大林組技術研究所報 No. 79 2015

非線形三次元 F E M 解析による断層上の 地中 R C 構造物の損傷評価

樋口俊一 米澤健次穴吹拓也 江尻譲嗣

Damage Estimation of Underground Reinforced Concrete Structure Subjected to Fault Rupture Using Non-Linear Three-Dimensional Finite Element Analyses

Shunichi Higuchi Kenji Yonezawa Takuya Anabuki Joji Ejiri

Abstract

This research focused on damage estimation for an underground reinforced concrete structure placed on a fault line in the case of a fault rupture. A three-dimensional finite element analysis that considered the non-linear behaviors of both the soil and reinforced concrete was applied to clarify the relations between the fault rupture directions and the fracture mode of the structure. Different fracture modes for the structure, in terms of the direction and dislocation of the fault rupture, were observed in the results. In addition, two limit fault dislocations focused on the structural performance were proposed: a member failure limit and structure destruction limit.

概 要

本研究は、岩盤の断層直上に設置し、埋め戻した鉄筋コンクリート製ボックスカルバート構造物を対象とし、 断層変位による構造物の損傷と破壊モードを解析的に検討したものである。構造物軸線に対して斜行した低角断 層を想定し、非線形三次元FEMモデルを用いて、逆断層及び正断層変位を漸増させる地盤-構造物連成解析を実 施した。解析結果について、構造物の損傷と破壊モードを作用外力と関連付けて考察したところ、逆断層の場合 には断層変位の増加に伴い、構造物と周辺岩盤のり面間の埋戻土の土圧増加により底版がせん断圧縮破壊に至る ことがわかった。一方、正断層の場合には全体系での破壊は解析では確認できなかった。さらに、構造物の損傷 状態を、構成部材が破壊に至る断層変位量と、構造物が崩壊に至る断層変位量の2つの観点から整理した。

1. はじめに

近年,内陸活断層地震に起因する地表面変状の報告が 増えつつあり,海外では1999年の台湾・集集地震の事例 に代表される,大規模な地盤変状の影響で構造物に大き な被害が生じた事例が報告されている¹⁾。断層近傍に構 造物を建設する際にはそれを避けて計画することが従来 の考え方であるが,文部科学省地震調査推進研究本部等 による活断層の調査・研究の進展により,交通・エネル ギー等のライフライン構造物において,既設構造物に対 する断層変位の影響を再評価する必要性が想定される。

構造物に対する断層変位の影響については、例えば常 田は構造物側の工学的対応を整理・考察しており²,近 年断層変位を考慮した構造物の設計・施工事例^{例えば3)}も増 えつつある。しかしながら、地盤の拘束により断層変位 の影響を大きく受ける地中構造物については、構造安全 性のみならず、使用性等に対する損傷評価基準の設定に 着目した影響評価の実績や検証が十分とは言えない。

このような背景から,本研究では岩盤上に設置された

地中鉄筋コンクリート製ボックスカルバート構造物を対 象とし、断層変位による構造物の損傷と破壊モードを解 析的に解明し、損傷評価基準の考え方を整理した。

2. 検討方法

2.1 検討対象

Fig. 1に検討対象とする鉄筋コンクリート製ボックス カルバート構造物(以下, RC構造物とする。)と断層お よび表層地盤の関係を模式的に示す。また, RC構造物の 横断面及び配筋状況をFig. 2に示す。

RC構造物は岩盤を掘削したトレンチに設置された三 連のボックスカルバートとし、奥行き方向16mの1ブロ ックを検討対象とした。RC構造物底面は岩盤に直接接し、 側面及び上面を埋戻土で覆い、土被りを8mとした。

断層はRC構造物底面に対してほぼ対角線に走行し,対象とするブロック中心からみた傾斜角度(dip angle)は約30°とした(後出, Fig. 6)。Photo1に3Dプリンタで製作したRC構造物及び周辺岩盤の模型を示す。



Fig. 1 RC構造物と断層の位置関係 Locations of RC-Structure and Fault



Cross-Section and Bar Arrangement of the RC-Structure

写真より、断層走向とRC構造物の軸方向が一致しない ために、岩盤のり面と断層線が複雑に交差する様子が確 認でき、断層変位によりRC構造物は複雑な挙動を示すも のと推察できる。

なお、本来は隣接するブロックとは軟質目地材等を介 して接するためブロック間に相互作用が生じるが、本検 討ではその影響は考慮しないこととした。

2.2 解析モデル

2.2.1 解析プログラム 解析には大林組が開発した 有限要素解析プログラム「FINAL-GEO」⁴⁾を用いた。 FINAL-GEOは、多くの検証実績を有するコンクリート材 料構成モデル⁵⁾を導入するとともに、大規模高速化に適 した連立方程式の解法を用いて演算速度を従来から飛躍 的に高速化した。

2.2.2 解析モデル Fig. 3に3次元FEMモデルを示す。 モデルの座標系は、RC構造物の横断方向をX方向、RC 構造物の軸方向をY方向、鉛直方向をZ方向、岩盤表面を 平面で定義し、検討対象範囲は断層面を包含するように、 RC構造物底面の中央を原点としてX方向122m、Y方向



Photo 1 RC構造物及び周辺岩盤の3D模型 3D Modeling of the RC-Structure and the Bedrock

100m, Z方向13.9mの範囲とした。

3次元モデルは岩盤を剛体と仮定し、その上にRC構造物と表土・埋戻土層を非線形ソリッド要素でモデル化した。本モデルにおいて、断層変位は上盤側岩盤表面の強制変位として与えた。即ち、岩盤は剛体と仮定しているので、岩盤の変形は考慮されていない。

表土・埋戻土の領域は、RC構造物の変形による周辺地 盤への影響範囲がRC構造物底面から地表面まで45度方 向に拡がると仮定してその外側にある程度の余裕を確保 するとともに(前出, Fig. 1),断層面がモデルのX方向 境界と交差しないように、モデル範囲を適宜拡大した。

RC構造物の要素分割は部材厚方向の要素分割数を4以上とした。一方,RC構造物軸方向は横断方向と比較して変形が生じにくいと考えられることから,部材厚(1.0m~1.3m)も考慮して1m程度の要素分割とした。

表土・埋戻土の深さ方向の要素分割は最大1.0m程度と した。また,RC構造物の周囲とその上部は自重載荷によ って地盤に不自然な応力が生じることを避けるため,初 期の自重載荷解析においては,二重節点を設けて鉛直方 向の自由すべりを許容した(後出,Fig.4①)。



Fig. 3 3次元FEMモデルの概要 Outline of the 3D FE Model

表土・埋戻土およびRC構造物はいずれも六面体要素に よりモデル化した。RC構造物の主鉄筋及び面外せん断補 強筋は分散鉄筋要素(コンクリートと鉄筋の剛性の重ね 合わせ)によりモデル化した。ただし、斜め方向に配置 される壁上下端のハンチ部補強筋はトラス要素(補強筋 軸方向のみの剛性を有する線材要素)によりモデル化し た。RC構造物ブロック軸方向端面両側は地盤要素で埋戻 し、解析時にRC構造物内空部分に土がせり出さないよう に1要素分を線形材料とした。

表土・埋戻土,岩盤表面, RC構造物のそれぞれの境界 面には接合要素(面的なジョイント要素)を挿入し,相 互のすべり及び剥離を表した。なお,本解析モデルの規 模は総節点数約11万,総自由度数約30万である。

2.2.3 材料特性および構成則 表土・埋戻土の構成 則はバイリニアモデル(2次剛性なし)とし,破壊条件は Drucker-Pragerの条件を適用した。Table 1に表土・埋戻土 の物性値を示す。バイリニアモデルであることから,剛 性値は破壊時のひずみの適合性を考慮し,静的物性値(変 形係数)を用いた。ポアソン比はv=0.33とした。

Table 2にコンクリートの材料特性値を示す。引張側構 成則は、ひび割れ強度までは弾性、ひび割れ強度後はコ ンクリートの破壊エネルギーに基づく軟化特性を適用し た。圧縮側構成則は、圧縮強度に達するまでは修正Ahmad モデルを適用し、圧縮強度後はコンクリートの破壊エネ ルギーに基づく軟化特性を適用した。ひび割れ後のせん 断伝達特性及び圧縮強度低減特性は長沼モデルを適用し た。コンクリート構成則の詳細は文献5)を参照されたい。

鉄筋の構成則は降伏強度を折れ点とするバイリニアモ デルを適用した。Table 3に鉄筋の材料特性を示す。

2.2.4 接合要素 Table 4に本解析における接合要素の特性を示す。表中の接合要素の部位番号①~⑤は Fig. 4に示すものである。岩盤~周辺地盤間のせん断方向 は摩擦のみを考慮した。また、いずれも粘着(付着)力 は考慮しないこととした。

Table 1(a) 表土・埋戻土の物性値(その1) Material Properties (soil-1)

土質	単位体積重量γ (kN/m ³)	静的変形係数Es (N/mm ²)	
表土	14.4	109o ^{0.73}	
埋戻土	19.3	$79\sigma^{0.18}$	
2/2 3			

 $\sigma = 2/3\sigma_v$

Table 1(b) 表土・埋戻土の物性値(その2) Material Properties (Soil-2)

Material Troperties (Soli 2)			
土質	内部摩擦角φ	粘着力c	
	(°)	(N/mm^2)	
表土	3.0	0.060	
埋戻土	40.0	0.035	

Table 2 コンクリートの材料特性値 Material Properties (Concrete)

ヤング 係数 (N/mm ²)	ポアソ ン比	圧縮強 度f _c (N/mm ²)	引張強 度 f _t (N/mm ²)	単位体 積重量γ (kN/m ³)
2.35×10 ⁴	0.20	23.54	1.88	24.0

Table 3 鉄筋の材料特性値 Material Properties (Rebar)

	1	()	
ヤング 係数 (N/mm ²)	ポアソン 比	引張強度f _t (N/mm ²)	降伏後の剛 性低下率
2.00×10^{5}	0.30	345.0	0.01

2.3 解析方法および解析ケース

2.3.1 解析方法 解析は自重載荷と断層変位載荷の 2段階からなる。Fig.5に各解析段階でのモデルの境界条 件を示す。本モデルでは岩盤を剛体として扱うため、岩 盤表面位置を固定または強制変位境界とした。具体的に は自重載荷時は岩盤表面位置を全て固定として載荷し、 断層変位載荷では上盤側の岩盤に強制変位を与え、下盤 側の岩盤を固定した。

表土・埋戻土の側面境界は、自重載荷時は鉛直ローラ

ー,断層変位載荷時は自重載荷により生じた水平反力を 与える荷重境界とした。

2.3.2 解析ケース 断層変位として正断層型,逆断 層型の変位パターンを入力した。なお、本解析では断層 面とRC構造物の座標系が一致していないため、断層変位 δはFig. 6に示すようにX, Y, Z成分それぞれを断層面に 投影した時の合成変位で表現される。

2.3.3 載荷ステップ δは1ステップあたり1mmの 強制変位増分で,最大断層変位500mmまで漸増単調載荷 した。

2.4 構造物への影響評価基準

断層変位に対するRC構造物と地盤の挙動を考察し, RC構造物の損傷過程および破壊モードを把握した上で, 限界断層変位を設定した。本検討では部材限界変位と空 間保持限界変位の2種類の限界断層変位を評価基準とし た。これは,不静定構造物は一つの部材が破壊しても, 直ちにその構造物が目的とする機能を損なうとは限らな いからである。

2.4.1 部材限界変位 部材限界変位は, RC構造物の 底版, 側壁, 隔壁あるいは頂版のいずれかが破壊に至る 時の断層変位とした。

2.4.2 空間保持限界変位 本検討では構造物全体が 崩壊し,目標とする機能(空間保持機能)を損なう時の 断層変位を,空間保持限界変位として定義した。ただし 数値解析においては,部材が破壊に至った後は応力の再 分配が上手く表現できずに数値的不安定現象が生じる場 合があり,構造物全体が崩壊に至るまでの信頼できる解 析結果が得られない場合もある。そのような場合におい ては,空間保持限界変位は数値的不安定現象が生じた断 層変位以上にあるものと判定した。

3. 逆断層変位によるRC構造物の影響評価

3.1 地盤の変形モード

Fig. 7に逆断層方向への断層変位を200mm作用させた際の,(a)モデル全体の地表面の変形状況,と(b)モデル中央における切断面の変形状況およびせん断ひずみコンター,を示す。地表面には断層の段差に応じた上盤側の隆起が見られ,さらにRC構造物と岩盤に挟まれた部分では大きな水平方向の圧縮を受けた盛り上がりが見られる。

3.2 RC構造物の変形モードと損傷状況

Fig. 8に断層変位200mm時における構造物上流側から みたRC構造物の変形状況を底版底面に作用する鉛直応 力とともに示す。ここで,RC構造物の軸方向に対してY 軸原点側を上流側,反対側を下流側と定義した(前出, Fig. 3参照)。このときRC構造物は断層線に沿って下盤 側に傾き,上流側の右端部で下盤に集中的に支持される。 したがって,鉛直反力の大部分は断層線に沿った直線上 と,上流側端部に集中する。また,上盤部下流側では底

	Table 4	接合要素の特性
Contact	Element's	Conditions and Properties

1				
如位	自重載荷		断層変位載荷	
고마여러	せん断	面法線	せん断	面法線
①構造物周面 上部	自由	接合	接合	接合
 2 岩 盤 ~ 表 土・埋戻土間 	接合	接合	摩擦 (φ16°)	接触・ 剥離
③構造物上面 ~周辺地盤間	接合	接合	摩擦 (φ10°)	接触・ 剥離
④構造物側面 ~周辺地盤間	自由	接合	摩擦 (φ10°)	接触・ 剥離
⑤構造物底面 ~岩盤間	接合	接合	摩擦 (φ30°)	接触・ 剥離

①構造物周面上部 ①構造物周面上部



Fig. 4 接合要素の配置





Fig. 6 断層変位成分 Fault Displacement Components

面と岩盤が接する部位があり, RC構造物にはたわみや変形が生じている。

Fig. 9に逆断層変位におけるRC構造物の変形モードの 概念図をモデル中央断面の変形・せん断ひずみコンター とともに示す。これよりRC構造物は岩盤により押し上げ られ、底版には断層線に沿って大きな支圧力が作用する とともに、両側の岩盤のり面は接近する方向に変位する ため、水平方向に圧縮力が作用することがわかる。

RC構造物のひび割れ損傷進展状況をFig. 10に、底版の ひび割れ損傷進展状況をFig. 11に示す。図中の黒線はひ び割れを表し、赤および黄色部分は最大圧縮強度到達後 に軟化した状態の(以下,圧縮軟化域とする)コンクリ ート要素を示す。底版では断層線に沿って圧縮軟化域に 到達した要素が広がっている。これらより、頂版、側壁 及び隔壁と比較して、特に底版の損傷が大きいことがわ かる。前述のように、逆断層変位においてはRC構造物両 側の岩盤のり面が接近する方向に移動し、変位の進展に 伴って底版には大きな軸圧縮力が作用し、同時に断層が 押し上げることによる支圧力(せん断力)が作用する。 このようなメカニズムから、逆断層変位に対する底版の 破壊モードとして圧縮・せん断破壊が現われるものと考 えられる。これに対して頂版,側壁及び隔壁では圧縮軟 化に至った要素が少なく損傷の程度は比較的軽微である。

3.3 限界断層変位の設定

3.3.1 部材限界変位 部材限界変位を設定するため に, Fig. 12に示す各断面・位置について軸ひずみ(符号: 引張+, 圧縮-)に着目して整理した。

Fig. 13に代表的な断面・位置における底版の断層変位 量に対する軸ひずみの推移を示す。上流側のFace 1にお いては底版①と底版②、中央のFace 2では底版②,下流 側のFace 3では底版②と底版③の軸ひずみが大きくなり, 底版の損傷および変形が断層線に沿って集中することが わかる。各部の軸ひずみの比較から,底版の軸ひずみの 発生量は底版②で顕著であり,底版が部分的な軸圧縮破 壊に至るものと推察できる。また,この破壊領域の拡大 に伴って,底版②においてはFace 1では断層変位約 170mm時から,Face 3では断層変位約310mm時からそれ ぞれの軸ひずみが急激に進展している。一方,Face 1・ 底版①の軸ひずみおよび,Face 3・底版③の軸ひずみは 断層変位100mmで増加し始めるがその増加傾 向は約200mmで概ね収束し,断層変位約350mmまでは大 きな増加傾向を示していない。

以上より,底版は断層変位約170mmで部分的に破壊し 始め,断層変位約310mmで底版全体の破壊状態に至ると 考えられる。

3.3.2 空間保持限界変位 Fig. 14に断層変位約 370mm時と約380mm時の底版の損傷・変形状況を示す。 断層変位約370mm時までは構造物の変形状況に不自然 な現象は生じないが,以降のステップにおいては,徐々 に底版部の変形状況に乱れが生じ数値的不安定現象が現





(b) モデル中央断面の変形状況とせん断ひずみコンター
 Fig. 7 3次元FEMモデルの変形状況(逆断層)
 Deformation Shape of the Model (Strike Slip)



(a) 構造物変形状況 (b) 底面鉛直応力コンター
 Fig. 8 RC構造物変形状況と底面鉛直方向応力分布
 Deformation of the RC-Structure and the Vertical Stress
 Distribution on the Base Slab (Strike Slip)





Conceptual Diagram of the Deformation Mode of the RC-Structure under the Strike Fault Rupture



(c) 断層変位300mm

Fig. 10 RC構造物のひび割れ損傷進展状況

(Strike Slip)







断層変位370mm時 (b) 断層変位380mm時 (a) Fig. 14 断層変位約370mm時と約380mm時の 底版の損傷・変形状況

Crack Appearance and Deformation of the Base Slab at the Fault Displacement of 370mm and 380mm

われ、構造物に不自然な挙動が見られる。このように断 層変位370mm以降の解析結果は信頼性に劣るものと考 えられるため、空間保持限界変位は370mm以上とした。







Fig. 13 底版の断層変位量に対する軸ひずみの推移 Development of Axial Strains of the Base Slab in terms of the Fault Displacement (Strike Slip)

正断層変位によるRC構造物の影響評価 4.

地盤の変形モード 4.1

正断層変位500mm時における地表面の鉛直変位コン ターと、解析モデルの中央断面における地盤とRC構造 物の変形状況をFig. 15に示す。RC構造物の左側側面にお いては周辺地盤と離間が生じ, RC構造物周辺の地盤は 引張・せん断ひずみが支配的であることがわかる。

4.2 RC構造物の変形モードと損傷状況

Fig. 16に断層変位300mm時における,逆断層と正断層 のRC構造物躯体の損傷状況を比較して示す。逆断層変 位に比べ正断層変位では圧縮軟化に至る要素が少ない。 特に底版の損傷程度には明確な違いがみられ, 圧縮軟化 に対する損傷が軽微である。Fig. 17に断層変位300mmお よび500mm時のコンクリート躯体の最大主ひずみコン ターを, Fig. 18に断層変位500mm時の底版の支圧力コン ターを示す。正断層変位を受ける場合は頂版に大きな引 張ひずみが生じる領域が広く,曲げ・引張力が卓越して いる。また,底版の支圧力コンターより,断層線上と沈 み込む岩盤に接触する隅角部に高支圧領域がみられる。 Fig. 19に示すように正断層変位ではRC構造物両側の岩 盤のり面が互いに離れる方向に移動するため逆断層のよ うな圧縮力は生じず,沈み込む岩盤に接触した底版隅角 部と断層線上において鉛直方向の支圧力とRC構造物底 版を引き伸ばす方向の摩擦力が生じる。よって,正断層 変位の場合には逆断層で確認されたRC構造物躯体の圧 縮・せん断による破壊は生じない。一方で頂版には大き な引張ひずみが生じることから,これによる鉄筋の引張 破断に対しての検討が必要である。

4.3 限界断層変位の設定

4.3.1 部材限界変位 Fig. 20に主筋(X方向)と配 力筋 (Y方向)の鉄筋ひずみコンターを示す。図中のmax 値は各要素重心位置のひずみの最大値を示す。ここで鉄 筋のひずみが要素ひずみで代表されると仮定して、鉄筋 破断時の要素ひずみの上限値を、主筋は7.0%、配力筋は 3.0%としてRC構造物の部材限界変位を評価した。主筋に ついては沈み込む岩盤に支持された底版隅角部の1要素 に支圧により局部的に大きなひずみが発生しているが, その他の要素では発生ひずみは大きくても2.0%程度で ある。これは上限値の7.0%よりも十分小さいため、鉄筋 が破断する可能性は小さいと考えられる。一方、配力筋 では断層変位400mm時に下流側頂版隅角部に上限値の 3.0%を超えるひずみが発生し、断層変位500mm時では最 大値4.32%を示した。断層変位が約350mmに達すると一 部の要素ひずみは上限値3.0%を超過することから,配力 筋が破断する可能性が高いと判断し、断層変位約350mm を部材限界変位と設定する。

4.3.2 空間保持限界変位 RC構造物の性能として, 一部の配力筋が破断した場合でも直ちに空間保持能力が 損なわれる状況には至らない。しかしながら,本解析に



(b) モデル中央断面の変形状況とせん断ひずみコンター
 Fig. 15 3次元FEMモデルの変形状況(正断層)
 Deformation Shape of the Model (Normal Slip)



Comparison of the Crack Development of the RC-Structure during Fault Rupture (Normal and Strike Slip)





Fig. 18 正断層変位500mm時の底版支圧力コンター Vertical Stress Distribution on the Base Slab

Distribution of the Maximum Principal Strain Appeared on Concrete at the Fault Displacement of 500mm (Normal Slip) at the Fault Displacement of 300mm and 500mm (Normal Slip)



Distribution of the Maximum Principal Strain Appeared on the Rebar in Terms of X and Y Directions

おいては鉄筋破断を考慮していないため、鉄筋破断の可 能性が高いと判断した断層変位量以上の解析結果につい ては信頼性に劣る。したがって、解析的な限界も含め空 間保持に対する限界変位は350mm以上と判断すること とした。

以上の考察から設定した断層変位の方向と、構造物の 部材限界変位および空間保持限界断層変位の関係を、 Table 5に整理して示す。

5. 結論

岩盤の断層直上に設置し、埋め戻した鉄筋コンクリー ト製ボックスカルバート構造物に対して、当該構造物と 周辺地盤をモデル化した非線形有限要素解析を行い、断 層変位が構造物に及ぼす影響を解析的に評価した。以下 に得られた知見と考察を示す。

 構造物破壊の観点からは、逆断層変位の方が正断層 変位の場合よりも厳しい条件となることがわかった。 正断層では変位の増大に伴い構造物に大きな剛体回 転が生じるが、逆断層変位に比べると構造物の損傷 は軽微である。



Fig. 19 正断層変位におけるRC構造物の 変形モード概念図

Conceptual Diagram of the Deformation Mode of the RC-Structure under the Normal Slip Fault Rupture

Table 5	解析により設定した限界断	層変位
Critical F	ault Displacement of the St	ructure
Extract	ed from 3D FE Analysis R	esults

將國亦位	限界断層変位(mm)		
	部材限界	空間保持限界	
逆断層	310程度	370以上	
正断層	350程度	350以上	

2) 逆断層変位の場合,断層線上の底版に作用する支圧 力と,構造物両側の岩盤のり面の接近による側方土 圧の増大により,底版のせん断圧縮破壊が先行する ことがわかった。

- 3) 正断層変位の場合,岩盤のり面が離れて側方土圧が 減少するため底版の圧縮破壊は生じにくいことがわ かった。一方,頂版の隅角部において配力筋が破断 する可能性があることがわかった。
- 4) RC構造物に期待する機能と、解析による損傷状況の 考察から、各断層変位に対する限界断層変位を設定 した。

参考文献

 1) 土木学会 地震工学委員会:地下構造物の耐震性能照 査と地震対策ガイドライン(案),地下構造物の合 理的な地震対策研究小委員会,2011.

- 常田賢一:土木構造物における地震断層の工学的 対応に関する考察,土木学会論文集 No. 752/ I- 66, pp.63 -pp.77, 2004.
- 3) 畔取良典,長瀧元紀,泉谷 透,北田奈緒子:鉄道シ ールドトンネルに対する断層変位対策の一事例,土 木学会第61 回年次学術講演会, 3-096, 2006.9.
- *澤健次,穴吹拓也,江尻譲嗣:大規模・高速化非 線形FEM解析ソフト「FINAL-GEO」,大林組技術 研究所報, No.75, 2011.12, CD-ROM.
- 5) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O., Eto, H. : Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Rein-forced Concrete Scaled Model Using Three Dimensional Finite Element Method, 13th WCEE, Paper No.586, 2004.8.