

# 論文 三次元有限要素法を用いたアンカー擁壁の設計

伊波 あかね\*1・松原 仁\*2・伊良波 繁雄\*3・神田 康行\*4

**要旨**：本研究は、道路改良工事に伴い計画された新工法の親杭式土留めアンカー式擁壁の設計に三次元有限要素解析を利用し、その設計の妥当性を検討したものである。有限要素法による解析の結果、歩道上、高さ 4m に位置するコンクリート梁の突出幅を 100cm から 15cm 程度に抑えることができた。その結果、歩行者の安全性、快適性の観点から良好な通行空間の形成が可能となった。

**キーワード**：コンクリート，三次元有限要素法，親杭式土留めアンカー擁壁，新工法

## 1. はじめに

擁壁は土砂の崩壊を防ぐために土を支えるコンクリート構造物であり、用地や地形などの条件によって、土だけでは自立できない箇所に設けられる。

擁壁の基本計画にあたっては、擁壁の高さ、地形あるいは、地盤条件等により構造形式、基礎形式が変わることから、設置の必要性、設置箇所の地形や地質、周辺構造物との相互影響、施工条件、安全性や景観への配慮、経済性に関する調査・検討を十分に行う必要がある。

ここでは、新工法のアンカー擁壁の設計を行うにあたって横梁部材の応力状態の安全性を確かめるため、三次元有限要素法(以下、FEM)を用いて応力解析を行った。

## 2. 設計概要

今回解析を行った擁壁は、道路改良工事に伴い計画された新工法の親杭式土留めアンカー擁壁である。この構造形式を採用した経緯を図-1 に記した。まず、擁壁を歩道端に計画する必要があるため、用地の制限から自立式擁壁を採用した。また、擁壁天端でのたわみ量も制限されている

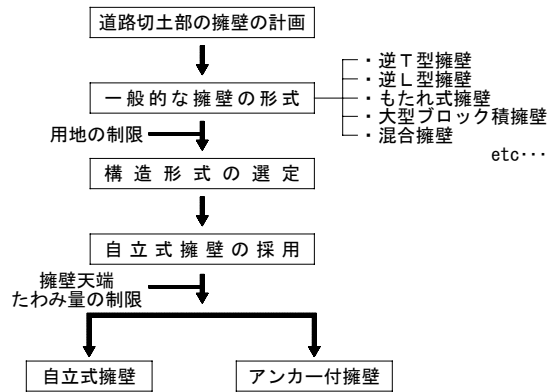


図-1 擁壁計画フローチャート



従来工法

従来工法

写真-1 従来工法の擁壁

ことからアンカー付擁壁とした。ここで、従来工法(写真-1)で設計した場合、H鋼横梁を被覆するコンクリート梁が歩道上 4m の位置で 100cm 程度突出した形状となり、今回擁壁を計

\*1 芝岩エンジニアリング (正会員)

\*2 日本原子力研究所 計算科学技術推進センター 博士(工学) (正会員)

\*3 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 博士(工学) (正会員)

\*4 琉球大学大学院 理工学研究科 修士(工学) (正会員)

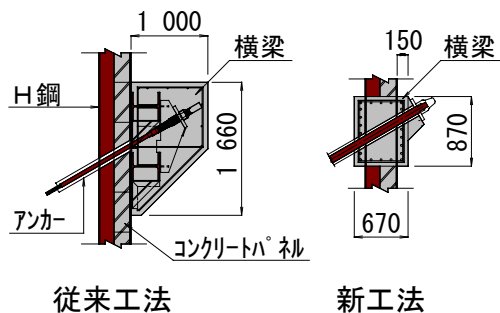


図-2 従来工法と新工法の断面比較

画している現場では歩行者に対して圧迫感を感じさせ景観上も好ましくない。今回提案する工法は、横梁に鉄筋コンクリート梁(以下、RC梁)を使用することでその張出し厚を15cmに抑え、歩行者の安全性、快適性の観点から良好な通行空間の形成と経済性の向上が期待できる。従来工法と新工法のアンカー定着部付近の断面を図-2に示す。

### 3. 解析目的

新工法では図-3に示すようにH鋼横梁の代替にRC梁を用いる構造としたが、H鋼によりコンクリート断面が欠損するため、コンクリートに耐力上問題となるひび割れが発生することが懸念される。また、そのRC梁への作用圧は、梁そのものにかかる土圧とコンクリートパネルを介してH鋼に伝わる土圧が考えられ、拘束されている位置が根入れ部及びアンカー部の2箇所であり、非常に複雑な構造モデルとなっている。

従来の簡易的な横梁設計計算には、アンカーの両サイドに位置するH鋼を支点とし、アンカー位置に集中荷重がかかる単純梁と見なす方法がある。今回提案する新工法のRC梁の設計にその方法を適用すると、単純梁モデルは安全側の設計となるが、上記H鋼との交差位置での局所的な応力が起因となるコンクリートのひび割れ発生まで検討するのは不可能である。

そこで、本研究では荷重条件、境界条件をより現状に合致するようにモデル化を行い、三次元FEM線形解析を実施し全体挙動を把握した後、RC梁の表面に問題となる応力集中が現れないか検討を行い、考察を行った。

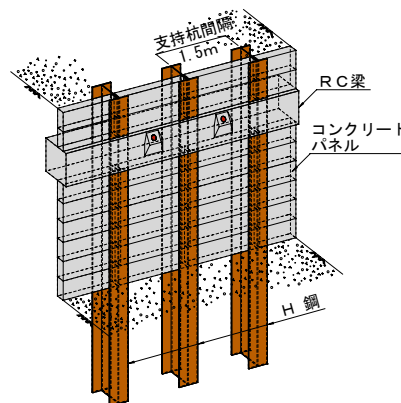


図-3 新工法の擁壁概略図

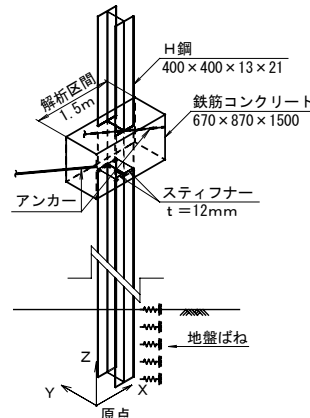


図-4 解析対象モデル

### 4. 解析方法

#### 4.1 解析モデル

解析対象モデルは図-3のアンカー1スパン間(1.5m)を、対称性を考慮して図-4のように取り出し解析に用いた。また、解析プログラムは線形弾性解析であり、独自で開発した。使用した要素は、一般的に用いられているアイソパラメトリック六面体要素<sup>1)</sup>である。この要素は、変位場にxyz連成項を含むため、本研究で取り扱うような複雑な変形を伴う問題に対して有効であり、また、コンクリート、H鋼及び鉄筋の連成解析に対して、メッシュ分割が容易であるという利点を有する。なお、本研究で用いたモデルは要素数101,178、自由度389,358であり、大規模解析モデルとなっている。土留め壁となるコンクリートパネルは、H鋼への荷重伝達部材と見なした。地盤は弾性体とし、道路橋示方書V耐震設計編<sup>2)</sup>に基づき水平ばねでモデル化<sup>3)</sup>した。解析対象部材は親杭のH鋼と横梁部材のRC梁、RC梁の鉛直方向の変位を拘束するためのスティフナー、水平方向に対して30°で打設されたアンカー、そして水平地盤ばねとした。

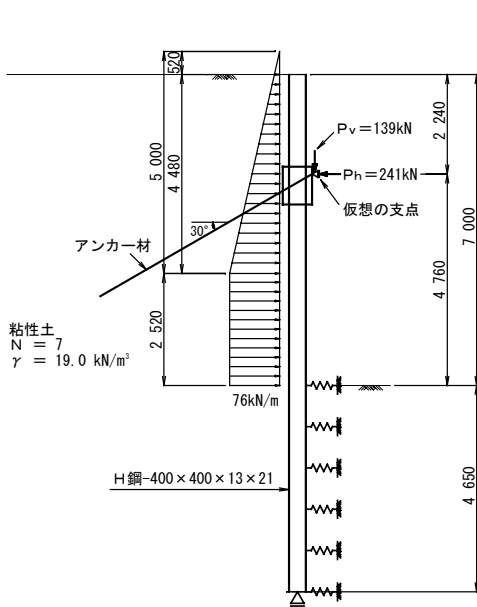


図-5 土圧分布

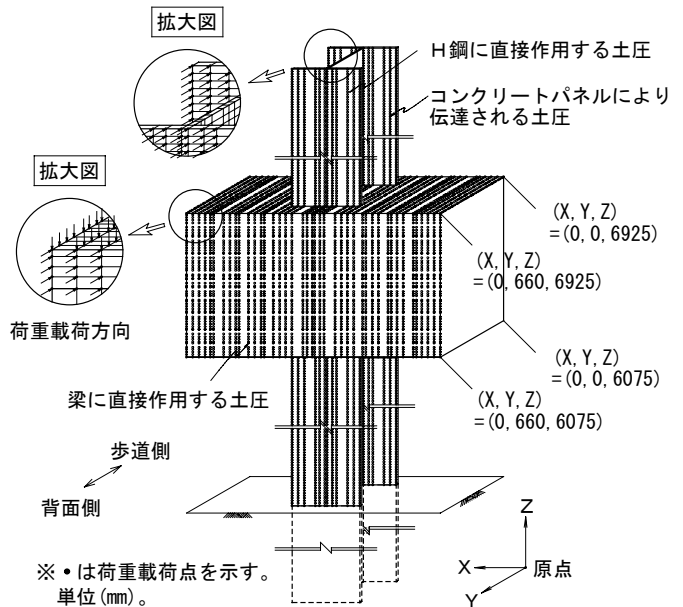


図-6 荷重荷重

#### 4.2 解析条件

解析は境界条件として根入れ部に水平地盤ばねを設け、H鋼下端のZ方向を拘束した。また、対称性を考慮するためRC梁両側面のX方向を拘束し、アンカー部には仮定の支点を設けて反力を与えた。但し、アンカー材が水平方向に対して30°の角度で打設されていることを考慮し、反力を水平方向と鉛直方に分解して与えた。なお、水平反力Phの妥当性は市販のフレーム解析ソフトでアンカー位置に支点を設け、そこに発生する支点反力が0と等しくなるように調節した。また、表-1、表-2に解析に用いた諸係数を示す。

表-1 ヤング係数およびポアソン比

	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 μ	単位体積重量 γ (kN/m <sup>3</sup> )
鋼材 <sup>※1</sup>	2.0×10 <sup>5</sup>	0.30	77
鉄筋 <sup>※2</sup>	2.0×10 <sup>5</sup>	0.30	77
コンクリート <sup>※3</sup>	2.5×10 <sup>4</sup>	0.17	23 (無筋) 24.5 (有筋)
上載土	—	—	19

※1 H400\*400\*13\*21・ステイフナーt=12mm

※2 主筋 D25・スターラップ D19

※3 設計基準強度 σ<sub>ck</sub>=24N/mm<sup>2</sup>

表-2 アンカー反力及びバネ定数

アンカー	P <sub>v</sub> = 1.39 × 10 <sup>2</sup> kN P <sub>h</sub> = 2.41 × 10 <sup>2</sup> kN
地盤	K <sub>h</sub> = 1.26 × 10 <sup>-1</sup> N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3 荷重条件

図-5に示すように、道路土工指針<sup>4)</sup>に基づく断面決定用土圧(アンカー打設間隔1.5m分)を用いて土圧をH鋼とRC梁に節点荷重として作用させる。なお、H鋼への土圧は図-6に示すようにコンクリートパネル背面部の土圧をフランジ前面側に、H鋼背面部の土圧をフランジ背面側に水平方向に作用させた。また上載荷重は梁に直接作用する上載土による荷重とコンクリートパネルによる自重を鉛直方向に作用させた。

#### 4.4 解析検討ケース

解析は無筋コンクリート梁とH型鋼との付着力を考慮した完全付着の場合(ケース1)と考慮しない場合(ケース2)、及び、鉄筋コンクリート梁でコンクリートとH型鋼の付着を考慮した完全付着の場合(ケース3)の3ケースからなる。

なお、ケース2の場合は日本鋳業協会の研究報告を参考に許容付着応力度を1.0N/mm<sup>2</sup><sup>5)</sup>と仮定した。つまりH鋼と横梁との付着はこの値を境に剥離が起こるものとした。解析では、引張応力による剥離が起きると想定される要素を付着切れ対象要素として取扱い、この要素位置

を 図-7 に示す。この付着切れ対象要素は  $1.0\text{N/mm}^2$  以上の引張応力が生じると付着切れ要素と判定される。ここで付着切れ要素とは、ほぼ 0 に近いヤング係数を持ち、応力伝達を行わない要素としてモデル化した。解析は弾性解析の繰返し計算で、許容付着応力度を超えた要素は付着切れ要素として導入し、付着応力が 0 となるように解析を行った。

## 5. 解析結果

### 5.1 変形

図-8 に解析検討ケース 1 の H 鋼及び梁の変形モードを示しているが、変形モードは拘束箇所や土圧载荷位置により複雑な挙動を示していることが分かる。根入れ付け根から約 45cm の位置で最大変位 6.80mm と非常に小さな値となっており、特に有害となるたわみは見られなかった。

### 5.2 応力

図-9 に解析検討ケース 1 の最大主応力分布図を示す。これより H 鋼の背面側フランジ表面に大きな引張りが生じていることが分かる。この引張応力は H 鋼フランジ面に作用する土圧と梁の拘束によって応力が集中して発生したと考えられる。しかし、実際にはこのような応力に達する以前にコンクリートと H 鋼との界面抵抗が低下し、引張応力による剥離が生じていると想定できる。そのために解析検討ケース 2 で剥離を考慮した解析を行った。

解析検討ケース 2 の最大主応力分布状態を 図-10 に示す。解析検討ケース 1 の分布図と比較すると、梁上・下面側に発生していた引張応力が小さくなっていることが分かる。

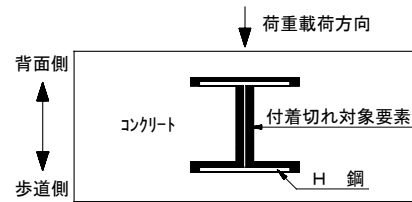


図-7 付着切れ対象要素位置図 (梁断面)

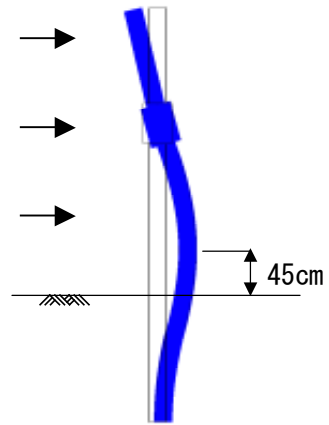


図-8 変形モード図

また同図より、フランジ隅角部付近のコンクリートに  $3.34\text{N/mm}^2$  の大きな引張りが生じているが、これは応力集中に伴う局所的な応力である。しかし、H 鋼背面側フランジ下のコンクリートは圧縮応力が発生しており、水平方向の荷重に対して抵抗しているため、この応力集中によるひび割れは問題ないと思われる。

解析検討ケース 3 の鉄筋の最大主応力分布図を 図-11 に示す。これより梁歩道側と側面部分に引張りが生じているが応力は全体的に小さい。なお、表-3 にはケース 1～3 の解析結果をまとめて示した。これより、コンクリートに発生する圧縮応力は全体的に小さな値を示していることが分かる。

### 5.3 曲げひび割れの検討

ここでは、梁表面に許容引張応力度を超える応力が発生していることから、曲げひび割れの

表-3 解析結果

( $\text{N/mm}^2$ )

解析検討ケース	最大圧縮主応力度				最大引張主応力度			
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	許容値	ケース 1	ケース 2	ケース 3	許容値
上 面	0.33	0.23	0.35	8.00	6.99	3.34	7.06	1.91
下 面	0.33	0.52	0.37		6.68	0.95	6.74	
前 面	2.97	3.00	2.89		1.70	2.14	1.76	
背 面	0.01	0.04	0.01		0.90	0.95	0.82	

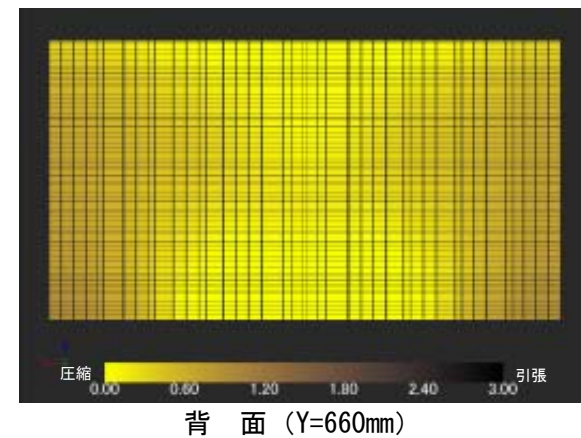
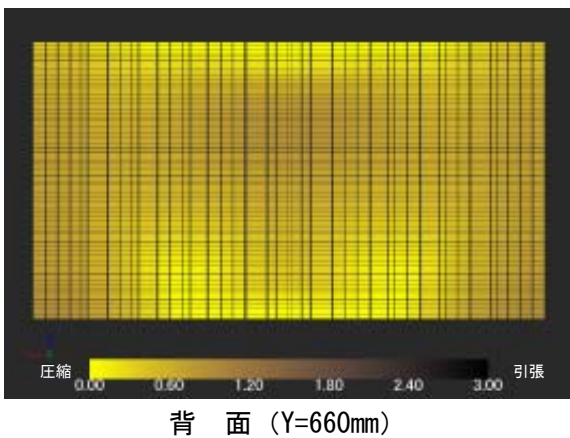
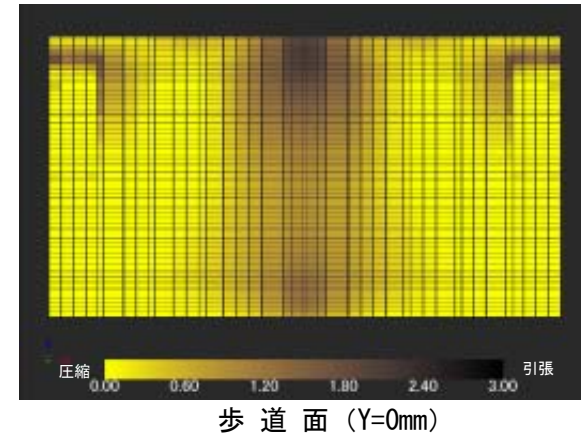
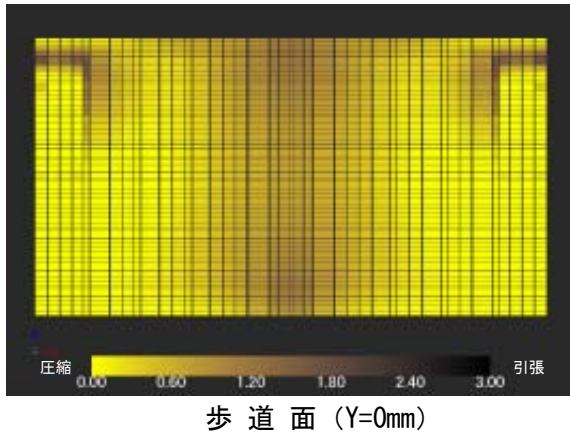
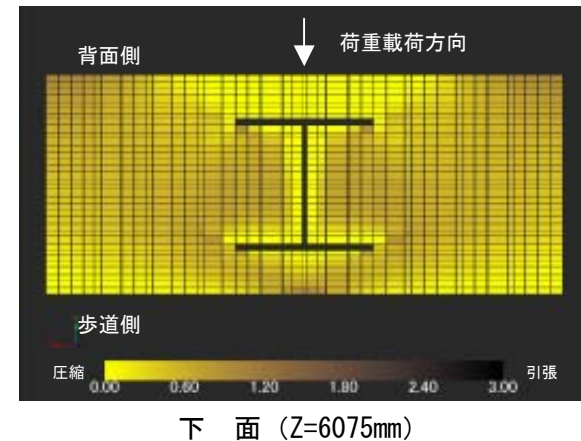
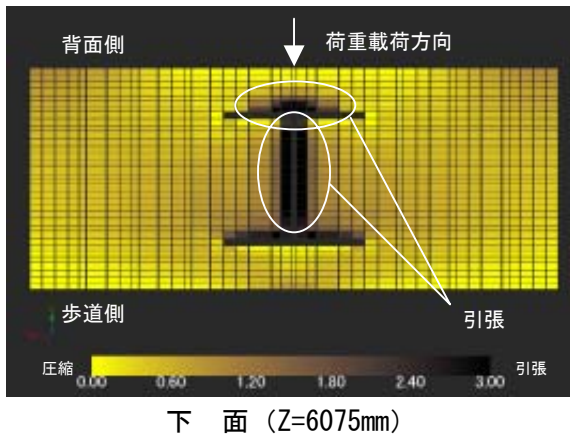
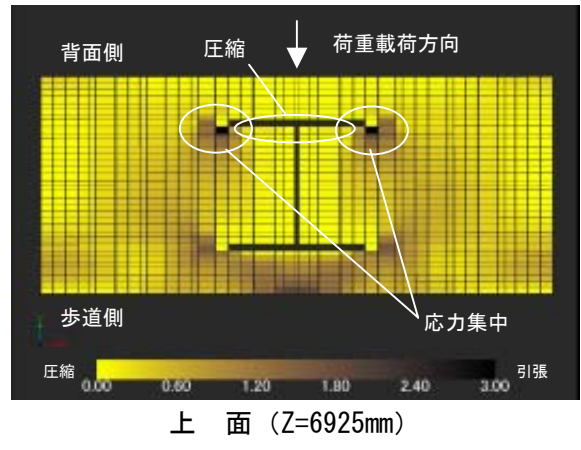
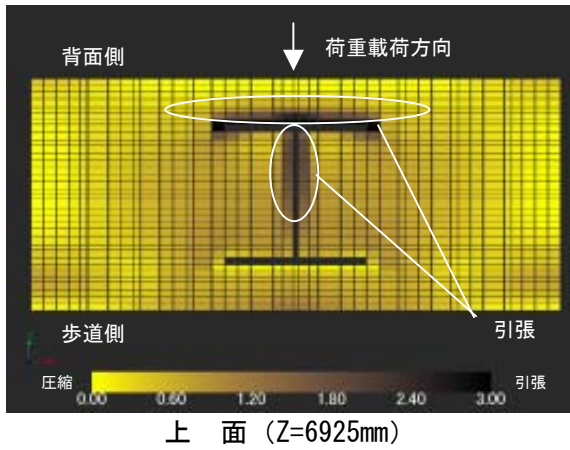


図-9 解析検討ケース1 主応力分布図 (N/mm<sup>2</sup>)

図-10 解析検討ケース2 主応力分布図 (N/mm<sup>2</sup>)

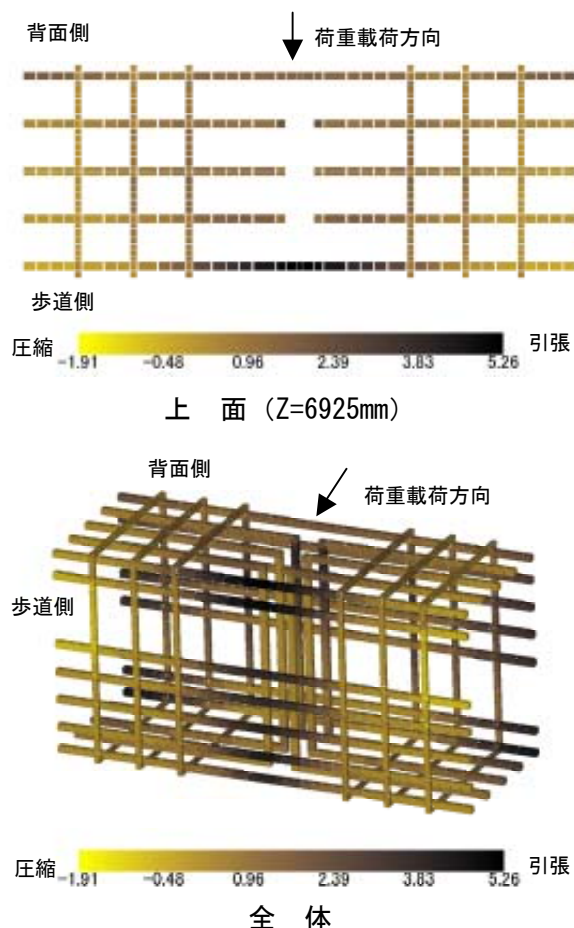


図-11 鉄筋最大主応力分布図 (N/mm<sup>2</sup>)

検討を行う。ひび割れ幅を許容ひび割れ幅以内に抑えるには、鉄筋の引張応力度を低く設定する必要がある。図-11 に示すように鉄筋の最大主応力度は 5.26N/mm<sup>2</sup> となっている。鉄筋の許容引張応力度をコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に従って計算すると  $\sigma_{se}=153\text{N/mm}^2$  となり、本解析結果はこれよりも小さい値となっている。従って、ひび割れに対して問題のない構造であると言える。

## 6. まとめ

本研究では、新工法の親杭式アンカー付土留め擁壁を対象として実状に合った荷重及び境界条件を設定した。またコンクリート、H 鋼、鉄筋の全てを六面体要素によってモデル化し、FEM 線形解析を用いて大規模な三次元応力解析を行った。その結果、構造物全体の応力分布を把握することが可能となり、実設計への有効性を示した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 対象モデルを無筋コンクリート梁としてコンクリートと H 鋼の付着切れを考慮した解析を行った結果、フランジ隅角部付近のコンクリートの応力集中に伴い最大引張主応力が 3.3N/mm<sup>2</sup> 発生したが、局所的な応力なので耐力上問題の無いことが分かった。
- (2) 新工法のアンカー擁壁の応力解析を、三次元 FEM を用いることで構造物全体の応力分布を求めることが可能となり、耐力上十分安全であることが確認できた。また、本工法を用いることにより歩行者の観点から良好な通行空間の形成を可能にした。

本研究で得られた知見は本研究の対象擁壁における数値計算結果であり、その知見を一般に普遍化するには、今後、数値計算の更なる蓄積が必要である。また今回、H 鋼とコンクリートの付着切れを引張による剥離と想定して解析を行ったが、せん断方向のすべりによる剥離や非線形を考慮した解析を行うことが今後の課題である。なお、当該新工法は既に供用を開始しており、問題となるひび割れは発生していないことが目視により確認されている。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、芝岩エンジニアリングの崎浜秀治氏に非常に有効な助言を受けた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 鷲津久一郎他、有限要素法ハンドブック I、培風館、1993
- 2) 道路橋示方書IV下部構造編、社団法人日本道路協会、2002.3
- 3) 田中忠次他：地盤の三次元弾塑性有限要素解析、丸善、1996.3
- 4) 道路土工—仮設構造物工指針、社団法人日本道路協会、1999.3
- 5) 「鉛と亜鉛」誌、日本鋳業協会、2003.1
- 6) コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、土木学会、2002.12