

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820207

研究課題名(和文) 橋脚と上部構造連成下での2方向加振時のゴム系支承の終局挙動解明と安全照査法の検討

研究課題名(英文) Investigation on ultimate behavior of rubber bearings and their seismic verification method considering the interaction of piers and a superstructure under bi-directional seismic excitations

研究代表者

海老澤 健正 (EBISAWA, Takemasa)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90332709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：実橋梁を再現する2径間連続高架橋模型による加振実験では、現行設計では考慮されていない鉛直軸力の変動や相対回転がゴム支承に生じた。これらを考慮した局所的な応力やひずみを算出したところ、現行の許容値を上回る可能性があることが判明した。次に、上記の加振実験結果ならびに新たに開発した装置による支承単体の水平2方向静的繰り返し載荷実験結果をもとに、支承挙動を再現する超弾性ソリッドFEモデルを開発した。せん断挙動はおおむね実験を再現できたが、さらなる高精度化には履歴挙動を考慮する必要がある。最後に、積層ゴム支承の小型供試体の破断試験を実施し、引張軸力を与えた場合には荷重の低下が生じることを確認した。

研究成果の概要(英文)：During the bi-directional shake table test, the rubber bearings installed in a scaled 2-span elevated-girder bridge model exhibited rotational deformations and the variation of axial forces that are ignored in the current seismic design. Due to these axial forces and rotational deformations, the local stress and local strains in the rubber bearings may exceed the allowable limits specified by the current design code. Then, bi-directional cyclic loading test was conducted on rubber bearings by newly developed loading system. By making use of the test data obtained from the above tests, a FE model with a nonlinear elastic constitutive relation was presented. This model appropriately expresses the shear deformation of the bearings. However, there is still a room to improve the model by considering the hysteretic behavior caused by the tensile stresses. Finally, it was observed by the shear rupture test that the load carrying capacity of the bearings decreases under tensile axial force.

研究分野：構造工学

キーワード：耐震構造 積層ゴム支承 破断試験 振動台実験 連続高架橋

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震以降、極大地震に対する橋梁の耐震性能向上策として積層ゴム支承を用いた反力分散構造や免震支承を用いた免震構造の有効性が認識され、多くの橋梁に採用されてきた。これらの構造はその後の大きな地震動を経験してきたが、積層ゴム支承の残留変形という軽微な損傷はあるものの重大な被害は発生しなかった。しかし、東北地方太平洋沖地震(2011年)では、積層ゴムの破断という極めて重大な被害が確認された。このような支承の破壊が生じると、免震機能の喪失により現行設計のコンセプトが破綻する。その結果、橋脚への作用地震力が大幅に上昇し高架橋の根本的な安全性が損なわれる可能性も考えられる。上記の積層ゴム支承の破断は当該支承における材料劣化や製作上の欠陥の可能性もあるが、現行の支承の安全照査には実状が必ずしも十分に反映されていないのも事実である。すなわち、橋脚頂部は地震時において回転し、積層ゴム系支承にはせん断と曲げが連成した変形が生じるにもかかわらず、現設計では、支承の終局状態は、一定死荷重下で載荷板を拘束し、せん断変形のみが生じるようにした水平一方向せん断により同定されている。さらに、安全性照査は、支承は作用モーメント(回転剛性)を無視したせん断ばねでモデル化し、橋軸と橋軸直角方向に独立に入力した水平地震動に対して行われる。しかしながら、実地震動では地震動の3方向成分が同時に入力するので、せん断剛性、回転剛性、圧縮剛性などを持つ積層ゴム系支承には橋脚と上部構造との相互作用により少なくとも3方向の力の成分と2方向の曲げの成分が連成して作用するので設計の想定とは大きく異なる。以上のように現行のゴム系支承の照査法での想定は実状とかなり異なるのでその妥当性を検討する必要がある。

2. 研究の目的

鋼製橋脚などを対象とした多方向地震動下での高架橋の終局挙動に関する実験的ならびに数値解析的研究についての蓄積に基づき、積層ゴム系支承に焦点を当て、橋脚と上部構造との連成挙動を考慮することでより実際に即した多方向地震動連成下の支承の終局挙動を明らかにし、照査に反映する。

3. 研究の方法

まず、実橋梁をできる限り忠実に再現した2径間連続高架橋加振実験(代表者が分担者として参加している基盤研究(A))において橋梁模型内に設置された積層ゴム支承の挙動を実測することで、実橋梁内でのゴム支承の挙動について検討を行う。これとは別に、積層ゴム支承単体の静的な水平2方向繰り返し載荷および曲げ載荷試験を行い、支承単体の特性を把握する。つぎに、各実験に整合するゴム支承のFEモデルの構築を行う。最後に

積層ゴム支承の小型供試体の破断試験を実施し、破断特性の把握を行う。

4. 研究成果

(1)連続高架橋加振実験に基づく地震時の支承挙動の検討

図-1に示す2径間連続高架橋の加振実験における積層ゴム支承の挙動を詳細に実測し特性を検討した。

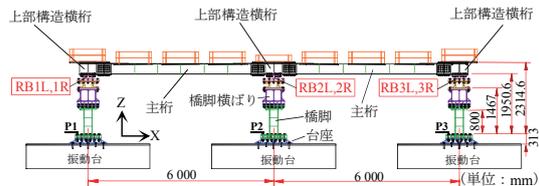
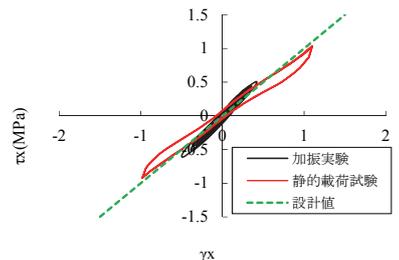


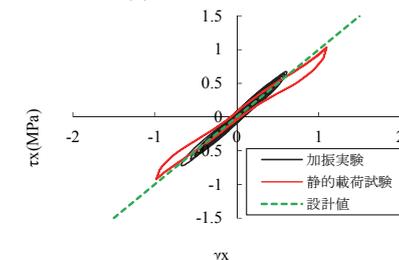
図-1 連続高架橋加振実験供試体

①せん断挙動

中央橋脚 P2 左端の支承に生じる平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係を図-2に示す。なお、平均せん断応力はゴム支承に作用するせん断力を初期断面積で除した値、平均せん断ひずみは相対水平変位をゴム層の総厚で除した値として定義している。また、後述の(2)の支承単体の一定振幅 ($\gamma=100\%$) の1方向繰り返し載荷実験の結果および現行設計で用いられるせん断バネの荷重変位関係を同図に示す。ひずみ振幅の比較的大きいCFT橋脚では静的載荷実験のせん断剛性や設計値と近い値となっているが、ひずみ振幅の小さい無充填橋脚ではせん断剛性が高く生じており、振幅の大きさに剛性が依存して変化する傾向を確認できる。



(a) 無充填橋脚



(b) CFT 橋脚

図-2 平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係

②鉛直方向の挙動

中央橋脚 P2 上の左右のゴム支承に作用する鉛直方向平均応力の時刻歴応答を図-3 に示す。図より左右の支承に作用する鉛直方向平均応力は上部構造の死荷重による平均圧縮応力を振動中心として振幅のほぼ等しい逆位相の変動をしている。これは上部構造に作用する橋軸直角方向の水平地震力により生じる橋軸回りの転倒モーメントに左右の支承が鉛直方向偶力で抵抗することによる。

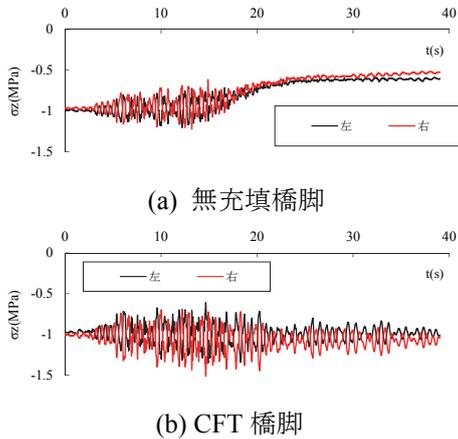


図-3 鉛直方向平均応力の時刻歴応答

③相対回転に関する挙動

連続高架橋に設置されたゴム支承には図-4 に示すように、せん断変形に加えて橋脚が曲げ変形することによる橋脚天端のたわみ角に起因した橋軸直角軸まわりの相対回転が生じる可能性がある。この相対回転は細長比が大きく、曲げ変形しやすい鋼製橋脚ではより大きくなることが考えられる。

中央橋脚上のゴム支承に生じる橋軸直角軸まわりの相対回転角の時刻歴応答を図-5 に示す。なお、橋軸まわりの回転に関しては、上部構造に作用する橋軸直角方向の転倒モーメントに2基の支承が偶力で抵抗するため個々の支承に作用するモーメントは小さく、相対回転もほとんど生じない。橋軸直角軸まわりの挙動に関しては、最大で 0.021rad(無充填)、0.025rad(CFT)、橋脚の限界状態到達前まででもそれぞれ 0.014rad(無充填)、0.025rad(CFT)の大きな相対回転角が生じている。これらの回転角は現行の設計で考慮する桁の回転角(中間支点: 1/300rad)に対して 4.2 倍(無充填)、7.5 倍(CFT)の大きさの回転角に相当する。なお、支承の相対回転角は橋脚頂部面でのたわみ角とよく一致しており、支承の相対回転角は主として柱頂部の回転角に起因するものであることが確認された。

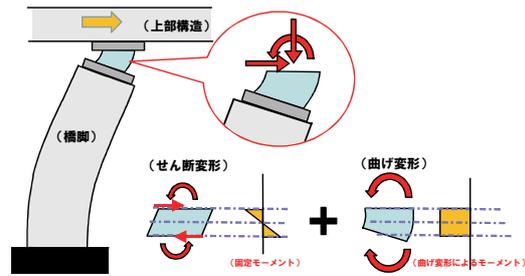


図-4 高架橋に設置されたゴム支承の挙動

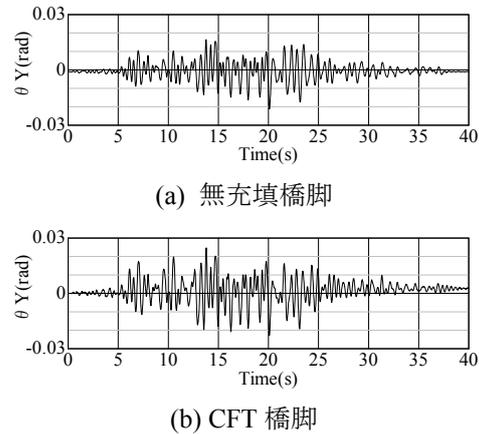


図-5 橋軸直角軸まわりの相対回転角の時刻歴応答

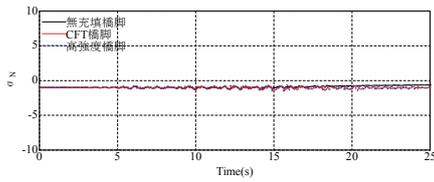
④局所的な応力およびひずみ

中央橋脚 P2 上の支承における鉛直方向応力、局部せん断ひずみの時刻歴応答を図-6、図-7 に示す。ここでは、支承の平均鉛直応力の算定では2方向せん断変形による断面積の減少を考慮した有効面積を用い、曲げ応力ははり理論に基づく簡易式で計算した。また、局部せん断ひずみについては道路橋支承便覧での算定式によった。

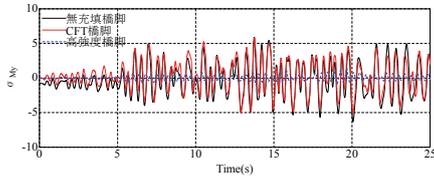
支承の平均鉛直応力はいずれの橋脚も 1MPa 程度の圧縮応力であるが橋脚が終局状態に到達する前に無充填橋脚や CFT 橋脚では曲げ引張り応力が片側振幅で 5~6MPa となるので、支承には局部的に無充填鋼製橋脚では 4MPa、CFT 橋脚では 6MPa 程度の引張り応力が作用する。この引張り応力は支承便覧での地震時の許容値 2MPa に比べるとかなり大きな値である。

また、支承の局部せん断ひずみは x 方向成分が y 方向成分に比べて非常に大きく、局部せん断ひずみの合ひずみは CFT 橋脚では 700%、無充填橋脚では 600%程度の値となっている。局部せん断ひずみの限界値 500%、許容値 416%と比べても大きな値となっている。局部せん断ひずみは支承の相対回転に起因する要素が支配的であり、平均せん断ひずみの影響は大きくない。

このように局部応力、ひずみとも現行での許容値と比べ大きな応答値が生じる可能性がある。ただし、いずれの実験でも目視で支承には損傷は認められなかった。

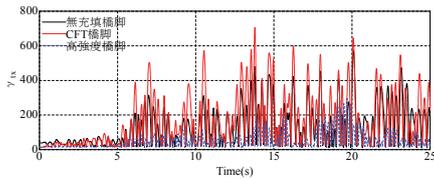


(a) 平均応力

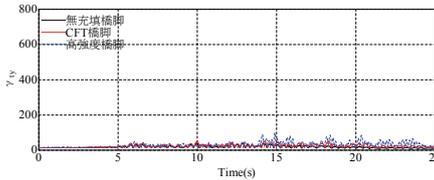


(b) 曲げ応力

図-6 ゴム支承の鉛直応力



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-7 ゴム支承の局部せん断ひずみ

(2) 静的荷重試験による積層ゴム支承の挙動特性の把握

① 水平 2 方向荷重試験

積層ゴム支承の水平 2 方向荷重を行うために、図-8 に示す荷重装置の開発を行った。本荷重装置は 3 本のアクチュエータとボールジョイントからなる既存の 3 次元荷重装置と支承の上下の鋼板を水平に維持するために新たに開発した水平維持装置により構成されている。本装置では支承に作用する鉛直荷重も引張領域を含めて自由に変動させることが可能である。

供試体には前記の連続高架橋加振実験で用いた積層ゴム支承と同諸元のものを用い、荷重ケースとしては圧縮繰り返し荷重、1 方向水平繰り返し荷重(長辺および短辺方向)、対角方向水平繰り返し荷重、らせん荷重(図-9)を行いゴム支承の挙動特性を確認した。これらの実験結果を図-10 に示す。2 方向荷重では水平荷重および水平変位の長辺方向成分を用いて示す。これによると、1 方向荷重の荷重変位関係は長辺、短辺方向の荷重ともよく一致すること、対角方向荷重およびらせん荷重の長辺、短辺方向各成分の荷重-変位関係も 1 方向荷重と概ね一致することが確認された。よって今回の荷重試験のように平均せん断ひずみ $\gamma=100\%$ 程度の小さい範囲においては 2 方向成分の連成はなく、1 方向荷重で予測可能であることを確認した。

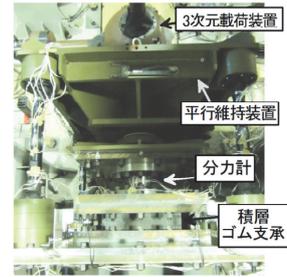


図-8 水平 2 方向荷重装置

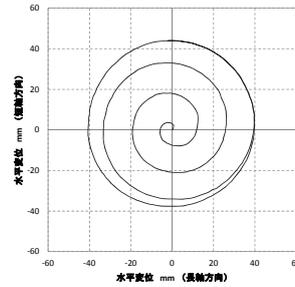
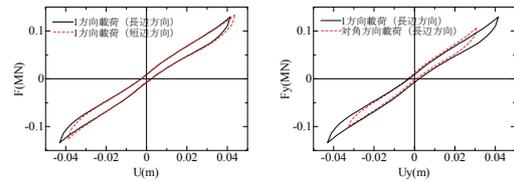
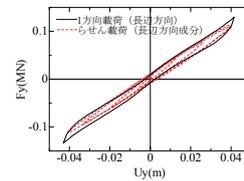


図-9 らせん荷重



(a) 1 方向荷重

(b) 対角方向荷重



(c) らせん荷重

図-10 ゴム支承の水平荷重-水平変位関係

② 曲げ荷重試験

積層ゴム支承の曲げ挙動特性を把握するため、図-11 に示す 1000kN 曲げ試験機を用いて、長辺方向の軸まわりの繰り返し曲げ荷重を行った。回転角 0.03rad 程度を目標としてゴム支承に荷重を与えた。実験により得られたモーメント-相対回転各関係を図-12 に示す。曲げ荷重試験では履歴特性を有すること、繰り返し荷重回数に伴い回転剛性が低下する確認した。この原因として曲げ引張りによるボイド発生に起因したゴム材料の損傷が考えられる。

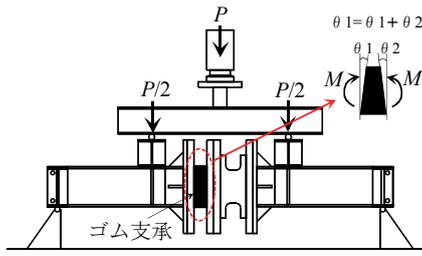


図-11 曲げ载荷試験

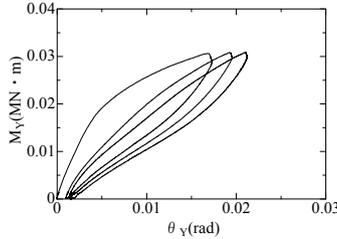


図-12 モーメントー相対回転角関係

(3) 積層ゴム支承の FE モデルの構築

図-13 に示すようにゴム層と内部鋼板のみならず、上および下鋼板と被覆ゴムを考慮することにより、実状に即したモデル化を行った。ゴム層および被覆ゴムは 8 節点ハイブリッドソリッド要素、上下鋼板および内部鋼板は 8 節点ソリッド要素を用いた。ゴム支承は大きなせん断変形が生じることから幾何学的非線形性を考慮した。ゴム材料には圧縮性を考慮した以下に示す歪エネルギー関数に基づく超弾性体構成則を用いた。ここでは、引張り静水圧応力下での材料劣化による剛性低下を考慮するため、静水圧応力の正負で異なる関数を設定した。

$$W = W_I(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + W_J(J)$$

$$W_I(\bar{I}_1, \bar{I}_2) = C_{11}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{C_{21}}{2}(\bar{I}_1 - 3)^2 + \frac{C_{31}}{3}(\bar{I}_1 - 3)^3 + \frac{C_{41}}{C_{51}} \exp(C_{51}(\bar{I}_1 - 3)) + C_{12}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{C_{22}}{2}(\bar{I}_2 - 3)^2 + \frac{C_{32}}{3}(\bar{I}_2 - 3)^3 + \frac{C_{42}}{C_{52}} \exp(C_{52}(\bar{I}_2 - 3))$$

引張り時：(J-1) < 0

$$W_J(J) = \frac{1}{D_1}(J-1)^2 + \frac{1}{D_2}(J-1)^4$$

圧縮時：(J-1) > 0

$$W_J(J) = E_1[(J-1) - \frac{1}{E_2} \exp\{E_2(J-1)\}] + \frac{E_3}{2}(J-1)^2$$

歪エネルギー関数の材料定数は圧縮载荷試験、1 方向载荷試験、曲げ载荷試験により得られた荷重-変位関係およびモーメント-相対

回転角関係との誤差が最小となるように同定した。

図-14 に各試験での荷重-変位関係、モーメント-相対回転角関係を実験結果と比較して示す。圧縮载荷および 1 方向载荷試験については、塑性を考慮していないため実験で現れる履歴特性は再現することはできないものの、荷重-変位関係をみると圧縮剛性およびせん断剛性が概ね一致することを確認した。曲げ载荷試験では、目標とする実験結果の近似曲線に近い挙動を再現するよう材料定数を同定することができるものの、実験での履歴挙動の影響が大きく、今後非弾性モデルの検討が必要である。

次に、同定した解析モデルを用いて(1)の加振実験で得られた支承の相対変位を用いて支承応答を求めたものが図-15 である。これによると、振幅の大きい範囲での平均的なせん断剛性は実験と近くなっている。しかし、振幅の小さい範囲では実験でのせん断剛性は高くなっており、より精度の高い解析には、振幅依存性を考慮する必要があることが明らかとなった。

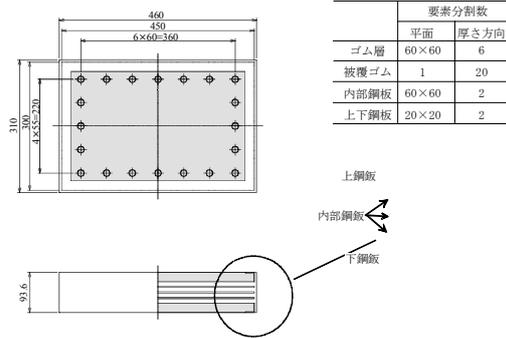
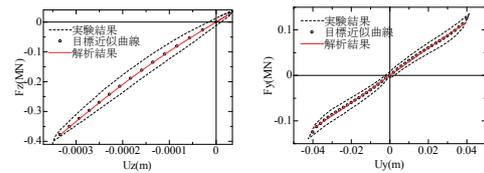
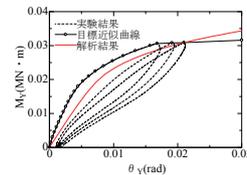


図-13 解析対象とそのモデル化



(a) 圧縮試験

(b) せん断試験



(c) 曲げ試験

図-14 FE モデルの同定結果

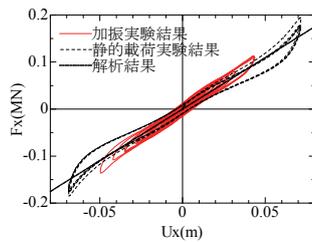


図-15 FE モデルによる加振実験の再現解析

(4) 積層ゴム支承における鉛直軸力による破断特性への影響

(1)での加振実験により実際の橋梁での積層ゴム支承には鉛直軸力の変動および相対回転角の発生があることが明らかとなった。ここでは、鉛直軸力の相違が積層ゴム破断に与える影響を検討するため、鉛直軸力を一般的な載荷試験での圧縮 6MPa とした場合と引張鉛直力 1MPa を与えた場合について水平 1 方向漸増繰り返し載荷実験を行った。図-16 に両者の水平荷重—水平変位関係を示すが、鉛直圧縮力を与えた場合と比べて、鉛直引張力を与えた場合には破断時の平均せん断ひずみに明確な違いが得られなかった。しかし、鉛直引張り力作用下では荷重が若干低下すること、また、破断時には瞬時に支承断面全体にき裂が進行してエネルギーが開放されるスナップバック挙動を示すため大きな衝撃が生じることが確認された。

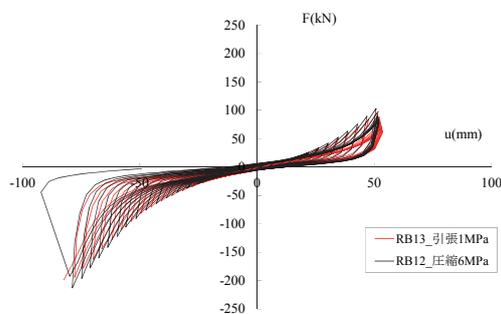


図-16 支承破断試験における水平荷重—水平変位関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

①後藤芳顯,海老澤健正,奥村徹,松澤陽,小畑誠,Jianzhong Li,Yan Xu, 水平 2 方向加振を受ける連続高架橋模型における橋脚, ゴム支承, 上部構造の連成とその終局挙動について, 性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, Vol.17, pp.431-438, 査読有, 2014.

〔学会発表〕 (計 3 件)

①加藤文哉, 後藤芳顯, 海老澤健正, 奥村徹, 積層ゴム支承の水平 2 方向載荷実験, 土木学

会第 68 回年次学術講演会, 2013 年 9 月 04 日, 日本大学(千葉県習志野市).

②後藤芳顯,奥村徹,海老澤健正,小畑誠, Jianzhong Li,Yan Xu, 連続高架橋模型の 2 方向加振実験によるゴム支承の挙動特性の検討土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014 年 9 月 10 日, 大阪大学(大阪府豊中市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海老澤 健正 (EBISAWA, Takemasa)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号: 90332709