

# ボルト定着部の定量的耐荷性能の把握に向けた解析的検討

Analytical study on a quantitative assessment for load-bearing capacity of anchorage zone

近藤 駿光<sup>†</sup>, 宗本 理<sup>††</sup>  
Toshiki Kondo, Satoru Munemoto

**Abstract** Many bridges were seriously damaged by the Pacific coast of Tohoku Earthquake in 2011. Especially, bridge restrainer systems on the concrete pier were failed due to the anchorage zone's fracture. In general, it's considered that anchor bolt embedded in concrete is designed based on static load and bolt's fracture. In this paper, we conduct numerical simulations with 3D FEM to a complex phenomenon such as cone failure and bond failure. In order to estimate load-bearing capacity of anchorage zone properly, we proposed mechanical model based on hydrostatic pressure. Consequently, failure condition of anchorage zone under various boundary condition could be simulated well using our proposed mechanical model.

## 1. 序論

鋼・コンクリート定着部は、橋梁やトンネルをはじめ、複合構造として多用されている。その中でも、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では写真-1 に示すような落橋防止装置据え付け部におけるコンクリートの損傷、さらに平成 24 年に起きた笹子トンネル天井版落下事故ではボルト定着部の損傷により人命に関わる重大な事故まで発生している。

アンカーボルト定着部の点検では、目視や接触、打音などの簡易的な定期点検が主流となっているが、これらの点検方法ではボルト定着部の詳細な損傷度合いについて把握することは困難である。ボルト定着部の破壊性状としてボルト破断、コーン破壊、さらに付着破壊が挙げられるが、設計では基本的にボルト破断によるボルト定着部の破壊を想定している。しかし、橋梁などの既設構造物にあと施工する場合には設計基準を満足できない状態で施工される場合があり、想定外の破壊により重大な事故に繋がる恐れがある。

あと施工アンカーボルト定着部を対象とした既往の研究では、静的引抜き試験が多く実施されており、設計耐力や破壊性状に関する検討がなされてきた<sup>3)</sup>。一方で、解析的研究では上述した 3 種類の破壊性状を定量的に評価する必要があり、破壊性状が分離・乖離といった現象であることから幅広い分野で適用されている有限要素法 (FEM と称す) ではあまり研究がなされていないのが現状である。あと施工アンカー定着部の適用事例も

様々であることから、荷重の種類、载荷方向、さらに境界条件も多種多様であり、これらを全て実験することは困難であり、合理的ではない。そのため、数値解析により任意の条件におけるあと施工アンカー定着部の耐荷性能を定量的に把握することは非常に重要である。

そこで本研究では、最終的に任意の条件におけるあと施工アンカーボルト定着部の耐荷性能を定量的に把握可能な解析手法を確立することを最終目標とし、まずボルト定着部の破壊性状であるコーン破壊、付着破壊、ボルト破断を定量的に評価可能なモデルに関する検討を行う。具体的には、実験結果と比較した上で各破壊性状に対する提案したモデルの妥当性について検証し、あと施工アンカーボルト定着部の耐荷性能を適切に評価するために必要な最適なモデルを提案する。



写真-1 落橋防止装置据え付け部の損傷事例

<sup>†</sup> 愛知工業大学大学院工学研究科 (豊田市)

<sup>††</sup> 愛知工業大学工学部土木工学科 (豊田市)

2. 解析概要

2.1 設計による考え方

埋め込み深さが変化した場合におけるあとアンカーボルト定着部の破壊性状による設計耐力の変化を表したグラフを図-1 に示す。アンカーボルト接合部の破壊性状として 1 章で述べたように付着破壊, コーン破壊, ボルト破断の 3 種類が挙げられる。式 (1), (2) より 200mm の埋め込み深さの場合, 約 100kN から 150kN あたりで付着破壊やコーン破壊, またはこの破壊性状が同時に発生する可能性があることが予測される。また, 式 (3) はボルト破断を表した式である。

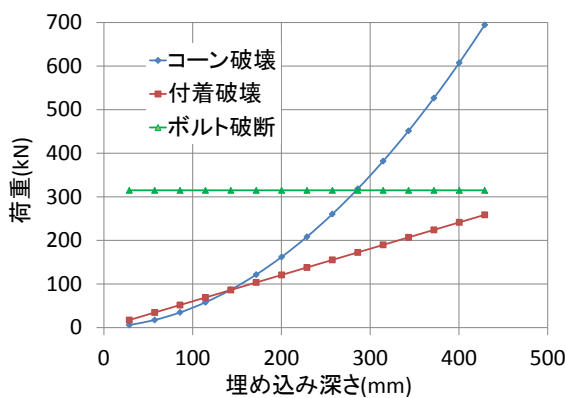


図-1 アンカーボルト接合部の破壊性状

$$P_c(x) = \sigma_{cone} A_c(x) \dots \dots \dots (1)$$

$\sigma_{cone}$ : コンクリートの引張強度

$A_c$ : 有効コーン面積

$$P_b(x) = \int_0^x \pi D \tau(x) dx \dots \dots (2)$$

$\tau(x)$ : 付着応力

$$P_t(x) = \sigma_t A_s \dots \dots \dots (3)$$

$\sigma_t$ : ボルトの許容応力

$A_s$ : ボルトの有効断面積

2.2 解析対象

2.2.1 簡易モデルによる付着特性の妥当性

既往の研究より付着特性の妥当性について検証する。付着特性の妥当性の検証として, 小川らが行った一面せん断実験<sup>3)</sup>を参考にモデル化を行った。図-2 に解析対象の概要を示す。この供試体は, 鋼板とコンクリートの間に樹脂を用いて接着している。荷重条件としては鋼板の押し抜き試験となっている。また, 実現象の影響を考慮するため, コンクリートに特定の拘束圧が作用する場合の検討も行った。

解析モデルでは, コンクリート, アンカーボルト, さらにエポキシ樹脂とコンクリート間の付着特性について 8 積分点を有するソリッド要素によりモデル

化した。解析モデルを図-3 に示す。境界条件では, コンクリート底面を鉛直方向のみ固定した。荷重条件として, 鋼板上部に押し抜き方向に強制変位を与えることで静的押し抜き解析を行う。また実験では実施されていないが, 拘束圧による影響について把握するため, コンクリートに圧縮力が作用している状態における静的押し抜き解析も検討した。解析に用いた各種材料定数を表-3 に示す。

2.2.2 ボルト定着部における各破壊性状の妥当性

本研究では, 鋼・コンクリート間の破壊を表現した付着特性モデルを用いてあと施工アンカーボルト定着部の破壊性状であるコーン破壊, 付着破壊, ボルト破断を対象とした解析を実施する。

まず, ボルトとコンクリート間に注入した樹脂とコンクリートによる付着破壊を対象とした解析では図-4 に示す供試体を対象とした。また本研究では, 供試体端部を固定した上で設計上埋め込み深さが浅いために生じた付着破壊と設計上十分に埋設されたアンカーボルト周辺のコンクリートを強制的に押さえる事による 2 種類の付着破壊について検討する。なお, 両者ともアンカー先端部に強制変位を与え, 静的に引抜き解析とした。

次に, コーン破壊を対象とした解析では松崎らが実施した供試体<sup>4)</sup>を参照した。この供試体はボルト径 D19, 埋め込み深さ 300mm とボルト径に対する埋め込み深さが約 15 倍確保されており, 実験はボルト最深部からコンクリート上面に向かって約 45 でひび割れが生じて終局を迎える実験結果が得られている。

さらに, 付着破壊とコーン破壊が混在した複合破壊を対象とした検討では, 図-4 に示す供試体において供試体端部の 4 辺を鉛直方向に固定した実験より複合破壊が確認されているため, 図-4 と同様の供試体を使用し境界条件のみ変えることとした。最後に, 設計で想定されるボルトの判断に関する検討では供試体に対してせん断方向にボルトに力を作用させることによりボルト破断を考慮した解析も試みた。それぞれの各寸法やボルトの埋め込み深さを表-1 に示す。

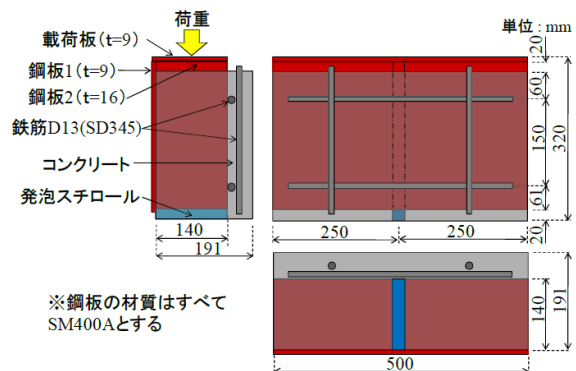


図-2 付着特性に関する解析対象

2.3 各破壊性状を対象とした解析モデル

各破壊性状を対象とした解析モデルでは、付着特性の妥当性に関する検証解析と同様に、コンクリート、アンカーボルト、さらにエポキシ樹脂とコンクリート間の付着特性を模擬した要素をソリッド要素にてモデル化した。2.4節で紹介した図-4の解析モデルを一例として図-5の(a),(b)に示す。奥行500mm、幅500mm、高さ300mmの実験供試体にD29のアンカーボルトを200mm埋め込んだモデルとなっており、対称性を考慮した1/4モデルとした。

また、埋め込み深さの短い完全に付着破壊するモデルでは埋め込み深さ50mm、ボルト径D29を使用した。埋め込み深さの短いモデルの境界条件はコンクリート上面全体を固定した。実験を対象にしたモデルではボルト定着部周辺のコンクリート上面のみを押さえた。載荷条件は、どちらのモデルもボルト上端部に鉛直方向上向き強制変位を与えることで静的引抜き解析とした。アンカーボルト底面部と接触しているコンクリートの付着条件に関しては、接するコンクリート要素がある引張限界ひずみに達した場合にコンクリート要素を消去する手法を用いて底面付着を再現した。

ボルト破断を対象としたモデルでは、コーン破壊する実験供試体の1/2モデルで作成し、コンクリート上面部から出ているアンカーボルト2要素分にz方向の強制変位を与えることでボルトにせん断力を再現した。また、上記で述べたコンクリート要素を消去する方法をアンカーボルトに適用し、アンカーボルトの最大せん断応力時でのひずみからボルトの要素を消去する方法を適用した。表-2に各解析モデルの概要を示す。

2.4 各種材料諸元 (コンクリートと鋼材)

コンクリートと鋼材の応力-ひずみ関係を図-6、各ケースにおける材料定数を表-3に示す。材料特性としてコンクリートには Von Mises の降伏条件を適用し、圧縮側では塑性域で弾性係数の1/100で硬化するものとし、引張側では最大引張強度を圧縮強度の1/10とした。最大引張強度以降は軟化を表現しており、最終的に応力が0となる引張限界ひずみは引張破壊エネルギーと要素の等価長さから算出した。一方の鋼材に関して、降伏条件はコンクリートと同様に Von Mises とし、降伏強度以降は初期剛性の1/100で等方硬化するバイリニア型モデルを適用した。

2.5 付着特性

2.5.1 付着破壊の考え方

ここでは、アンカーボルトとコンクリート間に使用されるエポキシ樹脂とコンクリートの付着特性として適用

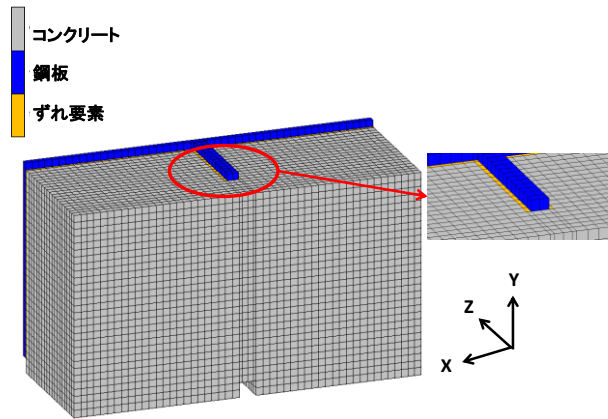


図-3 付着特性に関する解析モデル

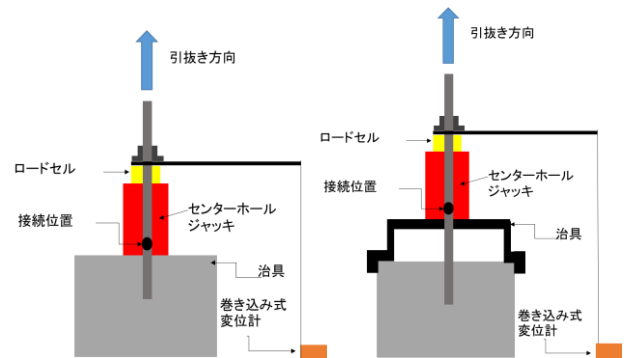
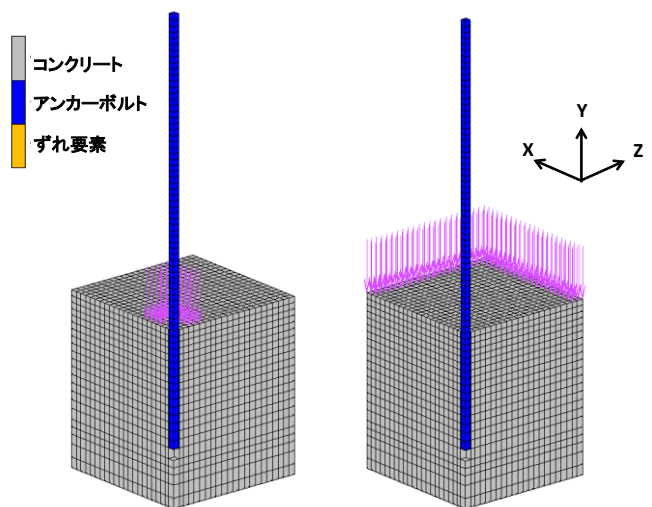


図-4 付着破壊に関する解析対象

表-1 各解析対象に関する概要

	①本研究室 (付着破壊)	②松崎ら (コーン破壊)	③松崎ら (ボルト破断)
寸法	500×500×300	900×900×300	900×900×300
埋め込み深さ	200mm	200mm	200mm
ボルト径	D29	D19	D19
載荷条件	ボルト上端部	ボルト上端部	ボルト定着部せん断
設計耐力	90kN	160kN	-



(a) 付着破壊 (b) 複合破壊

図-5 解析モデルの一例

したずれ要素について記述する。ずれ要素はアンカーボルトとコンクリートを形成する節点で構成されており、簡易な等方弾性体で表した。ずれ要素のせん断応力-せん断ひずみの関係を図-7 に示す。図-7 に示すように、ずれ要素がせん断強度を迎えるまでに有効断面積の減少をせん断弾性係数の低下により表現し、せん断強度以降はせん断弾性係数を 0 とし、さらにエポキシ樹脂の破壊エネルギーに基づき応力を低減させた。せん断弾性係数の低減に関する式を(4)~(7)に示す。

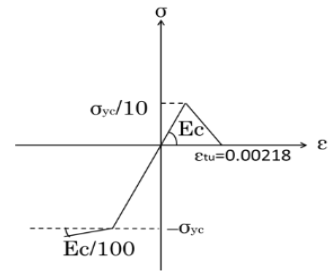
$$[D] = \begin{bmatrix} K+G \times \beta \times \frac{4}{3} & K-G \times \beta \times \frac{2}{3} & K-G \times \beta \times \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ K-G \times \beta \times \frac{2}{3} & K+G \times \beta \times \frac{4}{3} & K-G \times \beta \times \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ K-G \times \beta \times \frac{2}{3} & K-G \times \beta \times \frac{2}{3} & K+G \times \beta \times \frac{4}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G \times \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G \times \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \times \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\epsilon_{cr} = \frac{W_{cr}}{d} \quad (5) \quad W_{cr} = \frac{2Gf}{\sigma_t} \quad (6) \quad \beta = 1 - \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{cr}} \quad (7)$$

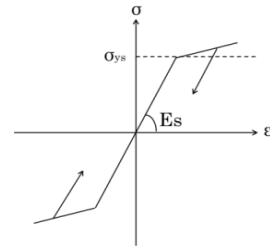
まず、低減率を考慮した等方弾性体の[D]マトリクスを式(5)に記述する。なお、体積弾性係数 K, せん断弾性係数 G, 低減率  $\beta$  を表している。低減率  $\beta$  はまず、終局時のひずみの算出式である式(6)と引張強度時のひび割れ幅の算出式である式(7)に基づき、終局時のひずみを計算した後、低減率とひずみの関係を表した式(8)によって算出する。なお、終局時のひずみは  $\epsilon_{cr}$ 、現在のひずみは  $\epsilon_t$ 、破壊エネルギーは Gf、ずれ要素の要素長は d としている。なお、等方弾性体[D]マトリクス内でせん断弾性係数の低減率  $\beta$  は 0.6 を下限値としている。また、各せん断応力成分による相当値がコンクリートの実せん断強度<sup>5)</sup>を超えた場合にも強制的に低減率  $\beta$  を 0.6 とした。応力を低減するためエポキシ樹脂の引張限界ひずみ値は  $\epsilon_{cr-1}$  とした。ずれ要素に使用した定数を表-4 に示す。

2.5.2 静水圧による影響

ここでは、2.1 節でも述べたように、あと施工アンカーボルト定着部における付着破壊には 2 種類あり、そのうち一般的にプレートなどによってボルト周辺のコンクリート上面を押さえたケースでは、コンクリート内部におけるボルト周辺の静水圧状態はボルト周辺のコンクリート上面を押さえていないケースと異なる傾向が予測される。つまり、付着性状が変化する可能性が高い。そこで、本研究では 2.3 節で扱ったずれ要素とは異なるずれ要素について提案する。具体的には、前述のせん断方向のみを考慮したずれ要素に対して、静水圧の状況に応じてエポキシ樹脂とコンクリート間の付着特性が変化するモデルを検討する。そのためには静水圧と関連のあるパラメータと材料強度の関係が必要である。そこで、本検討では静水圧と関連のある体積ひずみに着目し、鈴



(a) コンクリート



(b) 鋼材

図-6 各材料の応力-ひずみ関係

表-2 各解析に関する概要

	付着特性モデル		付着破壊モデル	
	鋼板	コンクリート	アンカーボルト	コンクリート
ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	210000	21000	210000	21000
ポアソン比	0.3	0.2	0.3	0.2
密度(kg/mm <sup>3</sup> )	7850	3160	7850	2350
引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	490	3	490	2.3
圧縮強さ(N/mm <sup>2</sup> )	-	30	-	27.6
降伏強さ(N/mm <sup>2</sup> )	350	-	350	-
	コーン破壊モデル		ボルト破壊モデル	
	アンカーボルト	コンクリート	アンカーボルト	コンクリート
ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	210000	21000	210000	21000
ポアソン比	0.3	0.2	0.3	0.2
密度(kg/mm <sup>3</sup> )	7850	2350	7850	2350
引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	490	2.3	490	2.3
圧縮強さ(N/mm <sup>2</sup> )	823.2	19.2	823.2	19.2
降伏強さ(N/mm <sup>2</sup> )	-	1.88	-	1.88

表-3 各種材料定数

	対称性	境界条件	載荷条件
①付着破壊	4分の1	ボルト周辺	ボルト上端引抜き
①付着破壊	4分の1	コンクリート端部	ボルト上端引抜き
②コーン破壊	4分の1	コンクリート端部	ボルト上端引抜き
①複合破壊	4分の1	コンクリート端部	ボルト上端引抜き
③ボルト破断	2分の1	コンクリート端部	ボルト定着部せん断

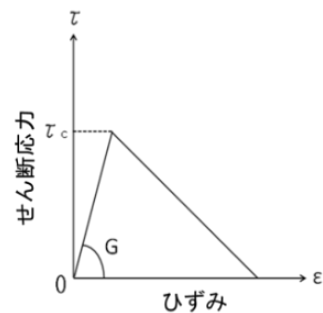


図-7 樹脂のせん断応力-ひずみの関係

木らが実施した荷重速度の異なるコンクリートの圧縮強度試験<sup>6)</sup>が実施した試験により算出されたコンクリートの圧縮強度の増加率と体積ひずみの関係を適用した。(図-8を参照)静水圧モデルのフローチャートを図-9に示す。

3. 解析結果

3.1 付着特性の妥当性

3.1.1 せん断応力-変位関係

せん断応力-変位関係を図-10に示す。実験結果では最大せん断応力が2.08N/mm<sup>2</sup>となっており、どちらのモデルの結果と比べても約11%の違いであり、実験結果と近い結果が得られた。また、静水圧モデルでは実験での最大せん断応力到達時の最大変位が0.44mmだったのに対し、解析結果でも0.44mmに到達時に最大荷重に到達していることが確認できた。一方で、実験と解析で剛性に大きな違いが見られた。その要因の一つとして、両者の境界条件が挙げられる。解析では全要素が密に連結しているのに対して、実験では載荷部分と鋼板の隙間などの要因で鋼板にかかる荷重が変化する可能性がある。そのため、解析結果の方が実験結果に比べて剛性が高くなったものと思われる。以上の事より、本研究では最大せん断応力を適切に評価できたものとし、最大荷重の評価に対して提案した付着特性モデルの妥当性があると考えられる。

3.1.2 荷重-変位関係(側圧あり)

コンクリートに対する拘束圧の有無による影響について荷重-変位関係をまとめたものを図-11に示す。今回側圧はコンクリートに割裂が起きないように25kNとした。解析結果より、拘束圧がない場合では最大荷重が約310kNに対し、拘束圧がある場合では最大荷重が約330kNとなった。この結果より、2.5.2節で述べた拘束圧を受けるコンクリートの体積ひずみによりコンクリート自体の強度が変化するため最大荷重の上昇につながったと考えられる。

体積ひずみ-最大せん断強度関係を図-12に示す。結果より、体積ひずみが減少することでコンクリートの最大せん断強度の上昇値の違いが確認できる。また、最大せん断強度の値に付着面積をかけた値の差は約20kNとなっており、上記に示した最大荷重時の差であることが確認できた。図-8から体積ひずみが約0.02減少し、最大せん断強度約0.5N/mm<sup>2</sup>の上昇が確認できた。そのため、静水圧に応じて変化する付着特性モデルを用いることで、境界条件による付着特性の変化を評価できると思われる。以上のことから、静水圧モデルはコンクリートが拘束圧を受ける場合でも再現可能であるため、モデルの妥当性が証明できる。

表-4 ずれ要素の材料パラメータ

	ずれ要素
ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	2400
ポアソン比	0.34
破壊エネルギー(N/mm)	$7.8 \times 10^{-3}$
最大せん断応力(N/mm <sup>2</sup> )	5.1
要素長d(mm)	10
$\epsilon_{cr}$	0.06
$\epsilon_{cr-1}$	0.11

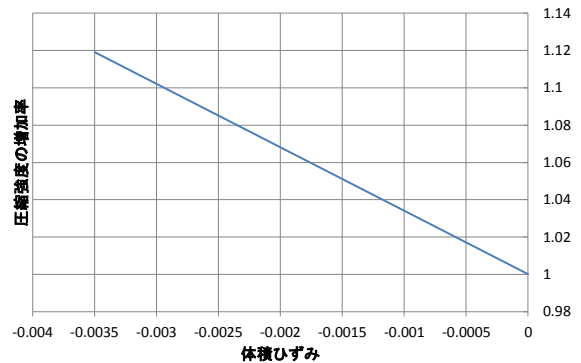


図-8 圧縮強度の増加率と体積ひずみの関係<sup>5)</sup>

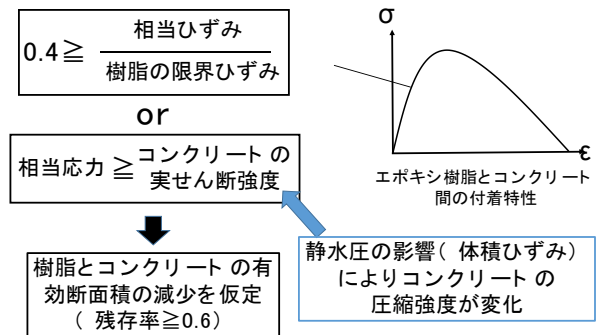


図-9 静水圧モデルのフローチャート

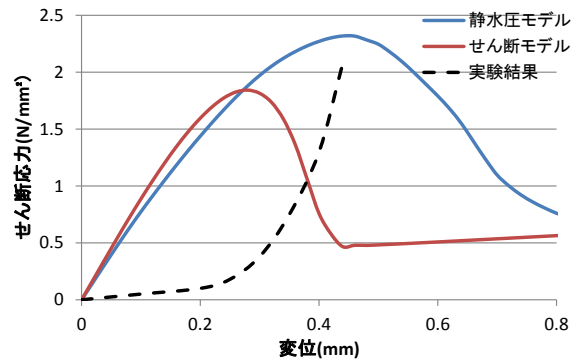


図-10 せん断応力-変位関係

## 3.2 付着破壊

### 3.2.1 埋め込み深さが浅い場合

荷重-変位関係を図-13 に示す。この結果から、付着破壊による設計耐力としていた 25kN を超えた後、荷重が減少していることから付着破壊による実現象を概ね再現できているものと思われる。

付着破壊の破壊性状としてコンクリートの最大主ひずみ分布を図-14 に示す。本解析では引張限界ひずみを  $2000\mu$  と設定していることから、コンクリートのひび割れが生じている領域を灰色とした。この結果から、ボルト定着部分近傍のコンクリートのみ灰色となっており、付着破壊が再現できたといえる。

### 3.2.2 ボルト定着部近傍を固定した場合

付着破壊を対象にした解析モデルでの荷重-変位関係を図-15 に示す。この結果より、実験結果ではアンカーボルトの降伏が先行し、その後荷重が低下していることが確認できる。一方で、せん断モデルでの解析結果は最大荷重が約 90kN と小さくなっており、最大荷重到達後はいきなり荷重が 0 になる結果となった。これらの原因として、ボルト定着部周辺のコンクリート上面を鉛直方向に固定すると、ボルト周辺の内部コンクリートの応力場は圧縮状態となり、その影響がせん断モデルでは考慮できていないことが挙げられる。そのため、圧縮応力場における付着破壊をせん断モデルでは表現できないことが明らかとなった。

静水圧モデルによる解析結果では、最大荷重が約 135kN となっており、実験結果では、184kN となっていたため、解析結果と実験結果の最大荷重値に差が出てしまった。また、最大荷重時の変位に関しても、解析結果では約 1mm、実験結果では約 17mm で最大荷重を迎えていることから最大荷重時での変位は正確に再現できないことがわかった。原因として、実験では鉄筋が降伏したのに対し、解析では、ずれ要素の静水圧に基づく純せん断強度の閾値が実際のエポキシ樹脂とコンクリート間の付着強度よりも小さくなったことが 1 つの原因として考えられる。

図-14 と同様に、各モデルによる最大主ひずみ分布による破壊性状を図-16 (a) と (b) に示す。実験ではコンクリート上面を鉛直方向に固定することでコーン破壊を強制的に抑制し、付着破壊となった。一方のせん断モデルの解析でもボルト周辺のコンクリートが灰色となっていることから破壊性状は概ね実験と同様の傾向が得られた。これは、上面を固定されたコンクリートは圧縮応力場となることから端部側のコンクリートへのひび割れが抑制されたものと思われる。以上の結果より、せん断モデルによるずれ要素で様々な条件下における付着破壊による耐荷性能を十分に評価できるとは言い難い結果となった。よって、

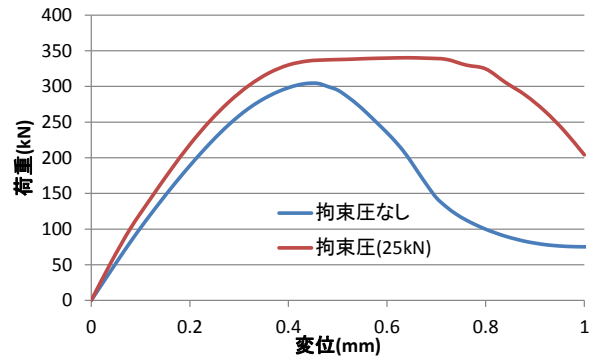


図-11 荷重-変位関係

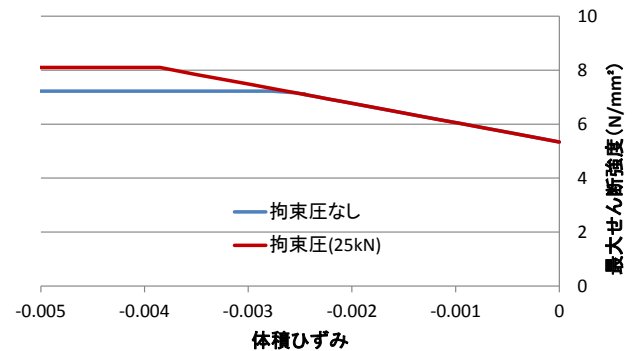


図-12 体積ひずみ-最大せん断強度関係

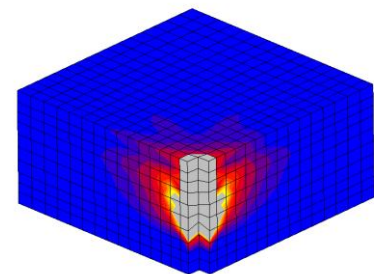
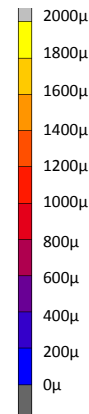
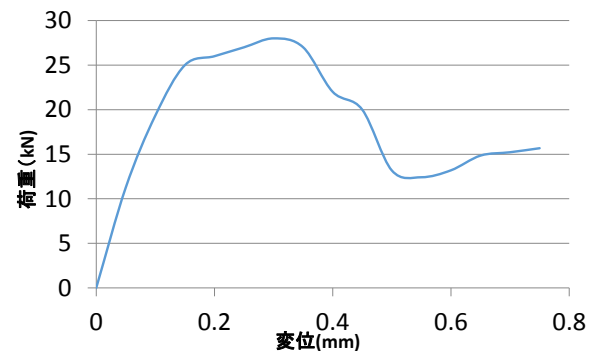


図-13 荷重-変位関係

図-14 破壊性状(付着破壊)

せん断モデルはボルト定着部周辺のコンクリートに圧縮力が生じない場合には十分適用可能である。

静水圧モデルの解析結果では解析では、 $2000\mu$ を超えた灰色の部分アンカーボルト周辺のコンクリートのみを表れていることから破壊性状に関してはしっかりと表現できると考えられる。

**3.4 コーン破壊**

コーン破壊が確認されているモデルの荷重-関係のグラフを図-17 に示す。実験供試体での最大荷重が150kNであったのに対し、せん断モデルでの解析結果の最大荷重は128kNとなっており、差は20kNであった。また、最大荷重を迎えた後、荷重が急激に下がっていることから、コーン破壊が生じる実験供試体と同様に脆性破壊の傾向が解析結果にも表れた。

静水圧モデルの解析結果では、上記で示したせん断モデルの最大荷重 128kN に対して静水圧モデルの最大荷重が141kNとなり、実験の最大荷重である150kNに近い値となった。また、最大荷重時を迎えた後に急激に荷重が落ちていることから実験と同じような傾向を示している。最大荷重および荷重-変位関係の傾向からせん断モデルより実現象を再現できたと考えられる。

コーン破壊が確認されているモデルによる破壊性状を図-18 (a)と (b)に示す。今回対象とした実験供試体はボルト底面からコンクリート上面に向かって45度でコンクリートがひび割れていく完全コーン破壊が表れたのに対して、せん断モデルによる解析結果では、コンクリート上面における扇状のひび割れと深くなるにつれて付着破壊しており、複合破壊という結果となった。これは、埋め込み深さが深いずれ要素がコンクリート上面部に対して速く閾値に到達してしまったためボルト底面部付近では付着破壊、ボルト上面部はコーン破壊の性状が確認されたと考えられる。今回の静水圧モデルの解析結果では、一般的なコーン破壊の形成角度である45度より急ではあるが、ボルト底面部からコンクリート上面部にむかって主ひずみ分布が予測されることから、ひび割れが形成されていることが確認できるため、せん断モデルよりも静水圧モデルはコーン破壊を再現できたと考えられる。

**3.5 複合破壊(コンクリート端部固定)**

今回使用したモデルは、複合破壊を前提にしたモデルの荷重-変位関係を図-19 に示す。このモデルの実験では、最大荷重が約70kNとなっており、解析結果では約90kNであり、約20kNの差が確認できた。また、実験では、変位約2mmで荷重が落ちており、解析でも変位2mmを過ぎた後に荷重が低下している。荷重-変位関係の傾向として、最大荷重後に荷重が減少してい

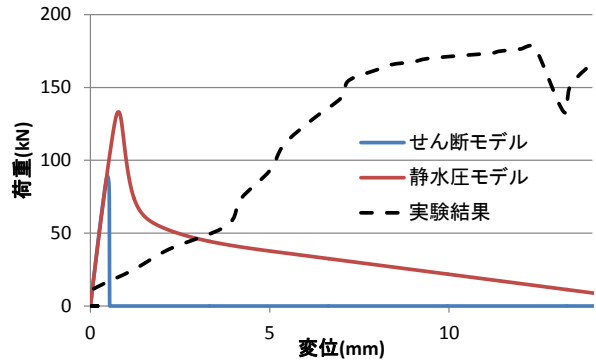
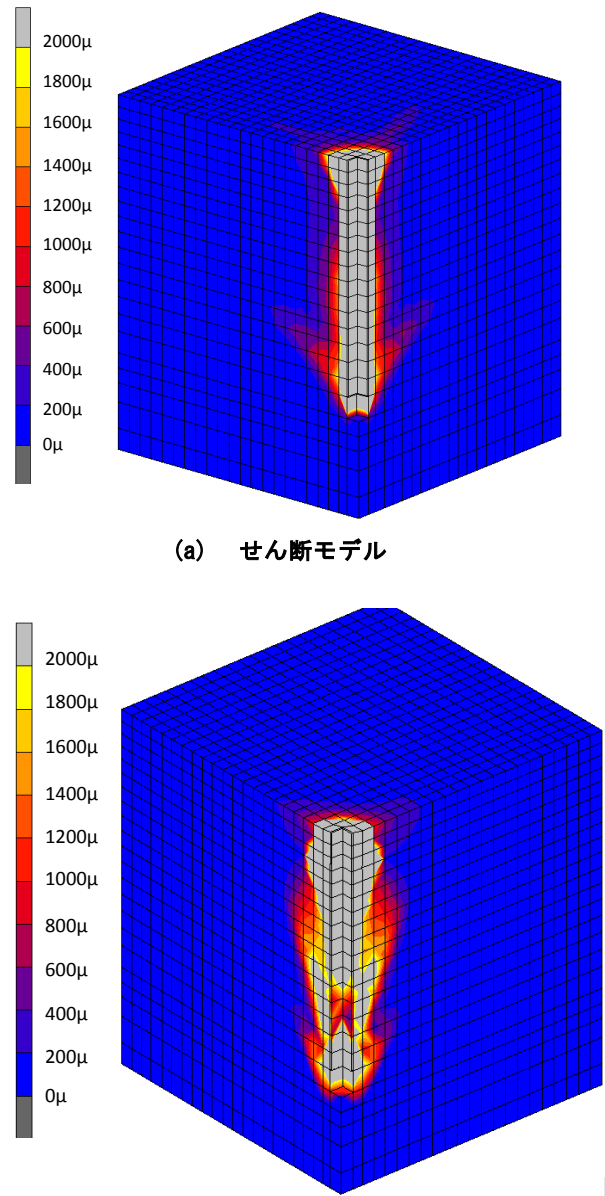


図-15 荷重-変位関係



(a) せん断モデル

(b) 静水圧モデル

図-16 破壊性状

ることから最大荷重の差は 20kN あるが荷重-変位の傾向としては十分表現できていると考えられる。

複合破壊したモデルにおける埋め込み深さ別でのひずみ-変位関係を表したものを図-20(a), (b), (c) に示す。埋め込み深さが 80mm 結果では、解析結果のひずみが大きくなる結果が確認できた。しかし、ひずみが減少する変位が実験結果と解析結果は約 2mm であることも確認できた。埋め込み深さ 120mm の結果では、80mm と同様に解析でのひずみが大きい結果となったが、80mm と比べてひずみの差が小さくなることを確認できた。また、ひずみの減少する変位は約 2mm で実験結果と解析結果で一致した。埋め込み深さ 200mm での結果は、(a), (b) の結果とは逆に実験値のひずみが大きくなったのに対し解析のひずみは小さくなった。解析では接触を考慮したソリッド要素を用いて付着特性を表現しているため、埋め込み深さが浅い要素からひずみの値が大きく、埋め込み深さが深くなるにつれて値が小さくなる。その一方で、付着破壊が生じた否かの判断となる閾値は深さ方向に一定であるため、埋め込み深さが浅い要素からボルトの挙動に応じてひずみが生じる実験結果とは異なる傾向になったものと考えられる。これは、今後埋め込み深さ別に閾値を変えるといった検討をしていく予定である。

複合破壊を前提にしたモデルの破壊性状を図-21 実験の破壊性状の写真を写真-2 に示す。この結果では、ボルト定着部近傍に大きなひずみが確認できるとともにコンクリート上面にも扇形のような主ひずみ分布が確認できる。写真-2 と比較しても、コンクリート上面部ではコーン破壊が起こっており、コンクリート底面部付近では付着破壊が起こっていることが確認できるため、アンカーボルト定着部での付着破壊とコーン破壊が同時に発生する複合破壊が再現できていると考えられる。

### 3.6 ボルト破断

ボルト破断モデルの荷重-変位関係を図-22 に示す。この結果から、初期剛性は 3.1.1 節で述べた要因で大きく異なるが、最大荷重時の値は解析と実験で約 130kN であることから妥当性があるといえる。アンカーボルト定着部にせん断方向の力をかけた際のボルト図-22 に示す。コンクリートの破壊性状として、アンカーボルト定着部が変形することによって 2000  $\mu$  破断のコンクリート要素での破壊性状を超える主ひずみ分布が出ていることが確認できる。今回、主ひずみ分布が出ているか大きく出ている箇所は引張力が作用する部分である。今回、破壊性状としてコンクリートの最大主ひずみ分布を見ている。また、今回の解析では破壊性状のみを考察したため今後、せん断破壊や地震動のような解析を今後行う際には、圧縮側のコンクリートも考慮することで荷重や応力をより忠実に再

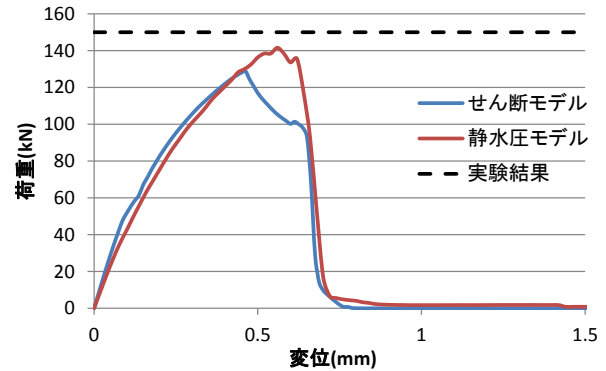
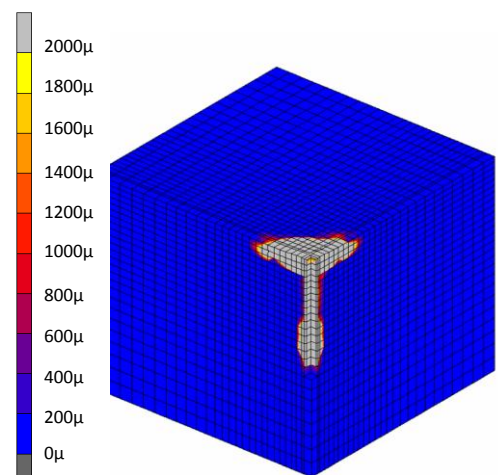
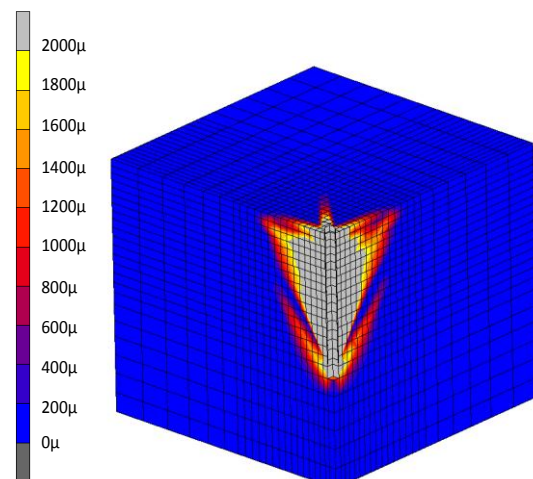


図-17 荷重-変位関係



(a) せん断モデル



(b) 静水圧モデル

図-18 破壊性状



現可能であると考え、図-22 と同様に、アンカーボルトの破壊性状を図-23 に示す。今回アンカーボルトは最大せん断応力時のひずみになるとアンカーボルトの要素を消去するモデルとなっている。図-24 からアンカーボルト接合部から赤い丸で囲んだ3つの要素が消去されていることがわかる。せん断破壊として、コンクリート上面付近でのボルトの損傷は緒方らが行ったせん断耐力に関する実験<sup>9)</sup>で明らかになっているため、ボルト破断のモデルは実現象を再現できると考えられる。

4. 結論

本研究では、アンカーボルト定着部を対象として定量的に精度よく評価可能な解析モデルに関する検討を行った。本研究で得られた結果を表-5、知見を以下にまとめる。

- 1) 今回用いた付着特性のせん断モデルおよび静水圧モデルの妥当性について検証した。最大荷重については今回用いたモデルは良好に再現できた。
- 2) 静水圧モデルを用いた解析の体積ひずみ-最大せん断強度の結果から、実構造物のような鋼・コンクリート構造に拘束圧がかかる場合での再現が良好に可能なことから、今回用いた付着特性の妥当性を証明した。
- 3) せん断モデルでは、付着破壊するモデルのようなボルト定着部のコンクリートに圧縮応力が作用する条件の場合、適切に評価できない可能性がある。
- 4) コーン破壊を対象にした静水圧モデルの解析結果において、荷重-変位および破壊性状ともに良好に再現できることが確認できた。
- 5) 付着特性をせん断力だけでなく、静水圧に基づいたものに変更することで、破壊性状の適用範囲を拡張できることを確認できた。
- 6) 表-5 にモデル別再現評価を示す。今回行った解析により正確に評価するためには、静水圧の閾値をより精度良くするとともにボルトの埋め込み深さごとに閾値を設定する必要があると考える。

参考文献

- 1) 福島県内における鋼橋の被害調査報告, 土木学会, 構造工学委員会調査団, 2011. 4. 6
- 2) 東日本大震災コンクリート委員会・構造工学委員会合同調査団一次調査報告(速報版), コンクリート委員会・構造工学委員会, 2011. 4
- 3) 前野裕文, 後藤芳顕, 小畑誠, 松浦聖: 引き抜き力を受ける付着型アンカーボルトの定着部の破壊機構に関する研究, 土木学会論文集, No. 441/I-18, pp. 185-192, 1992. 1

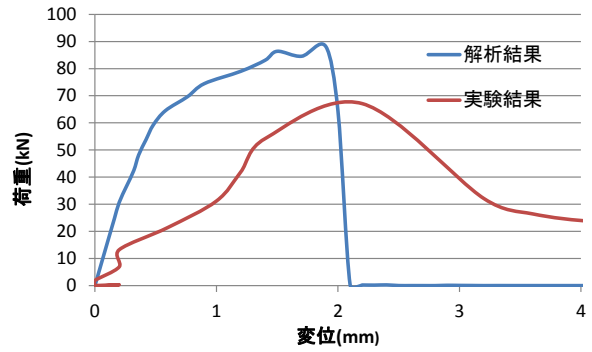
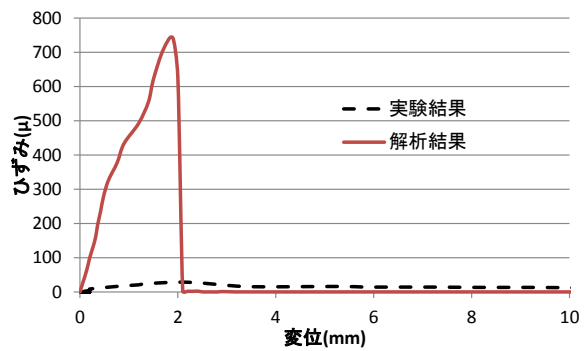
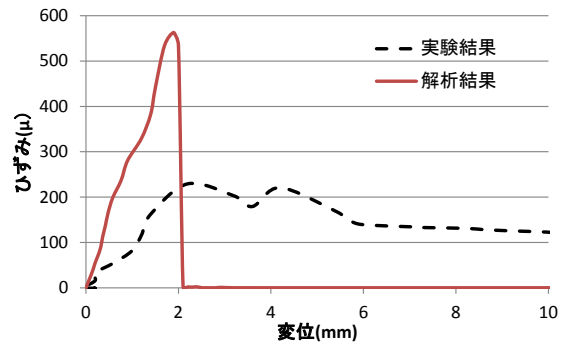


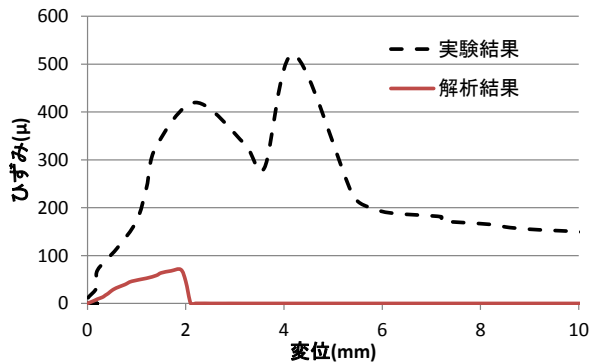
図-19 荷重-変位関係



(a) 埋め込み深さ 80mm



(b) 埋め込み深さ 120mm



(c) 埋め込み深さ 200mm

図-20 埋め込み深さ別ひずみ-変位関係

- 4) 小川淳史, 吉武勇, 三村陽一, 和多田康男, 尾上枝里: 接着材を用いた鋼・コンクリート合成構造の一面せん断試験, 土木学会第 66 回年次学術講演会, pp41-42, 2010
- 5) 松崎育弘, 川瀬清孝, 永田守正, 石川公章, 今井清史, 竹内正博: 樹脂アンカーの支持耐力に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演概要集, 1983. 9
- 6) 壹岐直之, 清宮理, 山田昌郎: 付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究, 土木学会論文集, No. 550/V-33, 73-83, 1996. 11
- 7) 鈴木澄江, 小山善行, 陣内浩, 早川光敬: 圧縮強度試験における荷重速度がコンクリートの圧縮強度と変形性状に及ぼす影響に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp201-207, 2009, 2
- 8) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり - ひずみ関係, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, 1987 年 2 月
- 9) 足立将人, 西山峰広, 河野進: PC 鋼より線の付着応力-すべり関係に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 2, 1665-1670, 1997
- 10) 緒方紀夫, 大中英輝: あと施工アンカーボルトのせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 19, No. 2, 661-666, 2002

(受理 平成 31 年 3 月 9 日)

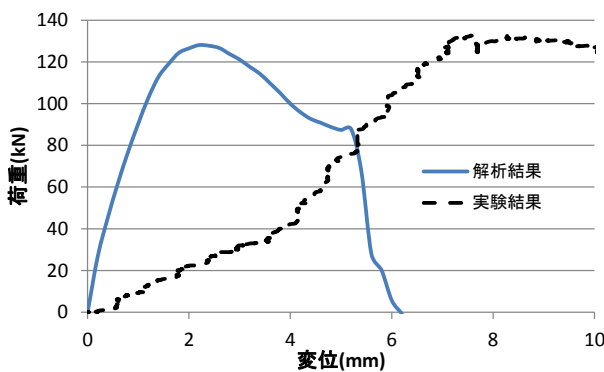


図-22 荷重-変位関係

表-5 モデル別再現評価

	せん断モデル	静水圧モデル
付着破壊	×	△
コーン破壊	△	○
複合破壊	×	○
ボルト破断	○	○

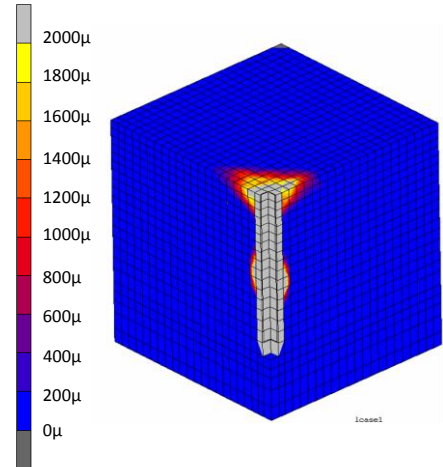


図-21 破壊性状(複合破壊)



写真-2 複合破壊

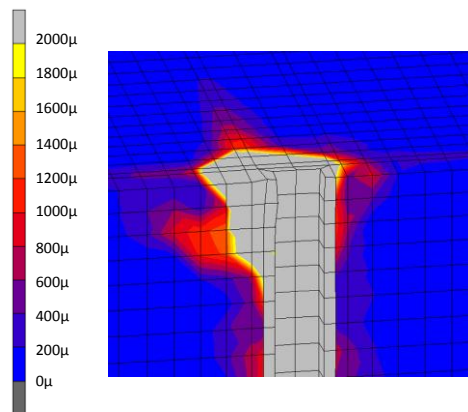


図-23 破壊性状(コンクリート)

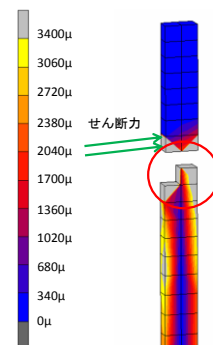


図-24 破壊性状(アンカーボルト)