

実規模解析による立坑を有する地中 RC ダクトの逆断層変位作用に対する損傷評価

(一財) 電力中央研究所 正会員 ○山野井 悠翔, 正会員 松尾 豊史, 正会員 山口 和英
(株) 電力計算センター 島村 真介

1. はじめに

2011年の東日本大震災以降、原子力施設への規制は強化され、断層変位に対しては、少しでも変位が生じる可能性のある断層が存在する基盤には構造物を設置できないという厳しい基準が設けられている。この背景には、断層変位に対する構造物の性能評価手法が未だ確立されていないことがある。筆者らは性能評価手法の確立に向け、逆断層変位を受ける立坑を有する RC ダクトを対象とし実規模モデルによる解析事例の拡充を行っている。本稿では交差角 60 度、傾斜角 45 度の逆断層変位が作用した際の躯体の損傷評価を行う。

2. 解析モデル概要

構造物と地盤、及びその界面の破壊の相互作用を考慮するために、立坑を含む RC ダクト、周辺地盤（砂層）、岩盤を全て三次元ソリッド要素でモデル化した（図 1 a, b）。解析コードはコンクリートの破壊挙動を精度よく再現できる COM3 を使用した¹⁾。立坑を含む RC ダクトには多方向分散ひび割れを考慮可能なコンクリート構成モデルを適用し、鉄筋配置部に関しては鉄筋コンクリートの構成モデルを適用した¹⁾。岩盤と建屋は弾性体とし、ダクトの配筋やコンクリート、岩盤の物性は既往の地震応答解析を参考に設定した²⁾。一方で、砂層には Multi-yield surface plasticity に基づく弾塑性構成モデル³⁾を適用し、既往の豊浦砂の一面せん断試験結果と一致するように入力物性を設定した（図 2）⁴⁾。強度特性は表 1 のように設定し、Drucker-Prager の破壊基準に従うものとした。各種界面及び断層面には、剥離と滑りを考慮できる接合要素を図 1 c のように配置した。ずれに対しては Mohr の降伏条件に従い（①, ②: $\mu \cong 0.0$, ③, ④, ⑤: $\mu = 0.3$, ⑥: $\mu = 1.5$ ）、構造ジョイントはずれのみを考慮した。岩盤—底板間ジョイント③のみ剥離に対して 0.5MPa の引張強度を与え（③以外: 0.0MPa）、粘着力を 3.4MPa とした。

解析は自重解析と断層変位解析の 2 ステップで行った。自重解析時には側面を鉛直ローラー、底面を完全固定の境界条件とし、断層変位解析時には側面の反力を維持したまま上盤のモデル底面に強制変位を入力した。なお、1 ステップで与える変位量は感度解析により鉛直変位で 0.2mm と定めた。

3. 交差角 60 度の逆断層変位が作用した際の立坑を有する RC ダクトの損傷モード

本検討では地震動を引き起こすような主断層ではなく、主断層のずれによって二次的に形成される副断層を対象とする。敷地内断層評価手法検討委員会（JANSI-2013）における過去 120 年間の観測記録を踏まえて、最大で鉛直変位量 500mm まで解析を行った。以下では強制変位として与えた鉛直断層変位量を断層変位と表す。

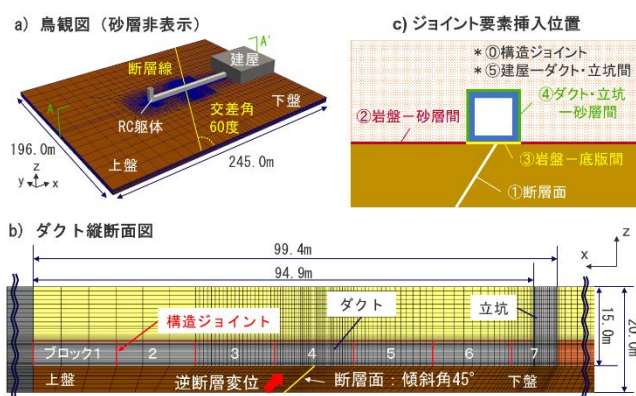


図 1 解析モデル概要

表 1 入力物性値

a) コンクリート(無筋 or RC要素)			c) 岩盤・建屋 (弾性モデル)	
f_c (MPa)	E_c (MPa)	f_t (MPa)		E (MPa)
24.0	25000	1.91	岩盤	2660
			建屋	1800
b) 砂層(弾塑性モデル)				
RD (%)	C (MPa)	ϕ (°)	ϕ_{post} (°)	
89.19	0.0	42.0	32.0	

f_c : 圧縮強度, f_t : 引張強度, E_c , E : ヤング係数, RD: 相対密度, c : 粘着力, ϕ : 内部摩擦角, ϕ_{post} : ヒール後の内部摩擦角

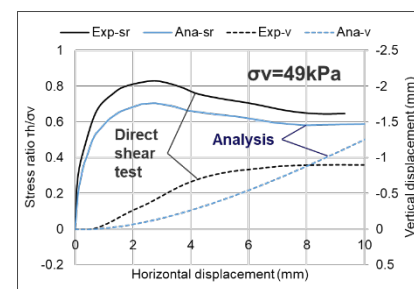


図 2 砂層の一面せん断挙動

(1) 断層変位初期の挙動 (断層変位: 0mm~200mm)

逆断層変位によってダクトには水平圧縮力と鉛直上方へのせん断力が作用する。図3に示す断層変位200mm時の変形図より、前者の作用は主に鉛直屈曲部の曲げ損傷として吸収され、後者は断層と交差するブロック端の構造ジョイントのずれにより吸収される。同図に断層変位量と各種指標の関係も示すが、ジョイントのずれ変位は断層変位とほぼ線形関係であり、屈曲部は断層変位が約150mmの時点で鉄筋の降伏ひずみに達していることが分かる(図3左上)。一方で、断層変位量が100mmまでの領域に着目すると(図3右上)、断層変位約25mmを境に断層直撃ブロックのx方向圧縮応力の増加が緩やかになり、屈曲部の水平変位が増加し始めていることから、断層の水平変位は直ちに屈曲部に作用しているのではなく、直撃部が抵抗した後に屈曲部に伝播することが確認できる。断層変位100mmまでは局所的な降伏も確認されなかったため、構造ジョイントのずれを除くと弾性範囲内でも評価可能であったと言える。

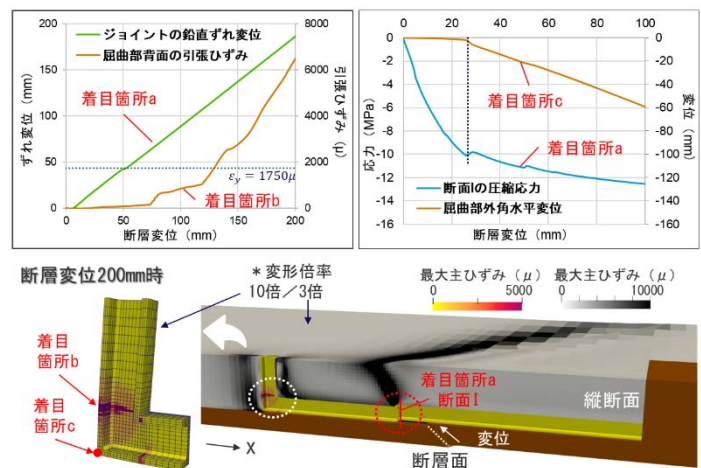


図3 断層変位200mmまでの損傷

(2) 終局変位時の挙動 (断層変位: 200mm~500mm)

断層変位200mmまでに構造全体は概ね降伏しており、以降は降伏領域が広がるのみであった。断層変位量が400mmを超えると、新たに断層直撃ブロックで一部降伏が生じ(図4左)、屈曲部の隅角部では内壁の圧壊が見られた(図4右)。また、三次元的に断層が交差しているため、その影響と考えられるダクト横断面の損傷も見られた。しかし、いずれの損傷も躯体全体の崩壊につながるものではなく、今回対象とした構造物は逆断層変位に対して十分なリダンダンシーを有していると評価できる。

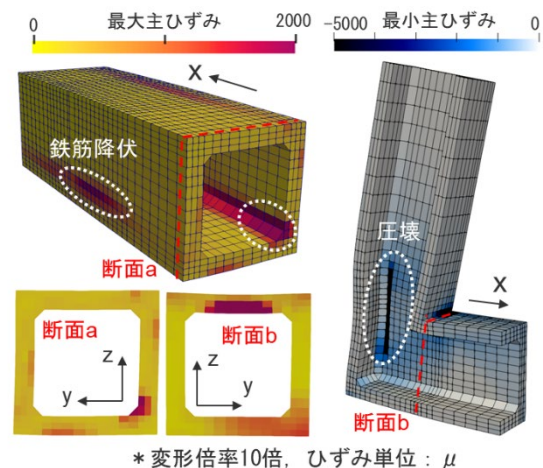


図4 最大断層変位(500mm)時の損傷

4. おわりに

本検討より、断層変位量が100mm程度までであれば構造物は概ね弾性範囲であり、梁要素などの簡易モデルでも評価可能であったと考えられる。さらに、断層変位が数mm程度であれば屈曲部まで断層変位作用が伝達しないため、断層直撃部のみの評価で十分であると言える。一方、断層変位量が大きく、断層直撃部以外の損傷が顕著になる場合には構造物全体系を適切にモデル化する必要があると考えられる。今後の検討課題として、構造ジョイントや岩盤一底版間のジョイント物性、異なる角度で断層線が交差する場合の損傷モードの変化などが挙げられる。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, CRC Press, 2003.
- 2) 松尾豊史, 渡部龍正, 横田克哉, 島村真介: 鉛直屈曲部を有するRC立坑を対象とした三次元非線形地震応答解析, 土木学会第75回年次学術講演会講演概要集, 2020.
- 3) Soltani, M. and Maekawa, K.: Numerical simulation of progressive shear localization and scale effect in cohesionless soil media, International Journal of Non-Linear Mechanics, pp.1-13, 2014.
- 4) Shibuya, S., Mitachi, T. and Tamate, S.: Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear, Geotechnique, Vol.47 No.4, pp.769-790, 1997.