

博士論文 (要約)

不確実性パラメータを考慮した断層をまたがる
構造物の大規模並列解析手法に関する研究

三橋 祐太

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

博士論文

不確実性パラメータを考慮した断層をまたがる
構造物の大規模並列解析手法に関する研究

Study on Large-Scale Parallel Analysis Considering
Stochastic Parameters for Fault Crossing Structures

平成 29 年 8 月

三橋 祐太

目次

第 1 章	序論	1
1.1	地震とシミュレーション技術	1
1.2	有限要素解析技術	4
1.3	研究目的	21
1.4	本論文の構成	21
第 2 章	地盤解析技術と有限要素法	25
2.1	地盤のモデル化とメッシュ生成	25
2.2	地盤中の不連続面のモデル化	29
2.3	地盤の不確実性	32
第 3 章	不連続面を考慮した地盤のモデル化に係る要素定式化の提案とその性能評価	35
3.1	緒言	35
3.2	改良 Goodman ジョイント要素	36
3.3	ジョイント要素の大規模解析への適用性	43
3.4	結言	54
第 4 章	地盤モデルのメッシュ生成技術の提案とその性能評価	55
4.1	緒言	55
4.2	不連続面を考慮したメッシュ生成	56
4.3	不連続面を含むメッシュ生成手法の提案	57
4.4	提案手法の実問題への適用（不連続性岩盤の剛性評価）	71
4.5	結言	78
第 5 章	不確実性パラメータの同定手法とその性能評価	79
5.1	緒言	79

5.2	神城断層地震の概要	80
5.3	ジョイント要素の地震動力学的シミュレーションへの適用	82
5.4	地盤の不確実性パラメータ	114
5.5	動力学的破壊シミュレーションにおけるパラメータ同定	115
5.6	結言	127
第 6 章	大規模モデルによる断層をまたがる構造物のモデル化とその評価	129
6.1	緒言	129
6.2	断層をまたがる構造物に関する既往の研究と問題点	130
6.3	動力学的シミュレーション解析による断層変位を受ける構造物の評価 . . .	135
6.4	結言	180
第 7 章	結論	181
	謝辞	185
	参考文献	187

目次

1.1	線形弾性体の境界値問題設定	4
1.2	並列計算機におけるネットワーク, メモリ, プロセッサの構成	9
1.3	MPI-OpenMP ハイブリッド並列のイメージ	12
1.4	領域分割の例	12
1.5	有限要素法データの領域分割の例	13
1.6	有限要素法データの領域分割の例 (2)	14
1.7	FrontISTR のプログラム構造	16
1.8	FrontISTR で使用可能な要素タイプ (1)	16
1.9	FrontISTR で使用可能な要素タイプ (2)	17
1.10	R-O モデルの応力-ひずみ関係	19
1.11	本研究の全体構成	23
2.1	地盤を 2 次元ソリッド要素によりモデル化した地中構造物の解析モデル例	26
2.2	等価線形手法	28
2.3	DEM による斜面のすべり検討の例	31
3.1	6-node and 8-node joint elements	36
3.2	Single side of 6-node triangular joint element	37
3.3	Deformation modes of 6-node triangular joint element	38
3.4	8-node quadrilateral joint element	40
3.5	熊本地震を受けた阿蘇大橋西側斜面 (筆者撮影)	44
3.6	すべり安全率の計算手法	45
3.7	解析モデル	46
3.8	入力地震動	46
3.9	せん断応力コンター図 (T=0.0(s))	47
3.10	せん断応力コンター図 (T=5.2(s))	47
3.11	せん断応力コンター図 (T=6.0(s))	47

3.12	せん断応力コンター図 (T=6.3(s))	48
3.13	せん断応力コンター図 (T=6.6(s))	48
3.14	せん断応力コンター図 (T=6.9(s))	48
3.15	せん断応力コンター図 (T=7.2(s))	49
3.16	静的な解析結果による局所安全率コンター図	49
3.17	静的解析と動的解析による局所安全率コンター図の比較	49
3.18	Analysis model and boundary conditions	51
3.19	Deformation diagram and Y-displacement contour	51
3.20	The FEM mesh derived from refinement of the FE mesh	52
3.21	The FEM mesh divided to subdomain using FrontISTR	53
3.22	Comparison of deformation diagrams and Y-displacement contours of rough mesh and fine mesh	53
4.1	不連続面が一枚しかない場合の例	58
4.2	不連続面が複数ある場合の例	58
4.3	Flowchart of making FEM mesh	59
4.4	Division of tetrahedral solid element	60
4.5	Division of 6-node triangular joint element	61
4.6	Division of prism solid element	62
4.7	Definition of Graph	63
4.8	Definition of depth-first search	64
4.9	Definition of modified depth-first search	64
4.10	FEM mesh inserted joint element	65
4.11	Defined graph through meshing	66
4.12	Flow of inserting joint element	67
4.13	FEM mesh after smoothing	68
4.14	Analysis model and boundary conditions	69
4.15	Deformation diagram and Z-displacement contour	70
4.16	MBC モデルにおけるパラメータの設定	72
4.17	解析モデル図	73
4.18	変形図	74
4.19	等価剛性の評価結果	76
4.20	ばらつきの評価結果	77

5.1	震源と断層の位置関係 (赤：震央，青：断層の地表トレース ／地理院地図 (電子国土 Web) に追記)	80
5.2	K-NET 白馬における加速度時刻歴	81
5.3	ジョイント要素の応力変位関係	82
5.4	すべり弱化モデル	82
5.5	解析モデル	84
5.6	断層面のモデル (Case01)	85
5.7	断層面のモデル (Case02)	85
5.8	断層面のモデル (Case03)	86
5.9	粘性境界の設定	86
5.10	解析モデル変形図および鉛直変位コンター図 (単位：m)	87
5.11	断層破壊時刻	88
5.12	断層食い違い量 (Case02 / 単位：m) ($T = 2, 4, 6(s)$)	89
5.13	断層食い違い量 (Case02 / 単位：m) ($T = 8, 10(s)$)	90
5.14	変位応答時刻歴の比較	92
5.15	K-NET 白馬の速度応答時刻歴	93
5.16	解析の速度応答時刻歴	94
5.17	加速度応答時刻歴の比較 (Case01 ／緑：観測記録，黒：観測記録 (ローパス)，赤：解析結果)	95
5.18	加速度応答時刻歴の比較 (Case02 ／緑：観測記録，黒：観測記録 (ローパス)，赤：解析結果)	96
5.19	加速度応答時刻歴の比較 (Case03 ／緑：観測記録，黒：観測記録 (ローパス)，赤：解析結果)	97
5.20	メッシュサイズによる応答の比較 (EW 方向)	98
5.21	メッシュサイズによる応答の比較 (NS 方向)	99
5.22	メッシュサイズによる応答の比較 (UD 方向)	100
5.23	初期応力の方向	101
5.24	応答変位時刻歴	102
5.25	変形図	103
5.26	断層破壊時刻とすべり量コンター図	104
5.27	線形ソルバーの解析時間	106
5.28	並列計算における加速率	107
5.29	ジョイント要素のエネルギー算出方法	108
5.30	モデル全体のエネルギー推移 (粘性境界あり)	109
5.31	モデル全体のエネルギー推移 (粘性境界なし)	110

5.32	理論解との比較における初期応力の方向角と比較位置	111
5.33	理論解との比較（震源から 1km）	111
5.34	理論解との比較（震源から 2km）	112
5.35	理論解との比較（震源から 4km）	112
5.36	理論解との比較（震源から 6km）	113
5.37	破壊時刻コンター図	113
5.38	ベイズ最適化のイメージ図	118
5.39	ステージごとの適合度の変化	119
5.40	探索された解析ケースのプロット	120
5.41	探索により得られた上位 20 ケースの SMGA(池田 [24] らの SMGA を追加)	121
5.42	探索により得られた上位 20 ケースの応答変位時刻歴	122
5.43	断層破壊時刻	123
5.44	ステージ 1 の応答変位時刻歴（X 方向）	124
5.45	ステージ 1 の応答変位時刻歴（Y 方向）	125
5.46	ステージ 1 の応答変位時刻歴（Z 方向）	125
5.47	ステージ 1 の応答変位時刻歴（Z 方向／グループ分け）	126
6.1	原子力学会調査報告による解析手法	133
6.2	トンネルの解析モデル例（トンネル部拡大）	135
6.3	トンネルの解析モデル例（モデル全体図）	136
6.4	解析モデル全体図	138
6.5	構造物モデル全体図	138
6.6	構造物モデル断面図（メッシュ表示）	139
6.7	構造物モデル断面図（メッシュ非表示）	139
6.8	トンネルモデル図	140
6.9	トンネルの断面図	140
6.10	物性値の検討における変更領域（1）	141
6.11	物性値の検討における変更領域（2）	141
6.12	断層モデルのメッシュ	142
6.13	構造物と地殻モデルのメッシュ	142
6.14	粘性境界の設定	143
6.15	周辺地盤の応力ひずみ関係	143
6.16	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布（Case01～Case03／変形倍率 10 倍／単位:m）	145
6.17	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布（Case01／変形倍率 10 倍／単位:m）	146

6.18	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case02 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	146
6.19	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case03 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	147
6.20	トンネルの $t = 5(s)$ 最大せん断ひずみ (Case01 / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	147
6.21	トンネルの $t = 5(s)$ 最大せん断ひずみ (Case02 / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	148
6.22	トンネルの $t = 5(s)$ 最大せん断ひずみ (Case03 / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	148
6.23	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case03~Case05 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	150
6.24	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case03 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	150
6.25	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case04 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	151
6.26	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case05 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	151
6.27	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case03 / 単位:m)	152
6.28	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case04 / 単位:m)	152
6.29	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case05 / 単位:m)	153
6.30	トンネル周辺の断層の食い違い量分布 (Case05 / $t = 10(s)$ / 単位:m)	154
6.31	トンネル周辺の断層の食い違い量分布 (Case01, Case03, Case05 / $t = 10(s)$)	155
6.32	全要素最大せん断ひずみ時刻歴 (Case01 / 単位:ε)	155
6.33	全要素最大せん断ひずみ時刻歴 (Case05 / 単位:ε)	156
6.34	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 2.0(s)$ / 単位:m)	156
6.35	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 4.0(s)$ / 単位:m)	157
6.36	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 6.0(s)$ / 単位:m)	157
6.37	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 8.0(s)$ / 単位:m)	158
6.38	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 10.0(s)$ / 単位:m)	158
6.39	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 11.0(s)$ / 単位:m)	159
6.40	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 12.0(s)$ / 単位:m)	159
6.41	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 13.0(s)$ / 単位:m)	160
6.42	地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / $t = 14.0(s)$ / 単位:m)	160
6.43	各時刻の地殻地表面絶対変位コンター図 (Case05 / 単位:m)	161
6.44	各時刻の周辺地盤近傍断層食い違い量コンター図 (Case05 / 単位:m)	162
6.45	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case01, Case06 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	163
6.46	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case01 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	164
6.47	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case06 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m)	164
6.48	トンネルの $t = 5(s)$ 最大せん断ひずみ (Case01 / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	165
6.49	トンネルの $t = 5(s)$ 最大せん断ひずみ (Case06 / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	165

6.50	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case01 / 単位:m)	166
6.51	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case06 / 単位:m)	166
6.52	$t = 10(s)$ の断層食い違い量 (Case04 / 周辺地盤部分 / 単位:m)	167
6.53	強制変位境界条件	168
6.54	最大せん断ひずみ (静的解析 / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	169
6.55	トンネルの $t = 10(s)$ 最大せん断ひずみ (Case04 / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	169
6.56	最大せん断ひずみの動的解析との比較 (単位:ε)	170
6.57	断層モデルのメッシュ (リファイン後)	171
6.58	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case04 / 単位:m)	173
6.59	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case04 / 周辺地盤部分 / 単位:m)	173
6.60	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case04R / 単位:m)	174
6.61	$t = 5(s)$ の断層食い違い量 (Case04R / 周辺地盤部分 / 単位:m)	174
6.62	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case04 / 変形倍率 10 倍 / 単位:m) . . .	175
6.63	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case04W / 変形倍率 10 倍 / 単位:m) .	176
6.64	トンネルの $t = 5(s)$ 変位量分布 (Case04R / 変形倍率 10 倍 / 単位:m) .	176
6.65	トンネルの $t = 5(s)$ 最大せん断ひずみ (Case04 / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	177
6.66	トンネルの $t = 5(s)$ 最大せん断ひずみ (Case04W / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	177
6.67	トンネルの $t = 5(s)$ 最大せん断ひずみ (Case04R / 変形倍率 10 倍 / 単位:ε)	178
6.68	全要素最大せん断ひずみ時刻歴 (単位:ε)	178
6.69	最大せん断ひずみ時刻歴 (単位:ε)	179

表目次

3.1	Physical properties of solid and joint elements	50
4.1	Physical properties of solid and joint elements	69
4.2	物性値一覧	73
5.1	断層パラメータ	86
5.2	解析モデル一覧	87
5.3	スケーラビリティの確認モデル一覧	105
5.4	相関係数一覧	116
5.5	ベイズ最適化の解析結果を用いた不確実性の評価	125
6.1	断層パラメータ	137
6.2	解析ケース一覧	143
6.3	解析用物性値	144
6.4	解析ケース一覧	172

第 1 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 2 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 3 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 4 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 5 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 6 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

第 7 章は単行本もしくは雑誌掲載等の形で刊行される予定があるため、インターネット公表できません。

謝辞

本論文は筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻博士後期課程在籍中の研究成果をまとめたものです。この博士論文を執筆するにあたり、多くの方々にご協力いただきました。謹んでお礼申し上げます。

主査を引き受けていただきました奥田洋司教授に厚くお礼申し上げます。指導教官として本研究を実施する機会を与えていただき、かつ本研究を進めるにあたり、共同研究の開始から4年以上にわたって数多くの場面で有益な示唆を与えていただきました。また橋本学講師にもFrontISTRの改造や論文の執筆において多くの重要な意見をいただきました。心から感謝いたします。

本論文の副査をお引き受けくださいました東京大学大学院工学系研究科山口彰教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科佐々木健教授、東京大学地震研究所堀宗朗教授には貴重なご教示を数多くいただきました。感謝の意を表します。

研究室メンバーの皆様からは、ゼミや日々のディスカッションを通して多くのことを勉強させてもらいました。

会社に勤めながらの博士課程進学を許可いただいた株式会社構造計画研究所の皆様にも大変お世話になりました。内山不二男部長には研究計画の策定などにおいて大変お世話になりました。島袋ホルヘ副部長には業務の調整や研究内容への助言などをいただきました。渡辺高志氏には、検討の実施において協力頂くとともに、研究の進め方や研究者としての在り方などを学ばせてもらいました。岡村航氏には3次元すべり安全率の評価においてご協力いただきました。

本論文3章の熊本地震のシミュレーション解析および5章の神城断層地震のシミュレーションにおいては、防災科学研究所の強震記録を使用させていただきました。謝意を表します。

最後に，仕事と研究を両立するにあたって精神的な支えとなってくれた両親に感謝いたします。

博士課程を通じて得た経験を生かして，これからも研究に取り組んでいきたいと思えます。

平成 29 年 8 月

三橋 祐太

参考文献

- [1] 貝塚爽平. 発達史地形学. 東京大学出版会, 1998.
- [2] Jose F. Vigil. A cross section illustrating the main types of plate boundaries.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/40/Tectonic_plate_boundaries.png,
 (平成 29 年 3 月 16 日閲覧).
- [3] 丸山茂徳. 地球史を読み解く. 放送大学大学院教材. 放送大学教育振興会, 2016.
- [4] R. Hooke. *The Posthumous Works of Robert Hooke, ... Containing His Cutlerian Lectures, and Other Discourses, Read at the Meetings of the Illustrious Royal Society. ... Illustrated with Sculptures. To These Discourses is Prefixt the Author's Life, ... Publish'd by Richard Waller.* Sam. Smith and Benj. Walford, 1705.
- [5] John Michell. Conjectures concerning the cause, and observations upon the phaenomena of earthquakes; particularly of that great earthquake of the first of november, 1755, which proved so fatal to the city of lisbon, and whose effects were felt as far as africa, and more or less throughout almost all europe; by the reverend john michell, ma fellow of queen's college, cambridge. *Philosophical transactions*, Vol. 51, pp. 566–634, 1759.
- [6] Harry Fielding Reid. *The mechanics of the earthquake*, Vol. 2. Carnegie institution of Washington, 1910.
- [7] Koto Bundjiro. On the cause of the great earthquake in central japan, 1891. *The Journal of the College of Science, Imperial University, Japan*, Vol. 5, pp. 295–353, 1893.
- [8] United States Geological Survey. A fence, near Point Reyes, California, offset 8.5 feet by displacement on the fault during the 1906 earthquake.
<https://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/along2.html>, (平成 29 年 3 月 15 日閲覧).
- [9] 狩野謙一, 村田明広. 構造地質学. 朝倉書店, 1998.

- [10] Augustus Edward Hough Love. *A treatise on the mathematical theory of elasticity*. at the University Press, 1920.
- [11] NA Haskell. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 54, No. 6A, pp. 1811–1841, 1964.
- [12] Michel Bouchon. A simple method to calculate green's functions for elastic layered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 4, pp. 959–971, 1981.
- [13] Stephen H. Hartzell. Earthquake aftershocks as green's functions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 5, No. 1, pp. 1–4, 1978.
- [14] 大竹政和, 村松郁栄, 木下繁夫, 福島美光, 香川敬生, 佐藤春夫, 藤原広行. 強震動の基礎 ウェブテキスト 2000 版. 防災科学技術研究所, 2000.
- [15] Katsuhiro Kamae, Kojiro Irikura, and Arben Pitarka. A technique for simulating strong ground motion using hybrid green's function. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 2, pp. 357–367, 1998.
- [16] Aki Keiiti. Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, No. 4, pp. 1217–1231, 1967.
- [17] Irikura Kojiro. Prediction of strong acceleration motion using empirical green' s function. In *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, 第 151 巻, p. 156, 1986.
- [18] Charles L Lawson and Richard J Hanson. *Solving least squares problems*. SIAM, 1995.
- [19] Allen H Olson and Randy J Apsel. Finite faults and inverse theory with applications to the 1979 imperial valley earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 72, No. 6A, pp. 1969–2001, 1982.
- [20] Stephen H Hartzell and Thomas H Heaton. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 imperial valley, california, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No. 6A, pp. 1553–1583, 1983.
- [21] 防災科学技術研究所. 近地強震記録を用いた 2011 年 03 月 11 日東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン解析 (2011/08/12 改訂版).

- http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/inversion/,
(平成 29 年 3 月 15 日閲覧).
- [22] 芝良昭, 野口科子, 佐藤浩章. 強震記録のインバージョン解析に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源過程. 電力中央研究所報告 研究報告, No. 11058, pp. 1–22, 2012.
- [23] 武藤大介, 上野寛, 川添安之. 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の前後に発生した地震の震源過程の解析. 験震時報 = Quarterly journal of seismology, Vol. 78, No. 1, pp. 29–44, oct 2014.
- [24] 池田隆明, 小長井一男, 釜江克宏, 佐藤京, 高瀬裕也. 2014 年長野県北部の地震の被害調査と震源のモデル化. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I975–I983, 2016.
- [25] 防災科学技術研究所. 近地強震記録を用いた平成 28 年 (2016 年) 熊本地震 (4 月 16 日 1 時 25 分、M7.3) の震源インバージョン解析 (2016/8/9 再改訂版) . http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/Kumamoto_20160416/inversion/, (平成 29 年 3 月 15 日閲覧).
- [26] 纈纈一起, 小林広明, 三宅弘恵. 2016 年 4 月 14・16 日熊本地震の震源過程 . <http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/2016kumamoto/index.html>, (平成 29 年 3 月 15 日閲覧).
- [27] 岩切一宏, 川添安之, 長谷川嘉臣. 地震波形を用いた気象庁の震源過程解析: 解析方法と断層すべり分布のスケーリング則. 験震時報 = Quarterly journal of seismology, Vol. 78, No. 1, pp. 65–91, oct 2014.
- [28] 大中康誉, 松浦充宏. 地震発生の物理学. 東京大学出版会, 2002.
- [29] 志田原巧, 末永弘, 中川加明一郎. 断層破碎帯を対象とした原位置簡易透水試験装置の開発と適用性検討. 電力中央研究所報告 研究報告, No. 4038, pp. 1–21, 2005.
- [30] 岡田哲実, 平山伸行. 断層物性評価の高度化のためのサンプリング装置および三軸試験装置の開発. 電力中央研究所報告 研究報告, No. O15006, pp. 1–21, 2015.
- [31] 壇一男, 武藤真菜美, 鳥田晴彦. 動力学的破壊シミュレーションによる断層の連動破壊に関する基礎的研究. 活断層・古地震研究報告, No. 7, pp. 259–271, 2007.
- [32] 入江紀嘉, 壇一男, 生玉真也, 入倉孝次郎. 地中震源断層と地表地震断層の断層パラ

- メータ間の経験的關係を拘束条件とした動力学的断層破壊モデルの構築－強震動予測のための運動学的断層モデルの高度化をめざして－. 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 657, pp. 1965–1974, 2010.
- [33] Eiichi Fukuyama, Ryosuke Ando, Chihiro Hashimoto, Shin Aoi, Mitsuhiro Matsu'ura. A physics-based simulation of the 2003 tokachi-oki, japan, earthquake to predict strong ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 6, pp. 3150–3171, 2009.
- [34] 澤田昌孝. 動力学的破壊進展解析による地表断層変位予測手法の提案. 電力中央研究所報告. 研究報告. 電力中央研究所地球工学研究所 編, No. 14007, pp. 1–25, nov 2014.
- [35] 斎藤正彦. 線型代数入門. 基礎数学 1. 東京大学出版会, 1996.
- [36] Carlos A Felippa. Solution of linear equations with skyline-stored symmetric matrix. *Computers & Structures*, Vol. 5, No. 1, pp. 13–29, 1975.
- [37] Magnus Rudolph Hestenes and Eduard Stiefel. *Methods of conjugate gradients for solving linear systems*, Vol. 49. NBS, 1952.
- [38] E. Barragy and Graham F. Carey. A parallel element-by-element solution scheme. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, No. 11, pp. 2367–2382, 1988.
- [39] Genki Yagawa, Yasushi Nakabayashi, and Hiroshi Okuda. Large-scale finite element fluid analysis by massively parallel processors. *Parallel computing*, Vol. 23, No. 9, pp. 1365–1377, 1997.
- [40] 奥田洋司, 阿南統久. オーダリングによる ebe データ並列有限要素法の効率化. 日本機械学会論文集. B 編, Vol. 65, No. 640, pp. 3869–3876, dec 1999.
- [41] 柄谷和輝, 奥田洋司, 矢川元基. 並列有限要素法による大規模構造問題の解法について. 日本計算工学会論文集, Vol. 1999, pp. 19990009–19990009, 1999.
- [42] FrontISTR 研究会. FrontISTR 研究会 HP. <http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/>, (平成 29 年 3 月 11 日閲覧).
- [43] 東京大学大学院・新領域創成科学研究科・人間環境学専攻教授 奥田洋司. Frontistr の並列計算の基礎. [http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/160610/\(02\)Parallel_FISTR.pdf](http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/160610/(02)Parallel_FISTR.pdf), 2016 年 3 月 18 日 (2017 年

4月2日閲覧)。

- [44] George Karypis Department of Computer Science and Engineering University of Minnesota. *Metis A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices Version 5.1.0 Manual*, march, 2013.
- [45] 中島研吾, 伊田明弘, 松本正晴. ppopen-hpc と大規模シミュレーション (ppopen-hpc における大規模疎行列計算と自動チューニング / hacapk ライブラリにおける階層型行列法の大規模解析に向けた改良 / ppopen-hpc による地震波動-建築物連成シミュレーション). ハイパフォーマンスコМПユーティングと計算科学シンポジウム論文集, 第 2015 巻, pp. 52–53, 5 2015.
- [46] 奥田洋司, 矢川元基. 未来型計算力学 (<特集>シミュレーションが創る 21 世紀の技術). シミュレーション, Vol. 19, No. 4, pp. 246–253, dec 2000.
- [47] 東京大学大学院・新領域創成科学研究科・人間環境学専攻教授奥田洋司. Frontistr の中での hec-mw の役割. http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/130522/variables_P130522.pdf, 2013 年 5 月 22 日 (2017 年 4 月 19 日閲覧)。
- [48] 東京大学大学院・新領域創成科学研究科・人間環境学専攻講師橋本学. Frontistr のカスタマイズ. <http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/FrontISTR/150602/customize.pdf>, 2015 年 3 月 23 日 (2017 年 4 月 19 日閲覧)。
- [49] 西村昭彦, 室野剛隆, 西村隆義. Ghe モデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証. 地震工学研究発表会講演論文集, Vol. 25, pp. 309–312, 1999.
- [50] 吉田望, 辻野修一, 石原研而. 地盤の 1 次元非線形解析に用いる土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化. 学術講演梗概集. B, 構造 I, Vol. 1990, pp. 1639–1640, sep 1990.
- [51] 吉田望, 田蔵隆, 鈴木英世. 地盤の非線形地震応答解析手法の比較. 地震工学研究発表会講演概要, Vol. 23, pp. 49–52, 1995.
- [52] I Newton. 1669: “methodus fluxionum et serierum infinitarum”, as cited by ew weisstein, "newton's method." from mathworld—a wolfram web resource.
- [53] 原子力規格委員会. JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程. 一般社団法人

- 日本電気協会, 2008.
- [54] 大崎順彦. 建築構造学大系: 振動理論. 第 24 卷. 1980.
- [55] 中村尚弘, 猪田幸司, 鈴木琢也, 中村壮志, 中野富夫. 非線形 3 次元 fem による原子力発電所建屋のひずみエネルギーに基づくフラジリティ評価の試み. 構造工学論文集. B, Vol. 57, pp. 115–125, mar 2011.
- [56] RR Kunar and L Rodriguez-Ovejero. A model with non-reflecting boundaries for use in explicit soil-structure interaction analyses. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 8, No. 4, pp. 361–374, 1980.
- [57] John Lysmer, Takekazu Udaka, C Tsai, and H Bolton Seed. Flush-a computer program for approximate 3-d analysis of soil-structure interaction problems. Technical report, California Univ., Richmond (USA). Earthquake Engineering Research Center, 1975.
- [58] 地震工学研究所, 構造計画研究所. SuperFLUSH/2D 使用説明書, 2011.
- [59] 東平光生, 吉田望. 時間領域の有限要素法と境界要素法の結合解法による地盤振動解析. 土木学会論文集, Vol. 1989, No. 410, pp. 395–404, 1989.
- [60] 横山秀史, 八代和幸, 蒲原章裕. 鉄道沿線地盤振動の水平動および鉛直動の伝播特性 (特集 環境技術). 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 11, pp. 35–40, nov 2011.
- [61] 横山秀史, 伊積康彦, 渡辺勉. 3 次元振動解析による地盤および建物振動の予測シミュレーション手法 (特集環境工学). 鉄道総研報告 = RTRI report : 鉄道総合技術論文誌, Vol. 29, No. 5, pp. 41–46, may 2015.
- [62] 地震工学研究所, 構造計画研究所. SuperFLUSH/3D 理論説明書, 1995.
- [63] 地震工学研究所, 構造計画研究所. SuperFLUSH/2D 理論説明書, 2011.
- [64] 吉田望. *DYNEQ A computer program for DYNamic response analysis of level ground by EQuivalent linear method*(Version 3.36), 2015.
- [65] Richard E. Goodman. Some safety issues for dams on rock foundations (講演資料), 2014.
- [66] 濱克宏, 水野崇, 笹尾英嗣. 第 2 期中期計画期間における研究成果取りまとめ報告書: 深地層の研究施設計画および地質環境の長期安定性に関する研究. *JAEA-research*, Vol. 2015, No. 7, pp. 1–269, aug 2015.
- [67] 松岡元. 土質力学. 基礎土木工学シリーズ / 赤井浩一監修. 森北出版, 1999.

-
- [68] R.E. Goodman. *Methods of Geological Engineering: In Discontinuous Rocks*. West Information Publishing Group, 1976.
- [69] Klaus-Jurgen Bathe and Anil Chaudhary. A solution method for planar and axisymmetric contact problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 65–88, 1985.
- [70] Daniel Pantuso, Klaus-Jürgen Bathe, and Pavel A Bouzinov. A finite element procedure for the analysis of thermo-mechanical solids in contact. *Computers & Structures*, Vol. 75, No. 6, pp. 551–573, 2000.
- [71] 佐々木猛, 吉中龍之進, 永井文男. 有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究. 土木学会論文集, Vol. 1994, No. 505, pp. 59–68, 1994.
- [72] 吉田秀典, 堀井秀之. マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析. 土木学会論文集 = Proceedings of JSCE, Vol. 535, pp. 23–41, mar 1996.
- [73] 堀井秀之, 宇野晴彦, 吉田秀典, 芥川真一, 打田靖夫, 森川誠司, 山辺正, 多田浩幸, 京谷孝史, 伊藤文雄. 節理性岩盤を対象とした各種解析手法による要素解析結果の比較. 土木学会論文集, No. 659, pp. 229–240, 2000.
- [74] 土岐憲三, 三浦房紀, 大竹敏雄. 3次元ジョイント要素による地盤-構造物系の非線形震動解析. 土木学会論文報告集, Vol. 1982, No. 322, pp. 51–61, 1982.
- [75] NK Samadhiya, MN Viladkar, and Moataz A Al-Obaydi. Three-dimensional joint/interface element for rough undulating major discontinuities in rock masses. *International Journal of geomechanics*, Vol. 8, No. 6, pp. 327–335, 2008.
- [76] 田中忠次. 材料及び幾何学的非線形性をとり入れた地盤・土構造物の静的解析. 農業土木学会論文集, Vol. 1981, No. 96, pp. 64–71, a2, 1981.
- [77] 竹内秀克, 高稲敏浩, 野田利弘. 飽和粘土地盤の圧密変形に及ぼす幾何学的非線形性の効果. 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 539–550, 2006.
- [78] 小林英男. 破壊力学. 共立出版, 1993.
- [79] 2014 年広島豪雨災害調査団. 平成 26 年 8 月広島豪雨災害調査報告書. Technical report, 土木学会, 2015.
- [80] 国土地理院. 大雨等による被災地域の空中写真を公開. <http://www.gsi.go.jp/kibanjoho/kibanjoho60024.html>, (2017 年 4 月 12 日閲覧).

- [81] 大槻敏, 楠見晴重, 松岡俊文. 3次元個別要素法による岩盤斜面の滑り崩壊シミュレーション解析. 2007.
- [82] 中瀬仁, 曹国強, 田部井和人, 栃木均, 松島亘志. 個別要素法による原子力発電所周辺の地震起因性斜面崩落挙動のモデル化と適用性. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, pp. I476–I492, 2015.
- [83] 岡田哲実, 小早川博亮, 伊藤洋. 不連続性岩盤の寸法効果を考慮した引張・圧縮強度の解析的評価方法の提案. 電力中央研究所報告. 研究報告. 電力中央研究所地球工学研究所 編, No. 11034, pp. 1–26, apr 2012.
- [84] 趙顕, 福井勝則, 大久保誠介. 岩石の寸法効果と時間依存性挙動の計算機シミュレーションによる検討. 資源と素材, Vol. 111, No. 9, pp. 595–600, 1995.
- [85] United States Nuclear Regulatory Commission, et al. Reactor safety study. an assessment of accident risks in us commercial nuclear power plants. executive summary. Technical report, United States Nuclear Regulatory Commission, 1975.
- [86] 日本原子力学会. 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評価実施基準:2015. 日本原子力学会, 2015.
- [87] Robert P Kennedy, CA Cornell, RD Campbell, S Kaplan, and HF Perla. Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 59, No. 2, pp. 315–338, 1980.
- [88] 蛭沢勝三, 神野邦彦, 中村英孝, 伊東守, 阿部清治. 地震動下での建屋・機器の現実的応答評価法と応用. Technical report, 日本原子力研究所, 1996.
- [89] Emilio Rosenblueth. Two-point estimates in probabilities. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 5, No. 5, pp. 329–335, 1981.
- [90] YL Su, YJ Wang, R Stefanko, et al. Finite element analysis of underground stresses utilizing stochastically simulated material properties. In *The 11th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association, 1969.
- [91] Michael D McKay, Richard J Beckman, and William J Conover. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, Vol. 21, No. 2, pp. 239–245, 1979.
- [92] Shunsuke SAKURAI and Yasunari DOI. Reliability analysis of slope by finite element

- method. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 1983, No. 330, pp. 87–97, 1983.
- [93] 中桐滋, 久田俊明. 確率有限要素法入門: 不確定構造の解析. 培風館, 1985.
- [94] Roger G Ghanem and Pol D Spanos. *Stochastic finite elements: a spectral approach*. Courier Corporation, 2003.
- [95] 本田利器, 村上裕宣. スペクトル確率手法による構造動的解析における入力波の位相不確定性の影響評価法. 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 673–683, 2005.
- [96] 堀宗朗, 中川英則. 非線形スペクトル確率有限要素法の提案と断層問題への適用に関する基礎的研究. 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 4, pp. 643–652, 2010.
- [97] Byunghyun Choi, Akemi Nishida, and Norihiro Nakajima. A parametric study for the seismic response analysis of a nuclear reactor building by using a three-dimensional finite element model. In *2016 24th International Conference on Nuclear Engineering*, pp. V001T03A035–V001T03A035. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [98] 伊藤洋, 北原義浩. 地盤物性のバラツキの評価法 (その 2)-物性値のバラツキが地盤の安定性に及ぼす影響-(財) 電力中央研究所. 電力中央研究所報告, 研究報告, Vol. 384026, , 1985.
- [99] 高橋佳宏, 國生剛治. 地盤の 1 次元地震応答解析に与える地盤物性のバラツキの影響. 地震工学研究発表会講演論文集, Vol. 26, pp. 449–452, 2001.
- [100] 本城勇介, 大竹雄, 加藤栄和. 地盤パラメータ局所平均の空間的ばらつきと統計的推定誤差の簡易評価理論. 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 68, No. 1, pp. 41–55, 2012.
- [101] 本間俊介, 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, CITAK Seckin, 堀高峰. 断層-都市系のパラメータ不確実性を考慮可能な統合地震シミュレータの開発. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp. I199–I209, 2014.
- [102] Robert R Youngs, Walter J Arabasz, R Ernest Anderson, Alan R Ramelli, Jon P Ake, David B Slemmons, James P McCalpin, Diane I Doser, Christopher J Fridrich, Frank H Swan, et al. A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (pfdha). *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 1, pp. 191–219, 2003.
- [103] 高尾誠, 土山滋郎, 安中正, 栗田哲史. 確率論的断層変位ハザード解析手法の日本にお

- ける適用. 日本地震工学会論文集, Vol. 13, No. 1, pp. 17–36, 2013.
- [104] 地震調査委員会. 震源断層を特定した地震の強振動予測手法(「レシピ」). Technical report, 地震調査研究推進本部, 2009.
- [105] 半谷裕彦, 川口健一. 形態解析: 一般逆行列とその応用. 形態解析: 一般逆行列とその応用. 培風館, 1991.
- [106] 根木勲, 岡田哲男. 遺伝的アルゴリズムと有限要素法を組み合わせた構造最適設計. 日本造船学会論文集, No. 177, pp. 327–338, jun 1995.
- [107] 村上章. 有限要素法・境界要素法による逆問題解析: カルマンフィルタと等価介在物法の応用. コロナ社, 2002.
- [108] 松岡弘大, 貝戸清之, 徳永宗正, 渡辺勉, 曾我部正道. 逐次データ同化を利用した列車走行時の橋梁加速度応答に基づく変位応答推計. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 3, pp. 527–542, 2013.
- [109] 鈴木素之, 北園芳人, 中村洋介, 美馬健二, 中濃耕司, 稲垣秀輝, 櫻井正明, 阪口和之. 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震地盤-斜面災害調査. Technical report, 土木学会地盤工学委員会, 2016.
- [110] 鵜飼恵三, 細堀建司, 永瀬英生, 榎戸源則. 簡便分割法による斜面の三次元安定解析. 土木学会論文集, Vol. 1986, No. 376, pp. 267–276, 1986.
- [111] 奥田洋司, 江連真一, 中島研吾. 大規模並列計算のための要素細分化ツールの開発. 日本応用数理学会論文誌, Vol. 12, No. 1, pp. 29–43, mar 2002.
- [112] Rainald Löhner and Paresh Parikh. Generation of three-dimensional unstructured grids by the advancing-front method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 8, No. 10, pp. 1135–1149, 1988.
- [113] 野島和也, 川原陸人. 三次元デローニー分割法における境界表面の形成. 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 331–338, 2004.
- [114] Clyde Gumbert, Rainald Lohner, Paresh Parikh, and Shahyar Pirzadeh. A package for unstructured grid generation and finite element flow solvers. In *7th Applied Aerodynamics Conference*, p. 2175, 1989.
- [115] Joachim Schöberl. Netgen an advancing front 2d/3d-mesh generator based on abstract rules. *Computing and visualization in science*, Vol. 1, No. 1, pp. 41–52, 1997.

-
- [116] R. Schneiders, R. Schindler, and F. Weiler. Octree-based generation of hexahedral element meshes. In *IN PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL MESHING ROUNDTABLE*, pp. 205–215, 1996.
- [117] 吉中龍之進, 吉田淳, 佐々木猛, 佐々木勝司. 寸法効果を考慮した岩盤不連続面の設計用物性値の設定. 土木学会論文集, Vol. 62, No. 2, pp. 457–470, jul 2006.
- [118] 鈴木俊一, 本島貴之, 井尻裕二, 青木広臣. 確率統計理論による亀裂特性データの相互関係の整理と数値解析モデルによる妥当性検証. 土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 1, pp. 185–195, 2009.
- [119] 敷地内断層評価手法検討委員会. 原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書. Technical report, 一般社団法人原子力安全推進協会, 平成 25 年 9 月.
- [120] 水本学千, 坪井利弘, 三浦房紀. 3 次元 fem による断層モデルの解析に関する基本的検討. 土木学会論文集 = Proceedings of JSCE, No. 780, pp. 27–40, jan 2005.
- [121] 水本学千, 三浦房紀, 坪井利弘. 3 次元有限要素法による 2000 年鳥取県西部地震の断層運動シミュレーション. 地震工学研究発表会講演論文集, Vol. 26, pp. 377–380, 2001.
- [122] 近藤久雄, 勝部重矢, 谷口薫. 2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震に伴う地表地震断層の概要 (速報). GSJ 地質ニュース GSJ chishitsu news, Vol. 4, No. 1, pp. 1–4, jan 2015.
- [123] 国土地理院. 長野県北部地震に伴う地表変形調査. <http://www.gsi.go.jp/cais/topic141203.html>, (平成 27 年 5 月 19 日閲覧).
- [124] 文部科学省研究開発局地震・防災研究課地震調査研究推進本部. 長野県北部の地震活動. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/major_act/act_2014.htm#a20141122, (平成 27 年 5 月 19 日閲覧).
- [125] 国立研究開発法人産業技術研究所地質調査総合センター. 長野県北部の地震 [2014 年 11 月 22 日]. <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/naganokenhokubu2014/index.html>, (平成 27 年 5 月 19 日閲覧).
- [126] D. J. Andrews. Rupture velocity of plane strain shear cracks. *Journal of Geophysical*

- Research*, Vol. 81, No. 32, pp. 5679–5687, 1976.
- [127] 産業技術総合研究所. 活断層データベース.
https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html, (平成 27 年 5 月 19 日閲覧).
- [128] David M Boore, Christopher D Stephens, and William B Joyner. Comments on baseline correction of digital strong-motion data: Examples from the 1999 hector mine, california, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 4, pp. 1543–1560, 2002.
- [129] 気象庁. 2014 年 11 月 22 日 22 時 08 分 長野県北部 M6.7.
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/fig/cmt20141122220817.html>, (平成 27 年 5 月 19 日閲覧).
- [130] 長野県北部の地震に関する調査団. 2014 年長野県北部の地震に関する調査団報告. Technical report, 日本地震工学会, 2015.
- [131] 加瀬祐子. 2014 年長野県北部の地震の動力学的震源モデル (その 3) . In *Japan Geoscience Union MEETING 2016*, pp. SSS27–P11, 5 2016.
- [132] Elizabeth H Yoffe. Lxxv. the moving griffith crack. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 42, No. 330, pp. 739–750, 1951.
- [133] BV Kostrov. Selfsimilar problems of propagation of shear cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 28, No. 5, pp. 1077–1087, 1964.
- [134] FA Dahlen. On the ratio of p-wave to s-wave corner frequencies for shallow earthquake sources. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 64, No. 4, pp. 1159–1180, 1974.
- [135] 港湾技術研究所地震防災研究領域. 2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震 (m6.7) の震源モデル (暫定版) . http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2015/jr_45.html, (2017 年 4 月 11 日閲覧) .
- [136] 入倉孝次郎, 三宅弘恵, 岩田知孝, 釜江克宏, 川辺秀憲, Luis Angel Dalguer. 将来の大地震による強震動を予測するためのレシピ. 京都大学防災研究所年報, No. 46, pp. 105–120, 2002.
- [137] S Peyrat and KB Olsen. Nonlinear dynamic rupture inversion of the 2000 western tottori, japan, earthquake. *Geophysical research letters*, Vol. 31, No. 5, 2004.

-
- [138] 後藤浩之, 澤田純男. Walsh 関数に基づく動力学震源インバージョン解析—推定変数のトレードオフ及びノイズに関する考察—. 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 745–752, 2006.
- [139] Carl Edward Rasmussen. Gaussian processes for machine learning. 2006.
- [140] 原子力土木委員会断層変位評価小委員会. 断層変位評価小委員会研究報告書. Technical report, 一般社団法人土木学会, 平成 27 年 7 月.
- [141] 断層の活動性と工学的リスク評価調査専門委員会. 断層の活動性と工学的リスク評価. http://www.aesj.net/sp_committee/com_dansou, (平成 29 年 3 月 16 日閲覧).
- [142] 大島洋志. 地震・活断層とトンネル (特集過去に学び、未来に備える (第 5 回) 活断層について考える (その 1)). 日本地震工学会誌, No. 24, pp. 8–13, feb 2015.
- [143] 熱海建設事務所 (鉄道省). 丹那トンネルの話. 1995.
- [144] 櫻井孝. 北伊豆地震 (1930 年) による丹那トンネル内地震断層出現状況記録. 応用地質, Vol. 39, No. 6, pp. 540–544, feb 1999.
- [145] 櫻井孝. 兵庫県南部地震により出現した横尾山地震断層. 応用地質, Vol. 37, No. 6, pp. 452–462, feb 1997.
- [146] 地盤工学会阪神大震災調査委員会. 阪神・淡路大震災調査報告書. 1996.
- [147] Konagai Kazuo, Mikami Atsuchi, Katagiri Toshihiko, Raquib Ahsan, and Maruyama Daisuke. Report of damage caused by the mid-north iwate earthquake of september 3, 1998. *Bull., Earthquake Resistant Structure Research Center*, pp. 3–13, 1999.
- [148] 地盤工学会, 日本応用地質学会. 活断層が分かる本. 技報堂出版, 2016.
- [149] 朝倉俊弘, 小島芳之, 安東豊弘, 佐藤豊, 松浦章夫. トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究. 土木学会論文集, No. 493, pp. 79–88, 1994.
- [150] 朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄. 山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム. 土木学会論文集, No. 659, pp. 27–38, 2000.
- [151] 大塚久哲, 古川愛子, 相部岳暁. 断層変位を受ける地中構造物の耐震性と免震対策の適用性. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 66, No. 1, pp. 188–195, 2010.
- [152] 坂下克之, 畑明仁. 断層変位を受ける地中線状構造物の挙動に関する基礎的検討. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I297–I309, 2016.
- [153] 原子力規制委員会. 実用発電用原子炉に係る新規制基準について.

- <https://www.nsr.go.jp/data/000070101.pdf>, (平成 29 年 3 月 31 日閲覧).
- [154] 「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会. 断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策 「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会報告書. Technical report, 日本原子力学会, 2017.
- [155] 松井孝典, 松浦充宏, 寺沢敏夫, 林祥介, 谷本俊郎, 唐戸俊一郎. 地球連続体力学:. 第 6 巻. 岩波書店, 2010.
- [156] Yoshimitsu Okada. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, No. 2, pp. 1018–1040, 1992.
- [157] Yukitoshi Fukahata and Mitsuhiro Matsu'ura. General expressions for internal deformation fields due to a dislocation source in a multilayered elastic half-space. *Geophysical Journal International*, Vol. 161, No. 2, pp. 507–521, 2005.
- [158] Yukitoshi Fukahata and Mitsuhiro Matsu'ura. Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem. *Geophysical Journal International*, Vol. 166, No. 1, pp. 418–434, 2006.
- [159] 松浦律子, 三橋祐太. 津波計算のための任意形状・任意すべり量震源断層に対応した地殻変動計算プログラムの開発. 日本地震学会講演予稿集秋季大会, Vol. S17-08, No. 2015, p. 94, 2015.
- [160] 樋口俊一, 渡辺伸和, 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻讓嗣. 三次元 fem 解析による断層上の地中鉄筋コンクリート構造物の損傷評価. 断層変位評価に関するシンポジウム講演論文集, No. III-4, pp. 91–98, 2015.
- [161] 桑原徹, 平間邦興. 断層破碎帯の工学的物性評価に関する研究. 大林組技術研究所報, No. 43, pp. 99–106, 1991.