

「学 位 論 文 要 旨」

農業用パイプラインの更生技術と座屈破壊現象の解明

Rehabilitation technology and elucidation of buckling failure phenomenon of agricultural pipeline

農業環境工学専攻 農業環境工学大講座
裕 昌也

農業用の水路施設は築造後 40～50 年を迎える施設が増加しており、施設の老朽化に伴う事故が頻発している。特に、基幹的なパイプラインやトンネルなどの農業用排水路の延長は約 4 万 5 千 km に達しており、突発的な事故は年間 300 個以上に及んでいる。このような背景から老朽管の更生対策は急務となっているが、現場状況やコスト削減のため大断面のトンネルやパイプラインでは全面改修よりも既製管挿入（パイプインパイプ）工法による更生を選択するケースが多い。この工法は既設管内に新たな管を挿入後、その隙間にセメント系の中込材を充填して構造的に多層化することで高い安定性を確保するものであるが、中込材の硬化不良や充填不良による空隙の発生、更生管と中込材の境界面に発生する薄層隙間が更生管の安全性を大きく低下させる場合には破壊事故につながっている。

本研究では、老朽化した既設管とその内部に挿入する更生管外周面との隙間、中込材の強度や空隙の発生とその規模が更生管の安全性、すなわち外水圧作用時の座屈強度に及ぼす影響を明らかにするために、縮小モデルを用いた模型実験を実施した。実験的に更生管が座屈に至るメカニズムを解明するとともに、実用的な座屈強度推定式の提示と検証を実施している。

特殊な形状である馬蹄形管を用いた更生管については、その変形と周辺地盤の応力場に着目し、模型実験と弾塑性有限要素法による数値解析によって馬蹄形管が破壊に至るメカニズムを明らかにした。すなわち、馬蹄形管は外荷重が作用すると側壁全体が圧縮変形することによって荷重を分担するため、管全体の水平方向への変形量は極めて小さくなる。さらに、側壁下端部とインバートが接続するコーナー部には大きなひずみが発生するとともに、地盤反力もこの曲点部に集中

する。すなわち、馬蹄形管のクラウン部と側壁部は安定した応力状態を維持するものの、インバート部は両端のコーナー部からの圧縮が増大するとともに、下部地盤から上方への反力が増加する圧縮と曲げの複合応力状態が顕著になり座屈破壊に至る。このような応力状態で管外周面から外水圧が作用した場合は、管全体が内空へ縮小するモードが発生し、わずかな応力分布の偏差によって容易に座屈破壊することを示した。更生管の座屈強度に関する推定は、外水圧作用の影響を適切に評価することが最も重要であり、そのことが示唆された。

既設管内に挿入された円形更生管の外水圧に対する座屈強度については、縮小モデルによる模型実験を実施して破壊に至る挙動を明らかにした。4種類の材質と剛性を有する更生管の自由座屈実験によって管の曲げ剛性（EI 値）と座屈強度は線形的な関係にあり、提示した推定式によって高い精度で予測できること、また、任意の個所から突発的な破壊が発生することを明らかにした。加えて、円形更生管の周囲に中込材を打設したモデルの拘束座屈実験では、管全体が均等に圧縮する初期状況から、水圧の増大によって極めて狭い範囲に引張のひずみが生じて、突発的に破壊に至るメカニズムを明らかにした。そのひずみの集中領域は高々中心角 20 度の範囲であり、座屈箇所は管などの初期不整の影響に起因するため特定することはできない。馬蹄形管については、外水圧負荷によってインバート中央部に限定して引張ひずみが急激に増大しはじめ、究極的にはインバート中央部が内空へ突発的に変形し、破壊に至ることが明らかとなった。この座屈強度は、インバートの曲率半径を基に予測することができ、馬蹄形更生管の完全拘束条件における座屈強度推定式を提示した。

既設管と更生管の隙間に充填される中込材の影響については、中込材充填不良などの空隙が増大することによって強度低下するメカニズムを解明し、座屈強度は連続する空隙の大きさと線形関係にあり、その座屈強度推定式を示した。更生管外周面に 25%の空隙が生じた場合には座屈強度は 1/2 まで低下することが分かった。更生管外周面に生じる薄層隙間の影響については中込材充填の有無に関わらず、更生管直径のわずか 2%相当の隙間が生じた場合、座屈強度は 1/5 まで低下することが明らかとなり、その薄層隙間厚さを変数として、拘束状態における座屈強度の推定式を示した。

本研究の成果として、老朽化の進んだ既設管内に新管を挿入する場合、その更生管の外水圧に対する安全性は、更生管の座屈強度に支配され、中込材に発生する連続した空隙や更生管外周面に生じる薄層隙間の大きさを指標とすることによって、実務的なレベルでその座屈強度を予測できることを示した。提示した座屈強度推定式は馬蹄形状の更生管にも適用可能で、トンネルなどの地中構造物に頻発する裏込め空洞の影響予測にも応用することができる。