

支圧板式アンカーフレームの設計に関する検討

大阪管理部 調査設計課 鈴木 威
京都建設部 設計課 志村 敦
京都建設部 設計課 長澤 光 弥

要 旨

本論文は、鋼製橋脚アンカーフレームの合理的な設計法として、阪神高速道路において従来標準的に用いていたビーム方式と比べて構造を簡略化した支圧板式アンカーフレームに着目し、その適用に向けて検討した結果について報告するものである。今回の検討にあたってはまずFEM解析により支圧板式アンカーフレームの支圧板応力分布およびコンクリートの支圧応力分布を確認した。そして、その結果を踏まえた上で支圧板式アンカーフレームの設計法を提案し、1/4スケールの供試体を用いた載荷実験により性能確認を行った。

キーワード：アンカーフレーム、支圧板式、FEM解析、性能確認実験

はじめに

鋼製橋脚はコンクリート製フーチング上にベースプレートを介して設置し、フーチングに埋め込まれたアンカーフレームにアンカーボルトを介して定着する構造になっている。阪神高速道路ではこれまでアンカーフレームには大きな梁構造であるアンカービームにより力を伝達する方式(図-1)を採用していた。しかし、アンカーフレームはフーチングコンクリートの中に埋め込まれているた

め、コンクリートの支圧を適切に評価することにより、構造を簡略化した支圧板式のアンカーフレーム(図-2)でも設計が成り立ち、コスト縮減を可能とすることが期待できる。

今回の検討では、まずFEM解析により支圧板応力分布およびコンクリートの支圧応力分布を確認した。その結果を受けて、支圧板式アンカーフレームの設計法について提案し、1/4スケール供試体による載荷実験により設計手法の妥当性を確認した。

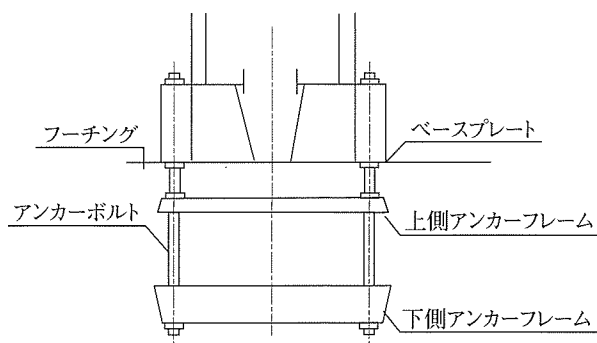


図-1 ビーム方式 (従来構造)

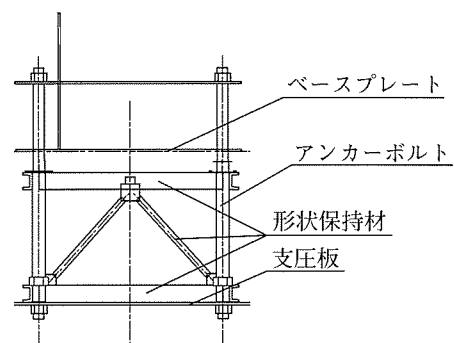


図-2 支圧板式 (新構造)

1. FEM解析

支圧板方式のアンカーフレーム構造における支圧板応力分布およびコンクリート支圧応力分布を把握することを目的として、3次元FEM解析による検討を行った。

1-1 解析方法

アンカーボルト1本相当区間の支圧板および同幅のコンクリートを3次元ソリッド要素によりモデル化してFEM解析を行った。まず、図-3に解析箇所のイメージ図を示す。

(1) モデル化

モデル化の対象範囲は図-3において斜線を施した範囲で、解析モデル図を図-4に示す。このモデル化の特徴としては、①アンカーボルト1本当りの支圧板および周囲のコンクリートをモデル

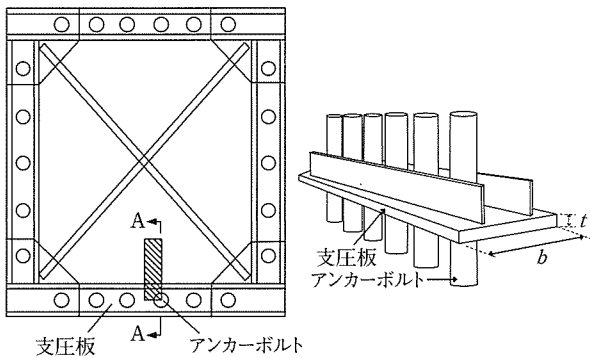


図-3 解析箇所のイメージ図

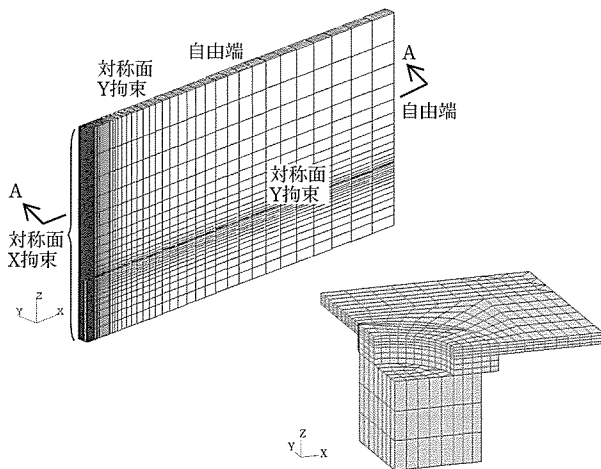


図-4 解析モデル図

化する、②対称性を考慮して1/4をモデル化する、③アンカーボルトはモデル化しない、④支圧板補剛材の効果を等価な剛性でモデル化する、⑤支圧板下端および側面は二重節点とする、の5点が挙げられる。

(2) 解析条件

解析に用いた材料定数を表-1に示す。また、荷重は1617kN（アンカーボルトの降伏荷重）とし、境界条件はフーチングの下端を固定とした。また、材料相互の境界は滑りを考慮した。

(3) 解析ケース

今回の検討においては、支圧板の板厚および幅をパラメータとし、表-2に示す5ケースについて解析を行った。

1-2 解析結果

解析結果として図-5に支圧板の引張応力分布、図-6にコンクリートの支圧応力分布を示す。

まず、図-5より支圧板軸直角方向の支圧板引張応力はナット端部で最大となり、板厚の最も薄いCASE-1で降伏点を超過していることが判る。また、ボルト並び方向の支圧板引張応力は支圧板幅方向の応力よりも小さい結果となっている。

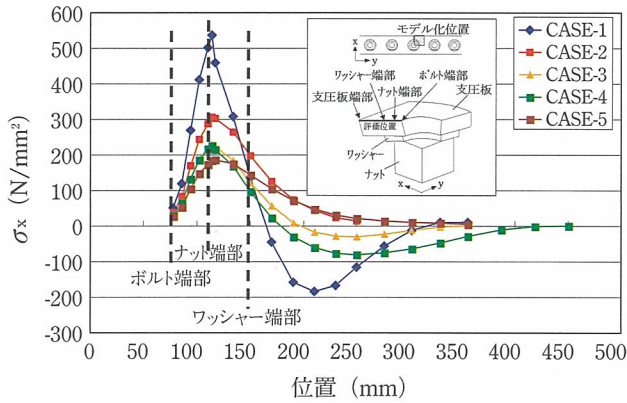
次に、図-6よりコンクリートの支圧応力は、支圧板幅方向にはボルト端部を頂点としてほぼ三角形分布となることが判る。ここで、支圧板幅が広い場合（CASE-4）においては、端部付近では

表-1 解析に用いた材料定数

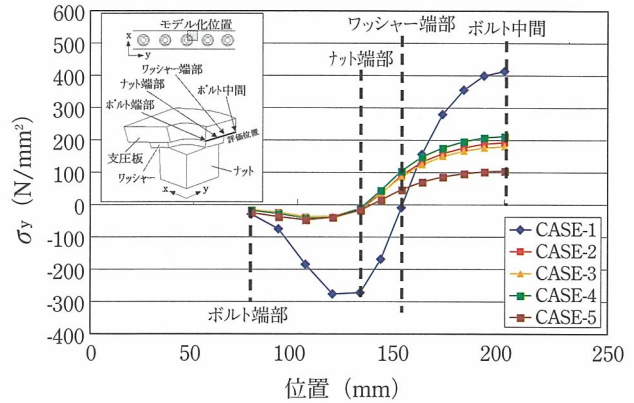
	コンクリート	鋼材 (支圧板,ワッシャー,ナット)
弾性係数 (N/mm ²)	1.05×10 ⁴	2.10×10 ⁵
ポアソン比	0.167	0.3

表-2 解析ケース

	板厚 t (mm)	幅 b (mm)
Case-1	20	710
Case-2	50	500
Case-3	50	710
Case-4	50	900
Case-5	70	710

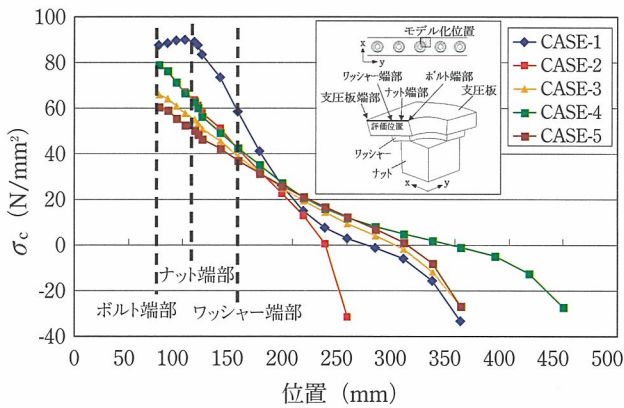


(a) 支圧板幅方向

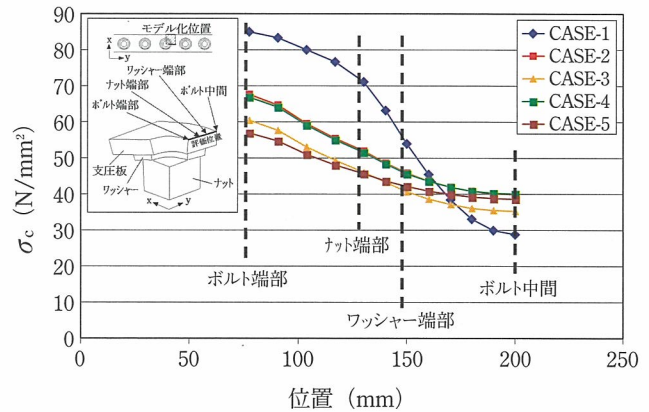


(b) ボルト並び方向

図-5 支圧板の引張応力分布



(a) 支圧板幅方向



(b) ボルト並び方向

図-6 コンクリートの支圧応力分布

ほとんど応力が発生していない。このことから、支圧板幅はある程度以上大きくしてもあまり効果がないと考えられる。また、応力の最大値としてはボルト端部で80～90N/mm²となっており、フーチングの設計基準強度(24N/mm²)の4倍程度となっている。しかし、大きなコンクリート塊中であるため周囲のコンクリートによる拘束効果もあると考えられ、実際に頭付きアンカーボルトの許容支圧応力度を最大で設計基準強度の10倍まで許容している例¹⁾もある。そこで、今回の構造においても設計基準強度以上の強度が期待できるものと考え、コンクリートの支圧については載荷実験により安全性を確認しており、その詳細については3章にて述べることにする。

また、ボルト並び方向については、支圧板厚が

薄い場合(CASE-1)においては他のケースに比べてボルト近傍に応力が集中しており三角形分布では近似できないと考えられる。

以上の解析結果より次のように考察できる。

- ① 支圧板の応力解析を行う場合には、支圧板上でのコンクリートの支圧応力分布を考慮して評価することにより支圧板の引張応力を低下させることが可能である。また、従来はボルト並び方向に梁として設計していたが、ボルト並び方向よりも支圧板幅方向の引張応力の方が大きくなっていることから、支圧板幅方向の片持ち梁として支圧板を設計すべきであると考えられる。
- ② アンカーボルト降伏応力作用時の支圧板の引張応力は、板厚50mm以上であれば降伏応力値以下で設計可能である。

なお、今回の解析においては、図-6(a)に示すように支圧板端部でコンクリートの支圧応力が負の値となっている。これは、今回の解析においてコンクリートと支圧板の剥離を考慮できないモデルを用いたために、支圧板端部近傍のコンクリートに生じる斜め引張応力の鉛直成分が算出されたものであり、実際にはコンクリートと支圧板が剥離するため、負の支圧応力は発生しないと考えられる。

2. 支圧板式アンカーフレームの設計法

上述の解析結果を踏まえ、ここでは以下に示す支圧板式アンカーフレームの設計法を提案する。

2-1 支圧板幅の決定

上述の解析よりアンカーボルトに作用する軸力に応じて支圧板に作用する支圧応力度は、ボルト部を頂点とした三角形分布をしており、ボルト端部付近のコンクリートの局部支圧応力度はコンクリートの設計基準強度の3~4倍となっていることが判明している。そこで、支圧板幅の設計について、以下のように考えられる。

支圧板の設計荷重はアンカーボルト1本あたりの引張力として、アンカーボルトの降伏荷重強度を用いるものとする。このとき支圧板に作用する外力は支圧応力の三角形分布を仮定すると図-7のようになる。これより、上下方向の釣り合い式は、アンカーボルト位置での支圧応力度を σ_{max}

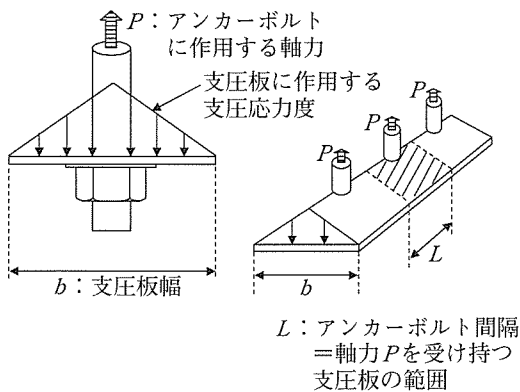


図-7 支圧板に作用する外力

とすると、

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_{max} \cdot b \cdot L - \sigma_{max} \times \pi \phi^2 / 4 = P \quad \dots\dots (1)$$

となる。ここで、支圧板面に作用する平均支圧応力度がコンクリートの設計基準強度の2倍以下となるように設計する。三角形分布の仮定より、 $\sigma_{max} \geq 4\sigma_{ck}$ となればよいから、式(1)より、支圧板幅は以下の式を満たすよう設計するものとする。

$$b \geq \frac{1}{2L} \left(\frac{P}{\sigma_{ck}} + \pi \phi^2 \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- b : 支圧板幅 (mm)
- L : アンカーボルト間隔 (mm)
- P : アンカーボルト1本あたりの設計荷重 (N)
- σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)
- ϕ : アンカーボルト径 (mm)

また、形状から定まる適用範囲として、支圧板幅は $b \geq 2\phi + 40$ を満たすものとする。

2-2 支圧板厚の決定

支圧板厚は、支圧板幅方向の片持ち梁として設計するとともに、ボルト軸力を確実にコンクリートに伝えるために有効支圧面積を考慮した設計を行うものとする。

片持ち梁としての必要板厚は、ナット端部を固定端とし、支圧荷重が三角形分布すると仮定して算出する。(参考図を図-8に示す。)

これより支圧板厚は、次式(3)を満たすよう

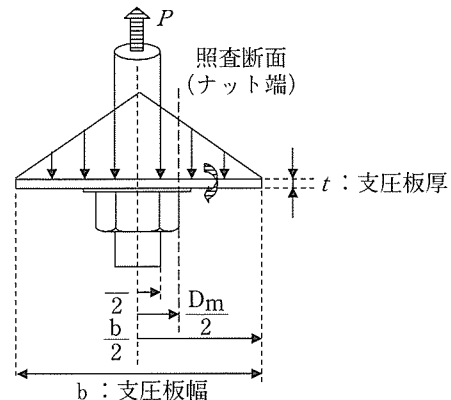


図-8 片持ち梁のモデル化

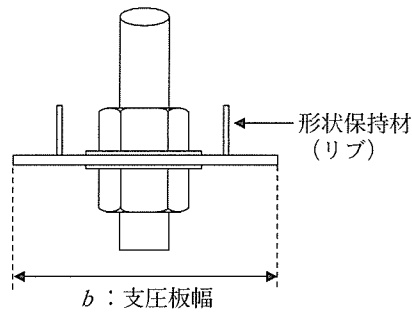


図-9 形状保持材

に決定する。

$$t \geq \sqrt{\frac{(b-D_m)^3 P}{b(2bL - \pi \phi^2) \sigma_{sa}}} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- t: 支圧板厚 (mm)
- b: 支圧板幅 (mm)
- D_m: ナットの最大径 (mm)
- L: アンカーボルト間隔 (mm)
- P: アンカーボルト1本あたりの設計荷重 (N)
- σ_{sa}: 支圧板の許容応力度 (N/mm²)

また、ボルト軸力を確実にコンクリートに伝えることができる剛度を確保するために、有効支圧面積についてもプレストレストコンクリートのPC鋼材定着部の設計式²⁾を参考に、次式

$$t \geq \frac{b-d}{3} - t_l \dots\dots\dots (4)$$

により照査するものとする。

ここに、

- t: 支圧板厚 (mm)
- b: 支圧板幅 (mm)
- d: ナットの短径 (mm)
- t_l: 座金の厚さ (mm)

また、支圧板の最低板厚は25mmとする。

2-3 形状保持材の配置

従前のアンカービームとは異なり、支圧板の剛性が低く架設時の変形が想定されるため、形状保持材として図-9に示すように十分な剛性を持ったリブを配置する。

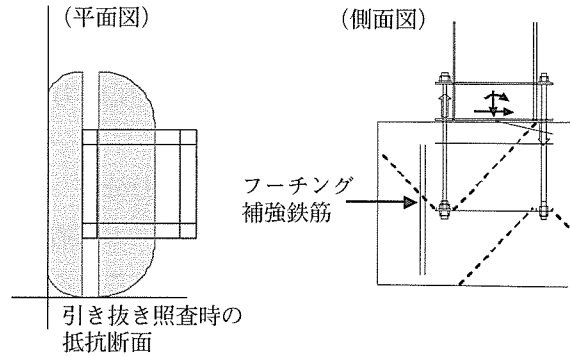


図-10 せん断抵抗面

2-4 フーチングコンクリートの照査

フーチングコンクリートの照査は、アンカーフレームより伝達される引き抜き力または押し込み力に対して、コンクリートのせん断応力度が許容せん断応力度以内であることを確認する。

設計荷重は、フーチング引き抜き照査に対してはアンカーボルト降伏軸力を、押し込み照査に対しては複鉄筋断面において引っ張り側ボルトが降伏した際に圧縮側ボルトに生じている軸力をそれぞれ使用するものとする。

押し込み、引き抜き照査に対しては、斜めせん断抵抗面を想定する。このとき、たとえば引き抜きの場合のせん断抵抗面は図-10のようになる。

ここで、フーチングに配置されているスターラップのみでせん断耐力が不足する場合には追加でせん断補強鉄筋を配置する。

2-5 2枚支圧板方式

フーチング厚が薄い場合などには、上述のフーチングコンクリートの照査において押し込み力に対する設計が成り立たないことが考えられる。そのような場合には、上側の形状保持板を上側支圧板として押し込み力を受け持たせ、2枚支圧板方式により設計するとよい。

3. 性能確認実験

上述のFEM解析結果をもとに支圧板方式アンカーフレームの設計法確立に向けて、1/4縮小模型による引張載荷実験を行った。この実験におい

ては特に、

- ① 支圧板式アンカーフレーム構造の健全性
- ② 支圧板上のコンクリート最大支圧応力値と支圧応力分布
- ③ 支圧板の最大引張応力と引張応力分布

に着目し、支圧板方式アンカーフレーム構造の健全性および設計法の妥当性を検証することを目的とする。

3-1 実験方法

(1) 実験供試体

実験供試体は直径 $\phi = 205\text{mm}$ のアンカーボルト3本に対して試設計したアンカーフレームの1/4スケールモデルを用いた。ただし、市販の材料に対応できるようにサイズについては若干の調整を行っている。表-3に試設計したアンカーフレーム寸法および実験供試体寸法を示す。

また、コンクリートには圧縮強度 24N/mm^2 のものを用い、実フーチングと同等の鉄筋量を配置している。また、供試体コンクリートの寸法はアンカーボルト引抜荷重に対してせん断破壊した場合のコーン破壊面積を確保した。なお、今回の実験においては地震時の繰り返し荷重によりアンカーボルトとコンクリートの付着が切れた状態を想定

表-3 実験ケース

ケース	アンカーボルト径 (mm)	支圧板幅 (mm)	支圧板厚 (mm)
実験供試体	48	152.2	15
試設計	205	650	72

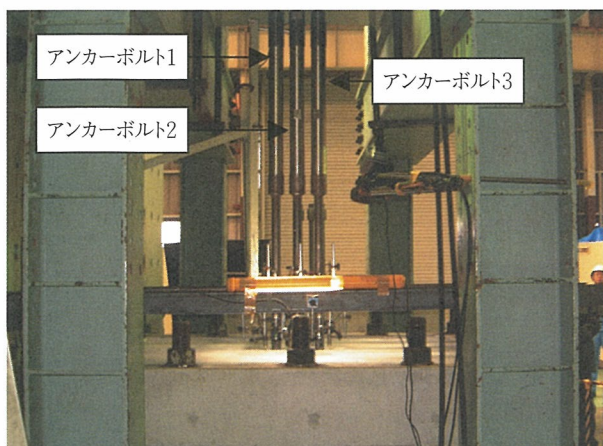


写真-1 実験状況

し、アンカーボルトに剥離剤を塗布することによりその状態を模擬している。実験状況を写真-1に示す。

(2) 荷重方法

供試体への荷重は以下の手順で実施した。

① 予備荷重

降伏荷重の20%程度まで荷重して供試体のガタを確認

② 降伏荷重まで荷重

アンカーボルトの降伏荷重まで荷重

③ 荷重を除荷

アンカーボルト残留変位、支圧板残留ひずみを確認

④ 最大荷重荷重

アンカーボルト降伏荷重の1.2~1.3倍程度まで荷重

(3) アンカーボルトの単体引張試験

アンカーボルト単体の引張挙動を把握するために、実験に先立って引張試験を実施した。その結

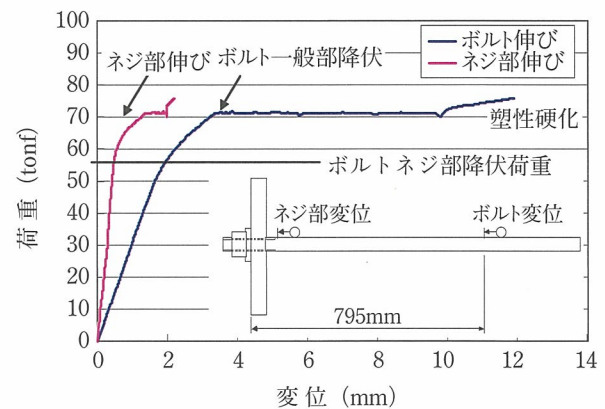


図-11 アンカーボルト単体での荷重-変位関係

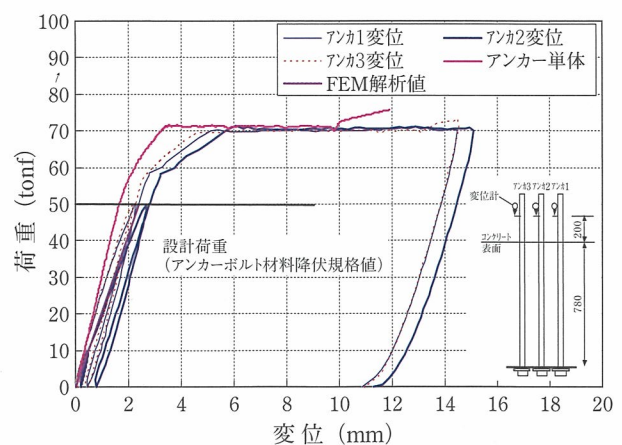


図-12 アンカーボルトの荷重-変位関係

果を図-11に示す。これより、約60tonf (=588kN) 付近でまずネジ部が降伏し、約70tonf (=686kN) 付近で一般部が降伏していることがわかる。

3-2 実験結果

実験により得られた供試体の荷重-変位関係を図-12に示す。図中には別途実施したアンカーボルト単体の引張試験結果及びFEM解析結果を併記した。ここで、FEM解析は線形解析であるため、荷重50tonf (=490kN) 時の変位までを直線で補完した。

これより実験では、設計荷重50tonf (=490kN) を超えて約70tonf (=686kN) で荷重が上がりなくなりアンカーボルトの伸びが増大した後、一部アンカーボルトが塑性硬化を開始したことを確認して载荷を終了したことが判る。最終的に設計荷重50tonf (=490kN) の約1.4倍まで载荷してもコ

ンクリート表面にクラックは確認されず、アンカーボルトの引き抜け等が生じなかったことから構造全体系としては健全であることを確認できた。以下では、コンクリート、支圧板の健全性について確認する。

(1) コンクリートの支圧応力

図-13に支圧板幅方向およびボルト並び方向のコンクリート支圧応力分布を示す。図中にはFEM解析結果も併せて示している。これより、支圧板幅方向については2-1節において支圧板幅の設計式を定める際に仮定した三角形分布がほぼ妥当であったことが判る。また、ボルト並び方向についてもほぼFEM解析と同様の傾向を示しており、FEM解析の妥当性が検証された。

(2) 支圧板の引張応力

図-14に支圧板幅方向およびボルト並び方向の支圧板引張応力分布を示す。図中にはFEM解

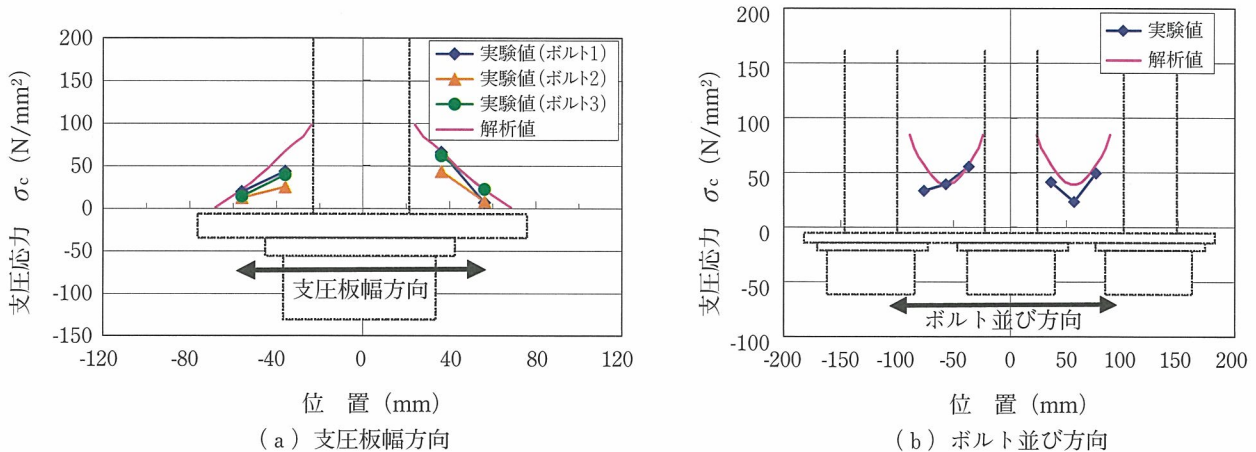


図-13 コンクリートの支圧応力分布

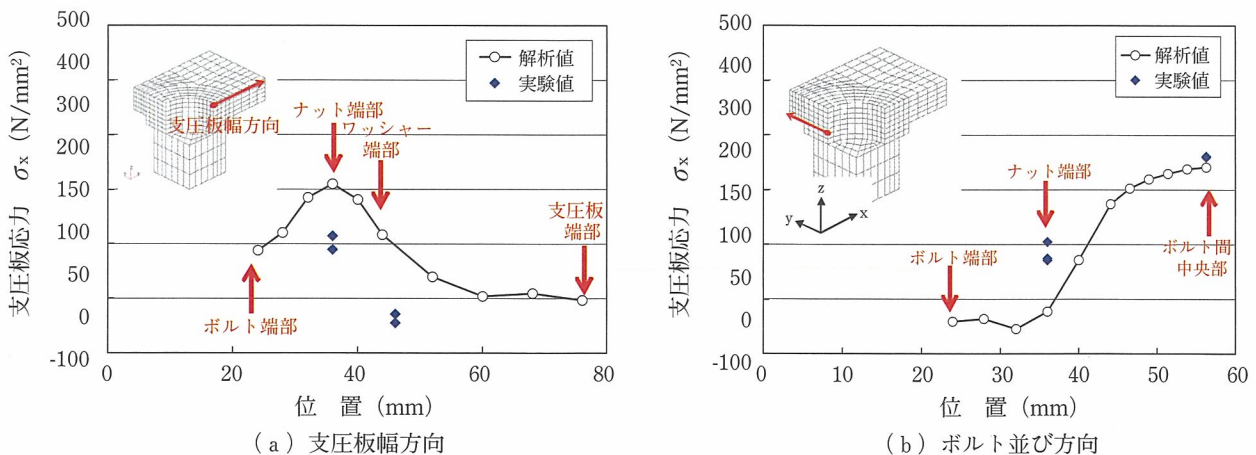


図-14 支圧板の引張応力分布

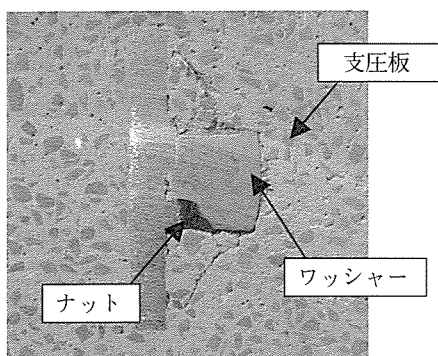


写真-2 供試体の切断面

析結果も併せて示している。これより、支圧板幅方向については最大引張応力値を示すナット端部でも $100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度（実験値）であり十分許容応力範囲内に抑えられている。ここで実験値と比べて解析値が大きくなっているのは、コンクリート支圧応力の解析値が実験値に比べ大きく算出されているためであると考えられる。また、ボルト並び方向については、実験値と解析値の間に若干の違いは見受けられるものの、最大応力値を示すボルト間中央部においてはほぼ一致しており、FEM解析の妥当性が確認できた。

(3) まとめ

以上より、FEM解析と実験値がほぼ整合しており、支圧板方式アンカーフレームの設計法の妥当性が確認された。また、荷重載荷後に実験供試体を切断してアンカーボルト近傍のコンクリート内部を確認したところ写真-2に示すような状態であった。支圧板上部には特にクラックや圧壊している箇所は見当たらず、構造の健全性を確認することができた。

以上、ここでは試設計ベースの供試体による実験結果のみを報告したが、この供試体の他にも、さらに支圧板厚や支圧板幅を小さくした供試体による実験も行っており、今後さらなる合理化に向けての検討を行っていく所存である。

4. まとめ

今回の検討により、構造が簡略な支圧板方式によりアンカーフレームの設計が可能であることが確認できた。本方式のアンカーフレームの適用により、今後の鋼製橋脚工事においてより合理的な設計が可能になるものと考ええる。

謝辞：本検討の実施にあたっては、阪神高速道路公団・鋼構造物検討委員会（委員長：渡邊英一京都大学教授）においてご審議いただき、同委員会の委員各位には適切なご指導をいただいた。また、解析及び実験にあたり、三菱重工業(株)の岸氏、近藤氏に特にお世話になった。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 各種合成構造設計指針・同解説, (社)日本建築学会, pp. 191-198, 1985.
- 2) 藤井学, 小林和夫: プレストレストコンクリート構造学, 岡田清監修, 国民科学社, pp. 137-145, 1979.

A STUDY ON THE DESIGN OF PRESSURE-PLATE-TYPE ANCHOR FRAME FOR STEEL PIERS

Takeshi Suzuki, Atsushi Sshimura, and Mitsuya Nagasawa

We propose a rational design for the anchor frame of steel piers. In the Hanshin Expressway, anchor frame was designed as a beam structure, but considering the footing concrete, it can be designed as a simple pressure plate structure. We conducted FEM analysis to determine stress distribution of the pressure-plate-type anchor frame. Then, with the result of FEM analysis, the design method was proposed. And last, loading experimentation is conducted and the suitability of the design method was confirmed.

Keywords: anchor frame, pressure-plate, FEM analysis, loading experiments