

(6) ゴム支承アンカー部の地震時挙動の解析的検討

九州工業大学 正会員 幸左 賢二
 九州工業大学大学院 正会員 安藤 高士
 阪神高速道路公団 正会員 閑上 直浩
 東京エンジニアリング 正会員 萩原 隆朗

1. まえがき

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承の損傷が発生した。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承を採用することにより橋梁全体系の耐震性を増すと共に、塑性変形能に優れたゴム支承を採用することにより、支承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、現在までゴム支承単体での荷重-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承の挙動について評価した例は多くはない¹⁾。そこで、著者らは橋座上にゴム支承を設置し、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、橋座部も含めた支承部全体系の挙動を評価した²⁾。

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（設計水平力を増加させるための増設）アンカーの3種類とし、各試験体の終局挙動を比較することによって、補強効果を評価した。本報告は、これらの実験概要および実験現象を再現するために実施したFEM解析結果について述べるものである。

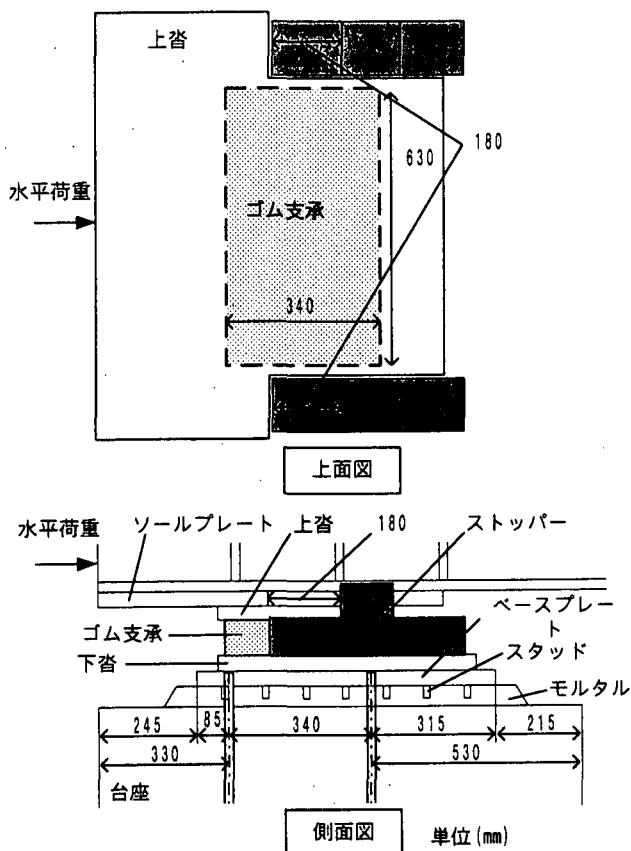


図-1 試験体形状

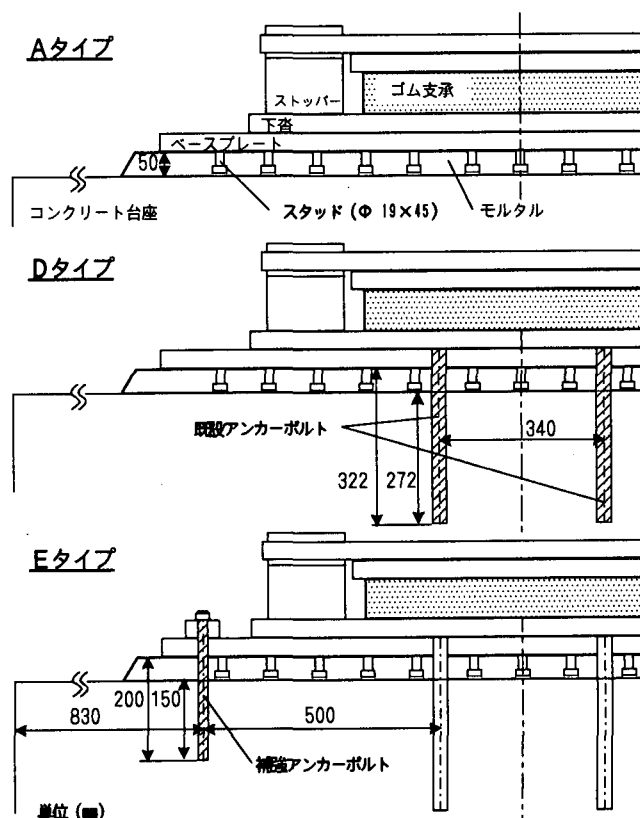


図-2 試験体タイプ

キーワード：ゴム支承，終局耐力，アンカーボルト，FEM，耐震補強

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1

Email: kosa@civil.kyutech.ac.jp

TEL&FAX 093-884-3123

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用ゴム支承(340x630mm)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。

①試験体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。

②試験体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および破壊性状を確認する。

③試験体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。

なお、上記試験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、アンカーが結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倍の本数を配置している。

②アンカーボルトは実橋の調査実績により、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10φ(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 $= (50+272)/32$ を確保した。また、補強アンカーでは実PC橋脚でのPC鋼材の位置を考慮し、コンクリート台座中に15cm埋め込み、9φ $((150+50)/22)$ を確保した。

2.2 載荷要領および使用材料

載荷装置を図-3に示す。最小死荷重480kNを載荷した状態で、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 $60\text{mm} \times 300\% = 180\text{mm}$)に達した時点でせん断変形を拘束するようにストッパーを設けた。よって水平力は約1100kN(水平荷重180mm)まで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。

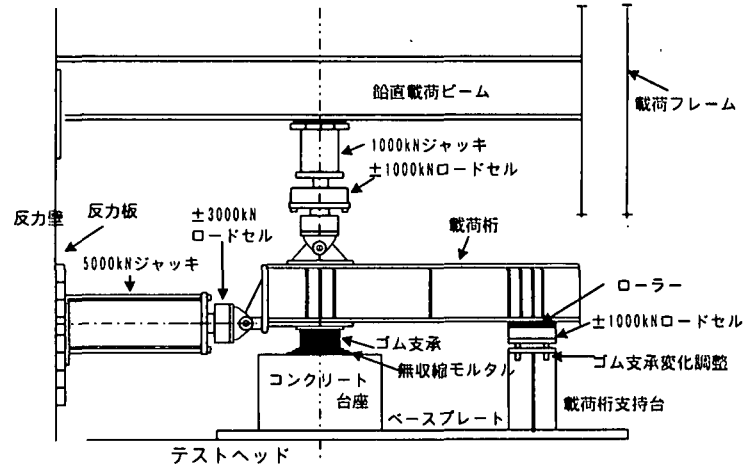


図-3 載荷要領図

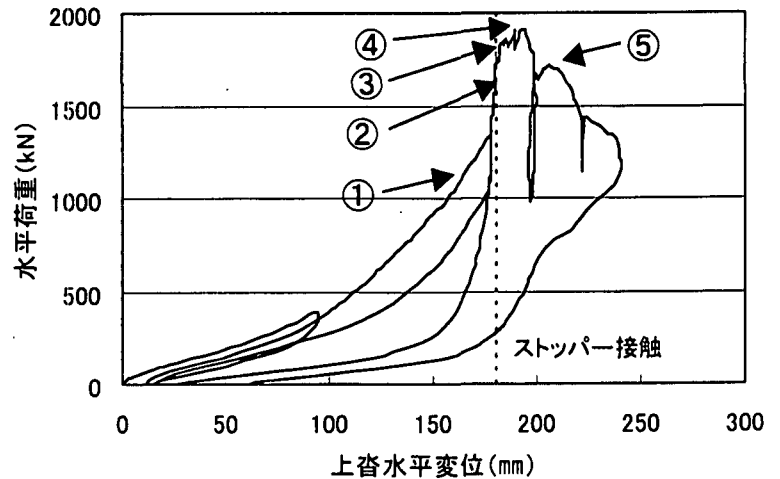


図-4 荷重-上沓水平変位 (Eタイプ)

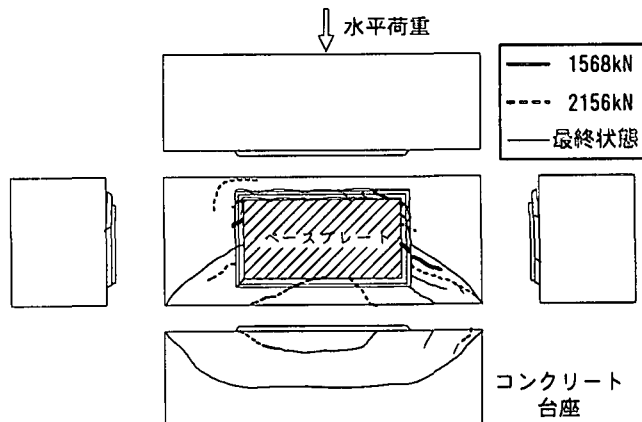


図-5 最終破壊状況 (Eタイプ)

- ①ゴム支承 (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 ($\phi 19$, 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タイプ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-上沓位置の水平変位, 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 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本が破断し, 残る1本は大きく変形している。破断したボルト形状から初めはせん断力で, 最後は引張力で破断したと思われる。これに対して補強アンカーは4本とも抜け出し, 大きく変形している。前面側面側モルタルは, 台座をえぐり取るかたちで破壊し, 2つの押し抜きせん断破壊面が形成されている。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ある, 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. 最大耐荷力評価

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

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

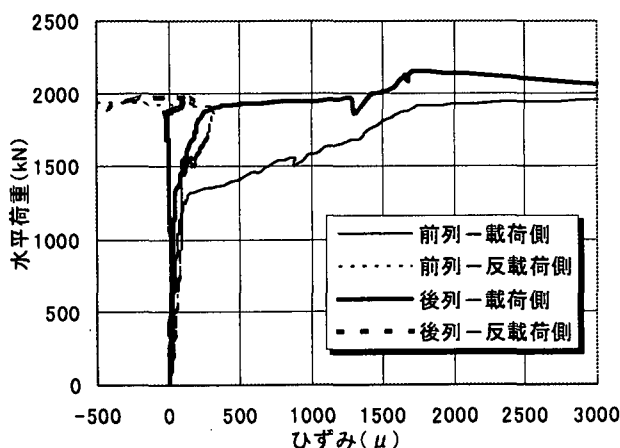


図-6 既設アンカーひずみ分布

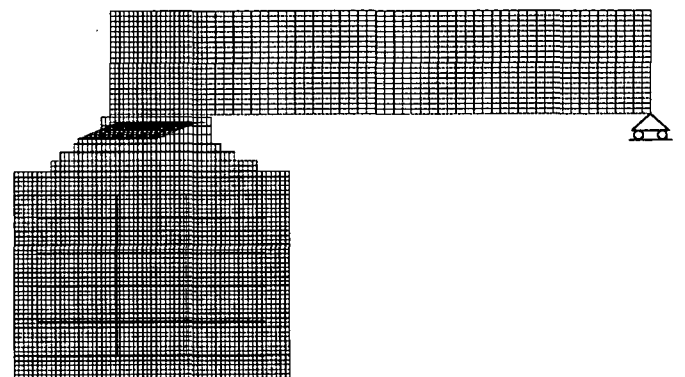


図-7 解析モデル

あった。これに対して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1968kN、Eタイプで2444kNであった。これを実験値と比べると、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り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、実際には引張とせん断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するため、必ずしも既設と補強ボルトと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複鉄筋による計算手法でも最大耐力に対して一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（上支承幅の1/7）、鉄筋は100mmあたりの本数に、載荷荷重も100mmあたりに換算している。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。荷重に伴う変形を模擬するために、図-7に示すように、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う変形量を逐次考慮した解析を行うことが望ましいが、収束時間の制約から、変形の影響を簡便に考慮するためである。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・台座接合部で発生しているため、接合部およびアンカーボルト部を弾塑性部材とし、他の部材は弾性部材とした。

図-8にアンカーボルトの応力-ひずみモデルを示すが、引張材料試験結果を用いたトリリニアモデルを採用している。接合部のバネ要素は、鉛直および水平バネを40mmピッチで配置している。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た。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バネ定数は $2.36 \times 10^7 \text{ N/mm}^2$ となる。その後は、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た。

4.2 解析結果

図-10にベースプレート部の水平荷重-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分かる。ベースプレートの鉛直変位（浮き上がり）が4mm付近の作用水平荷重時に実験では2000kN、解析値では1700kNと若干異なる傾向となっているが、これには解析で考慮するコンクリートの引張強度特性や二次元モデルの実験との差異の影響が考えられる。図-11に

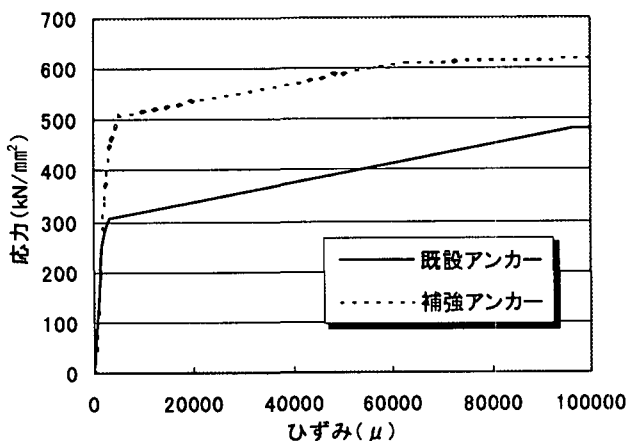


図-8 アンカーの応力-ひずみ関係

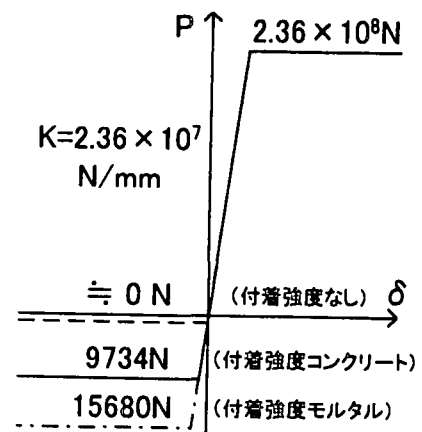


図-9 鉛直バネモデル

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よりひずみが急激に増加し、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、図-11に示すように解析では鉄筋ひずみがモルタルと台座の付着面付近に集中するために、付着面以外ではひずみの伸びが少なくなるためと考えられる。このように解析ではアンカーボルトの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、作用荷重1400kN、浮き上がり量0.5mmでは、コンクリートの台座の前面側半分に12N/mm²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の作用荷重1800kN、浮き上がり量5mmでは、浮き上がりの進展に伴い30N/mm²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を生じている。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. パラメータ分析

5.1 タイプ A, D, Eの比較

同様の手法を用いて解析を行い、A, D, Eの実験結果との比較を行った。図-14に実験結果と解析結果と

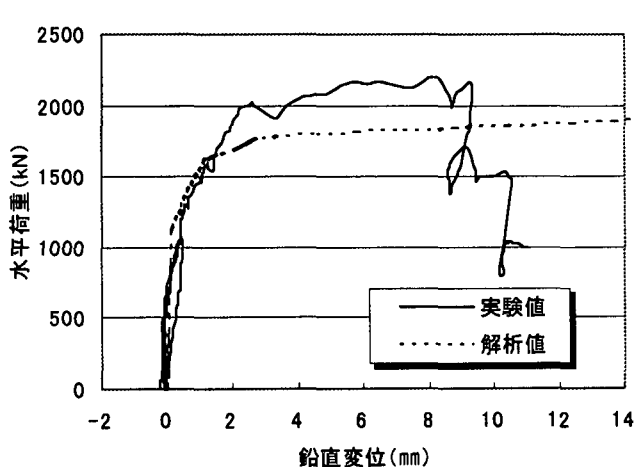


図-10 ベースプレート部の荷重-鉛直変位

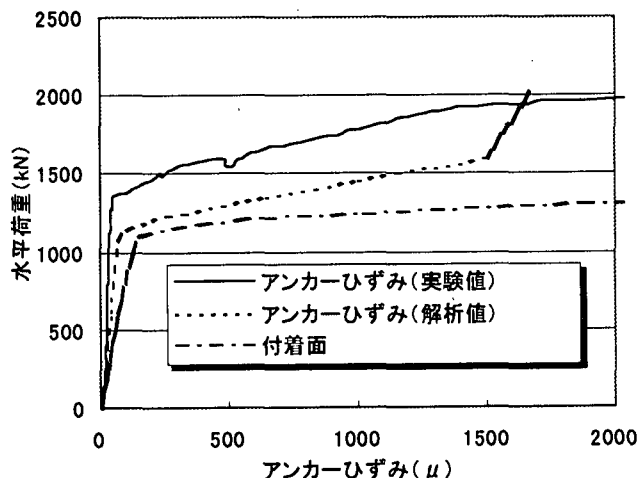


図-11 アンカーボルトの荷重-ひずみ

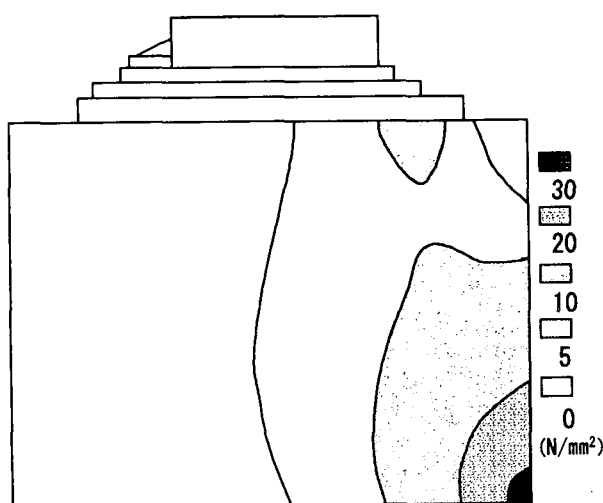


図-12 最小主応力図 (作用荷重 1400kN)

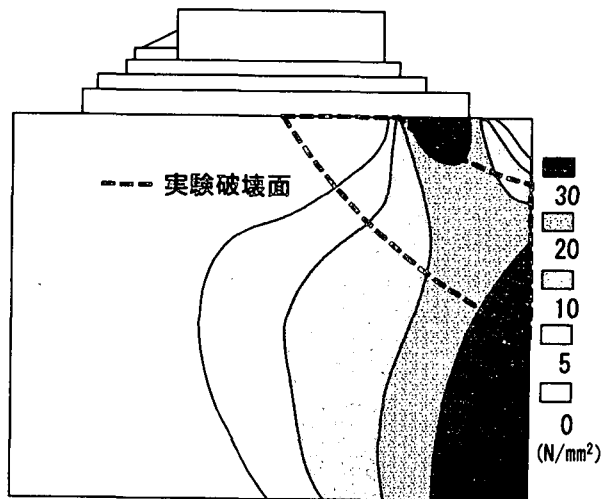


図-13 最小主応力図 (作用荷重 1800kN)

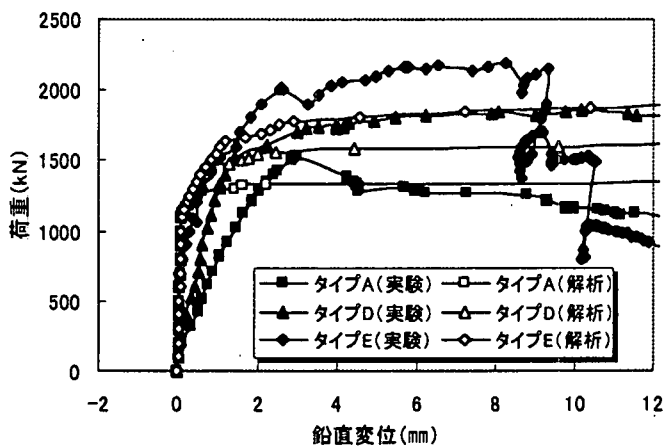


図-14 タイプ別荷重-鉛直変位関係

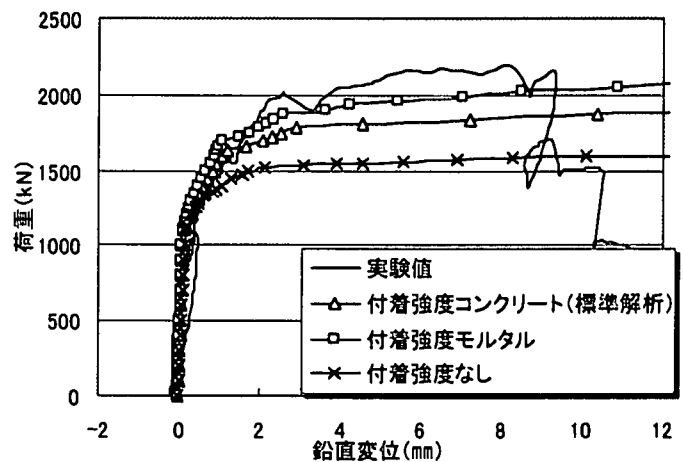


図-15 荷重-鉛直変位関係

の比較を示す。実験 A の初期勾配が大きく異なっている点を除けば、解析値および実験値はほぼ同様の勾配を示している。また、浮き上がり量が 2mm を超える領域では、解析値が鉛直変位の増加に伴っても荷重がほぼ一定値の傾向となるのに対して、実験では荷重が増加する D、E タイプと荷重が減少する A タイプに区分できる。これらの違いは、アンカーボルトを有しない A タイプにおいては浮き上がり量の増加とともに、曲げ引張側の抵抗が減少するのに対して、解析上は引張応力を一定値としていることなどの影響が考えられるが、最大荷重点や浮き上がり量の変曲点などは概ね一致していると考えられる。

5.2 附着強度

上記のタイプ E の解析結果では、実験値と最大耐力に差異が認められた。ここでは図-9 に示すように、モルタルの圧縮強度を用いて引張応力を算出したもの、および非常に引張抵抗を小さくしたものを比較することによって、コンクリートの引張応力が抵抗荷重に及ぼす影響を評価した。図-15 に引張強度の違いによる荷重-鉛直変位の関係を示す。引張強度の設定により 3 割程度の強度の差異が認められるが、これはアンカーボルト量が 0.4% 程度と小さいために、コンクリート引張側の応力-ひずみ曲線が抵抗荷重に影響するためと考えられる。

6. まとめ

- ゴム支承のアンカー一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 のいずれのタイプのベースプレートも附着剥離を生じ、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破壊により終局に至った。
 - ② 実験および解析によると、D、E タイプ試験体では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の降伏を最大耐力と見なして良いと考えられる。
 - ③ 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伴い、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) 前田良刀, 荒巻真二, 木下紘, 山本亭市, 山本吉久: 大型ゴム支承の品質と力学特性, 橋梁と基礎, Vol.33, No.10, 1999. 10.
- 2) 幸左賢二, 丹波寛夫, 播金昭浩, 萩原隆朗: P C 橋脚上のゴム支査アンカー一部の挙動検討, 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.