

地震時に地盤中の弱層に生じる相対変位の解析と一考察

電力中央研究所 正会員 ○宮川 義範
電力中央研究所 正会員 山野井 悠翔

1. はじめに

発電所を構成する地中構造物の中には地盤中の弱層と交差する例があり、耐震性への影響が懸念されている。この問題では、対象領域の外から能動的に変位が加わる断層変位の場合と異なり、地震動に起因する受動的な挙動が重要になる。別途実施中の構造物を含めた実験・解析に先立って、構造物を含まない地盤と弱層から成る系を対象としたやや広域の解析により、弱層沿いに生じる相対変位のオーダーと傾向を調べた。

2. 解析計画

図-1 に示す $900\text{m} \times 900\text{m} \times 210\text{m}$ の一様な岩盤領域に $300\text{m} \times 300\text{m}$ の弱層が含まれる系を基本ケースとする。ソリッド要素の一边を 5m 程度とする方針で要素分割を行い、節点数 $1,180,650$ 、要素数 $1,127,500$ （うち弱層は $50 \times 50 = 2500$ 要素）のモデルを作成した。解析ケースは、表-1 に示す 14 通りとした。岩盤は線形弾性体とし、密度を 2.0t/m^3 、ポアソン比を 0.3 とした。弱層は、剥離・すべり挙動を表現するための非線形の面ジョイント要素で模擬し、幅を 100mm 、密度を 1.8t/m^3 とした。弱層のせん断弾性係数として、文献 1) の $G_0 = 34.3(\sigma'_{m0}/0.09807)^{0.6}[\text{MPa}]$ を参照し、便宜的に σ'_{m0} を上載圧と読み替えて適用した。引張強度と粘着力は同じと仮定した。基本ケースの下端は、弱層をはさんだ相対変位をゼロに制御するために固定境界とし、ケース 1、4 を通して粘性境界を設けた場合との違いを比較した。側方は周期境界とした。入力波形として、図-3 に示す兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測波を地下 210m まで引き戻した A 波（E+F 波と 2E 波の 2 通り、12 秒間、E+F 波の最大振幅 $X:339.38\text{Gal}$, $Y:466.44\text{Gal}$, $Z:251.87\text{Gal}$ ）を基本としつつ、波形の影響を確認するために、新潟県中越沖地震の KiK-net 川西観測点深部の波形で、方向毎に A 波（E+F）と同じ最大振幅に調整した B 波（20 秒間）も一部で用いた。3%のレーリー減衰を設定し、時間分割は 0.01 秒とした。地震応答を求める前には自重解析を行った。解析プログラムとして E-FrontISTR を使用した。

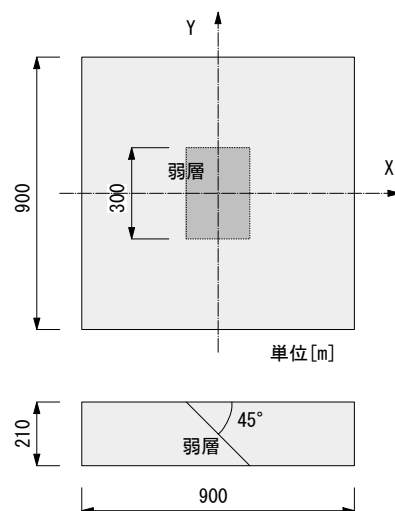


図-1 解析の対象

神戸海洋気象台観測波を地下 210m まで引き戻した A 波（E+F 波と 2E 波の 2 通り、12 秒間、E+F 波の最大振幅 $X:339.38\text{Gal}$, $Y:466.44\text{Gal}$, $Z:251.87\text{Gal}$ ）を基本としつつ、波形の影響を確認するために、新潟県中越沖地震の KiK-net 川西観測点深部の波形で、方向毎に A 波（E+F）と同じ最大振幅に調整した B 波（20 秒間）も一部で用いた。3%のレーリー減衰を設定し、時間分割は 0.01 秒とした。地震応答を求める前には自重解析を行った。解析プログラムとして E-FrontISTR を使用した。

3. 解析結果および弱層のせん断抵抗に関する解釈

弱層の水平方向中央（全体座標系 $Y=0$ ）の節点列の変位を出力してその時刻歴中最大値を整理し、さらにその鉛直方向に沿った最大値を表-1 に記載した。表枠外に記したとおり、弱層を参照したローカルな座標系で見た値である。ケース 1 と 10 を比較すると、入力が 50%になったとき、相対変位がそれ以上に低下していて、弱層の非線形化する境が両ケースの間にあることを示唆している。下端境界条件に関してケース 1 と 4 を比べると、他の因子に比して（境界近傍では差が確認されたものの）最大変位への影響は小さい。ケース 13 のように傾斜角を 90° にすると Y 方向の相対変位が生じない点は、破碎帯を挟んだ対称性から自然な帰結であるが留意すべきである。弱層の広さと粘着力を横軸として表-1 の結果をプロットしたのが図-3 である。弱層の広さが増すほど相対変位は増大しているが、増大幅は頭打ちになる傾向が認められた。より深い部分までモデル化したとき、必ずしも一次の振動モードが卓越しないためと捉えている。粘着力を 500kPa 以上としたケースでは相対変位が非常に小さくなっており、これも弱層が非線形領域に至らなくなるためと解釈できる。

トンネルの断面をいかに大きく見積もっても弱層の面積に比べればはるかに小さく、構造物が相対変位応答
キーワード 弱層, 破碎帯, 大規模解析, 地中構造物, 相対変位

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財) 電力中央研究所 TEL 070-6568-9680

表-1 解析ケースと主な結果

No.	解析領域	下端境界	入力波形	周辺岩盤	弱層				解析結果 (Y=0; 弱層をはさんだ相対変位) [mm]			
				せん断弾性波速度[m/s]	領域	傾斜角 [deg]	剛性	引張強度・粘着力[kPa]	x	y	z (開き)	z (閉じ)
1	900m×900m × 210m	固定	A(E+F) × 1.0	700	300m × 300m	45	拘束圧依存	100	43.51	40.59	0.21	-0.18
2					200m × 200m				34.26	34.33	0.21	-0.17
3					100m × 100m				10.32	13.16	0.23	-0.14
4		粘性	A(2E) × 1.0		300m × 300m		周辺岩盤相当	十分大きい	53.34	43.59	7.72	-0.14
5									0.03	0.08	0.06	-0.03
6		固定	A(E+F) × 0.5 B × 1.0				0.15	0.40	0.21	-0.14		
7							1000	0.15	0.40	0.21	-0.14	
8							500	2.67	4.36	0.21	-0.14	
9							10	58.80	48.90	0.32	-0.19	
10							拘束圧依存	100	11.10	5.87	0.16	-0.08
11									27.16	12.56	0.24	-0.22
12									35.07	105.71	64.71	-4.44
13									25.21	0.01	0.08	-0.06
14※	2700m×2700m × 630m	A(E+F) × 1.0	700	900m × 900m	45			59.38	44.50	0.21	-0.20	

※個々の要素の大きさを3倍

弱層座標系 x : 傾斜方向、y : 走向方向、z : 法線方向

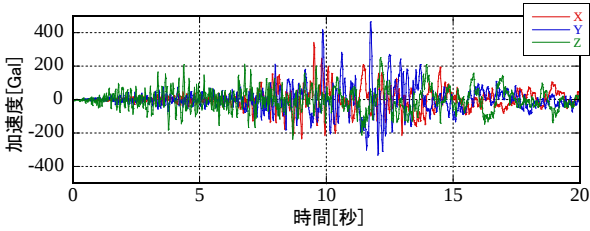
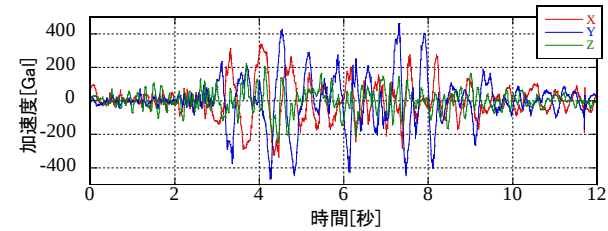


図-2 入力波形 (左 : A 波、右 : B 波)

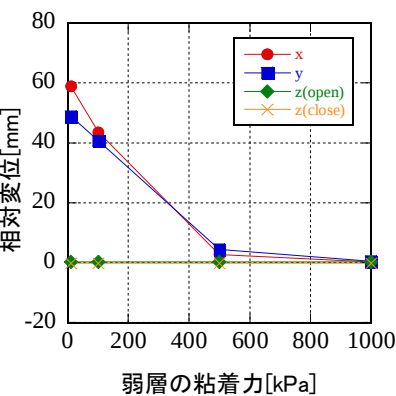
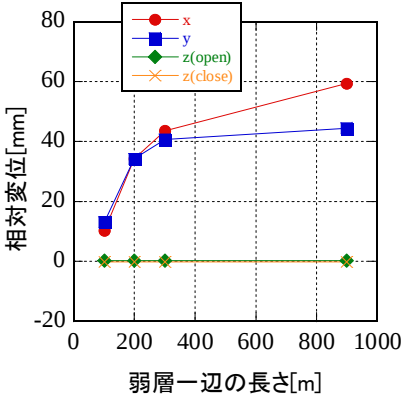


図-3 相対変位に影響を及ぼす因子 (左 : 広さ、右 : 粘着力)

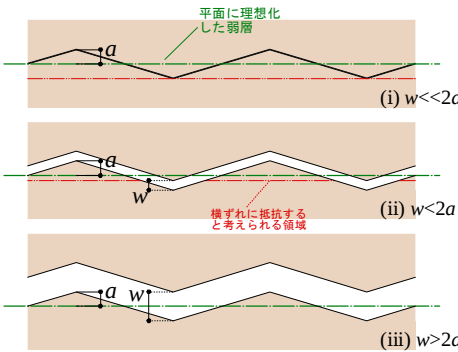


図-4 弱層の平面性と噛合い抵抗

を抑制する効果は極めて限定的と推察される. よって、相対変位応答の推定精度を高めるには、弱層の面積や、実質的なせん断強度を考慮することが重要である. その観点から、今回の解析における粘着力の意味合いについて補足的に考察する. 図-4 では、弱層を定波長の周期的な三角波で模式化した. 平面までの距離にして $\pm a$ の範囲で凹凸があるとし、初期状態における弱層の幅に地震時の法線方向の開きを加えた長さを w と置いた. 今回の解析における粘着力は、 $w > 2a$ ならば弱層を構成している粘土などの弱い材料自体の粘着力に、 $w \ll 2a$ ならば周辺岩盤のせん断強度に相当すると考えている.

4. まとめ

900m×900m×210m の領域に 300m×300m の弱層が含まれる系を基本とした大規模解析を行い、弱層沿いの相対変位応答に対する影響因子と度合を整理した. 解析精度を向上させるにはより正確な弱層のモデル化が重要だが、ひとまず弱層の平面性を仮定した場合、mm～cm オーダーの相対変位が生じうるとの結果を得た.

参考文献

1) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術＜技術資料＞，2009.2
謝辞：E-FrontISTR は、FrontISTR（東京大学奥田研究室）を基に大成建設・アーク情報システム・東京大学地震研・防災科学技術研究所・東電設計・電力中央研究所の6機関が機能拡張したものである. 関係各位に謝意を表する.