断層変位を受けせん断破壊するＲＣボックスカルバートの損傷確率評価

(株)大林組　　正会員　○佐々木智大
(株)大林組　　正会員　　樋口　俊一

１．はじめに

内陸直下型地震において断層変位による地盤変状が報告される事例が増えつつあるが，地盤に拘束された地中構造物に及ぼす影響として，強制変位に伴う構造体の損傷や機能障害が想定される．一方インフラの機能維持の観点からは，個々の構造物のフラジリティに着目した損傷評価が求められる．

本研究では，断層変位が作用する RC ボックスカルバートの有限要素解析によりその損傷過程を分析し，材料強度，地盤定数のばらつきを考慮した損傷確率を求め，その結果について考察した．

２．解析対象構造物と解析モデル

解析の対象とした RC ボックスカルバートを図-1 に示す．既往の研究[1)]にて著者らが検討に用いたモデルと同様の構造物を対象とした．せん断波速度 400m/s 程度の基盤上に高さ 5.5m，幅 9.5m の鉄道構造物等設計標準で設計された RC ボックスカルバートを構築し，その上に土被り 20m でせん断波速度 200/s 程度の密な砂地盤により埋め戻されていると仮定した．中央の隔壁を挟んで高さ 4.5m，幅 4.0m の内空が 2 か所存在し，側壁，中壁，頂版，底版の厚さは 0.5m とした．コンクリートの呼び強度は 24MPa とし，主筋，配力筋，せん断補強筋には SD345 の異形鉄筋を使用した．ハンチは省略している．表層地盤には，密度γ =17kN/m^3，内部摩擦角ϕ =38 度，ポアソン比ν =0.33 の密な砂地盤を仮定した．詳細は参考文献 1)を参照されたい．

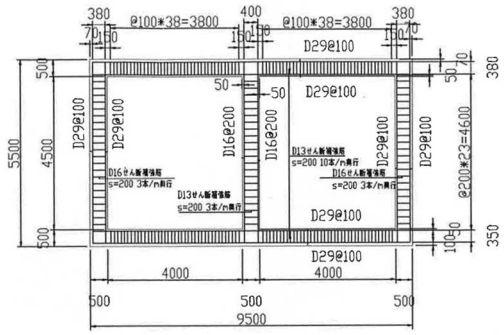

図-1 解析対象構造物

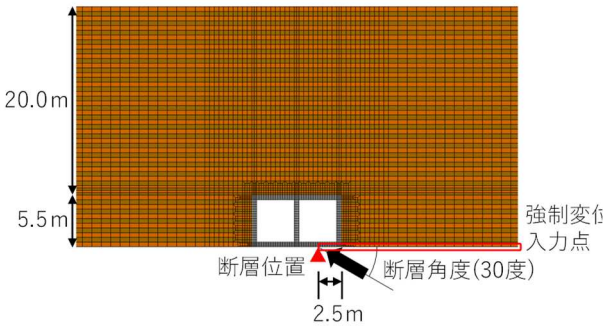

図-2 解析モデル(構造物周辺拡大)

図-2 に解析モデルを示す．解析には大林組が開発した大規模有限要素法解析プログラム「FINAL-GEO」を用いた．RC ボックスカルバート，表層地盤はともに四辺形平面ひずみ要素でモデル化した．RC ボックスカルバートにはひび割れ発生から終局に至るまでの挙動を精度よく再現できるコンクリート構成則を適用した．鉄筋は埋込み鉄筋を仮定している．地盤には，橋口らが提案する拡張下負荷面モデルを適用した．使用した材料パラメータは既往の遠心模型実験を精度よく再現できるパラメータとしている．構造物-表層地盤間，構造物-基盤間，表層地盤-基盤間には接触・剥離を考慮するジョイント要素を挿入した．

図-2 に示すように，断層は RC ボックスカルバートの直下に存在すると仮定し，基盤に相当する節点に対して強制変位を入力した．構造物を右下から左上に向け突き上げるように持ち上がる逆断層型を想定し，断層角度は基盤に対して 30 度とした．

損傷確率を求めるに当たり，コンクリート強度，地盤剛性に相当するせん断波速度，地盤強度に相当する内部摩擦角がばらつくと仮定し，表-1 に示

表-1 ばらつきを考慮したパラメータ

	平均値 μ	$\mu+\sigma$	$\mu-\sigma$	備考
ｺﾝｸﾘｰﾄ強度	呼び強度の1.4倍 33.6 MPa	1.13μ 38.0 MPa	0.87μ 29.6 Mpa	変動係数 CV=0.13
地盤剛性	せん断波速度 Vs=200m/s程度	1.1μ Vs=220 m/s程度	0.9μ Vs=180 m/s程度	変動係数 CV=0.1
地盤強度	下負荷面パラメータの内部摩擦角 ϕ=32度	1.1μ ϕ=34.5度	0.9μ ϕ=29.4度	$\tan\phi$ に対する CV=0.1で評価

キーワード　断層変位，地中構造物，フラジリティ評価，偶然的不確実さ，せん断破壊
連絡先　　〒204-8558　東京都清瀬市下清戸 4-640　(株)大林組　技術研究所　ＴＥＬ042-495-1013

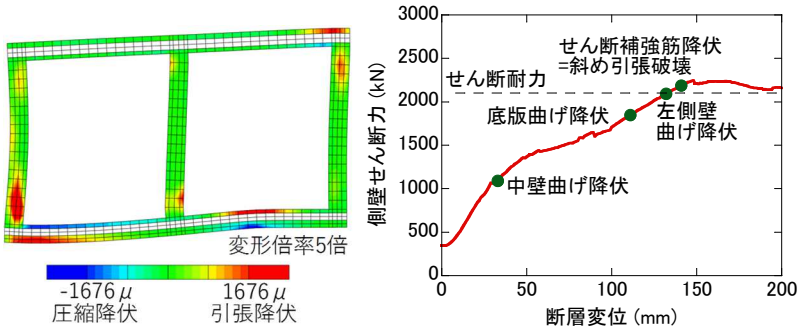

図-3 水平方向鉄筋ひずみ(左)と側壁せん断力(右)

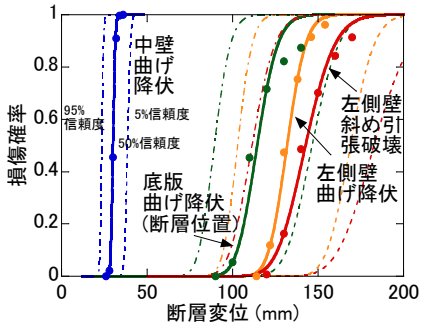

図-4 フラジリティ曲線

表-2 パラメータごとの偶然的不確実さ要因の対数標準偏差

	全体	ｺﾝｸﾘｰﾄ強度	地盤剛性	地盤強度
中壁曲げ降伏	0.040	0.031	0.040	0.006
左側壁斜め引張破壊	0.095	0.013	0.094	0.014

す 3 種類，6 つのパラメータを組み合わせた 8 ケースの解析を行い，求められた応答のばらつきから 2 点推定法による損傷確率を評価した．各パラメータの変動係数 CV は，原子力分野における地震 PRA 標準[2)]を参考に設定した．

3．断層変位による RC ボックスカルバートの破壊メカニズム

図-3 に平均値をパラメータに用いて解析した結果得られた水平鉄筋ひずみ，および，左側壁に作用するせん断力と断層変位を示す．図-3 には，分布荷重を考慮し求めたせん断耐力も比較のため示している．初めに中壁が曲げ降伏し，その後，底版，左側壁の順に曲げ降伏が進行する．最終的に，左側壁のせん断力がせん断耐力を上回り，せん断補強筋が降伏し，斜め引張破壊の兆候を示した．ここで曲げ降伏は引張側鉄筋が降伏したとき，斜め引張破壊はせん断補強筋が降伏したときと定義した．

4．断層変位による損傷確率評価

図-4 は，表-1 に示したばらつきの組み合わせを考慮した 8 ケースの解析結果に基づいて評価した 5%，50%，95%信頼度のフラジリティ曲線である．ここで，認識論的不確実さ要因の対数標準偏差は 0.15[2)]を仮定した．中壁の曲げ降伏は，断層変位が 26mm(HCLPF 値)～30mm(50%損傷確率)程度と，小さい断層変位で発生する．終局状態である左側壁の斜め引張破壊は，断層変位が 95mm(HCLPF 値)～143mm(50%損傷確率)のときである．

パラメータごとに偶然的不確実さ要因の対数標準偏差を求めた結果を表-2 に示す．偶然的不確実さ要因の対数標準偏差は，求めたいパラメータ以外のばらつきによる結果を平均して 2 ケースに集約し，2 点の結果から標準偏差を求めた．この整理によると，中壁の曲げ降伏が生じる断層変位のばらつきは，コンクリート強度と地盤剛性が支配的であり，左側壁の斜め引張破壊が生じる断層変位のばらつきは，地盤剛性が支配的であることがわかる．地盤強度はいずれの損傷に対しても与える影響は小さい．これは，本検討モデルが，土被り 20m であり，拘束圧が大きいためと考えられる．土被りをパラメータとした解析等によりさらに検討を進めたい．

5．まとめ

密な砂地盤中に土被り 20m の位置に埋設された RC ボックスカルバートが断層角度 30 度の逆断層により斜め引張破壊する場合の損傷確率を評価した．その結果，最初の損傷である中壁の曲げ降伏が生じる断層変位の偶然的不確実さ要因によるばらつきは，コンクリート強度と地盤剛性の影響が支配的であること，終局状態である左側壁の斜め引張破壊が生じる断層変位の偶発的不確実さ要因によるばらつきは，地盤剛性が支配的であることがわかった．一方，本検討条件においては，地盤強度が偶発的不確実さ要因によるばらつきに及ぼす影響は小さかった．

参考文献

1) 佐々木智大・樋口俊一：断層変位を受けるボックスカルバートの損傷メカニズムに関する研究，土木学会論文集 A1（地震工学論文集 Vol. 37），2018 年(掲載予定)．

2) （一社）日本原子力学会：AESI-SC-P006:2007 日本原子力学会標準 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全性評価実施基準：2007，2007 年．