既設トンネル補強用セグメントの開発（その２：載荷試験）

東京地下鉄㈱　正会員　○佐藤　謙
日本シビックコンサルタント㈱　フェロー会員　田崎　和之
メトロ開発㈱　正会員　水上　博之、石山　路代
日之出水道機器㈱　正会員　日高哲郎　甲斐信博

１．はじめに

（その１：FEM 解析）において，THE-HD セグメント（以下，HD セグメントという）の単体および連結構造の３次元 FEM 解析を行い，HD セグメントは側面の嵌合効果により，セグメント継手やリング継手の接合が無くても構造体として成立することを示した．本稿では，実際に鋳造した部材を用いて、単体曲げ試験，継手曲げ試験を実施し解析値との整合性について報告する．

２．載荷試験

１）試験概要

試験には実際に鋳造した HD セグメントを使用した．その仕様を表１に，写真を写真１に示す．

表１　HD セグメントの仕様（球状黒鉛鋳鉄）

材料の種類	FCD450-10
引張強度	450N/mm^2 以上
降伏耐力	280N/ mm^2 以上
ヤング率	170 KN/ mm^2
伸び	10%以上
セグメント高さ	200mm
セグメント長さ	764mm（支点間）
セグメント最大幅	311mm
セグメント厚さ	周壁 10mm 底板 12mm
セグメント重量	47Kg

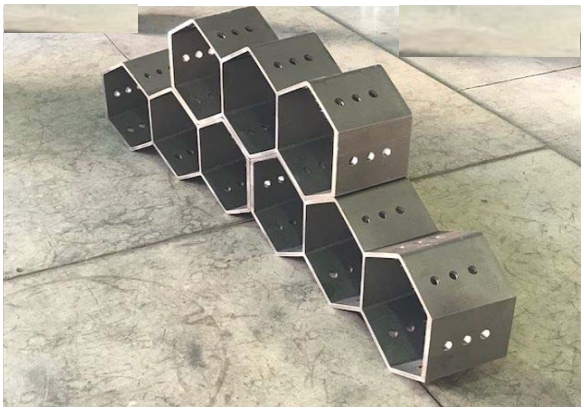

写真１「HD セグメント」（３部材）

本試験では単体部材曲げ試験および継手曲げ試験の２種類を行い，以下の内容を確認した．

① 単体部材曲げ試験：剛性および応力分布
② 継手曲げ試験：リング継手の剛性および応力分布
③ ３次元 FEM 解析との比較（剛性および応力分布について FEM 解析の有意性の確認）

２）単体部材曲げ試験（CASE1）

HD セグメントの形状および載荷状態を図１に示す．載荷方法は４点曲げ載荷とし，荷重は材料弾性限界を目安に載荷した（各 CASE 共通）．主な計測は最も大きな応力が発生すると思われる六角形の頂点を中心にひずみゲージを貼り，また中央部鉛直変位を測定した．

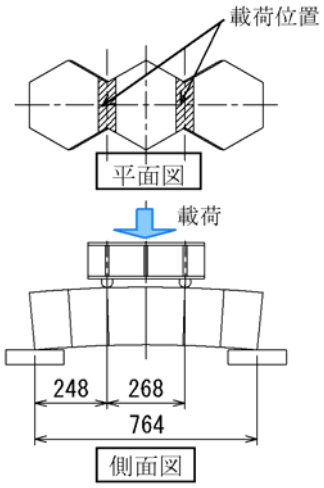

図１　単体部材曲げ試験

３）リング継手曲げ試験（CASE2）

本試験はセグメント継手部を両側から HD セグメントを挟みこみ，六角形の凹凸を利用して継手強度を確保するものである．載荷状態を図２に示す．リング継手部の高力ボルトは M16 を各面に２本ずつ配置し，セグメント継手にボルトなしの場合（CASE2-1）とボルト１本接合の場合（CASE2-2）で行った．

キーワード　鋳鉄，セグメント，トンネル補強，　載荷試験，FEM 解析
連絡先〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6　東京地下鉄㈱　TEL03-3837-7264 FAX03-3837-7171

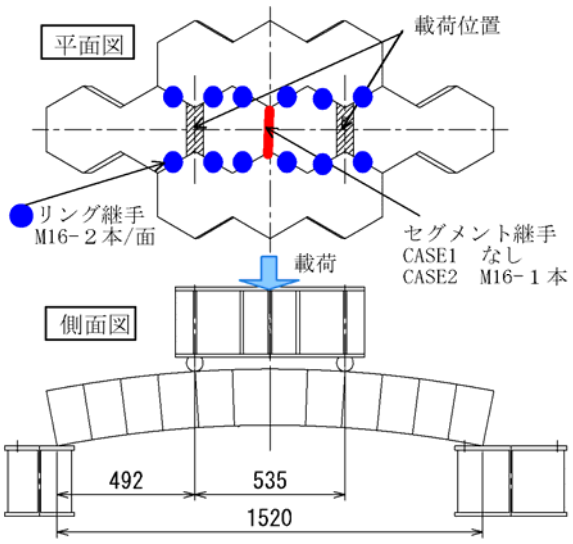

図２　リング継手試験

３．試験結果

各試験の荷重，変位，剛性結果一覧表を表２に，３次元 FEM 解析の結果一覧表を表３に示す．荷重-変位の各グラフを図３，４に示す．試験とＦＥＭの剛性比（Ia/Ib）では 0.93～1.0 と試験が少し小さめであったが，ほぼ合致しておりＦＥＭの有意性が確認できた．CASE2 でセグメント継手のボルトの効果はなく，またリング継手のボルトのひずみの変動がほとんどなかったため（数十μ程度の圧縮・引張），組立て用の最小限のボルトでもリング継手構造が成立すると考えられる．

表２　試験結果一覧表

	荷重 P (KN)	変位 δ (mm)	剛性 EIa (Nm^2)	ｾｸﾞﾒﾝﾄ継手
CASE1	46.2	2.35	155,420	－
CASE2-1	40.1	5.71	437,258	なし
CASE2-2	40.1	5.73	435,731	あり

表３　FEM 解析結果一覧表

	荷重 P (KN)	変位 δ (mm)	剛性 EIb (Nm^2)	剛性比 Ia/Ib
CASE1	50.0	2.37	166,965	0.93
CASE2-1	40.0	5.69	437,264	1.00
CASE2-2	40.0	5.69	448,294	0.97

単体部材の FEM 解析と載荷試験の応力比較を図５に示す．本セグメントの最大になる応力は開口側の六角形の凹凸の頂点であり，底板側（フランジ側）に行くに従い応力は減少する傾向はＦＥＭの解析結果とほぼ同じ結果であった．底板および中仕切り壁はほとんど応力がなく，薄肉可できる余地がある．

４．まとめ

①３次元ＦＥＭ解析は試験結果と荷重-変位および応力状態をほぼ推定できる．

②HD セグメントの最大応力は六角形の頂点であり，応力の大きい所を肉厚化し，小さい所を薄肉化することで，より軽量化部材をＦＥＭで推定することが可能である（任意の形状変更は鋳鉄の製造メリット）．

③リング継手を主に HD セグメントを構成することにより構造的に耐力，剛性の高い構造を構築できる．

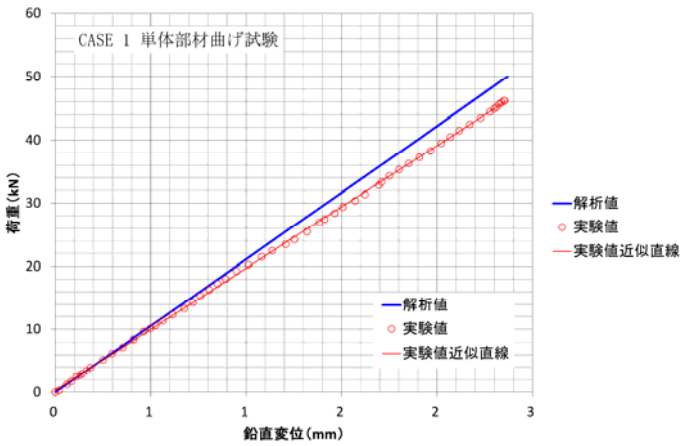

図３　単体部材曲げ試験（荷重-変位）

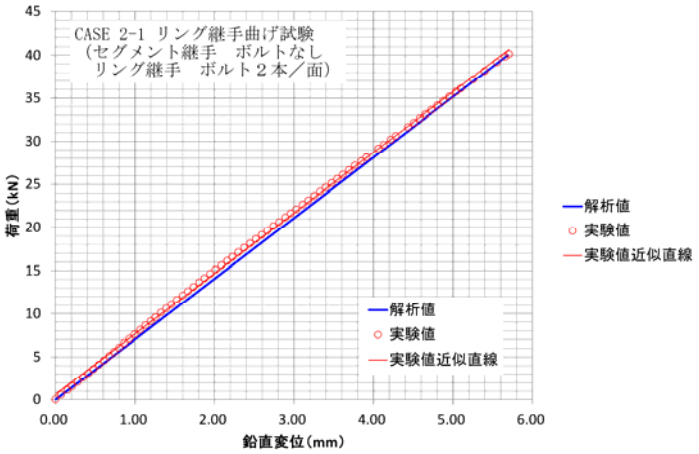

図４　リング継手曲げ試験（荷重-変位）

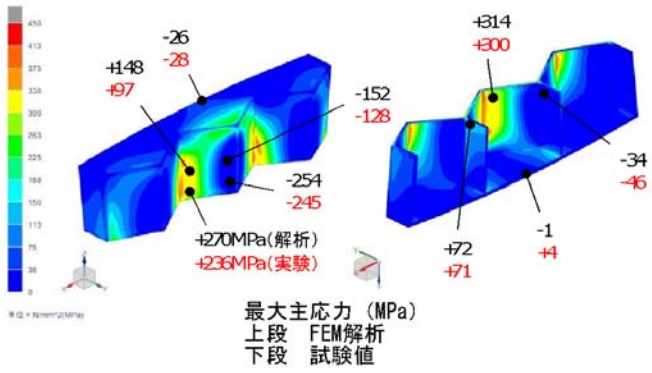

図５　応力分布（解析と試験値の比較）

5. 謝辞

本開発にあたり，FEM 解析および載荷試験で早稲田大学小泉淳教授にご指導頂き，ここに感謝を申し上げます．