

III-18

高水圧下におけるシールドセグメントの挙動と解析

—— スキンプレートの変形と応力について ——

神奈川県内広域水道企業団

蒲谷 秀彦

住友建設(株)技術研究所

正会員 三上 博

住友建設(株)横浜支店

君島 喜一郎

東洋大学工学部

正会員 小泉 淳

1. はじめに

高水圧下(約3kgf/cm²)において施工された、泥水シールド工事中において、鋼製セグメントのスキンプレートに、曲率の反転を伴った変形が生じることが確認された。本報告では、施工中に観測されたスキンプレートの応力、変形挙動および、数値解析によるシミュレーション結果について示す。

2. 観測されたスキンプレートの挙動

本工事は、神奈川県内で実施された内径1200mmの送水管布設工事であり、掘進区間にある急曲線(R=30m)等の関係から、図-1に示す様な外径2000mmの鋼製セグメントが使用された。施工区間は、土被りが厚く、地下水位が高いため、施工当初よりセグメントが、シールドマシンのテールを抜け出た直後に、スキンプレート(t=3.0mm)に目視できる程度の大きな変形が認められた。図-2は、施工期間中に観測したスキンプレートの変位分布図の一例である。観測地点の理論水圧強度は、2.8kgf/cm²であり、インナーグラウト時には、4.5kgf/cm²程度の圧力が作用していたものと推定される。スキンプレートは、水圧作用と同時に飛び移り現象(曲率の反転)が発生し、中央部での面外方向変位は約26mmとなり、最終的なインナーグラウト時には約39mmに達している。図-3は、スキンプレート内面に貼り付けたワイヤーストレインゲージによる、ひずみ測定値(中央部)をマシンテールとの位置関係により示したものである。スキンプレートのひずみは、マシンテールを抜け出る直前に急激に増加しており、中央部では、 $8 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$ 程度に至り、その後は比較的安定状態で推移している。スキンプレート内のひずみ分布は、端部で小さく、中央部で大きな傾向を示していた。

3. 座屈理論による検討

軸方向に半無限長の部分円筒が、一様な外圧を受けた場合の座屈荷重については、下式の理論解¹⁾が適用される。

○ 直線辺ヒンジの場合

$$q_{cr} = \frac{E t^3 (\pi^2 / \theta^2 - 1)}{12 r^3 (1 - \nu^2)}$$

ここで E:ヤング率 t:板厚、r:中立円半径

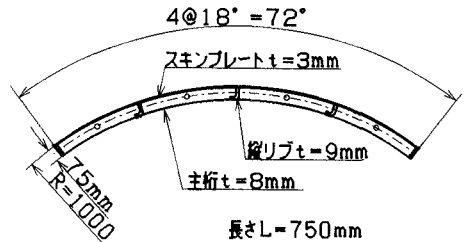


図-1 セグメントの構造

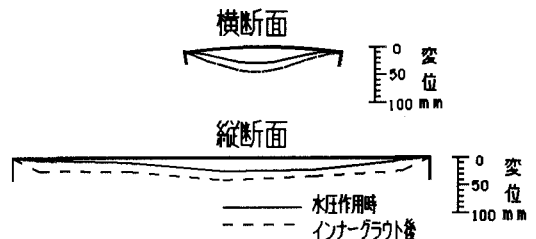


図-2 スキンプレートの変位分布

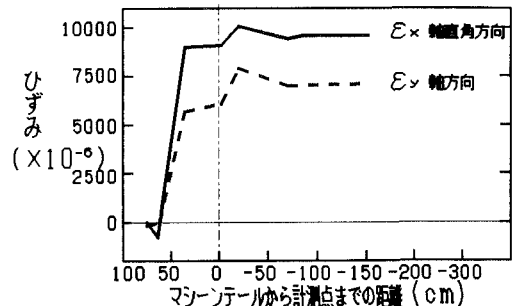


図-3 スキンプレートのひずみ測定値

2θ : 開角 (rad) ν : ポアソン比

○ 直線辺固定の場合

$$q_{cr} = \frac{E t^3 (K^2 - 1)}{12 r^3 (1 - \nu^2)}$$

$$K \tan \theta \cdot \cot K \cdot \theta = 1$$

本工事におけるセグメントに対し、縦リブ位置を支点として、上式を適用すると両辺ヒンジの場合は、

$q_{cr} = 2.08 \text{ kgf/cm}^2$ 、両辺固定の場合は、 $q_{cr} = 4.27 \text{ kgf/cm}^2$ となる。

4. FEMによる解析

上記の理論解では、軸方向主桁端の境界条件が考慮されておらず、飛び移りに伴う各部の応力変化が不明であるため、FEMによるシミュレーション解析を実施した。解析モデルを図-4に示す。計算は、汎用構造解析コード MSC/NASTRANによる幾何学的非線形解析で行った。図-5は、計算結果による荷重強度とスキンプレート中央点の変位の関係である。図中のGN-5は等分布圧力荷重の他に微小な不等分布荷重を部分的に加えたケースである。各ケースともある荷重強度において急激に変位が急増し、その後変位は安定状態に移り、飛び移り現象が生じていることが解る。GN-1, GN-3等の荷重及び構造系が完全に対称の場合には、飛び移り発生点の荷重が現場での水圧強度及び、理論座屈荷重強度に比べてかなり大きな値となっているが、GN-5では、現実に近い値となっている。実際の工事における状況を考えて、荷重作用の微小なタイムラグや、初期におけるセグメントの微小なゆがみ等が考えられるため、飛び移りの引き金となる、微小な不整を加えた解法がより現実に近い値を示しているものと思われる。図-6は、解析結果（GN-5）による飛び移り直後のスキンプレートの応力分布を示したものである。中央部では、約20000kgf/cm²程度の応力値となっている（材料線形計算であるため、実際の降伏応力を非常に上回る数値となっている）。前述の施工現場でのひずみ計測値と計算結果は、比較的良好一致したレベルとなっている。さらに、端部での応力分布が、中央部に比べかなり小さいことも、両者は、同様の傾向を示している。計測結果及び解析結果から見て、当該スキンプレートでは、中央部付近の部材は、降伏応力を超えていたものと思われる。ただし、計測結果から、主桁及び、縦リブの応力度は、比較的低いレベルに留まっていたことが確認されている。

5. おわりに

本報告では、シールド工事中に観測された、スキンプレートの飛び移り現象を、解析的に再現する一手法を見いだした。今後は、飛び移り防止に関しての、効果的な補強手法について考えて行きたい。

参考文献：1) チモシェンコ著、「撓曲理論」、コロナ社、1953年

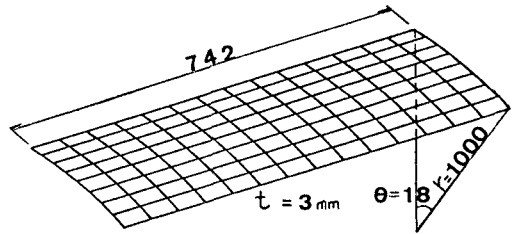


図-4 解析モデル図

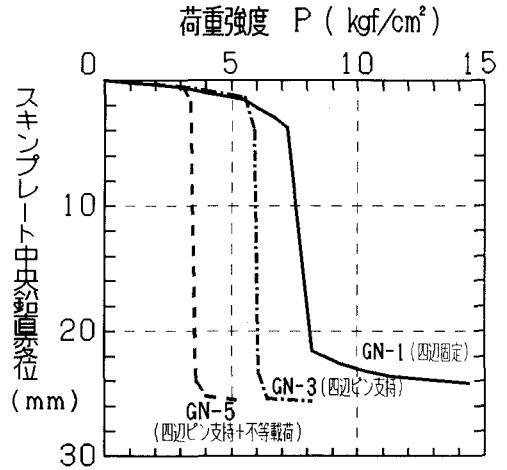


図-5 スキンプレート中央の変位（解析値）

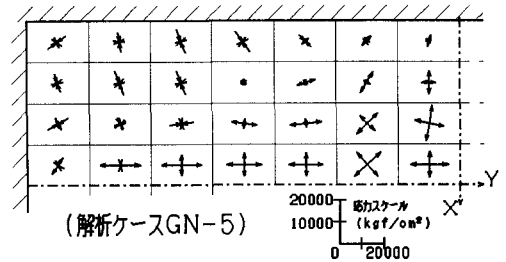


図-6 スキンプレート応力分布（解析結果）