

トンネル覆工の力学的特性に関する考察

Consideration of Mechanical Characteristic for Tunnel Lining

砂金 伸治¹⁾, 真下 英人²⁾

Nobuharu ISAGO, and Hideto MASHIMO

Tunnel lining is designed and constructed mainly based on the past experience. Considering mechanical characteristic and the introduction of new materials to lining lead to a proper structure, and it can reduce the cost of construction. In this study, full-scale loading experiment for tunnel lining was carried out to achieve the upper purposes, and the analysis was done on the basis of the results. The following results were acquired: (1) the cracks were dispersed in the forecasting area in the lining with SFRC, (2) in analysis, the bending moment decreased considering the influence of crack in lining, while the axial force was nearly constant in the same load.

Keywords: tunnel, lining, loading experiment, steel fiber reinforced concrete, crack

1. はじめに

道路トンネルの建設箇所の増加と大断面化・扁平断面化が徐々に進みつつあり、トンネル建設におけるコスト縮減は早急に取り組むべき課題となっている。その中で既往のトンネル覆工は、供用性に関する機能や、不明確な外的条件に対する安全性の付与や特殊条件下での外力支持に挙げられる種々の力学的な機能を持ちあわせながら、主として過去の実績に基づき設計や施工が行われている。そのため、覆工の力学的な特性を明らかにし、あわせて強度の高いもしくは鋼繊維で補強したコンクリートといった新たな材料を覆工に導入することにより、薄肉化を図った一層適切な覆工構造の提案ができ、コストの縮減を図ることが可能であると考えられる。

そこで本研究ではトンネル覆工の設計手法を確立するために、覆工の力学的な特性を把握することを目的として載荷実験を実施した。また、実験結果に基づきフレーム解析を行い、ひび割れを考慮した場合の覆工の特性を検討した。

2. 実験方法

(1) 供試体諸元

実験は図-1 に示すような覆工を模擬した半円形のコンクリート供試体を作成し、それにトンネル中心方向に載荷することとした。実験に使用した2体の供試体の諸元を表-1 に示す。各ケースのうち、ケース①の諸元を道路トンネル技術基準に基づいたものとし、供試体の材料にプレーンコンクリートを使用した。

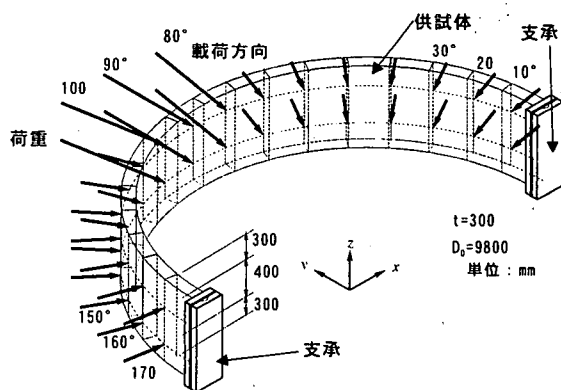


図-1 覆工供試体の概要図

1) 正会員 修士(工学) 建設省土木研究所

2) 正会員 博士(工学) 建設省土木研究所

またケース②は鋼繊維による補強効果の把握を目的とし、既往の実績等を踏まえ、表-1 に示す量の鋼繊維を混入した供試体を使用した。また、実験に当たっては供試体の強度の管理を行い、目標とした強度に概ね達した時点で実験を実施した。

(2) 供試体の作成および設置

供試体のコンクリート打設および養生については、レディミクストコンクリートをポンプ車により打設し、ケース②では、鋼繊維を現場にて打設前にミキサー車に投入して混合した。打設後は表面の乾燥を防ぐために養生シートで養生し、脱型

は材令7日以上とした。供試体の設置は覆工の軸方向が鉛直方向と平行になる向きで設置し、供試体下部にはテフロン板およびテフロンシートで摩擦を除去した支承を配置し、覆工アーチ支点は回転のみを自由とする支承を配置して拘束した。

(3) 載荷方法および計測項目

載荷は図-1 に示す座標系で 10° ピッチの 17 断面で、供試体の下部より 30cm と 70cm にジャッキの中心部が配置されるように 1 断面に 2 本のジャッキを設置し、供試体の破壊に達するまで載荷を行った。荷重パターンは 20kN/本の荷重を全ジャッキより作用させた後、 $80\sim 100^\circ$ 部分のジャッキのみで載荷を継続し、残りはジャッキのバルブを閉めることによりジャッキ自体を地盤反力ばねに模擬した。またジャッキの荷重を面載荷の状態に近づけるために幅 200mm、厚さ 30mm の鋼板を供試体とジャッキの間に挟んだ後に載荷した。

本実験では載荷荷重、ジャッキ反力、ジャッキストローク、供試体の変位、ひずみ、およびひび割れの発生状況を観察・計測した。

3. 実験結果

(1) 変位

図-2 に載荷荷重と天端変位の関係を示す。ケース①では 80kN/本程度で第 1 のひび割れが発生した。また 360~370kN/本で傾きが変化し、390kN/本で天端変位が 36mm 程度に達した後、荷重一定のままで変位は増加し、約 40mm の時に圧縮破壊に至った。ケース②では 60kN/本程度で第 1 のひび割れが発生した。また 300kN/本程度で曲線の傾きが変化し、330kN/本に達した付近で変位が 35mm となった。その後、変位が止まらなくなったが、変位の増加する速度が小さくなってきたため、変位が 40mm 強で載荷

を再開させたが、335kN/本に増加させた瞬間に供試体は破壊した。傾きが変わる付近を含めて考えると若干ではあるが鋼繊維補強コンクリートであるケース②の変位は荷重の変化に対して緩やかに増加する傾向があった。なお、ジャッキの荷重が 100kN/本の場合で、天端付近では約 117kN/m^2 (1.17kgf/cm^2) の外圧が作用

表-1 実験に使用した供試体の仕様

使用材料(コンクリート)	プレーン	鋼繊維補強
実験ケース番号	①	②
厚さ t (mm)	300	300
外径 D_o (mm)	9800	9800
目標とした 28 日強度 (N/mm^2)	18	18
スランプ (cm)	12	12 (混入前 18)
粗骨材最大寸法 G_{max} (mm)	40	20
鋼繊維混入率 (%)	—	0.5
鋼繊維直径 (mm)	—	0.8
鋼繊維長さ (mm)	—	60
実験実施時の 管理 供試体の 強度 試験結果 (強度: N/mm^2)	材齢 (日)	材齢 (日)
	平均一軸圧縮強度	平均一軸圧縮強度
	平均曲げ強度	平均曲げ強度
	平均曲げタフネス	平均曲げタフネス
	16	21
	26.29	19.86
	—	3.88
	—	3.61

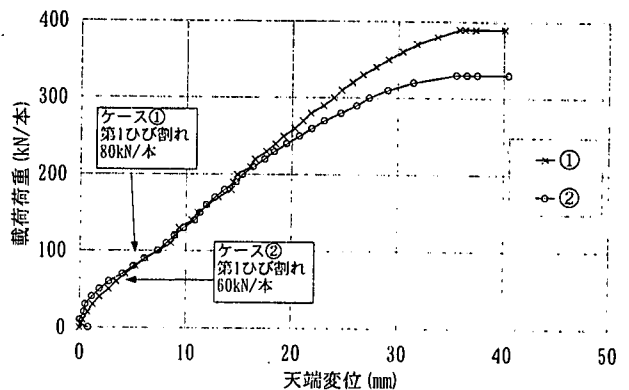


図-2 実験の荷重-変位曲線

している場合とほぼ同一と考えられる。

(2) 変形モード

図-3 にケース①で荷重が 200kN/本の場合における引張断面を無視した場合の構造物全体の曲げモーメント図を示す。これより 45° および 135° より脚部側に近い方では曲げがほぼ発生していなかった。また図-4 に同条件での軸力図を示す。これより軸力は天端付近およびひび割れの発生している近傍(第1のひび割れは 90° 付近, 第2のひび割れは 65° および 115° 付近)では脚部付近より若干大きく、ひび割れの発生に伴う計測の精度が問題と考えられるが、それ以外ではほぼ一定であった。

(3) ジャッキストロークと荷重の関係

供試体の変形に伴って発生するジャッキの反力とストロークの関係を測定し、ジャッキを地盤反力ばねと見なす場合の地盤反力係数を算定した。その結果、反力とジャッキストロークの関係は、それぞれの測定位置で傾向が異なり、ばらつきも大きい。荷重が 20~100kN/本程度の場合では平均して、50MN/m (5 万 kgf/cm) 程度、100kN/本以降では 100MN/m (10 万 kgf/cm) 程度の反力係数であった。

(4) ひずみ

ひずみの計測結果の一例として、図-5 にケース①、図-6 にケース②の場合における 95° の地点での荷重-ひずみ関係を示す。なお、図中は引張ひずみを正としている。両ケースとも外側では圧縮ひずみとなっている。ケース②の鋼繊維補強コンクリートの場合、供試体の破壊直前でひずみが緩やかに増加して破壊していることが分かる。また、内側のひずみについてはケース①および②とも引張ひずみが発生しているが、ケース②の場合は緩やかに増加した。鋼繊維補強コンクリートのケースでは引張ひずみが発生している他の計測箇所でも同様の傾向が見受けられる場合もあり、理由として微細なひび割れが発生していると考えられる。

(5) ひび割れ発生状況および供試体の破壊

図-7 (a) にケース①、図-7 (b) にケース②のひび割れの展開図を示す。なお図-7 中に示す荷重は最初にひび割れが発生した箇所とその荷重である。ケース①

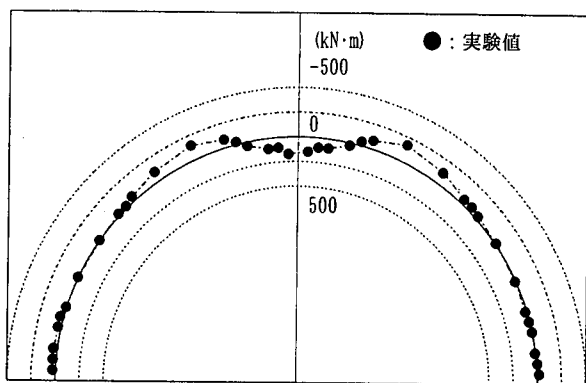


図-3 曲げモーメント図(ケース①, 200kN/本)

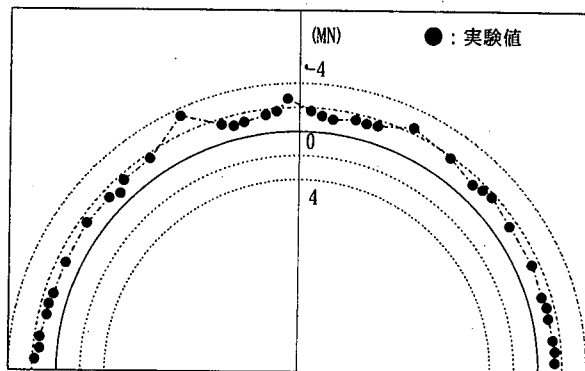


図-4 軸力図(ケース①, 200kN/本)

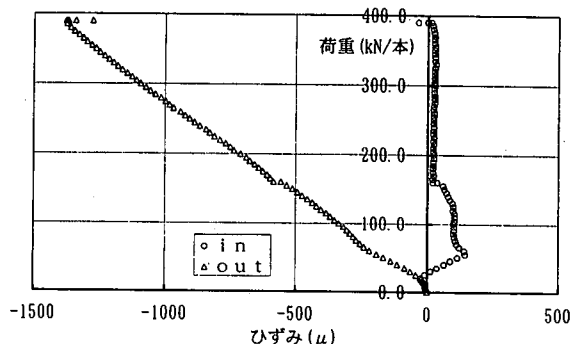


図-5 荷重-ひずみ関係(ケース①, 95°)

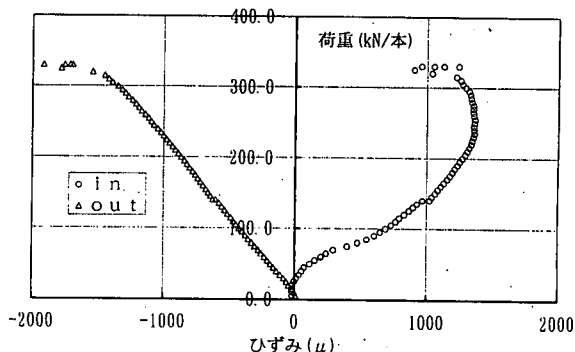


図-6 荷重-ひずみ関係(ケース②, 95°)

では、供試体の内面側の 90° 付近に最初に 80kN/本でひび割れを上下にわたって確認し；その場合で幅 0.15mm 程度であった。またそのひび割れは荷重が 160kN/本で、平均 0.5mm 程度、最大 1.5mm 程度の幅になり、また最後に計測した 260kN/本で、平均 1.2mm、最大 2.5mm 程度の幅であった。また、外面については 160kN/本で 62° と 67° に 2 本のひび割れ、および対称の位置である 115° 付近に上下にわたって発生した。

ケース②では、内面側の 90° において 60kN/本でひび割れが上下にわたって断続的にかすかに確認されたが、それ以降は 85~100° でひび割れの筋が多数発生しており、定量的なひび割れ幅の計測はできなかった。

外面では、240kN/本で 62~68° に 4 本のひび割れが上下にわたって発生した。

以上より、供試体の強度が異なるため、ひび割れの発生する荷重は異なるが、位置については最初にひび割れが確認されたのが内面側の 90° 付近、次に外面側の 65° (115°) 付近と、供試体の材料の種類等によらずほぼ同一であった。内面側のひび割れについては、ケース②では複数のひび割れが種々の方向に進展するが、ケース①では概ね 2~3 本のひび割れが上下に進展していた。また、ひび割れ幅についてはケース①では定量的な計測が可能だったが、ケース②で不可能だったため比較が困難だった。また、外面側のひび割れ幅についてはケース①とケース②では差が見受けられなかった。

また、本実験では供試体が破壊まで至った。ケース①では、110~120° 付近で覆工に斜めひび割れが急速に発達した後に急激に破壊し、それに伴い 80~90° 付近の外面側が圧縮破壊を起こし、60~70° 付近の内面側の順で破壊が進行した。ケース②では、破壊の発生した順番はケース①と同様であったが、110~120° 付近で覆工に斜めひび割れが緩やかに発達し、破壊自体も内側の覆工の剥落が見られた。しかし破壊後の最終状態は、剥落したコンクリート塊の大きさが鋼繊維を用いたケース②の方が小さくなっていた。

4. 覆工載荷実験の解析

(1) 解析方法

実験結果をもとにフレーム解析により、ケース①の実験結果の検証を行った。解析では覆工の材料は線形とし、ヤング率とポアソン比は供試体試験結果から得られた値を用い、それぞれ 20.2kN/mm²、0.20 とした。また、載荷ジャッキについては引張り方向を無視した地盤反力ばねと仮定し、地盤反力ばね定数はすべてのばね定数が同一の値をとるものとして解析を行った。さらに、ひび割れ発生後の挙動を検討するために、ひび割れ確認後に回転ばねを考慮し、実験結果と合致するように回転ばね定数を算定した。なお、ひび割れは実験結果より、第 1 のひび割れは 90° の位置に載荷荷重 70kN/本で、第 2 のひび割れは 65° および 115° の位置に載荷荷重 150kN/本で発生したと仮定し解析した。

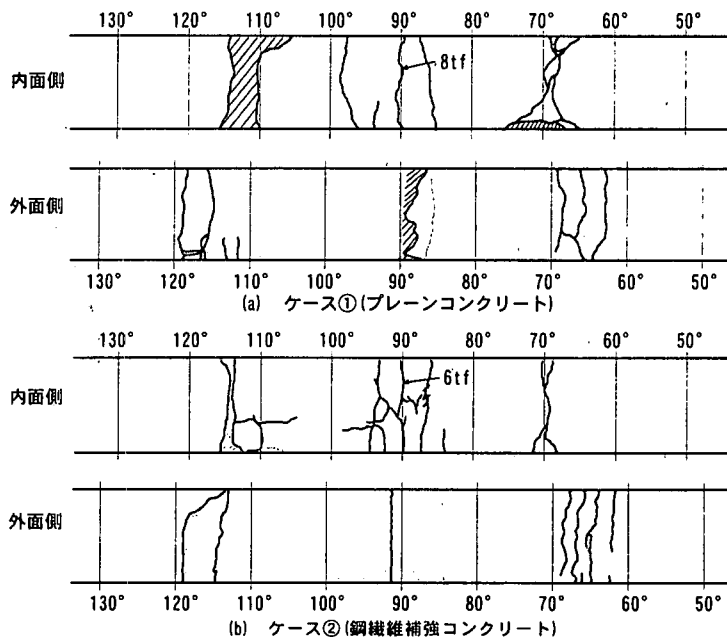


図-7 最終ひび割れ図(斜線部は剥落箇所)

(2) 解析結果

第 1 のひび割れが発生するまでの荷重が 30～70kN/本における半径方向の地盤反力ばね定数 K_x 毎の天端変位の変化を図-8 に示す。これより $K_x=50\text{MN/m}$ の解析結果と実験による天端変位の値が概ね一致した。また載荷荷重が 50kN/本における曲げモーメント図を図-9、軸力図を図-10 に示す。曲げモーメントは天端部分で解析値よりも実験値の方が若干小さい値となっているものの、 $K_x=50\text{MN/m}$ の場合で概ね実験値と一致したと考えられる。また軸力は脚部に近いほど解析値より実験値の方が小さいが、ばね定数の差による影響は小さかった。

次に $K_x=50\text{MN/m}$ において、第 1 のひび割れが発生した地点に回転ばねを考慮した場合の解析を行った。載荷荷重は 70～150kN/本とし、回転ばね定数 $K_{r1}=1\sim 50\text{MN} \cdot \text{m/rad}$ 、および無限大(すなわち回転ばねを考慮しない)の場合の天端変位および断面力を算定した。天端変位の変化を図-11 に示す。これより K_{r1} を 20～50 $\text{MN} \cdot \text{m/rad}$ 程度とした場合に実験値と解析値が概ね一致した。また載荷荷重が 150kN/本における曲げモーメント図を図-12 に示す。これより実験による曲げモーメントの値が解析結果よりも若干小さいが、 K_{r1} が 10～20 $\text{MN} \cdot \text{m/rad}$ 程度の場合に実験値と解析値が概ね一致した。以上より回転ばね定数 K_{r1} は 20 $\text{MN} \cdot \text{m/rad}$ 程度とした場合に実験を最も再現できると考えられる。しかし、回転ばね定数はひび割れの開口幅や覆工に作用している軸力により大きく影響を受けるためにさらに検討を要する。なお、軸力の変化については、 K_{r1} の値が小さい場合で解析値が実験値と比較的近づいたが、 K_{r1} の変化による軸力の差は小さく、またひび割れの発生地点付近では軸力値が大きくばらついており、実験結果と解析結果の比較を行うことは困難であった。

また、第 2 のひび割れの発生後、荷重が 150～300kN/本において、第 2 のひび割れに回転ばね(回転ばね定数= K_{r2})を配置して第 1 のひび割れと同様の検討を行ったが、変位や断面力の変化に K_{r2} の影響があまり現れない結果となった。本解析では実験条件での再現を目的としたため、 $K_x=50\text{MN/m}$ で解析を行っているが、今後は K_x を小さくした場合に K_{r2} の影響がどの程度になるかを確認する必要があると

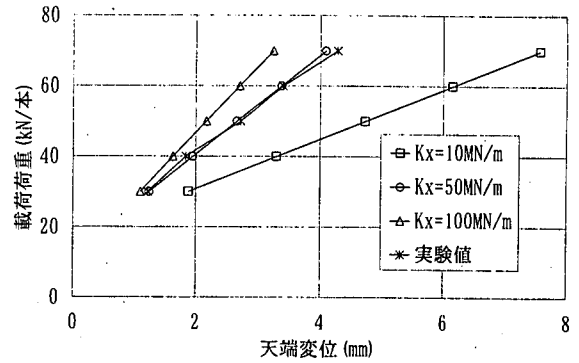


図-8 荷重-変位曲線(ひび割れ発生前)

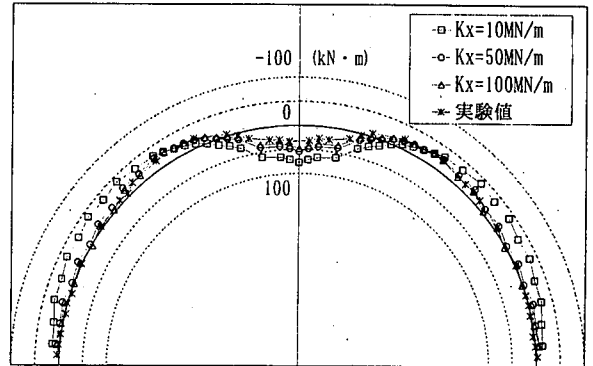


図-9 曲げモーメント図(50kN/本載荷時)

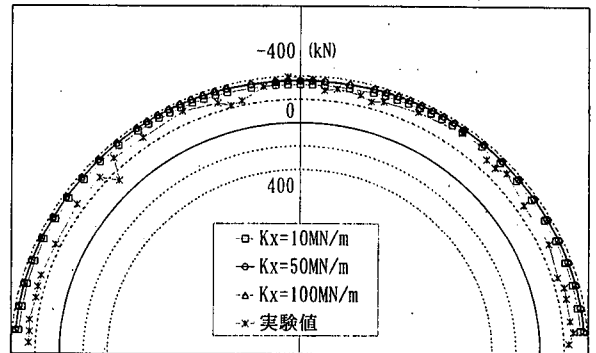


図-10 軸力図(50kN/本載荷時)

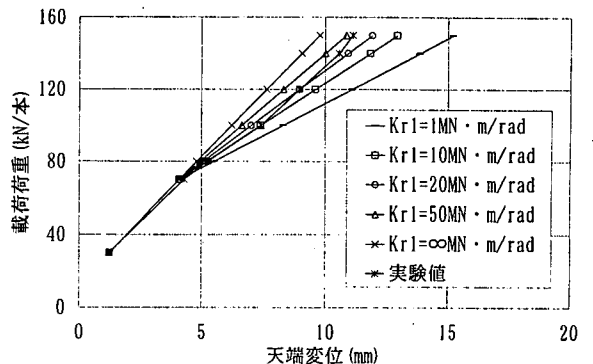


図-11 荷重-変位曲線(第1ひび割れ考慮)

考えられる。

以上を踏まえ、 $K_x=50\text{MN/m}$ 、 $Kr1=20\text{MN} \cdot \text{m/rad}$ 、 $Kr2=50\text{MN} \cdot \text{m/rad}$ として解析を行った場合の 85° の地点における軸力と曲げモーメントの変化の関係を図-13に示す。なお図-13中の凡例の(a)は K_x 、 $Kr1$ 、および $Kr2$ を考慮した場合、(b)は K_x および $Kr1$ を考慮した場合、さらに(c)は K_x のみを考慮した場合で、荷重は $50\sim 300\text{kN/本}$ について検討した。荷重が同一の場合、第1のひび割れ、すなわち $Kr1$ を考慮した(b)や(c)の場合は考慮しない(a)の場合に比較して軸力はほとんど変化しないが、曲げモーメントが低下する結果が得られた。これより構造系の変化を検討して設計することにより合理的な設計が可能になると考えられる。なお、実験値との比較を行ったが、実験値ではさらに曲げモーメントが低く、実験で使用した載荷板による拘束の影響があると考えられる。また、第2のひび割れ、つまり $Kr2$ を考慮した場合の結果が第1のひび割れのみを考慮した場合とほとんど変化しなかった。そのため載荷条件や軸力、また K_x 等による影響について検討する必要がある。

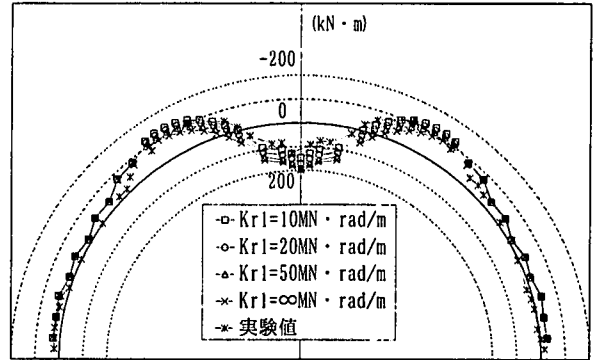


図-12 曲げモーメント図(第1ひび割れ考慮)

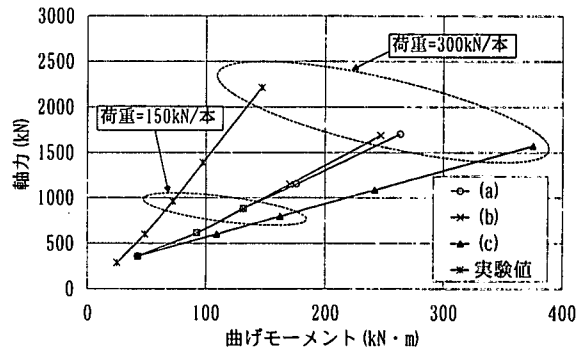


図-13 軸力-曲げモーメント変化図(85°)

5. まとめと今後の課題

本検討では覆工にプレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリートを用いた場合の実験およびその解析を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 鋼繊維補強コンクリートの供試体ではひび割れが発生すると予測された領域に分散して発生していたのに対し、プレーンコンクリートではひび割れがある程度集中して成長した。
- (2) 鋼繊維補強コンクリートの供試体では破壊直前でひずみの変化が緩やかになるとともに、破壊後の剥落したコンクリート塊の大きさから判断して、鋼繊維による補強効果が確認できた。
- (3) 骨組み解析では、ひび割れを模擬した回転ばねを配置し、そのばね定数を実験結果と解析結果がなるべく一致した挙動を示すように算定し、その回転ばね、すなわちひび割れを考慮して解析を行った場合は、ひび割れを考慮しない場合に比較して、同一の荷重で曲げモーメントが低下しており、ひび割れの発生に伴い構造系が変化することが分かった。

また、今回の実験および解析を踏まえた今後の課題を以下に示す。

- (1) 今回は荷重制御による実験であり、ひび割れ発生以降から供試体が破壊するまで、プレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリートの挙動の差異が明確に現れたとは言えない部分が多かったため、載荷の条件を変更して検討する必要がある。
- (2) 載荷荷重が大きくなった場合のジャッキの反力係数の非線形性や係数の大小による影響、および実験で用いた載荷板の影響等を分析し、解析にそれらを反映させて検討を進める必要がある。
- (3) ひび割れ発生後の構造系の変化による覆工の力学的特性に及ぼす影響を把握し、それらを踏まえた上で、荷重の形態、大きさおよび地山種別を変化させ、さらに詳細に挙動を検討する必要がある。