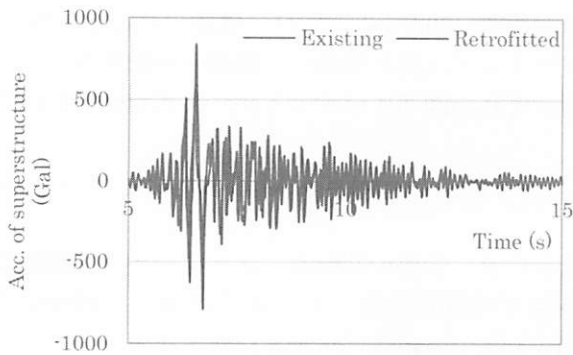


図-6 上部構造の水平加速度

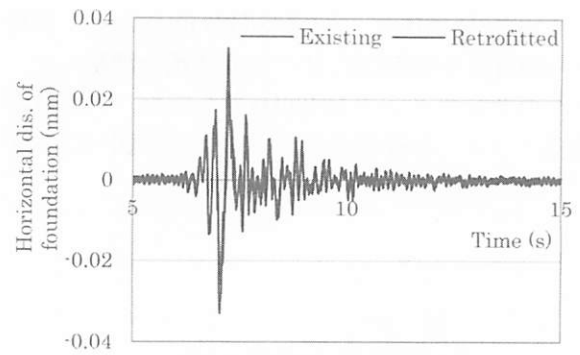


図-10 基礎の水平変位

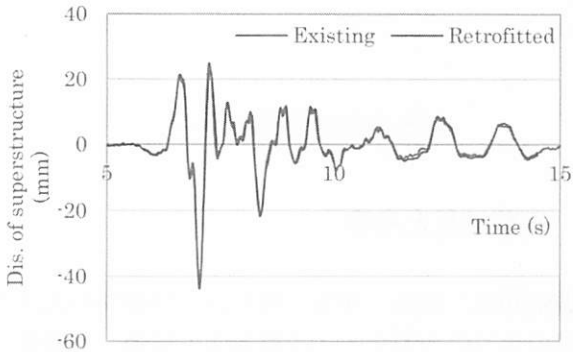


図-7 上部構造の水平変位

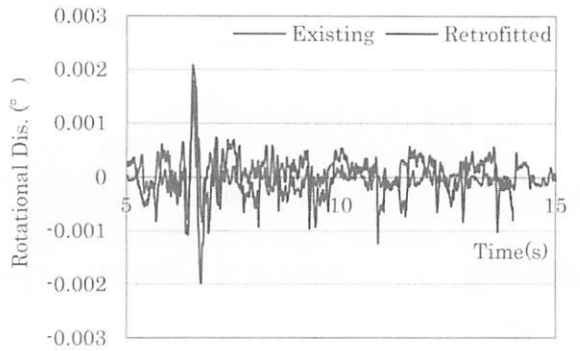


図-11 基礎の回転角

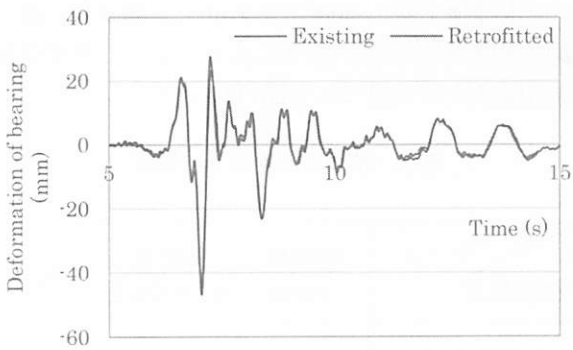


図-8 支承の変形

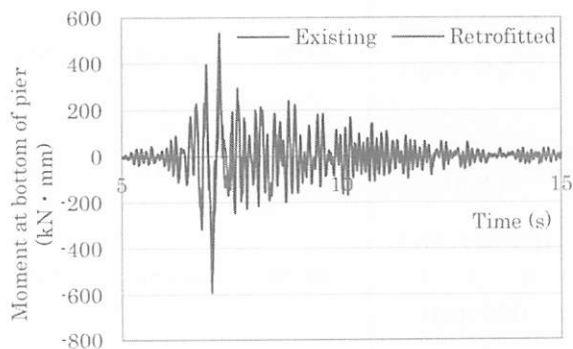


図-9 柱下端の曲げモーメント

により補強した既設橋梁の振動特性および耐震性能を検討した。支承の水平剛性の13%の有効剛性を有するアンカーを上部構造と地盤の間につないだ場合、上部構造の最大加速度・橋脚柱の断面力および基礎の変位は大きく低減した。上部構造の水平変位および支承の変形についても4%程度低減した。今回の実験結果に基づき、グラウンドアンカーを導入する工法は橋梁構造物の耐震性能を予測通りに向上することを確認できた。今後の研究で、本工法の補強量・ダンパー装置の有無による補強効果について、さらに調べる必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997年3月。
- 2) An, T., Kiyomiya, O., Hung, T.V.: Effect of earthquake-proof reinforcement by ground anchor and damper on an existing bridge with high pier, 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, July 25-29, 2010.
- 3) An, T., Kiyomiya, O.: Vibration behaviour and seismic performance of an existing bridge retrofitted by ground anchor, IABSE Conference, Rotterdam, May 6-8, 2013.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），2012年3月。

4. 結論

本稿では、模型振動実験にてグラウンドアンカー