

## 正断層がパイプラインに及ぼす作用に関する遠心模型実験

University of Dundee (UK) 学生会員 ○ 永岡修一  
 University of Dundee (UK) 非会員 M. F. Bransby  
 University of Auckland (NZ) 非会員 M. C. R. Davies

### 1. 研究目的

地震による被害の主たる要因として、地震動と断層変位の二つが挙げられるが、その影響が広範囲に及ぶことから、研究対象としては前者のほうに対してより多くの取り組みがなされてきた。しかしながら、断層変位に伴う地盤の長期変動もまた、構造物にとって重大な危険要素である。特に、1999年に相次いで発生した台湾・集集地震やトルコ・コジャエリ地震における、地盤の断層変位に伴う地表面の社会基盤構造物の甚大な被害は、断層変位に対する地盤工学的な取り組みの必要性を強調するものであった。そこで本研究では、有効半径 3.0m、最大遠心加速度 130G のビーム型遠心力载荷試験装置を用いた断層模型実験を行い、基盤の正断層及び逆断層に伴う砂層の変形状況及び断層の伝播挙動について検討を行ってきた。本発表は正断層を対象としており、地中埋設管のモデルとしてパイプラインの模型を模型砂地盤中に断層と直交するように設置し、正断層がパイプラインに及ぼす作用について行った検討について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2-1 実験に用いた試料及び実験装置

本研究では、粒径の整った Fontainbleau 砂( $\gamma=15.57\text{kN/m}^3$ ,  $d_{10}=0.18\text{mm}$ ,  $d_{50}=0.24\text{mm}$ ,  $e_{\text{max}}=0.83$ ,  $e_{\text{min}}=0.55$ ) を用いて実験を行った。次に、本実験に用いた実験装置を図-1 に示す。模型地盤である砂層は、透明アクリル樹脂製の側壁を有する、遠心力载荷試験装置の試験ボックス内にあらかじめ設置された断層発生装置内に、空中落下法により相対密度  $D_r=60\%$  に調整し準備した。模型地盤の寸法は、横幅 684mm、高さ 217mm、奥行き 500mm である。また、模型地盤中に着色層を設けることにより、模型地盤中における断層の伝播状況の観察を可能としている。模型パイプラインは、基盤の断層と直交するように模型地盤の奥行き方向中央部に設置した。正断層は、油圧シリンダーに載せた可動式上盤を油圧ポンプによって下降させることで発生させ、その傾斜角度は  $60^\circ$  と設定した。模型地盤準備完了後、所定の遠心加速度に至った後に、模型地盤換算で約 0.5mm ずつ上盤を上昇させ、変位を中断する度に写真を撮影し、得られた連続写真を用いて PIV による画像解析を行った。

#### 2-2 実験条件

表-1 に、本検討で実施した実験条件を示す。遠心加速度は 80G で一定とし、また模型地盤の層厚は  $H_{\text{soil}}=217\text{mm}$  であるので、層厚 17.4m を有する実地盤の断層挙動を再現することになる。実験に用いた模型パイプラインは図-2 に示すように、長さ  $l=624\text{mm}$ 、外径  $d=5\text{mm}$ 、肉厚  $t=0.25\text{mm}$ 、円形断面を有する中空の鉄製チューブ(ヤング係数  $E=206\text{GPa}$ )であり、ひずみゲージの有無に伴い 2 種類のパイプラインを用いている。ひずみゲージは 14 組計 28 個、図-2 に示す配置でパイプラインの外壁に取り付けている。パイプラインの埋設深さは、実地盤換算で 1.4m ( $H_{\text{cover}}/d=3.5$ , 浅い埋設)と 2.8m ( $H_{\text{cover}}/d=7.0$ , 深い埋設)の 2 パターン設定した。実験ではまず Test1 において、基盤の断層変位の増加に伴いパイプラインに生じる塑性ヒンジの位置を、Test2 ではパイプラインに生じる応力ひずみ関係を弾性域内とし、正断層がパイプラインに及ぼす作用の把握

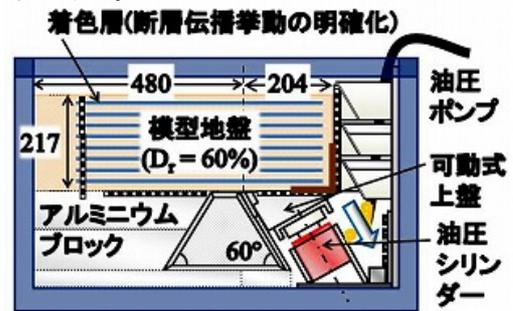


図-1 断層模型実験装置 (単位: mm)

表-1 実験条件 (\*実地盤換算)

Test No.	模型地盤		パイプライン		断層
	層厚 $H_{\text{soil}}$ (m)	$D_r$ (%)	ひずみゲージ	埋設深さ比 $H_{\text{cover}}/d$	最大鉛直変位 $\text{Throw}_{\text{max}}$ (m)
1	17.4	60.7	なし	7.0	2.22
2		59.4	14 組	3.5	0.065
3		64.3	(図-2)	7.0	2.24

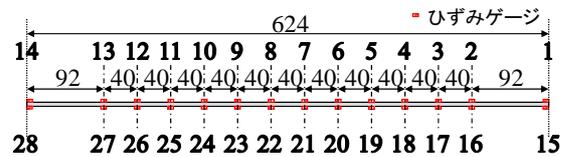


図-2 実験に用いた模型パイプライン (単位: mm)

を図った。また Test3 では Test1 同様、パイプラインが塑性変形を生じるほどの断層変位を基盤に生じさせ、また同時に埋設深さの違いがパイプラインに及ぼす影響についても併せて検討した。

### 3. 実験結果及び考察

図-3 に Test1 の実験における、基盤の鉛直変位で 2.22m(実地盤換算)の断層を生じさせた模型地盤の様子を示す。模型パイプラインと側壁との間には十分な間隔があり、観察される断層伝播挙動は、無载荷地盤のものと同様であると考えられる。まず、比較的基盤に対して鉛直な断層(初期断層)が、基盤表面の断層発生点から模型地盤表面に向かって伝播していることが分かる。初期断層は模型地盤中央部まで伝播した後不活発となり、その後ほぼ直線的な断層(主断層)が断層発生点から模型地盤表面に到達し、下盤と上盤の間に不連続面を形成していることが分かる。この主断層は、基盤の断層傾斜角 60°よりさらに 8°傾いていることが分かった。実験終了後の観察により、パイプラインには図-4 に示すように、断層変位に伴う引っ張り及び曲げ破壊により 2 つの塑性ヒンジが確認され、それらは主断層の両側に 1 つずつ生じていることが分かる。

次に Test2 より得られた、断層変位の増加に伴う軸力及び曲げモーメント分布を、それぞれ図-5 及び図-6 に示す。ここで正の軸力は引っ張り力であることを示し、また正の曲げモーメントは上に凸の変形であることを意味している。実地盤換算で Throw=6.5cm と小さい断層変位であるにも関わらず、両図においてその発達過程を確認することが出来る。まず図-5 に示す軸力分布においては、パイプライン両端において軸力はほぼ発生しておらず、また最大軸力は常に  $x=-11.8\text{m}$  において計測されており、この位置は図-3 及び図-4 における H1 の塑性ヒンジとほぼ一致することが分かる。一方パイプラインは、 $-24.6 < x < 4.2\text{ m}$  の範囲で曲げモーメントを生じており、正の最大曲げモーメントが生じている  $-15.0 < x < -11.8\text{ m}$  において塑性ヒンジ H1 を生じたものと考えられる。

パイプラインの埋設深さが及ぼす影響を評価するために、図-7 及び図-8 に、埋設深さの違いが断層変位の増加に伴う最大軸力及び最大曲げモーメントに及ぼす影響を示す。まず図-7 より、 $\text{Throw} < 0.08\text{m}$  において最大軸力は断層変位の増加に伴い増加し、その後一定を保っている。これは、断層変位の増加に伴いパイプラインと周辺地盤との摩擦が一定化したためと考えられる。一方図-8 に示す、最大曲げモーメントと断層変位との関係においては比例関係が認められ、また深い埋設のほうが曲げモーメントの値も大きくなっている。

### 4. まとめ

本研究において、断層変位を受ける埋設されたパイプラインの作用を遠心模型実験により検討した結果、断層がパイプラインを横切ることに伴い、その交差部分の両側において、パイプラインには上もしくは下に凸の曲げモーメントが発生していることが分かった。正断層がパイプラインに及ぼす作用は複雑さを含むものであるが、その設計時には埋設深さを十分考慮する必要があることが実験的に示された。

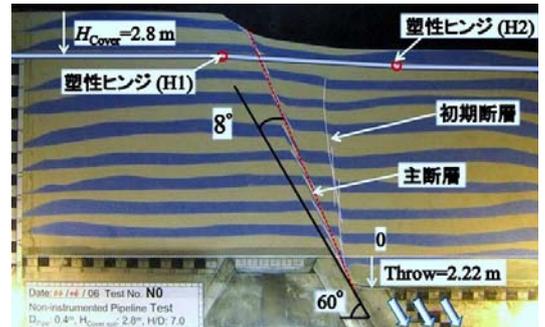


図-3 基盤の鉛直変位 Throw=2.22 m (実地盤換算)時における模型地盤 (Test1)

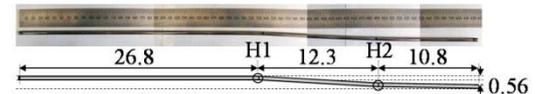


図-4 Test1 実験終了後のパイプライン

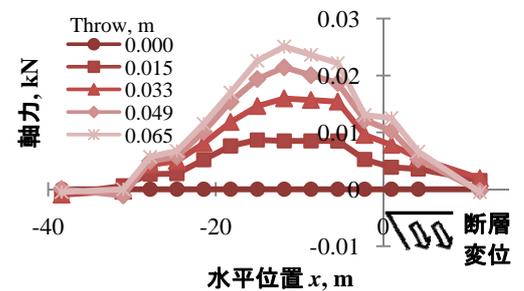


図-5 断層変位の増加に伴う軸力分布 (Test2)

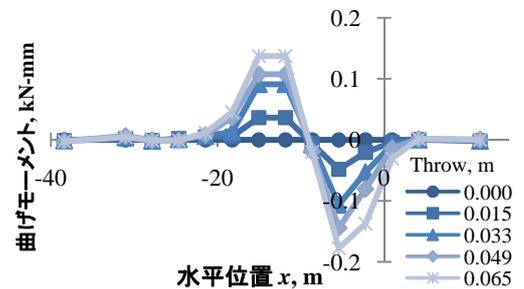


図-6 断層変位の増加に伴う曲げモーメント分布 (Test2)

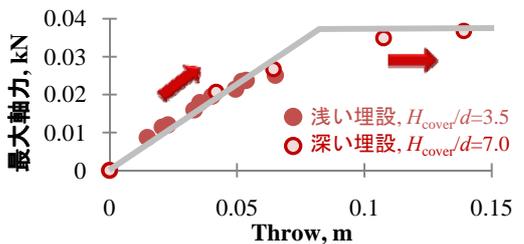


図-7 埋設深さの違いが軸力に及ぼす影響

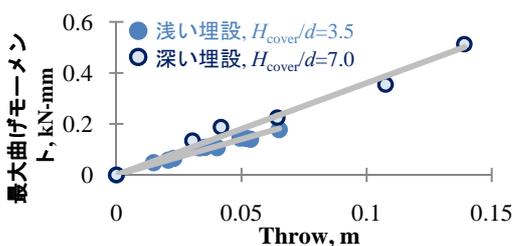


図-8 埋設深さの違いが曲げモーメントに及ぼす影響