

## (16) EPS板を用いた衝撃貫通現象に関する基礎的研究

## A fundamental study on the impact penetration behavior of EPS plate

深澤仁\*, 園田佳巨\*\*, 森谷晋\*\*\*

Jin Fukazawa, Yoshimi Sonoda, Moriya Susumu

\*九州大学大学院博士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

\*\*工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

\*\*\*九州大学大学院技術職員, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

Key Words: finite element method, EPS plate, penetration behavior

キーワード: 有限要素法, EPS板, 貫通挙動

## 1. 緒言

近年, 土木分野における構造設計は性能照査型に移行しつつあり, 大規模な衝撃荷重の作用が予想される落石防護工や砂防堰堤などの防護構造物についても, その性能を明確にすることが求められている。これらのことから, 土木学会では性能設計に関する指針を示すなどして<sup>1)</sup>, 今後の設計法の基本的な考え方を解説している。これまで, 落石防護工など衝撃荷重を受ける土木構造物の耐衝撃性に関する解析的研究は数多くなされてお<sup>2)3)4)</sup>, RCはりなど構造部材の弾塑性衝撃応答については, 既存の汎用ソフトなどを用いて概ね把握できることが報告されている<sup>5)</sup>。しかし, 衝突物の貫入・貫通や裏面剥離などのように対象物の破壊を伴う現象については, その挙動を定量的に精度良く再現する手法は未だに確立されているとは言い難い状況である。

これらの破壊現象を再現する解析手法として, 個別要素法やMPS法, SPH法などのような粒子法による手法も考えられるが<sup>6)7)</sup>, 本研究では有限要素法に改良を加えて破壊を表現することを試みた。一般的に要素間の結合と形状関数による変位場の内挿を前提に定式化された有限要素法<sup>8)9)</sup>で破壊現象を取り扱うことは困難であるが, 応力やひずみなどの物理量に圧縮限界や引張限界・せん断限界を設けて, それらの限界に達した要素を取り除くような処理を行えば可能であると考えられる。そこで本研究では, 簡易ではあるがEPS板に先端の尖った丸鋼を自由落下させた貫通実験を行い, 有限要素解析によって貫通現象に関する基礎的検討を試みた。EPS材の材料物性値や破壊基準については, 圧縮試験および引張試験, せん断試験を実施して求めた。これらの実験および解析結果から, 事前に設けた限界条件に達した要素を取

り除くことで, 有限要素解析によって貫通現象を表現できるか検討した。

## 2. 実験概要

## 2.1 EPSの材料試験

## (1) 圧縮試験

図-1に本試験で用いた一軸載荷装置を示す。最大載荷荷重は300Nである。この載荷装置を用いてEPS材の圧縮試験, 引張試験, せん断試験を実施し, それぞれの材料物性を求めた。

図-2に圧縮試験に用いた供試体を示す。圧縮試験用供試体の寸法は直径40mm, 高さ40mmで, 図-1の一軸載荷装置により圧縮方向に荷重を作用させ, 発生した圧縮荷重と供試体の上端変位および下端変位の差から, 荷重-変位関係を求め, 断面積1257mm<sup>2</sup>および自然長80mmを用いて, 応力-ひずみ関係に換算した。圧縮試験は全部で4回実施した。図-3に今回の圧縮試験で得られた全4回分の応力-ひずみ関係およびそれらの平均値を示す。図より, ひずみが約5%以降, 初期勾配の1/4で硬化するようなバイリニア型の応力-ひずみ関係を4回とも示していることが分かる。これらの圧縮特性は, 土木学会発行の「ロックシェットの耐衝撃設計」に報告されているEPS材の圧縮特性と類似しており<sup>10)</sup>, 本研究では, 全4回の平均値をEPS材の圧縮特性とした。

## (2) 引張試験

図-4に引張試験に用いた供試体を示す。直径 $d_1=40\text{mm}$ ,  $d_2=13\sim 14\text{mm}$ , 高さ80mmの中央部分がくぼむように加工された砂時計型の供試体である。片方の端部を固定し, もう片方の端部に引張荷重を加え, 供試体

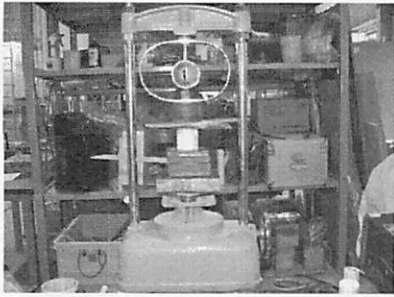


図-1 一軸載荷装置

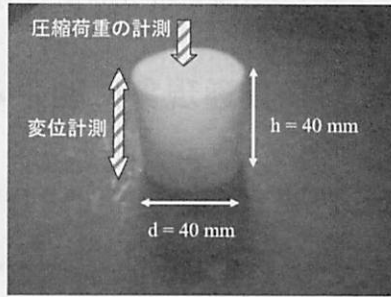


図-2 圧縮試験用供試体

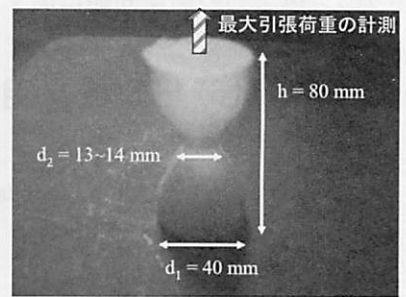
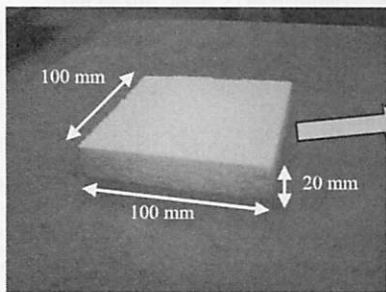
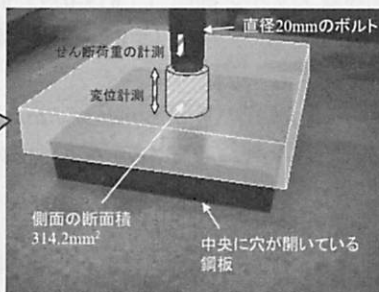


図-4 引張試験用供試体



(a) せん断試験用供試体



(b) せん断試験実施要領

図-5 せん断試験概況

試験回数	最大引張荷重 (N)	引張限界応力 (N/mm <sup>2</sup> )
1回目	36.23	0.235
2回目	33.64	0.218
3回目	33.64	0.253
平均	34.5	0.24

表-1 引張試験で得られた引張限界応力

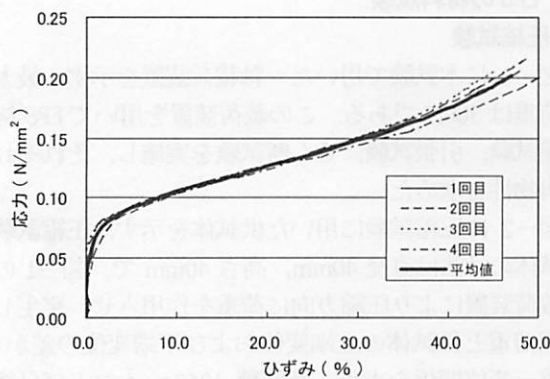


図-3 圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係

中央部で破断するときの最大引張荷重を計測した。表-1に全3回の引張試験結果を示す。引張限界応力は、試験で計測された最大引張荷重と供試体中央部の断面積の関係より算出した。表より、全3回の引張限界応力は、約  $0.2\text{N/mm}^2$  の値であることが分かる。このことから、本試験で用いたEPS材の引張限界応力を、全3回の平均値である  $0.24\text{N/mm}^2$  とした。

### (3) せん断試験

図-5 (a)にせん断試験用供試体を示す。縦 100mm、横 100mm、厚さ 20mm の供試体である。この供試体を図-5 (b)に示すように、中央に直径 27.0mm の丸孔が開いている鋼板の上に置き、上から直径 20.0mm のボルトで押し抜いたときの荷重および押し抜き量を計測した。試

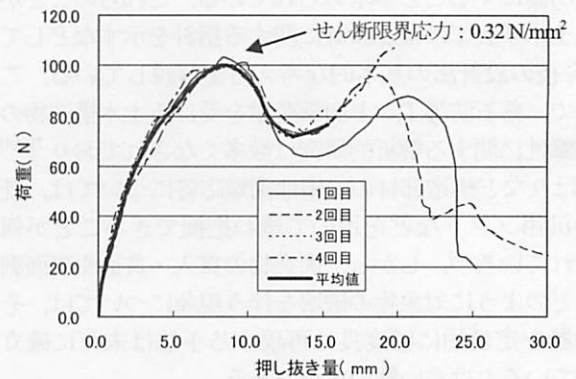


図-6 せん断試験で得られた荷重-押し抜き量関係

験は全部で4回実施した。得られた荷重-押し抜き量関係を図-6に示す。図より、4回とも押し抜き量が8mm程度で荷重が最大値 100N を示し、その後、押し抜き量が12mmで荷重が75Nまで減じていることが分かる。また、押し抜き量が12mm以降、それぞれの荷重-押し抜き量関係がばらついており、これはせん断荷重を加えているボルトの中心と、鋼板中央の丸孔の中心とがずれており、両者の隙間が一定ではないことが影響していると考えられる。このずれの影響は、せん断載荷が進むにつれて大きくなると推測される。以上のことから、押し抜き量が8mmの時の最大荷重 100N を用いて、図-5 (b)の斜線で示す側面の断面積  $314.2\text{mm}^2$  をもとに、EPS材のせん断限界応力を  $0.32\text{N/mm}^2$  とした。

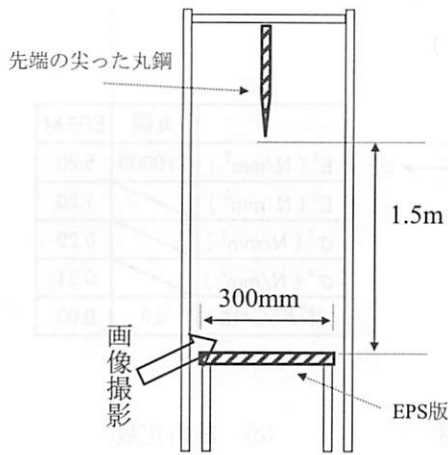


図-7 貫通実験概略図

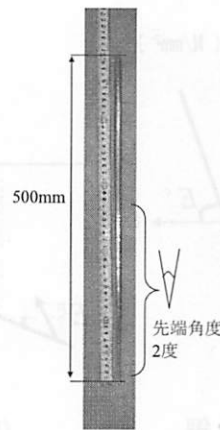


図-8 丸鋼の寸法

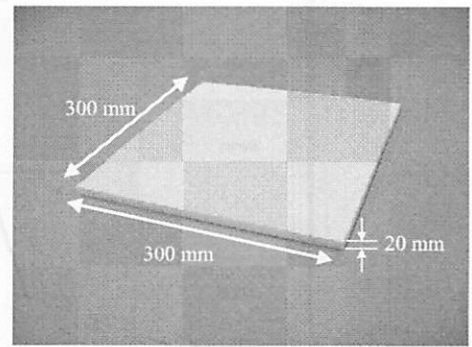


図-9 EPS板の寸法

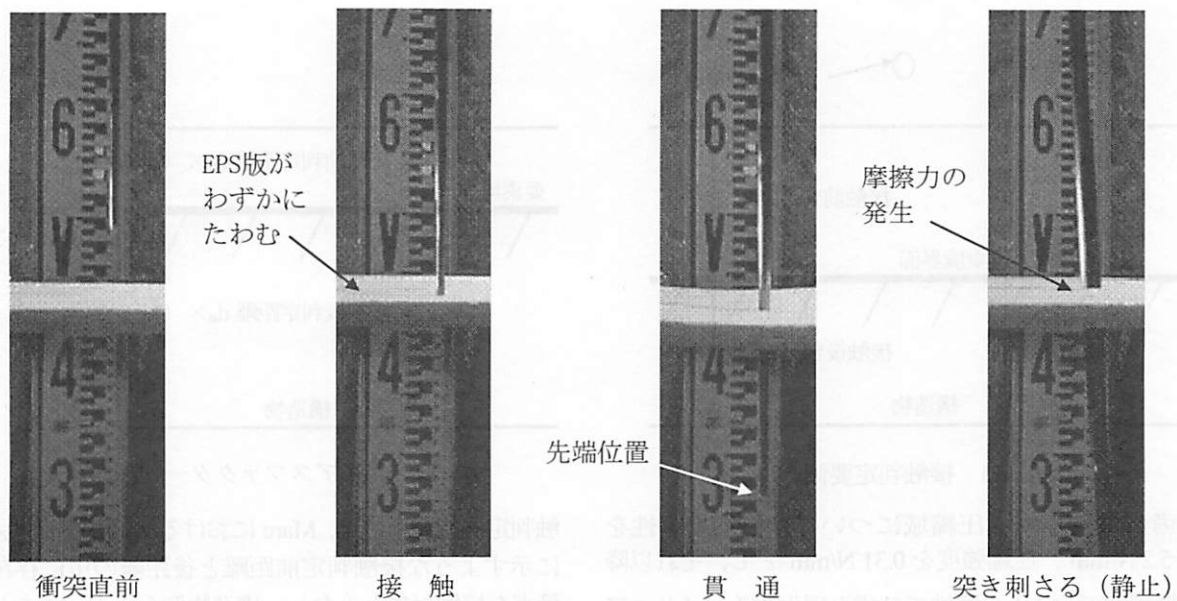


写真-1 貫通実験概略図

## 2.2 EPS板の貫通実験

図-7にEPS板の貫通実験の概略図を示す。本実験では重錘落下試験装置を用いて、丸鋼を落下高さ1.5mの位置から自由落下させ、EPS板に衝突させることを試みた。一連の衝突現象を高速度カメラ(1200コマ/秒)で撮影し、丸鋼の貫通挙動やEPS板の破壊モードなどを調べた。図-8に実験で用いた丸鋼の寸法を示す。全長は500mmで、丸鋼の先端角度は2度になるように加工した。図-9に本実験で用いたEPS板の寸法を示す。縦300mm、横300mm、厚さ10mmの形状で、支持条件は2辺単純支持とした。

写真-1に実験結果を示す。図より、EPS板全体が丸鋼との接触時にわずかに曲げ変形するが、その後の変形はあまり大きくなり、丸鋼が貫入していくことが分かる。このことより、EPS板の破壊挙動が、局所的な破壊現象であり、平板の全体曲げ応答などとは異なった応答であると考えられる。

また、本実験では、丸鋼は突き抜けず、EPS板に突き

刺さった状態で静止した。この時の丸鋼の貫通量は265mmであった。高速度カメラの映像から、丸鋼側面とEPS板との間の摩擦力によって2辺単純支持されたEPS板の跳ね上がりを抑えているように作用していることが確認された。これらのことから、丸鋼の落下によるエネルギーのほとんどは、摩擦力によって逸散するエネルギーに変換されたと推測される。

## 3. 貫通シミュレーション解析

### 3.1 解析モデル

図-11に解析モデル全体図を示す。丸鋼の先端角度やEPS板の寸法、支持条件などは貫通実験と同様にした。計算時間短縮のため、丸鋼に衝突時の初速度5.4m/sを与え、EPS板と接した状態から解析を始めた。

図-12に本解析で用いた丸鋼およびEPS材の材料特性を示す。丸鋼の材料特性は、剛性 $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$ の弾性体とした。EPS材の材料特性は、上述の材料試験

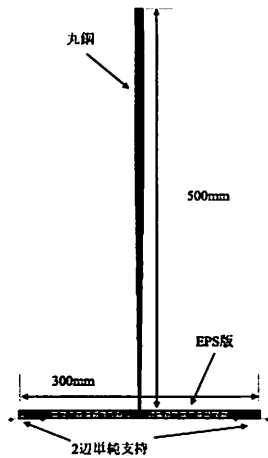
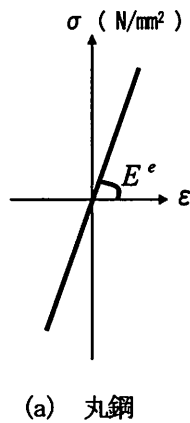
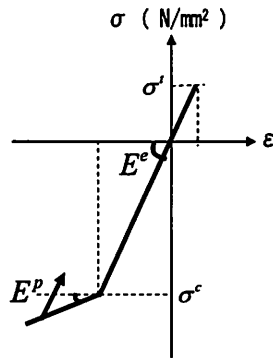


図-11 解析モデル全体図



(a) 丸鋼



(b) EPS材

	丸鋼	EPS材
$E^e$ (N/mm <sup>2</sup> )	210000	5.20
$E^p$ (N/mm <sup>2</sup> )		1.20
$\sigma^t$ (N/mm <sup>2</sup> )		0.20
$\sigma^c$ (N/mm <sup>2</sup> )		0.31
ポアソン比	0.3	0.00

(c) 材料定数

図-12 材料特性

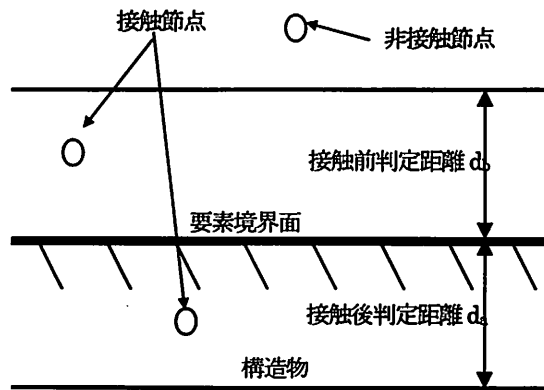


図-13 接触判定要領

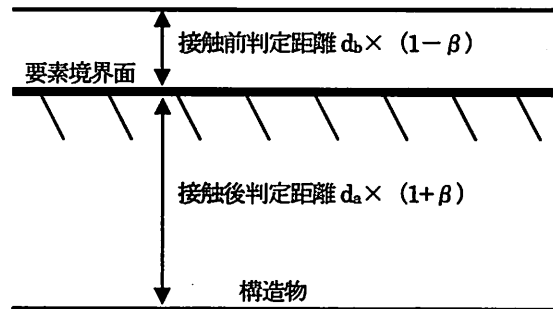


図-14 バイアスファクターの設定要領

を参考に設定した。圧縮域については、初期剛性を  $E_{em}^e = 5.2 \text{ N/mm}^2$ 、圧縮強度を  $0.31 \text{ N/mm}^2$  とし、それ以降は初期剛性の約 1/4 の剛性でひずみ硬化するバイリニア型の材料特性を与えた。引張域については、今回の材料試験では計測できなかった引張域の初期剛性を、圧縮域の初期剛性と同じであると仮定し、 $E^e = 5.2 \text{ N/mm}^2$  を入力した。また、引張強度を  $0.2 \text{ N/mm}^2$  とした。せん断強度についても材料試験から  $0.32 \text{ N/mm}^2$  とした。

有限要素法によって貫通現象を表現するため、事前に設定した破壊基準に達した要素は、その後の計算ルーチンから除外する（要素を消去する）ことを考えた。破壊基準は材料特性をもとに、最大垂直ひずみが圧縮域では 50%、引張域では 3.8%、せん断成分については最大せん断応力が  $0.32 \text{ N/mm}^2$  とし、これらの値のうちいずれかの基準に達した要素は破壊したものと考え、その後の計算から除外した。

本研究では、汎用解析ソフト MSC.MARC2005r3 を用いて弾塑性衝撃応答解析を行った。直接時間積分法にはシングルステップフォーボルト法を用い、解析時間を 20msec とした。時間間隔については、最小時間刻みを  $1.0 \times 10^{-8} \text{ sec}$  とした自動制御で行った。

丸鋼と EPS 材との接触時における計算は、Marc の接

触判定機能を用いた。Marc における接触判定は、図-13 に示すような接触判定前距離と後距離の中に存在する節点を接触対象とみなし、構造物側からの反力を与えるように設定されている。この機能を用いると、高速で物体が衝突するような場合に対して、被衝突物の表面から適切な接触前判定距離を設けることで、現実には起こり得ない物体内部への過度な貫入を防ぐことができる。本研究では、基本となる接触判定距離を衝突車輪の最小要素寸法長の 1/20 に設定した上で、図-14 に示すような接触判定距離の前距離および後距離を調整するバイアスファクター  $\beta$ （本解析では過度の接触前反力が生じないように  $\beta = 0.99$  を採用した）を用いて接触判定距離を調整した。また、丸鋼と EPS 板との間の摩擦係数を 0.5 とした。

### 3.2 解析結果

図-15 に解析結果を示す。図より、接触時に EPS 板がたわむものの、破壊条件に達した要素を取り除くことで、貫通現象が概ね再現できていることが分かる。図-16 に丸鋼と EPS 板との接触部位の拡大図を示す。この図から、丸鋼の円形断面に沿って EPS 板の要素が消去され、丸鋼が貫通していることが分かる。これらのことから、要素

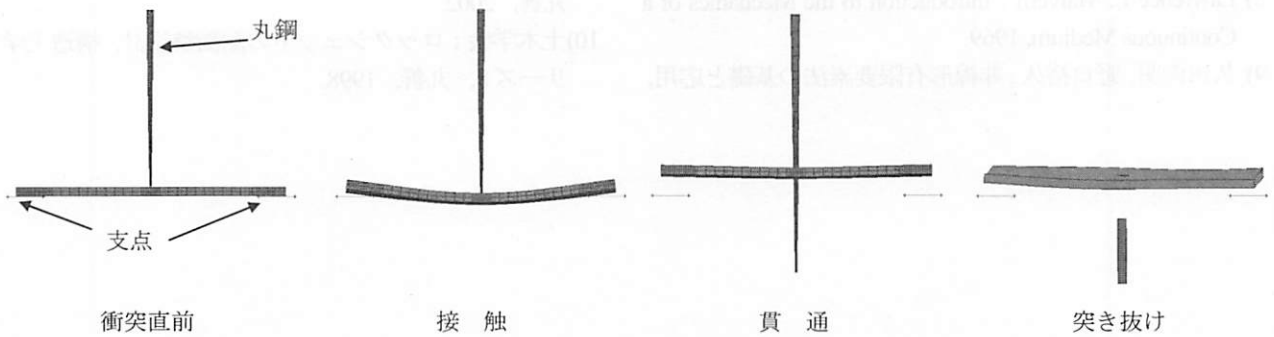


図-15 解析結果

間での力のやり取りを前提に定式化された有限要素法であっても、破壊条件に達した要素を適切に取り扱うことで、貫通現象を表現できると考えられる。

次に、実験では丸鋼は突き抜けず、EPS板に突き刺さった状態で静止したが、解析では丸鋼が突き抜ける結果となった。これは、解析では接触要素間に摩擦力が働くように設定されるため、要素消去にともない丸鋼側面とEPS板との間に空間が生じると摩擦力も失われることになり、丸鋼とEPS板の間に発生する摩擦抵抗が実際よりも小さく評価されたためであると考えられる。

以上のことより、貫通現象を精度良く解析するためには、接触判定や摩擦力の評価方法に改善の必要があるが、圧縮限界などの破壊条件に達した要素を取り除く処理を行うことで、貫通現象を有限要素解析によって簡易に再現できることが認められた。

#### 4. 結論

本研究は、有限要素解析によって貫通現象を表現できるかを検討するため、丸鋼によるEPS板の貫通実験および解析を実施し、以下のことが分かった。

- (1) 簡易な材料試験ではあるが、EPS材の圧縮特性、引張限界応力、せん断限界応力を把握した。
- (2) 要素間の結合や形状関数による変位場の内挿を前提に定式化する有限要素法であっても、破壊条件に達した要素を取り除く処理を行えば、貫通現象を表現できることが分かった。
- (3) 摩擦力による逸散エネルギーを正しく評価するには、接触面での接触判定を適切に行なう必要がある。

本解析で使用した汎用有限要素解析ソフト Marc のように時間積分が陰解法をベースとした手法を用いる場合、対象物の破壊が局所的で全体系としての力のつり合いが保てる状態であれば、要素消去によって貫通現象の再現が可能であることが確認できた。しかし、対象物の破壊が局所的なものにとどまらず、消去要素数が増える

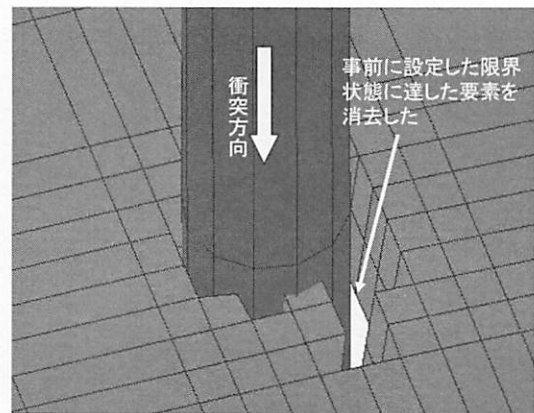


図-16 接触部位拡大図

と解の精度も低下することが予想される。今後、破壊規模と解析精度の関係等について定量的な検討をする必要がある。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：性能設計における土木構造物に対する作用の指針，構造工学シリーズ18，丸善，2008。
- 2) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，構造工学シリーズ15，丸善，2004。
- 3) 岸徳光，三上浩，小室雅人，松岡健一：弾塑性衝撃応答解析法のRC梁への適用性，構造工学論文集，Vol.43A，pp1579-1588，1997.3。
- 4) 井元勝慶，大野友則，佐々木昇，小暮幹太：重錘落下衝突を受けるRCはり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性，構造工学論文集，Vol.41A，pp1201-1212，1995.3。
- 5) 玉井宏樹，園田佳巨：損傷モデルを用いたRCはりの衝撃応答解析手法に関する検討，土木学会論文集A，Vol.63，No.3，pp411-422，2007.7。
- 6) 原木大輔，香月智：個別要素法によるコンクリート供試体の高速破壊挙動解析の試み，構造工学論文集，Vol.51A，pp1645-1652，2005.3。
- 7) GR.Liu, M.B.Liu：Smoothed Particle Hydrodynamics，2003。

- 8) Lawrence E. Malvern : Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, 1969.
- 9) 久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 2002.
- 10) 土木学会 : ロックシェットの耐衝撃設計, 構造工学シリーズ 8, 丸善, 1998.