

開削トンネル構造物の耐震性に関する実験的研究

工務部 工務第一課 北 沢 正 彦
工務部 設計課 幸 左 賢 二
大阪管理部 調査設計課 丹 波 寛 夫

要 約

開削トンネル隅角部を対象とした正負交番および単調載荷、ハンチの有無、補強鉄筋の有無をパラメータとした実験を実施し、これらの要因が隅角部の終局状態に与える影響を評価した。その結果、ハンチのある隅角部は4 δy から5 δy の間で終局状態に達した。またハンチ隅角部に内側から外側に鉄筋補強した試験体は5 δy 以上の変形性能を有していた。ついで、試験体（ハンチあり、内側から外側に鉄筋補強）の変形性能をフレームモデルにより照査すると、部材変形能1/30、曲率じん性率10程度を有しており、補強配筋した隅角部はじん性に富んだ構造物であることが明らかとなった。

キーワード：変形性能、耐震性能、開削トンネル、正負交番載荷

まえがき

都市内で開削トンネルを建設するときには、既存の地下構造物などにより断面形状が制約されることが多い。また、一般に都市内高速道路の開削トンネル形状は、従来の地下鉄断面（幅員10m：高さ5m）に比べて、4車線程度を確保するため幅員が20m以上と広く、かつ建築限界や換気空間の確保などから高さも10m程度の大断面となる。これに伴い壁厚および床版厚も1.5mを超える極厚形状となり、部材厚の増大に伴いハンチも大きくなっている。このため、従来の設計においては必ずしも十分考慮されていなかったハンチ形状を合理的に評価することによって断面の縮減を図ることが可能となってくる。

現在、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が行われ、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

ることが明らかにされつつある^{1),2)}。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。

従来、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変形性能が求められており、正負交番荷重が作用した場合の隅角部付近の挙動を把握することが重大な課題となっている。

例えば、泉らはラーメン橋脚隅角部を対象とした正方向載荷と負方向載荷の比較を行い、載荷方向によって耐荷力およびひびわれ性状が大きく異

なることを明らかにするとともに、隅角部における補強配筋の設計手法を提案している³⁾。また、Priestleyらは同様にラーメン橋脚隅角部の正負交番載荷試験を行い、隅角部の耐震性を確保するための設計法を提案している⁴⁾。

本研究では、まず開削トンネル隅角部を対象とした正負交番および単調載荷、ハンチの有無、補強鉄筋の有無をパラメータとした実験を実施し、これらの要因が隅角部の終局状態に与える影響を評価した。ついで、実験結果を用いて開削トンネル断面の設計に用いる応力-ひずみおよび解析モデルについて検討した。解析の適用性の妥当性を評価した。検討フローを図-1に示す。

1. 実験概要

1-1 試験体概要

開削トンネル断面の耐震性を評価するためには、ボックス断面全体系をモデル化した実験が理想的ではあるが、試験体規模の制約、断面耐力がいずれの荷重の場合も隅角部付近で決定すること、および本実験の主な目的が載荷方法、ハンチ形状および補強配筋が隅角部の終局挙動に与える影響を評価することから、箱形断面の隅角部を取り出したL字型形状の部分実験を実施した。表-1に試験体一覧表、表-2に配筋パターン、図-2に試験体の配筋概要を示すが、負載荷時に床版隅角部が抵抗しないように、隅角部外面に切欠部(50×70cm)を設けている。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、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

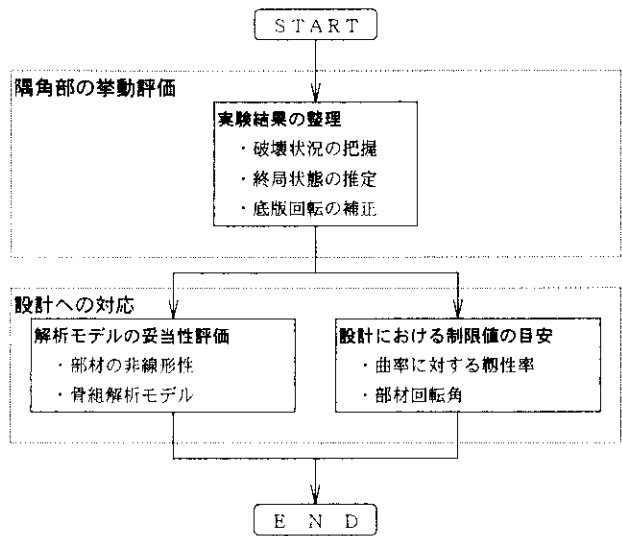


図-1 検討フロー

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 降伏強度
		ハンチ	パターン	圧縮強度	引張強度	弾性係数	
1	曲げ単調載荷	0	4	295	29.0	-	D10:3710 (1707.0) D13:3680 (1752.0) D19:4100 (1952.0)
2	曲げ正負交番載荷	0	3	320	23.5	2.44×10^5	
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	2.44×10^5	
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	2.05×10^5	
7	曲げ単調載荷	0.5t	4	307	20.5	1.99×10^5	
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	25.0	2.34×10^5	
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	2.44×10^5	

*1: t=側壁厚さ *2: t/4(両法)、降伏ひずみ

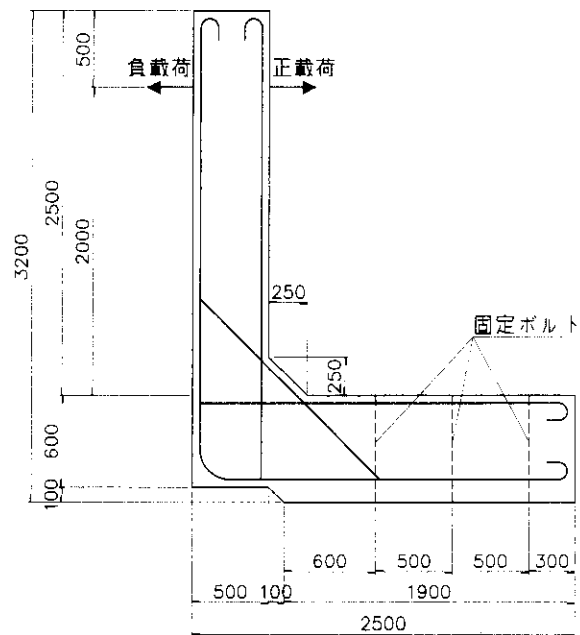


図-2 試験体配筋概要 (No. 9)

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)、パターン3 (隅角部外側の補強筋のみ)、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300kgf/cm² (平均実圧縮強度: 314kgf/cm², ヤング係数: 2.44×10⁵kgf/cm²) とし、鉄筋はSD345 (D10実降伏強度: 3710kgf/cm², D19実降伏強度: 4100kgf/cm²) を用いた。

1-2 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 (δy) と定義した。以降は、降伏変位の整数倍ごとに3 δy までは各3回ずつ正負交番載荷を行い4 δy 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。載荷は降伏までは荷重制御、降伏以降は変位制御としている。ここで、最大載荷変位は10cmと設定したが、実験では6 δy 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 δy 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 (2.86kgf/cm²) 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。

2. 実験結果

2-1 破壊状況

代表例として、単調載荷のNo. 3, 7および正負交番載荷のNo. 6, 9, 10について図-3, -4にひびわれ図を示すとともに、以下に損傷過程を示す。

①No. 3 (ハンチあり, 補強筋なし, 負方向単調載荷)

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. 5 (←)	No. 3 (←) No. 7 (→) No. 9 (←)	No. 5 (←)

1: 側壁厚さ

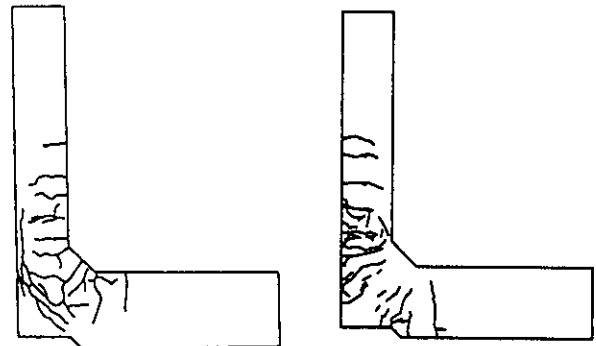


図-3 ひびわれ状況 (左よりNo. 3, 7正載荷時)

荷重3.6tfで底版のハンチ始点に曲げひびわれが発生、その後、側壁・底版にひびわれが進行し、荷重11.0tfでハンチ中央付近にひびわれが発生した。荷重17.5tfあたりから隅角部外側にせん断ひびわれを生じた。

②No. 7 (ハンチあり, 補強筋なし, 正方向単調載荷)

荷重7.1tfで側壁外側のハンチ始点に曲げひび

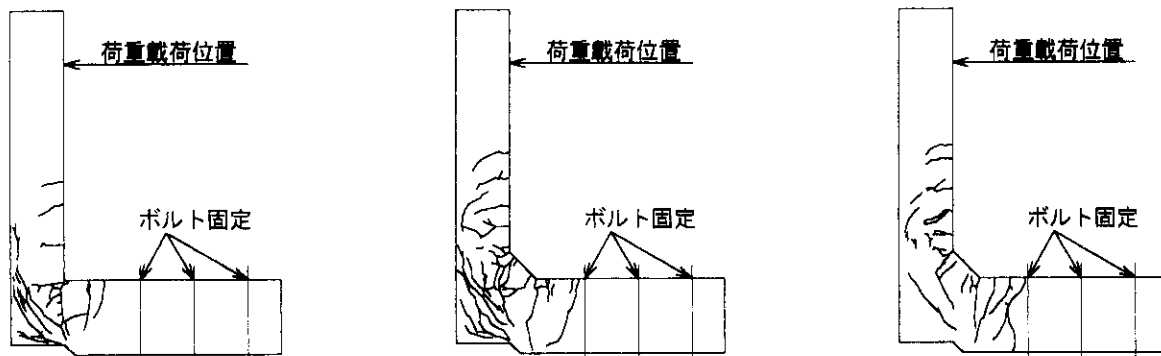


図-4 ひびわれ状況 (左よりNo. 6, 9, 10負荷時)

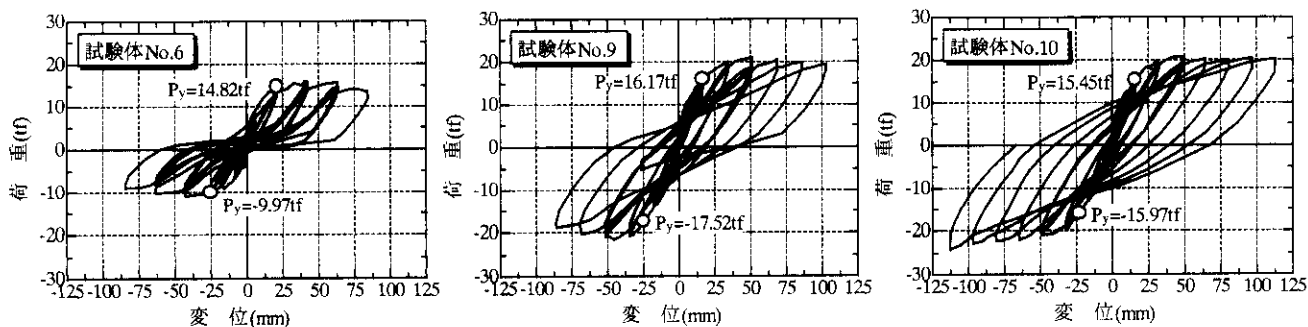


図 5 荷重-変位関係 (No. 6, 9, 10)

われが発生, その後荷荷を続けても, 明確なせん断ひびわれの発生もなく, 大幅な荷重低下も起きなかった。

③No. 6 (ハンチなし, 補強なし, 正負交番載荷)

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 δy 負荷荷重-8.6tf付近で隅角部外側に斜めひびわれが1本, 2 δy 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 δy まで載荷した時点で, 変位制限値(10cm)付近に達したので, 実験を終了した。

④No. 9 (ハンチあり, 補強筋なし, 正負交番載荷)

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 δy 負荷荷時-21.5tf付近

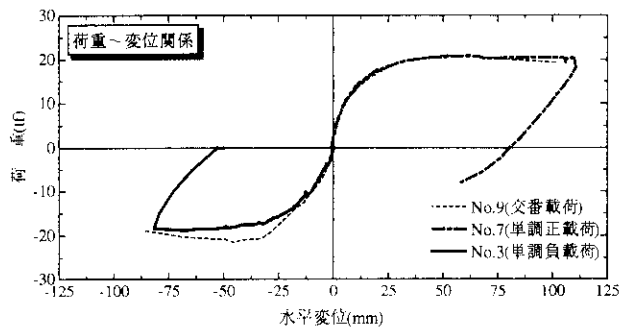


図-6 荷重-変位の対比

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 δy の正載荷時に変位制限値に達したので, 実験を終了した。

⑤No. 10 (ハンチあり, パターン2鉄筋補強, 正負交番載荷)

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 δy 負荷荷時-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 δy 時で変位制限値を超えたので、実験を終了した。

2-2 荷重-変位関係の対比

代表的な実験結果を図-5、単調荷重の荷重-変位曲線と正負交番荷重の包絡線の対比を図-6に示すとともに、荷重-変位関係を対比して評価する。

① 単調荷重と正負交番荷重

No. 3とNo. 7を比較すると、ハンチがある場合、隅角部を開く方向の荷重に対するよりも、隅角部を閉じる方向の荷重に対する抵抗の方が大きいことが分かる。これは、ハンチが圧縮側に特に有効であるためと考えられる。また、正載荷側では両者は概ね一致した挙動を示している。

これに対して負載荷側では、単調荷重では変位の増加とともに荷重が増加するのに対して、正負交番荷重では3 δy 付近から荷重が減少している。

② ハンチの有無

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。

③ 補強筋の有無

試験体No. 9とNo. 10(ハンチあり、隅角部の内側から外側に向かう補強筋あり)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 δy 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。

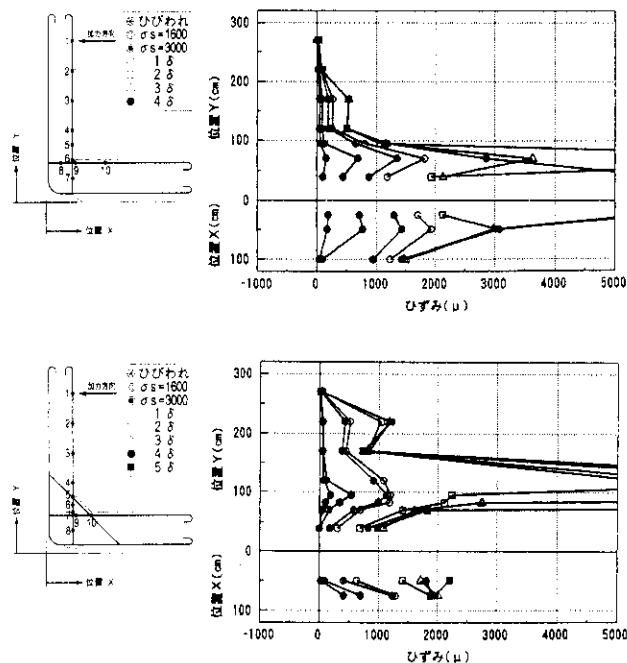


図-7 内側主鉄筋ひずみ分布
(上No. 6負載荷、下No. 9負載荷)

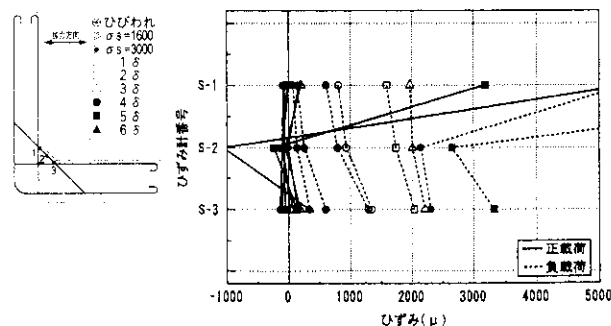


図-8 ハンチ筋のひずみ性状 (No. 9)

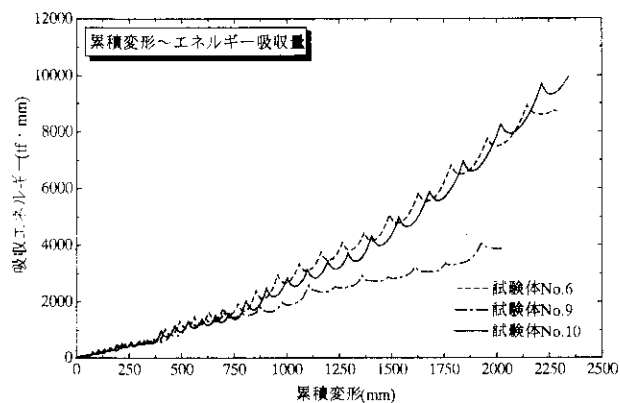


図-9 累積変形-エネルギー吸収量

④ 補強筋の有無

試験体No. 9とNo. 4(ハンチあり、隅角部の外側の補強筋のみ)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。

2-3 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-7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。

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-8)。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 μ 程度と降伏に至ってないが、No. 8の隅角部内側から外側への補強筋は4 δy で1800 μ 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 μ 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 μ (No. 10の7 δy)で降伏ひずみよりやや小さくなっている。

2-4 エネルギー吸収性能

図-9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量を示す。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。

3. 耐震性評価

3-1 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 δy をピークに荷重が低下した。一方、No. 8の隅角部の内側から外側に向かう補強をした場合は、負載荷で3 δy 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 δy) 正載荷 (4 δy)

No. 2 試験体：負載荷 (4 δy) 正載荷 (4 δy)

No. 8 試験体：負載荷 (なし) 正載荷 (5 δy)

ひびわれ進展状況をみると、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 δy で発生し、3 δy 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隅角部の内側から外側に向かう補強筋には、4 δy の時点で1830 μ 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 δy から4 δy 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 δy 時に隅角部外側に斜めひびわれが発生し、これによって負側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。

3-2 ハンチのある場合の耐震性能

No. 9の補強のない場合・正載荷・正載荷とも3 δy をピークに、また、No. 4の隅角部外側を補強した場合正載荷で2 δy をピークに荷重が低下している。一方、No. 10の隅角部の内側から外側に補強した場合は、正載荷で3 δy でピークを示しているが、負載荷では5 δy 時点で荷重がピークとなっている。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みると、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 δy あたりで発生し、5 δy では外側全域におよんでいる。同様に、隅角部外側のみ補強した場合も3 δy あたりでひびわれが発生している。一方、隅角部の内側から外側に向かう補強筋を配置した場合は、ひびわれ発生は2 δy 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 δy 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の隅角部の内側から外側に向かう補強筋をみると、7 δy の時点でも1580 μ 程度しかひびきが発生しておらず、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 δy から5 δy 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 δy 以上の変形性能を有していると考えられる。

4. 設計に用いる材料・解析モデルの検討

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、 ΔL ：水平方向変形量 L ：部材長さ
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-10に解析モデルを示すが、実験

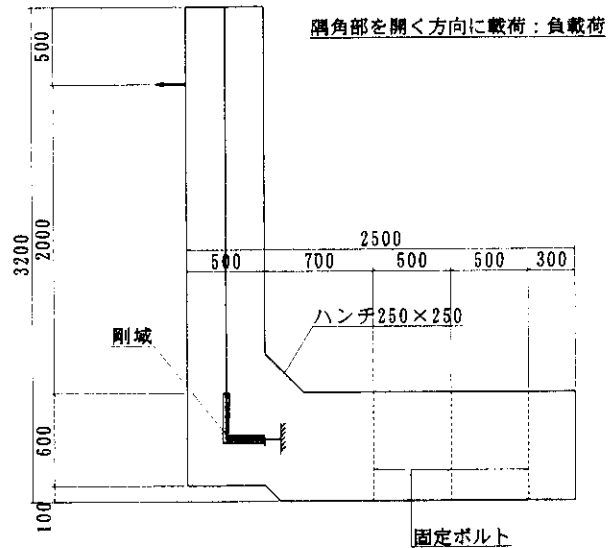


図-10 解析モデル例 (No.10)

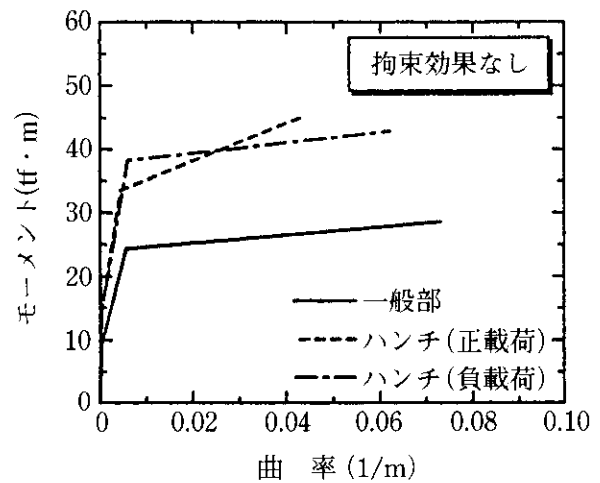


図-11 M- ϕ 関係

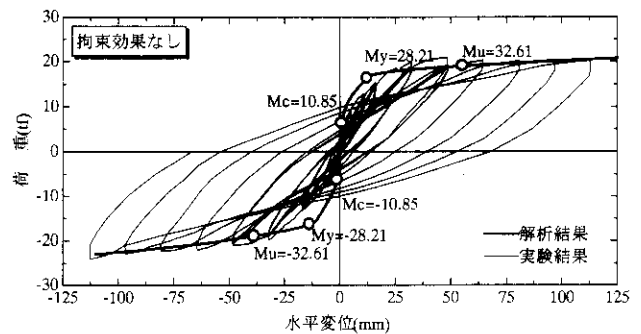


図-12 解析結果

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-11にM- ϕ 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-12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 δ_y から4 δ_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 δ_y から5 δ_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 δ_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) 武田三弘・斉藤啓一・生田雄康：断面が変化するRC部材のせん断に関する実験的研究(1), 土木学会49回年次学術講演会概要集V-5, pp.862-863, 1994.9.
- 2) 中島裕之・安田扶律・田坂幹雄：掘削・開削トンネルの隅角部に関する実験, 土木学会51回

年次学術講演会概要集III-5, pp.146-147, 1996.9.

- 3) 津野和男・泉満明：コンクリート構造物の隅角部設計法(その1), 土木技術29巻号, pp.20-28, 1972.9.

- 4) Paulay, T., and M. J. N. Priestley, Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, Wiley, New York, 1992.