

NATM 鉄筋支保工の基礎的実験

Foundamental Experiments of Lattice Girder Arch Supports on NATM

武井 正孝*
Masataka Takei

伊藤 忠彦*
Tadahiko Ito

村井 重雄**
Shigeo Murai

熊谷 健洋***
Takehiro Kumagae

西 保****
Tamotsu Nishi

寺本 勝三*****
Syozo Teramoto

要 約

本報文は、現在開発中の NATM 鉄筋支保工に関する基礎的実験についての報告である。

本鉄筋支保工は、3本の軸方向鉄筋が、螺旋状に巻かれた鉄筋によって組立られたものである。このような鉄筋支保工の力学特性などを明らかにするために、支保工単体およびそれにコンクリートを打設して作成した RC 部材の曲げ実験および解析を行った。

単体の曲げ実験の結果、本鉄筋支保工は H 鋼に比べて曲げ剛性・曲げ耐力は小さいものの、変形能力は大きいことがわかった。また、補強により曲げ剛性・曲げ耐力も調節できることが明らかとなった。

RC 部材の曲げ実験およびその解析の結果、吹付けコンクリート施工後の鉄筋支保工は、曲げと軸力が作用する RC 部材で十分モデル化できることが確認された。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 鉄筋支保工の形状
- §3. 単体曲げ実験および解析
- §4. RC 支保部材曲げ実験および解析
- §5. まとめと今後の課題

§1. はじめに

一般に NATM における鋼製支保工は、ロックボルトや吹付けコンクリートとの一体性を保持し、内圧効果を期待して採用されることが多い。この場合、鋼製支保工

は支保部材の主要な部分として位置付けられるため、H 鋼等の断面係数の大きなものが用いられている。これを鉄筋支保工で代替することができれば、部材の軽量化が図れるとともに経済的にも優れたものとなる。さらに鉄筋支保工は、H 鋼による支保工に比べて、施工性、地山との密着性、吹付けコンクリートとの一体性が良いなど多くの長所を有している。しかしながら、鉄筋支保工の力学的特性についてはまだ十分に明らかにされていないため、日本では実施工例が少ないのが現状である。

本報文は、現在開発中の NATM 鉄筋支保工に関する基礎的実験についての報告である。まず、支保工単体の曲げ実験およびその解析を行い、力学特性および破壊過程について検討した。次に、単体にコンクリートを打設して作成した RC 部材の曲げ実験およびその解析を行い、RC 部材としての挙動の確認を行った。

*技術研究所土木技術課

**土木設計部設計課

***技術研究所先端技術研究課

****技術研究所土木技術課長

*****土木設計部副部長

§ 2. 鉄筋支保工の形状

鉄筋支保工の断面形状を Fig. 1 に示す。本支保工は、3本の軸方向鉄筋（以後主筋と呼ぶ）が、螺旋状に巻かれた鉄筋（以後螺旋筋と呼ぶ）によって組立てられたものである。主筋および螺旋筋は丸鋼（SR295）であり、各々の接点は溶接接合されている。また、螺旋筋の形状は円形と三角形の2通りである。なお、図中の破線は、試験体を補強する場合の補強筋の位置を示している。この補強方法は、短い丸鋼棒（ $\phi 10$ ）を、図に示した位置に、螺旋の巻き方向と逆の方向に溶接で取付けるというものであり、このような補強が効果的であることは事前解析により確認されている。

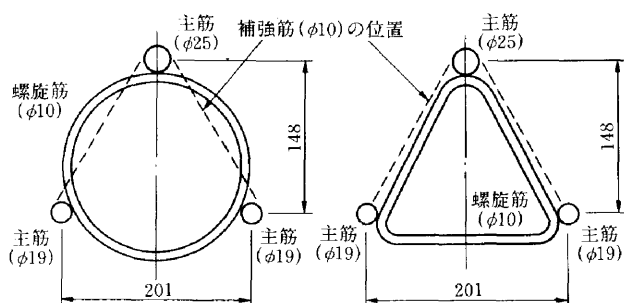


Fig.1 鉄筋支保工の断面形状

Photo 1, 2 に試験体の写真を示す。実際の鉄筋支保工の構造・形状はアーチ状であるが、試験体は断面性能を求めることを主目的とするために直線部材とした。

Table 1 に引張試験により求めた丸鋼の降伏点とヤング率を示す。

§ 3. 単体曲げ実験および解析

3-1 実験方法

Fig. 2 に曲げ実験の載荷方法を示す。曲げ実験はスパン1800mmの中央1点載荷で行った。加力はアクチュエータ（油圧ジャッキ：10tf（98kN）レンジ）で行い、載荷速度は0.3mm/secとした。また、下筋の軸方向拘束を避けるために、4つの支点はそれぞれ独立のローラー支承とし、支点近傍の下筋には補強材を当てて、局所的な破壊を防ぐようにした。

実験パラメータは、①螺旋ピッチ、②螺旋形状、③補強程度の3つとした。補強程度については、先に述べた方法で各ピッチを全て補強した場合（全体補強）と2ピッチおきに補強した場合（部分補強）の2通りとした。

Table 2 に実験一覧表を示す。

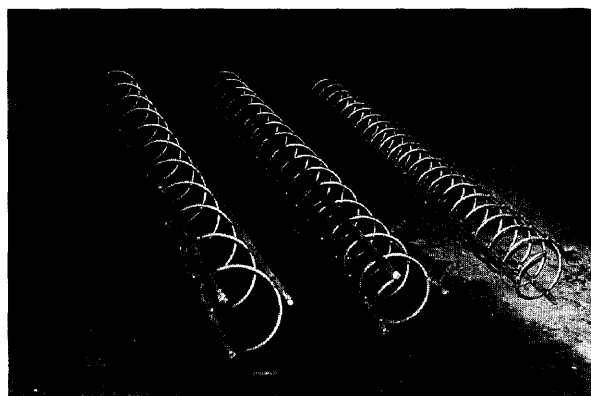


Photo 1 試験体形状(円形螺旋筋)

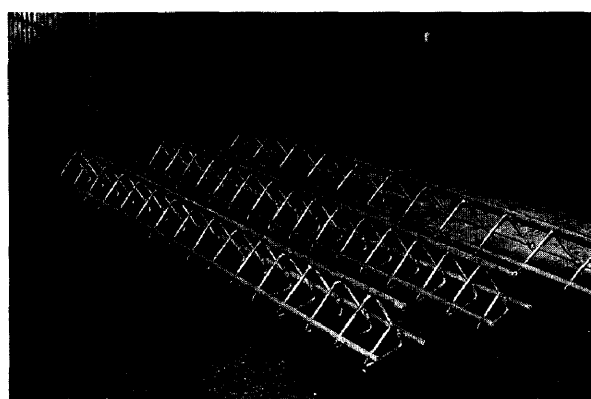


Photo 2 試験体形状(三角形螺旋筋)

Table 1 鉄筋の降伏点とヤング率

	降伏点 (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)
φ10	3011	1.98×10^6
φ19	3041	1.96×10^6
φ25	3044	2.00×10^6

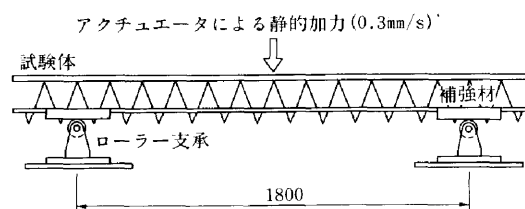


Fig.2 載荷方法

3-2 実験結果

(1) 曲げ剛性, 曲げ耐力

Table 2 には、曲げ剛性 EI と曲げ耐力 M_u の実験値を示している。螺旋ピッチが小さいほど、また補強が多いほど、 EI および M_u は大きくなっている。螺旋形状で比較すると、 EI は三角形の方が大きいものの、 M_u については円形の方が大きい。実験のモーメント-たわみ曲線を Fig. 3 に示す。T150などのように補強のない試験

Table 2 実験一覧表

試験名	螺旋筋		補強	鋼材量(kg/m)			EI ($10^3\text{tf}\cdot\text{cm}^2$)			M_u ($\text{tf}\cdot\text{m}$)
	形状	ピッチ(mm)		主筋	組立筋*	計	実験値	解析値	実／解	
C100	円形	100	なし	8.31	3.85	12.2	39.2	31.2	1.25	0.465
C150		150			2.61	10.9	33.2	25.3	1.31	0.380
C225		225			1.80	10.1	25.5	20.3	1.25	0.308
T150	三角形	150			2.82	11.1	37.0	32.9	1.12	0.349
T225		225			1.93	10.3	28.3	25.8	1.09	0.302
C150RA	円形	150	全体	8.31	4.25	12.6	191	182	1.05	1.190
T150RP	三角形		部分		3.37	11.7	106	115	0.92	0.814
T150RA			全体		4.46	12.8	418	506	0.82	1.864

*螺旋筋と補強筋の鋼材量

体の EI および M_u は小さいものの、変形能力は大きい。一方、T150RA などのように補強の多い試験体では、 EI および M_u は大きい変形能力が小さく、降伏後の耐力低下が大きい。図中には、H鋼(H100)のたわみ曲線(理論値)も併せて示している。T150RA と H鋼の M_u はほぼ同じである。

Fig. 4 に吸収エネルギーと鋼材量 (Table 2 参照) の関係を示す。吸収エネルギーは、たわみ50mmまでの荷重-たわみ曲線下の面積として求めたものであり、試験

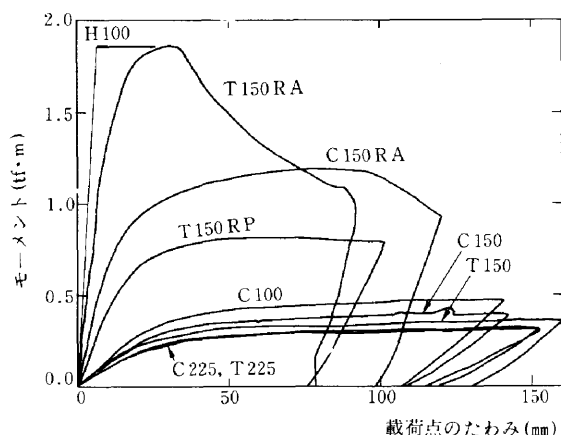


Fig.3 モーメント-たわみ曲線(実験)

体が荷重されたときのエネルギー吸収能力の指標にしようとしたものである。吸収エネルギーは、鋼材量が増加すると大きくなっているが、その増加の割合は、螺旋筋のピッチを小さくした場合よりも、補強筋を配置した場合の方がかなり大きい。すなわち、補強筋を配置した方がより経済的に吸収エネルギーを大きくできることになる。

(2) 変形性状, 破壊性状

Photo 3 に試験終了時の試験体の状況を示す。試験体は、荷重により荷重点で折れ曲ってほぼ V 字形に変形し

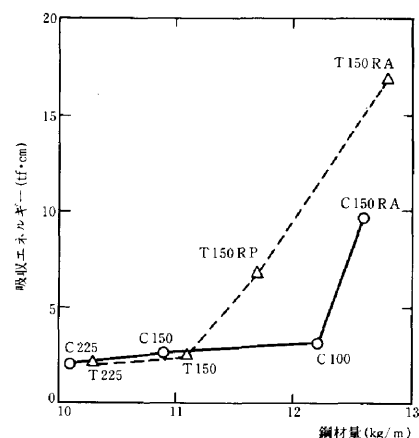


Fig.4 吸収エネルギーと鋼材量の関係

た。また、全ケースとも溶接部では破壊しなかった。

Fig. 5 は主筋のひずみとモーメントの関係である。曲げによる圧縮・引張ひずみが各主筋それぞれに生じていることがわかる。このことから無補強の試験体では、トラスのような一体化した変形をせず、各主筋が重ねばりのようにそれぞれに曲っているものと考えられる。

Fig. 6 は荷重点直下の螺旋筋応力とモーメントの関係である。各応力は螺旋筋の内側と外側で計測したひずみから求めた。無補強の場合 (C150, T150) は曲げ応力が大きくなるものの、軸応力は小さい。一方、補強のある場合 (T150RA) は曲げ応力は極めて小さくなり、軸応力の方は大きくなっている。このことから補強のある場合はトラス構造に近くなるため、 EI および M_u が大きくなったと考えられる。

3-3 解析結果

各ケースについて、3次元骨組構造物解析(弾性解析)を行った。Fig. 7 に解析モデルを示す。

Table 2 には EI の解析値を示している。円形螺旋の場合、螺旋筋を折線近似してモデル化しているために、特に補強のないケースでは実験と解析の結果にややずれがある。

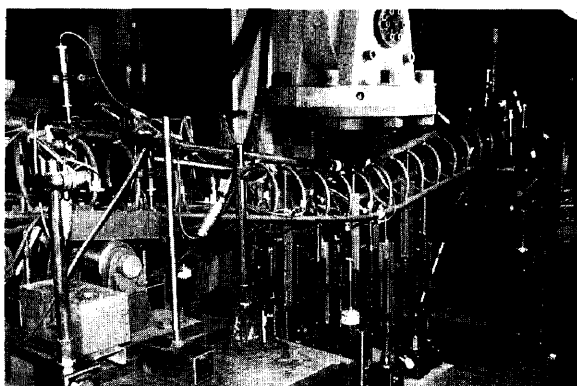


Photo 3 試験体状況(単体曲げ実験終了時)

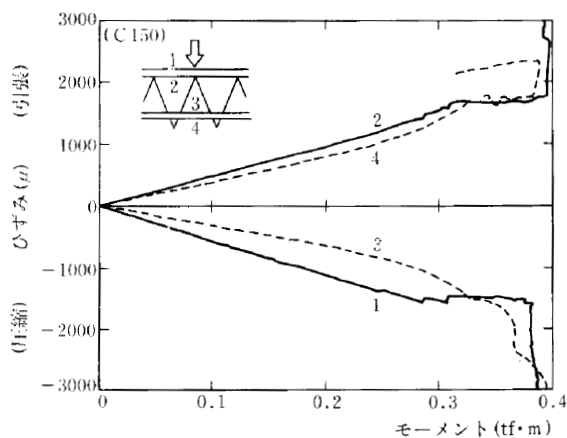


Fig.5 主筋のひずみとモーメントの関係

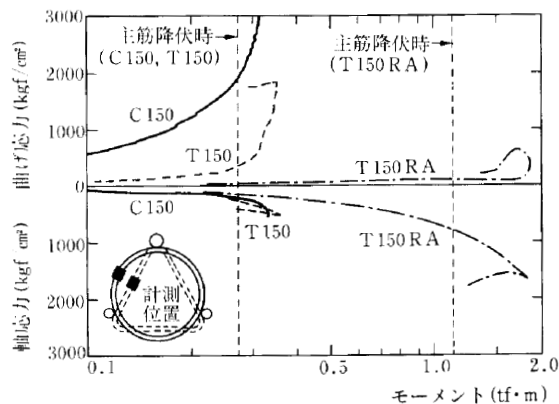


Fig.6 螺旋筋応力とモーメントの関係

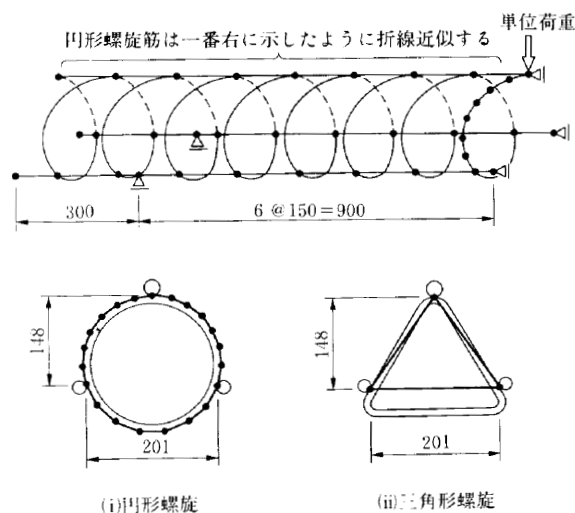


Fig.7 解析モデル(単体)

Fig. 8 に解析により得られたモーメントーたわみ曲線の一例を示す。T150RA の EI が実験より大きいのは、解析モデルが 3 次元トラスになっているためである。また解析の結果、螺旋筋の降伏が主筋の降伏より先行し、

主筋は図中の○点で降伏し（応力が $3,000 \text{ kgf/cm}^2$ (294 MPa) に達した。したがって、全体剛性に影響を与えるものは主筋の降伏の方であると考えられる。

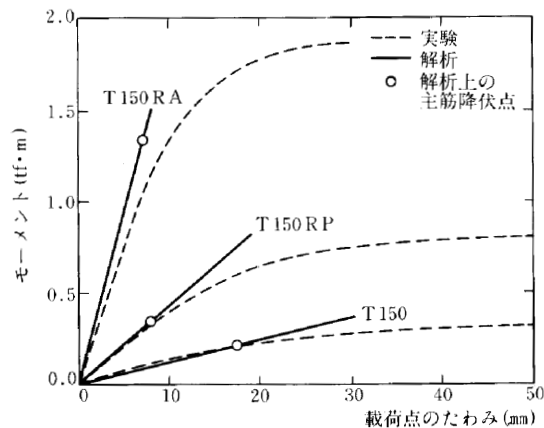


Fig.8 モーメントーたわみ曲線(解析)

§ 4 . RC 支保部材曲げ実験および解析

4-1 実験方法

RC はり供試体は、単体試験体の C150 (円形螺旋、ピッチ 150 mm 、補強なし) にコンクリートを打設して作成したものである。供試体の断面を Fig. 9 に示す。載荷方法はスパン 270 cm の三等分点一方向載荷とした。せん断スパン比が大きい ($a/d=6.0$) ため曲げ破壊が先行する形式ではあるが、せん断区間には土木学会 RC 示方書に基づいて最小スターラップ量を配置した。本実験に使用したコンクリート配合を Table 3 に、材料強度を Table 4 に示す。供試体は実験時まで湿布養生し、載荷速度 0.2 mm/min の変位制御で部材角約 $1/30$ まで載荷を行った。

Photo 4 に実験状況を示す。

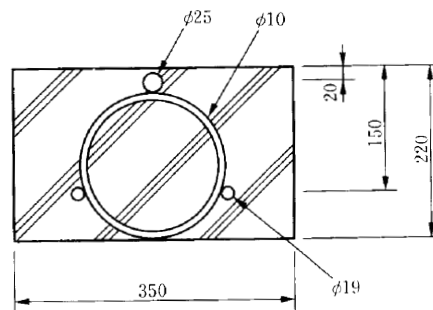


Fig.9 RC 供試体断面寸法

4-2 実験結果

Fig. 10 に実験終了時のひびわれ図を示す。せん断区

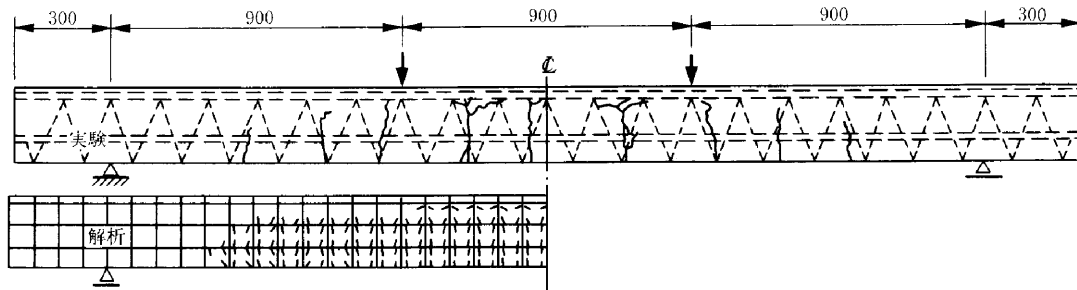


Fig.10 ひびわれ図

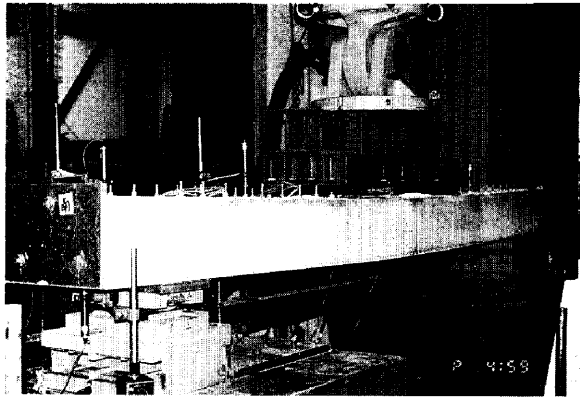


Photo 4 実験状況 (RC支保部材曲げ実験)

Table 3 コンクリート配合

G_{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スラブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	AE減水剤		
20	56.0	50.1	175	313	895	904	0.782	18.5	3.3

Table 4 コンクリートの材料強度 (材令28日)

圧縮強度 (kgf/cm ²)	323
引張強度 (kgf/cm ²)	27.4
ヤング率 (kgf/cm ²)	2.04×10^5

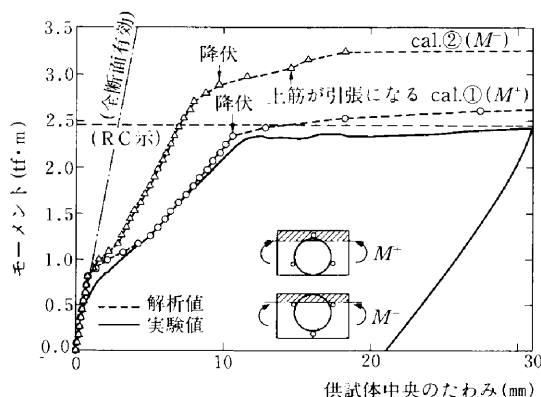


Fig.11 モーメント-たわみ曲線

間に斜め引張りひびわれの進展は見られず、典型的な曲げ引張り破壊となった。鉄筋は丸鋼を使用しているため、ひびわれ間隔は大きい。後述する解析結果と比較すると、ひびわれ発生範囲はよく一致している。また、引張り鉄筋降伏後は、ひびわれが圧縮筋に沿うように進展した。Fig. 11 にモーメント-たわみ曲線を示す。図中には、全断面有効の場合の剛性および RC 示方書による終局強度も示している。終局強度と比較しても RC 部材として妥当な挙動を示したといえる。

4-3 RC 支保部材の FEM 解析

トンネルの設計においては、従来からの標準パターンによる経験的手法から FEM 等による解析的手法を積極的に利用しようとする傾向が高まりつつあり、これは数値解析手法が任意のトンネル断面形状を扱え、地盤の非線形性や異方性も考慮できるようになったためである。数値解析手法による設計の場合、施工される支保効果の定量的評価が極めて重要になるため、鉄筋支保工の RC 部材としての挙動を把握しておく必要がある。

(1) 実験の解析

解析は 4 節点アイソパラメトリック要素を用いた 2 次元非線形 FEM 解析で行った。コンクリートの 2 軸応力状態における破壊条件は Kupfer 則により、破壊後の残留剛性および残留応力は、圧縮・引張ともに 1/100 とした。鉄筋は Bi-Linear モデルとし、降伏後の残留剛性は 1/100 とした。解析モデルを Fig. 12 に示す。鉄筋はトラス要素 (線材) で考慮し、螺旋筋およびスターラップは近似的に鉛直材に置き換えてモデル化した。

解析結果は Fig. 11 (cal.①) に示している。初期ひびわれの発生荷重が実験値より大きい。RC 部材としての剛性や降伏点荷重および降伏点変位等の終局状態付近までの挙動は、よく一致していると思われる。また、実験でのひびわれが早期に発生したのは、螺旋筋下端でのかぶりが無いため、ひびわれが誘発されたためと推測される。

解析値 cal.②は本解析モデルを用いて、逆方向の荷重

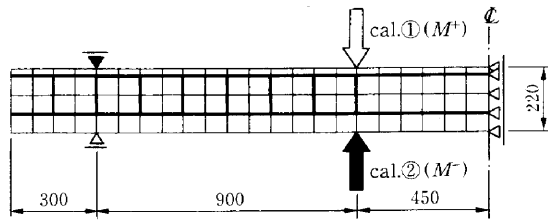


Fig.12 解析モデル (RC 供試体)

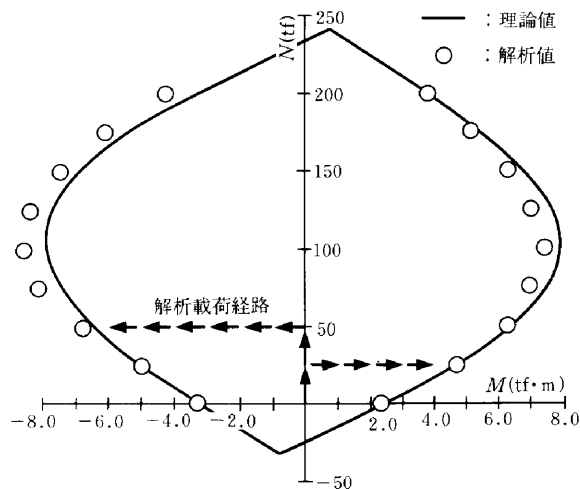


Fig.13 M-N インターラクション

を作用させた場合の解析結果である。cal.①と比べ、ひびわれ発生後に引張り鉄筋がすぐ効果を発揮するため、全断面有効から RC 断面への移行が早く現れる。また、RC 示方書の終局状態では中立軸が上筋のかぶり部分に入り上筋も引張となるが、cal.②の解析結果でも下筋 ($\phi 25$) の降伏後に上筋 ($\phi 19$) が圧縮から引張に移行し、この状態をよく再現しているものと思われる。

(2) 軸力が作用した場合の解析

トンネルの支保工は上記のような単純曲げが作用するのではなく、軸力と曲げが作用する部材である。そこで、支保工軸力と曲げモーメントの関係を考察するため、本解析モデルにより軸力をパラメータとした解析を行った。解析上、軸力は初めの数ステージで作用させ、その後荷重増分により解析した。Fig.13 に解析結果を示す。インターラクションカーブの理論値と解析値は比較的良好に一致しており、軸力作用下においても本解析モデルで部材の挙動を解析的に求めることが可能と思われる。

§ 5. まとめと今後の課題

5-1 実験および解析結果のまとめ

(1) 単体

①螺旋状の組立筋を持つ鉄筋支保工単体の曲げ剛性、耐力が明らかになった。

②本鉄筋支保工は、補強することによって剛性と耐力の調節が可能である。

(2) RC 支保部材

①吹付けコンクリート施工後の鉄筋支保工は、曲げと軸力が作用する RC 部材として十分モデル化できる。

②一般に解析的手法でトンネルの設計を行う場合、支保材は曲げと軸力が考慮できる「線形はり要素」でモデル化される¹⁾が、鉄筋支保工では RC 部材として非線形性を考慮したモデル化が必要であると思われる。

5-2 今後の課題

本鉄筋支保工を実用化していくためには、施工への適用性に関する具体的な検討が必要であると思われる。検討が必要と考えられる事項を以下に示す。

- ・単体の軸力作用下での力学的特性
- ・単体の継手部の構造
- ・曲線部材の製作方法
- ・実施工適用下での外力を想定した荷重試験によるアーチ形状の支保工の挙動
- ・施工性 (支保工の建込み方法等)
- ・本支保工の適用可能地山
- ・実施工適用下において支保工に生ずる応力
- ・施工費用

今後は、本鉄筋支保工の試験施工を行い、上記事項等の検討を行う予定である。

謝辞 本実験を行うに際し、御協力いただいた関係各位に心より感謝致します。

参考文献

- 1) 土木学会編：トンネルにおける調査・計測の評価と利用，1987。
- 2) 武井・伊藤・寺本・村井：NATM 鉄筋支保工の基礎的実験(その1)―螺旋状の組立筋を持つ支保工単体の曲げ実験―，土木学会第46回年次学術講演会，第VI部，pp.160-161，1991。
- 3) 伊藤・武井・熊谷・西：NATM 鉄筋支保工の基礎的実験(その2)―RC 部材としての曲げ実験と解析―，土木学会第46回年次学術講演会，第VI部，pp.162-163，1991。