

TBM用新型ライナーの設計手法 A Design Method for The New Type Liner in TBM Tunneling

森 益基*・西岡 巖*・伊藤 文雄**・寺本 哲***・梶 修****
Masuki MORI, Iwao NISHIOKA, Fumio ITO, Tetsu TERAMOTO and Osamu KAJI

In TBM tunneling, the installation of segmental liner, which can support both thrust force for the machine and earth pressure for tunneling, is effective for safe and rapid excavation when the rock is weak and/or the excavated roof collapses frequently. This paper describes the development of new type segmental liner that is relatively cheap and easy to install compared to the conventional segments for shield tunneling. The liner has composite structure of steel shell and filled concrete. Each pieces are jointed without using bolts to reduce installation time. In order to establish the design method for this liner, loading tests on full scale pieces were performed and the results were evaluated using numerical analysis.

Keywords : TBM tunneling , segmental liner , composite structure , loading tests , design method

1. はじめに

近年、TBMの長距離急速施工による経済性が着目され、国内でのTBM施工が増加してきているが、日本においてTBMによるトンネル掘削を行う場合、地質の変化に対応できる施工システムの開発が重要であり、自立性岩盤から崩壊性岩盤までに対応した掘削システムが要求される。そのためには、グリッパにより岩盤から掘進反力をとる方式と、シールドジャッキを使用してライナーから反力をとる両掘進方式に対応できるTBMマシンとTBMライナーが必要である。そこで、TBM掘進反力を受けかつ地山を支承する機能を持つ新型ライナー（以下ハイブリッドライナーという）の開発を行った。

ハイブリッドライナーは、図-1.1に示すような鋼枠と中詰めコンクリートから形成されるハイブリッド構造であり、鋼枠は工場にて製作し中詰めコンクリートを現地にて打設する現場製作型のプレキャストライナーである。したがって、RCセグメントのように型枠を必要としないため、ライナーの製作期間が短く、

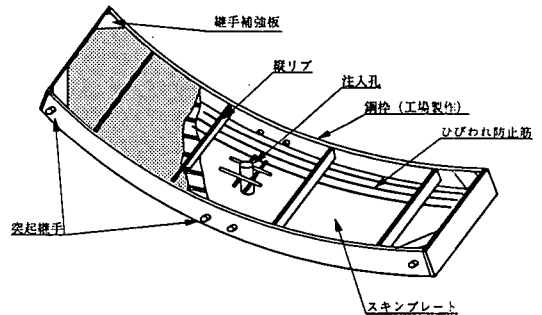


図-1.1 ハイブリッドライナー概要図

*	正会員	大成建設(株)	土木設計第一部
**	正会員	大成建設(株)	土木設計計画部
***		大成建設(株)	土木技術部
****	正会員	大成建設(株)	土木プロジェクト推進部

前方予知等によりライナーが必要と判断されてからの製作が迅速に対応できる等の特長を有している。^{*)}

また、ハイブリッドライナーは、鋼枠と中詰めコンクリートの簡易合成効果を考慮した設計を行い、主桁をできるだけ薄くして低価格化を図るとともに、突起継手の採用によるボルトレス構造としており、組立の高速化も図っている。

2. 概要

ここに提案しているハイブリッドライナーの構造は、コンクリートと鋼材とで合成された鋼コンクリート合成構造であり、代表的なものとしては鉄骨鉄筋コンクリート部材やコンクリート充填柱、サンドイッチ部材などが挙げられる。これらの構造物については、それぞれ構造の特性を考慮した設計手法が確立されているが、ハイブリッドライナーのような構造については未だ設計手法が確立されていない。

また、ハイブリッドライナーでは主桁に設けた突起継手を隣接ライナーの主桁に設けたメス穴に差し込むだけの簡易継手構造（図-2.1参照）としているが、このようなライナーの設計にあたっては、継手によるライナーの剛性低下および千鳥組効果を忠実に表現できる梁バネ解析を行う必要がある。梁バネ解析においては、ピース間の継手部を回転バネとしてモデル化（図-2.2参照）しているが、回転バネ定数の算定手法についてはシールドセグメントのようにボルトでピース間を締結されるタイプを除いて十分に確立されているとは言えない。

このように、ハイブリッドライナーの設計を行う上で、以上の2点について、確立された設計手法が提案されておらず、ハイブリッドライナーを設計する上で解決すべき問題となっている。

そこで、ここではハイブリッドライナーの実物大供試体による実験を行うとともに、鋼枠と中詰めコンクリートの合成効果、継手部の回転バネ定数の算定手法に着目したFEM解析を行った。その結果を検討することにより、以上の未解明な部分を明らかにし、ハイブリッドライナーの設計手法を提案することができた。

3. 本体部の挙動評価

3.1 単体曲げ試験

ハイブリッドライナー本体部の挙動特性を明らかにするため、ライナーの平板供試体および円弧供試体を用いて単体曲げ試験を行った。単体曲げ試験の状況は図-3.1に示すとおりである。

3.2 コンクリート非線形解析

鋼枠とコンクリートの合成効果を明らかにするため、コンクリートのひび割れ挙動を考慮できるコンクリート非線形解析を実施し、単体曲げ試験の結果と比較検討を行った。ここで解析に用いたモデルは、円弧供試体の正曲げ試験をモデル化している。

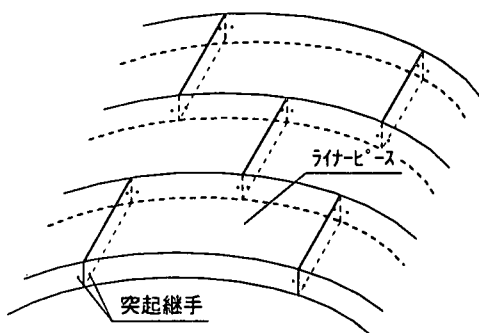


図-2.1 簡易継手構造

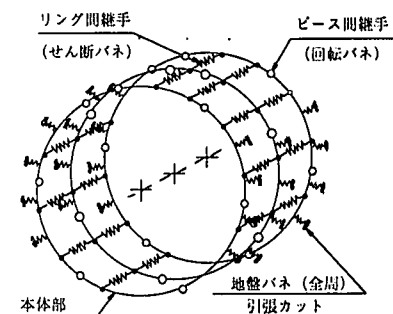


図-2.2 梁バネモデル概念図

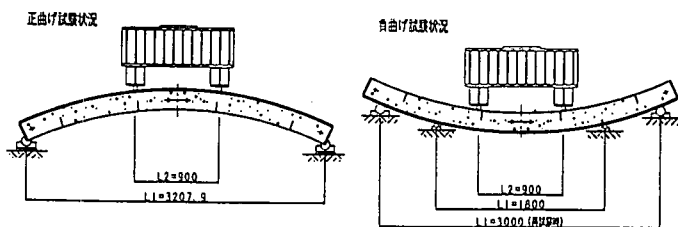


図-3.1 単体曲げ試験状況図

また解析ケースとしては、モデルAとして「鋼棒とコンクリートを剛結とする」モデル、モデルBとして「鋼棒とコンクリートの間を完全に縁切れさせた」モデルの二つを用意し、載荷実験と同様に中央部の線荷重を単調増加させ、中央部及び荷重載荷点直下（リブ付近）の変位とコンクリートに貼付された歪みゲージの値を解析結果と比較検討する。

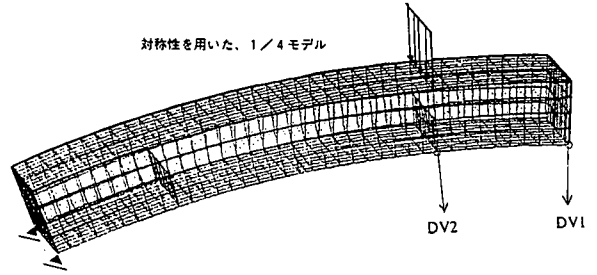


図-3.2 解析モデル

(a) 解析手法

ハイブリッドライナーは、構造形状として3次元となるため、解析に使用したモデルはライナーの1/4モデルを用いた（図-3.2参照）。したがってコンクリートひび割れモデルとしては、BazantのCrack Bandモデル²⁾を3次元に拡張し、破壊後の剛性低下は、破壊エネルギー G_f とメッシュサイズによって規定されるものを採用した。尚、破壊エネルギー G_f の値については、CEB-FIPコードにより使用したコンクリートの最大骨材寸法と設計基準強度より決定した。また鋼棒部の材料特性として曲げによる降伏を再現するため、Misesの弾塑性モデルを用い、降伏後は弾性係数の1/100倍に変化するひずみ硬化型を仮定した。本解析に用いた入力パラメータとしては以上の7つの材料定数が必要となる（表-3.1参照）。

表-3.1 入力パラメータ

鋼棒			中詰めコンクリート			
弾性係数 E kgf/cm ²	ポアソン比 ν	降伏応力 σ_y kgf/cm ²	弾性係数 E kgf/cm ²	ポアソン比 ν	引張強度 f_t kgf/cm ²	破壊エネルギー G_f kgf/cm
2,100,000	0.3	3,200	234,000	0.19	26.4	0.124

(b) 解析結果

モデルAとモデルBを用いて鋼棒部とコンクリート部の応力分担について検討を行う。但し、解析結果は、計測結果の最大荷重34tf程度に対し、約半分の17tfまでしか再現できなかった。これは、3次元のひび割れ進展解析の解の収束性に問題があるためと考えられる。したがって、最終挙動まで解析で追うことが出来なかったが、実験結果をみると17tfの荷重作用時には鋼棒に許容応力を超える応力が作用しているの、許容応力度以内の挙動を検討するには十分な解析結果を得ることができたと考えている。

載荷重と変位量（供試体中央の変位＝DV1、載荷点直下の変位＝DV2）の関係を示した荷重－変位曲線（図-3.3）をみると、2tf程度まではモデルAと同じ挙動を示すが、それ以降は計測値をモデルAとモデルBの解析結果で挟んでおり、実際の試験体はこの2つのモデルの間の状態、すなわち、ある程度コンクリー

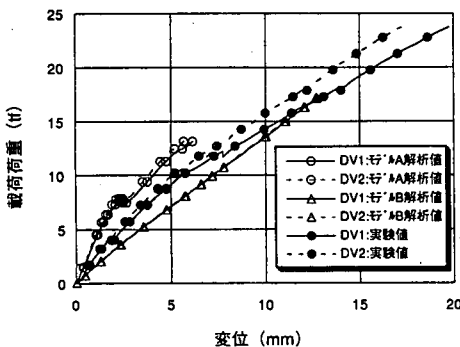


図-3.3 荷重-変位曲線

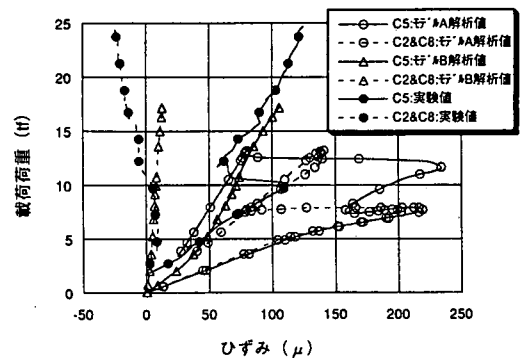


図-3.4 荷重-ひずみ曲線

トと鋼枠の剥離が起きている事を示している。

さらに引張縁の歪み挙動と比較すると、計測点C5（供試体中央のコンクリート面）の荷重－歪み曲線（図－3.4）でも変位挙動と同様に、モデルAは初期の剛性とコンクリートのひび割れにより応力が解放される現象をよくシミュレートしている。一方、計測点C2&C8（リブ付近のコンクリート面）では、モデルBの方が実際の現象に近い挙動を示しており10tf以上の剛性もよく再現している。

また、主桁に発生するひずみ値を、荷重 $P = 13.04\text{tf}$ の場合について解析値と実験値を比較したところ、図－3.5に示すようにモデルAの解析値と実験値は圧縮領域でかなり近い値を示し、引張領域においてはモデルAとモデルBの中間的な値を実験値は示している。この結果からも、中立軸より圧縮側では主桁とコンクリートは完全に付着し一体として挙動しているが、中立軸より引張側では主桁とコンクリートの間では徐々に剥離が始まり、一体として挙動できなくなっていると思われる。

そこで、中立軸より圧縮側の領域で実験値に近い値を示したモデルAについて、主桁のひずみ分布と中詰めコンクリートのひずみ分布を比較してみた（図－3.6）。これをもても分かるように、低い荷重レベルでは圧縮縁から引張縁まで主桁とコンクリートのひずみ分布は一致するが、荷重レベルが大きくなると、コンクリートの引張側にはひび割れが生じるため引張ひずみが解放され、コンクリートの引張ひずみは増大しなくなる。しかし、中立軸より圧縮側ではコンクリートと主桁のひずみ分布はほぼ一致しており、引張側においてひび割れが入っても、圧縮側では主桁とコンクリートが一体として挙動していることが分かる。

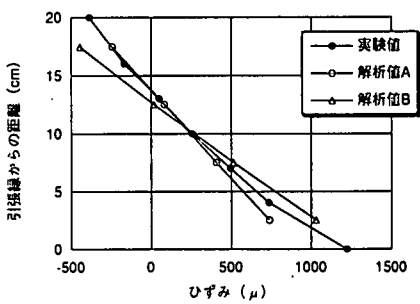
このように、ハイブリッドライナー全体としては、中立軸より引張側でコンクリートと鋼枠の剥離が起るため、完全に一体として挙動することはできないが、中立軸よりも圧縮側に限定すると、鋼枠と中詰めコンクリートは一体として挙動し、両者のひずみ分布も一致していることが解析結果より明らかとなった。

3.3 本体部の設計手法

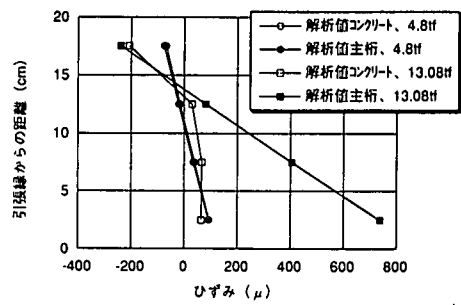
(a) スキンプレートの有効幅

単体曲げ試験におけるスキンプレートの応力分布をみると、正曲げの場合と負曲げの場合で図－3.7に示すような特徴があることが分かった。

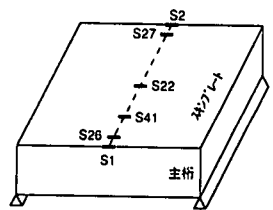
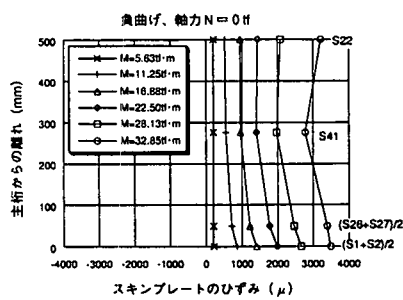
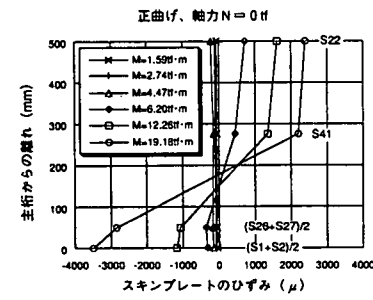
正曲げの場合は、スキンプレートに圧縮応力が作用するため、圧縮応力が大きくなるとスキンプレートは座屈破壊を起こし、ライナー中央部ではスキンプレートのはらみ出しによる張力の影響で、逆に引張応力が



図－3.5 主桁ひずみ分布比較



図－3.6 主桁とコンクリートのひずみ分布比較



図－3.7 スキンプレートのひずみ分布

作用していることが分かる。これに対し負曲げの場合は、ライナー中央部では若干応力が落ちるものの、ほぼ全幅にわたってスキンプレートが有効に作用していることが分かる。

以上の結果より、正曲げの場合はシールドセグメントに用いられるスチールセグメントと同様、スキンプレート厚の25倍のみを有効とし、負曲げの場合は全幅の約80%は有効であるとしてよいことが分かった。

(b) 主断面の設計手法

鋼コンクリート合成構造部材のひとつである鉄骨鉄筋コンクリート構造物については、「コンクリート標準示方書、土木学会」で、鉄骨部分の断面耐力と鉄筋コンクリート部分の断面耐力の和を鉄骨鉄筋コンクリート部材の断面耐力とする累加強度方式としているが、「鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針、(財)鉄道総合技術研究所」では鉄骨と鉄筋コンクリートが一体として働くことを前提として断面耐力を算定する、合成方式を採用している。この合成方式では、鉄筋コンクリートと同様に以下のような仮定を用いている。

- ①軸方向ひずみは中立軸からの距離に比例し、コンクリートと鉄骨に生じるひずみ分布は等しい。
- ②コンクリートの引張応力を無視する。

ハイブリッドライナーについても、鋼枠と中詰めコンクリートの合成効果を考慮した設計をするためには、上で仮定しているように、中立軸よりも圧縮側については鋼枠（主桁）と中詰めコンクリートが同一のひずみ分布となっていることを確認する必要がある。3.2では正曲げの試験結果と解析結果より、これらが同一のひずみ分布となっているであろうと推測することができたが、ここでは、負曲げの試験結果より、直接主桁とコンクリートのひずみ値を圧縮縁において比較することにより、鋼枠と中詰めコンクリートのひずみ分布が圧縮側において同一の分布をしていることを確認する。

単体曲げ試験で得られた、供試体中央の曲げモーメント～ひずみ曲線を図-3.8に示す。これをみても分かるように、コンクリートと主桁のひずみは900 μ 程度までは同一の挙動を示すが、900 μ を超えると主桁とコンクリートは異なった挙動を示すことが分かる。

900 μ のひずみ量はコンクリート応力で約210kgf/cm²に相当して

おり、実験に用いたコンクリートの設計基準強度に相当する。すなわち、コンクリートが圧縮破壊することにより、中立軸より圧縮側でも主桁とコンクリートの一体性は保たれなくなり、ひずみ分布の同一性が保たれていないものと思われる。

すなわち、部材の弾性領域で設計を行う許容応力度法で設計を行うにあたっては、合成方式で設計を行っても問題はないが、部材の塑性状態まで考慮する終局限界状態の設計では、合成方式で設計を行うことはできない。したがって、ハイブリッドライナーの設計を行うにあたっては、許容応力度法で設計を行うことを前提とし、終局限界状態の設計を行うには、材料が塑性化した後の状態についてより研究を重ねる必要がある。

(c) ヤング係数比 n の設定

一般のRC構造部材を設計する場合、鉄筋とコンクリートの弾性係数の比であるヤング係数比 n を15として応力度を算定している。これは、クリープによりヤング係数比が弾性値の2倍程度になることから、慣用的に弾性値の1.5倍程度として定めた値である。

ハイブリッドライナーについても、3.3.1と3.3.2で述べてきた設計手法に従い、ヤング係数比を弾性値である n = 9 を用いた場合と、慣用値である n = 15 を用いた場合について主桁の許容耐力を算定し、実験で得ら

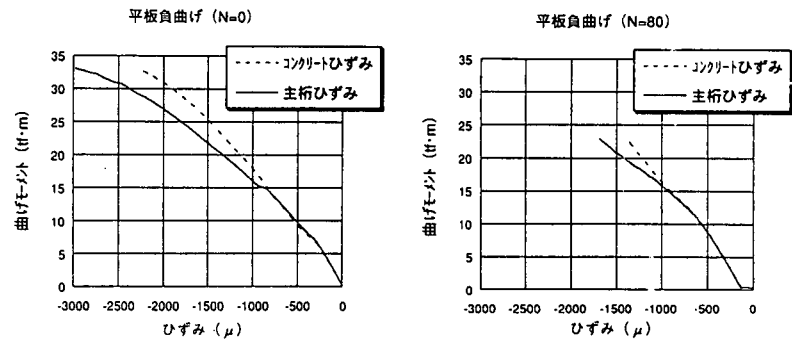


図-3.8 曲げモーメントと圧縮縁ひずみの関係図

れた主桁の許容耐力との比較検討を行った（図-3.9参照）。

その結果、慣用値である $n=15$ を用いて主桁の許容曲げモーメントを算定すると、実験で得られた許容曲げモーメントよりも小さくなり、安全側の結果が得られることが分かる。特に、軸力が作用している場合、 n の変化で許容曲げモーメントは大きく変化し、軸力が作用しているほど安全側の結果が得られていることが分かる。

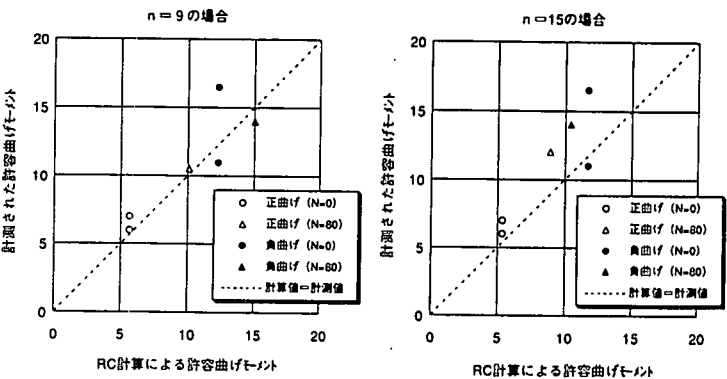


図-3.9 主桁の許容曲げモーメント

このことより、ハイブリッドライナーの設計においても、ヤング係数比として慣用値である15を用いて差し支えないことが分かった。

4. 継手部の挙動評価

4.1 継手曲げ試験

ハイブリッドライナー継手部の挙動特性を明らかにするため、ライナーの継手部を平板供試体でモデル化した継手曲げ試験を行った。継手曲げ試験の状況は図-4.1に示すとおりである。

ただし、このときは継手接触面に変形が生じていたため、継手部を完全に接触させることができず、主桁に近い部分だけが接触し、中央部には若干隙間が残る不完全接触状態であった。

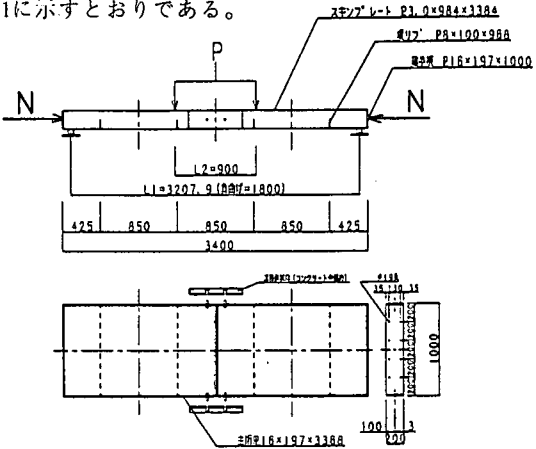


図-4.1 継手曲げ試験状況図

4.2 突き合わせ継手部の数値実験

突き合わせ継手構造の場合、継手面に作用する軸力の偏心位置が核外となる場合は、図-4.2(b)に示すように引張縁に目開きが生じるため、ここに回転角 θ が生じる。ピース間継手を回転バネでモデル化する場合、回転バネ定数 K_θ は継手部の曲げモーメント M と回転角 θ の関係より、 $K_\theta = dM/d\theta$ （接線勾配）として算定することができる。

そこで、継手部における曲げモーメント M と回転角 θ の関係を求めるため、FEMによる数値実験を行った。解析ケースと解析モデル（メッシュ、境界条件）は、それぞれ表-4.1と図-4.3(a)に示す。図-4.3(b)は、供試体部材を梁で、継手部の挙動を回転バネでモデル化したときの梁バネモデルである。

連続体とした場合のひずみ分布

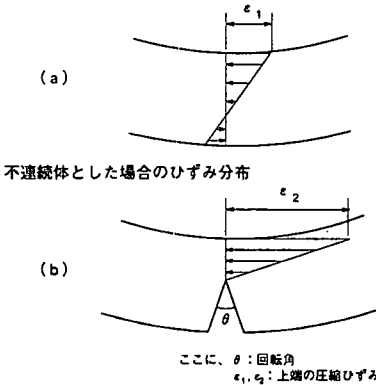


図-4.2 継手部における回転角

表-4.1 解析ケース

桁高 h (m)	荷重 P (tf)	中立軸 x (m)	x/h
0.1	0.117	0.08	0.8
	0.183	0.04	0.4
	0.217	0.02	0.2
0.2	0.233	0.16	0.8
	0.367	0.08	0.4
	0.433	0.04	0.2
0.4	0.467	0.32	0.8
	0.733	0.16	0.4
	0.867	0.08	0.2

継手部の回転角 θ は、梁バネモデルにおける変位量が F E M モデルにおける変位量と同じになるときの、回転バネ定数 K_θ と継手部における曲げモーメント M より、 $\theta = M/K_\theta$ として算定した。

その結果、継手部を連続体とした場合の圧縮縁ひずみ ϵ_1 (図-4.2(a)参照) と不連続体とした場合の圧縮縁ひずみ ϵ_2 (図-4.2(b)参照) の差 ($\Delta \epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1$) と θ の間に図-4.4 に示すような関係があることが分かった。この関係は、桁高を 0.1m ~ 0.4m まで変化させてもほぼ同様の傾向を示しており、またポアソン比を 0.2 ~ 0.3 に変化させても同様の結果となった。したがって、 $\Delta \epsilon$ と回転角 θ の間には、以下のような関係式が成立すると考えることができる。

$$\theta = \alpha \cdot \Delta \epsilon \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 $\Delta \epsilon$: 継手部の目開きによる圧縮縁のひずみ増分
 α : θ と $\Delta \epsilon$ の関係を表す定数。 $\alpha = 2.7 \text{ (rad)}$

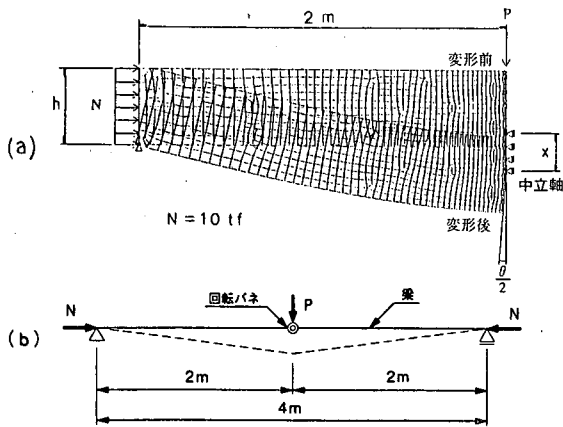


図-4.3 数値実験の解析モデルと変形図

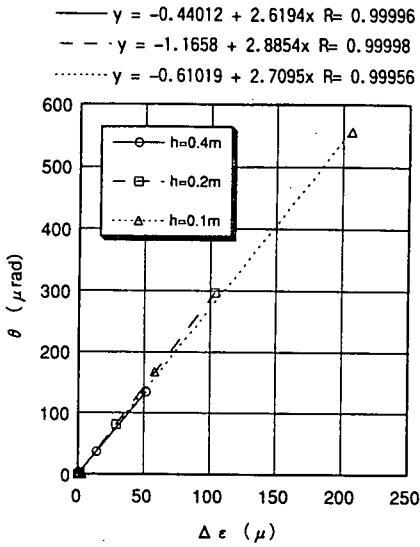


図-4.4 $\Delta \epsilon$ と θ の関係

4.3 回転バネ定数 K_θ の算定

上で得られたような関係を用いて回転バネ定数 K_θ を求めると、次式が得られる。

$$\Delta \epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1 = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot b \cdot E \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{M}{N} \right)} - \frac{6 \cdot M + N \cdot h}{b \cdot E \cdot h^2} \quad \dots \dots (2)$$

$$K_\theta = \frac{dM}{d\theta} = \frac{1}{\frac{2 \cdot \alpha}{3 \cdot b \cdot E \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{M}{N} \right)^2} - \frac{6 \cdot \alpha}{b \cdot E \cdot h^2}} \quad \dots \dots (3)$$

ここに、 K_θ : 回転バネ定数 (tf・m/rad)
 N : 継手面に作用する軸力 (tf)
 M : 継手面に作用する曲げモーメント (tf・m)
 E : 換算弾性係数 (tf/m²)。コンクリートと鋼材の断面比より換算。
 b : ライナーの全幅 (m)

式(3)は継手部に目開きが生じた状態を前提として誘導されているため、 $M/N \geq h/6$ の状態でしか成立しない。 $M/N = h/6$ となったとき、すなわち継手部に目開きが生じる限界の状態では、式(3)によれば $K_\theta = \infty$ となり、継手部に目開きが生じないときは連続体と同様の剛性となることを示している。したがって、 $M/N < h/6$ の状態では、常に K_θ を ∞ としてよい。

4.4 継手曲げ試験結果との比較

図-4.5に継手曲げ試験をモデル化した解析モデル図を示す。この解析モデルを用いて、継手曲げ試験の実験値と解析値を比較検討した。このとき、実験においては継手部が完全に接触している状態ではなかった

ため、式(3)を式(4)のように拡張して K_θ を算出している。

$$K_\theta = \frac{dM}{d\theta} = \frac{1}{\frac{2 \cdot \alpha}{3 \cdot b' \cdot E' \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{M}{N}\right)^2} - \frac{6 \cdot \alpha}{b \cdot E \cdot h^2}} \dots (4)$$

ここに、 b' : 継手面の接触幅 (m)

E' : 換算弾性係数 (tf/m²)。継手の接触部におけるコンクリートと鋼材の断面積より換算。

なお式(4)をみても分かるとおり、 K_θ は継手部に発生する断面力により変化するため、荷重増分法により各ステップごとに K_θ の値を変えて解析している。この結果、載荷重 P と継手位置におけるたわみ量 δ の関係を求めたところ、図-4.6に示すように実験値に近い傾向を示しており、式(4)により算出した回転バネ定数が妥当であることが分かる。

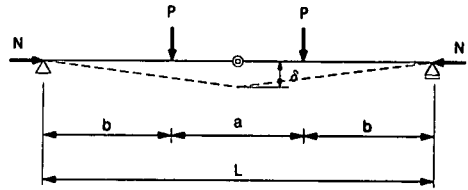


図-4.5 解析モデル図

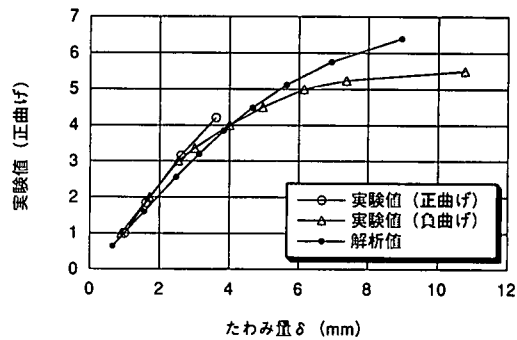


図-4.6 解析結果と継手曲げ試験結果の比較

5. まとめ

今回の実験および数値解析を通じて、ハイブリッドライナーを設計する上での問題点について、その力学的挙動を明らかにし、さらに妥当な設計手法を提案することができた。

その成果をまとめると以下のとおりである。

- ①曲げモーメントの増大に伴い、引張側では主桁と中詰めコンクリートの付着が切れていると思われるが、中立軸より圧縮側については鋼枠とコンクリートのひずみ分布はほぼ同じである。
- ②上の仮定に基づいて主桁の許容曲げモーメントを算出すると、実験により計測された許容曲げモーメントと良い一致をみた。
- ③スキンプレートが圧縮縁にある時は、スキンプレート厚の25倍の幅だけを有効とし、スキンプレートが引張縁にある時は、全幅の80%を有効としてよい。
- ④継手部の回転バネ定数は、継手部の断面力により変化し、軸力の偏心位置が核外となる場合は、回転バネ定数を式(4)により算出することができる。このとき、ここで算出している回転バネ定数は $M \sim \theta$ 関係の接線勾配であるため、荷重増分法によりステップごとに K_θ を変化させながら解析した。

今後は、ハイブリッドライナーを用いた実施工現場で十分な計測を行うことにより、ライナーの挙動、作用荷重、組立時の挙動等についても検討を加え、設計手法をより充実させるべきと考えている。さらに、ライナーの施工性についても十分に検討し、より施工性の優れたライナーを開発していく所存である。

また、今回のハイブリッドライナー載荷実験とその挙動特性の研究は、石川島建材工業（株）との共同研究として実施したものである。

参考文献

- *1) 梶 修・西田 義則・大川 孝・栄 毅熾：ハイブリッドライナー（TBM用新型ライナー）の開発，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集6，pp646～647，1996.9.
- *2) BAZANT,Z.P.,OH,B.H.：Crack Band Theory for Fracture of Concrete,Mater. Struct. RILEM, Paris, France,16, pp.155-177, 1983