

# 論文 開削トンネル隅角部の耐震性に関する実験的研究

幸左賢二\*<sup>1</sup>・安田扶律\*<sup>2</sup>・藤井康男\*<sup>2</sup>

**要旨：**開削トンネル構造の隅角部には、通常側圧および地盤反力によって生じる負の曲げモーメントが作用するが、地震時にはこの隅角部に正負交番荷重が作用する。そこで、本研究では開削隅角部を対象とした正負交番載荷実験により、隅角部の終局挙動および変形性能を評価した。その結果、ハンチのない隅角部は隅角部内で損傷が生じるとともに、補強鉄筋の効果があまりなく、 $3\delta y$ から $4\delta y$ で終局状態に達した。一方、ハンチのある隅角部は補強鉄筋の効果が顕著にあらわれた。特に隅角部の内側から外側に補強した場合は、 $5\delta y$ 以上の変形性能を有する結果が得られ、ハンチおよび補強筋の有無の影響が大きいことが明らかとなった。

**キーワード：**開削構造、正負交番載荷、隅角部、終局変位

## 1. はじめに

都市内トンネルでは、既存の地下構造物などにより空間の制約条件が厳しいため、トンネル断面の合理的設計が求められる場合が多い。このためには、設計断面力が大きく一般に形状決定断面となる隅角部における合理的設計手法の確立が特に重要である。

過年度、阪神高速道路公団では死荷重時および震度法設計時における隅角部の合理的設計を目的に、ハンチの有効性および剛域の取扱いに関する検討を行い、ハンチが設計断面として十分考慮できうること、および剛域として評価することによって経済性も発揮できることを明らかにした。一方、開削ボックス構造の隅角部には、通常側圧および地盤反力によって生じる負の曲げモーメントが作用するが、地震時にはこの隅角部に正負交番荷重が作用する。すなわち、常時状態では考慮する必要のない反対方向の力が作用することとなる。

現在まで開削トンネルは耐震性に優れた構造とみなされ地震時荷重について特に考慮されないことも多かった。しかしながら、兵庫県南部地震のような巨大地震を受けた場合には、地盤および構造物が塑性化することによってエネルギーを吸収

することから、終局状態である塑性領域における地盤および構造物の挙動評価が必要となる。特に、巨大地震力が作用するコンクリート構造物には高いじん性が求められており、正負交番荷重が作用した場合の隅角部の挙動を把握することが重大な課題となっている。本研究では、開削隅角部に関する正負交番載荷実験により、隅角部の終局状態における挙動について考察し、構造物としての変形性能および補強効果について評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

表-1に試験体一覧表、表-2に配筋パターン、図-1に試験体の配筋概要を示す。試験体は、実物開削トンネルの1/4スケールとし、側壁断面幅50cm、底面断面幅70cm、断面せい70cmとした。ハンチ形状は1:1とし、ハンチなし、ハンチ厚0.5t (t:側壁厚さ)、ハンチ厚1.0tの3種類とした。配筋は、主鉄筋、ハンチ筋および隅角部外側の補強鉄筋を5-D19 (引張鉄筋比0.45%)、隅角部内側から外側に配置する補強鉄筋を5-D13とし、帯鉄筋は、D10@75で配置した (帯鉄筋比0.27%)。載荷試験方法は、単調および正負交番の2種類とし、

\*1阪神道路公団工務部設計課 Ph.D. (正会員)

\*2阪神道路公団工務部

表-1 試験体一覧表

No	荷重載荷方法	配筋仕様		コンクリート			鉄筋
		ハンチ	パターン	圧縮強度	引張強度	弾性係数	降伏強度
1	曲げ単調載荷	0	4	295	29.0	-	D10:3710 (1767 μ) D13:3680 (1752 μ) D19:4100 (1952 μ)
2	曲げ正負交番載荷	0	3	320	23.5	$2.44 \times 10^5$	
3	曲げ単調載荷	0.5t	4	295	29.0	-	
4	曲げ正負交番載荷	0.5t	3	331	27.5	$2.44 \times 10^5$	
5	曲げ単調載荷	1.0t	4	295	29.0	-	
6	曲げ正負交番載荷	0	4	295	22.6	$2.05 \times 10^5$	
7	曲げ単調載荷	0.5t	4	307	20.5	$1.99 \times 10^5$	
8	曲げ正負交番載荷	0	2	339	30.0	-	
9	曲げ正負交番載荷	0.5t	4	321	23.0	$2.34 \times 10^5$	
10	曲げ正負交番載荷	0.5t	2	341	30.8	-	
11	曲げ正負交番載荷	0.5t	1	313	27.5	$2.44 \times 10^5$	

#1 t: 側壁厚さ

#2 ( )内は、降伏ひずみ

それぞれ4体および7体とした。隅角部の補強タイプとしては、パターン1（隅角部内側から外側に向かう補強筋および隅角部外側の補強筋を含む）、パターン2（隅角部内側から外側に向かう補強筋のみ:以下直角補強と呼ぶ）、パターン3（隅角部外側の補強筋のみ:以下水平補強と呼ぶ）、パターン4（補強筋なし）の4種類である。設計コンクリート強度は $300 \text{ kgf/cm}^2$ （平均実圧縮強度: $314 \text{ kgf/cm}^2$ 、ヤング係数: $2.44 \times 10^5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ ）とし、鉄筋はSD345（D10実降伏強度: $3710 \text{ kgf/cm}^2$ 、D19実降伏強度: $4100 \text{ kgf/cm}^2$ ）を用いた。

2.2 載荷方法

載荷手法は単調載荷においては、荷重を徐々に上げ、コンクリートひびわれ発生時、主鉄筋降伏時に荷重、変位、鉄筋ひずみを計測した。正負交番載荷試験では、正負交番載荷で荷重を徐々に上げ、正載荷で計測引張主鉄筋が降伏する変位を降伏変位 ( $\delta y$ ) と定義した。以降は、降伏変位の整数倍  $3\delta y$  までは各3回ずつ正負交番載荷を行い  $4\delta y$  以降は各1回ずつの正負交番載荷とした。加力方向は、隅角部が閉じる方向を正としている。ここで、最大載荷変位は10cmと設定したが、実験では  $6\delta y$  程度の変位に対応している。これは、当初基部の回転の影響が小さいと想定し、終局を  $10\delta y$  と想定して最大変位を算定したが、基部回転が比較的大きく、この程

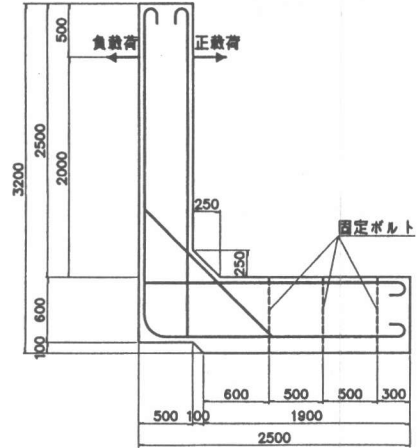


図-1 試験体配筋概要 (No.9)

表-2 配筋パターン

	ハンチなし	ハンチ 0.5t	ハンチ 1.0t
パターン1		No. 11 (←→)	
パターン2	No. 8 (←→)	No. 10 (←→)	
パターン3	No. 2 (←→)	No. 4 (←→)	
パターン4	No. 1 (←→) No. 6 (←→)	No. 3 (←→) No. 7 (←→) No. 9 (←→)	No. 5 (←→)

t: 側壁厚さ

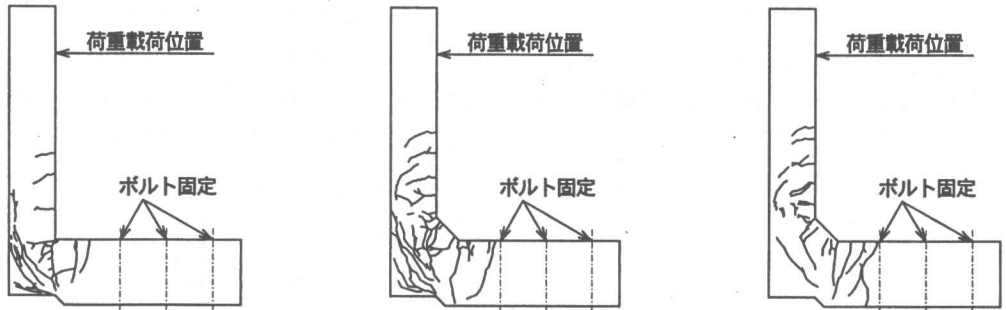


図-2 ひびわれ状況(左よりNO.6, 9, 10負荷時)

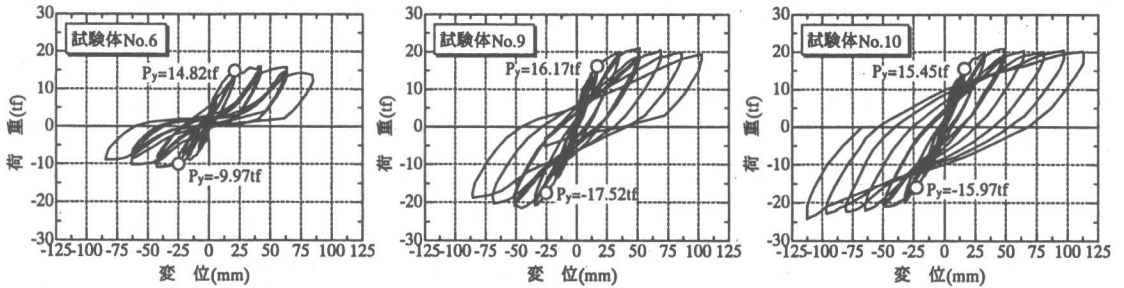


図-3 荷重-変位関係(NO.6, 9, 10)

度の変位じん性となった。しかしながら、正負交番載荷試験体ではNO.10試験体を除いてほぼ終局挙動を評価することができた。なお、軸力は、実ボックスカルバートに作用する荷重を考慮して10tfをジャッキで一定となるように制御しながら加力している。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況

代表例として、正負交番載荷タイプのNO.6, 9, 10について図-2にひびわれ図を示すとともに、以下に損傷過程を示す。

##### (1) NO.6試験体 (ハンチなし, 補強なし)

第1サイクル正負交番載荷時にそれぞれ荷重4.11tfで側壁外側の底版上部付近に、荷重-4.11tfで隅角部内側に曲げひびわれが発生した。その後、サイクルを重ねていくと、側壁を中心に曲げひびわれが成長していき、1 $\delta y$ 負荷時荷重-8.6tf付近で隅角部外側に斜めひびわれが1本、2 $\delta y$ の2サイクルでその外側にもう一本発生した。その後、各サイクルでのピーク荷重が低下してゆき降伏荷重まで低下するとともに、4 $\delta y$ まで載荷した時点で、変位制限値(10cm)付近に達したので、

実験を修了した。

##### (2) NO.9試験体 (ハンチあり, 補強筋なし)

第1サイクル正負載荷時にそれぞれ荷重+7.0tfで側壁外側ハンチ始点付近に、荷重-6.0tfで底版ハンチ始点に曲げひびわれが発生した。その後、サイクルを重ねていくと、側壁を中心に曲げひびわれが成長してゆき、3 $\delta y$ 負荷時-21.5tf付近で隅角部外側に斜めひびわれが発生した。その後、各サイクルでのピーク荷重が低下するとともに、6 $\delta y$ の正載荷時で変位制限値に達したので、実験を修了した。

##### (3) NO.10試験体 (ハンチあり, 直角補強筋のみ)

第1サイクル正負載荷時にそれぞれ荷重8.0tfで側壁外側ハンチ始点付近に、荷重-4.5tfで側壁内側ハンチ始点に曲げひびわれが発生した。その後、サイクルを重ねてゆくと、側壁を中心に、曲げひびわれが成長してゆき、2 $\delta y$ 負荷時-16.0tf付近で隅角部外側に斜めひびわれが1本発生したが、その後は増加しなかった。さらに、サイクルを重ねても、ピーク荷重はほとんど低下せず、7 $\delta y$ 時で変位制限値を超えたので、実験を修了した。

### 3.2 荷重-変位関係の対比

代表的な実験結果を図-3に示すとともに、荷重-変位関係を対比して評価する。試験体NO.9とNO.6を比較してみると、最大荷重が正側で15.9から20.8tfと約1.3倍、負側で-10.9から-20.3tfと約1.9倍に増大している。NO.9の荷重-変位関係のループは、若干スリップ形状を示しているがかなり安定している。これに対して、NO.6は、大きくスリップしており、履歴形状も小さい。以上のことから、正負交番荷重におよぼすハンチの効果は大きいと考えられる。

試験体NO.9とNO.10(ハンチあり、直角補強筋あり)を比較してみると、最大荷重には大きな差はみられないが、NO.10の荷重-変位関係はNO.9に比べ、ループが大きくより安定した形状を示している。また、NO.9では、 $3\delta y$ で最大荷重を示した後、荷重が徐々に減少しているのに対し、NO.10では減少傾向が現れていない。これは、隅角部外側に発生する斜めひびわれが補強筋によって抑制されているためと考えられ、この方向の隅角部補強筋は、全体のじん性向上に有効であると考えられる。試験体NO.9とNO.4(ハンチあり、水平補強筋のみ)を比較してみると、正側の最大荷重が20.8から25.2tfと1.2倍に増大しており、この方向の隅角部補強筋は、隅角部が閉じる方向の荷重に対して有効であることが分かる。補強筋の効果は、ハンチのない試験体でも同様に現れているが、いずれの試験体も試験体NO.9の最大荷重を上回っておらず、またループ形状も安定していない。とくに隅角部を開く方向の荷重に対しては、ハンチのある試験体に比べるとその耐力がかなり小さくなっている。

### 3.3 ひずみ性状

#### (1)引張主鉄筋のひずみ性状

側壁のひずみ分布をみると、図-4に示すようにハンチのない試験体は、隅角部始点で、ハンチのある試験体は、ハンチ始点でひずみが大きくなっている。すなわち、ハンチによって、モーメントに寄与するスパンが短くなっていることが分かる。また、ハンチのある試験体は、ひずみ分布が全体に

広がる傾向を見せており、ハンチによって応力の流れがスムーズになっていることが分かる。この傾向は補強筋の有無によっても現れており補強筋によって応力の流れがスムーズになっている。

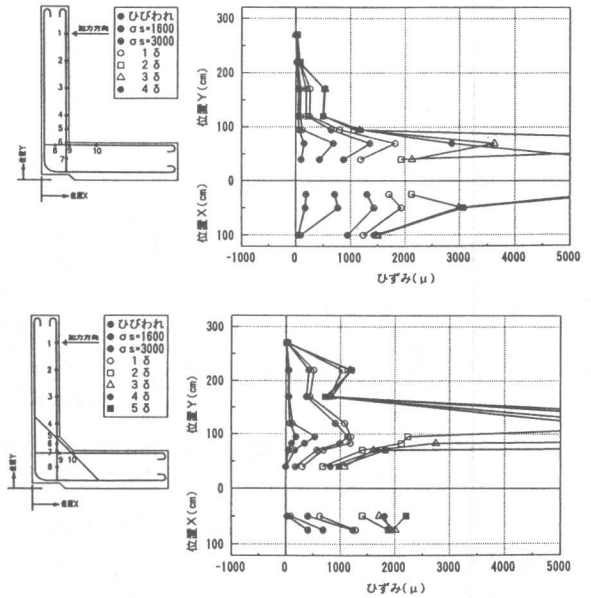


図-4 内側主鉄筋ひずみ分布  
(上NO.6負荷,下NO.9負荷)

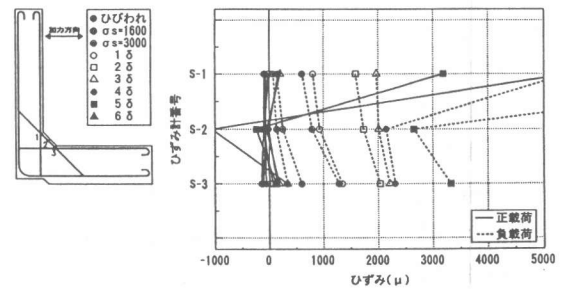


図-5 ハンチ筋のひずみ性状 (NO.9)

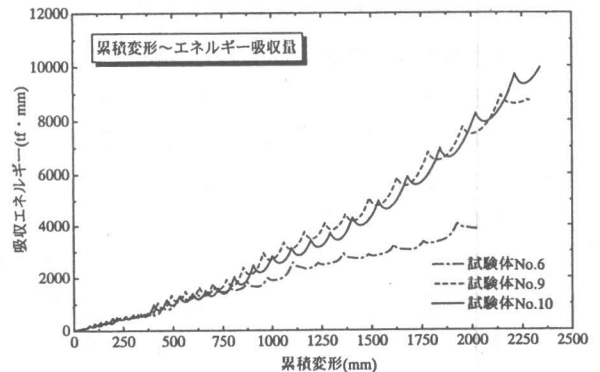


図-6 累積変形-エネルギー吸収量

## (2)ハンチ筋のひずみ性状

ハンチ筋は、隅角部を開く方向の荷重に対しては引張鉄筋として働いている。一方、隅角部を閉じる方向の荷重に対しては、はじめは圧縮鉄筋として働いているが、荷重が進むにつれてハンチ筋の中央のみが圧縮となっている(図-5)。しかしながら、ハンチ筋のひずみ分布は、補強筋の有無によって明確な差異は見られない。

## (3)補強筋のひずみ性状

ハンチのない場合、NO. 2の隅角部外側の補強筋は1600 $\mu$ 程度と降伏に至っていないが、NO. 8の隅角部内側から外側への補強筋は4 $\delta y$ で1800 $\mu$ を超え降伏に達している。一方、ハンチのある場合、隅角部外側の補強筋の発生ひずみは1200 $\mu$ 程度とハンチのない場合に比べ若干少なくなっている。また、NO. 10の隅角部内側から外側への補強筋は、最大で1600 $\mu$ (NO. 10の7 $\delta y$ )で降伏ひずみよりやや小さくなっている。

## 3.4エネルギー吸収性能

図-6に累積変形-エネルギー吸収量の関係の例を示す。累積変形とは、載荷開始からの変形の累積値を示し、エネルギー吸収量は各サイクルの荷重-変形曲線の面積の累積値を示す。ハンチのない試験体はハンチのある試験体に比べエネルギー吸収量が少なく、各サイクルでのエネルギー吸収量も小さくなっている。これは、ハンチのない試験体では、その荷重-変位関係のループがスリップしているためと考えられる。また、隅角部内側から外側に配置した補強筋は最大荷重を増加させるため、エネルギー吸収性能も向上させる。

## 4.耐震性評価

### 4.1ハンチのない場合の耐震性能

NO. 6の補強筋のない場合とNO. 2の水平補強した場合は、負載荷・正載荷とも2 $\delta y$ をピークに荷重が低下した。一方、NO. 8の直角補強した場合は、負載荷で3 $\delta y$ がピークとなっている。また、降伏時荷重を下回る載荷ステップは以下のとおりとなっている。

NO. 6 試験体: 負載荷(4 $\delta y$ ) 正載荷(4 $\delta y$ )

NO. 2 試験体: 負載荷(4 $\delta y$ ) 正載荷(4 $\delta y$ )

NO. 8 試験体: 負載荷(なし) 正載荷(5 $\delta y$ )

ひびわれ進展状況を見ると、耐力を支配していると推定される隅角部外側のひびわれはいずれも1~2 $\delta y$ で発生し、3 $\delta y$ で大きな斜めひびわれが発生し、以降のひびわれ進展はほとんど認められない。つぎに、補強筋外側に発生する斜めひびわれに対して有効と考えられる直角方向補強筋には、4 $\delta y$ の時点で1830 $\mu$ のひずみが生じており、鉄筋が降伏している。以上より、ハンチのない隅角部では補強筋の効果はあまりなく3 $\delta y$ から4 $\delta y$ の間で隅角部が終局状態に達すると推定される。また、No. 6試験体では負載荷1 $\delta y$ 時に隅角部外側に斜めひびわれが発生し、これによって負荷の最大耐力が支配されたと考えられ、最大耐力は-10tfと正載荷に比べて小さくなっている。

### 4.2ハンチのある場合の耐震性能

NO. 9の補強のない場合負載荷・正載荷とも3 $\delta y$ をピークに、また、NO. 4の水平補強した場合正載荷で2 $\delta y$ をピークに荷重が低下している。一方、NO. 10の直角補強した場合は、正載荷で3 $\delta y$ でピークを示しているが、負載荷では5 $\delta y$ 時点で荷重がピークとなっている。また、ハンチのない場合は荷重が降伏荷重まで低下していたが、ハンチのあるNO. 10試験体では降伏荷重まで低下していない。また、ひびわれ進展状況を見ると、隅角部外側に発生する斜めひびわれは、補強のない場合3 $\delta y$ あたりで発生し、5 $\delta y$ では外側全域におよんでいる。同様に、水平補強した場合も3 $\delta y$ あたりでひびわれが発生している。一方、直角補強した場合は、ひびわれ発生は2 $\delta y$ と他のケースより早くなっているがその後のひびわれ進展はみられず、5 $\delta y$ 時点でも耐力が十分保持されていると推定される。また、試験体NO. 10の直角方向補強筋をみると、7 $\delta y$ の時点でも1580 $\mu$ 程度しかひずみが発生しておらず、まだ降伏に至っていない。以上より、ハンチのある隅角部は補強筋の効果が顕著にあらわれ、補強筋なしの場合4 $\delta y$ から5 $\delta y$ の間で終局状態に達しているものと考えられ、隅角部内側から外側への補強をした場合は5 $\delta y$ 以上の変形

性能を有していると考えられる。

#### 4.3耐震性能評価例

ここでは、NO.10試験体を例にとり実構造物において、このタイプの形状が採用された場合の耐震性能評価を行う。まず、変形じん性率については、実験結果より5程度は確保されている。

部材変形角は次式により1/30は確保されている。

$$\Delta L/L = 10/270 \approx 1/30 \quad (1)$$

ここに、 $\Delta L$ :水平方向変形量  $L$ :部材長

次に、解析モデルおよび曲率じん性率について検討を行う。図-7に解析モデルを示すが、実験の固定条件を再現するために隅角部を閉じた方向に載荷した場合と隅角部を開く方向に載荷した場合に分けて設定し、隅角部には剛域を設けている。図-8にM- $\phi$ 関係を示すが、道路橋示方書Ⅲ編のコンクリートの応力-ひずみ曲線を用い終局ひずみ点はコンクリートの圧縮ひずみが0.0035に達する点としている。図-9に解析結果を示すが、解析上の終局ひずみ点 ( $\phi u/\phi y=10$ )では、正載荷側で50mm、負載荷側で85mm程度と実験上の終局変位100mmには達してなく、解析モデルが安全側となっていることがわかる。

#### 5. まとめ

開削トンネル隅角部を対象とした正負交番載荷実験により、隅角部の終局状態の挙動について考察し、構造物としての変形性能および補強効果について評価した。得られた結果を以下にまとめる。

(1)ハンチのない隅角部は補強筋の効果があまりなく3 $\delta y$ から4 $\delta y$ で隅角部が終局状態に達する。  
 (2)ハンチのある隅角部は補強筋の効果が顕著にあらわれ、補強筋なしの場合4 $\delta y$ から5 $\delta y$ の間で終局状態に達しているものと考えられ、隅角部の内側から外側に補強したNO.10試験体の場合は5 $\delta y$ 以上の変形性能を有していると考えられる。すなわち、隅角部の内側から外側の補強筋は、隅角部が開く方向への抵抗効果が大きいことが明らかとなった。

(3)NO.10試験体(ハンチあり、直角補強のみ)の変形性能を評価すると、変位じん性率5、部材変形角1/30を有しており、フレームモデルでの解析

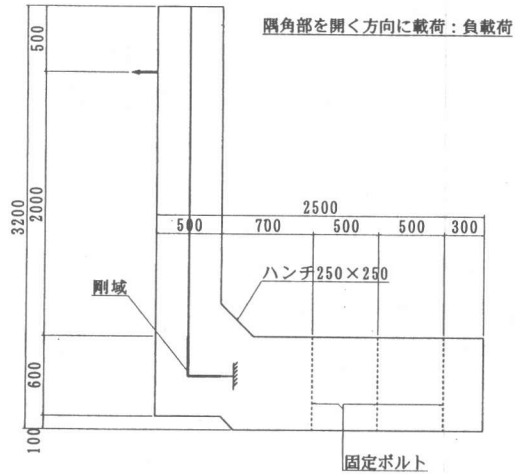


図-7 解析モデル例 (NO. 10)

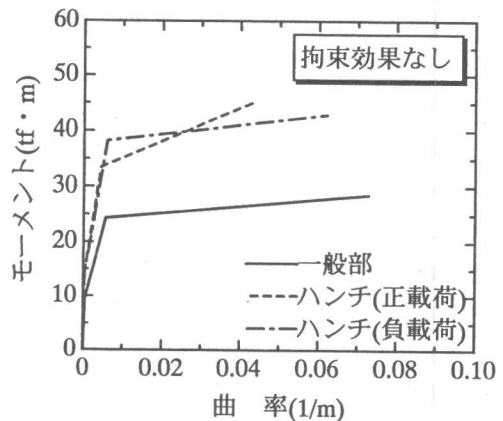


図-8 M- $\phi$ 関係(側面部)

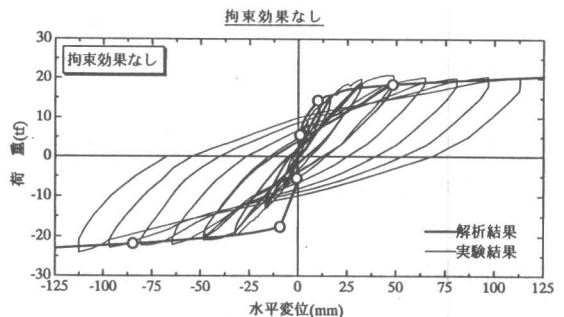


図-9 解析結果

によると曲率じん性率10程度を有していることが明らかとなった。

#### 参考文献:

- 1) 中島・安田・田坂・掘割・開削トンネル隅角部に関する実験, 土木学会第51回年次学術講演会概要集Vol. Ⅲ, 1996. 9.