

論文 ゴム支査アンカー部の終局時挙動に関する研究

幸左賢二^{*1}・閑上直浩^{*2}・播金昭浩^{*3}・萩原隆朗^{*4}

趣旨：3種類の沓座タイプを作成し、その上にゴム支査を設置し、鉛直力および水平力を作用させることによって、支査部全体系の挙動を評価した。実験およびFEM解析の結果から、最大耐力はほぼアンカーボルトの降伏耐力に対応していること、終局時は支査の浮き上がりに伴う支圧抵抗面積の減少により、押し抜きせん断破壊が生じやすくなることが明らかとなった。

キーワード：ゴム支査、終局耐力、引張破壊、アンカーボルト、耐震

1. はじめに

兵庫県南部地震においては、橋脚の被害とともに、桁の大きな変形に伴い桁や金属支査の損傷が発生した。このような損傷事例を鑑みて、積極的に免震や分散ゴム支査を採用することにより橋梁全体系の耐震性を増すとともに、金属支査のぜい性的な破壊をさけるために、塑性変形能に優れたゴム支査を採用し、支査自身の耐震性も増すことが標準的な考え方となりつつある。

しかしながら、現在までゴム支査単体での荷重-変位挙動は数多く把握されているものの、橋座上に設置されたゴム支査の挙動について評価した例は多くはない。そこで、著者らは橋座上にゴム支査を設置し、実桁の剛性を有する模型桁を介して、鉛直力および水平力を作用させることによって、橋座部も含めた支査部全体系の挙動を評価している¹⁾。試験体としては、アンカーなし、既設アンカーのみ、既設および補強アンカーの3種類とし、各供試体の終局挙動を比較することによって、補強効果を評価している。本報告は、既設および補強アンカー供試体タイプを中心に、実験の概要とFEM解析結果について述べるものである。

2. 実験概要

2.1 試験体形状

試験体は図-1に示すように、1500kN用ゴム支査(340x630x60mm)を厚さ50mmの無収縮モルタルを介してコンクリート台座(3000x1200x900mm)のほぼ中央に設置した。試験体タイプは図-2に示す以下の3種類である。

供試体A：ベースプレートにスタッドのみを溶植したもの。台座表面ははつらず、直接無収縮モルタルを打設する。無収縮モルタルとベースコンクリートとの付着または摩擦抵抗力を確認する。

供試体D：タイプAに既設アンカー(φ32mm,長さ10φ)4本を追加し最大耐力及び破壊性状を確認する。

供試体E：タイプAに既設アンカー(φ32mm,長さ10φ)4本と補強アンカー(φ22mm,長さ9φ)4本を追加し、最大耐力および破壊性状を確認する。

上記供試体は以下のような条件で設計している。

①モルタルと台座間で損傷が生じ、アンカーが終局破壊に至ることを想定しているので、ベースプレートとモルタル間では破壊を生じないように、スタッドは設計上必要な3倍を配置している。

*1 九州工業大学 建設社会工学科 (正会員)

*3 トピー工業 設計部

*2 阪神高速道路公団 大阪管理部 調査設計課

*4 東京エンジニアリング(株) 大阪支店

②アンカーボルトは実橋調査実績により、その埋め込み長はモルタル上面からの距離を取り、既設アンカーでは(モルタル中のアンカーボルト長+台座中のアンカーボルト長)/アンカー直径 $= (50+272)/32=10\phi$ を確保した。

2.2 载荷要領および使用材料

载荷装置を図-3に示す。最小死荷重480kNを载荷した状態で、水平荷重を片方向に漸増増加させる。ゴム支承は設計変形能が300%であるので、せん断変形が300%(ゴム層厚60mm \times 300%=180mm)に達した時点でせん断変形を拘束するためのストッパーを取り付けた。よって水平力が約1100kN(水平変位量180mm)までは水平力はゴム体を介してベースプレートに、1100kNを超える部分の水平力はストッパーを介してベースプレートに伝達される。使用材料の特性を以下に示す。

- ①ゴム支査(片フランジ型, $G=1\text{MPa}$)
- ②台座(早強コンクリート, $\sigma_{ck}=34.3\text{MPa}$, 実験日平均強度 35.7MPa)
- ③無収縮モルタル(超早強コンクリート, $\sigma_{ck}=44.1\text{MPa}$, 実験日平均強度 64.9MPa)
- ④ベースプレート・ストッパー($t=38\text{mm}$, SM490A)
- ⑤頭付きスタッド($\phi 19$, 長さ 45mm , JISB1198)
- ⑥既設アンカー($\phi 32$, 322mm , SS400, 実降伏強度 299.8MPa)
- ⑦補強アンカー(M22, 220mm , SS400相当, 506.7MPa)

2.3 実験結果

A, D, E 供試体ともほぼ同一の変状状況を示した。ここでは代表例としてEタイプの変状状況を示す。図-4に荷重-上査位置の水平変位および主要荷重点, 図-5に最終破壊状況, 図-6に既設アンカーのひずみ分布を示す。

- ①荷重1300kN: モルタル側面にひび割れが発生し、スタッドひずみ変化率に大きな変動があった。
- ②荷重1960kN: ベースプレートが浮き上がり始める。
- ③荷重2200kN: モルタル下面が浮き上がり、台座上面にひび割れが発生し、荷重が1520kNまで低下した。
- ④荷重1520kN: 前面モルタルが剥離しベースが

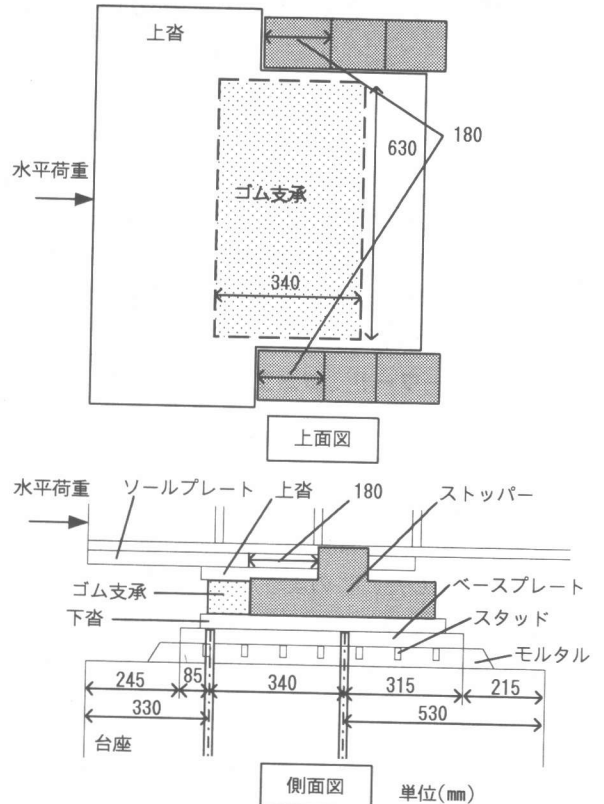


図-1 試験体形状

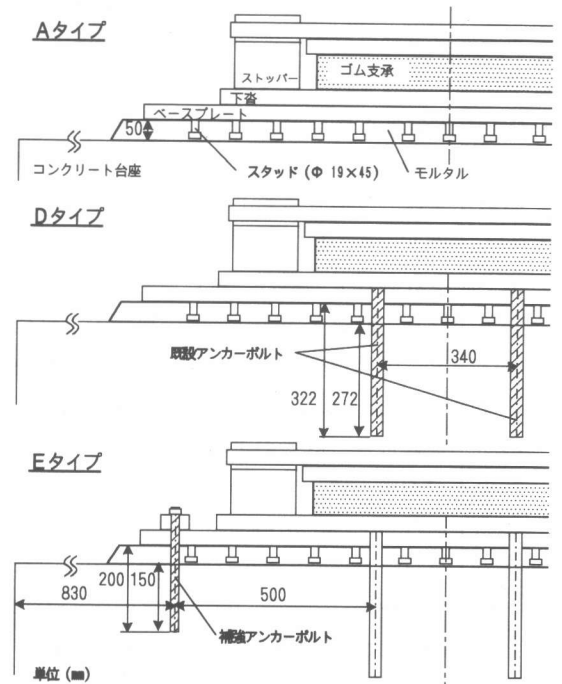


図-2 試験体タイプ

2cm水平移動した。

⑤荷重960kN：前面モルタルおよび台座上面が大きく破壊した。

⑥最終状態：既設アンカー4本中3本は破断し、残る1本は大きく変形している。破断したボルトの破面形状から初めはせん断力で、最後は引張力で切断したと思われる。補強アンカーは4本とも抜け出し、大きく変形している。前面側モルタルは、台座をえぐり取るかたちで破壊している。押し抜きせん断破壊面は2つから形成されている。図-5に示すように、一つはベースプレート前面から発生した45度方向の小さな破壊面で、他の一つは補強アンカー位置またはサイドブロック中心を起点として、深さ方向に45度の大きな破壊面である。既設アンカーおよび補強アンカーともほぼ同様の傾向を示し、1400kN付近よりひずみが徐々に増加し、2000kN付近でひずみが急激に増加し、降伏ひずみを超える。

以上のことから、最大耐力はアンカー降伏によって支配されるものの、最大耐力以降ベースの浮き上がりが大きくなるとともに、支圧抵抗面積が減少し、押し抜きせん断破壊に至ったと考えられる。

3. 最大耐力評価

RC複鉄筋断面計算により既設および補強アンカーが以下の鉄筋応力度に達する作用荷重を求める。

①設計上の鉄筋付着応力度(既設:225MPa, 補強:250MPa)

②設計上の降伏応力度(235MPa)

③材料試験による降伏応力度(300MPa)

表-1に示すようにアンカーボルト付着剥離時の荷重は、Dタイプで1610kN, Eタイプで1963kNであった。アンカーの発生応力度が設計上の降伏応力度に達するときの荷重は、Dタイプで1660kN, Eタイプで2029kNであった。また、実材料試験値に達するときの荷重は、Dタイプで1970kN, Eタイプで2444kNであった。これを実験値

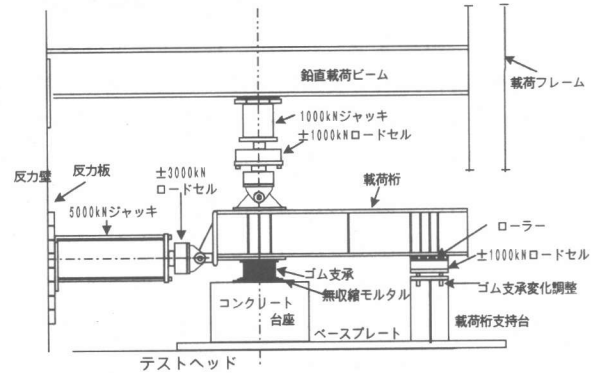


図-3 荷重要領図

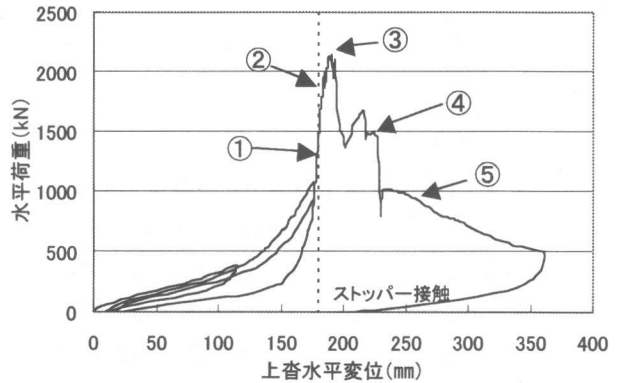


図-4 荷重-上沓水平変位(Eタイプ)

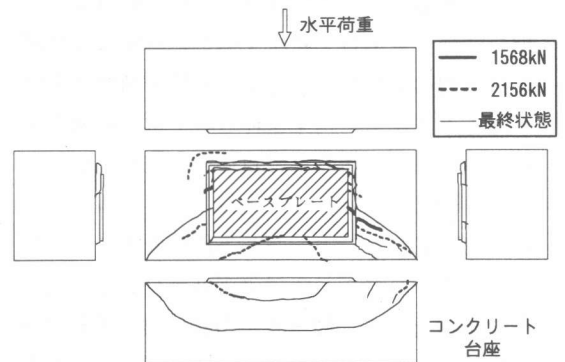


図-5 最終破壊状況(Eタイプ)

と比べると、Dタイプでは実材料試験値とほぼ一致した値となっているが、Eタイプでは実材料試験値に比べて実験結果は一割程度低めの値であった。これは、計算値は曲げモーメントによってアンカーに発生する引張応力度のみを評価したものであるのに対し、実際は引張応力とせん断応力が作用した合成応力状態となっていることやEタイプでは補強アンカー部のみのひずみが急激に進展したため、曲げ抵抗としては、必ずしも既設と補強ボルトの重ね合わせが成立しなかったためとも考えられる。以上のように、厳密には各アンカーの応力状態や合成応力度で評価する必要があるが、RC複鉄筋による計算でも最大耐力に対して1割程度の誤差で評価することが出来た。

4. FEM解析

4.1 解析手法

図-7に解析モデルを示す。二次元のモデル化にあたっては単位奥行き幅を100mmに設定し(上査幅の1/7)、鉄筋は100mmあたりの本数に、載荷桁も100mmあたりの剛性となるように換算している。コンクリート、鋼板には平面応力要素、鉄筋、アンカーボルトには埋め込み鉄筋要素、台座・モルタル接合部にはバネ要素を用いている。

図-7に示すように、荷重に伴う変形を模擬するために、上支承が180mm移動し、ゴム部が変形した状態からの荷重載荷とした。これは荷重増分に伴い変形量を考慮することが望ましいが、収束時間の制約から、変形の影響を簡便に考慮したことによる。拘束条件としては、台座の下端で完全固定、桁右端はローラー支持としている。実験によると、主な損傷がモルタル・台座接合部およびアンカーボルト部で発生しているので、これらについては弾塑性部材とし、他は弾性部材とする。図-8に引張材料試験結果を用いたアンカーボルトの応力-ひずみモデルを示す。接合部のバネ要素は、鉛直および水平バネを40mmピッチで配置した。

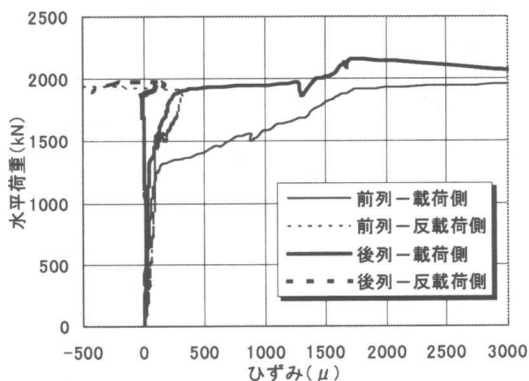


図-6 既設アンカーひずみ分布

表-1 実験結果一覧表 (単位:kN)

	Aタイプ°	Dタイプ°	Eタイプ°
実験最大耐力	1560	1950	2200
アンカ-付着剥離計算値	-	1610	1963
アンカ-降伏計算値	-	1660	2029
アンカ-実降伏計算値	-	1968	2444

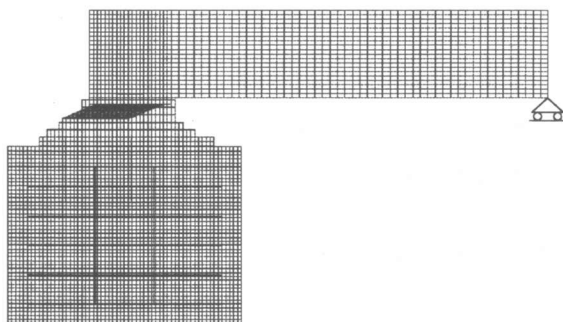


図-7 解析モデル

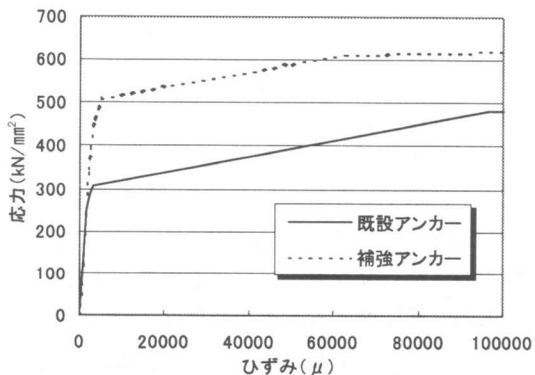


図-8 アンカーの応力-ひずみ関係

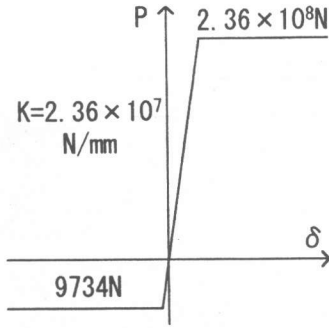


図-9 鉛直バネモデル

バネ定数の設定にあたっては、接合部モルタル部の5mmの範囲で損傷が発生すると仮定している。例えば、図-9に示すように、鉛直バネは引張強度に達するまでは、5mmの区間が弾性挙動を示すと仮定すると、バネ定数は $2.36 \times 10^7 \text{ N/mm}$ となる。ついで、アンカーボルトが設置されており、引張応力の伝達もある程度期待できることから、簡便的に引張強度に達した後も同一強度を保持すると仮定している。

4. 2解析結果

図-10にベースプレートの荷重-鉛直変位関係を示す。実験・解析とも、アンカーボルトの降伏に伴い、1600kN付近から変位が急増することがわかる。また、ベースプレートの鉛直変位（浮き上がり）が2mm付近のとき、作用水平荷重が実験では2000kN、解析値では1700kNと若干異なる傾向となっているが、これには実験に対して解析で考慮したコンクリートの引張強度特性の相違や二次元モデルの影響が考えられる。

図-11にアンカーボルトの水平荷重-ひずみ関係を示す。実験のひずみ計測点は接合部の位置（モルタル下面）より25mmのコンクリート台座中にある。実験では1400kNよりひずみが大きくなり始め、2000kNに達した時点では、降伏ひずみ程度に達する。これに対して解析では、上支承がストッパーに達した後ひずみが増加し始め、1600kN付近からはひずみの増加が止まっている。これは、接合部で浮き上がりが生じるのに対して、解析では附着すべりを考慮していないために、鉄筋ひずみがモルタルと台座の附着

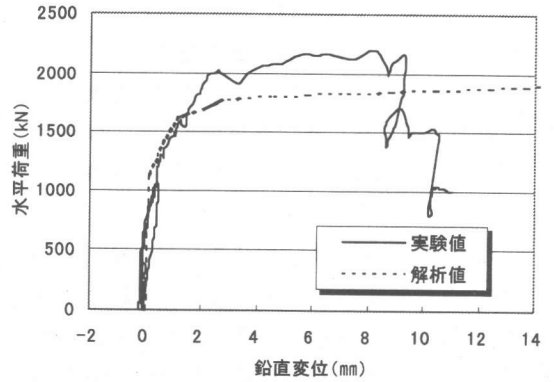


図-10 ベースプレート部の荷重-鉛直変位

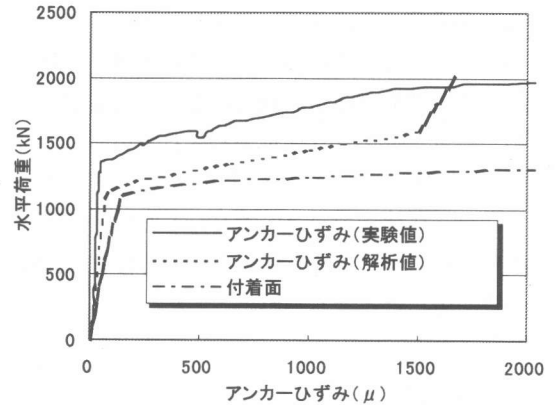


図-11 アンカーボルトの荷重-ひずみ

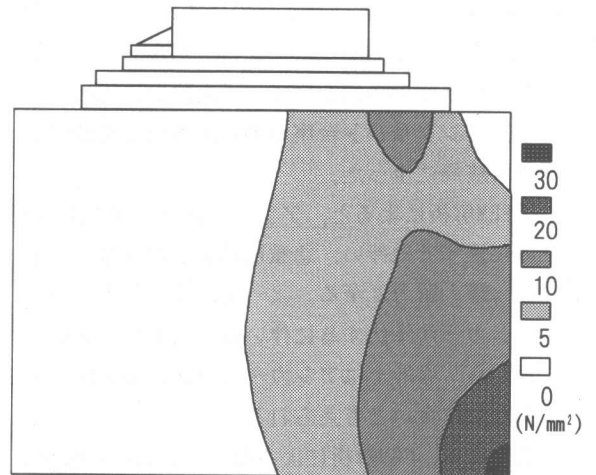


図-12 最小主応力図（荷重1400kN）

面付近に集中するためと考えられる。このように引張に伴う付着剥離現象をモデル化していないために、アンカーボルトのひずみが集中し、実験結果と大きく異なる傾向となっているが、定性的には荷重とアンカーひずみの関係を再現できていると考えられる。

図-12、-13に支承の浮き上がり量が0.5mmと5mmのときの最小主応力図を示す。図-12に示すように、荷重1400kN、浮き上がり量0.5mmでは、コンクリート台座の前面側半分に 12N/mm^2 程度の圧縮応力が分布していることがわかる。これに対して、図-13の荷重1800kN、浮き上がり量5mmでは、浮き上がりに伴い、 30N/mm^2 程度の圧縮応力が前面側2割の領域に集中しており、圧縮破壊レベルに達している。これらの領域を実験破壊面と対応させると、前面の小さな破壊面に対応した位置で大きな圧縮力が生じている。これらのことから、ベースプレートの浮き上がりに伴い、圧縮応力がコンクリート台座前面側に集中することにより、圧縮型の押し抜きせん断破壊が生じたと考えられる。

5. まとめ

ゴム支承の定着部を対象とした、終局挙動評価実験および解析により得られた結論を以下に示す。

①実験は、A、D、Eタイプのいずれもベースプレートの付着剥離から、アンカーボルトを有する場合は鉄筋の降伏を経て、最大耐力に達したのち、コンクリート台座の押し抜きせん断破壊により終局に至った。

②FEM解析によると、アンカーボルトが降伏ひずみに達するに伴い、急激に浮き上がり量が増加し、最大耐力に至る。よって、既設および補強アンカーが降伏するに伴い最大耐力に達することから、設計上はアンカーの降伏を最大耐力と見なして良いと考えられる。

③同様に、FEM解析によると、浮き上がり量が5mm付近に達すると、台座前面押し抜き側に大きな圧縮応力が集中する傾向が認められた。以上

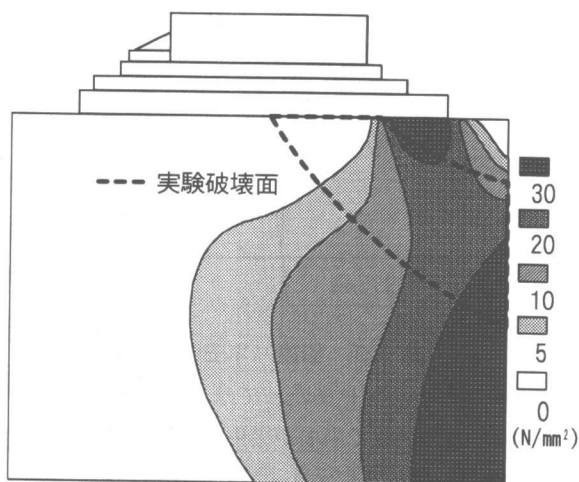


図-13 最小主応力図 (荷重1800kN)

から、アンカーが降伏に達すると、ベースプレートの浮き上がり量が大きくなることによって、支圧面積が減少し、押し抜きせん断破壊が生じやすくなると考えられる。

参考文献

- 1) 幸左賢二, 丹波寛夫, 播金昭浩, 萩原隆朗: PC橋脚上のゴム支査アンカー部の挙動検討, 第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 323~328, 1999. 10.
- 2) 前田良刀, 荒巻真二, 木下紘, 山本亨市, 山本吉久, 大型ゴム支査の品質と力学特性, 橋梁と基礎, Vol. 33, No. 10, 1999. 10.