



土 木 研 究 所 資 料

液状化と掘割道路の地震時浮上がりに対する
安定性の確率的評価法に関する検討

平成5年3月

建設省土木研究所
機械施工部動土質研究室

「Copyright © (1993) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted,
nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

液状化と掘割道路の地震時浮上がりに対する 安定性の確率的評価法に関する検討

動土質研究室 研究員 古関潤一

要 旨

既応の液状化・非液状化事例に基づいて、所定の地震外力に対する液状化の発生確率を液状化抵抗率 F_L の関数として定式化した。この結果を、半地下構造物の地震時浮上がりに対する安定計算に適用し、浮上がり発生確率を算定した。さらに、所定の期間内における地震の平均発生率を考慮して、液状化の平均発生率と半地下構造物の浮上がりの平均発生率の算定を行った。

キーワード：掘割道路，砂地盤，液状化，確率論

目 次

1. 研究の背景	1
2. 研究目的および研究内容	2
3. 既往の研究	3
3.1 液状化可能性の確率的評価	3
3.2 破壊確率を考慮した地盤の耐震設計法	25
4. 既往の液状化・非液状化事例に基づく液状化確率の定式化	32
4.1 検討方法	32
4.1.1 検討に用いた液状化・非液状化事例	32
4.1.2 液状化抵抗率の算定方法	33
4.1.3 定式化に用いた確率分布モデル	35
4.1.4 液状化確率の定式化の方法	38
4.2 検討結果及び考察	40
4.2.1 液状化抵抗率の算定結果に及ぼす諸条件の影響	40
4.2.2 液状化抵抗率の分布	48
4.2.3 一様分布モデルによる液状化確率の定式化	52
4.2.4 正規分布モデルによる液状化確率の定式化	57
4.2.5 極値分布モデルによる液状化確率の定式化	67
4.2.6 細粒分含有率の影響に関する検討	71
4.3 まとめ	81
5. 過剰間隙水圧と半地下構造物の浮上がり安全率の確率的評価	83
5.1 検討方法	83
5.1.1 過剰間隙水圧の発生量	83
5.1.2 半地下構造物の浮上がり安全率	86
5.2 検討結果及び考察	88
5.2.1 過剰間隙水圧の発生量	88
5.2.2 浮上がり安全率	93
5.2.3 既往の設計基準との比較	103
5.3 まとめ	105

6. 液状化と半地下構造物の浮上がりの平均発生率の算定	106
6.1 検討方法	106
6.1.1 地震の平均発生率	106
6.1.2 液状化の平均発生率	107
6.1.3 半地下構造物の浮上がりの平均発生率	114
6.2 検討結果及び考察	114
6.2.1 液状化の平均発生率	114
6.2.2 浮上がりの平均発生率	128
6.3 まとめ	135
7. 全体のまとめ及び今後の課題	136
参考文献	137
巻末資料1 計算に用いた液状化・非液状化事例	140
巻末資料2 液状化・非液状化事例の地盤条件及び液状化抵抗率	144
付録 主な用語の定義	147

目 次

表 3.1	既往の液状化事例および非液状化事例を対象とした液状化確率の算定結果 ¹²⁾	12
表 3.2	液状化可能性の確率的評価に関する既往の研究内容	24
表 3.3	地震の再現期間に応じた橋梁基礎地盤の耐震設計基準 ⁴⁾	25
表 3.4	重力式擁壁の地震時安全率と水平滑動量の超過確率 ²⁵⁾	28
表 3.5	破壊確率を考慮した地盤の耐震設計法に関する既往の研究	31
表 4.1	検討に用いた液状化・非液状化事例の内訳	32
表 4.2	液状化確率の定式化に関する計算ケース	40
表 4.3	液状化抵抗率を一様分布の確率変数とした計算結果	52
表 4.4	液状化抵抗率の算定方法を変えた場合の計算結果	55
表 4.5	液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした計算結果	57
表 4.6	動的せん断強度比を正規分布の確率変数とした計算結果	60
表 4.7	動的せん断強度比を極値分布の確率変数とした計算結果	67
表 4.8	動的せん断強度比と地震時せん断応力比を確率変数とした計算結果	68
表 4.9	きれいな砂を対象とした計算結果	73
表 4.10	シルト質砂を対象とした計算結果	77
表 5.1	過剰間隙水圧の発生量に関する計算ケース	86
表 5.2	液状化抵抗率の算定値に応じた過剰間隙水圧比の期待値の範囲	99
表 5.3	土質定数に乗じる低減係数 ²⁹⁾	104
表 6.1	液状化の平均発生率に関する計算ケース	112

目 次

図 2.1	研究フロー	2
図 3.1	相対密度と換算加速度を用いた液状化判定図 ³⁾	4
図 3.2	液状化強度比と繰返し回数の関係 ⁴⁾	5
図 3.3	地震マグニチュードと液状化安全率及び液状化確率の関係の計算 ⁴⁾	6
図 3.4	液状化による地盤破壊の可能性分布地図の作成例 ⁷⁾	7
	(1) 液状化を生じ得る地震の再現期間の分布図	7
	(2) 液状化危険度の定性的分布図	7
	(3) 地盤破壊の総合的な可能性分布図	8
図 3.5	液状化が生じる限界値 $\overline{S_c}$ と、補正 N 値の関係 ⁸⁾	8
図 3.6	液状化確率が 50% となる地震マグニチュードと震央距離の関係 ⁸⁾	9
図 3.7	東京湾埋立て地における最大加速度の発生確率 ⁹⁾	10
図 3.8	東京湾埋立て地における期間内液状化発生確率 ⁹⁾	11
図 3.9	東京湾埋立て地における液状化指数の年間超過確率 ¹⁰⁾	11
図 3.10	液状化までの繰返し回数と繰返しせん断応力比の関係の分類結果 ¹³⁾	14
図 3.11	液状化確率の深度方向分布 ¹⁵⁾	15
図 3.12	近似解析による液状化確率と既往の液状化・非液状化事例の比較 ¹⁵⁾	15
図 3.13	過剰間隙水圧比の超過確率とせん断応力振幅の繰返し回数の関係 ¹⁶⁾	16
	(1) 方法 1) の結果	16
	(2) 方法 1) と 2) の比較	17
図 3.14	所定期間内における過剰間隙水圧比の超過確率の試算結果 ¹⁶⁾	17
図 3.15	液状化の期間内発生確率の試算結果 ¹⁷⁾	18
図 3.16	補正 N 値及び繰返しせん断応力比と液状化確率の関係 ¹⁹⁾	19
	(1) きれいな砂の場合	19
	(2) シルト質砂の場合	19
図 3.17	液状化確率の算定結果に及ぼす諸要因の影響 ¹⁹⁾	20
	(1) 測定データの誤差を考慮した場合	20
	(2) データ間の相関性を考慮した場合	20
	(3) 液状化事例への片寄りを考慮した場合	20
図 3.18	定式化を行わずに直接液状化確率を求める方法の模式図 ¹⁹⁾	21
図 3.19	一様線形砂地盤の 1 次元応答解析結果 ²⁰⁾	22
	(1) 地震終了時の過剰間隙水圧比の期待値の深度方向分布	22

(2) 地震終了時の液状化確率の深度方向分布	22
(3) 地震動の条件を変えた場合の液状化確率	23
図 3.20 震度法の有用性の検討手順 ²³⁾	26
図 3.21 地震強度と地震動の不確実性を考慮した解析手順 ²⁴⁾	26
図 3.22 地震時平均安全率と沈下量の関係 ²⁴⁾	27
図 3.23 最大地表加速度と盛土の破壊確率の関係 ²⁶⁾	28
図 3.24 解析対象としたケーソン護岸 ²⁷⁾	29
図 3.25 破壊確率の算定結果の例 ²⁷⁾	30
図 3.26 総費用の試算結果 ²⁷⁾	30
図 4.1 N値及び有効上載圧と動的せん断強度比の第1項の関係 ²⁹⁾	34
図 4.2 平均粒径と動的せん断強度比の第2項の関係 ²⁹⁾	34
図 4.3 細粒分含有率と動的せん断強度比の第3項の関係 ²⁹⁾	34
図 4.4 一様分布モデルの確率密度分布	36
図 4.5 正規分布モデルの確率密度分布	37
図 4.6 極値分布モデルの確率密度分布	37
図 4.7 液状化の程度に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	41
(1) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合	41
(2) 地震マグニチュードの影響を考慮した場合	41
図 4.8 地震時マグニチュードに応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	42
(1) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合	42
(2) 地震マグニチュードの影響を考慮した場合	42
図 4.9 最大地表加速度 a_{max} に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	43
図 4.10 N値に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	44
図 4.11 細粒分含有率に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	45
図 4.12 粘土分含有率に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	45
図 4.13 粗粒分含有率に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	46
図 4.14 平均粒径に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	46
図 4.15 均等係数に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	47
図 4.16 深度と液状化抵抗率の関係	47
図 4.17 地下水面からの距離と液状化抵抗率の関係	48
図 4.18 液状化抵抗率の度数・累積度数分布	49
(1) マグニチュードの影響を考慮しない場合	49
(2) マグニチュードの影響を考慮した場合	49

図 4.19	液状化抵抗率と液状化事例の比率の関係	50
(1)	地震マグニチュードの影響を考慮しない場合 ($W = 0.04$)	50
(2)	地震マグニチュードの影響を考慮しない場合 ($W = 0.12$)	50
(3)	地震マグニチュードの影響を考慮しない場合 ($W = 0.2$)	51
(4)	地震マグニチュードの影響を考慮した場合 ($W = 0.12$)	51
図 4.20	液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたときの液状化抵抗率と液状化確率の 関係	53
図 4.21	液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時 せん断応力比と液状化確率の関係	54
図 4.22	液状化抵抗率の算定方法を変えた場合の L_{max}	55
図 4.23	液状化抵抗率の算定方法を変えた場合に液状化確率が 0 または 1 となる領域	56
図 4.24	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの液状化抵抗率と液状化確率の 関係	58
図 4.25	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時 せん断応力比と液状化確率の関係	58
図 4.26	動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地 震時せん断応力比と液状化確率の関係	61
(1)	タイプ 1	61
(2)	タイプ 2	62
(3)	タイプ 3	63
図 4.27	動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液状 化確率の関係	64
(1)	地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.2$ の場合	64
(2)	地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.3$ の場合	64
(3)	地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.4$ の場合	65
図 4.28	動的せん断強度比 $R = 0.3$ の場合の真値の確率密度分布 (正規分布)	65
図 4.29	(動的せん断強度比 - 地震時せん断応力比) と液状化事例の比率の関係	66
図 4.30	動的せん断強度比を極値分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液状 化確率の関係	69
(1)	地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.2$ の場合	69
(2)	地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.3$ の場合	69
(3)	地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.4$ の場合	70
図 4.31	動的せん断強度比 $R = 0.3$ の場合の真値の確率密度分布 (極値分布)	70

図 4.32	動的せん断強度比と地震時せん断応力比を確率変数としたときの動的せん断強度比と液状化確率の関係（地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.3$ の場合）	71
図 4.33	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液状化確率の関係（細粒分含有率10%未満の場合）	72
図 4.34	動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液状化確率の関係（細粒分含有率10%未満の場合）	74
	(1) 地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.2$ の場合	74
	(2) 地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.3$ の場合	74
	(3) 地震時せん断応力比 $\bar{L} = 0.4$ の場合	75
図 4.35	動的せん断強度比 $\bar{R} = 0.3$ の場合の真値の確率密度分布（正規分布，細粒分含有率10%未満の場合）	76
図 4.36	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液状化確率の関係（細粒分含有率10%以上40%未満）	78
図 4.37	細粒分含有率が10%以上20%未満の場合の動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	79
図 4.38	細粒分含有率が20%以上40%未満の場合の動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係	80
図 4.39	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの液状化抵抗率と液状化確率の関係の比較（対象とする細粒分含有率の範囲を変えた場合）	81
図 5.1	動的遠心模型実験によって得られた過剰間隙水圧比と液状化抵抗率の関係 ³⁴⁾	84
図 5.2	振動台実験によって得られた過剰間隙水圧比と液状化抵抗率の関係 ³⁵⁾	84
図 5.3	不攪乱試料の液状化試験によって得られた過剰間隙水圧比と液状化抵抗率の関係 ³⁶⁾	84
図 5.4	液状化における共同溝に作用する力 ³¹⁾	86
図 5.5	掘削道路に作用する力 ³⁶⁾	86
図 5.6	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの過剰間隙水圧比の累積確率密度関数	88
	(1) $p = 7$ の場合	88
	(2) $p = 4$ の場合	89
	(3) $p = 2$ の場合	89
図 5.7	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの液状化抵抗率の算定値と過剰間隙水圧比の非超過確率の関係	90

図 5.8	過剰間隙水圧比の設計値と非超過確率の関係	91
(1)	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき	91
(2)	液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき	91
(3)	細粒分含有率10%未満を対象としたとき(正規分布)	92
(4)	細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき(正規分布)	92
図 5.9	液状化抵抗率の算定値と過剰間隙水圧比の期待値の関係	94
(1)	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき	94
(2)	液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき	94
(3)	細粒分含有率10%未満を対象としたとき(正規分布)	95
(4)	細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき(正規分布)	95
図 5.10	過剰間隙水圧比の設計値と期待値の関係	96
(1)	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき	96
(2)	液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき	97
(3)	細粒分含有率10%未満を対象としたとき(正規分布)	98
(4)	細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき(正規分布)	99
図 5.11	構造物・地盤条件を固定した場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がり確率の 関係	100
(1)	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき	100
(2)	液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき	100
(3)	細粒分含有率10%未満を対象としたとき(正規分布)	101
(4)	細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき(正規分布)	101
図 5.12	構造物・地盤条件を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がり確率の関 係	102
(1)	常時の浮上がり安全率が大きいつき	102
(2)	常時の浮上がり安全率が小さいとき	102
(3)	静水圧比が大きいつき	103
図 5.13	液状化抵抗率と過剰間隙水圧比の関係 ³⁰⁾	104
図 5.14	過剰間隙水圧の発生特性を精度よく推定した場合の浮上がり安全率の設計値と 浮上がり確率の関係	105
図 6.1	荷重側と抵抗側の最大地表加速度の超過平均発生率及び平均発生密度の関係	109
図 6.2	東京における加速度応答スペクトルの超過平均発生率(文献38)の結果を用いた)	113
(1)	Ⅱ種地盤	113
(2)	Ⅲ種地盤	113

図 6.3	液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係	115
(1)	細粒分含有率40%未満を対象としたとき	115
(2)	細粒分含有率10%未満を対象としたとき	115
(3)	細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき	116
図 6.4	動的せん断強度比をタイプ1の正規分布としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係（細粒分含有率40%未満の場合）	116
(1)	設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.2$ の場合	116
(2)	設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.3$ の場合	117
(3)	設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.4$ の場合	117
図 6.5	動的せん断強度比をタイプ2の正規分布としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係（細粒分含有率40%未満の場合）	118
(1)	設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.2$ の場合	118
(2)	設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.3$ の場合	118
(3)	設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.4$ の場合	119
図 6.6	動的せん断強度比をタイプ3の正規分布としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係（細粒分含有率40%未満の場合）	119
図 6.7	細粒分含有率10%未満を対象としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係	121
(1)	タイプ1（設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.3$ ）	121
(2)	タイプ2（設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.3$ ）	121
(3)	タイプ3	122
図 6.8	細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係	122
(1)	タイプ1（設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.3$ ）	122
(2)	タイプ2（設計地震時せん断応力比 $L_{DES} = 0.3$ ）	123
(3)	タイプ3	123
図 6.9	地震マグニチュードの影響を考慮した場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係	124
(1)	液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき（ $a_2 = 0.313$ ）	124
(2)	液状化抵抗率を一樣分布の確率変数としたとき（ $a_2 = 0.313$ ）	124
(3)	$a_2 = 0.265$ としたとき（一樣分布）	125

図 6.10	地震動の設定値を変えた場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関	
	係	125
	(1) 最小マグニチュードを大きくしたとき	125
	(2) 最大マグニチュードを大きくしたとき	126
	(3) 設計マグニチュードを小さくしたとき	126
	(4) 設計マグニチュードを大きくしたとき	127
図 6.11	過剰間隙水圧の発生特性を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの	
	平均発生率比の関係	128
	(1) $p_r = 7$ のとき	128
	(2) $p_r = 4$ のとき	129
	(3) $p_r = 2$ のとき	129
図 6.12	地震動の設定値を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの平均発生	
	率比の関係	130
	(1) $a_2 = 0.313$ のとき ($M_{DES} = 7.5$)	130
	(2) $a_2 = 0.265$ のとき ($M_{DES} = 7.5$)	131
	(3) $M_{DES} = 8.0$ のとき ($a_2 = 0.313$)	131
図 6.13	構造物・地盤条件を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの平均発	
	生率比の関係	132
	(1) 常時の浮上がり安全率が大きいつき	132
	(2) 常時の浮上がり安全率が小さいとき	133
	(3) 静水圧比が大きいつき	133
図 6.14	過剰間隙水圧の発生特性を精度よく推定した場合の浮上がり安全率の設計値と	
	浮上がりの平均発生率比の関係	134
	(1) $M_{DES} = 7.5$ のとき	134
	(2) $M_{DES} = 8.0$ のとき	135

1. 研究の背景

1964年に発生した新潟地震及びアラスカ地震で、砂質地盤の液状化が構造物に大きな被害を引き起こしたことをきっかけとして、その後、液状化のメカニズムとその予測・対策方法に関する研究が各所で広く進められてきた。これらの成果に基づいて、地盤の液状化判定手法と、液状化の影響を考慮した構造物の安定性評価手法がいくつか提案されており、各種構造物の耐震設計において用いられている。

これらの手法では、「液状化が生じるか否か」あるいは「構造物が安定であるか否か」を判定するために、判定に用いる地震動の大きさと地盤の液状化強度が、構造物と地盤の諸条件をもとにそれぞれ一定の値として設定される。実際には、地震の発生率と、地盤強度のばらつき・測定誤差などに起因する不確実性をこれらの値は含んでいるが、上記の手法では、従来の経験に基づいて、または安全側の評価を行うことによりその影響が考慮された形となっている。

これに対し、確率モデルを導入することにより、これらの不確実性をより合理的に考慮する手法の検討が、1970年代後半から主に米国において行われてきた。わが国でも、設計に用いる地震動の大きさを期間内発生確率に応じて数段階設定し、それぞれに対応した許容状態となるように設計を行う手法が、特に重要な構造物において近年取り入れられつつある。しかし、地盤の液状化強度の不確実性を確率的に評価して、実際の設計を行う段階にはまだ至っていない。

筆者は、1991年8月より1年間、米国マサチューセッツ工科大学の客員研究員として、D. Veneziano教授の指導のもとで確率論に基づく耐震設計手法の適用性に関して研究する機会を得た。本報告は、その際の研究内容の一部をとりまとめたものである。

2. 研究目的および研究内容

本研究の目的は、砂質土の液状化問題に対する確率的手法の適用性を検討することである。研究内容を以下に示す。また、研究フローを図2.1に示す。

- 1) 砂質土の液状化問題を確率的に取り扱った既往の研究の手法と考え方を整理する。(第3章)
- 2) 既往の液状化事例・非液状化事例に基づいて、所定の地震外力に対する液状化の発生確率を、地盤のN値等から簡易的に求められる液状化抵抗率 F_L の関数として定式化する。(第4章)
- 3) 地震時に地盤内で生じる過剰間隙水圧を、 F_L の関数として確率的に評価する。また、半地下構造物の地震時浮上がりに対する安定計算に、この結果を適用した場合の検討を行う。(第5章)
- 4) 所定の期間内における地震の平均発生率を考慮して、液状化と半地下構造物の浮上がりの平均発生率を算定する。(第6章)

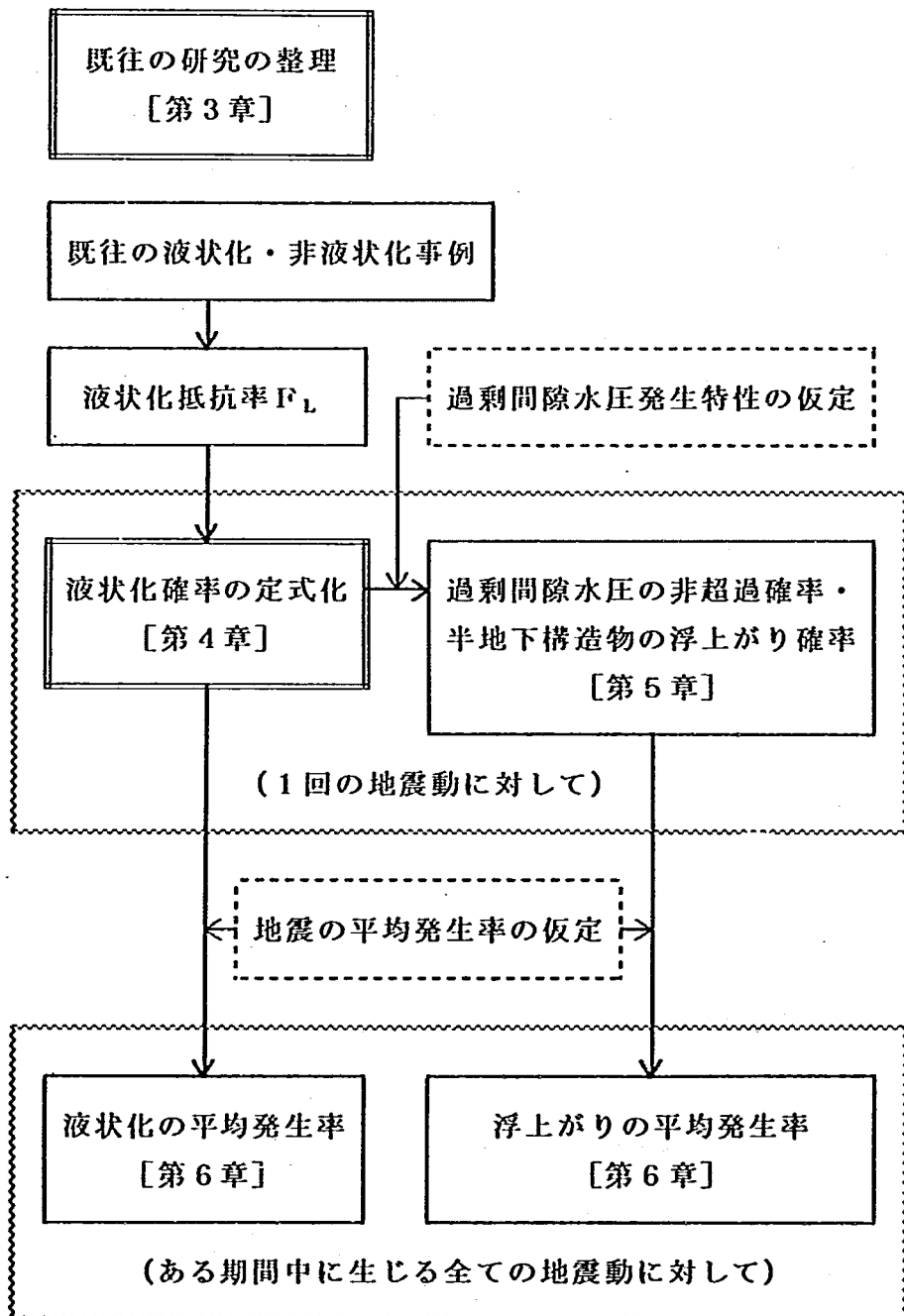


図2.1 研究フロー

3. 既往の研究

確率・統計的手法が土質工学に導入された経緯は、文献1)で紹介されている。ここでは、本研究で対象とする砂質土の液状化問題の確率的な取扱いと関連の深い、既往の研究の手法と考え方を整理した結果について述べる。

3.1 液状化可能性の確率的評価

(1) 液状化確率、期間内液状化発生確率及び液状化の平均発生率の定義

液状化が生じる可能性の確率的な評価は、次の2通りの場合について行われてきた。

- 1) 1回のある地震動に対して、対象地盤が液状化する確率
- 2) ある期間内に生じるすべての地震動に対して、対象地盤で1回以上の液状化が生じる確率

地震動の大きさがわかっている既往の事例を対象にして、評価手法の適用性の検討を行う場合には、1)の確率が用いられる。一方、実際の構造物の設計、あるいは液状化危険度の分布地図の作成においては、2)の確率のほうが重要となり、この場合には、想定する期間内に生じる地震動の大きさと発生確率の関係が必要となる。

地震の発生確率は、簡易的にはポアソン過程に従うものとして次式によりモデル化されることが多い²⁾。

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \dots (3.1)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad \dots (3.2)$$

ここに、 $f(t)$ ：地震の発生間隔が t となる確率の密度関数、 $F(t)$ ： $f(t)$ の累積密度関数（地震の発生間隔が t 以下である確率、すなわち現在から時刻 t までの間に1回以上の地震が発生する確率）、 λ ：地震の平均発生率（単位時間あたりの地震の平均発生回数）

$\lambda \cdot t$ が十分に小さい場合には、 $F(t)$ は次式により近似できる。これは、ある期間内において1回以上の地震が発生する確率が、地震の平均発生率にその期間を乗じたもの、すなわちその期間内における地震の平均発生回数とほぼ等しいことを意味する。

$$F(t) \approx \lambda \cdot t \quad \dots (3.3)$$

2)の液状化の発生確率についても、上記と同様なモデル化を行うことができる。以下では、混同を避けるため、便宜的に1)の確率を「液状化確率」と称し、2)の確率を「期間内液状化発生確率」と称する。なお、6章では2)の確率に関する検討を行ったが、単位期間内の液状化発生確率として式(3.3)中の λ に相当するものを「液状化の平均発生率」と称して用いている。

(2) Christianらの研究

Christianら³⁾は、合計39ケースの液状化事例および非液状化事例の統計的な分析を行った。N値から推定した相対密度 D_r と、次式により算定した換算加速度 A の分布を調べるとともに、これらをパラメータとした統計的な液状化の判定式を導いた。

$$\Lambda = a_{\max} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \quad \dots (3.4)$$

ここに、 $a_{\max}$ ：最大地表加速度、 σ_v ：着目点の全上載圧、 σ_v' ：着目点の有効上載圧

結果を図示すると図3.1のようになる。ただし、図中のPは液状化確率ではなく、対応するラインを液状化・非液状化の判定に用いた場合の判定の信頼度*1を示している。

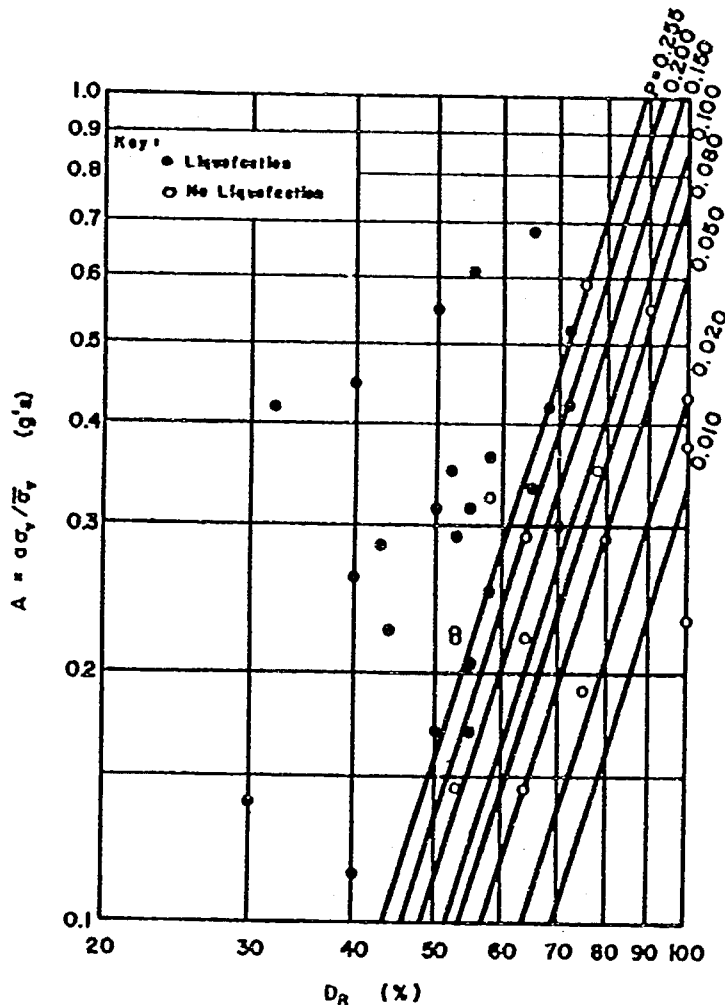


図3.1 相対密度と換算加速度を用いた液状化判定図³⁾

(3) Ferrittoらの研究

Ferrittoら⁴⁾は、地盤の相対密度 D_R と液状化強度比 C （式(3.7)の説明を参照）、及び地震動の等価繰返し回数 N_{eq} と $a_{\max}$ の4つの変数がそれぞれ正規分布であると仮定して、次式により定義される液状化安全率

*1 原文では“probability of error”と呼ばれている。これは、「ある地点が液状化する確率(probability that a site will liquefy)」ではなく、「液状化する地点を液状化しないものとして分類してしまう確率(probability of assigning a liquefiable site to the nonliquefiable category)」であるとして説明されている。

F_g の分布をモンテカルロ法により計算し、 F_g が1.0を下回る場合に液状化が生じるものとして液状化確率の算定を行った。

$$F_g = \frac{\tau_{eq}}{\tau_r} \quad \dots (3.5)$$

$$\tau_{av} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_v}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d \quad \dots (3.6)$$

$$\tau_r = C \cdot D_r \cdot \sigma_v' \cdot r_g \quad \dots (3.7)$$

ここに、 τ_{eq} ：地震により生じるせん断応力を N_{eq} 回の一樣波形に換算した場合の繰返しせん断応力（Seedら⁵⁾の方法に基づいている。）、 τ_r ： N_{eq} 回の繰返しで液状化が生じるせん断強度、 C ：繰返し三軸試験でのせん断応力比を D_r で除した値（図3.2の縦軸として求める。図中のラインは、Donovan⁶⁾が既往の繰返し三軸試験をとりまとめた結果に基づいている。）、 r_d ：深さ方向の補正係数、 r_g ：三軸試験強度を原位置での強度に換算する補正係数、 g ：重力加速度

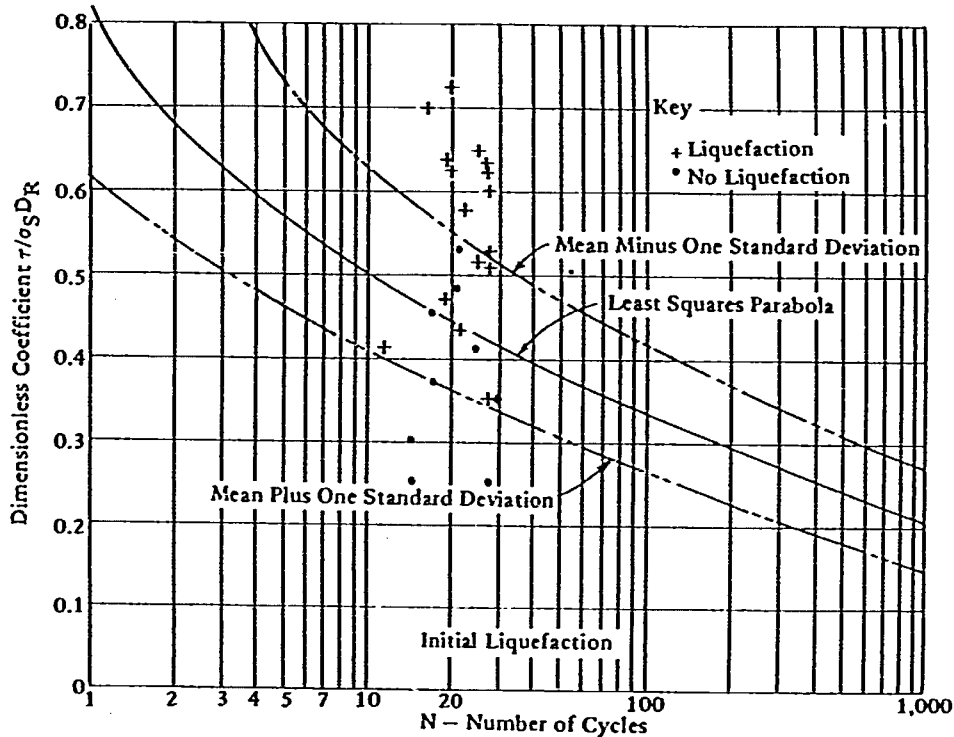


図3.2 液状化強度比と繰返し回数⁴⁾の関係

N_{eq} を地震マグニチュード M の関数として、また a_{max} を着目地点から断層までの距離 d と M の関数として表し、 d と地盤条件を仮定した場合の、 F_g （いくつかの信頼度に対する値を分布から求めたもの）と液状化確率の算定結果を図3.3に示す。さらに彼らは、地震の平均発生率を M の関数として表すことにより、期間内液状化発生確率を算定した。

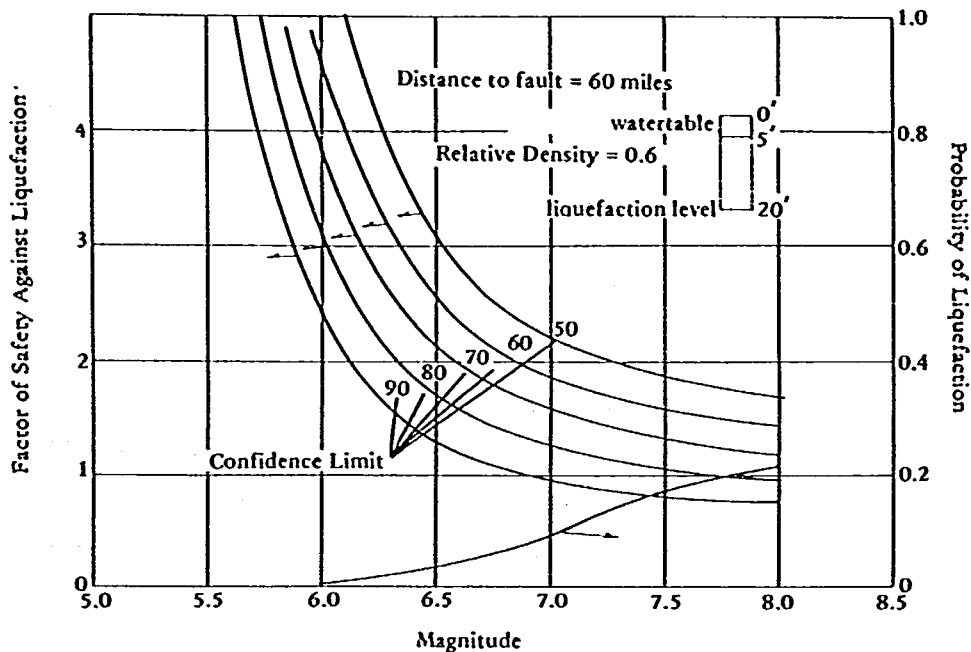


図3.3 地震マグニチュードと液状化安全率及び液状化確率の関係の計算例⁴⁾

(4) Youdらの研究

Youdら⁷⁾は、液状化により引き起こされる地盤破壊の可能性の分布地図を作成する手順を次のように示し、試算を行った。

- 1) 液状化を生じ得る地震のマグニチュードと震央距離の関係をを用いて、着目する地域周辺の地震の平均発生率から、液状化を生じ得る地震の平均発生率の逆数を再現期間として算定し、その分布図(ground failure opportunity map)を作成する。(図3.4(1))
- 2) 地盤の微地形分類と生成年代から、液状化を生じ得る地震が発生した場合の、液状化危険度の定性的な分布図(ground failure susceptibility map)を作成する。(図3.4(2))
- 3) 1)と2)の結果を組み合わせて、地盤破壊の総合的な可能性分布図(ground failure potential map)を作成する。(図3.4(3))

(5) Yegianらの研究

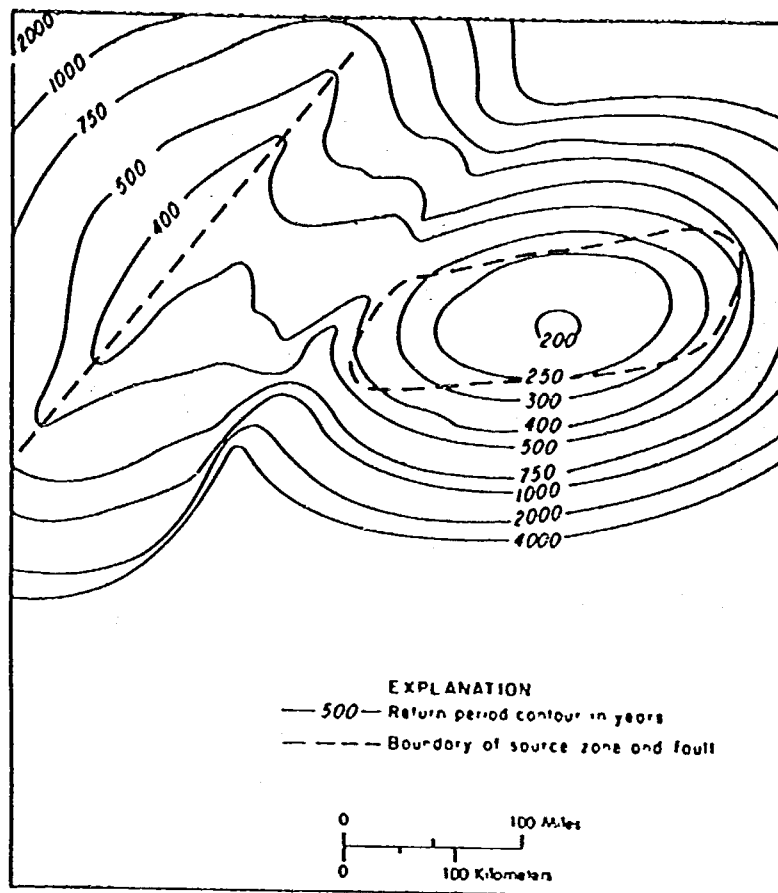
Yegianら⁸⁾は、合計43ケースの事例をもとに、地震のマグニチュード M と震源距離 R (単位mile) の関数として式(3.8)で表される変数 Sc を用いた分析を行い、式(3.9)による補正 N 値と液状化が生じる限界値 $\bar{Sc}$ の関係を図3.5のように求めた。

$$Sc = \frac{e^{0.5M \cdot H}}{(R+16) \cdot \sigma_v'} \quad \dots (3.8)$$

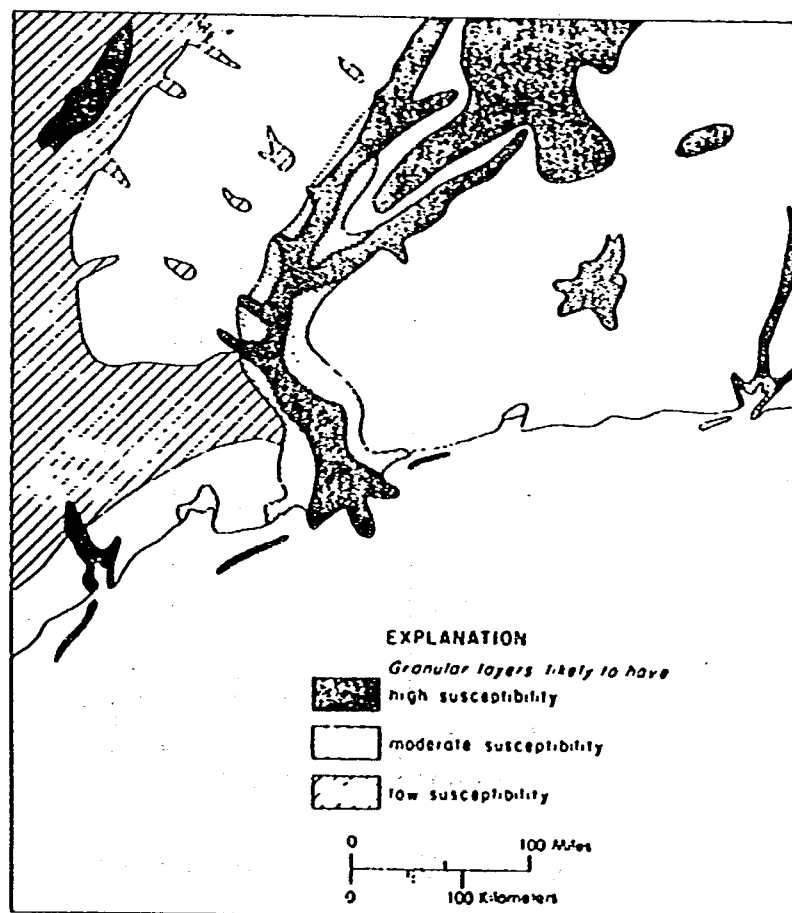
ここに、 H : 着目点の深度(単位feet)、 σ_v' : 着目点の有効上載圧(単位psi)

$$N' = \frac{50 \cdot N}{\sigma_v' + 10} \quad \dots (3.9)$$

ここに、 N' : 補正後の N 値、 N : 補正前の N 値 ($\sigma_v' = 40 \text{ psi} = 2.88 \text{ kgf/cm}^2$ のとき $N' = N$)

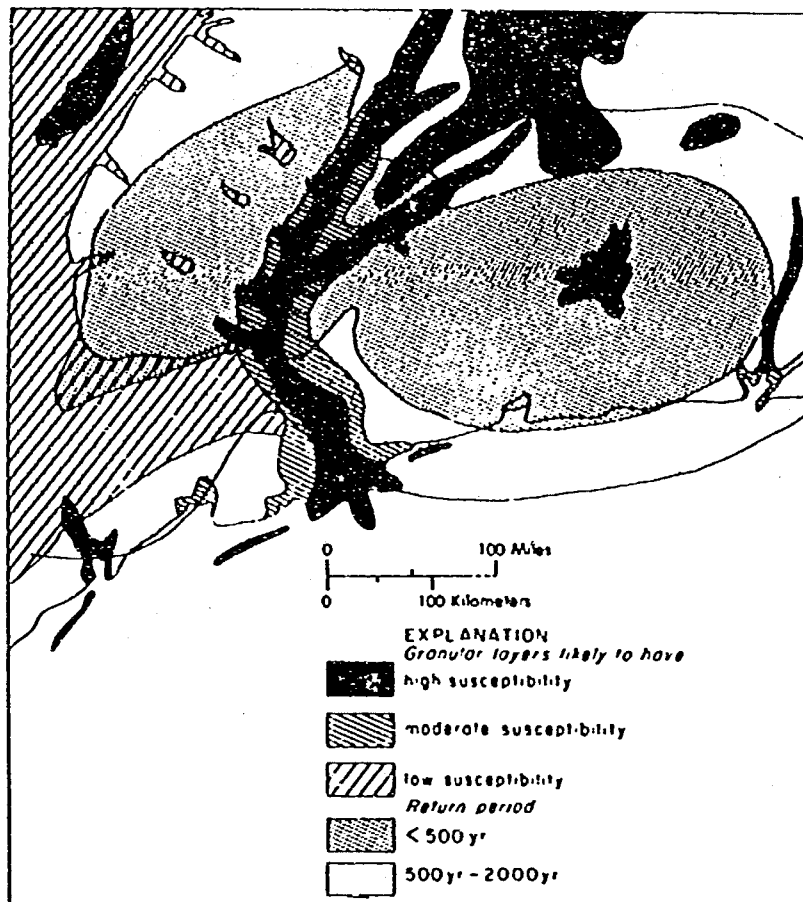


(1) 液状化を生じ得る地震の再現期間の分布図



(2) 液状化危険度の定性的分布図

図3.4 液状化による地盤破壊の可能性分布地図の作成例⁷⁾



(3) 地盤破壊の総合的な可能性分布図

図3.4 液状化による地盤破壊の可能性分布地図の作成例⁷⁾

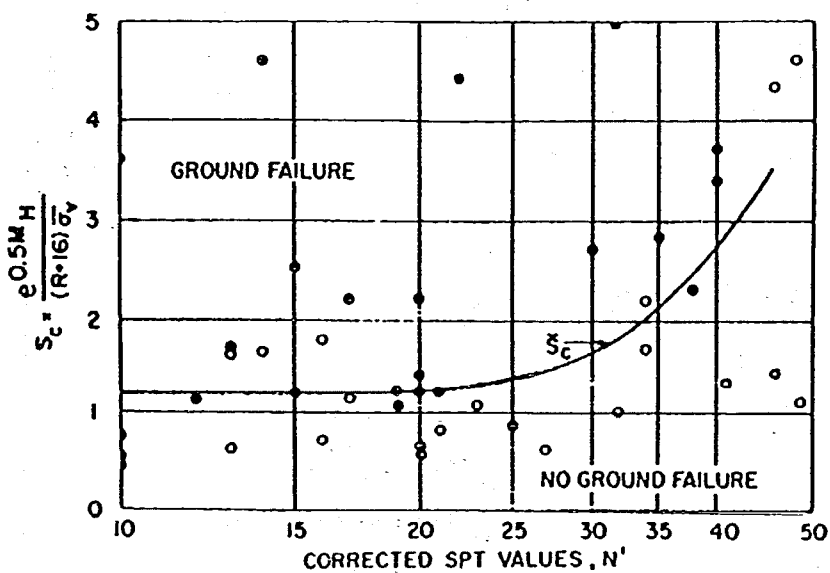


図3.5 液状化が生じる限界値 $\bar{S}_c$ と、補正 N 値の関係⁸⁾

彼らは、次式により求められる液状化可能性指標 (Liquefaction Potential Index) L P I が対数正規分布となることを仮定して、液状化の発生確率の算定法を示した。地下水位が地表面と一致する場合について、液状化確率が50%となるMとRの関係を求めた結果を、N' の関数として図3.6に示す。

$$L P I = \frac{S_c}{\bar{S}_c} \quad \dots (3.10)$$

$$\left. \begin{array}{l} L P I > 1.0 : \text{液状化する} \\ L P I < 1.0 : \text{液状化しない} \end{array} \right\} \quad \dots (3.11)$$

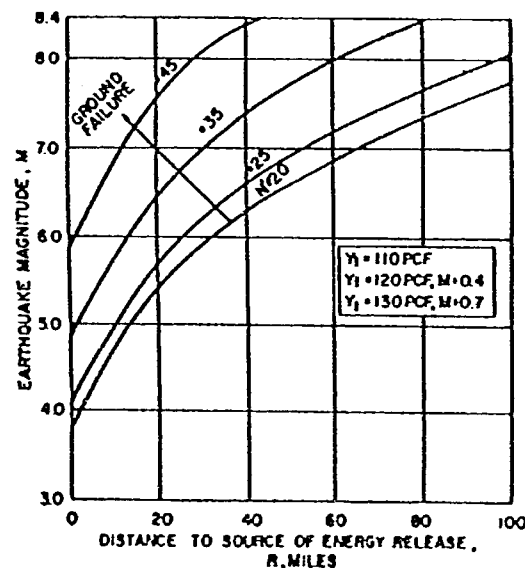


図3.6 液状化確率が50%となる地震マグニチュードと震央距離の関係⁸⁾

さらに彼らは、着目点のまわりに地震源が環状に均一分布し、また、マグニチュードMの地震の平均発生率 λ_M をMのある関数として表した場合について、期間内液状化発生確率の算定法を示し、試算を行った。

このように地震のマグニチュードと震源距離（または震央距離）を用いて液状化確率を定式化する方法は、 a_{max} を用いる方法と比較して、地震規模に応じた地震の平均発生率分布と震源の平面的な分布を直接的に考慮できる利点がある。

(6) McGuireらの研究

McGuireら⁹⁾は、東京湾の埋立て地を対象に、以下の3通りの方法を用いて期間内液状化発生確率の算定を行った。

- 1) 液状化を生じ得る地震のマグニチュードと震央距離の関係をj用いて、対象地域周辺の地震の平均発生率から、液状化を生じ得る地震の期間内発生確率を求め、これを期間内液状化発生確率とする。(empirical method、基本的には前述したYoudら⁷⁾の手順1)と同じ。)
- 2) 対象地盤を6層に分割して各層のN値から相対密度を推定し、細粒分含有率に関する補正を行って繰返しせん断強度比を求める。一方、次式のような距離減衰式を用いて、対象地域周辺の地震の平均発生率から a_{max} の期間内発生確率分布(図3.7)を推定し、式(3.6)と同様な計算を行って各層の繰返しせん断応力比を求める。前者が後者よりも小さい場合に液状化するものとし、前者の推定誤差として正規分布を、また、後者に

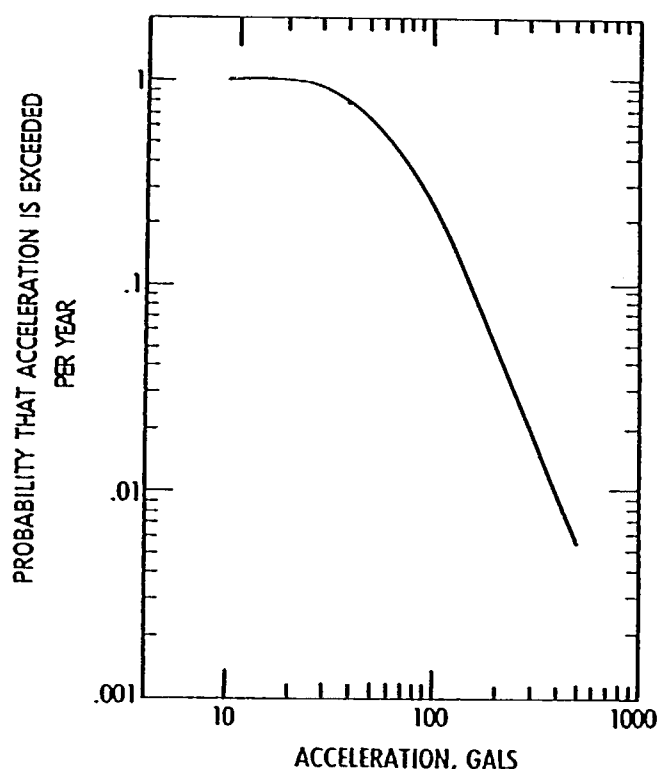


図3.7 東京湾埋立て地における最大加速度の発生確率⁹⁾

おける加速度の推定誤差として対数正規分布を仮定することにより、期間内液状化発生確率を求める。
(surface acceleration method)

$$a_{\max} = 18.4 \cdot 10^{0.30M} \cdot \Delta^{-0.80} \quad \dots (3.12)$$

ここに、 $a_{\max}$ ：最大地表加速度(単位gal)、 M ：地震のマグニチュード、 Δ ：震央距離(単位km)

3) 4種類の既往の強震記録を用いて対象地点の地震時応答解析を行い、得られた繰返しせん断応力比と用いた強震記録の M および Δ の関係を、上記のような距離減衰式を介さずに直接定式化し、これをもとに2)と同様な方法で期間内液状化発生確率を求める。(direct load-resistance method)

1)の方法では、期間内液状化発生確率が1年間で0.059となった。また、2)の方法では、図3.8に示すように1)とほぼ同程度の値が得られた。一方、3)の方法ではこれらと対応する結果が得られなかった。この理由として、定式化に用いた強震記録の数が少なかったため、繰返しせん断応力比の推定誤差が大きかったことが挙げられている。

さらにMcguireら¹⁰⁾は、同じ地盤を対象に2)の方法を拡張して、大規模な地震では地震動の継続時間が長くなることを考慮し、さらに次式による液状化指数 P_L 値(岩崎ら¹¹⁾の提案に基づく)を用いて、地盤全体としての液状化の程度に関する検討を行った。液状化の定義に用いる軸ひずみ両振幅としていくつかの値を用いた場合の、 P_L 値の年間超過確率を図3.9に示す。既往の被災事例の検討結果によれば比較的激しい液状化が生じるとされている5~15の P_L 値に対応する超過確率(すなわち、比較的激しい液状化の期間内発生確率)は、軸ひずみ両振幅として6%を用いた場合、1年間で0.025~0.045となった。

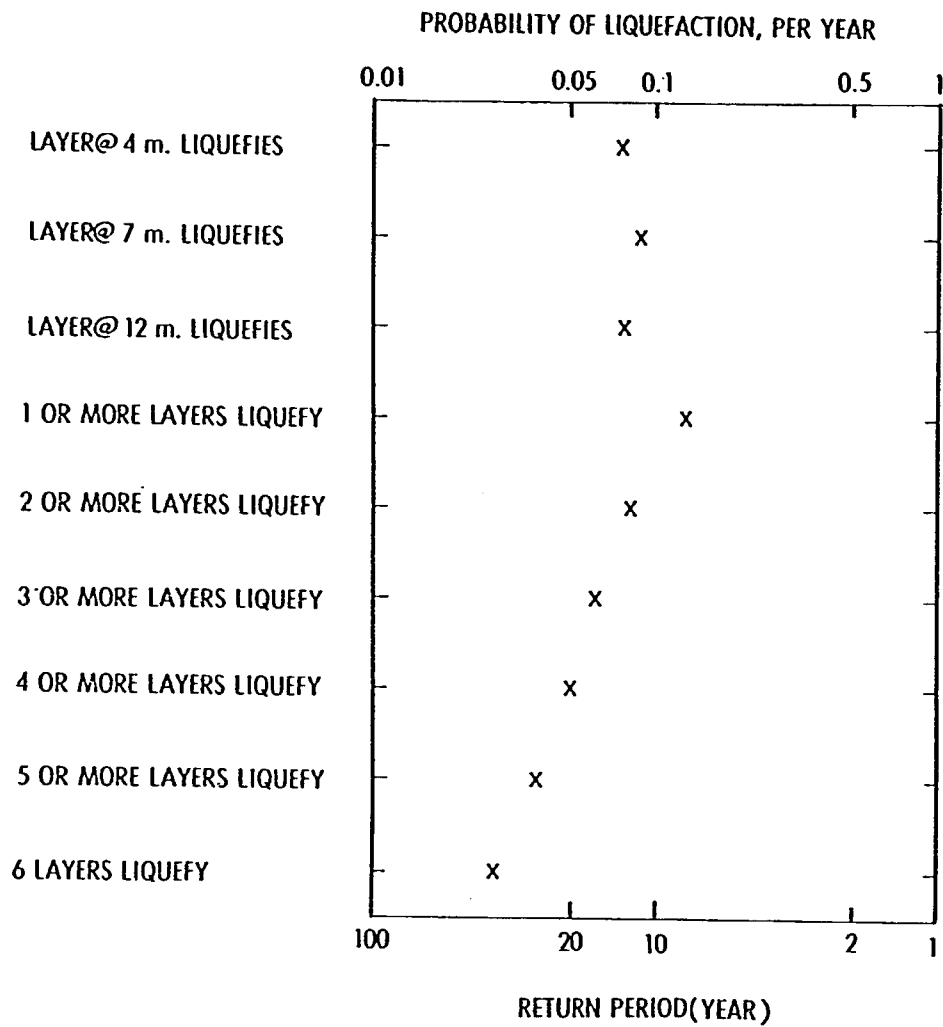


図3.8 東京湾埋立て地における期間内液状化発生確率⁹⁾

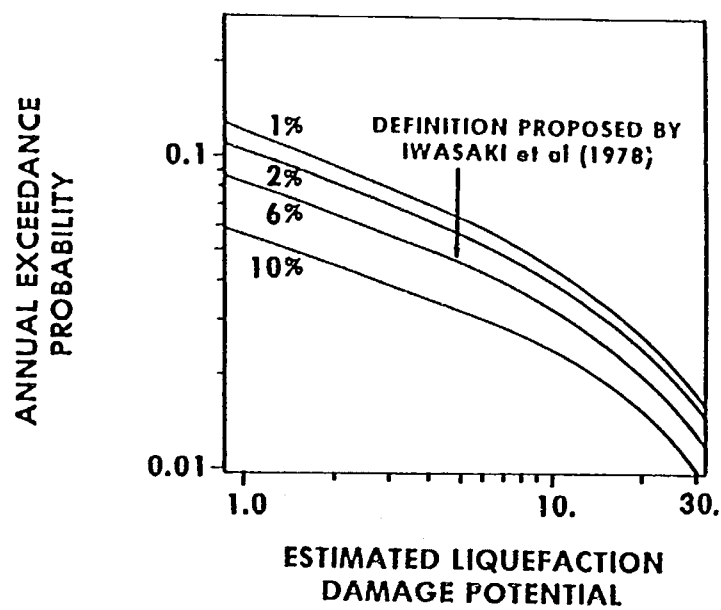


図3.9 東京湾埋立て地における液状化指数の年間超過確率¹⁰⁾

$$P_L = \int_0^{20} (1-R/L) \cdot (10-0.5 \cdot z) dz \quad \dots (3.13)$$

ここに、R：地震時せん断強度比、L：地震時せん断応力比、z：深度（単位m）
ただし、R>Lの場合、(1-R/L)はゼロとする。

(7) Halderらの研究

Halderら¹²⁾は、Seedら⁵⁾の液状化判定手法を1次近似(first-order approximation)することにより、等価繰返しせん断応力 τ_{eq} と繰返しせん断強度 τ_r の変動係数（標準偏差と平均値の比）を次式で表した。

$$\Omega_A^2 = \Omega_d^2 + \Omega_b^2 + \Omega_a^2 \quad \dots (3.14)$$

$$\Omega_R^2 = \Omega_N^2 + \Omega_C^2 + \Omega_L^2 + \Omega_v^2 + \Omega_D^2 \quad \dots (3.15)$$

ここに、 Ω_A ： τ_{eq} の変動係数、 Ω_d ：深度方向のせん断応力の低減率 r_d の変動係数、 Ω_b ：地盤の単位体積重量の変動係数、 Ω_a ： a_{max} の変動係数、 Ω_R ： τ_r の変動係数、 Ω_N ：モデル誤差の変動係数、 Ω_C ：繰返し三軸試験による繰返し強度比を原位置での強度比に換算する係数の変動係数、 Ω_L ：繰返し三軸試験による繰返し強度比の変動係数、 Ω_v ： σ_v' の変動係数、 Ω_D ： D_r の変動係数

彼らは、既往の実験結果等から上式右辺の各変動係数を定量的に評価し、さらに、 τ_{eq} と τ_r がそれぞれ対数正規分布となることを仮定して、合計30ケースの液状化事例および非液状化事例について液状化確率を算定した。結果を表3.1に示す。また、 a_{max} の平均発生率 λ_a を仮定した場合の期間内液状化発生確率の試算を行った。

表3.1 既往の液状化事例および非液状化事例を対象とした液状化確率の算定結果¹²⁾

Case number (1)	Earthquake (2)	$\bar{R}$ (3)	$\bar{D}_r$ (4)	$\bar{C}_r$ (5)	$\bar{\tau}_r$ (6)	$\bar{\tau}_r$ (7)	$\Omega_{\tau_r}^2$ (8)	$\Omega_{\tau_r}^2$ (9)	Probability of liquefaction (10)	Field behavior (11)
1	Niigata (1802)	0.599	0.53	0.589	250.2	207.8	0.0915	0.00026	0.316	No liquefaction
2	Niigata (1802)	0.599	0.64	0.589	302.1	207.8	0.0856	0.00026	0.123	No liquefaction
3	Niigata (1887)	0.628	0.53	0.595	264.8	138.5	0.0956	0.00026	0.023	No liquefaction
4	Niigata (1887)	0.628	0.64	0.595	319.7	138.5	0.0897	0.00026	0.003	No liquefaction
5	Mino Owari (1891)	0.495	0.65	0.567	505.7	1151.1	0.0831	0.36709	0.870	Liquefaction
6	Mino Owari (1891)	0.495	0.55	0.567	323.8	876.1	0.0890	0.36078	0.921	Liquefaction
7	Mino Owari (1891)	0.557	0.75	0.567	429.4	746.2	0.0773	0.36043	0.760	No liquefaction
8	Mino Owari (1891)	0.601	0.72	0.567	404.8	606.1	0.0791	0.36026	0.679	Liquefaction
9	Tohnankai (1944)	0.525	0.40	0.568	119.7	87.6	0.1116	0.36016	0.264	Liquefaction
10	Tohnankai (1944)	0.489	0.30	0.568	45.4	54.3	0.1456	0.36013	0.556	Liquefaction
11	Fukui (1948)	0.587	0.72	0.581	493.4	492.4	0.0826	0.36034	0.544	Liquefaction
12	Fukui (1948)	0.632	0.90	0.581	499.2	492.4	0.0698	0.36034	0.533	No liquefaction
13	Fukui (1948)	0.538	0.40	0.581	103.1	264.9	0.1132	0.36014	0.905	Liquefaction
14	Fukui (1948)	0.587	0.50	0.581	228.0	519.6	0.0911	0.36026	0.872	Liquefaction
15	Chile (1960)	0.407	0.50	0.567	185.9	197.0	0.1066	0.36018	0.472	Liquefaction
16	Chile (1960)	0.407	0.55	0.567	204.5	197.0	0.1024	0.36018	0.411	Liquefaction
17	Chile (1960)	0.407	0.75	0.567	328.7	259.8	0.0906	0.36026	0.291	No liquefaction
18	Niigata (1964)	0.543	0.53	0.577	222.2	277.1	0.0891	0.00026	0.816	Liquefaction
19	Niigata (1964)	0.543	0.70	0.577	356.5	341.1	0.0803	0.00043	0.492	Liquefaction
20	Niigata (1964)	0.543	0.64	0.577	268.3	277.1	0.0832	0.00026	0.601	No liquefaction
21	Niigata (1964)	0.543	0.53	0.577	363.3	341.1	0.0928	0.00043	0.475	No liquefaction
22	Alaska (1964)	0.483	0.50	0.568	157.7	259.8	0.0928	0.36026	0.732	Liquefaction
23	Alaska (1964)	0.483	0.44	0.568	223.2	281.4	0.1042	0.36026	0.579	Liquefaction
24	Alaska (1964)	0.483	1.00	0.568	394.2	255.8	0.0697	0.36043	0.184	No liquefaction
25	Alaska (1964)	0.483	0.65	0.568	205.0	277.1	0.0837	0.36026	0.618	Liquefaction
26	Alaska (1964)	0.483	0.68	0.568	272.7	433.0	0.0840	0.36026	0.712	Liquefaction
27	Tokachioki (1968)	0.567	0.78	0.573	222.6	221.8	0.0764	0.00015	0.548	No liquefaction
28	Tokachioki (1968)	0.477	0.52	0.573	116.3	212.6	0.0939	0.00015	0.985	Liquefaction
29	Tokachioki (1968)	0.567	0.80	0.573	230.9	185.5	0.0786	0.00014	0.255	No liquefaction
30	Tokachioki (1968)	0.477	0.55	0.573	157.9	236.4	0.0909	0.00018	0.935	Liquefaction

(8) Fardisらの研究

Fardisら¹³⁾は、いくつかの機関で実施された合計192ケースの繰返し単純せん断試験結果を、試験条件に応じて図3.10に示す計8つのグループに分類した。これを分析することにより、液状化までの繰返し回数と繰返しせん断応力比の関係を、供試体の作成方法、相対密度、拘束圧、端面条件などに応じた変数を用いて定式化し、それぞれの変数のばらつきを統計的に評価した。さらに、次式による過剰間隙水圧の発生モデル(Seedら¹⁴⁾に基づく)に、この関係式を代入した結果を示した。

$$\frac{\Delta u}{\sigma_v'} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left[\frac{n}{N_L} \right]^{1/2} \theta \quad \dots (3.16)$$

ここに、 Δu : 過剰間隙水圧、 n : 繰返し回数、 N_L : 液状化までの繰返し回数、 θ : 過剰間隙水圧の発生特性を示す係数

Fardisら¹⁵⁾は、上記の結果を用いて2通りの1次元地盤を対象に、全応力解析(モデルA)、過剰間隙水圧の消散を考慮しない有効応力解析(モデルB)、および過剰間隙水圧の消散を考慮した有効応力解析(モデルC)を行った。有効応力解析では、過剰間隙水圧の影響を考慮した平均有効主応力の平方根に、せん断剛性が比例するものとした。過剰間隙水圧比が1.0となったときを液状化と定義した場合の、各層ごとの液状化確率(図中の η)の深度方向分布を図3.11に示す。Aの全応力解析では、液状化確率が連続的に変化したのに対し、BおよびCの有効応力解析では、液状化確率が0または1のどちらかに近い値となった。この理由として、有効応力解析では、液状化確率が1に近づいた部分でエネルギーの吸収が生じるため、隣接した部分で液状化が生じにくくなることが挙げられている。

さらに彼らは、2次モーメントを用いた近似解析(First-order second-moment analysis)を行い、断面内での液状化確率の最大値が1となる確率(少なくとも1層で液状化が生じる確率)が、上記の有効応力解析とほぼ同程度になることを示した。液状化が生じる際の換算N値と最大せん断応力比の関係について、この近似解析法と既往の液状化・非液状化事例を比較したものを図3.12に示す。近似解析において関与するすべての要因の不確実性を考慮する(図中の $\sigma_Y=2.9$ の場合)と、液状化確率のばらつきが実際以上に過大評価される結果となった。

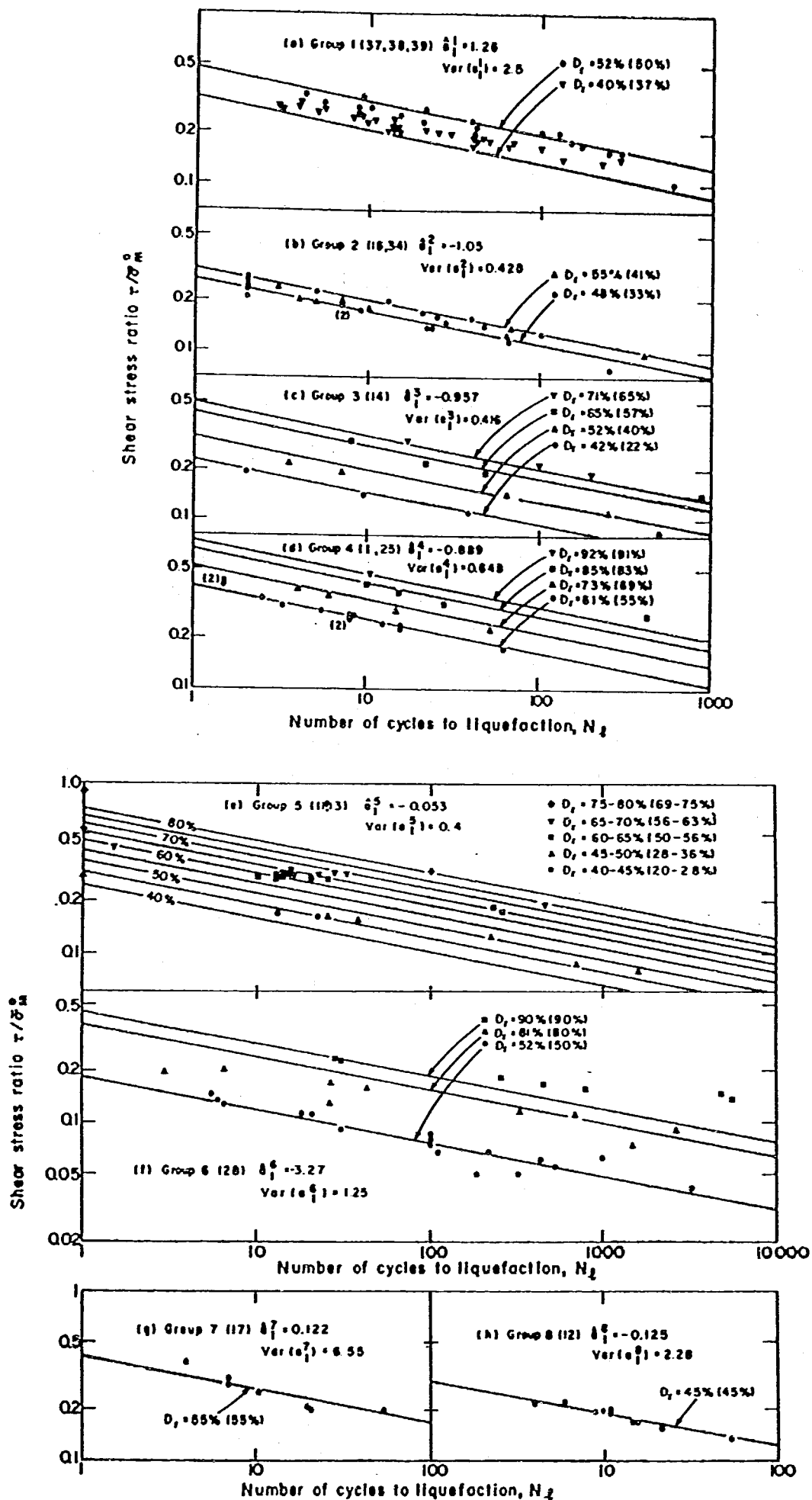


図3.10 液状化までの繰返し回数と繰返しせん断応力比の関数の分類結果¹³⁾

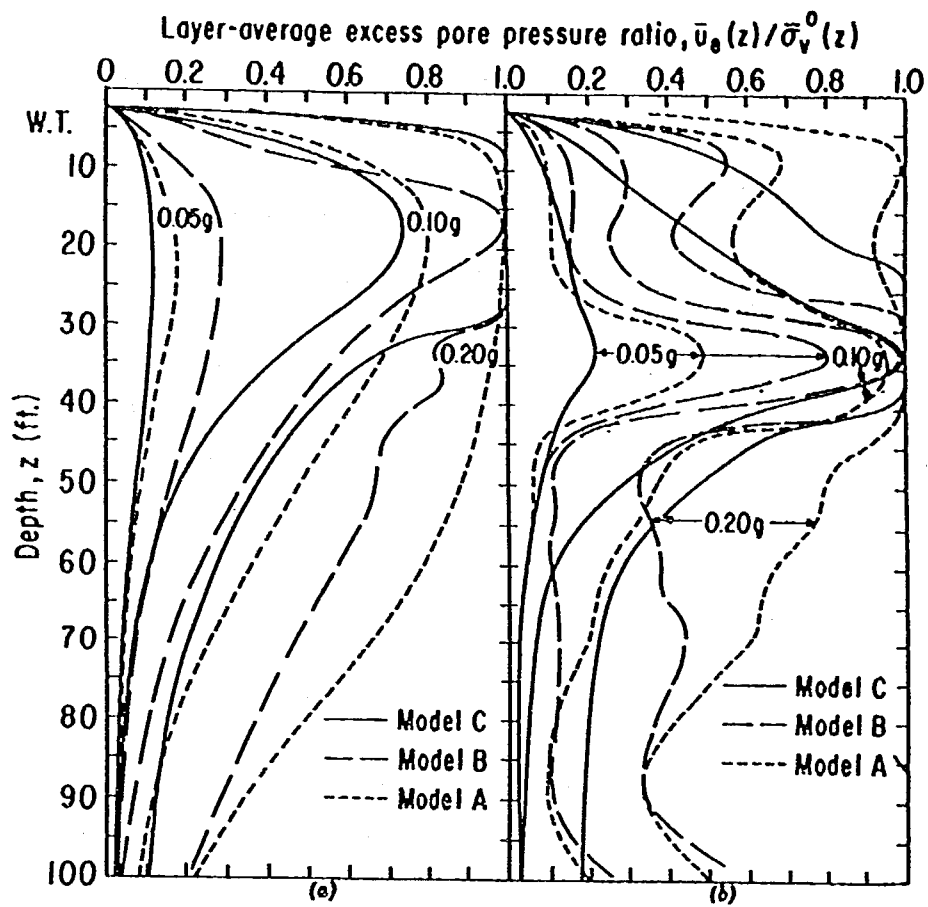


図3.11 液状化確率の深度方向分布¹⁵⁾

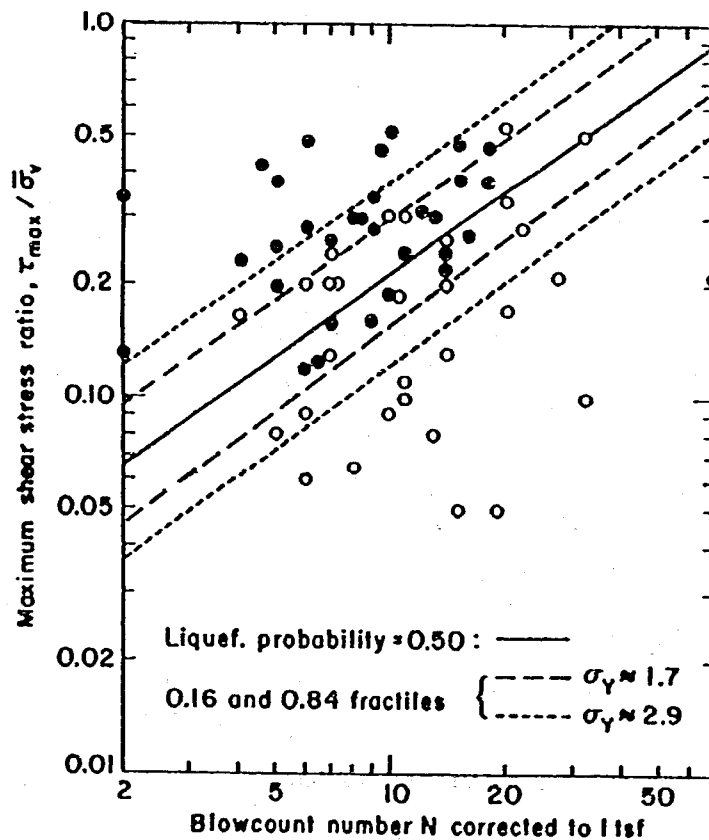


図3.12 近似解析による液状化確率と既往の液状化・非液状化事例の比較¹⁵⁾

(9) Chameauらの研究

Chameauら¹⁶⁾は、過剰間隙水圧 Δu を確率的に予測する方法として、次の2通りの方法を示した。

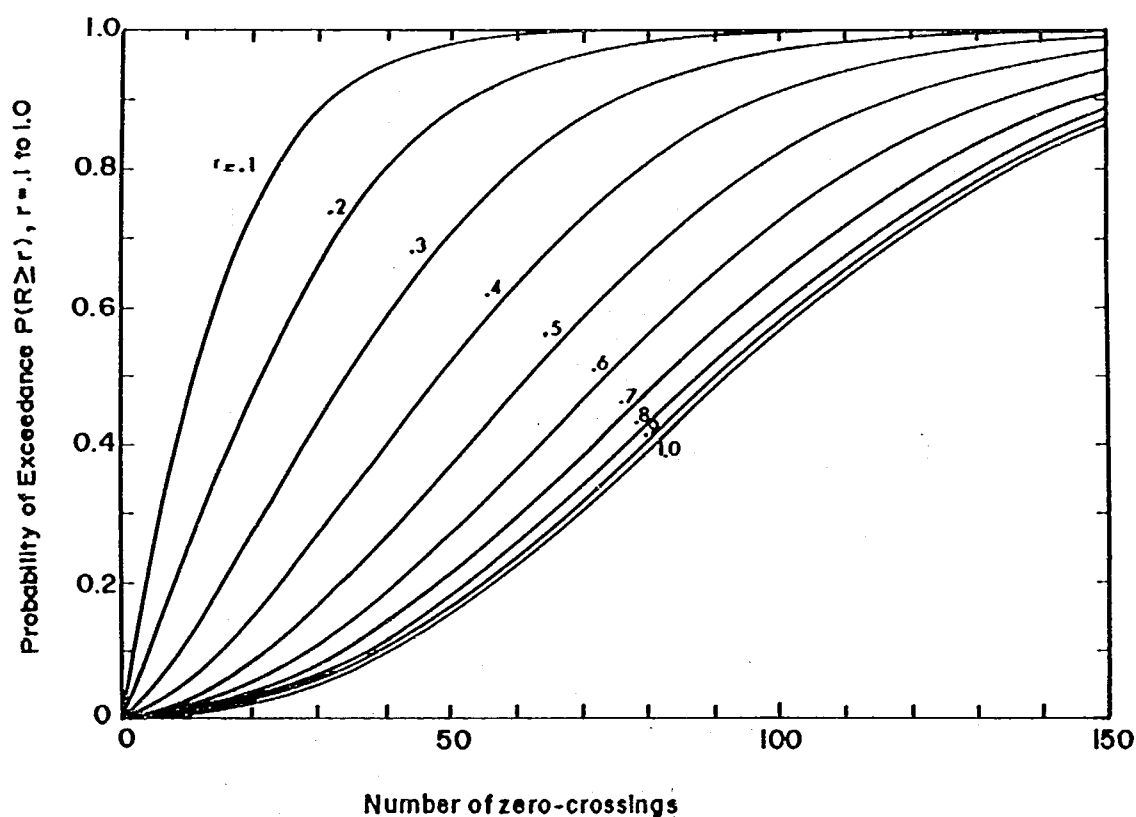
- 1) Δu の発生モデルとして式(3.16)と同様な関係を用いて、繰返しせん断応力振幅の確率密度関数を仮定することにより、 Δu の確率分布を求める。
- 2) 仮定した分布を満たすようにランダムに設定した土質定数と繰返しせん断応力振幅の時刻歴の組み合わせを用いて、1次元の有効応力応答解析を繰り返し行い、その結果を統計的に処理して Δu の確率分布を求める。

1)の方法で、繰返しせん断応力振幅 τ_d の確率密度関数 f が次式のような指数分布に従うと仮定した場合の、過剰間隙水圧比の超過確率の計算例を図3.13(1)に、また、対応する土質定数分布を用いて2)の方法で計算した結果との比較を図3.13(2)に示す。結果がせん断応力の繰返し回数だけの関数として表される点が特徴的である。

$$f(\tau_d) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot \tau_d) \quad \dots (3.17)$$

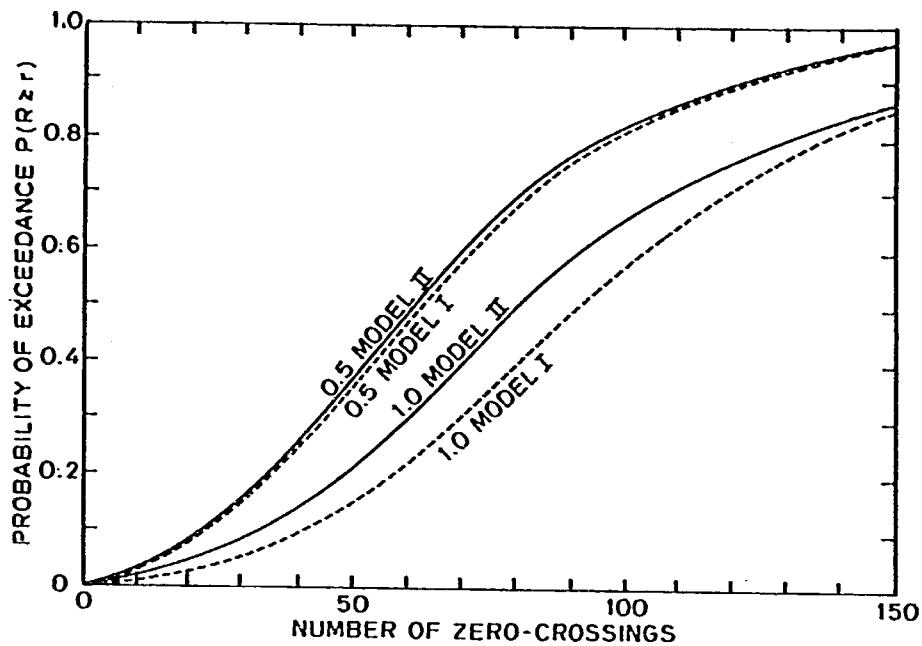
ここに、 λ ：着目点の深度、有効上載圧、加速度振幅のRMS (Root Mean Square, 2乗平均の平方根、図3.13の計算例では 38.2 cm/s^2 とした。)及び深度方向の低減係数の関数として求められる定数

さらに彼らは、加速度振幅のRMSと再現期間の関係、及びせん断応力の繰返し回数の確率分布を仮定することによって、所定の期間内における過剰間隙水圧の超過確率を求める方法を示した。サンフランシスコにある地盤を対象とした試算例を図3.14に示す。



(1) 方法1)の結果

図3.13 過剰間隙水圧比の超過確率とせん断応力振幅の繰返し回数の関係¹⁶⁾



(2) 方法1)と2)の比較

図3.13 過剰間隙水圧比の超過確率とせん断応力振幅の繰返し回数の関係¹⁶⁾

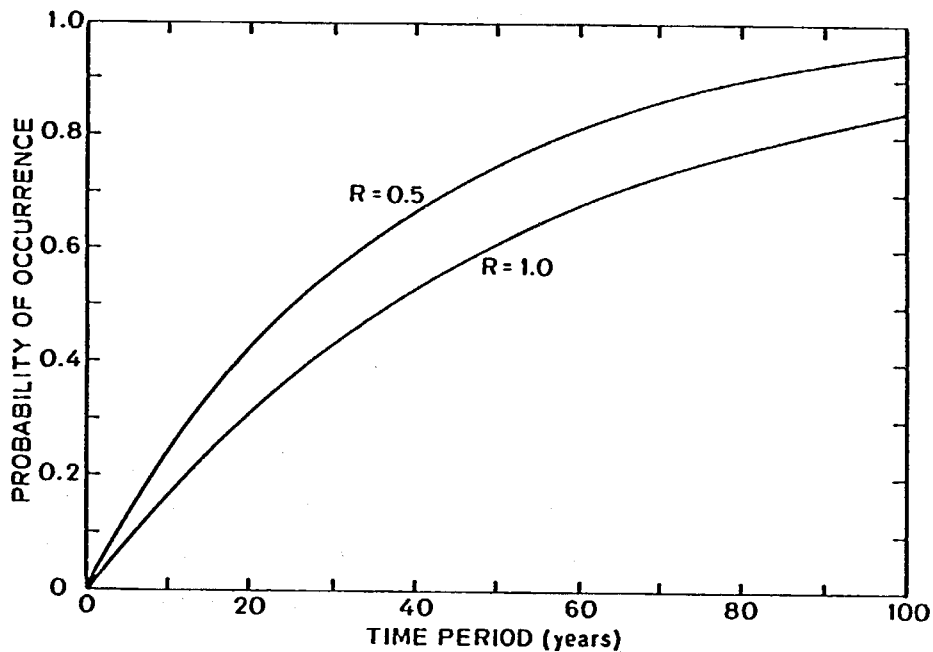


図3.14 所定期間内における過剰間隙水圧比の超過確率の試算結果¹⁶⁾

(10) Atkinsonらの研究

Atkinsonら¹⁷⁾は、Seedら⁵⁾¹⁸⁾の液状化判定手法と、式(3.12)と同様な距離減衰式を組み合わせ、地震の平均発生率と震源の分布、及びN値等の地盤条件から液状化の期間内発生確率を求める手法を示した。カナダ沖合海底地盤を対象とした試算結果を図3.15に示す。(図中の N_1 は、式(3.9)と同様な有効上載圧に関する補正を、相対密度の範囲を2通りに分けて行ったN値。)液状化の判定は絶対論的に行い、地震の平均発生率のみを確率変数としている点が特徴的である。

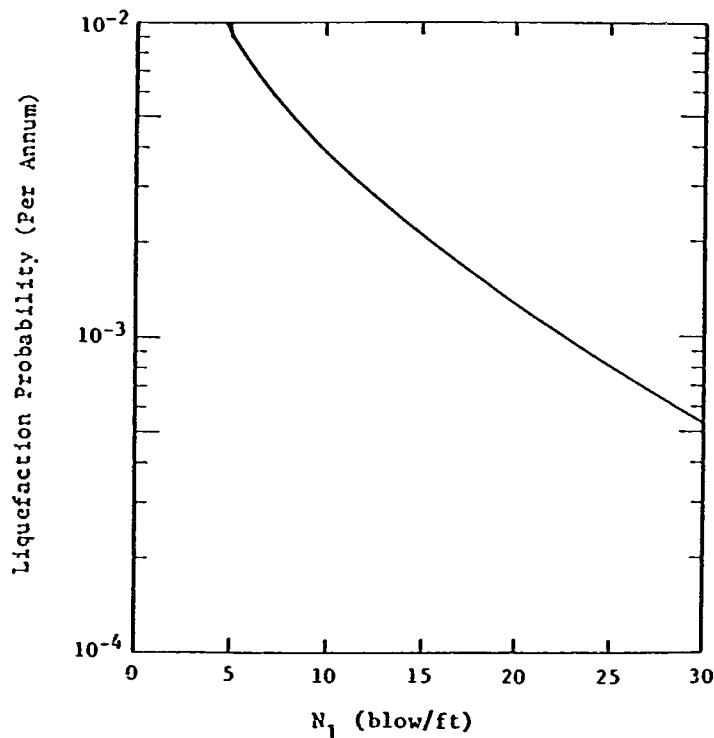


図3.15 液状化の期間内発生確率の試算結果¹⁷⁾

(11) Liaoの研究

Liao¹⁹⁾ は、液状化確率 P_{LIQ} を次式で定式化し、計278の既往の液状化・非液状化事例の分析を行った。

$$P_{LIQ} = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot X)} \quad \dots (3.18)$$

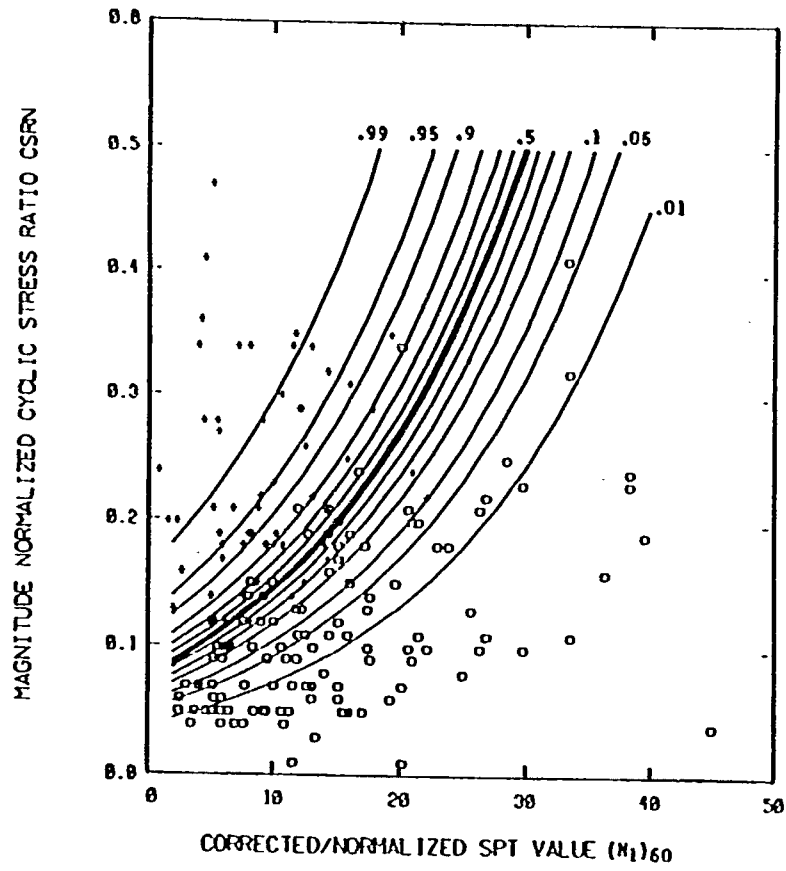
ここに、 $X = (1, x_1, x_2, \dots, x_m)$: 定式化に用いる m 個のパラメーターからなるベクトル、 $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$: 既往の事例に対する適合度がもっとも高くなるように定められる係数ベクトル

パラメーターとして、Seedらの液状化判定手法で用いられている繰返しせん断応力比 CSR_N と補正 N 値 $(N_1)_{60}$ を用いた場合の結果を図3.16に示す。図中のラインが、それぞれ数値として示された液状化確率に対応する等値線で、+印は液状化事例、○印は非液状化事例から求めたデータである。(1)に示した細粒分含有率 FC が12%以下のきれいな砂では、液状化確率の変化が比較的狭い範囲で生じるのに対し、(2)に示した FC が12%を超えるシルト質砂では、その範囲が広がった。

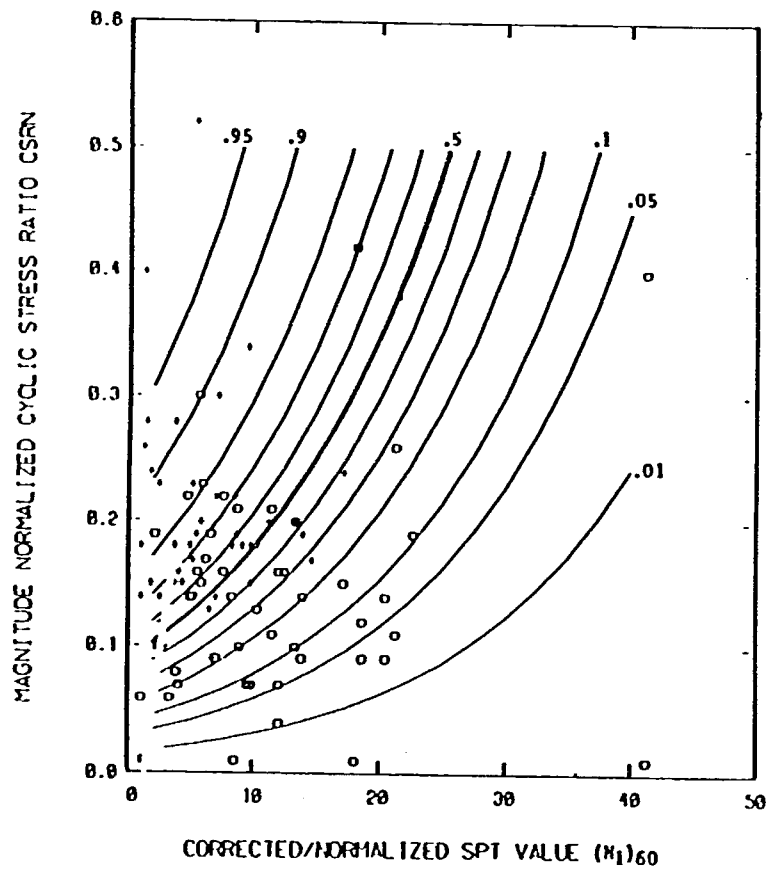
さらに彼は、この分析結果が以下の要因の影響を受けていることに注目し、これらの影響に関する検討を行った。

- 1) 測定データが真値であると仮定して分析を行ったが、実際には誤差が含まれている。
- 2) 各事例が互いに独立であると仮定して分析を行ったが、実際には、同一の地震でいくつかの事例が報告され、また、地盤条件がほぼ同一な隣接した地点での結果が別々に用いられているため、独立性は成立しない。
- 3) 一般に、液状化事例のほうが非液状化事例よりも記録に残されやすい。

きれいな砂に対する検討例を図3.17に示す。(1)は測定データの誤差が平均値ゼロの正規分布であると仮定して計算を行った例であり、誤差を考慮することにより、図3.16(1)と比較して液状化確率が変化する範囲が

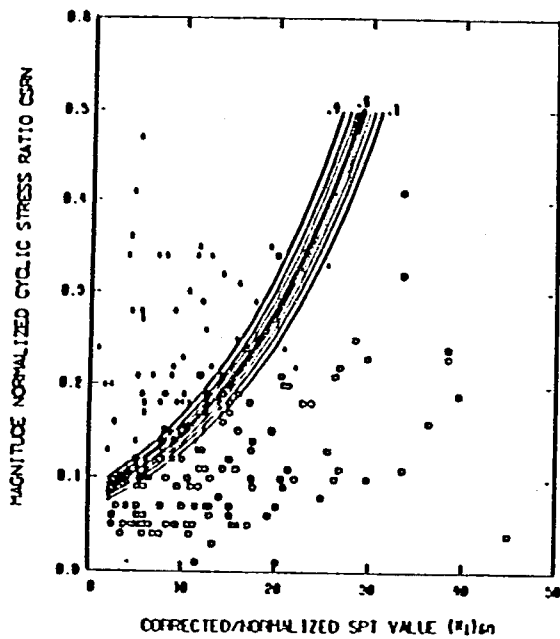


(1) きれいな砂の場合

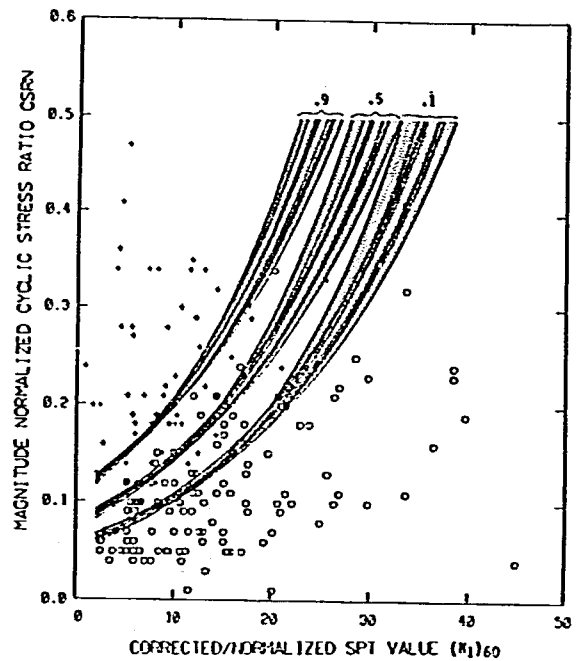


(2) シルト質砂の場合

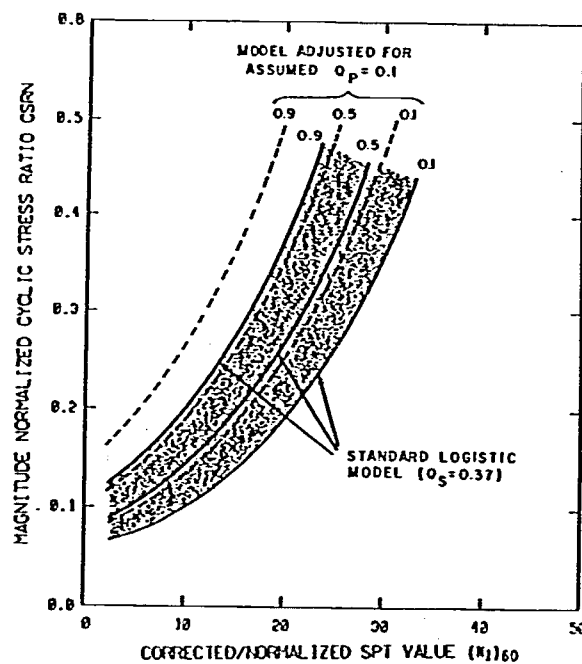
図3.16 補正N値及び繰返しせん断応力比と液状化確率の関係¹⁹⁾



(1) 測定データの誤差を考慮した場合



(2) データ間の相関性を考慮した場合



(3) 液状化事例への片寄りを考慮した場合

図3.17 液状化確率の算定結果に及ぼす諸要因の影響¹⁹⁾

狭くなった。(2)は異なる重みづけを行うことによりデータ間の相関性と各データの信頼性を簡易的に考慮して、いくつかの計算を行ったものであるが、結果はあまり変化せず、これらの要因の影響は小さかった。(3)の $Q_p=0.1$ のラインは、既往の記録が液状化事例に片寄っていることを考慮して計算を行った例であるが、これを考慮しない場合の結果(図中の $Q_s=0.37$ のライン)を非液状化事例側にほぼ平行移動した形となった。

このほかに彼は、図3.18に模式的に示すような方法を拡張して、各ポイントごとの液状化確率を式(3.18)のような定式化を行わずに事例の分布から直接求めた場合の検討を行った。また、CSRNに代わるパラメ

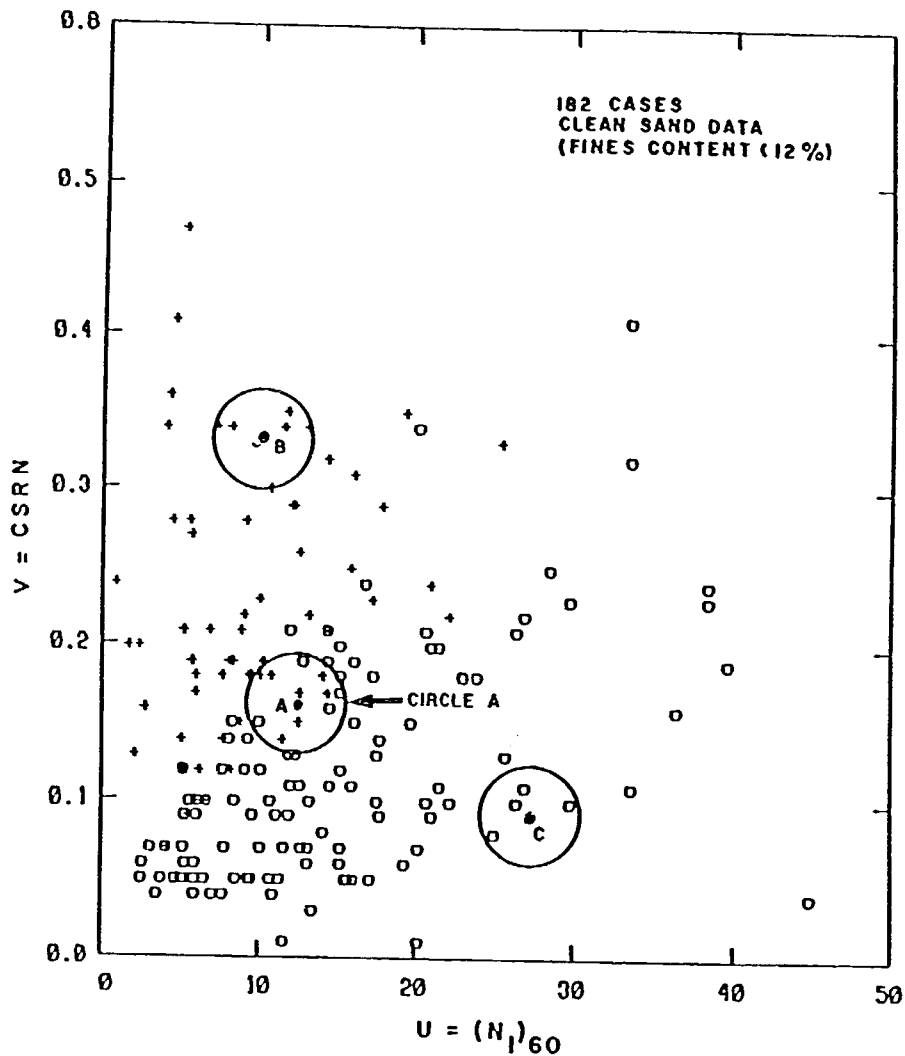


図3.18 定式化を行わずに直接液状化確率を求める方法の模式図¹⁹⁾

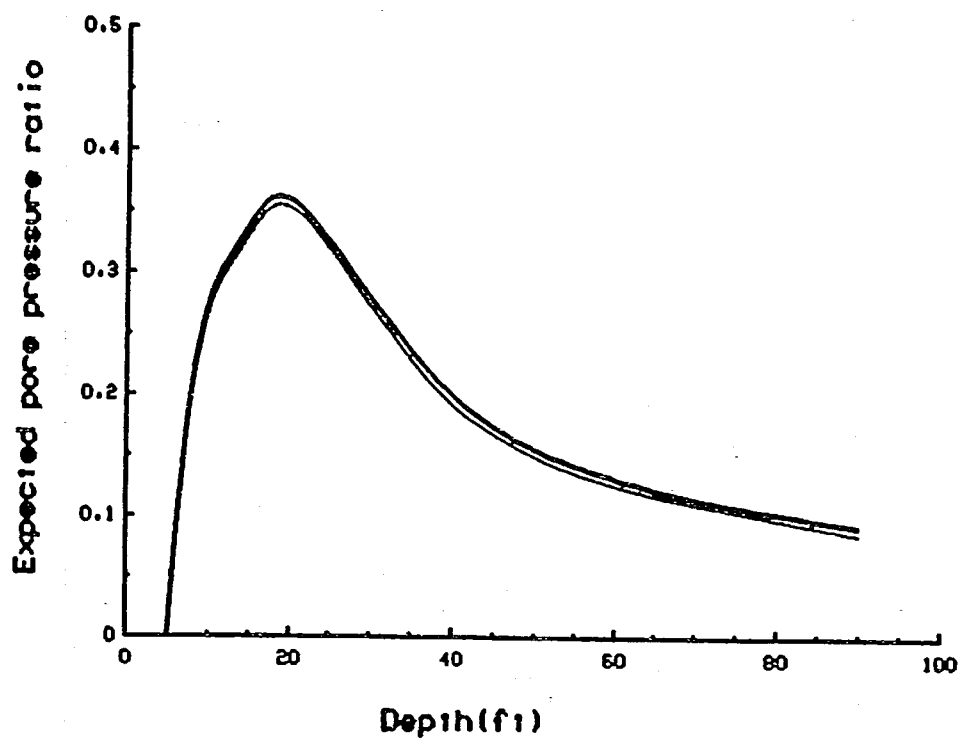
ーターとして、地震のマグニチュードと震央距離の関数として示される指数を用いた計算も行い、図3.16の結果を距離減衰式を介して換算した場合と比較した。

(12) Wangらの研究

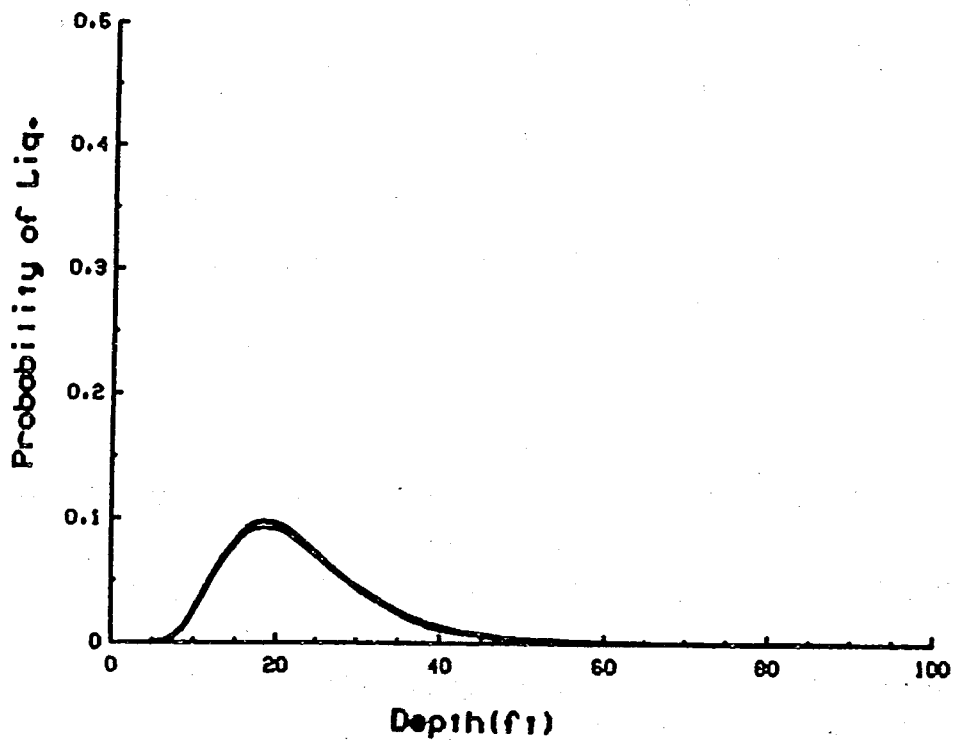
Wangら²⁰⁾は、過剰間隙水圧の発生量の確率的評価に関する検討を、以下の手順で行った。

- 1) Nonstationarity (確率分布の時間依存性) を考慮した地震動の不規則性を、加速度振幅成分と周波数成分とに分けて定式化し、それぞれに用いるパラメーターの確率分布を、計122の強震記録を分析して求める。
- 2) 過剰間隙水圧の発生量の応力比依存性を式(3.16)を拡張してモデル化した場合の適用性を、繰返し三軸試験結果をもとに明らかにする。
- 3) 計4通りの地盤を対象に、1)により定式化した地震動を入力波として周波数領域での1次元応答解析を行い、式(3.16)中の N_L が対数正規分布をとると仮定して地盤の液状化強度の不確実性を考慮した場合の、2)のモデルによる過剰間隙水圧の発生量の確率分布を計算する。

深さ100フィート(約30m)の均質な砂地盤を対象とした線形解析結果を図3.19に示す。(1)及び(2)は、ある周波数特性をもつ入力加速度振幅のRMSが 220mm/sec^2 で継続時間 t_d が15secの場合の、地震終了時における過剰間隙水圧比の期待値と液状化確率の深度方向分布である。深度20フィート(約6m)付近が最も液状化しや

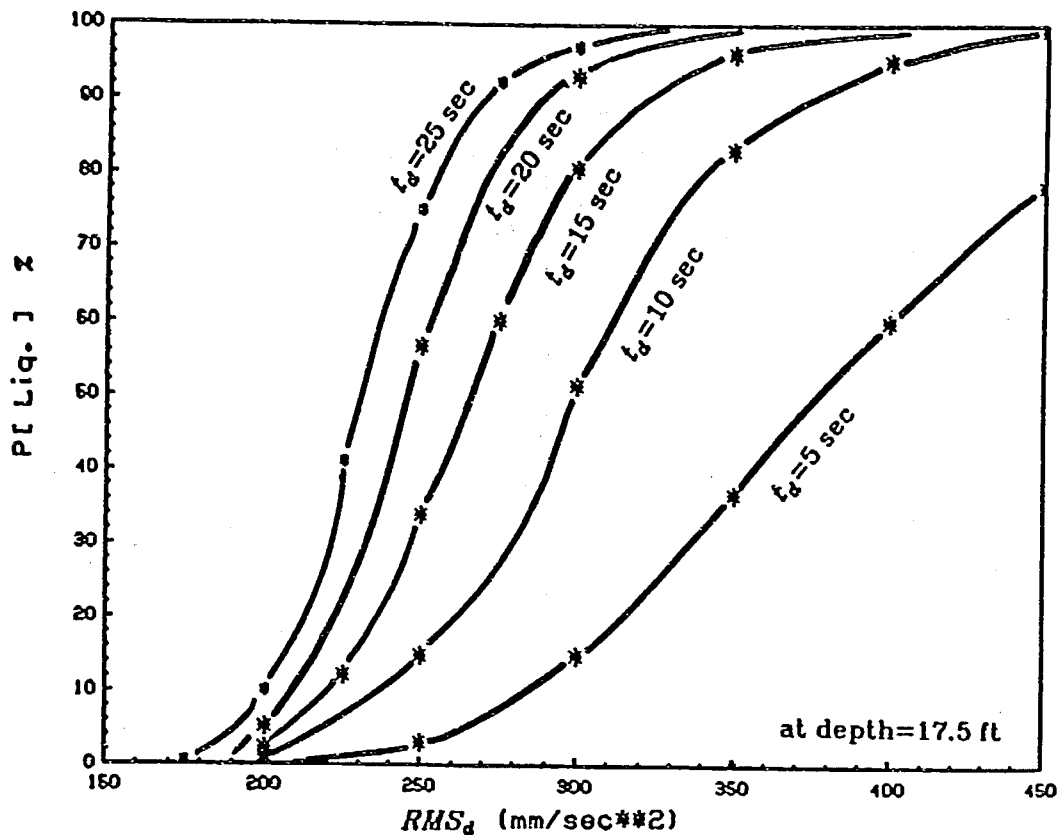


(1) 地震終了時の過剰間隙水压比の期待値の深度方向分布



(2) 地震終了時の液状化確率の深度方向分布

図3.19 一様線形砂地盤の1次元応答解析結果²⁰⁾



(3) 地震動の条件を変えた場合の液状化確率

図3.19 一様線形砂地盤の1次元応答解析結果²⁰⁾

すい結果となった。図中に2本の線があるのは、応答の確率分布が時間に依存しないとして応答解析を簡略化した場合と、しない場合とを比較したものであるが、この例ではほとんど差がなかった。また、(3)は、入力加速度の条件を変えた場合の深度17.571ト (約5.3m)における液状化確率である。この手法では、ある地点での液状化確率が上記のRMSと t_d 、及び入力波の周波数特性の関数として求められる。

さらに彼らは、非線形な地盤に対して等価線形化法を適用して応答解析を行う場合について、過剰間隙水圧の発生に伴う応答特性の変化の影響を「等価過剰間隙水圧」という概念により考慮した場合と、考慮しない場合との比較を行った。

以上の研究内容をまとめると、表3.2のようになる。表中には本研究の内容についても合わせて示した。

なお、Vanmarcke²¹⁾は、地盤材料の物性に不確実性を引き起こす要因を次の3つに分類したが、上記の研究では3)が検討対象とされている。液状化問題における1)の影響について検討したものとしては、Ootomoら²²⁾の研究がある。また、文献15)でも、1)の影響を考慮した物性の設定が行われている。

- 1) 自然に堆積した地盤が本来有している、空間内での物性分布のばらつき。
- 2) 物性を求める原位置あるいは室内試験が、限られた数しか行われないことによる不確定性。
- 3) 試験法自身がつ測定誤差、および試験により得られる指標から間接的に物性を求める際の誤差。

表3.2 液状化可能性の確率的評価に関する既往の研究内容

研究者	分析に用いた主なデータ	仮定した確率変数*	最終成果
Christianら ³⁾	液状化・非液状化事例	(統計分析)	液状化確率
Ferritoら ⁴⁾	繰返し三軸試験結果	$D_r, C, N_{eq}, a_{max}, \lambda_M$	液状化確率・期間内確率**
Youdら ⁷⁾		λ_M	液状化危険度分布図
Yegianら ⁸⁾	液状化・非液状化事例	LPI, λ_M	液状化確率・期間内確率
Mcguireら ^{9) 10)}	繰返し三軸試験結果	$\tau_{eq}, a_{max}, \lambda_M$	期間内液状化発生確率
Halderら ¹²⁾	三軸及び単純せん断試験結果	$\tau_d, \tau_r, \lambda_a$	液状化確率・期間内確率
Fardisら ^{13) 15)}	繰返し単純せん断試験結果	D_r, N_L, G	液状化確率
Chameauら ¹⁶⁾		N_L, τ_d, λ_a	Δu 発生量の確率・期間内確率
Atkinsonら ¹⁷⁾		λ_M	期間内液状化発生確率
Liao ¹⁹⁾	液状化・非液状化事例	(モデルフィッティング)	液状化確率
Wangら ²⁰⁾	強震記録	N_L, τ_d	Δu 発生量の確率
本研究	液状化・非液状化事例	F_L (または τ_r, a_{max}), λ_M	液状化、 Δu 発生量、及び F_u ***の確率・期間内確率

* 各記号の意味については本文中の説明及び巻末の記号一覧を参照

** 液状化確率：ある1回の地震に対しての確率

期間内確率または期間内液状化発生確率：ある期間内に生じるすべての地震に対する確率

*** F_u ：半地下構造物の浮上がりに対する安全率

3.2 破壊確率を考慮した地盤の耐震設計法

(1) Ferrittoらの研究

Ferrittoら⁴⁾は先に紹介した液状化確率の算定方法をもとに、液状化の影響を考慮して架橋地点を選定する基準として、表3.3に示す4段階の基準を提案した。表中の M_A 、 M_B は、それぞれ再現期間10, 25年の地震動に対応し、 M_C は再現期間50年または通常的设计地震動、 M_D は再現期間200年または生じ得る最大の地震動に対応する。また、 $FS_{m-\sigma}$ は液状化安全率 FS (式(3.5)参照) の平均値から標準偏差を差し引いた値 (信頼度84%に相当) で、 P_{LE} は供用期間内における期間内液状化発生確率である。 M_C レベルまでは P_{LE} を0.1以下に抑えること、また、 M_D レベルでは液状化が発生してもその影響が地表面に現れず、支持力破壊、水平流動、沈下などの問題が生じないことが提案されている。

表3.3 地震の再現期間に応じた橋梁基礎地盤の耐震設計基準⁴⁾

Earthquake	$FS_{m-\sigma}$	P_{LE}	Liquefaction Subsurface Layer	Propagation to Surface	Bearing Failure	Horizontal Flow Failure	Vertical Settlement Failure
M_A	≥ 1.5	≤ 0.1	No	No	No	No	No
M_B	≥ 1.3	≤ 0.1	No	No	No	No	No
M_C	≥ 1.1	≤ 0.1	No	No	No	No	No
M_D			Yes*	No	No	No	No

(2) 松尾らの研究

松尾ら²³⁾は、盛土構造物と自然斜面の耐震設計法としての、震度法による円弧すべり安定計算の有用性を検討する手順として、図3.20に示す検討フローを提案した。地震による既往の破壊事例を逆解析して得られる逆算震度 k と、地震動記録の調査から得られる推定震度 k' の比較から、 k の分布特性を確率モデルで表現し、これを用いて既往の非破壊事例の解析を行うことにより、震度法の有用性を定量的に確かめることができるとしている。ただし、液状化による破壊は検討対象とされていない。さらに彼らは、この手順に従って、河川堤防の5つの破壊事例を対象に k の逆算を行った結果を示した。

上記の検討では、地盤強度と地震動の不確実性が直接的には考慮されていないが、松尾ら²⁴⁾はこれらを考慮した解析を、新潟地震における最上川の6つの河川堤防を対象として行った。解析手順は図3.21に示すとおりで、既往の地震時に安定であったか否かの情報を考慮した最終的な安全性が、確率分布として求められる形となっている。具体的な手順を以下に示す。

1) 地盤を3層に分けて、それぞれの強度の平均値と標準偏差を用いた8通りの組み合わせについてすべり安全率を計算し、常時及び地震時のすべり安全率の確率的な分布を求める。ただし、沖積粘土地盤が対象であるため、地盤の強度として非排水せん断強度 c_u を用い、これが正規分布で近似できることから、安全率も正規分布として近似する。

2) 1)の結果から、盛土の地震時耐荷力 c (Seismic Capacity) の事前分布を求める。

3) 地震のマグニチュード、震央距離などから、距離減衰式を用いて最大地表加速度 a_{max} を求め、すべり安定計算に用いる地震時外力 a がこれに比例するものとして、その事前分布を求める。分布形として対数正規分布を仮定する。

4) 既往の地震時に安定であった ($c > a$) か否 ($c \leq a$) かの情報をもとに、ベイズの定理を用いて c と a の事後分布、及びその結合分布を計算し、 c と a の比として定義した安全率 R の事後分布を求める。

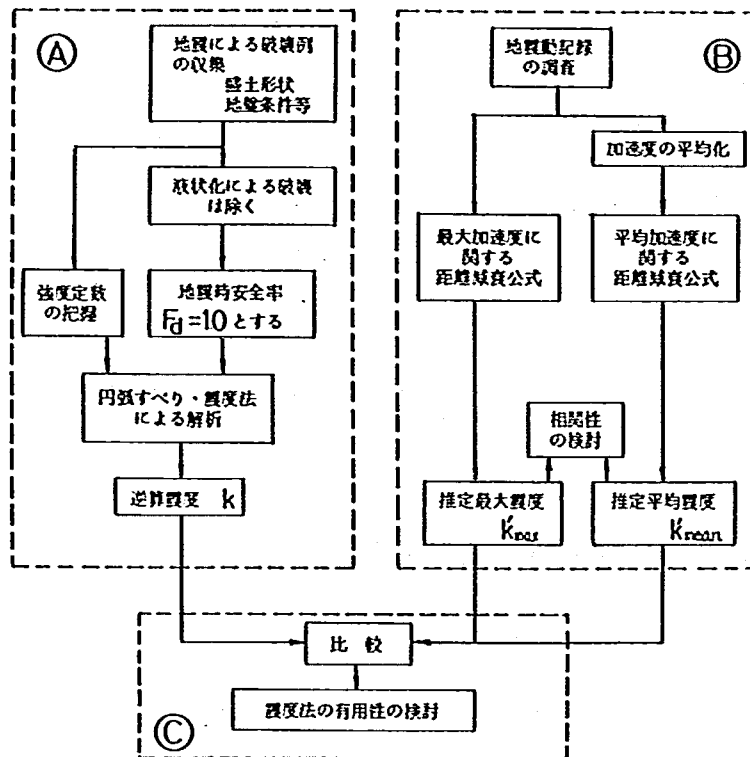


図3.20 震度法の有用性の検討手順²³⁾

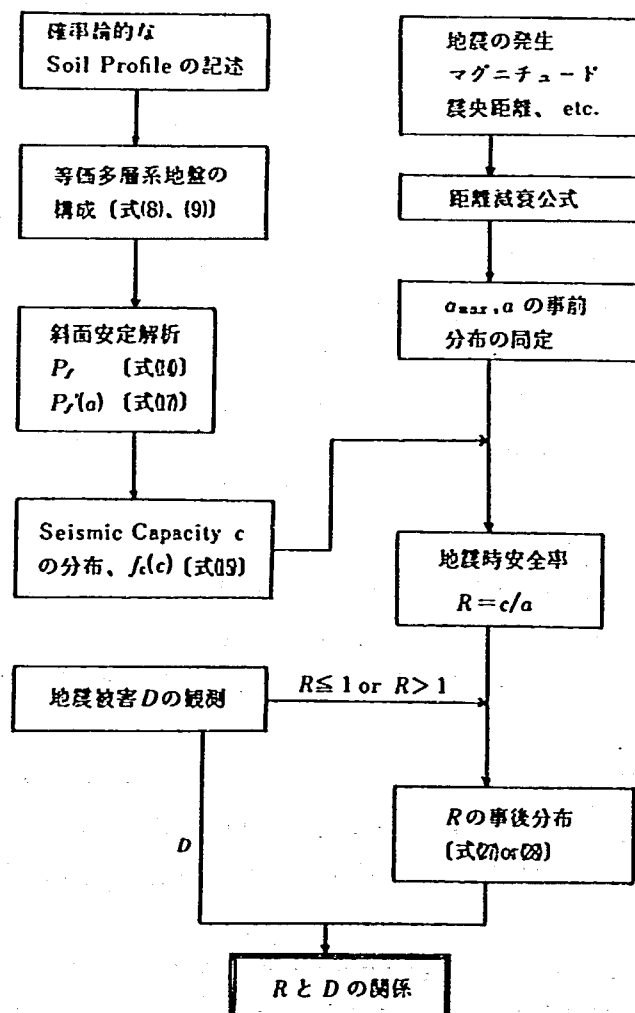


図3.21 地盤強度と地震動の不確実性を考慮した解析手順²⁴⁾

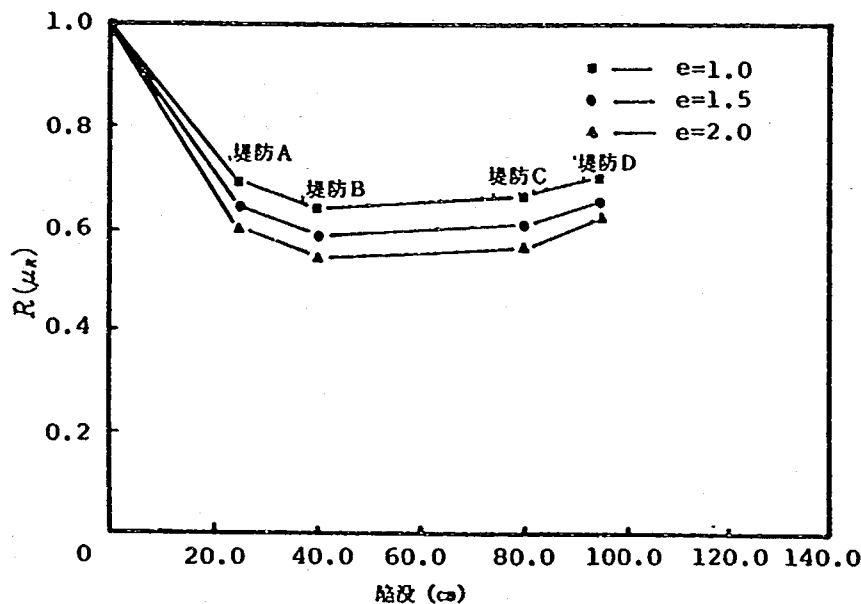


図3.22 地震時平均安全率と沈下量の関係²⁴⁾

地震で被害が生じた4つの堤防について求めた、 R の平均値と堤防の沈下量の関係を図3.22に示す。図中の e は、 a を求めるために a_{max} に乘じた係数である。

(3) Whitmanらの研究

Whitmanら²⁵⁾は、重力式擁壁の地震時の水平滑動量 d_{RW} を次式により定式化し、それぞれの補正係数のばらつきの影響を確率的に評価した。

$$d_{RW} = \bar{d}_{RV} \cdot R_{2/1} \cdot Q \cdot R \phi \cdot M \quad \dots (3.19)$$

ここに、 $\bar{d}_{RV}$ ：1つのすべりブロックからなる簡易な剛体モデルに置き換えた場合の平均水平滑動量（最大水平加速度 A とすべりが生じる限界加速度の比、及び最大速度 V の関数として表される。）、 $R_{2/1}$ ：1つのすべりブロックに強制的に置き換えたことを補正する係数（定数）、 Q ：地震動の不規則性に関する補正係数、 $R \phi$ ：土質強度の不確実性に関する補正係数、 M ：その他の要因の影響に関する補正係数

d_{RW} がある規定値 d_L を超過する確率を、地震時土圧公式を用いた通常の設計法による安全率と比較した例を表3.4に示す。地震動が小さいとき（表中の $A=0.2g$ 、 $V=10\text{inch/sec}$ の場合）に1インチ以上の滑動が生じる確率は、通常の設計法による安全率が1.2の場合には2%、1.0の場合でも10%と小さかった。一方、地震動が大きくなる（表中の $A=0.5g$ 、 $V=25\text{inch/sec}$ の場合）と、それぞれの場合に対応する確率は56%、40%と大きくなり、比較的大きな滑動が生じることが予想された。

表3.4 重力式擁壁の地震時安全率と水平滑動量の超過確率²⁵⁾

SAFETY FACTOR ON WALL WGT. SEISMIC CASE	d_L inches	CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE		
		A = 0.2 V=10 in/s	A = 0.3 V=15 in/s	A = 0.5 V=25 in/s
1.0	1	10%	28%	56%
	2	7%	18%	38%
	4	4%	10%	22%
1.1	1	5%	18%	47%
	2	3%	10%	30%
	4	2%	5%	16%
1.2	1	2%	12%	40%
	2	2%	6%	23%
	4	1%	3%	12%

(4) 北浦らの研究

北浦ら²⁶⁾は、砂質地盤上の盛土を対象に、地盤と盛土の粘着力及び内部摩擦角のばらつきと不確定性を考慮した震度法円弧すべり安定計算を行い、地震時の破壊確率を算定した。高さ4mの盛り土について、最大地表加速度 a_{max} を変化させた場合の破壊確率の計算結果を図3.23に示す。地盤内の過剰間隙水圧を考慮した場合としない場合とが合わせて示されており、図中の $\bar{P}_F$ と σ_{PF} は破壊確率の平均値と標準偏差である。過剰間隙水圧を考慮した場合には、450gal程度の地震で破壊確率が0.5程度（すべり安全率1.0に相当）となったが、考慮しない場合の破壊確率はこれよりも0.2程度小さかった。

さらに彼らは、この評価手法を既往の地震被害事例に適用し、この手法による破壊確率と実際の被害の程度が定性的に対応していることを示した。

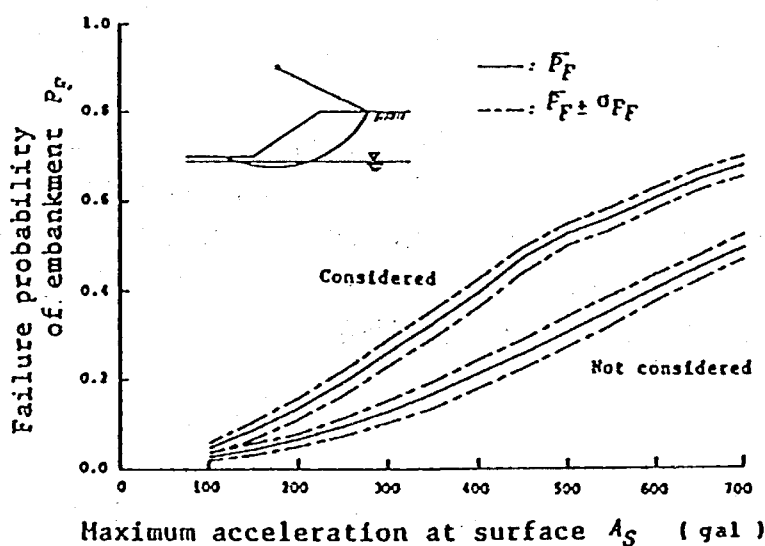


図3.23 最大地表加速度と盛土の破壊確率の関係²⁶⁾

(5) Tatsumiらの研究

Tatsumiら²⁷⁾は、確率有限要素法を用いて図3.24に示すケーソン護岸の耐震設計を行った。これは、地盤の弾性係数、単位体積重量、内部摩擦角、粘着力、及び地震水平力を確率変数として、応力解析とすべり安定計算を行うもので、次式による余裕安全度 Q_s が正規分布になると仮定し、 $Q_s \leq 0$ となる確率を破壊確率として求めている。

$$Q_s = \sum_{i=1}^N Q_{s1} \cdot \Delta L_i \quad \dots (3.20)$$

$$Q_{s1} = \tau_{f1} - \tau_1 \quad \dots (3.21)$$

ここに、 N ：すべり面が通る全要素数、 Q_{s1} ：すべり面が通る i 番目の要素の余裕安全度、 ΔL_i ： i 番目の要素のすべり面の長さ、 τ_{f1} 及び τ_1 ： i 番目の要素のすべり面上のせん断強度及び作用せん断応力

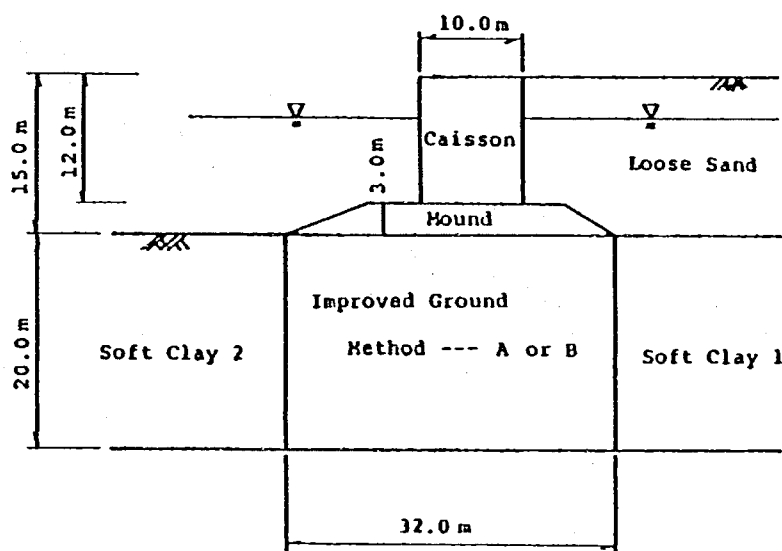


図3.24 解析対象としたケーソン護岸²⁷⁾

すべり面の位置を変えながら破壊確率を計算した結果の例を図3.25に示す。図中の○印は各すべり面を単独に用いた場合の破壊確率で、実線は Q_s が最小のすべり面で破壊が生じると仮定して、すべり面間での相関性を考慮した場合の破壊確率である。後者の場合には、特定のすべり面での破壊が卓越する結果が得られた。なお、図は円弧すべり面を仮定した場合の結果であるが、改良地盤上のマウンド内を通る直線すべり面を仮定した場合についても、同様な計算が行なわれた。

さらに彼らは、ケーソン直下の地盤改良方法を2種類（A及びB）設定し、また、それぞれの品質管理レベルを2通り（1及び2）設定した計4通りの場合について、施工費用と破壊が生じた場合の損失費用を試算し、経済性の比較を行った。結果を図3.26に示す。図の横軸は、円弧すべり破壊が生じた場合の護岸機能の停止、あるいは護岸内諸施設の被害などに起因する2次的な損失費用で、これが大きくなるに従って最適な工法がA-1からB-1、B-2の順に変わる結果が得られた。

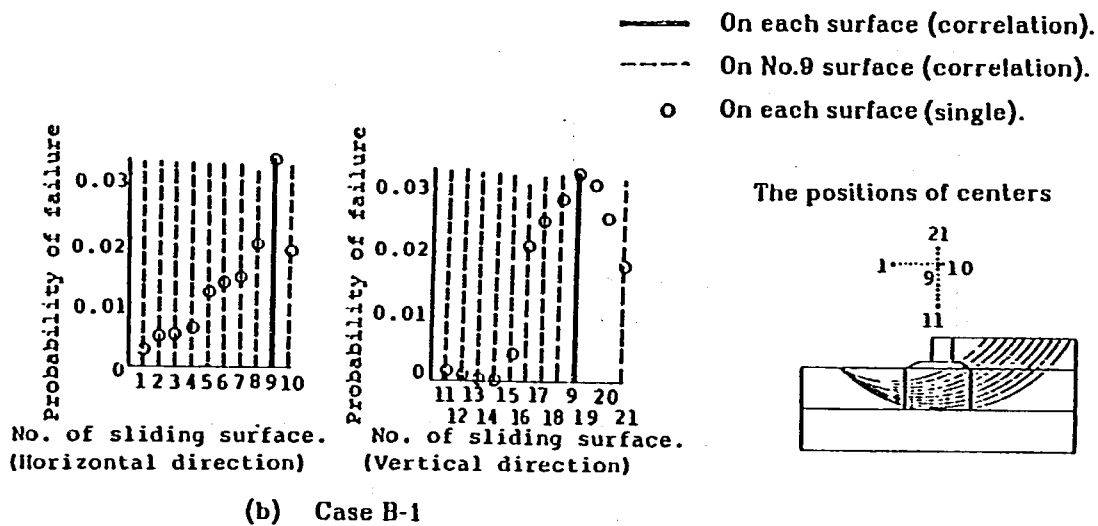
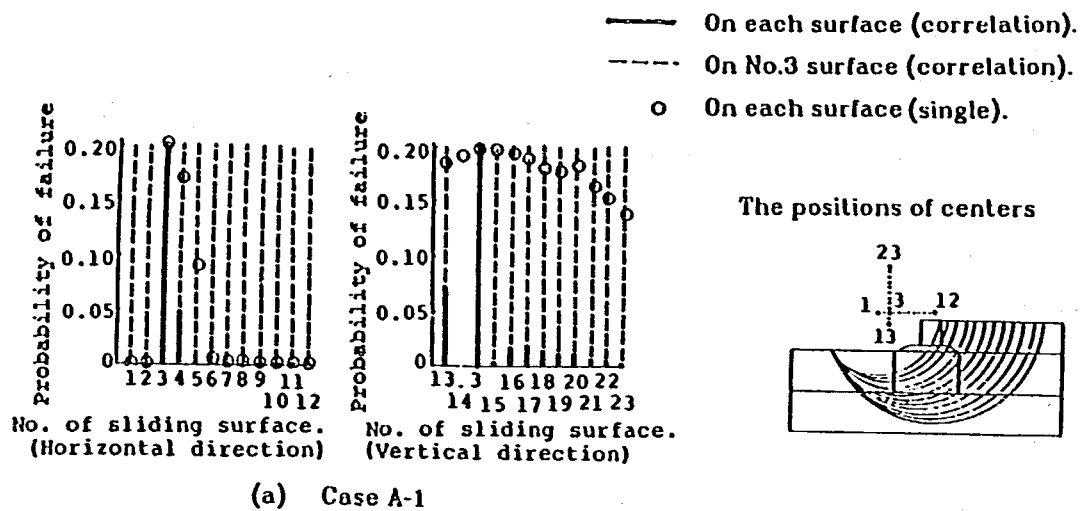


図3.25 破壊確率の算定結果の例²⁷⁾

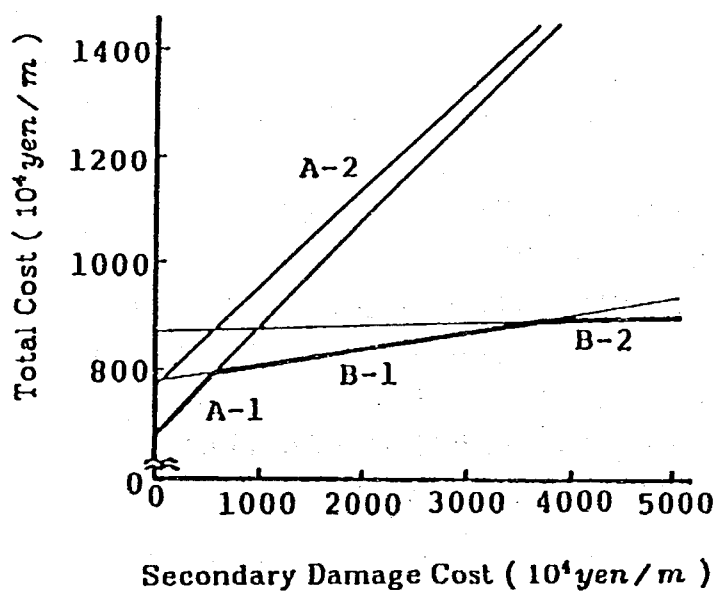


図3.26 総費用の試算結果²⁷⁾

以上の研究内容をまとめると、表3.5のようになる。表中には、本研究の内容も合わせて示した。これらのほかに、Whitman²⁸⁾は、軟弱な地盤上に建設されたオイルタンクから地震時に油が漏れて海を汚染する危険性を、確率的に評価した検討例を紹介している。

表 3.5 破壊確率を考慮した地盤の耐震設計法に関する既往の研究

研究者	対象構造物	対象地盤	地震発生率	最終成果
Ferritoら ⁴⁾	橋梁	液状化	考慮	多段階設計法の提案
松尾ら ^{23) 24)}	盛土	非液状化	(事例逆解析)	震度法すべり安定計算の有用性の検証
Whitmanら ²⁵⁾	重力式擁壁	非液状化	未考慮	滑動量推定法の提案、従来設計法の検証
北浦ら ²⁶⁾	盛土	液状化	未考慮	信頼性評価法の開発
Tatsumiら ²⁷⁾	ケーソン護岸	非液状化	考慮	コストスタディ、最適工法の選定
本研究	半地下構造物	液状化	考慮	従来設計法の検証

4. 既往の液状化・非液状化事例に基づく液状化確率の定式化

橋梁²⁹⁾、盛土³⁰⁾、共同溝³¹⁾などの各種の土木構造物の液状化に対する安定性を簡易的に判定する指標として、地盤のN値等から求められる液状化抵抗率 F_L が、我が国では広く用いられてきている。ここでは、所定の地震外力に対する液状化確率を F_L の関数として定式化した場合の検討を、既往の液状化事例・非液状化事例に基づいて行った。

4.1 検討方法

4.1.1 検討に用いた液状化・非液状化事例

1984年10月までに発表された文献を整理してLiao¹⁹⁾が作成した液状化・非液状化事例のデータベースのうち、我が国で記録された計88事例を検討に用いた。内訳を表4.1に、一覧を巻末資料に示す。大部分の事例が、Tokimatsuら³²⁾がまとめたものと重複しているが、可能な限り原典にさかのぼってデータの読みとり等を行っているため、数値は若干異なっている。また、彼らの分類にならって、液状化の程度を下記の4種類に分類している。ここでは、特に断らない限り、1)及び2)を「液状化」事例として、3)及び4)を「非液状化」事例として扱う。

表4.1 検討に用いた液状化・非液状化事例の内訳

事例数	液状化事例	36
	非液状化事例*	52
対象地震	総数	12
	発生年	1802～1980年
	マグニチュードの範囲	6.1～8.0

* 境界地点を含む

1) 激しく液状化 (Extensive Liquefaction) した地点：

噴砂が生じ、地表面の沈下量が砂層厚の2%以上、あるいは重い構造物の沈下量が20cm以上であった場合。

2) 液状化 (Moderate Liquefaction) した地点：

噴砂が生じ、地表面の沈下量が砂層厚の2%未満、あるいは重い構造物の沈下量が20cm未満であった場合。

3) 境界地点 (Marginal Site)：

液状化した領域と液状化しなかった領域の境界部分にあった場合。

4) 液状化しなかった (No Liquefaction) 地点：

噴砂も、地表面または構造物の沈下も生じなかった場合。

なお、各事例の数値は、最も液状化が生じやすいと推定される深度におけるもので、次式により有効上載

圧に関する補正を行った補正N値 N_1 が最も小さくなる深度が用いられている。

$$N_1 = \frac{1}{\sigma_v'} \cdot N \quad \dots (4.1)$$

ここに、 N ：補正前のN値、 σ_v' ：着目点の有効上載圧（単位 kgf/cm^2 ）

各事例間の相関性とそれぞれの信頼性が解析結果に及ぼす影響は、あまり大きくないことが示されている¹⁹⁾ (3.1(11)参照) ので、ここでは、各事例が互いに独立であると仮定した検討を行った。

4.1.2 液状化抵抗率の算定方法

以下に示す手順で液状化抵抗率 F_L の算定を行った。主な計算方法は文献29)に従っているが、水平震度を推定最大地表加速度 $a_{\max}$ から求めている点、及び地震のマグニチュードを考慮してせん断強度を補正した場合についても F_L を計算している点が異なっている。

(1) 地震時せん断応力比の算定

地震時せん断応力比 L を次式により算定した。

$$L = r_d \cdot k_s \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \quad \dots (4.2)$$

$$k_s = \frac{a_{\max}}{g} \quad \dots (4.3)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015 \cdot z \quad \dots (4.4)$$

ここに、 r_d ：深さ方向の補正係数、 k_s ：水平震度、 σ_v 及び σ_v' ：着目点の上載圧及び有効上載圧、 z ：着目点の深度（単位 m ）、 g ：重力加速度

(2) 動的せん断強度比の算定

動的せん断強度比 R を次式により算定した。

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad \dots (4.5)$$

$$R_1 = 0.0882 \cdot \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} \quad \dots (4.6)$$

$$R_2 = \begin{cases} 0.19 & (0.02\text{mm} \leq D_{50} \leq 0.05\text{mm}) \\ 0.225 \cdot \log_{10} (0.35/D_{50}) & (0.05\text{mm} < D_{50} \leq 0.6\text{mm}) \\ -0.05 & (0.6\text{mm} < D_{50} \leq 2.0\text{mm}) \end{cases} \quad \dots (4.7)$$

$$R_3 = \begin{cases} 0.0 & (0\% \leq FC \leq 40\%) \\ 0.004 \cdot FC - 0.16 & (40\% < FC \leq 100\%) \end{cases} \quad \dots (4.8)$$

ここに、 R_1 ： N 値と有効上載圧 σ_v' の関数で表される動的せん断強度比の第1項（図4.1参照）、 R_2 ：平均粒径 D_{50} の関数で表される動的せん断強度比の第2項（図4.2参照）、 R_3 ：細粒分含有率 FC の関数で表される動的せん断強度比の第3項（図4.3参照）

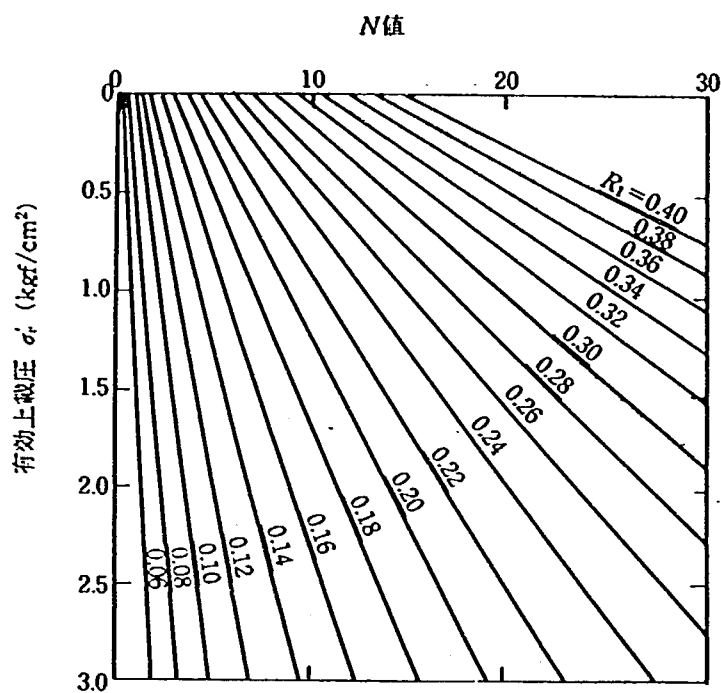


図4.1 N値及び有効上載圧と動的せん断強度比の第1項の関係²⁹⁾

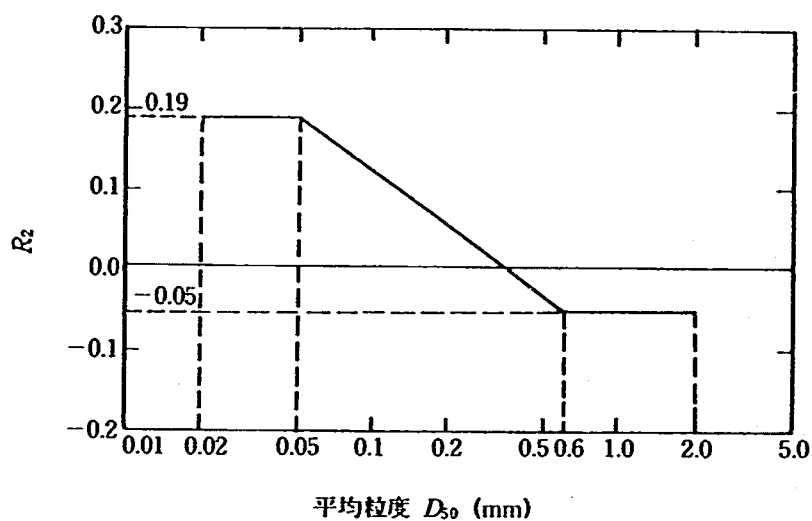


図4.2 平均粒径と動的せん断強度比の第2項の関係²⁹⁾

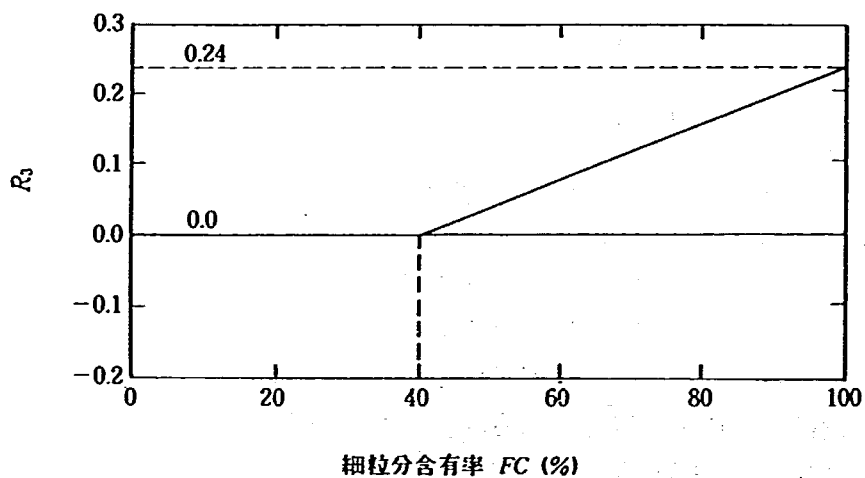


図4.3 細粒分含有率と動的せん断強度比の第3項の関係²⁹⁾

地震のマグニチュードMが大きくなると、一般に、地震動の繰返し回数が増えることが知られている。不規則な地震波を繰返し回数15回の等価な規則波に置き換えて液状化の検討を行う場合に、Mの影響を考慮するために、Tokimatsuら³²⁾は次式による補正係数 r_n を地震時最大せん断応力に乗じて用いた。

$$r_n = 0.1 \cdot (M - 1) \quad \dots (4.9)$$

r_n は、 $M=7.5$ の場合に0.65となり、Seedら⁵⁾が提案した不規則な地震波の等価化係数（式(3.6)の右辺第1項参照）と一致する。一方、式(4.5)は、地震時のせん断応力比の最大値（式(4.2)～(4.4)参照）に対応する強度として定式化されたものであるが、これを導くにあたっては、繰返し回数20回の規則波に置き換える等価化係数として0.55～0.7程度の値が仮定されている²⁹⁾。そこで、これらの値が対応するものとして、Mの影響を考慮した場合の動的せん断強度比 R_M を次式により算定した。 $M=7.5$ のときに $R_M=R$ 、 $M>7.5$ では $R_M<R$ 、また、 $M<7.5$ では $R_M>R$ となる。

$$R_M = R \cdot \frac{0.65}{0.1 \cdot (M - 1)} \quad \dots (4.10)$$

(3) 液状化抵抗率の算定

地震のマグニチュードの影響を考慮しない場合、及び考慮した場合のそれぞれに対する液状化抵抗率 F_L 及び F_{LM} を次式により求めた。

$$F_L = \frac{R}{L} \quad \dots (4.11)$$

$$F_{LM} = \frac{R_M}{L} \quad \dots (4.12)$$

4.1.3 定式化に用いた確率分布モデル

液状化確率の定式化では、以下に示す3種類のモデルを用いた。それぞれのモデルの特性については、4.2.3(3)及び4.2.5(1)を参照されたい。

(1) 一様分布モデル

図4.4に示すように、ある範囲 $a \sim b$ で一定の確率分布をもつモデルで、 X を確率変数としたときの確率密度関数 f_x 、及び平均値 m は次式で表される。

$$f_x = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & (a \leq x \leq b) \\ 0 & (x < a, b < x) \end{cases} \quad \dots (4.13)$$

$$m = \frac{a+b}{2} \quad \dots (4.14)$$

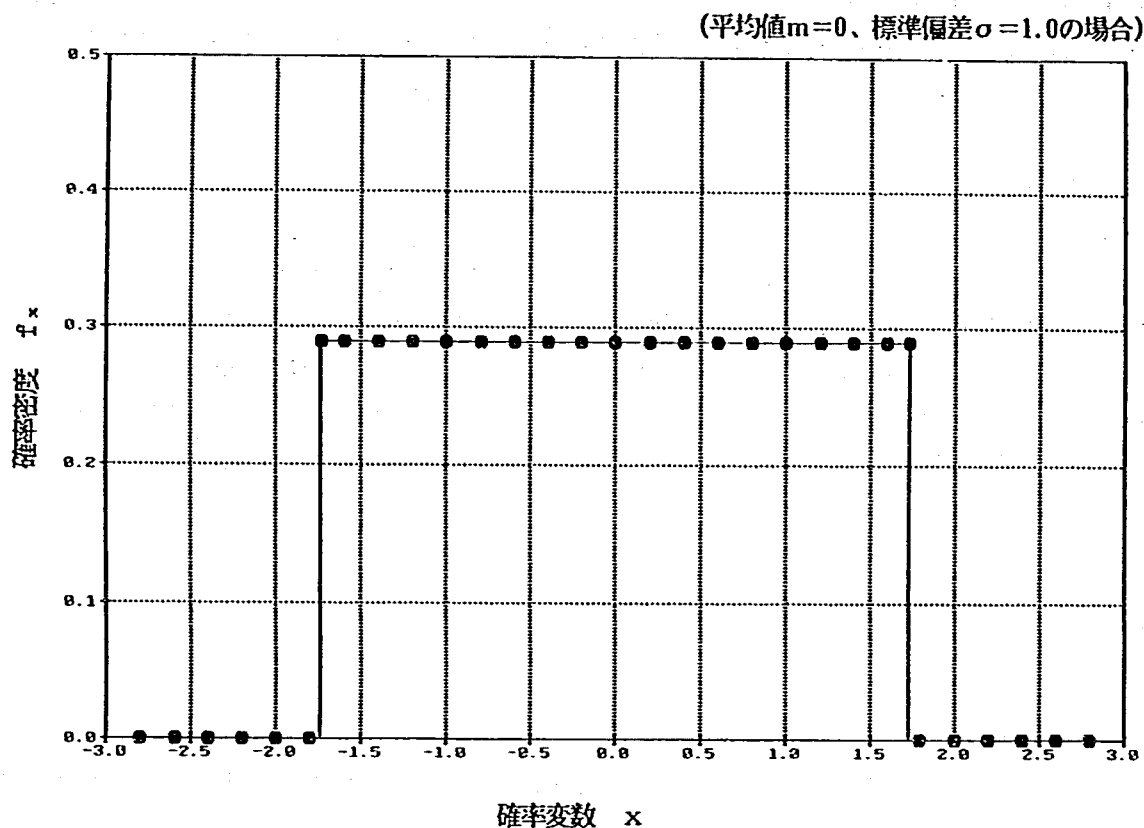


図4.4 一様分布モデルの確率密度分布

(2) 正規分布モデル

図4.5に示す左右対象の分布で、 f_x は次式で表される。

$$f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left(\frac{x-m}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad \dots (4.15)$$

ここに、 m ：平均値、 σ ：標準偏差、 π ：円周率

(3) 極値分布モデル

極値分布にはいくつかの種類があるが、ここでは次式による I 型 (Gumbel 分布) を用いた。分布形状は図4.6に示すように左右非対象で、数値の大きい側の分布がなだらかになっており、年最大降雨量や年最大風速の分布の近似によく用いられている。

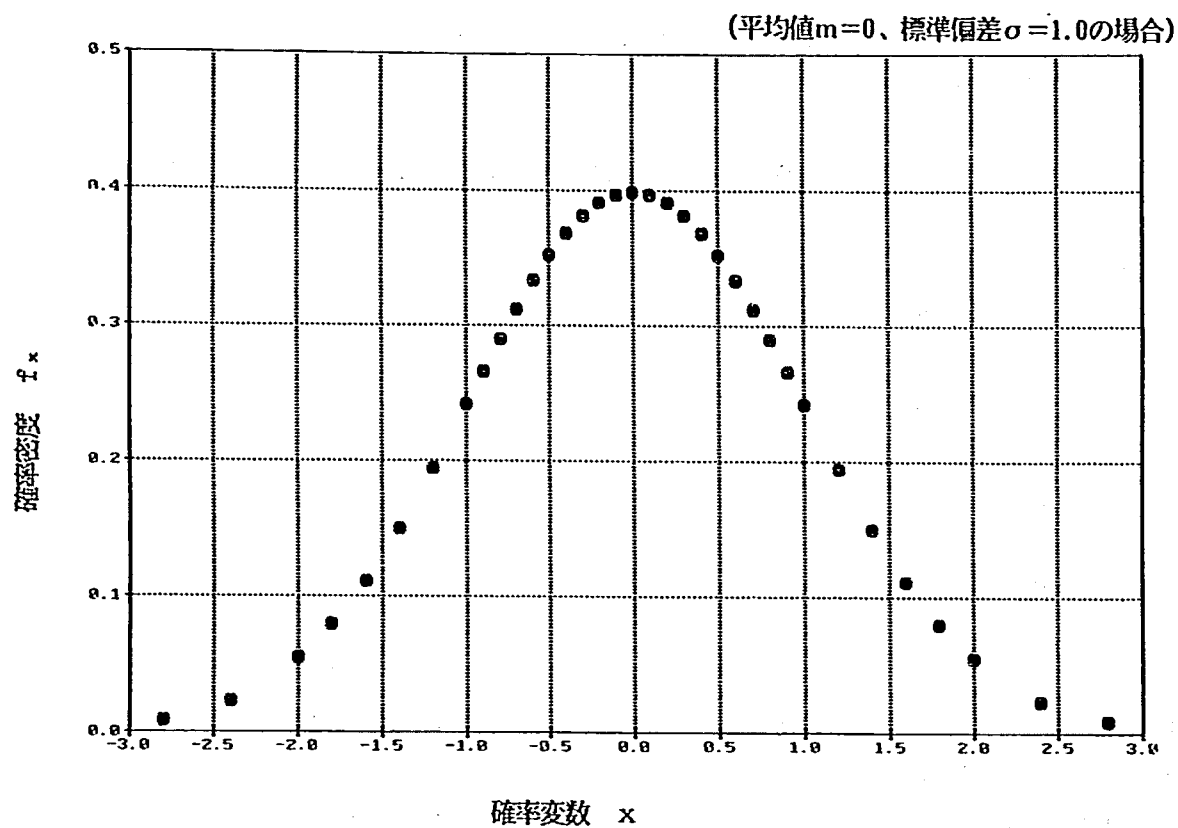


図4.5 正規分布モデルの確率密度分布

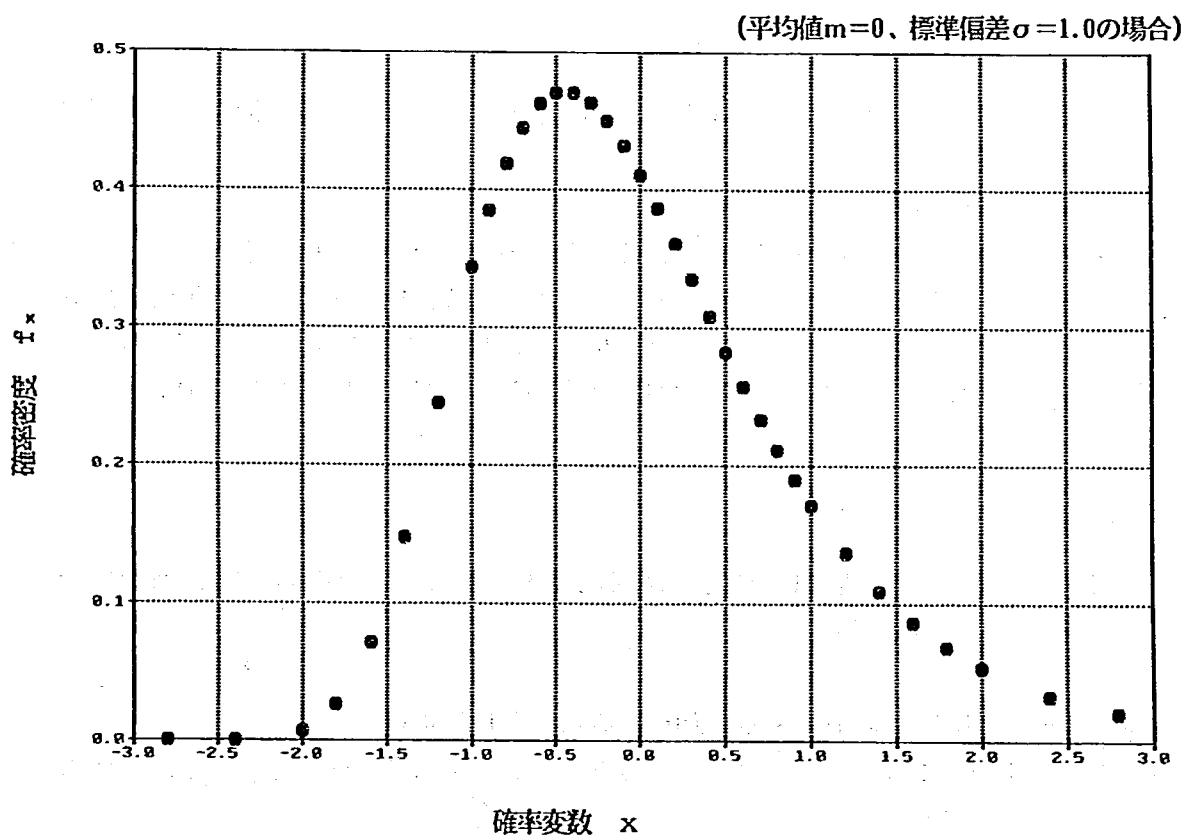


図4.6 極値分布モデルの確率密度分布

$$f_X = \alpha \cdot \exp[-\alpha \cdot (x - u) - \exp\{-\alpha \cdot (x - u)\}]] \quad \dots (4.16)$$

ここに、 α 及び u : 分布形状を決めるパラメーター

累積確率密度関数 F_X 、平均値 m 及び標準偏差 σ はそれぞれ次式となる。

$$F_X = \exp[-\exp\{-\alpha \cdot (x - u)\}]] \quad \dots (4.17)$$

$$m = u + \frac{\gamma}{\alpha} \approx u + \frac{0.577}{\alpha} \quad \dots (4.18)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot \alpha} \approx \frac{1.282}{\alpha} \quad \dots (4.19)$$

ここに、 γ : オイラーの定数

4.1.4 液状化確率の定式化の方法

(1) 液状化抵抗率を確率変数とした定式化

4.1.2に示した方法により算定された液状化抵抗率は、いろいろな要因による誤差を含んでいる。一方、本来の意味での液状化抵抗率（以下では「真の液状化抵抗率」と称する。）は、1.0を限界値として、それ以下ならば液状化が生じるような指標である。そこで、後者が確率変数であると考え、その密度分布が前者の関数として表されると仮定すると、液状化確率 P_{LIQ} は次式により求められる。

$$P_{LIQ} = \int_0^1 f_{FL}(\overline{F_L}) \cdot d\overline{F_L} \quad \dots (4.20)$$

ここに、 $f_{FL}(\overline{F_L})$: 液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ の関数として表される真の液状化抵抗率の確率密度関数

(2) 動的せん断強度比を確率変数とした定式化

液状化抵抗率の分子である動的せん断強度比 R は、地盤の N 値から間接的に算定されるので、分母の地震時せん断応力比 L よりも推定精度がかなり劣っていることが予想される。そこで、「真の動的せん断強度」が確率変数であると考え、「真の地震時せん断応力比」は地震時せん断応力比の算定値に等しいと仮定すると、前者が後者よりも小さいときに液状化が生じることから P_{LIQ} は次式により求められる。

$$P_{LIQ} = \int_0^{\overline{L}} f_R(\overline{R}) \cdot d\overline{R} \quad \dots (4.21)$$

ここに、 $f_R(\overline{R})$: 動的せん断強度比の算定値 $\overline{R}$ の関数として表される真の動的せん断強度比の確率密度関数、
 $\overline{L}$: 地震時せん断応力比の算定値

(3) 動的せん断強度比及び地震時せん断応力比を確率変数とした定式化

「真の地震時せん断応力比」が、「真の動的せん断強度」と互いに独立な確率変数であると仮定すると、 P_{LIQ} は次式により求められる。

$$P_{Li\alpha} = \int_0^{\infty} f_L(\bar{L}) \cdot \int_0^{\bar{L}} f_R(\bar{R}) \cdot d\bar{R} \cdot d\bar{L} \quad \dots (4.22)$$

ここに、 $f_L(\bar{L})$ ：地震時せん断応力比の算定値 $\bar{L}$ の関数として表される真の地震時せん断応力比の確率密度関数

(4) パラメーターの決定方法

4.1.3に示した確率分布モデルには、分布の範囲、平均値、ばらつきなどを示すパラメーターが含まれている。ここでは、次式による対数近似度 L (log-likelihood) が最も大きくなるように各パラメーターの組合わせを定めた。これは、液状化事例については液状化確率の対数を、また非液状化事例については非液状化確率の対数を取り、それらの合計が大きくなるほど近似度がよいとしていることを意味する。

$$L = \sum_{i=1}^n \{ Y_i \cdot \log_e (P_{Li\alpha i}) + (1 - Y_i) \cdot \log_e (1 - P_{Li\alpha i}) \} \quad \dots (4.23)$$

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{(液状化)} \\ 0 & \text{(非液状化)} \end{cases} \quad \dots (4.24)$$

ここに、 n ：全事例数、 Y_i ： i 番目の事例で実際に液状化が生じたか否かを示す変数、 $P_{Li\alpha i}$ ： i 番目の事例について算定した液状化確率 ($Y_i = 1$ となる確率)

一般に、 $0 < P_{Li\alpha i} < 1$ より $\log_e (P_{Li\alpha i})$ と $\log_e (1 - P_{Li\alpha i})$ は負の値となるため、 L も負の値をとる。また、一様分布モデルでは、 $P_{Li\alpha i} = 0$ または 1 (式(4.27)参照) となり対数が計算できない場合があるので、この場合には便宜的に $P_{Li\alpha i} = 0.000001$ または 0.999999 とした。

このようにして求められた L の最大値 L_{max} は、いくつかのモデル間で近似度を比較する場合の相対的な指標としても用いることができる。ただし、 n を変えた場合には L_{max} を比較しても意味がない。

なお、 $\exp (L)$ を計算すると次式となるが、これは、仮定した液状化確率モデルのもとで、実際と同じ結果が得られる確率に相当する。

$$\exp (L) = \prod_{i=1}^n \{ (P_{Li\alpha i})^{Y_i} \cdot (1 - P_{Li\alpha i})^{(1 - Y_i)} \} \quad \dots (4.25)$$

(5) 計算ケース

計算ケースの一覧を表4.2に示す。

表4.2 液状化確率の定式化に関する計算ケース

ケース名	仮定した確率変数及び分布形状	対象事例 (各記号の意味は凡例を参照)						
		AM	B	BM	C	CM	D	DM
FL-U	液状化抵抗率 (一様分布)	○	○	●	○	○	○	○
FL-N	液状化抵抗率 (正規分布)	○	○	●	○	○	○	○
R-N1~N3	動的せん断強度比 (正規分布)	-	○	○	○	○	○	○
R-E1~E3	動的せん断強度比 (極値分布)	-	○	-	○	-	○	-
RL-EN	動的せん断強度比 (極値分布) 及び 地震時せん断応力比 (正規分布)	-	○	-	-	-	-	-

凡例

○: 計算を実施

●: 境界地点を液状化事例とした場合
についても計算を実施

-: 未計算

A: 全事例

B: 細粒分含有率40%未満

C: 細粒分含有率10%未満

D: 細粒分含有率10%以上40%未満

M: 地震マグニチュード

の補正を行った場合

4.2 検討結果及び考察

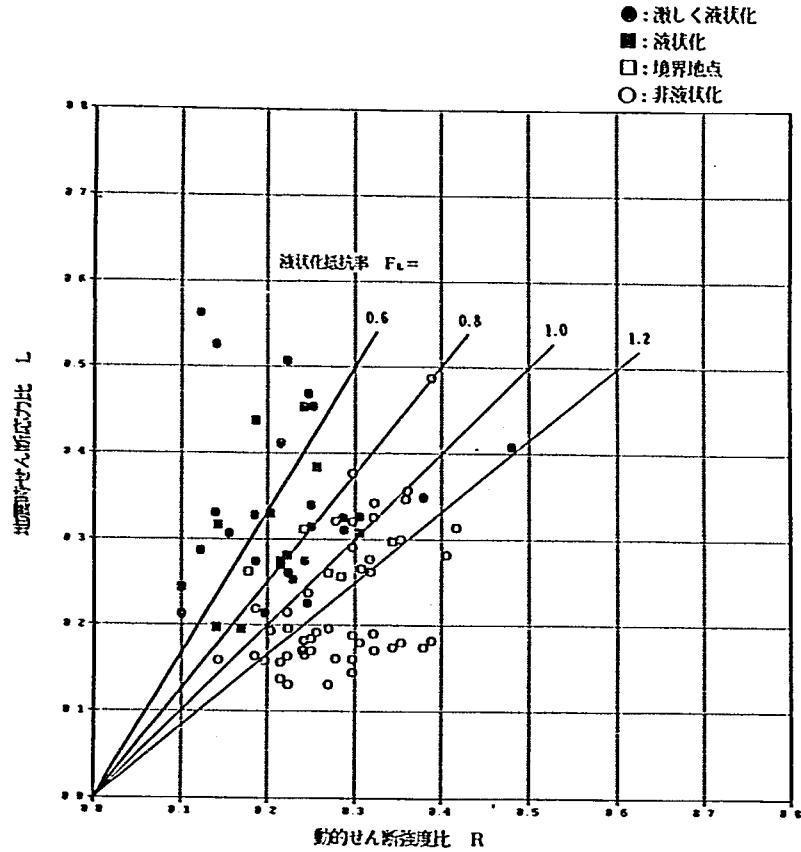
4.2.1 液状化抵抗率の算定結果に及ぼす諸条件の影響

地震時せん断応力比 L 、動的せん断強度比 R 及び R_M 、液状化抵抗率 F_L 及び F_{LM} の算定結果を巻末資料に示す。また、液状化の程度に応じた R と L の関係、及び R_M と L の関係を図4.7(1)及び(2)に示す。いずれの図においても、「激しく液状化した地点」と「液状化した地点」の液状化抵抗率は大部分が1.0以下であったのに対し、「液状化しなかった地点」の液状化抵抗率は大部分が0.8以上となった。また、「境界地点」の液状化抵抗率は、上記のデータが重なりあう0.7~1.1程度の値となり、分類内容に対応した結果が得られた。ただし、「激しく液状化した地点」と「液状化した地点」の違いは明確には現れなかった。

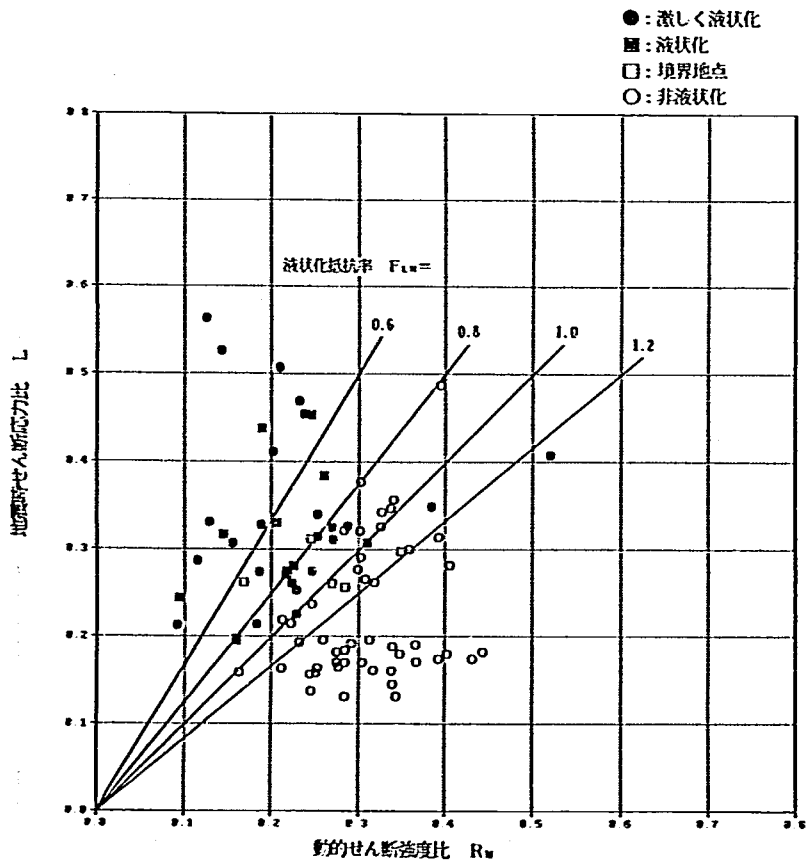
(1) 地震マグニチュードの影響

地震マグニチュード M に応じた R と L の関係、及び R_M と L の関係を図4.8(1)及び(2)に示す。液状化事例と非液状化事例が重なりあう領域 (以下では「混合領域」と称する。) に関して両図を比較すると、 M の影響を考慮することにより次のような変化が現れていることがわかる。

- 1) $M > 7.9$ の液状化事例 (図中の◆) が混合領域内にいくつかあるが、 M の影響を考慮することにより、これらが図の左側に平行移動した (式(4.10)参照)。
- 2) $M < 7.0$ の非液状化事例 (図中の○) が混合領域下方にいくつかあるが、 M の影響を考慮することにより、これらが図の右側に平行移動した。

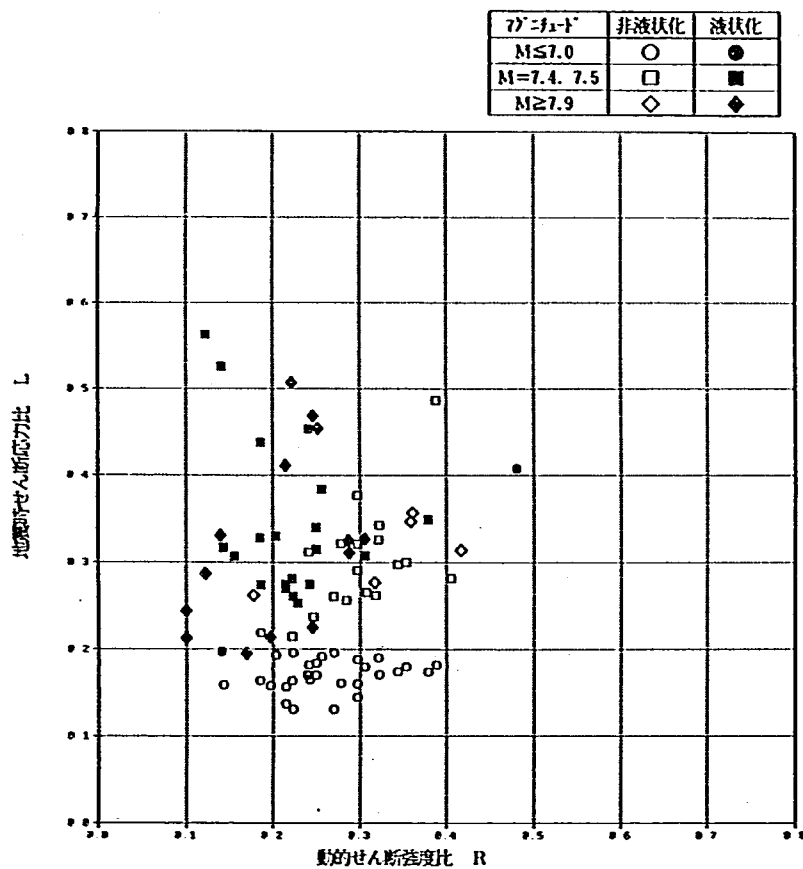


(1) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合

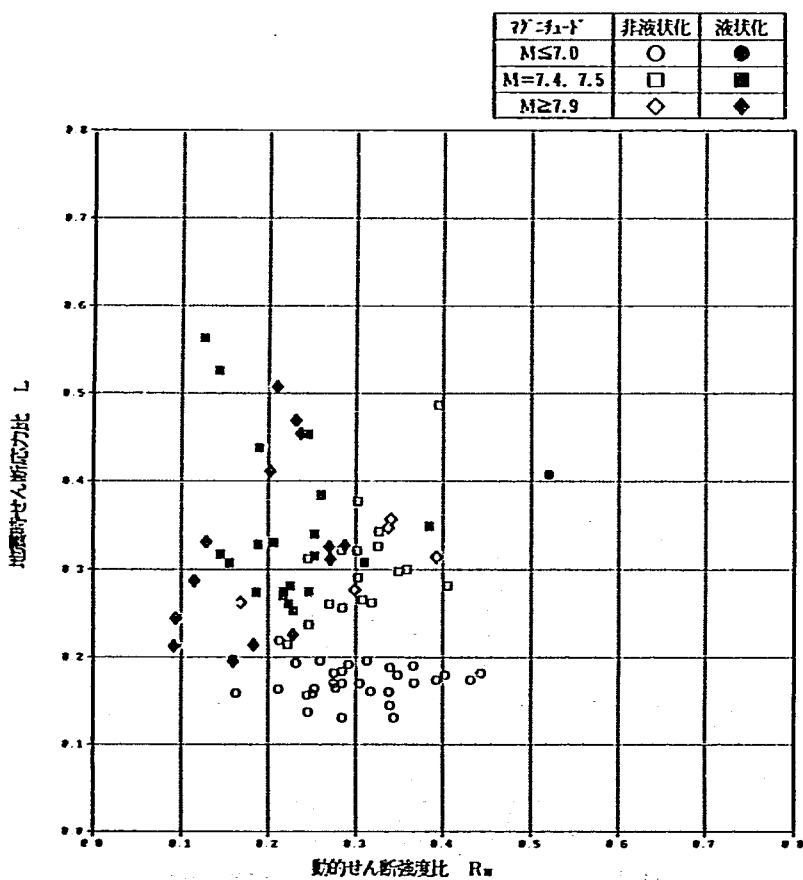


(2) 地震マグニチュードの影響を考慮した場合

図4.7 液状化の程度に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係



(1) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合



(2) 地震マグニチュードの影響を考慮した場合

図4.8 地震マグニチュードに応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

なお、 $M > 7.9$ の非液状化事例（図中の◇）と $M < 7.0$ の液状化事例（図中の●）も上記と同様に移動したが、混合領域内にあるのはそれぞれ1事例ずつであった。

(2) 最大地表加速度の影響

最大地表加速度 a_{max} に応じた R_H と L の関係を図4.9に示す。 a_{max} が大きくなるほど、式(4.2)及び式(4.3)により L が大きくなる。図の右下方（液状化抵抗率が大きい領域）にある非液状化事例のほとんどが $a_{max} < 0.2g$ （約200gal）であるのに対し、図の左上方（液状化抵抗率が小さい領域）にある液状化事例のほとんどは $a_{max} \geq 0.2g$ である。また、 $a_{max} < 0.2g$ の液状化事例と、 $a_{max} \geq 0.2g$ の非液状化事例は、混合領域に多く含まれている。

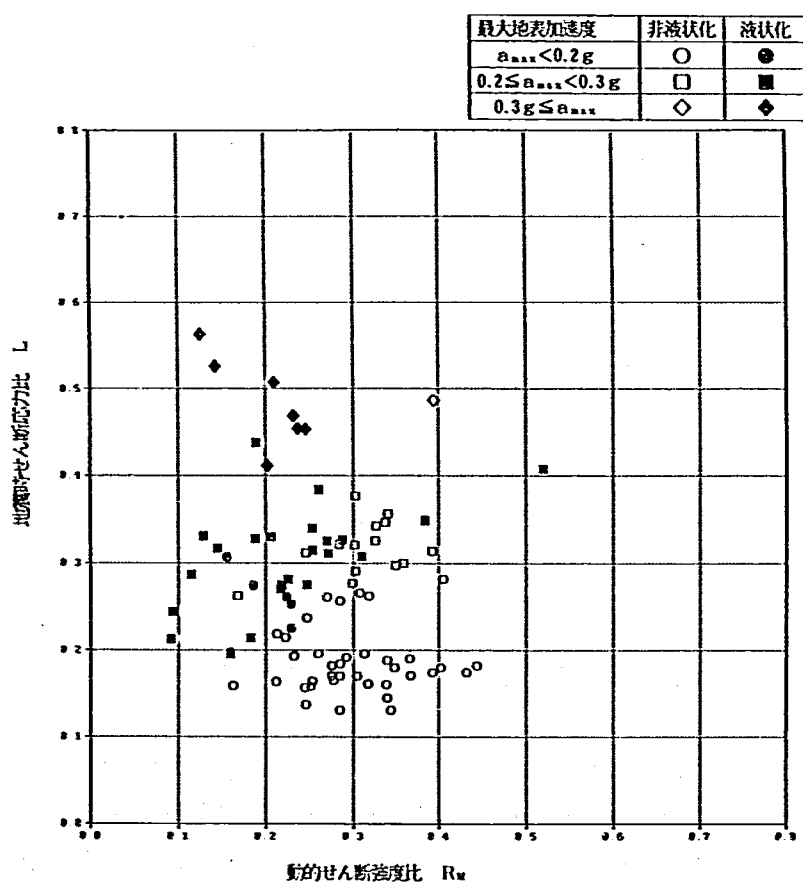


図4.9 最大地表加速度 a_{max} に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

(3) N値の影響

N値に応じた R_H と L の関係を図4.10に示す。N値が大きくなると、式(4.5)、(4.6)及び(4.10)により R_H が大きくなるが、式(4.7)及び(4.8)による補正項の影響が大きく、同じN値でも粒度によって R_H は大きく変化する。そのため、N値のみの影響として明確なものは、図中には現れていない。ただし、N値が20以上の事例は、すべて非液状化事例であることに留意する必要がある。

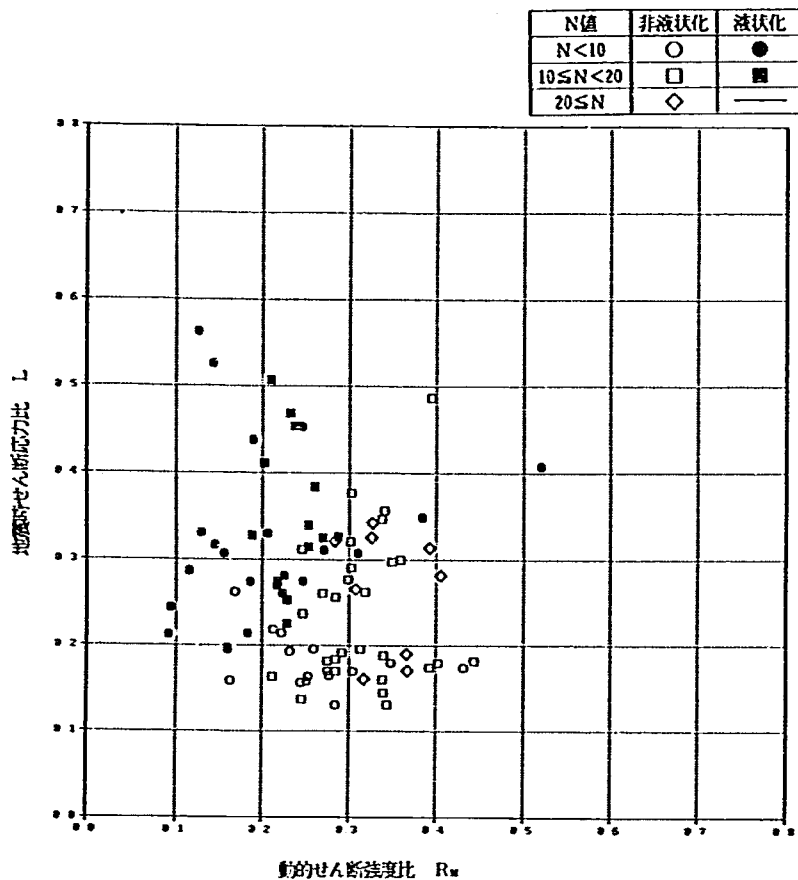


図4.10 N値に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

(4) 粒度の影響

細粒分含有率FC、粘土分含有率CC、粗粒分含有率GC、平均粒径 D_{50} 、及び均等係数UCのそれぞれに応じた R_d と L の関係を図4.11、図4.12、図4.13、図4.14、図4.15に示す。ただし、データが得られていない事例は、図から除外している。

図4.11より、FCが40%以上の液状化事例は2例あるが、いずれも図の右上方に突出していることがわかる。一方、FCが40%以上の非液状化事例は1例のみで、図のかなり右下にある。特に、最も右側の液状化事例は、鉱山で生じる鉱さい（鉱石から金属を精練したあとのかす）であり、自然地盤に見られる細粒土とは異なる液状化特性をもっていたと考えられている³³⁾。そこで、次項以降ではこれらの3事例を除外して、FCが40%未満の事例を対象とした検討を主に行った。すなわち、式(4.8)による補正項がゼロの場合を主な検討対象としたことになる。

粒度に関するFC以外の要因の影響に関しては、明確な傾向は見られなかった。

(5) 深度及び地下水位の影響

液状化抵抗率を算定した深度 z （4.1.1参照）と地震マグニチュードの影響を考慮した液状化抵抗率 F_{LM} の関係、及び地下水面からの距離（ $z - WL$ ）と F_{LM} の関係を、それぞれ図4.16及び図4.17に示す。これらの要因の影響は、明確には現れなかった。

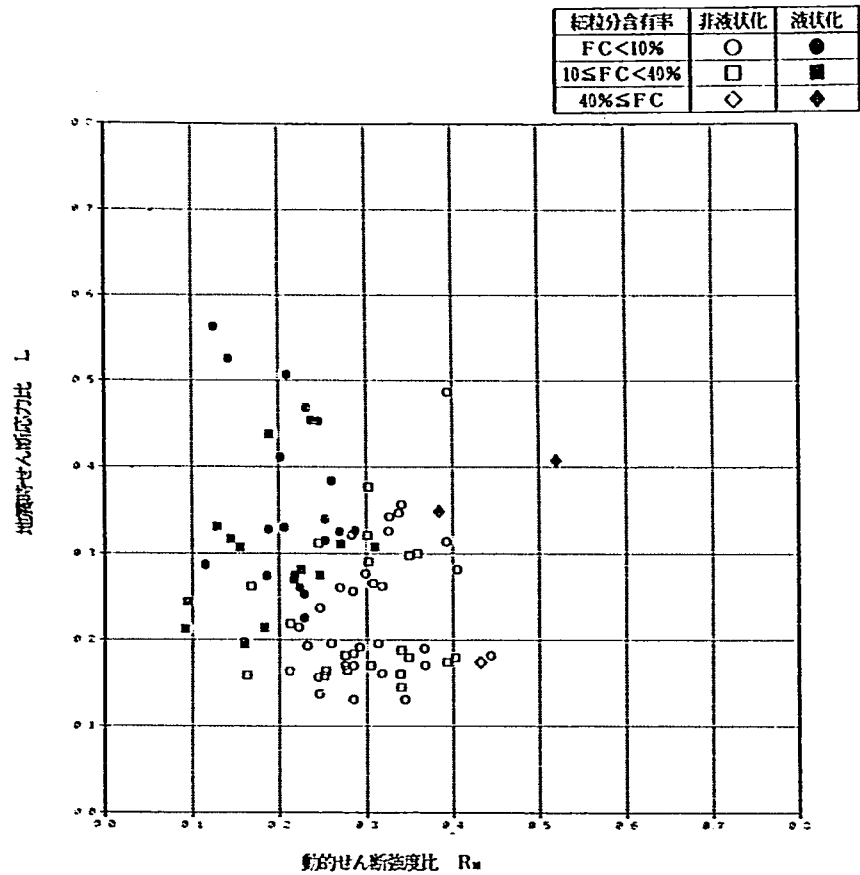


図4.11 細粒分含有率に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

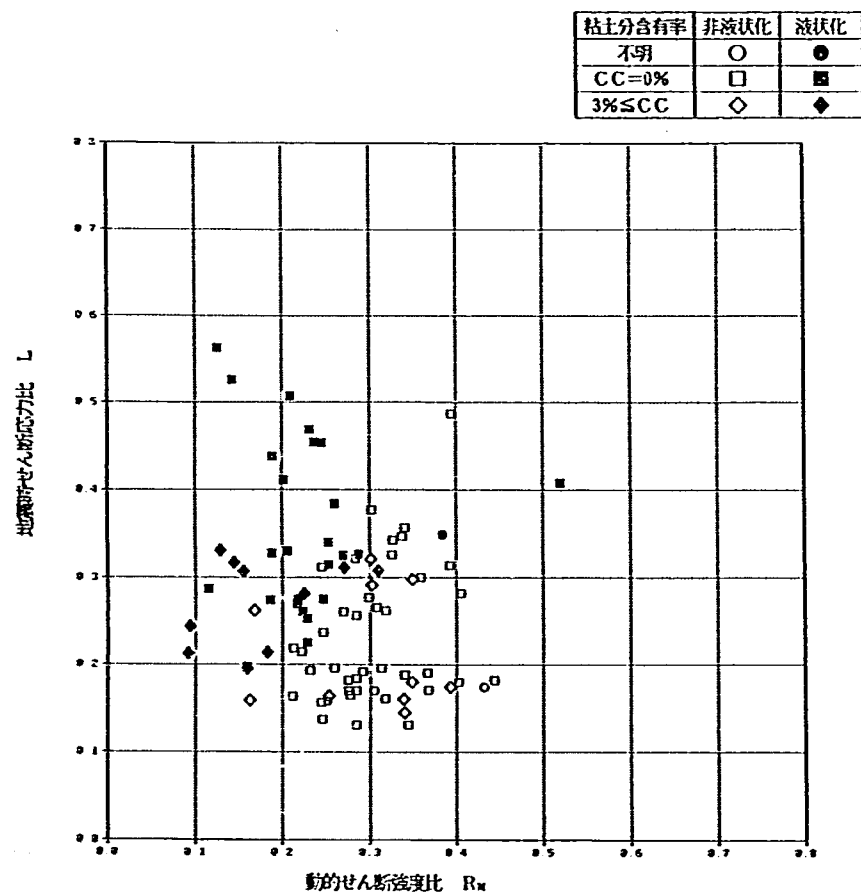


図4.12 粘土分含有率に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

粗粒分含有率	非液状化	液状化
GC=0%	○	●
1≤GC<5%	□	■
10%≤GC	◇	◆

注：粗粒分含有率が不明の非液状化事例を1事例除外した。

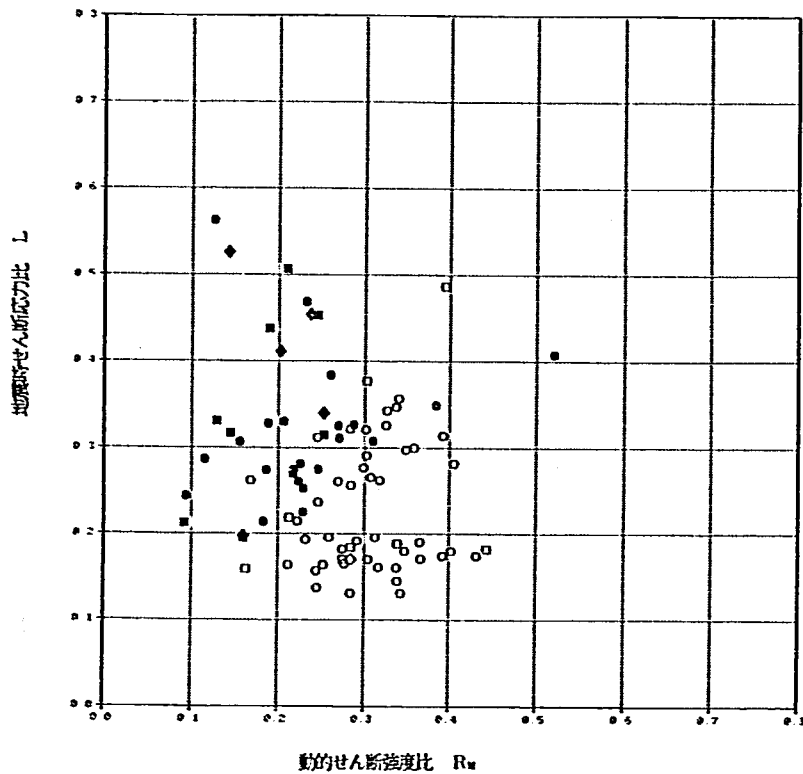


図4.13 粗粒分含有率に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

平均粒径	非液状化	液状化
$D_{50} < 0.125\text{mm}$	○	●
$0.125 \leq D_{50} < 0.35\text{mm}$	□	■
$0.35\text{mm} \leq D_{50}$	◇	◆

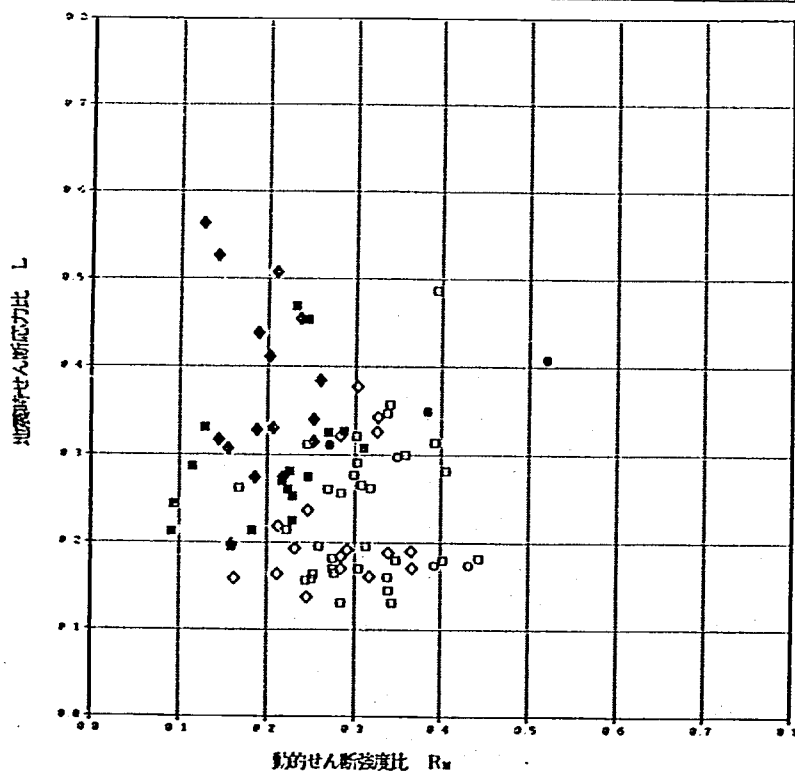


図4.14 平均粒径に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

均等係数	非液状化	液状化
$UC < 5$	○	●
$5 \leq UC < 10$	□	■
$10 \leq UC$	◇	◆

注：均等係数が不明の非液状化10事例、
液状化3事例を除外した。

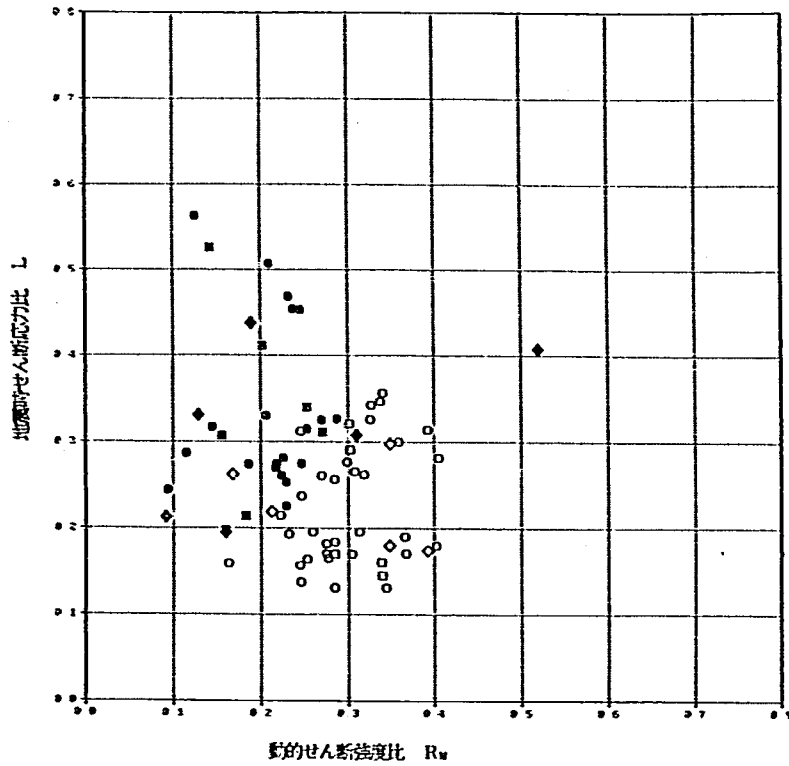


図4.15 均等係数に応じた動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

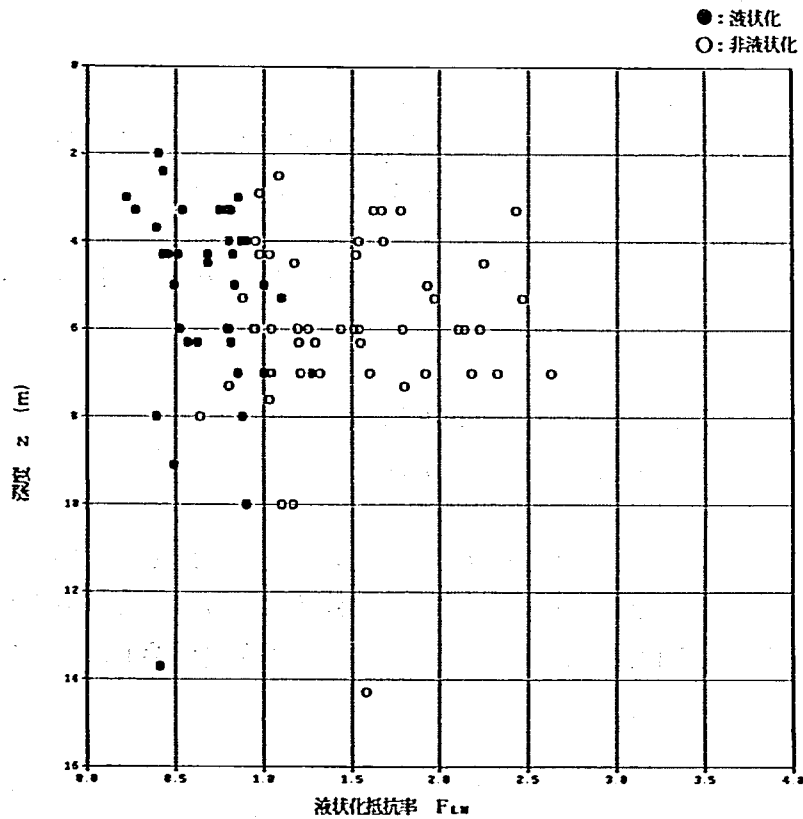


図4.16 深度と液状化抵抗率の関係

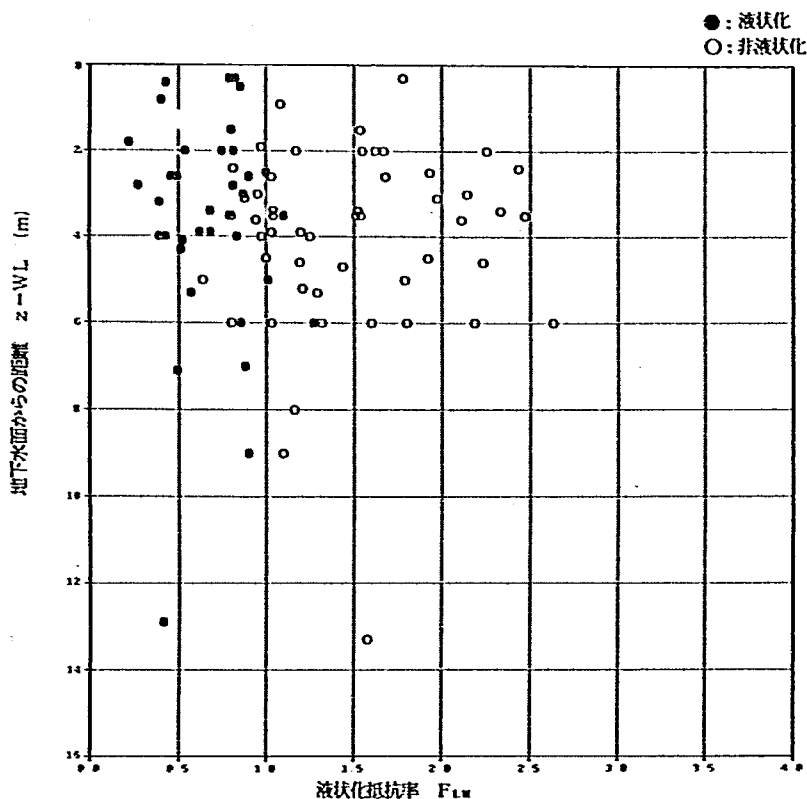


図4.17 地下水面からの距離と液状化抵抗率の関係

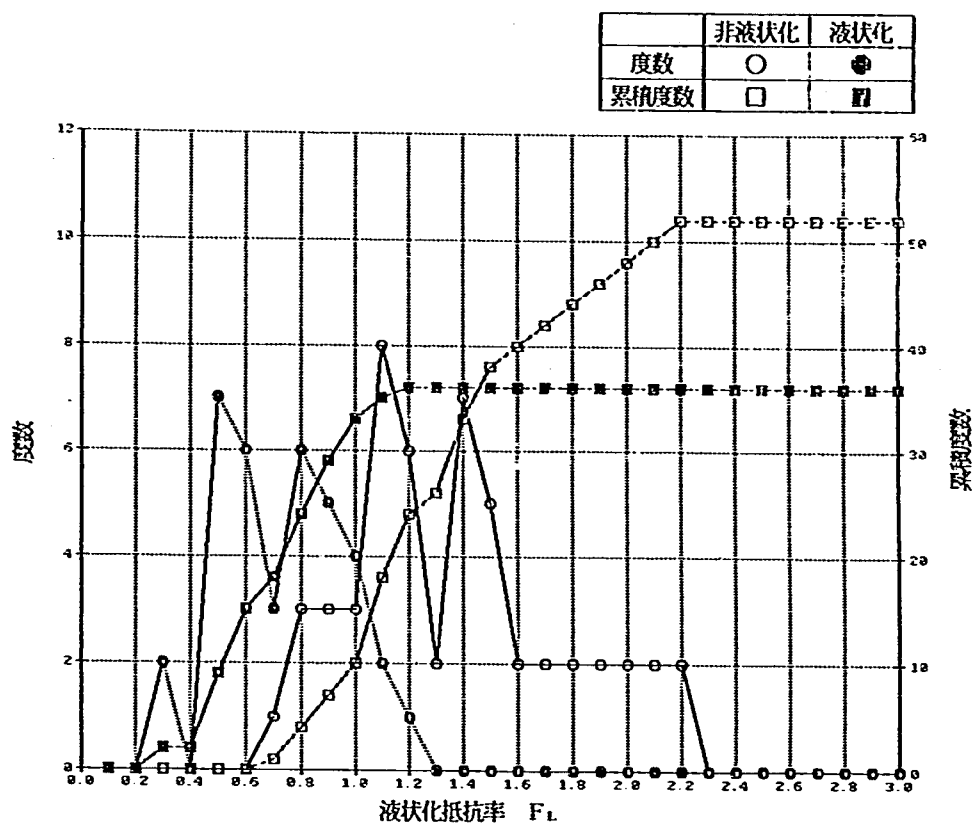
4.2.2 液状化抵抗率の分布

細粒分含有率 F_C が40%未満の計85事例を対象に算定した、液状化抵抗率 F_L 及び F_{LM} の度数・累積度数分布を図4.18(1)及び(2)に示す。ただし、液状化抵抗率は0.1刻みのグループに分けており、例えば $0.95 \leq F_L < 1.05$ の事例を $F_L = 1.0$ として扱っている。事例数が少ないため、液状化事例と非液状化事例の度数分布はなめらかな形になっていない。

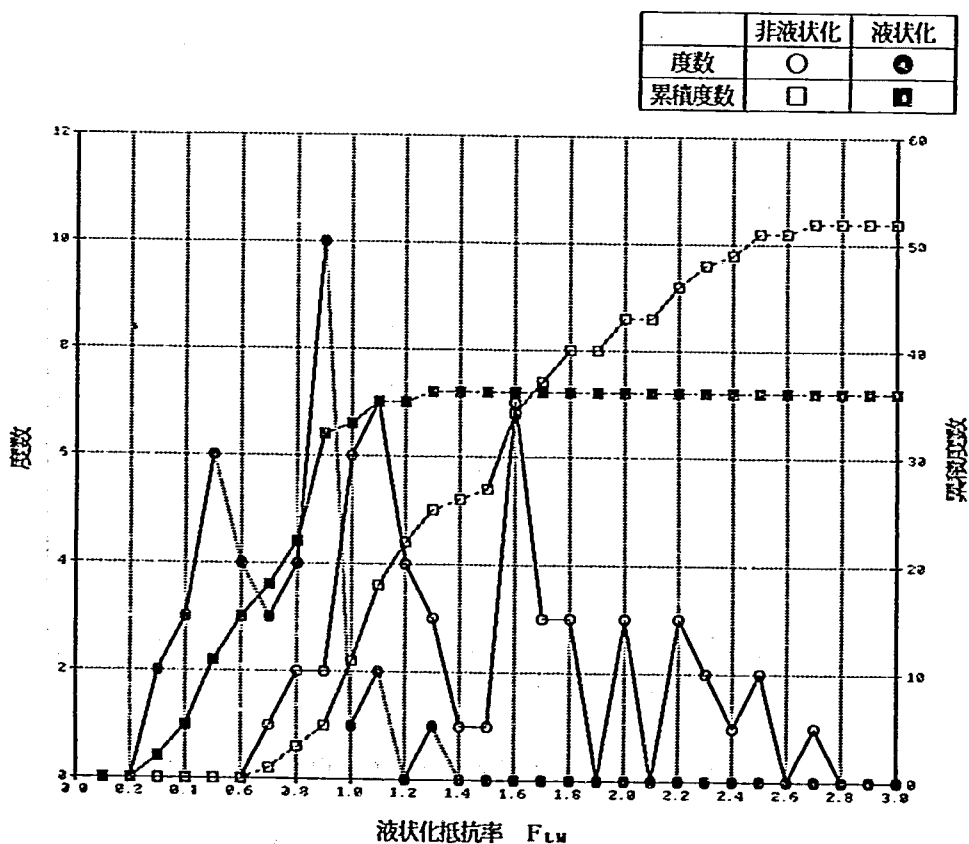
次に、液状化抵抗率にある幅 W をもたせて、その中に含まれる液状化事例の比率 R_{LIQ} を次式により算定した。

$$R_{LIQ} = \frac{(F_{L_{Q0}} \pm W/2 \text{の領域に含まれる液状化事例数})}{(F_{L_{Q0}} \pm W/2 \text{の領域に含まれる全事例数})} \quad \dots (4.26)$$

図4.19(1)～(3)は、異なる W に対する F_L と R_{LIQ} の関係である。 F_L がある範囲内にあるときに R_{LIQ} はほぼ直線的に変化し、その関係は W が大きくなるほどなめらかになった。また、図4.19(4)は F_{LM} と R_{LIQ} の関係であるが、対応する(2)と比較して、地震マグニチュードの影響を考慮したことによる明確な違いは見られなかった。

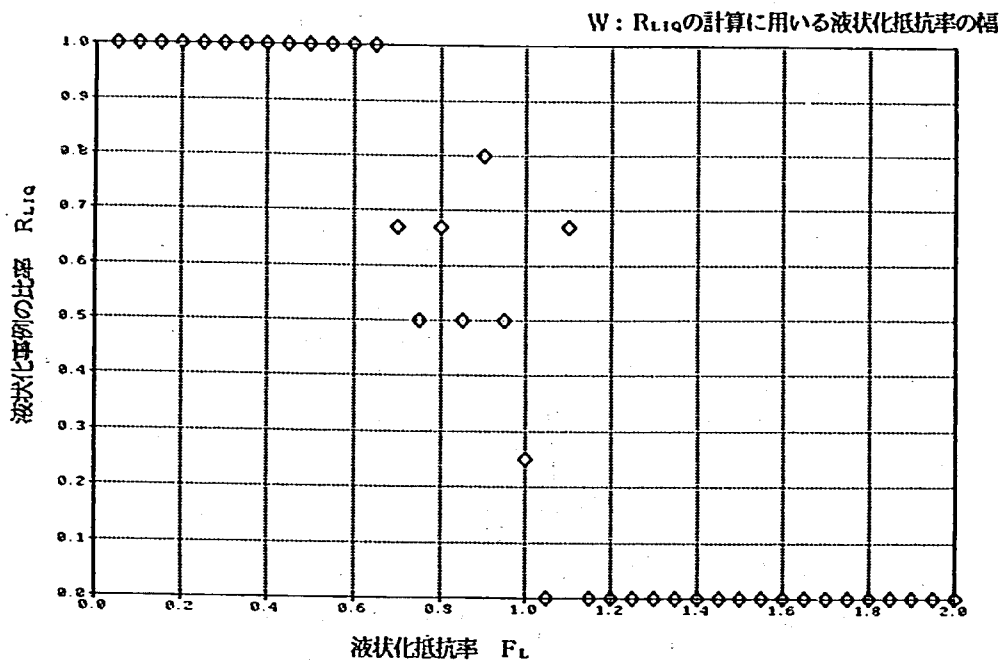


(1) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合

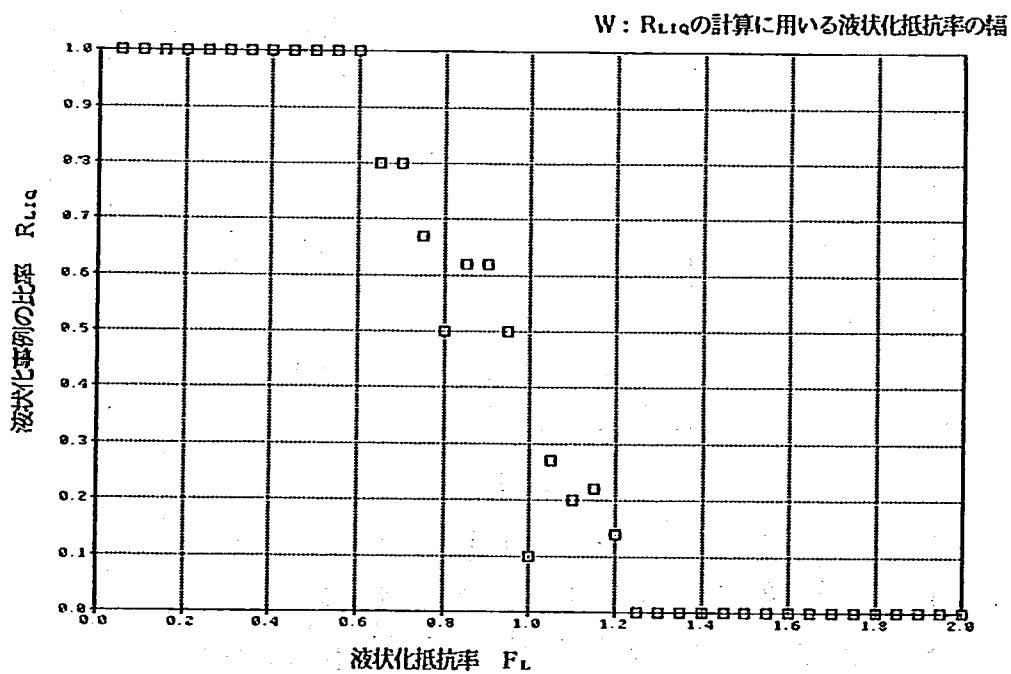


(2) 地震マグニチュードの影響を考慮した場合

図4.18 液化化抵抗率の度数・累積度数分布

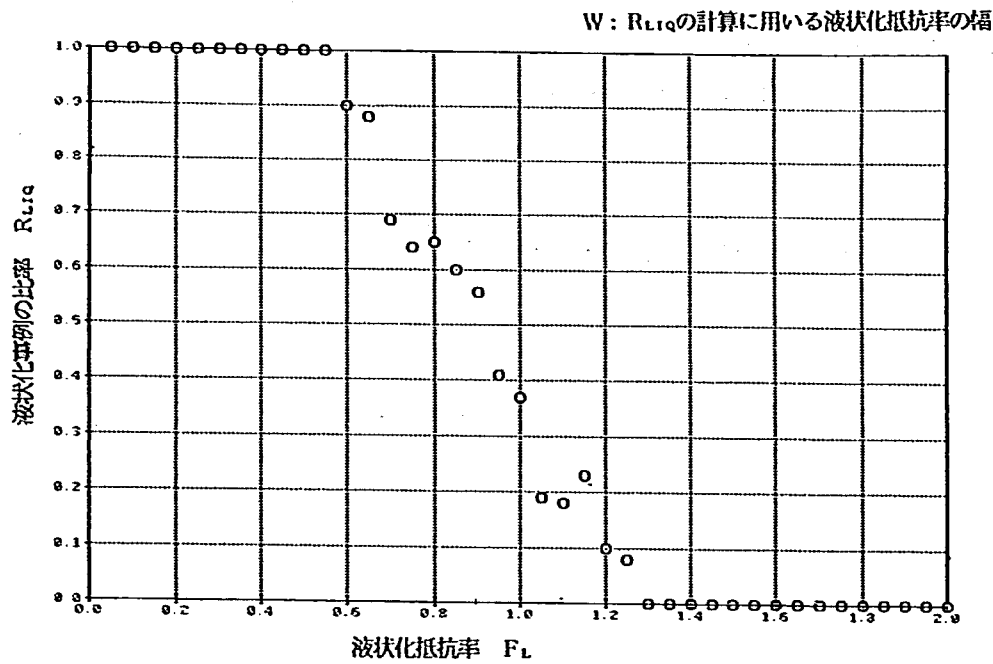


(1) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合 ($W=0.04$)

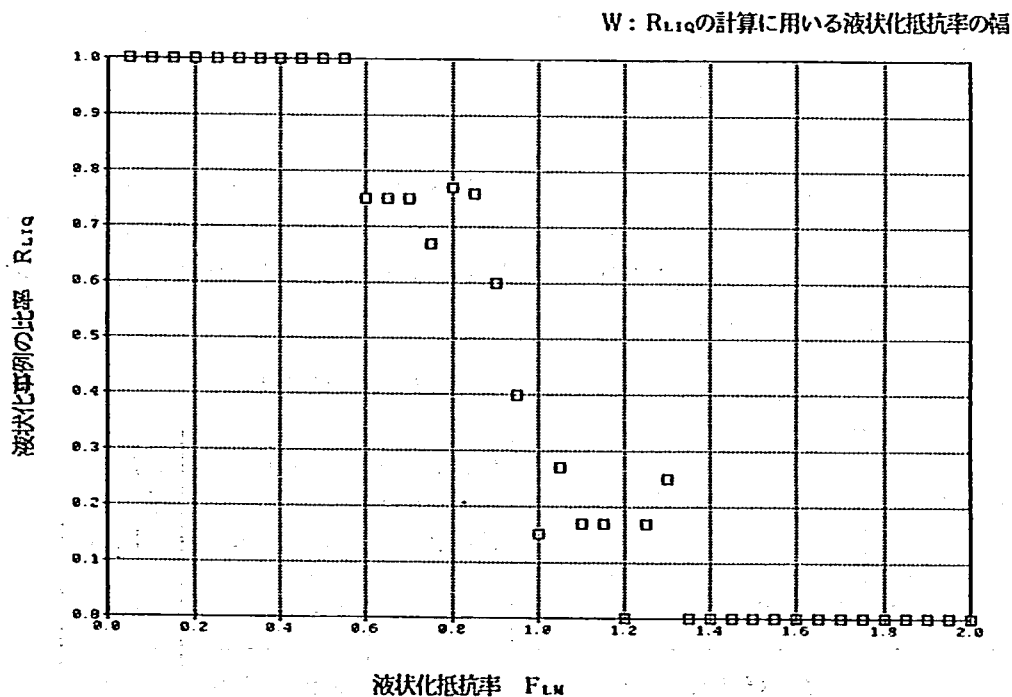


(2) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合 ($W=0.12$)

図4.19 液状化抵抗率と液状化事例の比率の関係



(3) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合 ($W=0.2$)



(4) 地震マグニチュードの影響を考慮した場合 ($W=0.12$)

図4.19 液状化抵抗率と液状化事例の比率の関係

4.2.3 一様分布モデルによる液状化確率の定式化

(1) 液状化抵抗率を確率変数とした定式化

式(4.13)を式(4.20)に代入すると、次式が得られる。

$$P_{LiQ} = \begin{cases} 0 & (1 < a) \\ \frac{1-a}{b-a} & (a \leq 1 \leq b) \\ 1 & (b < 1) \end{cases} \quad \dots (4.27)$$

ここでは、パラメーター a 及び b が、液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ の関数として次式で表されるものと仮定した。

$$a = \overline{F_L} - a' \quad \dots (4.28)$$

$$b = \overline{F_L} + b' \quad \dots (4.29)$$

これらを式(4.27)に代入すると次式が得られる。これは、 P_{LiQ} が $\overline{F_L}$ に関して直線的に変化することを意味しており、先に示した図4.19の傾向と対応する。

$$P_{LiQ} = \begin{cases} 0 & (1 + a' < \overline{F_L}) \\ \frac{1 + a' - \overline{F_L}}{a' + b'} & (1 - b' \leq \overline{F_L} \leq 1 + a') \\ 1 & (\overline{F_L} < 1 - b') \end{cases} \quad \dots (4.30)$$

細粒分含有率 F_C が40%未満の計85事例を用いて、式(4.23)による対数近似度 L が最も大きくなるような a' と b' の組合わせを計算した結果を表4.3に示す。地震マグニチュードの補正を行わない場合 ($\overline{F_L}$ として F_L を用いた場合) には $L_{max} = -22.68$ 、補正を行った場合 (F_{LM} を用いた場合) には $L_{max} = -21.04$ となり、補正を行った場合のほうが近似度が良かった。

表4.3 液状化抵抗率を一様分布の確率変数とした計算結果

ケース名	対象事例	地震マグニチュードの補正の有無	係数		最大対数近似度 L_{max}
			a'	b'	
FL-U-AM	全事例	有	0.34	0.38	-26.88
FL-U-B	細粒分含有率40%未満	無	0.16	0.40	-22.68
FL-U-BM	〔 () 内は境界地点を液状化事例とした場合の結果 〕	有	0.16 (0.24)	0.42 (0.30)	-21.04 (-21.57)

表中には、地震マグニチュードの補正を行った場合について、境界地点（4.1.1参照）を液状化事例であるとして計算を行った結果、及びFCが40%以上の3事例も含めて計算を行った結果も合わせて示した。

得られた a' と b' を用いて、 $\overline{F_L}$ と P_{Liq} の関係を図示すると図4.20となる。この図より、各要因の影響について以下のことがわかる。

- 1) 地震マグニチュードの補正の影響は小さい。
- 2) 境界地点を液状化事例とした場合には、 $0 < P_{Liq} < 1$ のラインが右側にほぼ平行移動して、同じ $\overline{F_L}$ に対する P_{Liq} が0.15~0.2程度増加する。
- 3) FCが40%以上の3事例も含めた場合には、ラインの傾きが小さくなって、 $\overline{F_L}$ が0.8~1.3程度のときの P_{Liq} が増加する。これは、FCが40%以上の液状化事例2例の $\overline{F_L}$ が大きめの値であったことによる（4.2.1(4)参照）。

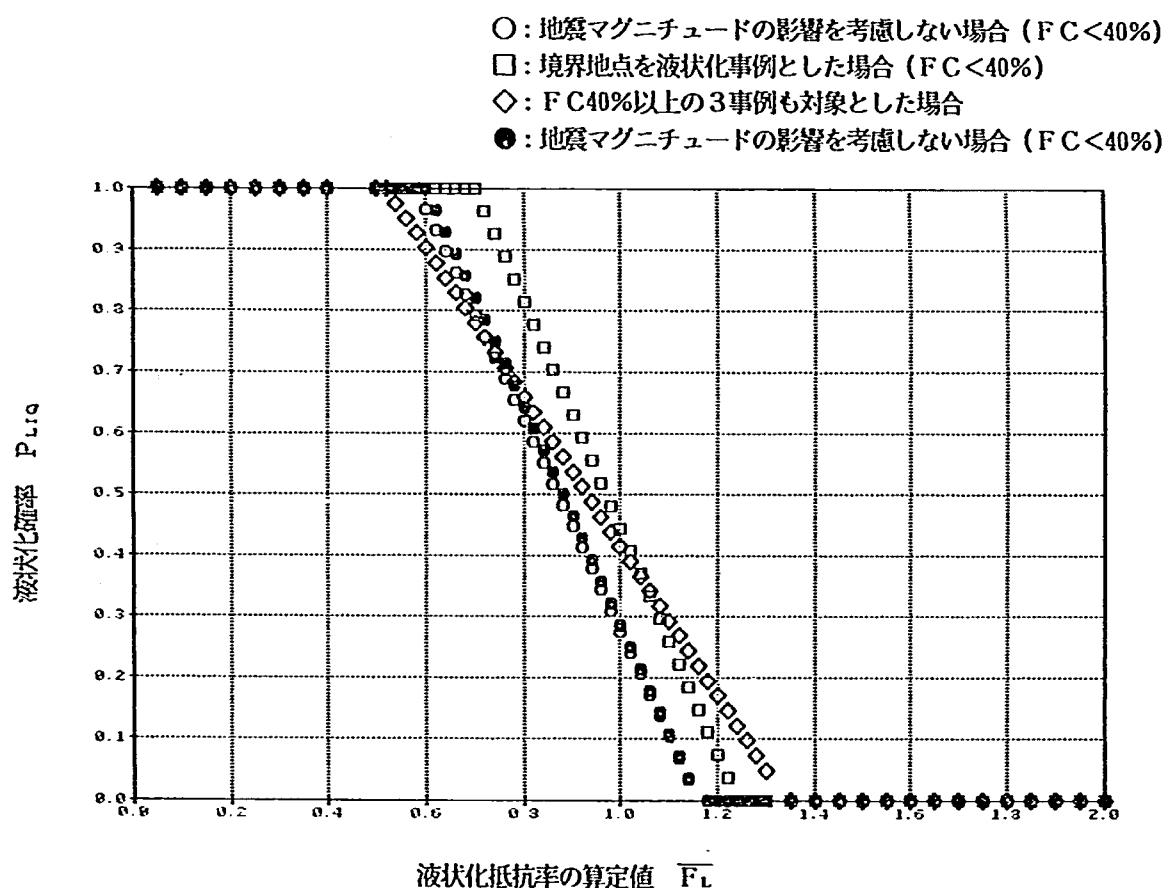


図4.20 液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたときの液状化抵抗率と液状化確率の関係

FCが40%未満の事例を用いて地震マグニチュードの補正を行い、境界地点は非液状化事例とした場合の P_{Liq} と地震時せん断応力比 τ 及び動的せん断強度比 R_H の関係を図4.21に示す。 P_{Liq} が0または1となる領域は、それぞれ、非液状化事例のみが存在する領域、液状化事例のみが存在する領域と対応した。

なお、式(4.28)及び(4.29)を式(4.14)に代入すると次式が得られる。右辺第2項は、液状化抵抗率の算定値が真値に対して平均的にどの程度余裕があるかを示しており、上記の場合については表4.3より0.13となった。これは、図4.19において $R_{Liq}=0.5$ となる液状化抵抗率がおおよそ0.9程度で、本来の境界値である1.0と比べて0.1程度の差があったことと対応している。

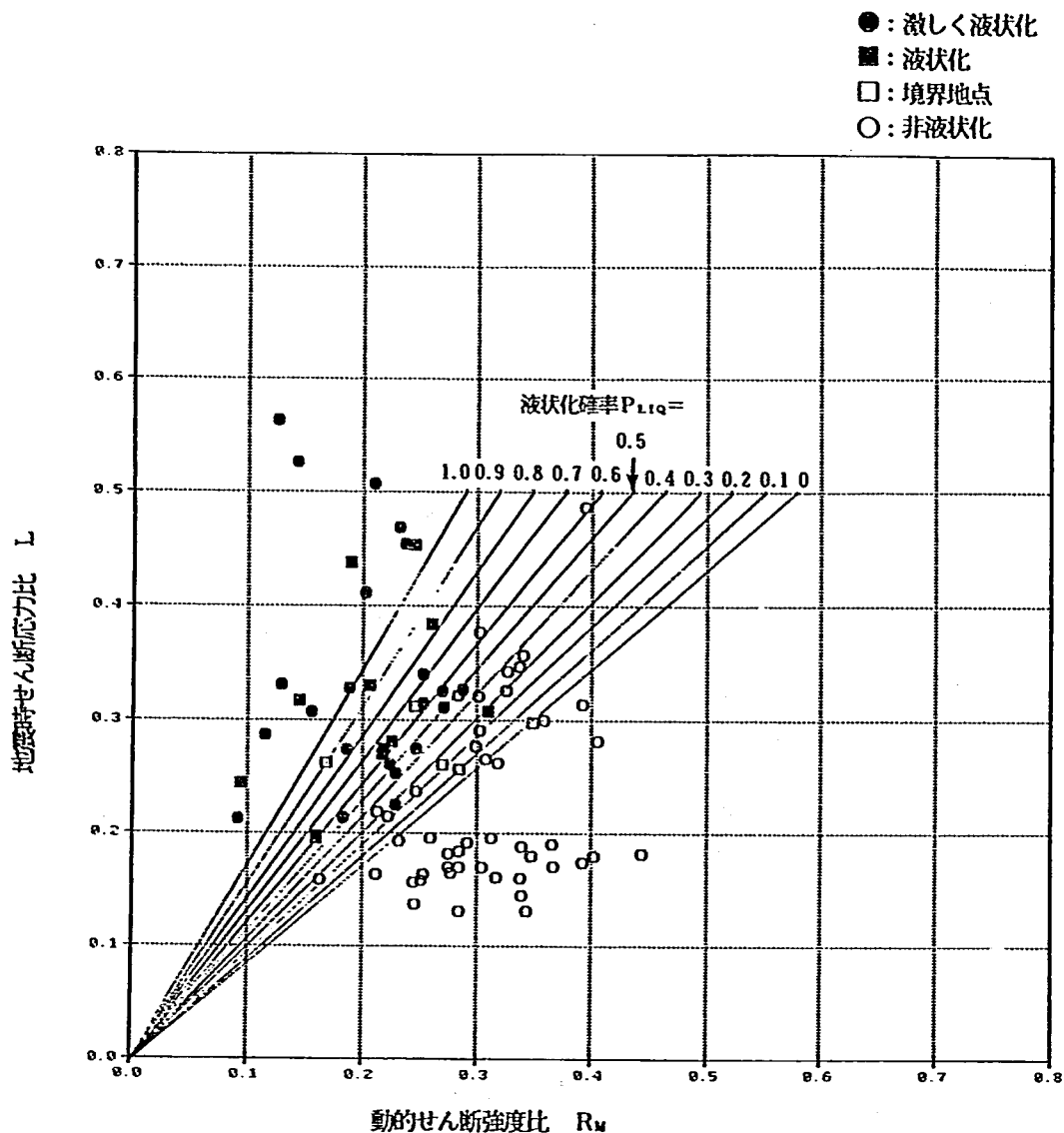


図4.21 液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液状化確率の関係

$$m = \overline{F_L} + \frac{b' - a'}{2} \quad \dots (4.31)$$

(2) 液状化抵抗率の算定方法を変えた場合の検討

図4.21では、等しい P_{LiQ} のラインが原点を通る直線で表されている。これは、両軸の比である液状化抵抗率を確率変数として、 P_{LiQ} を定式化したためであるが、次式で定義しなおした液状化抵抗率を用いて同様な計算を行うと、等しい P_{LiQ} のラインが通る位置を (C_R, C_L) にずらすことができる。

$$F_L' = \frac{R - C_R}{L - C_L} \quad \dots (4.32)$$

ここに、 C_R ：動的せん断強度比 R の補正量、 C_L ：地震時せん断応力比 L の補正量

C_R と C_L を0.1刻みで変えて計算した L_{max} を図4.22にまとめて示す。また、代表的ケースについて $P_{LIQ}=0$ 及び1のラインを図4.23に示す。 L_{max} が最大となる $(C_R, C_L) = (-0.2, -0.4)$ のときの a' と b' の値を表4.4に示すとおりで、このときの $P_{LIQ}=0$ 及び1のラインは、図4.23中の点線となった。この場合、補正量が大きいため F_L' は物理的な意味をもたなくなるが、このような補正を行うことにより、より近似度の高い液状化確率の定式化ができることがわかる。

また、補正量が小さい範囲内で L_{max} を比較すると、 $(C_R, C_L) = (0, 0)$ の場合の L_{max} は大きい値の一つとなっており、本来の定義で液状化抵抗率を用いた場合の近似度は、比較的良好であることがわかる。

表4.4 液状化抵抗率の算定方法を変えた場合の計算結果

ケース名	対象事例	地震マグニチュードの補正の有無	係数				最大対数近似度 L_{max}
			C_R	C_L	a'	b'	
FL-U-BM'	細粒分含有率40%未満	有	-0.2	-0.4	-0.25	0.45	-20.23

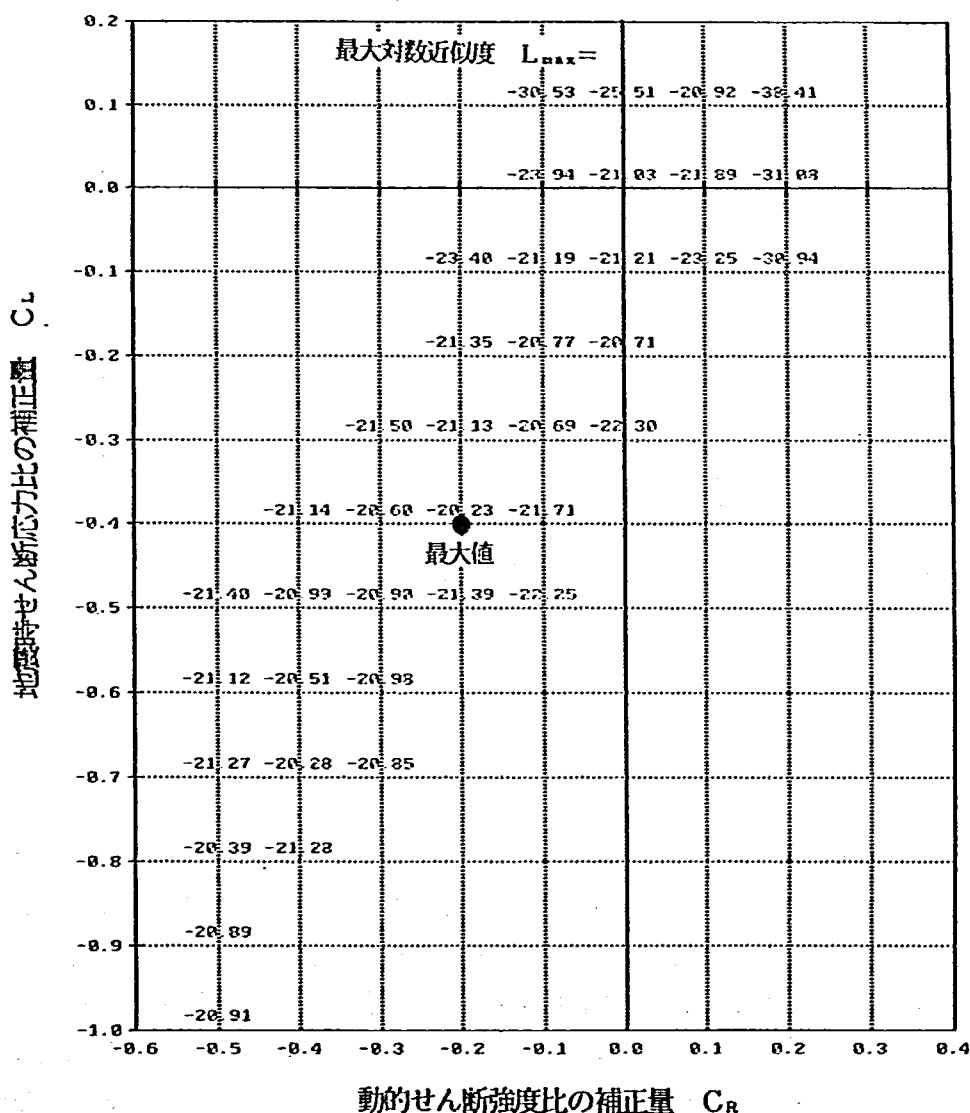


図4.22 液状化抵抗率の算定方法を変えた場合の L_{max}

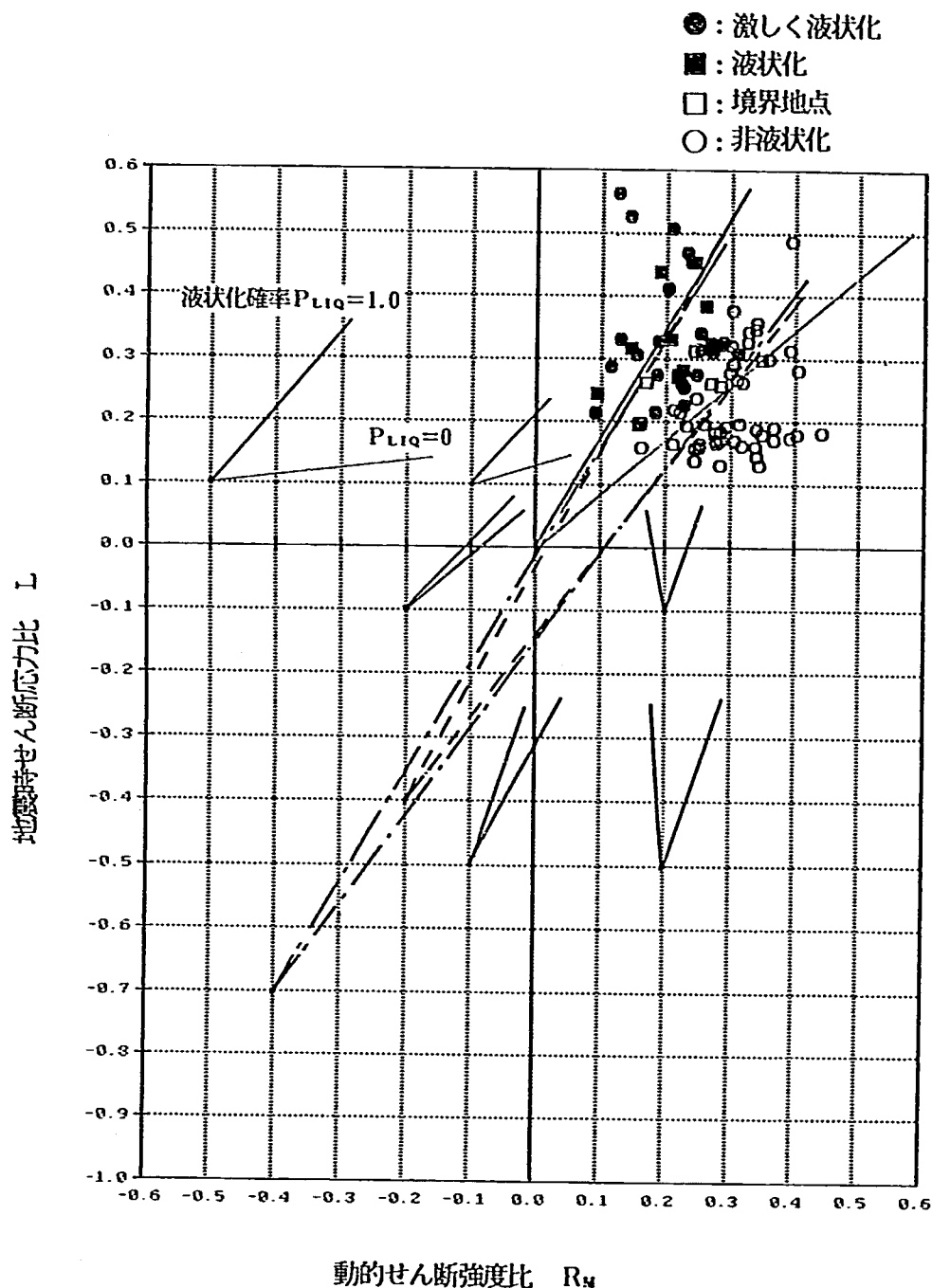


図4.23 液状化抵抗率の算定方法を変えた場合に液状化確率が0または1となる領域

(3) 一様分布モデルの問題点

一様分布モデルでは、式(4.30)あるいは図4.20、図4.21に示したように、ある範囲の外側では P_{Liq} が0または1となる。先に述べたように、これらは、非液状化事例のみが存在する領域、及び液状化事例のみが存在する領域にそれぞれ対応する。しかし、「非液状化事例のみが存在していた領域では $P_{Liq}=0$ で、今後も液状化が生じることはない。」と断定してしまうことは、ここで用いた事例数が十分に多いとは言いがたいので必ずしも望ましくない。このような観点からは、微小ではあっても常に $0 < P_{Liq}$ となる次項以降のモデルのほうが、安全側の評価を行えるものと考えられる。

4.2.4 正規分布モデルによる液状化確率の定式化

(1) 液状化抵抗率を確率変数とした定式化

ここでは、式(4.15)中の定数 m 及び σ のうち、 m のみが液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ の関数として次式で表され、また、 σ は一定値であるとして計算を行った。これは、一様分布モデルの平均値 $(a+b)/2$ が $\overline{F_L}$ に定数を加えたものとして、また、ばらつきの範囲 $b-a$ が一定値として設定されたことと対応する（式(4.28)及び(4.29)参照）。

$$m = \overline{F_L} + m' \quad \dots (4.33)$$

表4.3と対応する条件のもとでの計算結果を表4.5に示す。地震マグニチュードの補正を行わない場合には $L_{max} = -23.34$ 、補正を行った場合には $L_{max} = -20.88$ となり、一様分布モデルの結果と比較すると、補正を行わない場合には近似度が減少し、補正を行った場合には逆に近似度が増加した。

表4.5 液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした計算結果

ケース名	対象事例	地震マグニチュードの補正の有無	係数		最大対数近似度 L_{max}
			m'	σ	
FL-N-AM	全事例	有	0.08	0.22	-26.55
FL-N-B	細粒分含有率40%未満	無	0.12	0.18	-23.34
FL-N-BM	〔（ ）内は境界地点を液状化事例とした場合の結果〕	有	0.12 (0.04)	0.16 (0.16)	-20.88 (-21.92)

$\overline{F_L}$ と P_{LIQ} の関係を図示すると図4.24となる。各要因の影響に関しては、それぞれ4.2.3(1)で述べたことと同様の結果が得られた。

FCが40%未満の事例を用いて地震マグニチュードの補正を行い、境界地点は非液状化事例とした場合の P_{LIQ} と地震時せん断応力比 $\overline{L}$ 及び動的せん断強度比 $\overline{R}$ の関係を図4.25に示す。一様分布モデルの結果である図4.21と比較すると、以下のことがわかる。

- 1) $P_{LIQ} = 0.1 \sim 0.9$ のラインはほぼ一致する。
- 2) 正規分布モデルの $P_{LIQ} = 0.01$ 及び 0.99 のラインは、一様分布モデルの $P_{LIQ} = 0$ または 1 の領域内にある。

これらは、図4.24で $P_{LIQ} = 0.1 \sim 0.9$ となる部分がほぼ直線状になっており、また、その外側では傾きが急激に小さくなっていることと対応する。

なお、上記の場合の液状化抵抗率の算定値は、表4.5の m' より平均的には0.12の余裕があることがわかる。これは、一様分布を仮定した場合の結果とほぼ一致した。

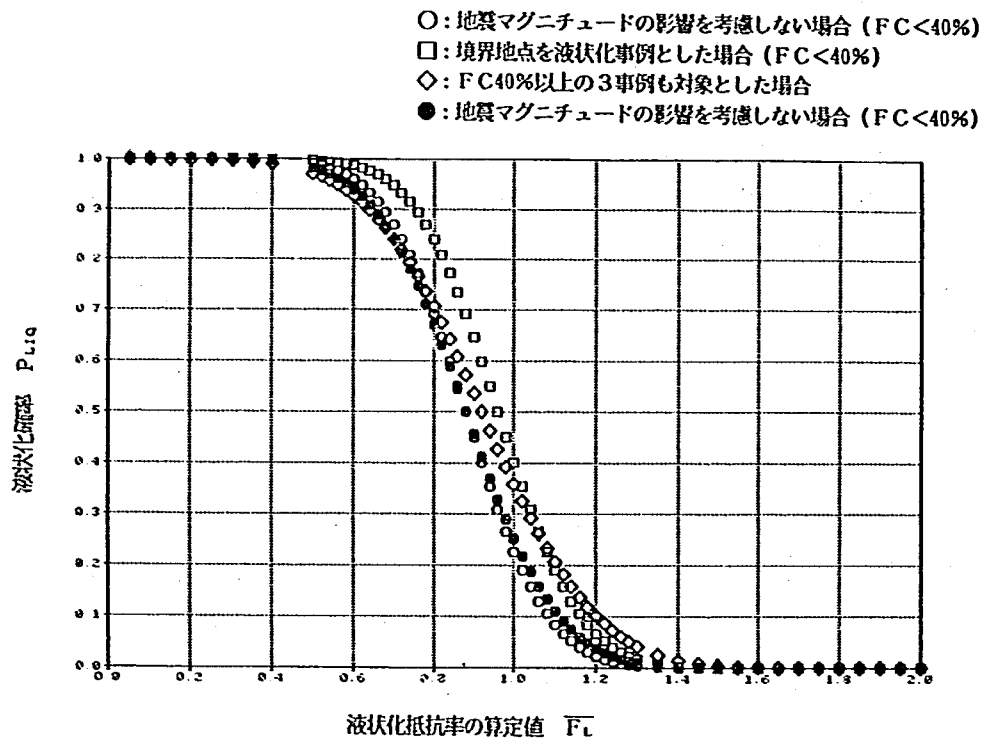


図4.24 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの液状化抵抗率と液状化確率の関係

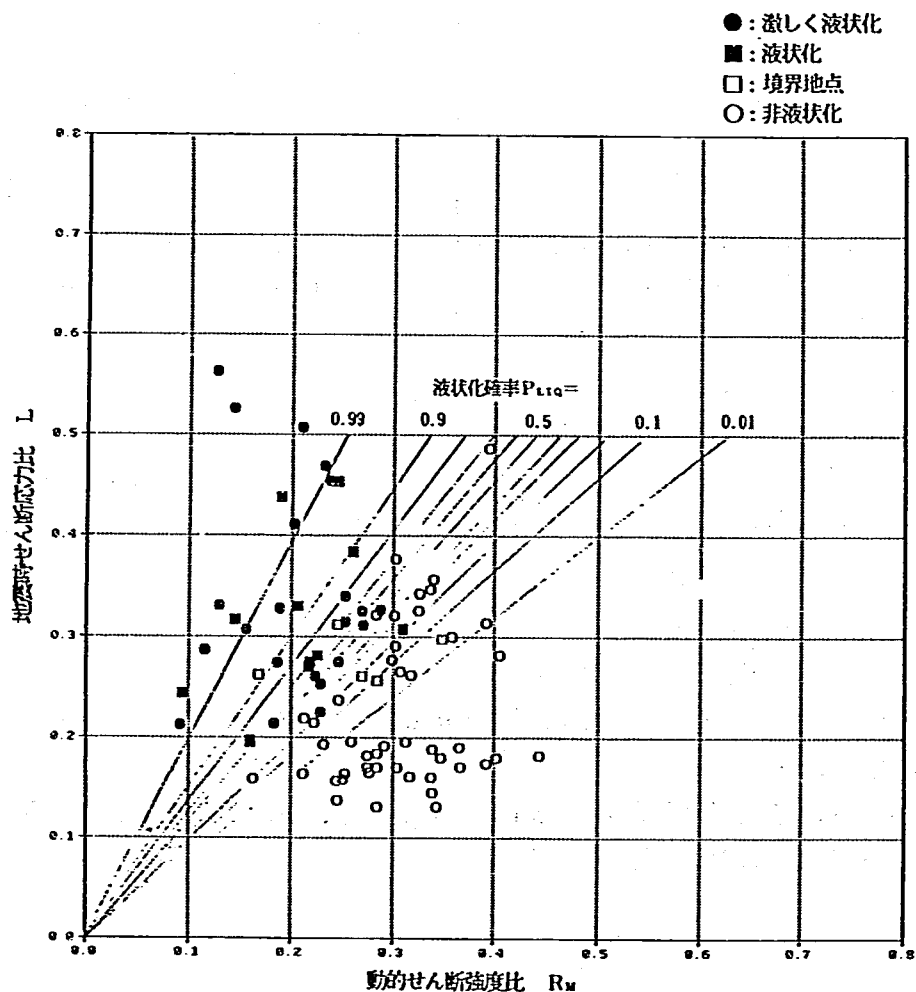


図4.25 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液状化確率の関係

(2) 液状化抵抗率を確率変数とすることの問題点

4.1.4(2)で述べた理由から、「真の液状化抵抗率」 F_L のばらつきが主として動的せん断強度比 R の推定精度に起因しているものと考え、「真の地震時せん断応力比」 L は算定値 $\bar{L}$ に等しいと仮定すると、式(4.20)を次のように変形することができる。

- ・ $F_L = R/\bar{L}$ より $dF_L = dR/\bar{L}$
- ・ 積分区間 $F_L = 0 \sim 1$ は $R = 0 \sim \bar{L}$ に対応する。
- ・ $\bar{F}_L = \bar{R}/\bar{L}$

$$\begin{aligned} \therefore P_{LIR} &= \int_0^1 f_{FL}(\bar{F}_L) \cdot dF_L \\ &= \int_0^{\bar{L}} \frac{1}{\bar{L}} \cdot f_{FL}(\bar{R}/\bar{L}) \cdot dR \quad \dots (4.34) \end{aligned}$$

上式を式(4.21)と比較すると、真の動的せん断強度比の確率密度関数 f_R として次式が得られる。

$$f_R = \frac{1}{\bar{L}} \cdot f_{FL}(\bar{R}/\bar{L}) \quad \dots (4.35)$$

これは、 f_R が $\bar{R}$ だけでなく $\bar{L}$ の関数でもあることを示している。例えば、 f_{FL} として正規分布モデルを用いた場合には、式(4.15)と式(4.33)より上式の右辺は次のように表され、 f_R として平均値 $\bar{R} + \bar{L} \cdot m'$ 、標準偏差 $\bar{L} \cdot \sigma$ の正規分布を考えていることになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\bar{L}} \cdot f_{FL}(\bar{R}/\bar{L}) &= \frac{1}{\bar{L}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left(\frac{F_L - (\bar{F}_L + m')}{\sigma} \right)^2 \right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (\bar{L} \cdot \sigma)} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left(\frac{R - (\bar{R} + \bar{L} \cdot m')}{\bar{L} \cdot \sigma} \right)^2 \right\} \quad \dots (4.36) \end{aligned}$$

動的せん断強度比は、地震時のせん断応力比の最大値に対応する強度として定義され、また、せん断応力波形の特性は地震動の大きさと相関関係があるので、 f_R が $\bar{L}$ の関数として表されても不自然ではない。しかし、 $\bar{L}$ の影響は、上の例のように動的せん断強度比の標準偏差（すなわちばらつきの程度）が $\bar{L}$ に比例するほど強くないことが予想される。このような理由から、液状化抵抗率を確率変数とする方法は、対象とする地震動が非常に大きい（あるいは非常に小さい）場合には、動的せん断強度比のばらつきを実際以上に大きく（あるいは小さく）見積もってしまう可能性があることがわかる。

(3) 動的せん断強度比を確率変数とした定式化

ここでは、式(4.15)を式(4.21)に代入し、その際に式(4.15)中の定数 m 及び σ が動的せん断強度比の算定値 $\bar{R}$ の関数または一定値として表されるものとして、以下に示す3通りの場合について計算を行った。

タイプ1 :

$$m = \bar{R} + C_1 \quad \dots (4.37)$$

$$\sigma = D_1 \quad \dots (4.38)$$

タイプ2 :

$$m = C_2 \cdot \bar{R} \quad \dots (4.39)$$

$$\sigma = D_2 \quad \dots (4.40)$$

タイプ3 :

$$m = C_3 \cdot \bar{R} \quad \dots (4.41)$$

$$\sigma = D_3 \cdot \bar{R} \quad \dots (4.42)$$

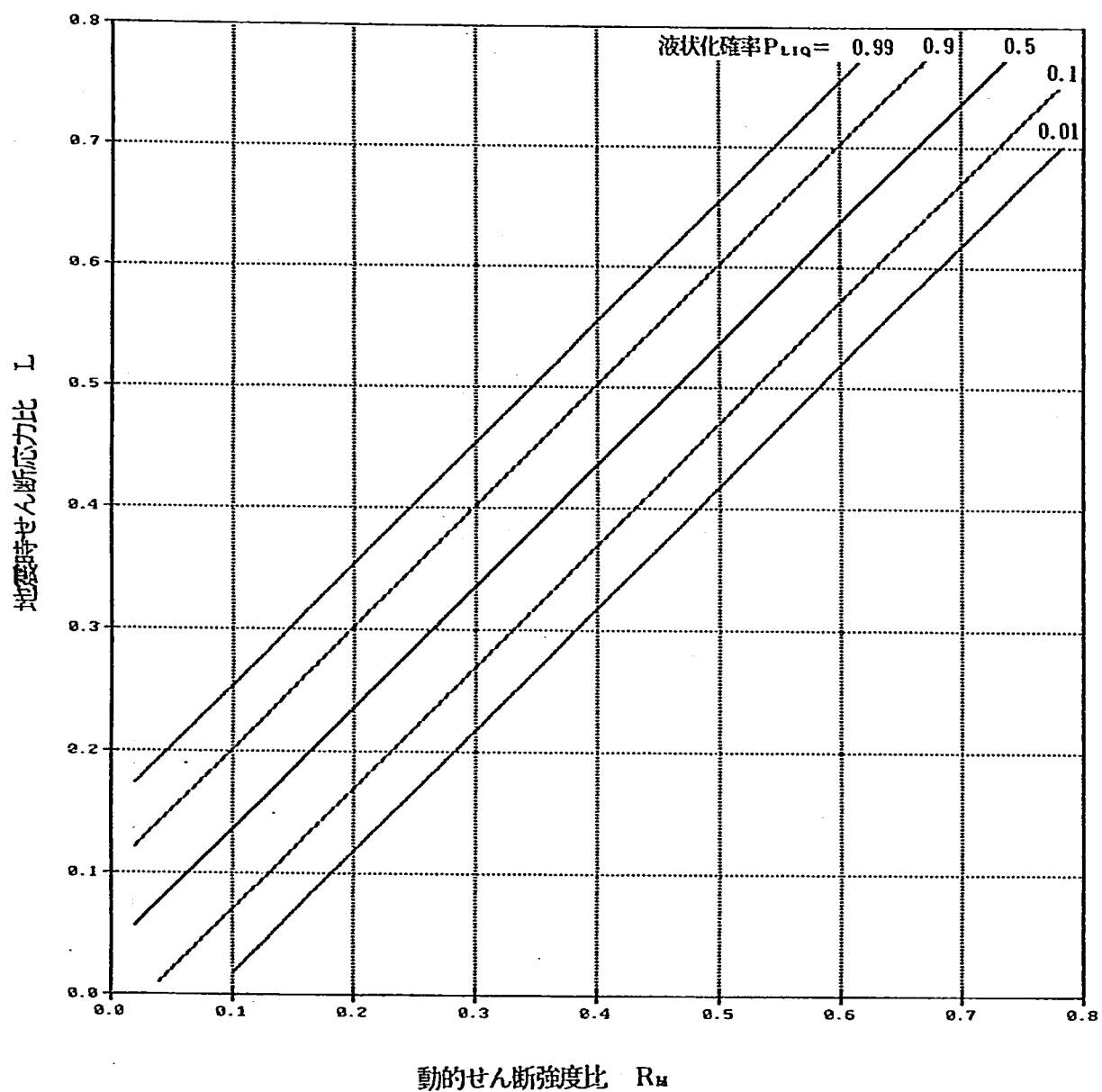
細粒分含有率FCが40%未満の計85事例を用いて、式(4.23)による対数近似度Lが最も大きくなるようなパラメーター C_1 及び D_1 の組合わせを計算した結果を表4.6に示す。タイプ2が最も近似度がよく、地震マグニチュードの補正を行わない場合には $L_{max} = -24.19$ 、補正を行った場合には $L_{max} = -21.52$ となったが、液化抵抗率を確率変数とした結果(表4.3及び表4.5参照)と比較すると、いずれの場合も近似度は低下した。

地震マグニチュードの補正を行った場合について、各タイプの P_{LIQ} と地震時せん断応力比 $\bar{L}$ 及び動的せん断強度比 $\bar{R}$ の関係を図4.26に示す。また、同じ場合で $\bar{L}$ を3通りの値に固定したときの、 P_{LIQ} と $\bar{R}$ の関係を図4.27に、 $\bar{R} = 0.3$ のときの真の動的せん断強度比 R の確率密度分布を図4.28に示す。これらより以下のことがわかる。

- 1) タイプ1と2では、 $\bar{R} \sim \bar{L}$ 図上で等しい P_{LIQ} のラインが平行線になる。タイプ1では傾きが1 : 1の平行線となるのに対し、タイプ2では $P_{LIQ} = 50\%$ のラインが原点を通る。
- 2) タイプ3では、 $\bar{R} \sim \bar{L}$ 図上で等しい P_{LIQ} のラインが原点を通る放射状となり、液化抵抗率を正規分布の確率変数とした図4.25とほぼ同様の関係となる。

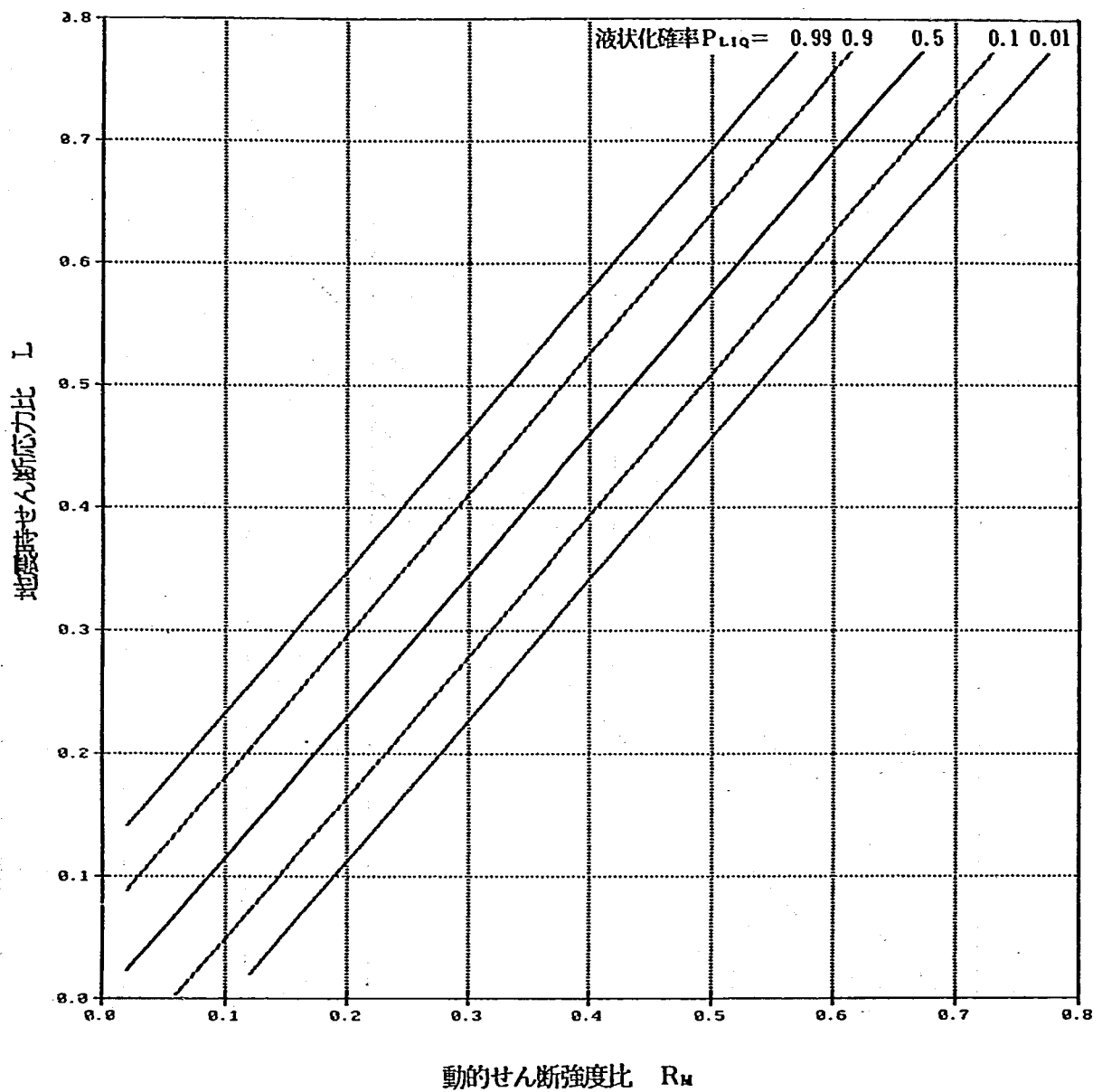
表4.6 動的せん断強度比を正規分布の確率変数とした計算結果

ケース名	対象事例	地震マグニチュードの補正の有無	タイプ	係数		最大対数近似度 L_{max}
				C_1	D_1	
R-N1-B	細粒分含有率40%未満	無	1	0.037	0.053	-25.22
R-N2-B			2	1.16	0.054	-24.19
R-N3-B			3	1.17	0.22	-24.26
R-N1-BM		有	1	0.036	0.051	-23.05
R-N2-BM			2	1.15	0.051	-21.52
R-N3-BM			3	1.16	0.21	-22.48



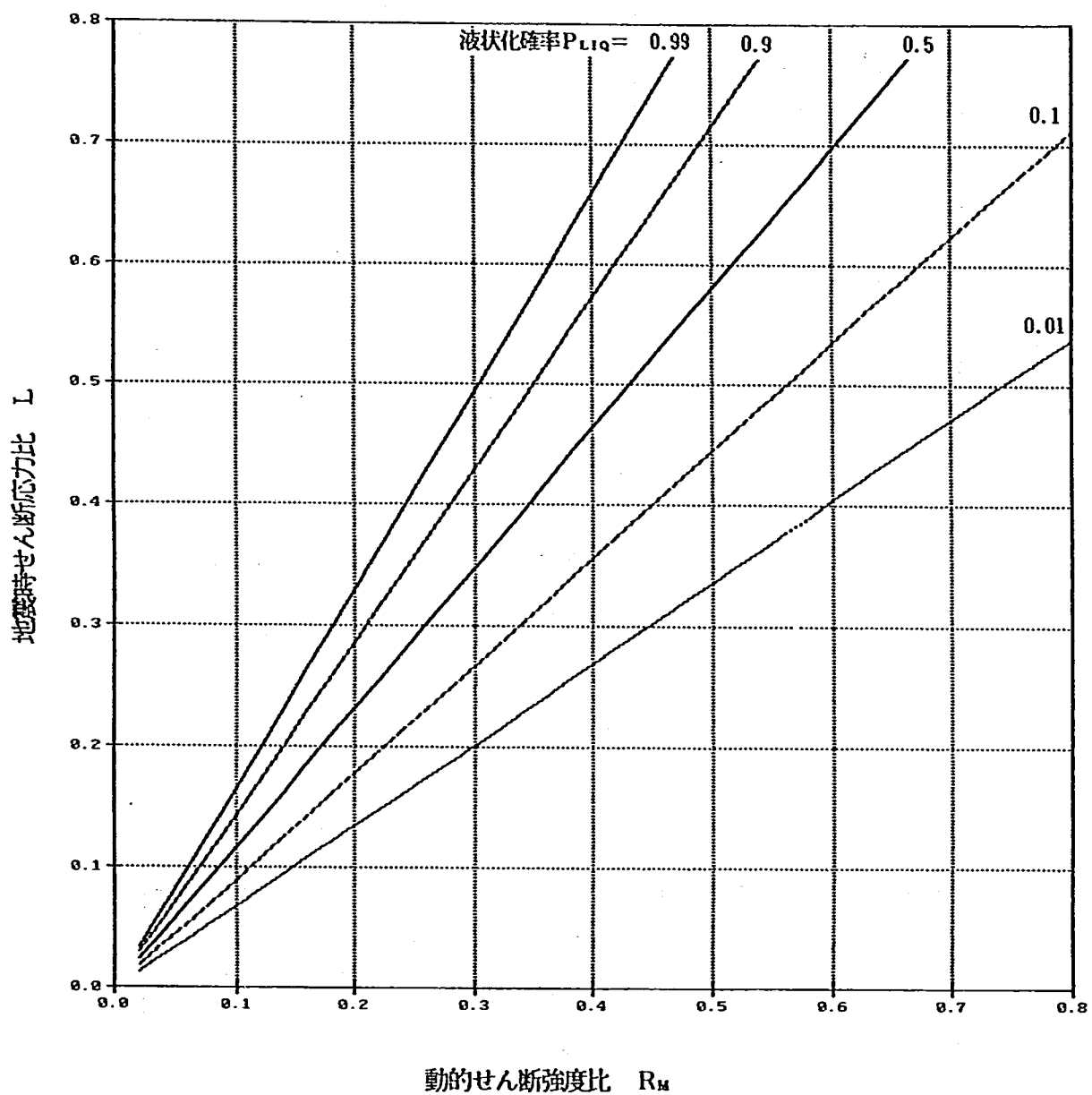
(I) タイプ1

図4.26 動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液状化確率の関係



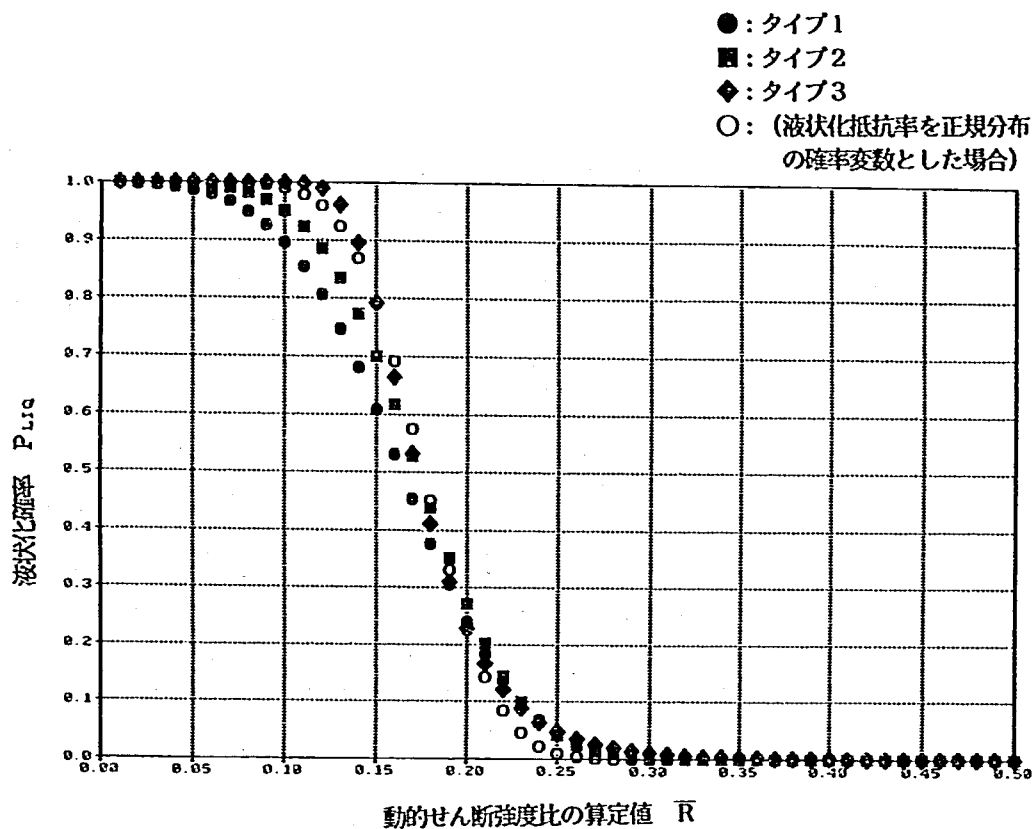
(2) タイプ2

図4.26 動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液状化確率の関係

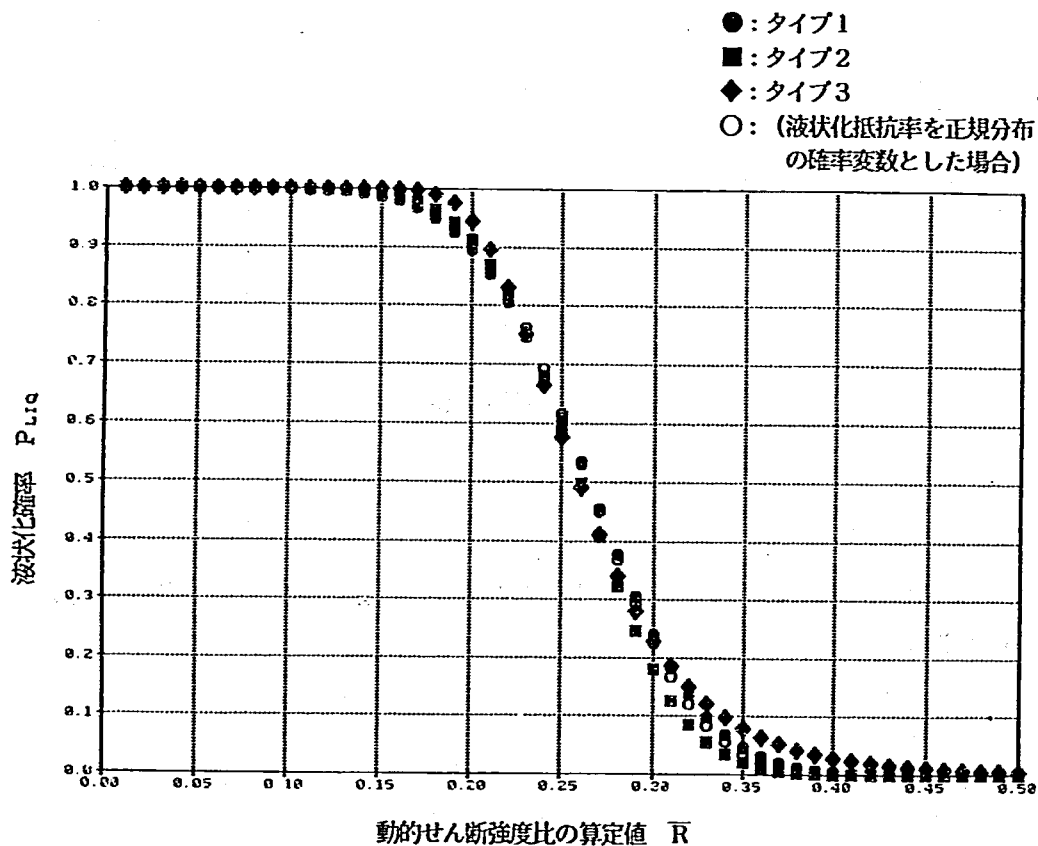


(3) タイプ3

図4.26 動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液状化確率の関係

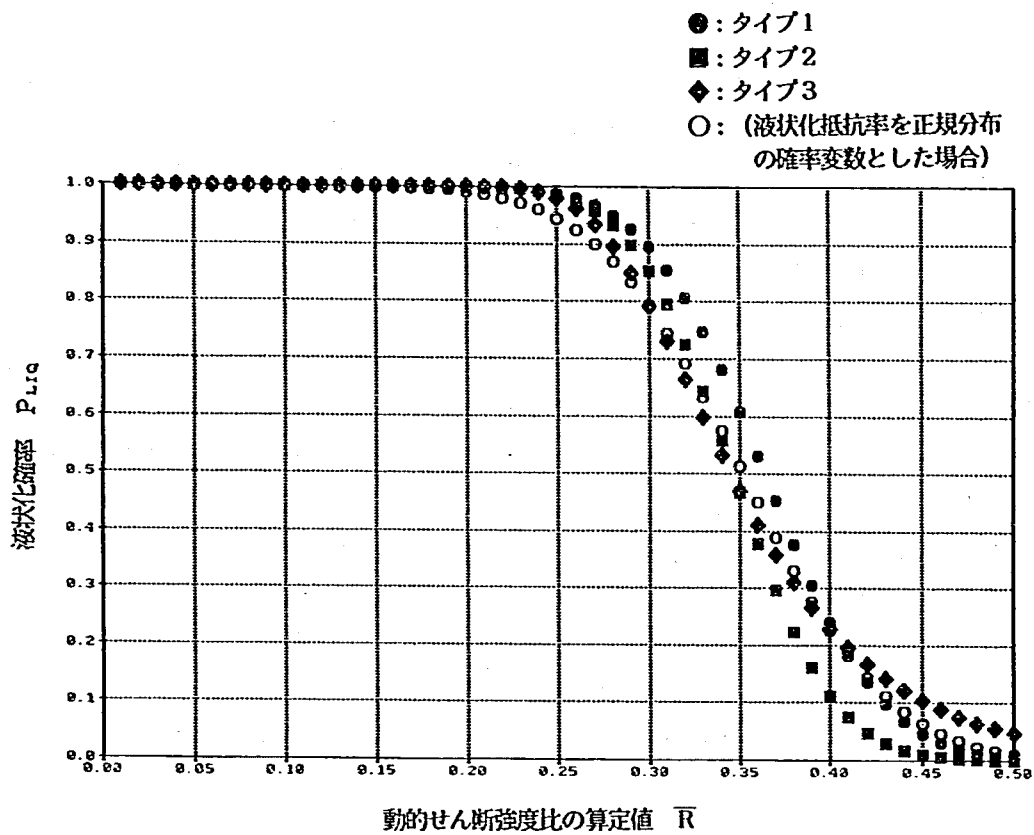


(1) 地震時せん断応力比 $\bar{L}=0.2$ の場合



(2) 地震時せん断応力比 $\bar{L}=0.3$ の場合

図4.27 動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液状化確率の関係



(3) 地震時せん断応力比 $\bar{T}=0.4$ の場合

図4.27 動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液化化確率の関係

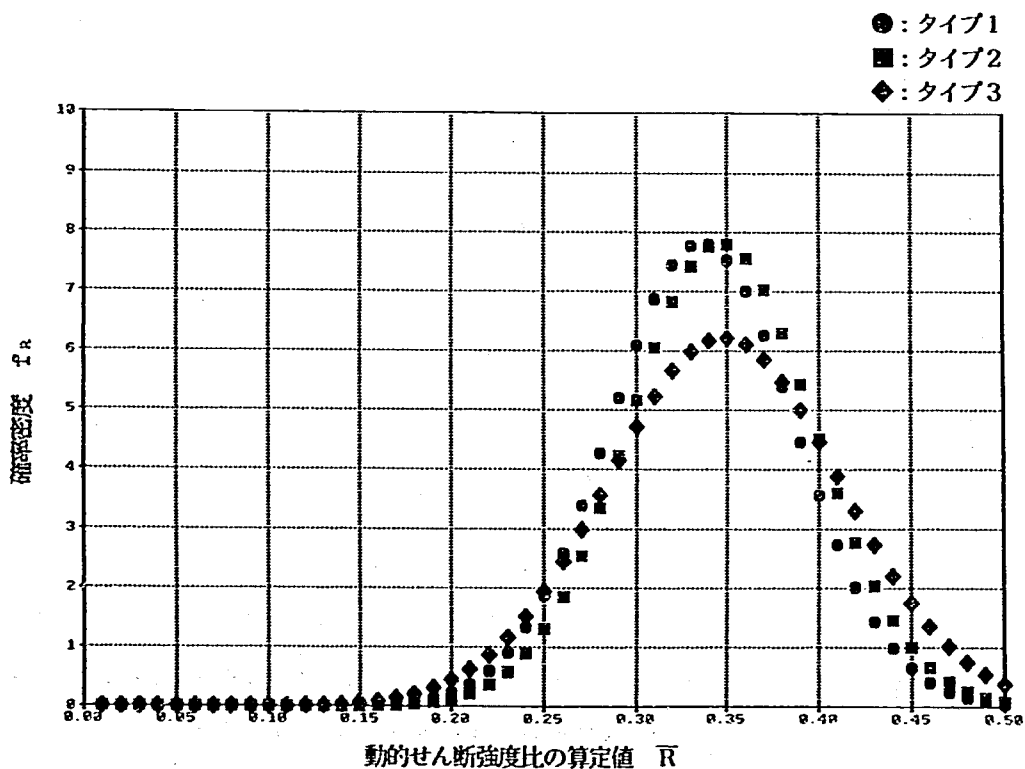


図4.28 動的せん断強度比 $\bar{R}=0.3$ の場合の真値の確率密度分布 (正規分布)

3) $\bar{L}=0.3$ としたときの P_{LiQ} と $\bar{R}$ の関係は、どのタイプもほぼ一致する。 $\bar{L}=0.2$ のときにはタイプ1<2<3の順に P_{LiQ} が大きくなるのに対し、 $\bar{L}=0.4$ ではタイプ2<1の順となり、またタイプ3の P_{LiQ} は $\bar{R}$ が小さいときには他のタイプよりも小さく、 $\bar{R}$ が大きいときには逆にこれらよりも大きくなる。

4) $\bar{R}=0.3$ のときの R の確率密度分布は、 $R=0.34$ 付近で最大となる。これは、地震時せん断強度比の算定値が、真値よりも平均的にはやや小さめであることを意味しており、表4.6の C_1 より0.036、あるいは C_2 及び C_3 より15%程度の余裕があることが予想される。

図4.27には、液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした場合の結果も合わせて示したが、動的せん断強度比を確率変数とした場合と比較して、 $\bar{L}=0.2$ のときには傾きが大きく、 $\bar{L}=0.4$ のときには逆に傾きが小さくなっており、4.2.4(2)で述べたこと（動的せん断強度比の標準偏差が地震時せん断応力比に比例すること）と対応している。しかし、近似度の高かったタイプ2との P_{LiQ} の差は最大でも15%程度で、用いた事例数が十分に多いとは言えないことを考慮すると、 $\bar{L}=0.2\sim0.4$ 程度の範囲を対象とする場合には、液状化抵抗率を確率変数とする方法を用いても差し支えないものと考えられる。

なお、図4.29は、地震マグニチュードの補正を行った場合について、4.2.2と同様な方法により $\bar{R}-\bar{L}$ にある幅 W をもたせて、その中に含まれる液状化事例の比率 R_{LiQ} を算定した結果である。 $R_{LiQ}=0.5$ となる $\bar{R}-\bar{L}$ はおおよそ-0.02程度で、 $\bar{L}$ が真値であると仮定すると、 $\bar{R}$ が平均的には0.02程度小さく評価されている

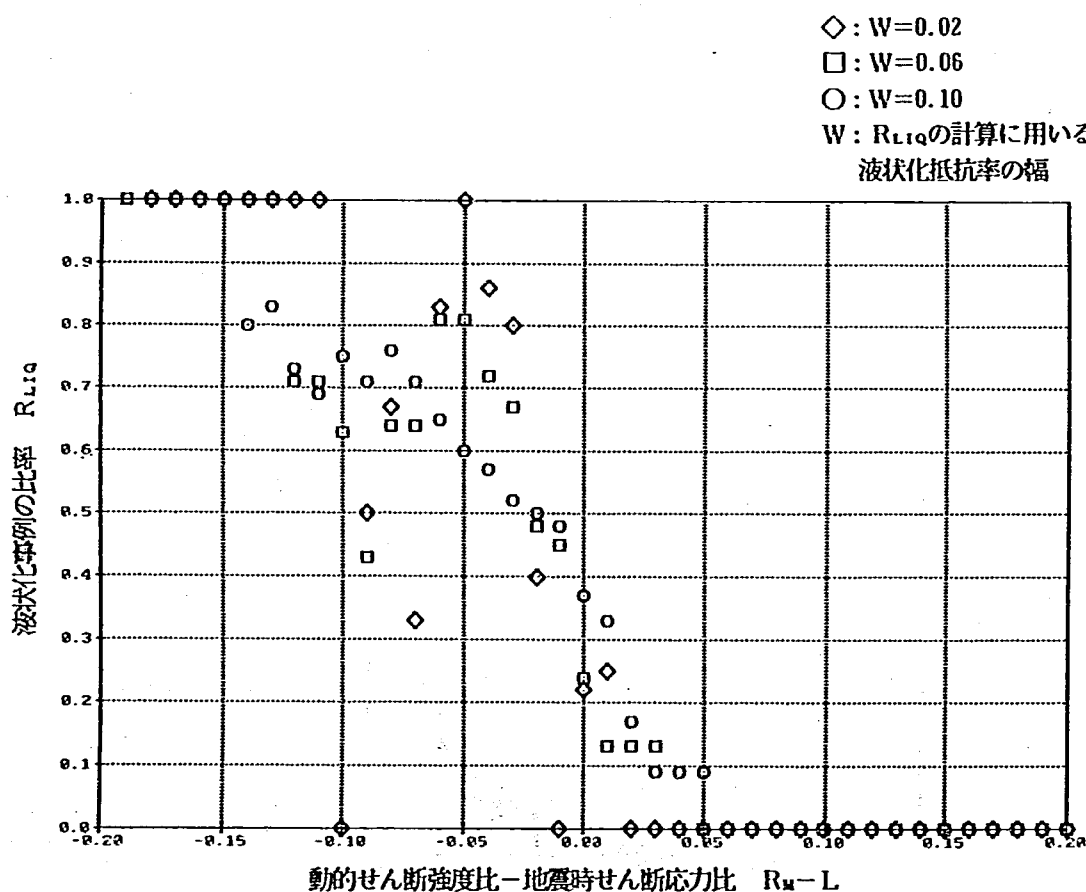


図4.29 (動的せん断強度比-地震時せん断応力比) と液状化事例の比率の関係

ことになる。この余裕がタイプ1の C_1 に相当するが、この場合には値は一致しなかった。

4.2.5 極値分布モデルによる液状化確率の定式化

(1) 極値分布モデルを用いた理由

測定値に含まれる誤差の影響を評価する場合、一般には正規分布を仮定して、次式のような定式化を行うことが多い。

$$x = \bar{x} + e \quad \dots (4.43)$$

ここに、 x ：測定誤差を取り除いた真値、 $\bar{x}$ ：測定値、 e ：測定誤差（平均値 $m=0$ 、標準偏差 σ の正規分布）

一方、動的せん断強度比を確率変数とした定式化では、地盤の N 値から間接的に算定する際の不確実性が評価の対象とされており、測定誤差のほかに算定手法自身の精度が問題となる。算定手法が導きだされた過程ではいくつかの簡略化が行われているが、これらの要因の不確実性が最終的な確率分布に及ぼす複雑な影響を考慮すると、最終的に仮定する確率分布は必ずしも正規分布である必要はないものと考えられる。

以下では、動的せん断強度比の分布形状が左右対象でない場合に結果がどのようなになるかを調べるために、極値分布を仮定した計算を行った。極値分布自身の理論的な意味を特に考慮したわけではないが、この分布は累積確率密度関数が簡潔な形で求められる（式(4.17)参照）ので、地震時せん断応力比も確率変数とした場合の2重積分（式(4.22)参照）が、実質1回の数値積分ですむという利点をもつ。

なお、最小値の分布を表現する場合によく用いられる極値分布として、図4.6とは逆に数値の小さい側の分布がなだらかなになるものがあり、これを用いた検討も行ったが、正規分布を仮定した場合よりも近似度が低下する結果となった。

(2) 動的せん断強度比を確率変数とした定式化

真の動的せん断強度比が極値分布であると仮定し、平均値 m と標準偏差 σ が算定値 $\bar{R}$ の関数または一定値として表されるものとして、正規分布モデルの場合と同じ3通りのタイプ（式(4.37)～(4.42)参照）の計算を行った。分布形状を決めるパラメーターである α と u は、 m 及び σ から式(4.18)、(4.19)を用いて求めた。

細粒分含有率 F_C が40%未満の計85事例を用いて、地震マグニチュードの補正を行った場合について、式(4.23)による対数近似度 L が最も大きくなるようなパラメーターの組み合わせを計算した結果を表4.7に示す。

表4.7 動的せん断強度比を極値分布の確率変数とした計算結果

ケース名	対象事例	地震マグニ チュードの 補正の有無	タイプ	係数		最大対数 近似度 L_{max}
				C_1	D_1	
R-E1-BM	細粒分含有率40%未満	有	1	0.037	0.051	-22.14
R-E2-BM			2	1.16	0.052	-20.65
R-E3-BM			3	1.16	0.21	-20.92

タイプ2の近似度がよく $L_{max}=-20.65$ となり、これまでの結果（表4.3、表4.5及び表4.6参照）と比較しても最も近似度が高かった。他のタイプの近似度も、それぞれ正規分布の対応する結果よりもよかった。

地震時せん断応力比 $\bar{L}$ を3通りの値に固定したときの、各タイプの P_{LiQ} と動的せん断強度比 $\bar{R}$ の関係を図4.30に、 $\bar{R}=0.3$ のときの真の地震時せん断強度比 R の確率密度分布を図4.31に示す。正規分布モデルの対応する結果（図4.27及び図4.28）と比較すると、 R の分布形状は変わっても、 P_{LiQ} と $\bar{R}$ の関係はほとんど変わらなかった。これは、表4.6と表4.7より、パラメーター C_1 及び D_1 の値がほとんど変わらなかったことと対応し、近似度の高い分布形状を仮定しても P_{LiQ} はあまり変わらないことがわかった。

(3) 動的せん断強度比と地震時せん断応力比を確率変数とした定式化

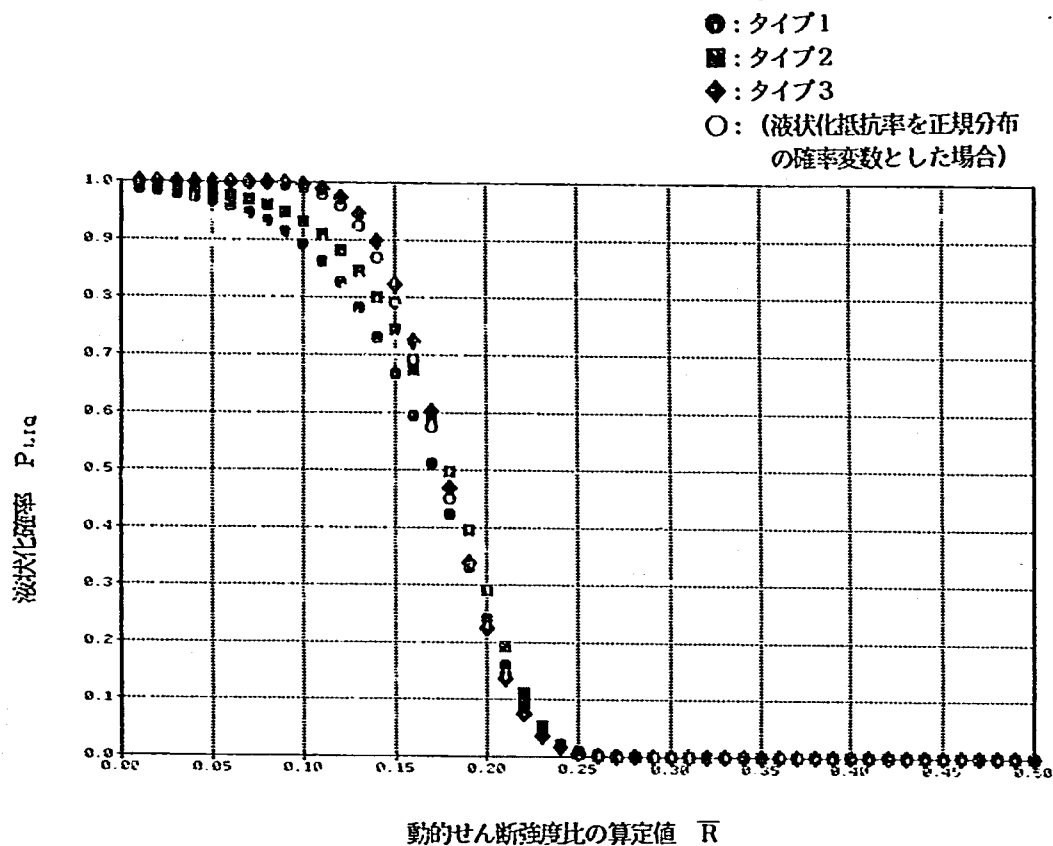
ここでは、これまでの検討で最も近似度が高かったことから、真の動的せん断強度比の分布としてタイプ2の極値分布を仮定した。また、真の地震時せん断応力比は平均値 m_L が算定値 $\bar{L}$ に等しく、標準偏差 σ_L が一定の正規分布であると仮定した。これは、式(4.2)及び(4.3)の中で最も不確実性が高いのは最大地表加速度 a_{max} で、その推定誤差の評価に式(4.43)が準用できると考えたためである。

細粒分含有率 FC が40%未満の計85事例を用いて地震マグニチュードの補正を行い、 σ_L として0.02, 0.05及び0.10の3通りの値を仮定した場合の計算結果を表4.8に示す。 $\sigma_L=0.02$ の場合には $L_{max}=-20.58$ となり、地震時せん断応力比の不確実性を考慮しない場合よりも近似度が若干上昇したが、 $\sigma_L=0.05$ 及び0.10の場合には近似度は逆にかなり低下した。

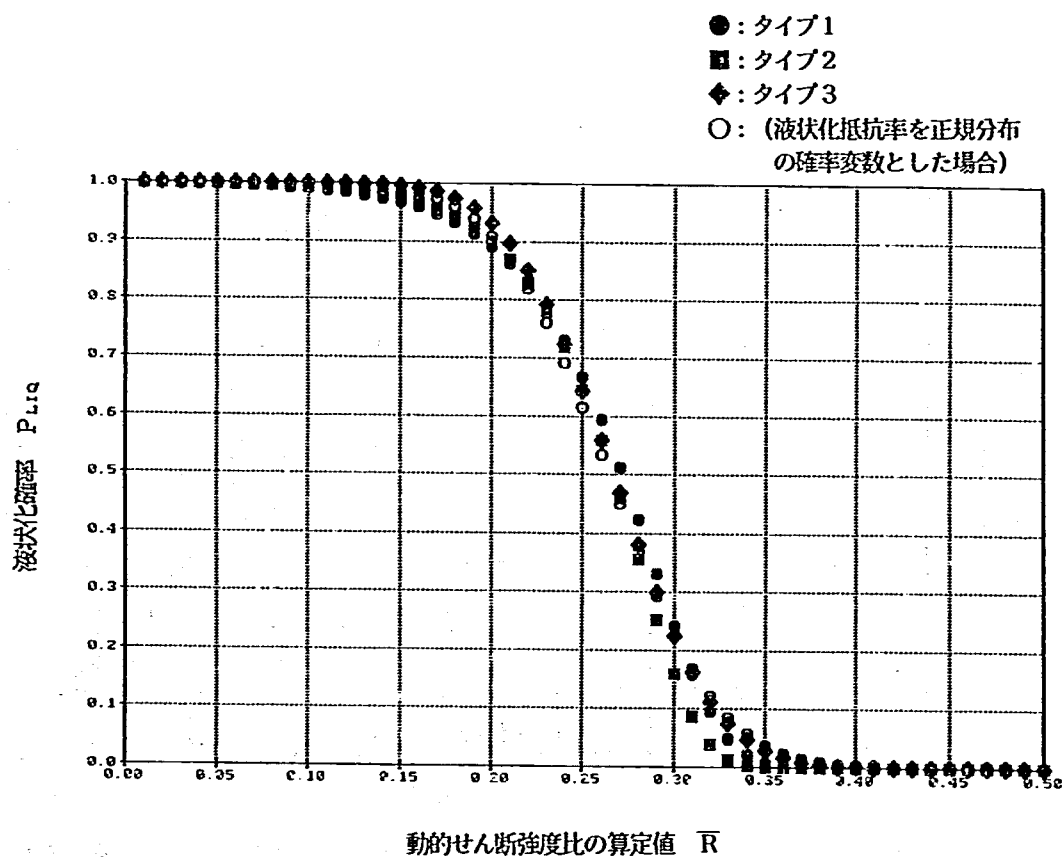
$\bar{L}=0.3$ のときの動的せん断強度比と液状化確率の関係を図4.32に示す。近似度の良い $\sigma_L=0.02$ の場合の結果は、液状化抵抗率を正規分布の確率変数として地震時せん断応力比の不確実性を考慮しなかった場合の結果とほぼ一致しており、地震時せん断応力比の不確実性を考慮しなくても実用上の影響はほとんどないものと考えられる。

表4.8 動的せん断強度比と地震時せん断応力比を確率変数とした計算結果

ケース名	対象事例	地震マグニチュードの補正の有無	地震時せん断応力比の標準偏差 σ_L	係数		最大対数近似度 L_{max}
				C_2	D_2	
RL-EN-1	細粒分含有率40%未満	有	0.02	1.15	0.048	-20.58
RL-EN-2			0.05	1.18	0.049	-22.11
RL-EN-3			0.10	1.23	0.052	-26.02

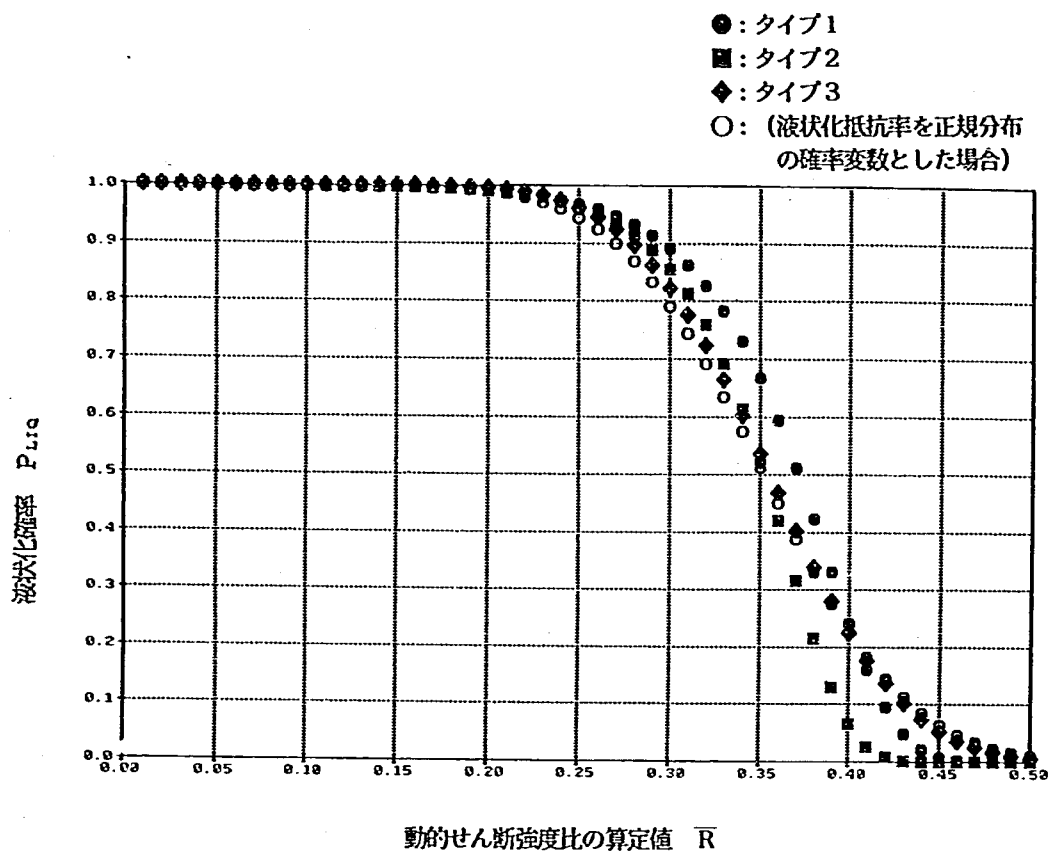


(1) 地震時せん断応力比 $\bar{L}=0.2$ の場合



(2) 地震時せん断応力比 $\bar{L}=0.3$ の場合

図4.30 動的せん断強度比を極値分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液状化確率の関係



(3) 地震時せん断応力比 $\bar{L}=0.4$ の場合

図4.30 動的せん断強度比を極値分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液状化確率の関係

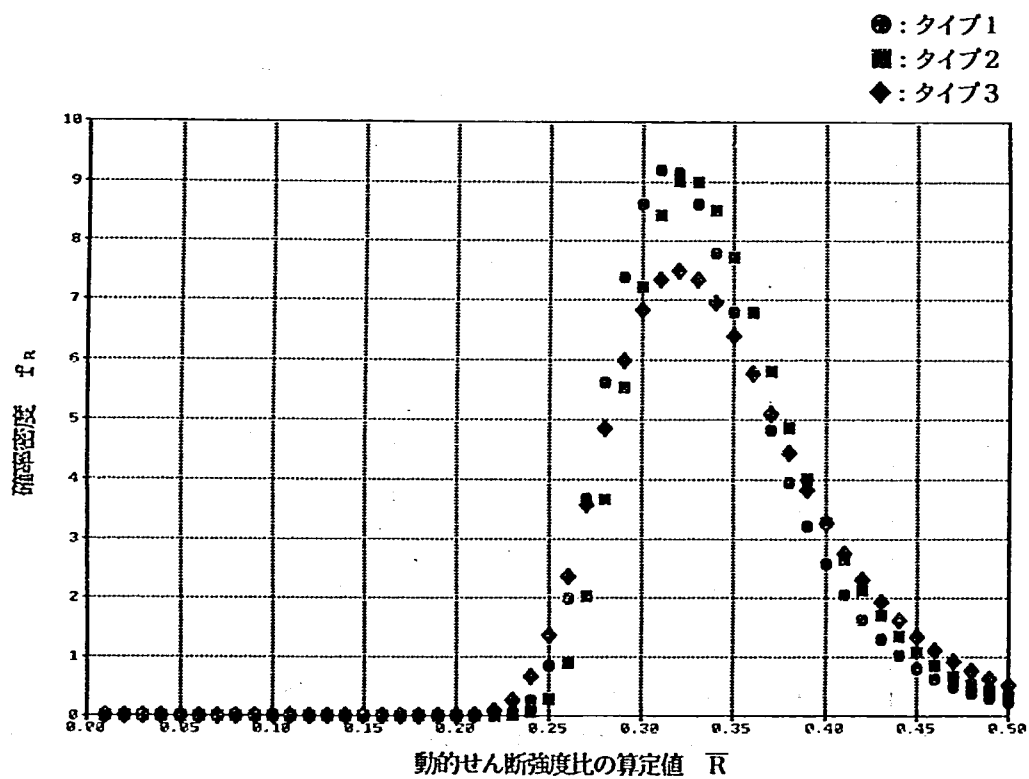


図4.31 動的せん断強度比 $\bar{R}=0.3$ の場合の真値の確率密度分布 (極値分布)

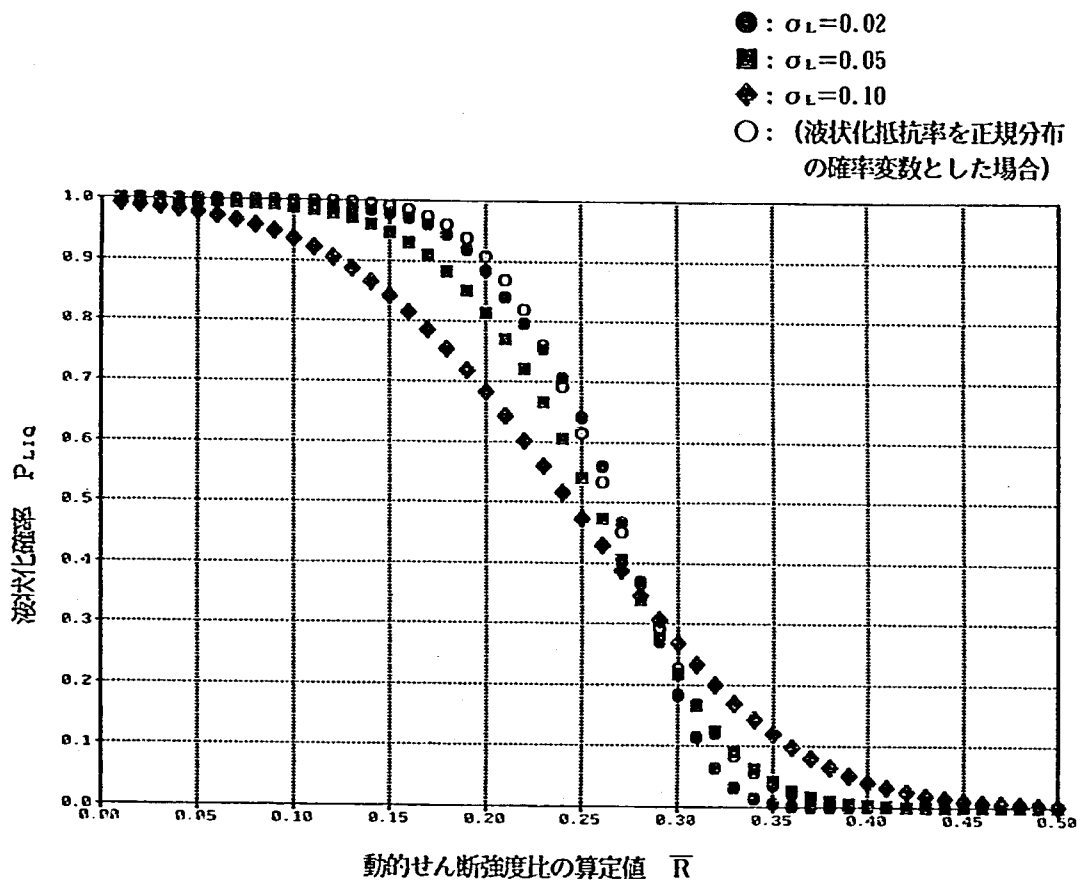


図4.32 動的せん断強度比と地震時せん断応力比を確率変数としたときの動的せん断強度比と液状化確率の関係（地震時せん断応力比 $\bar{\tau}=0.3$ の場合）

4.2.6 細粒分含有率の影響に関する検討

Liao¹⁹⁾は、細粒分含有率FCが12%以下のきれいな砂とFCが12%を超えるシルト質砂とに分けて、液状化確率の計算を行い、結果がかなり異なることを示した（3.1(11)参照）。また、Tokimatsuら³²⁾は、FCが5%以下の場合と10%以上の場合とに分けて検討を行い、後者の場合には換算N値を一定量補正することにより前者と同じ方法で液状化の有無を予測できることを示した。

前項までは、全ての事例、あるいは、FCが40%以下の事例を対象とした検討を行ってきた。ここでは、10%を境界値としてFCの範囲を細分化した場合の検討を行った。

(1) きれいな砂の液状化確率

FCが10%未満の計53事例を対象に、4.2.3～4.2.5と同様の方法で計算を行った結果を表4.9にまとめて示す。地震マグニチュードの補正を行った場合には、液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたときの近似度が最も高かったのに対し、補正を行わない場合には、同じ方法による近似度は他と比べて極めて低かった。

例として、地震マグニチュードの補正を行い、液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした場合の、 P_{Liq} と地震時せん断応力比 $\bar{\tau}$ 及び動的せん断強度比 $\bar{R}$ の関係を図4.33にもとの事例と合わせて示す。FCが40%以下の全ての事例を対象とした結果（図4.25）と比較して、 P_{Liq} が変化する領域がせばまった。これは、液状化事例と非液状化事例の重なりあう領域が小さくなったことによる。

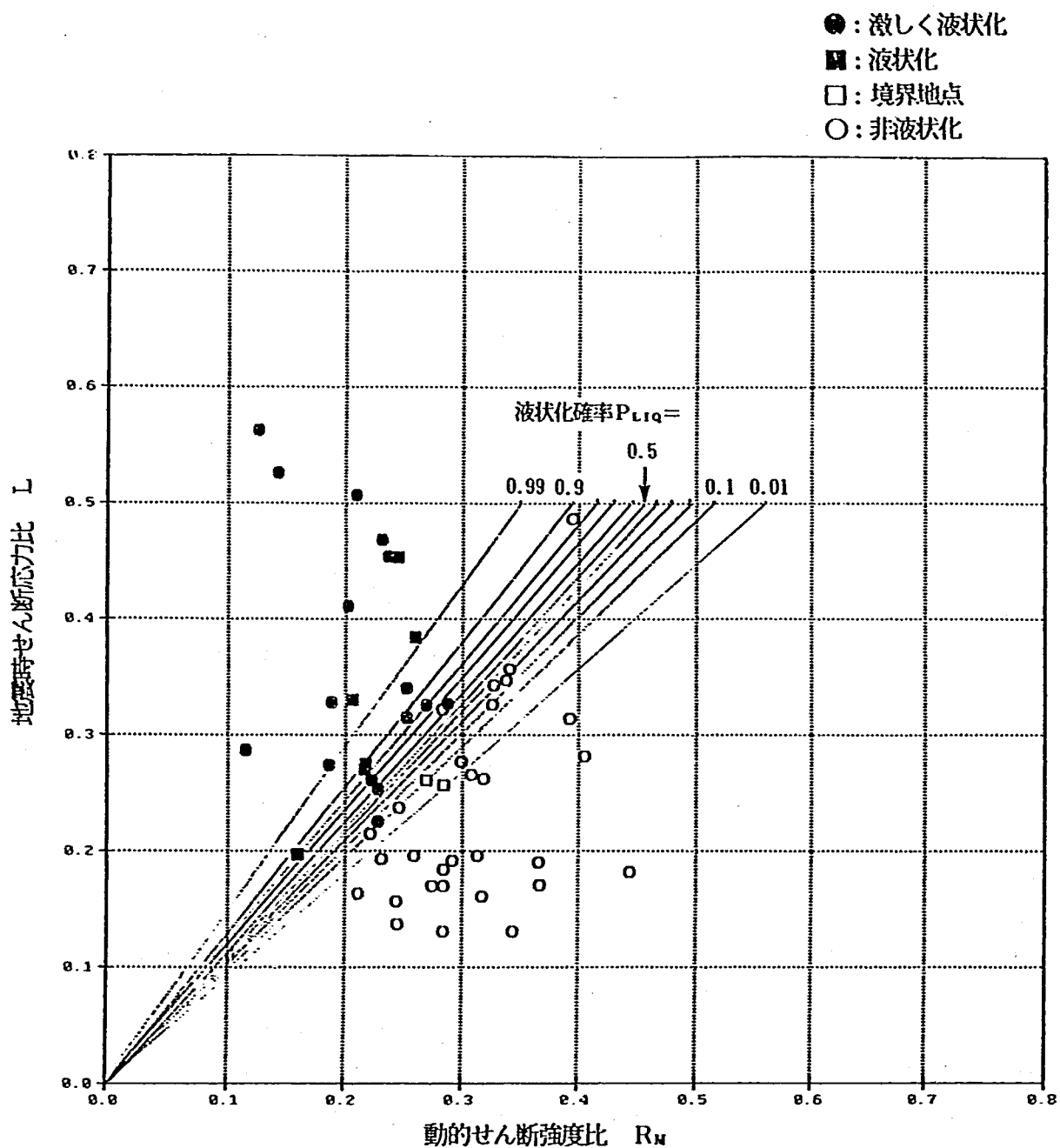


図4.33 液化化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液化化確率の関係（細粒分含有率10%未満の場合）

表4.9 きれいな砂を対象とした計算結果

ケース名	対象事例	地震マグニ チュードの 補正の有無	タイプ	係数		最大対数 近似度 L_{max}
FL-U-C	細粒分含有率10%未満	無	(一様)	$a' = 0.02$	$b' = 0.24$	-20.41
FL-N-C			(正規)	$m' = 0.09$	$\sigma = 0.12$	-10.56
R-N1-C			正規1	$C_1 = 0.031$	$D_1 = 0.043$	-12.72
R-N2-C			正規2	$C_2 = 1.13$	$D_2 = 0.039$	-11.38
R-N3-C			正規3	$C_3 = 1.11$	$D_3 = 0.14$	-10.53
FL-U-CM		有	(一様)	$a' = 0.05$	$b' = 0.23$	-8.62
FL-N-CM			(正規)	$m' = 0.09$	$\sigma = 0.09$	-8.72
R-N1-CM			正規1	$C_1 = 0.030$	$D_1 = 0.038$	-11.51
R-N2-CM			正規2	$C_2 = 1.14$	$D_2 = 0.031$	-9.42
R-N3-CM			正規3	$C_3 = 1.11$	$D_3 = 0.11$	-8.80
R-E1-CM			極値1	$C_1 = 0.031$	$D_1 = 0.037$	-10.79
R-E2-CM			極値2	$C_2 = 1.13$	$D_2 = 0.034$	-8.90
R-E3-CM			極値3	$C_3 = 1.11$	$D_3 = 0.12$	-8.82

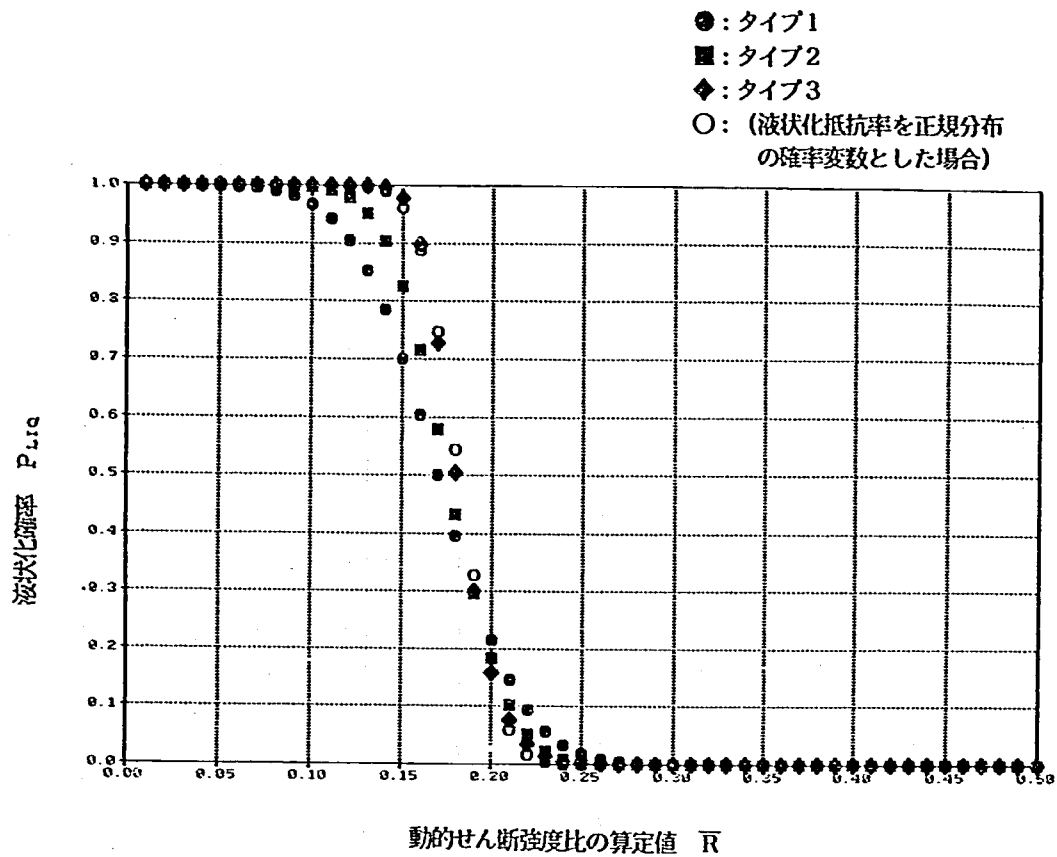
参考までに、正規分布モデルを用いた場合について、地震時せん断応力比 $\bar{L}$ を3通りの値に固定したときの P_{LiQ} と動的せん断強度比 $\bar{R}$ の関係を図4.34に、また、動的せん断強度比を正規分布の確率変数とした場合について、 $\bar{R}=0.3$ のときの真の地震時せん断強度比 R の確率密度分布を図4.35に示す。

(2) シルト質砂の液状化確率

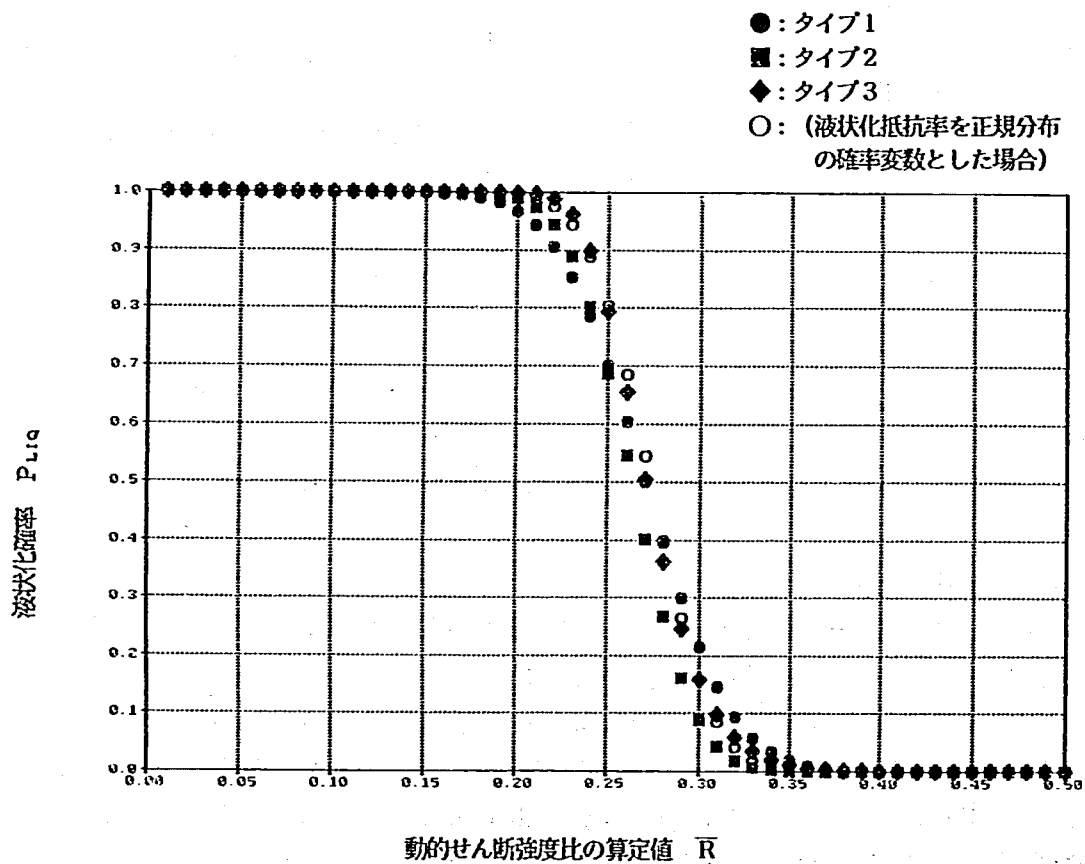
FCが10%以上40%未満の計32事例を対象に、同様の計算を行った結果を表4.10に示す。地震マグニチュードの補正の有無によらず、液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたときの近似度が最も高かった。

図4.25に対応する結果を図4.36に示すが、きれいな砂の場合とは逆に P_{LiQ} が変化する領域が広がった。これは、液状化事例と非液状化事例の重なりあう領域は変わらないが、全体の事例数が減少したことによる。

なお、さらに細分化した場合について、FCが10%以上20%未満の計20事例、及びFCが20%以上40%未満の計12事例の地震時せん断応力比 $\bar{L}$ と動的せん断強度比 $\bar{R}$ の関係を図4.37及び図4.38に示すが、特に明確な違いは見られなかった。

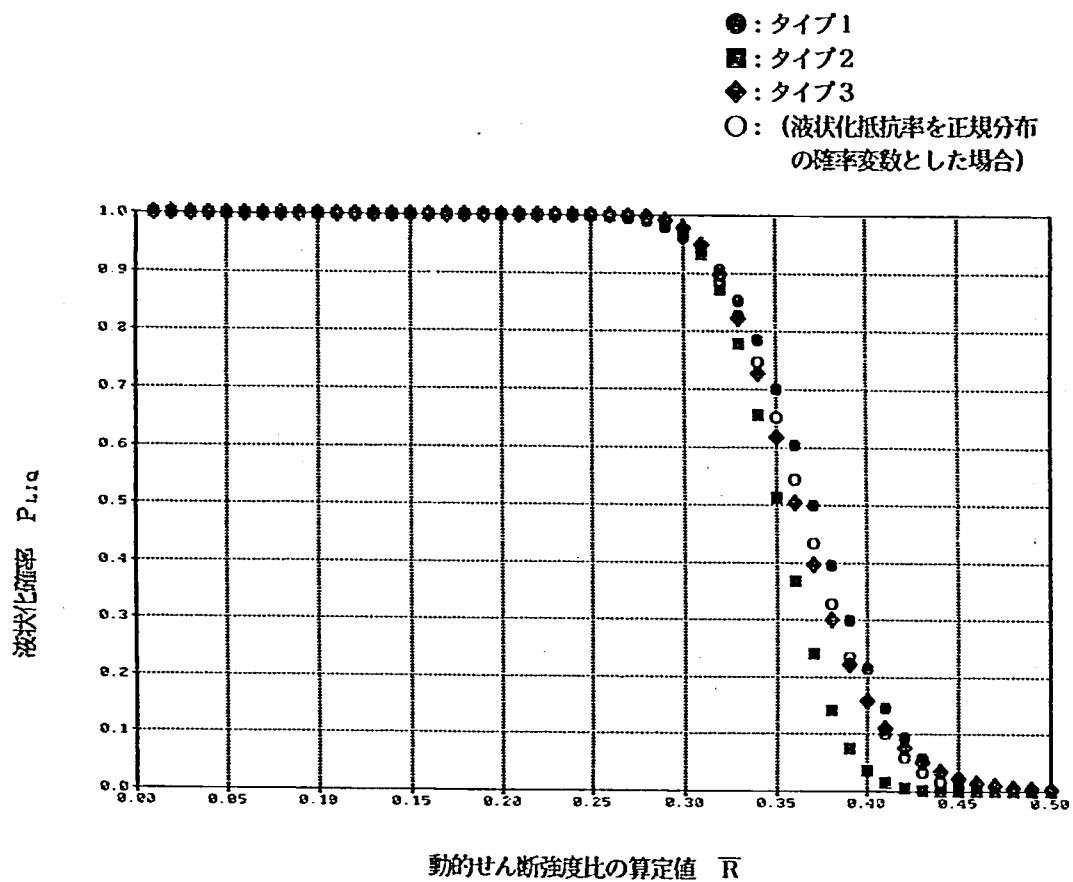


(1) 地震時せん断応力比 $\bar{L}=0.2$ の場合



(2) 地震時せん断応力比 $\bar{L}=0.3$ の場合

図4.34 動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液状化確率の関係
(細粒分含有率10%未満の場合)



(3) 地震時せん断応力比 $\bar{L}=0.4$ の場合

図4.34 動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比と液状化確率の関係
 (細粒分含有率10%未満の場合)

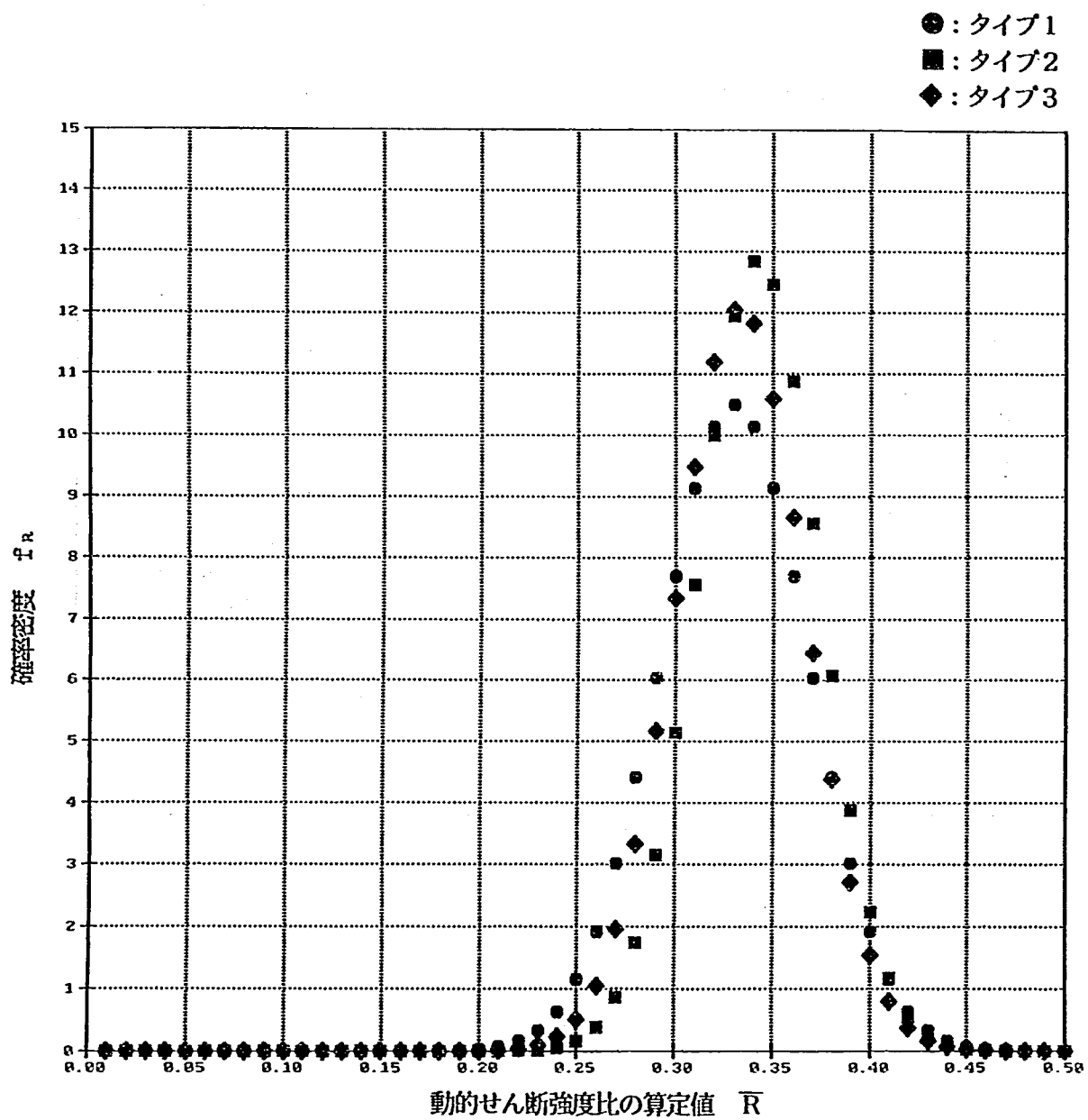


図4.35 動的せん断強度比 $\bar{R}=0.3$ の場合の真値の確率密度分布（正規分布、細粒分含有率10%未満の場合）

表4.10 シルト質砂を対象とした計算結果

ケース名	対象事例	地震マグニ チュードの 補正の有無	タイプ	係数		最大対数 近似度 L_{max}
FL-U-D	細粒分含有率10%以上 40%未満	無	(一様)	$a' = 0.20$	$b' = 0.53$	-10.44
FL-N-D			(正規)	$m' = 0.15$	$\sigma = 0.25$	-11.21
R-N1-D			正規1	$C_1 = 0.046$	$D_1 = 0.069$	-11.79
R-N2-D			正規2	$C_2 = 1.21$	$D_2 = 0.077$	-11.72
R-N3-D			正規3	$C_3 = 1.26$	$D_3 = 0.36$	-11.57
FL-U-DM		有	(一様)	$a' = 0.19$	$b' = 0.54$	-9.48
FL-N-DM			(正規)	$m' = 0.14$	$\sigma = 0.24$	-9.99
R-N1-DM			正規1	$C_1 = 0.042$	$D_1 = 0.070$	-10.66
R-N2-DM			正規2	$C_2 = 1.19$	$D_2 = 0.077$	-10.44
R-N3-DM			正規3	$C_3 = 1.24$	$D_3 = 0.35$	-10.61
R-E1-DM			極値1	$C_1 = 0.046$	$D_1 = 0.075$	-10.47
R-E2-DM			極値2	$C_2 = 1.20$	$D_2 = 0.086$	-10.32
R-E3-DM			極値3	$C_3 = 1.25$	$D_3 = 0.37$	-10.13

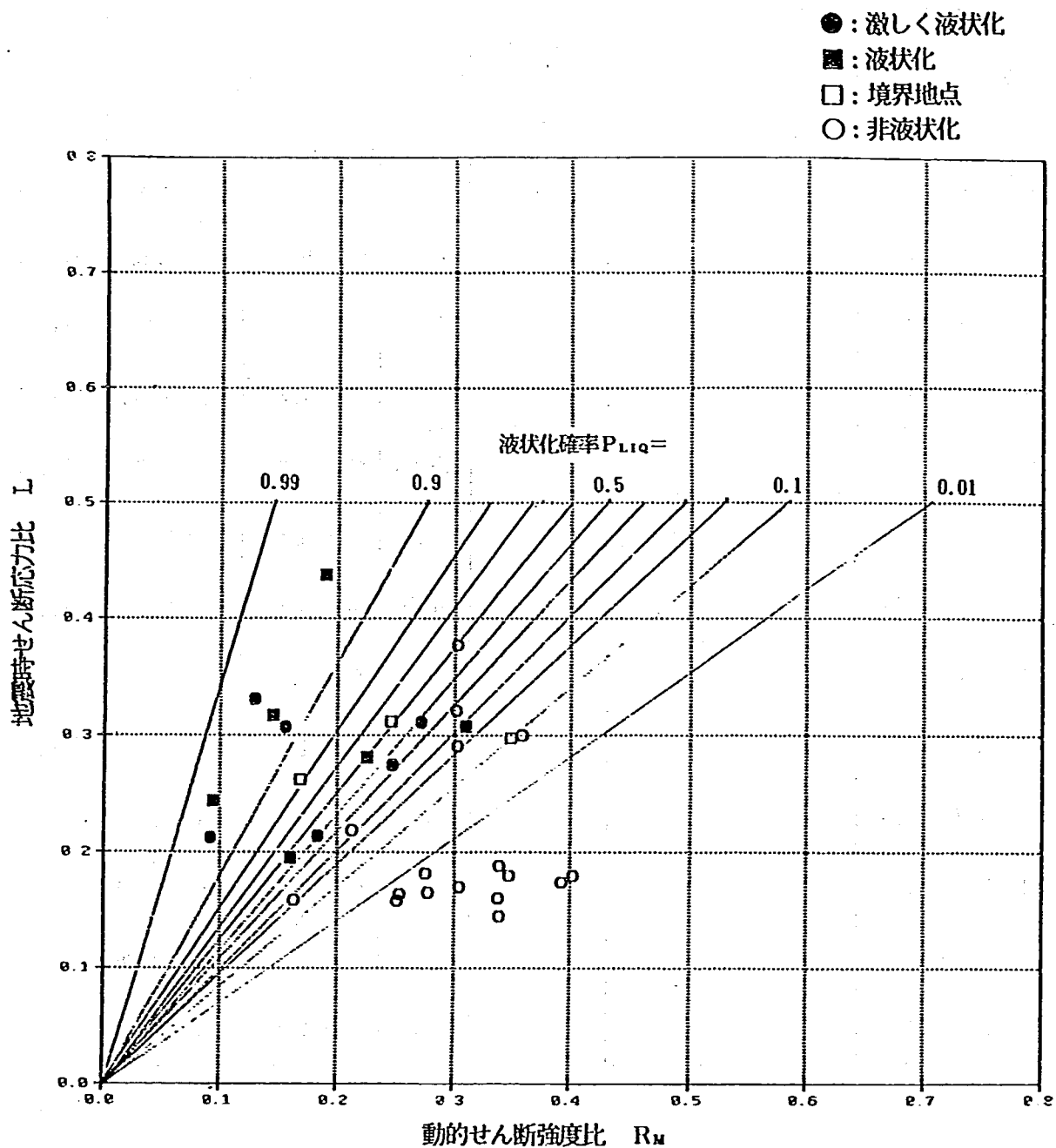


図4.36 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの動的せん断強度比及び地震時せん断応力比と液状化確率の関係（細粒分含有率10%以上40%未満の場合）

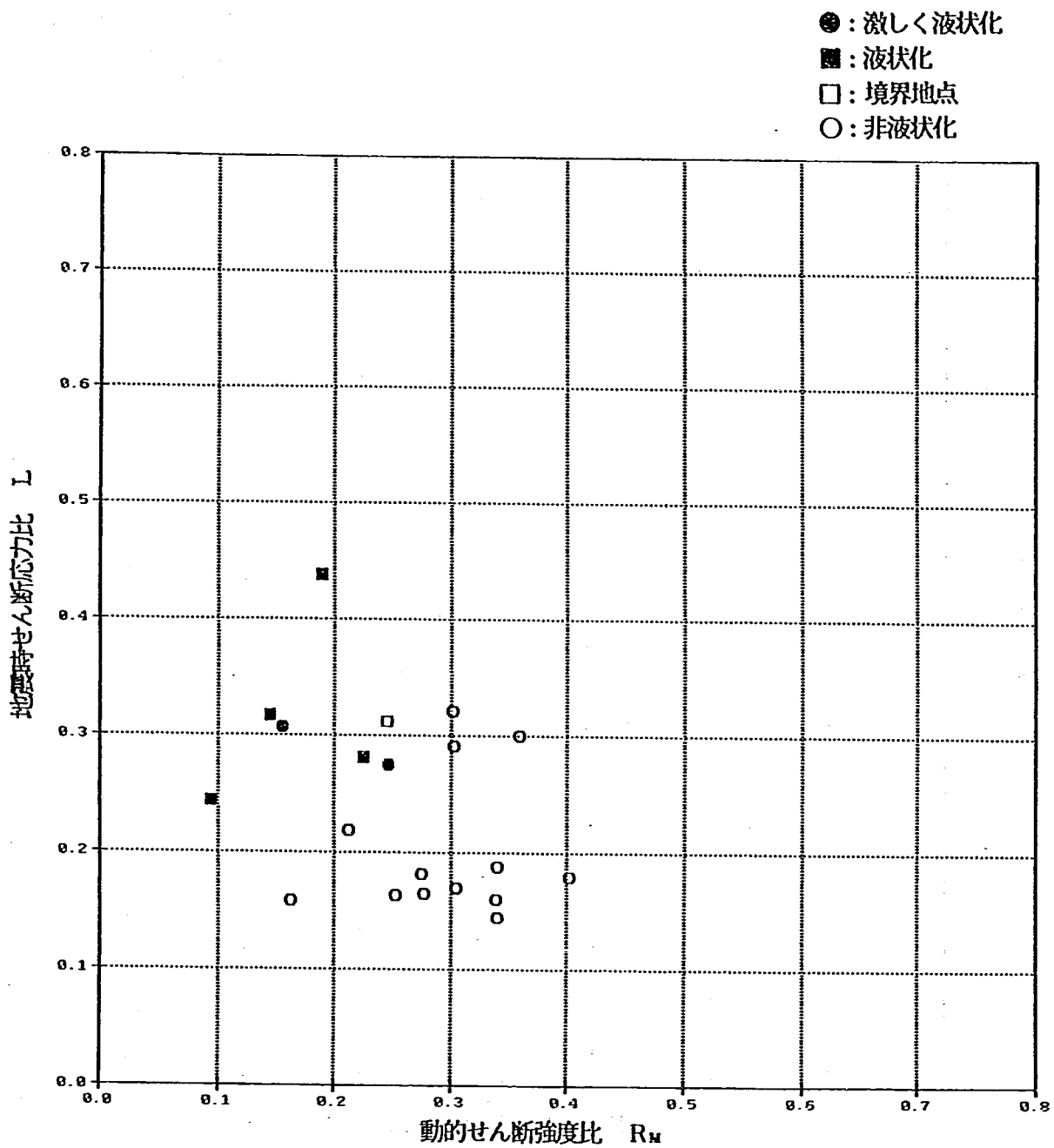


図4.37 細粒分含有率が10%以上20%未満の場合の動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

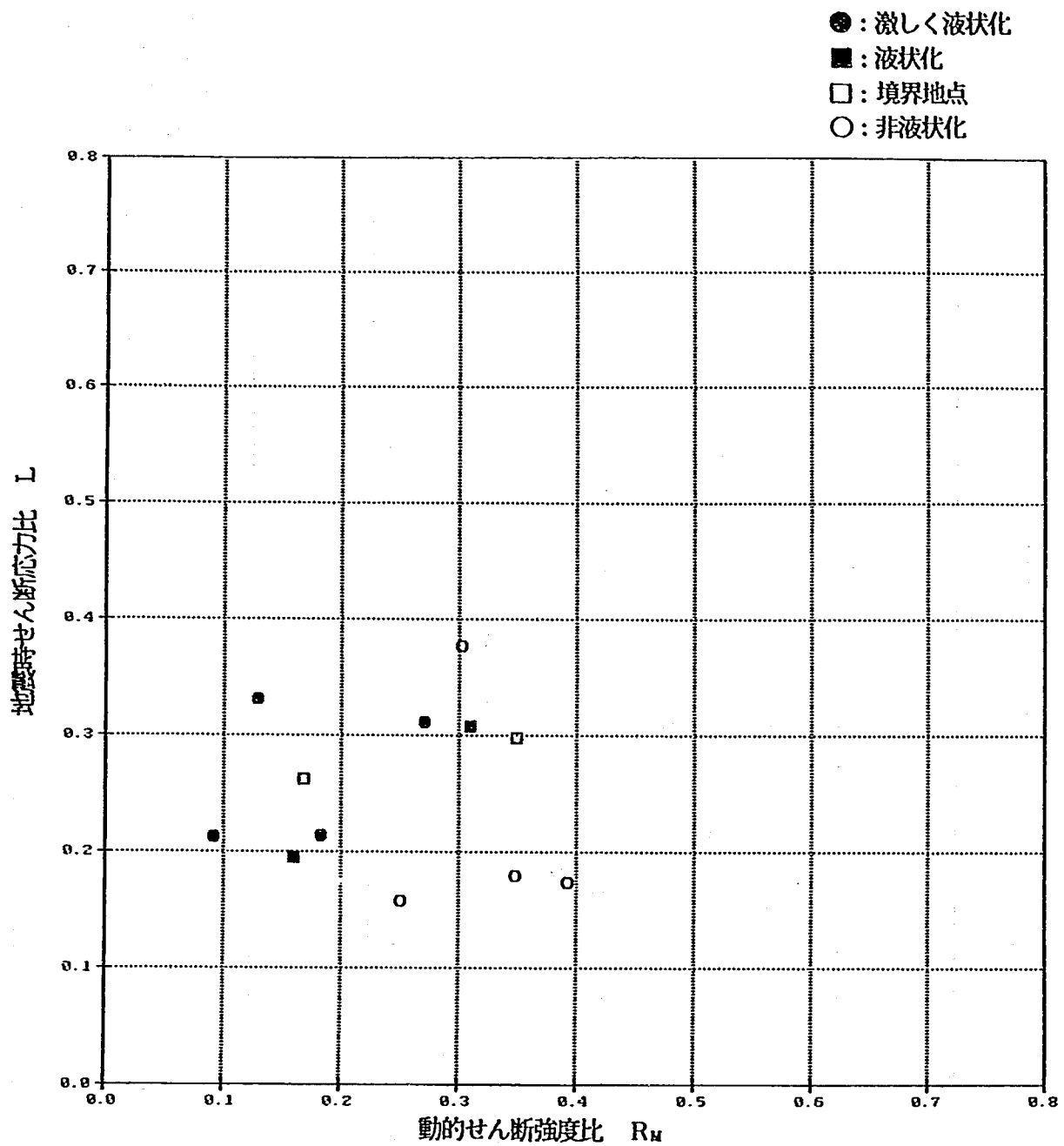


図4.38 細粒分含有率が20%以上40%未満の場合の動的せん断強度比と地震時せん断応力比の関係

(3) 液状化抵抗率と液状化確率の関係の比較

地震マグニチュードの補正を行い、液状化抵抗率を正規分布モデルの確率変数として定式化し、対象とする細粒分含有率の範囲を変化させたときの $\overline{F_L}$ と P_{LiQ} の関係の比較を図4.39に示す。 $P_{LiQ}=0.5$ となる $\overline{F_L}$ はいずれの場合も0.9程度となった。これよりも $\overline{F_L}$ が大きい場合には、シルト質砂のほうがきれいな砂よりも P_{LiQ} が高く、逆に $\overline{F_L}$ が小さい場合にはきれいな砂のほうが P_{LiQ} が高くなった。

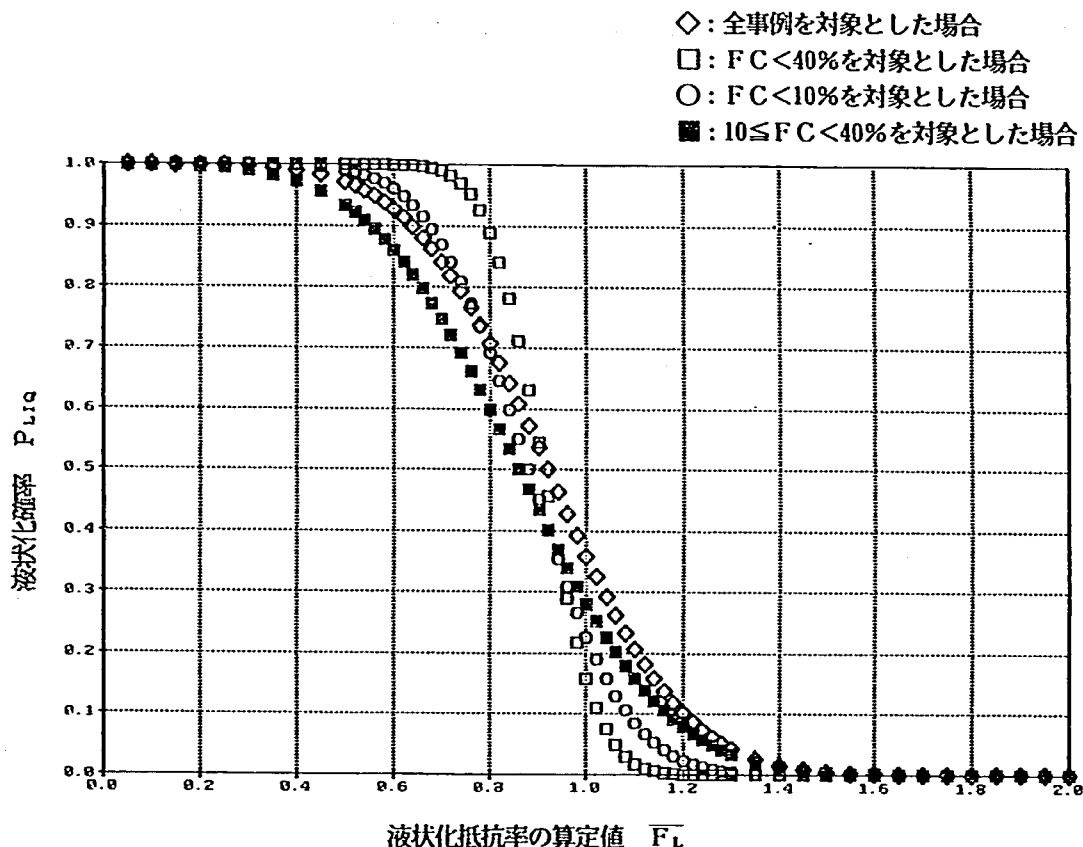


図4.39 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの液状化抵抗率と液状化確率の関係の比較
(対象とする細粒分含有率の範囲を変えた場合)

このように異なる結果が得られたことから、一般には、細粒分含有率が既知であるか否かの条件に応じて、対応した検討結果を用いる必要があるが、シルト質砂の事例は少ないため、今後も事例の収集に努めるとともに、他のパラメーターを導入した分類などを行って、信頼度をより一層高める必要がある。

4.3 ま と め

本章の検討結果をとりまとめると以下ようになる。

1) 液状化確率の近似度が最も高くなる分布モデルと定式化の方法は、地震マグニチュードの補正の有無及び対象とする細粒分含有率の範囲によって異なった。また、どの場合においても、液状化抵抗率を正規分布の確率変数とする方法が比較的良好な近似度を示した。ただし、この方法では、対象とする地震動の範囲によっ

ては、動的せん断強度比のばらつきを過大あるいは過小評価する可能性があることに留意する必要がある。

2) 地震マグニチュードの補正を行った場合と行わない場合の結果を比較すると、前者のほうが常に近似度が高かった。極値分布を用いた結果は、正規分布を用いた場合とあまり変わらなかった。また、動的せん断強度比と地震時せん断応力比を確率変数とした検討結果は、動的せん断強度比のみを確率変数とした場合とあまり変わらなかった。

3) 細粒分含有率10%を境界値としてきれいな砂とシルト質砂とに分けることにより、異なる検討結果が得られた。しかし、シルト質砂の事例は少ないため、今後も事例の収集・検討を行って、信頼度をより一層高める必要がある。

5. 過剰間隙水圧と半地下構造物の浮上がり安全率の確率的評価

共同溝・掘削道路のような地下・半地下構造物の設計では、地震時の浮上がりに対する安定性が、構造物に作用する鉛直方向の力の釣合より定義した浮上がり安全率を用いて判定される。そのためには、周辺地盤で生じる過剰間隙水圧の大きさを予測する必要がある、簡易的にこれを液状化抵抗率 F_L の関数として求める方法が用いられている³¹⁾。そこで、この方法に前章の結果を適用し、地震時の過剰間隙水圧の発生量と半地下構造物の地震時浮上がり安全率を確率的に評価することにより、既往設計手法の妥当性について検討した。

5.1 検討方法

5.1.1 過剰間隙水圧の発生量

(1) 液状化抵抗率との関係

地震時に地盤内で生じる過剰間隙水圧の大きさを簡易的に予測するために、次式により定義した過剰間隙水圧比 R_u を液状化抵抗率 F_L の関数として表した。

$$R_u = \frac{\Delta u}{\sigma_v'} \quad \dots (5.1)$$

ここに、 Δu ：過剰間隙水圧、 σ_v' ：有効上載圧

共同溝設計指針³¹⁾では、次式で $p=7$ とした関係式が用いられている。一方、水平飽和砂地盤の動的遠心模型実験より得られた R_u と F_L の関係³⁴⁾を図5.1に示すが、この場合には、地表面近くでは p は2に近く、深い部分では $p=7$ に近い関係となった。

$$\left. \begin{array}{l} R_u = F_L^{-p} \quad (F_L \geq 1) \\ R_u = 1 \quad (F_L < 1) \end{array} \right\} \dots (5.2)$$

常田ら³⁵⁾は、振動台実験結果をもとに図5.2のような関係を得た。また、安田ら³⁶⁾は、48個の不攪乱試料の液状化試験結果を分析して得られた関係を次式で表し、試料の動的せん断強度比 R と粒度に応じた関数として係数 p 及び q を求めた(図5.3参照)。ただし、これらの検討及び図5.1では、 F_L の算定方法がそれぞれ異なっていることに留意する必要がある。

$$R_u = q \cdot F_L^{-p} \quad \dots (5.3)$$

図5.1及び図5.2から明らかなように、地盤が一様な場合でも R_u と F_L の関係はかなりばらついており、実際の非一様な地盤では、ばらつきがさらに大きくなることが予想される。本来は、これらの不確定性を確率的に取り扱うべきであるが、十分なデータがまだ得られていないため、ここでは、「真の液状化抵抗率」(4.1.4(1)参照)に関して式(5.2)が成立するものと仮定して、 p を一定値に固定した計算を行った。

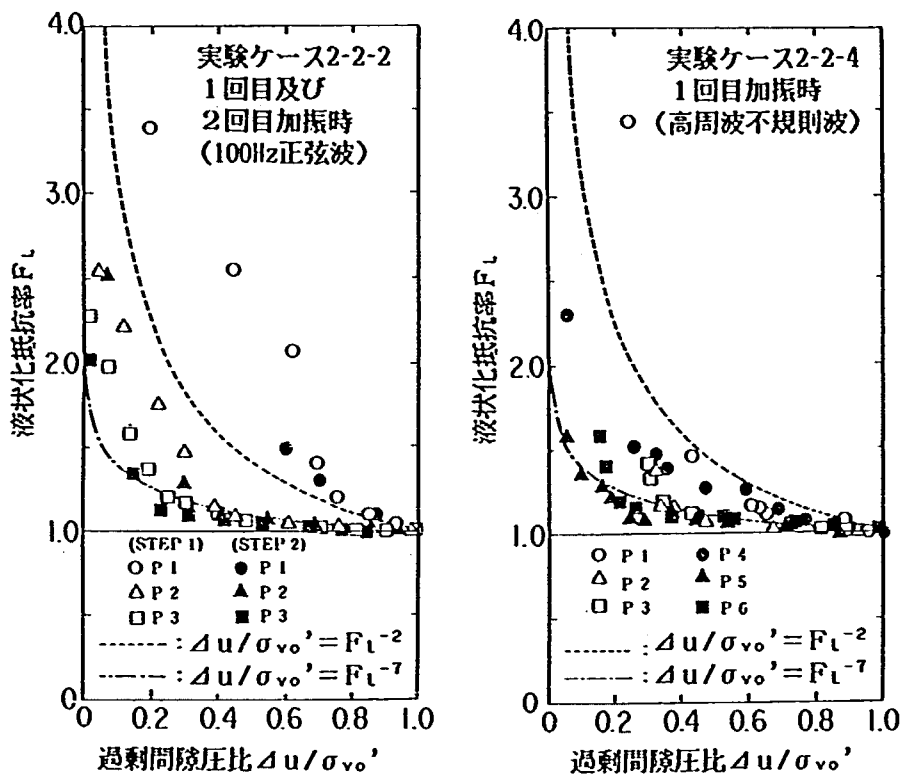


図5.1 動的遠心模型実験によって得られた過剰間隙水圧比と液状化抵抗率の関係³⁴⁾

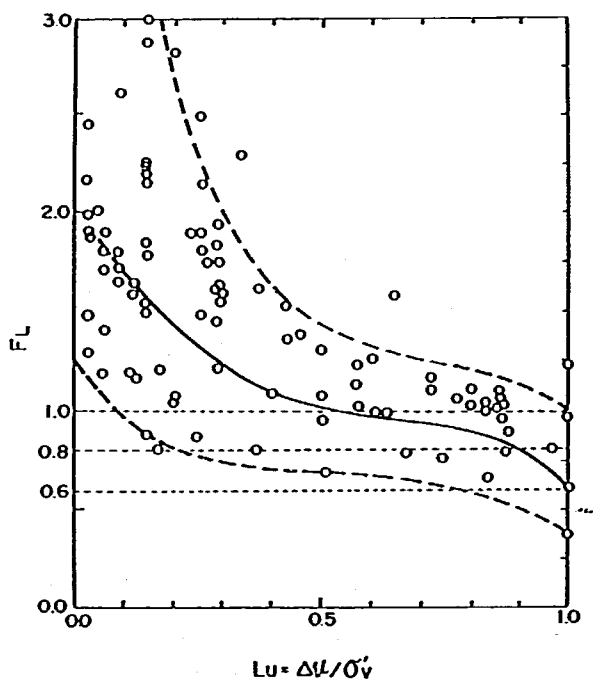


図5.2 振動台実験によって得られた過剰間隙水圧比と液状化抵抗率の関係³⁵⁾

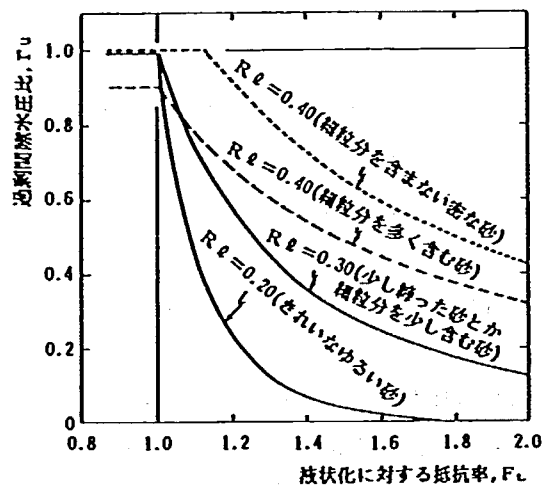


図5.3 不攪乱試料の液状化試験によって得られた過剰間隙水圧比と液状化抵抗率の関係³⁶⁾

(2) 確率的定式化

式(5.2)による R_u は、 F_L が増加すると単調に減少する。ゆえに、真の液状化抵抗率の確率分布が液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ の関数として表されている場合、 R_u がある値 X ($0 < X < 1$) よりも小さくなる確率（以下では、「累積確率密度関数」と称する。） $P[R_u < X]$ は次式により求めることができる。

$$P[R_u < X] = P[F_L > Y_X] = 1 - \int_0^{Y_X} f_{FL}(\overline{F_L}) \cdot dF_L = \int_{Y_X}^{\infty} f_{FL}(\overline{F_L}) \cdot dF_L \quad \dots (5.4)$$

$$Y_X = X^{-1/p} \quad \dots (5.5)$$

ここに、 $Y_X : R_u = X$ としたときに式(5.2)から逆算される液状化抵抗率 ($Y_X > 1$)

通常的设计では、 $\overline{F_L}$ を式(5.2)に代入して得られる値が過剰間隙水圧比の設計値 R_{ud} として用いられる。

$$\left. \begin{aligned} R_{ud} &= \overline{F_L}^{-p_d} \quad (\overline{F_L} \geq 1) \\ R_{ud} &= 1 \quad (\overline{F_L} < 1) \end{aligned} \right\} \quad \dots (5.6)$$

ここに、 p_d : 式(5.2)中の係数 p として設計で用いた値

p_d が実際の値 p_r とは異なっている場合も考慮して、 R_u が R_{ud} よりも小さくなる確率（以下では、「非超過確率」と称する。） $P[R_u < R_{ud}]$ を求めると、 $R_{ud} < 1$ の範囲では次のようになる。なお、以下の計算では、 p_d を 7（文献31）で用いられている値）に固定し、 p_r を 7、4、2 の3通りに変化させた。

$$P[R_u < R_{ud}] = P[F_L > F_{L1}] = 1 - \int_0^{F_{L1}} f_{FL}(\overline{F_L}) \cdot dF_L \quad \dots (5.7)$$

$$F_{L1} = (\overline{F_L}^{-p_d})^{-1/p_r} = (\overline{F_L})^{p_d/p_r} \quad \dots (5.8)$$

ここに、 $F_{L1} : X = R_{ud}$ 、 $p = p_r$ としたときに式(5.5)及び式(5.6)から求められる液状化抵抗率

さらに、上記の場合の実際の過剰間隙水圧比の期待値 $E[R_u]$ は次式となる。

$$E[R_u] = \int_0^{\infty} f_{FL}(\overline{F_L}) \cdot R_u \cdot dF_L = \int_0^1 f_{FL}(\overline{F_L}) \cdot dF_L + \int_1^{\infty} f_{FL}(\overline{F_L}) \cdot \overline{F_L}^{-p_r} \cdot dF_L \quad \dots (5.9)$$

(3) 計算ケース

計算ケースの一覧を表5.1に示す。地震マグニチュードの補正を行い、液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの前章の結果を用いて、対象とする細粒分含有率の範囲を3通りに変えて計算を行った。また、細粒分含有率40%未満を対象とした場合には、比較のために、液状化抵抗率を一樣分布の確率変数としたときの計算も行った。

なお、地震マグニチュードの補正を行わない場合の計算も行ったが、結果はほとんど変わらなかった。

表5.1 過剰間隙水圧の発生量に関する計算ケース

ケース名	仮定した確率変数及び分布形状	対象事例		
		BM	CM	DM
FL-U	液状化抵抗率（一様分布）	○	—	—
FL-N	液状化抵抗率（正規分布）	○	○	○

凡例

○：計算を実施 BM：細粒分含有率40%未満
 —：未計算 CM：細粒分含有率10%未満
 DM：細粒分含有率10%以上40%未満

いずれも地震マグニチュードの補正を行った場合を対象

5.1.2 半地下構造物の浮上がり安全率

(1) 浮上がり安全率の算定方法

文献31)では、共同溝の地震時の浮上がり安全率 F_u を次式により定義し、これが1.1未満である場合には液状化の詳細判定を行うものとしている（図5.4参照）。また、掘割道路のような半地下構造物に対しても同様に定義した浮上がり安全率が用いられており、最も危険な状態において1.0以上の浮上がり安全率を確保することとされている³⁰⁾（図5.5参照）。

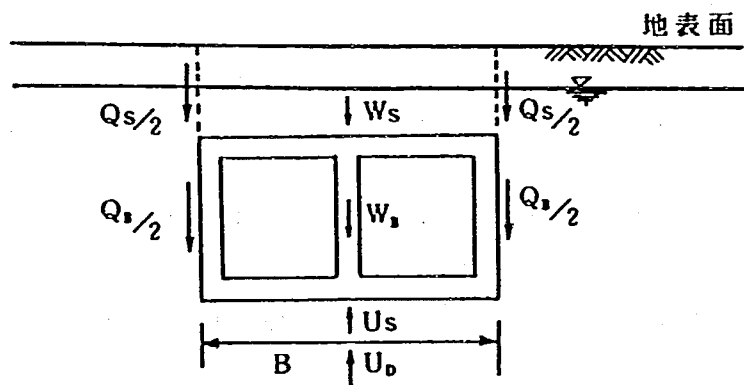


図5.4 液状化における共同溝に作用する力³¹⁾

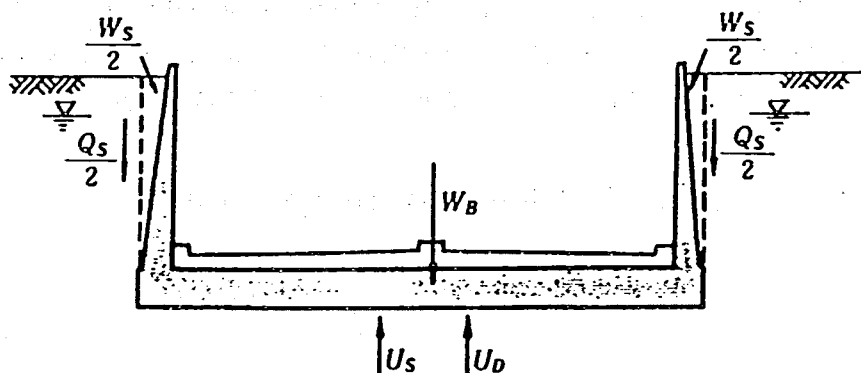


図5.5 掘割道路に作用する力³⁶⁾

$$F_u = \frac{W_s + W_b + Q_s + Q_b}{U_s + U_d} \quad \dots (5.10)$$

ここに、 W_s ：上載土の荷重、 W_b ：共同溝の自重、 Q_s ：上載土のせん断抵抗、 Q_b ：共同溝側面の摩擦抵抗、 U_s ：共同溝底面に作用する静水圧による揚圧力、 U_d ：共同溝底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力

ここでは、常時の浮上がり安全率 F_{u0} と式(5.13)による静水圧比 R_s を用いて、上式を R_u の関数として式(5.12)のように変形した。なお、この変形は常時と地震時の $Q_s + Q_b$ が変わらない場合に成立するが、実際には液状化の影響により地震時のほうが $Q_s + Q_b$ が小さくなることが予想されるため、式(5.11)による F_{u0} は地震時の $Q_s + Q_b$ を用いて計算した便宜的な値として考える必要がある。

$$F_{u0} = \frac{W_s + W_b + Q_s + Q_b}{U_s} \quad \dots (5.11)$$

$$\therefore F_u = F_{u0} \cdot \frac{U_s}{U_s + U_d} = \frac{F_{u0}}{1 + (U_d/U_s)} = \frac{F_{u0}}{1 + (\Delta u/u_s)} = \frac{F_{u0}}{1 + (R_u/R_s)} \quad \dots (5.12)$$

$$\text{ただし、} R_s = \frac{u_s}{\sigma_v'} \quad \dots (5.13)$$

(2) 確率的定式化

式(5.12)による F_u は、 R_u が増加すると単調に減少する。ゆえに、係数 p の実際の値を p_r としたときに、鉛直方向の力の釣合が崩れる限界値である1.0よりも F_u が小さくなって浮上がりが生じる確率（以下では、「浮上がり確率」と称する。） $P[F_u < 1.0]$ は、式(5.4)及び式(5.5)より次式となる。

$$P[F_u < 1.0] = P[R_u > R_{u1}] = 1 - P[R_u < R_{u1}] = \int_0^{Y_{x1}} f_{FL}(\overline{F_L}) \cdot dF_L \quad \dots (5.14)$$

$$Y_{x1} = R_{u1}^{-(1/p_r)} \quad \dots (5.15)$$

$$R_{u1} = R_s \cdot (F_{u0} - 1.0) \quad \dots (5.16)$$

ここに、 R_{u1} ：式(5.12)において $F_u = 1.0$ となる過剰間隙水圧比

一方、通常の設計では、 $\overline{F_L}$ を式(5.6)に代入し、式(5.12)を適用して得られる値が浮上がり安全率の設計値 F_{ud} として用いられる。

$$F_{ud} = \frac{F_{u0}}{1 + (R_{ud}/R_s)} \quad \dots (5.17)$$

ここに、 R_{ud} ：係数 p の設計値を p_d としたときに、式(5.6)により得られる過剰間隙水圧比の設計値

これらの式を用いることにより、 p_d が実際の値 p_r とは異なっている場合も考慮して、 F_{ud} と浮上がり確率の関係を求めた。過剰間隙水圧の発生量の計算と同様に、 p_d を7に固定し、実際の値 p_r を7、4、2の3通りに変化させた。

(3) 計算ケース

計算ケースは、5.1.1(3)と同様である。細粒分含有率40%未満を対象とし、液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした場合には、常時の浮上がり安全率 F_{u0} を1.2, 1.5, 1.8の3通り、静水圧比 R_s を1/3及び2/3の2通りに変化させて、これらの要因の影響を調べた。また、そのほかの場合には、 F_{u0} を1.5、 R_s を2/3に固定して計算を行った。

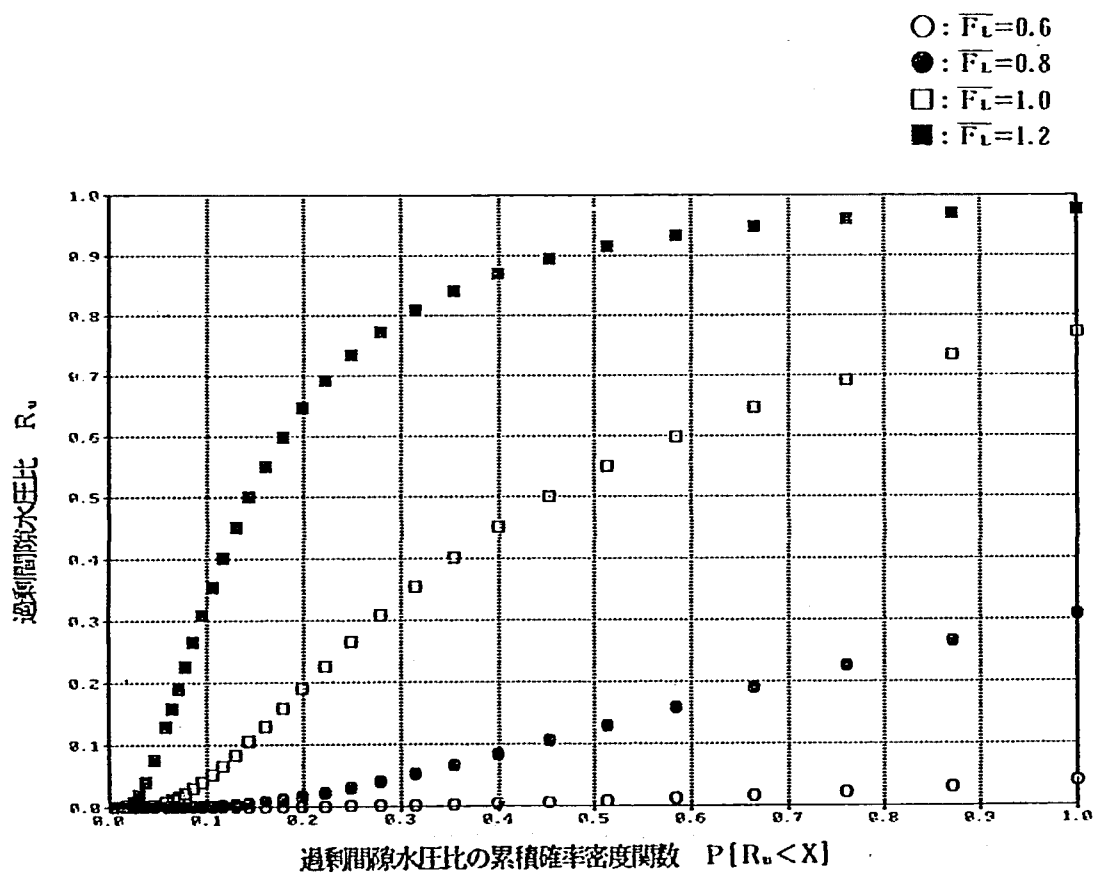
なお、例えば側壁高さ10mの掘削道路を考えた場合には、 $R_s=1/3$ となるのは地下水位が地表面から5m程度の深さにあるとき、 $R_s=2/3$ となるのは地下水位が2m程度の深さにあるときに相当する。

5.2 検討結果及び考察

5.2.1 過剰間隙水圧の発生量

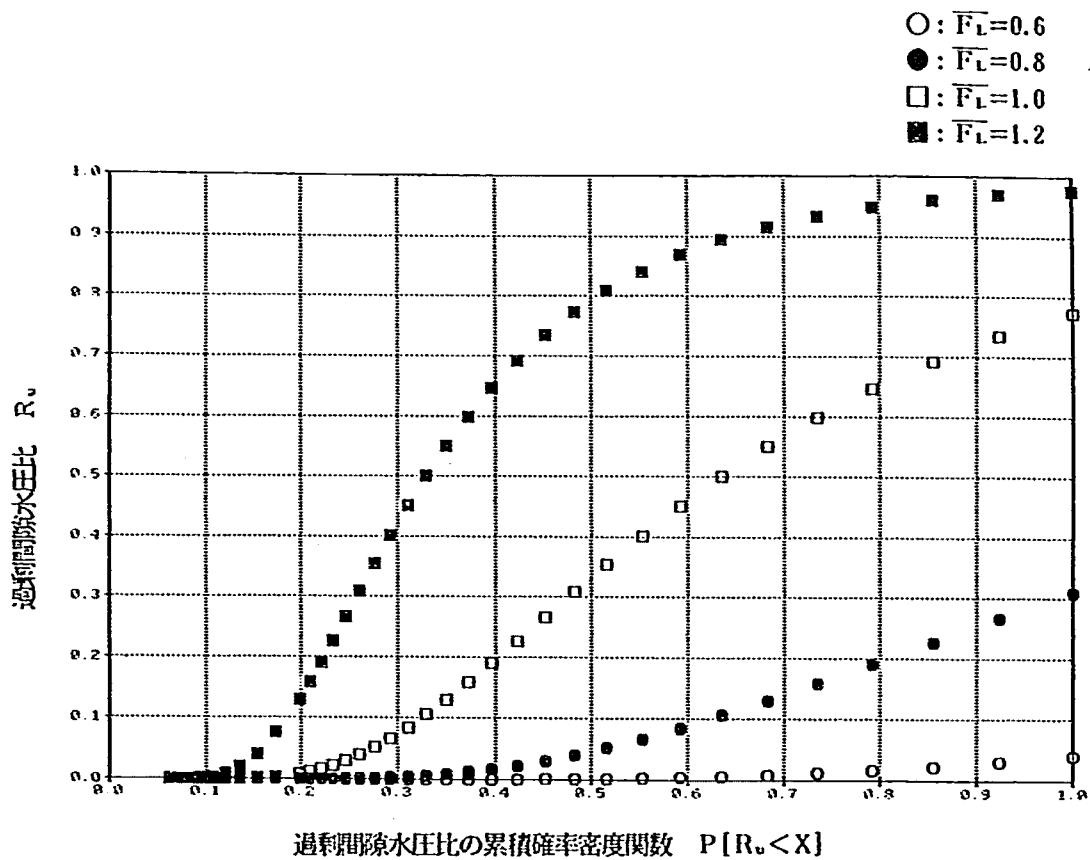
(1) 過剰間隙水圧比の累積確率密度関数

液状化抵抗率 F_L を正規分布の確率変数としたときの、式(5.4)による過剰間隙水圧比の累積確率密度関数 $P[R_u < X]$ の例を図5.6に示す。細粒分含有率 F_C が40%未満の事例について得られた結果を用いており、液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ を0.6, 0.8, 1.0, 1.2の4通りに、また、式(5.2)中の係数 p を7、4、2の3通りに変化させた。

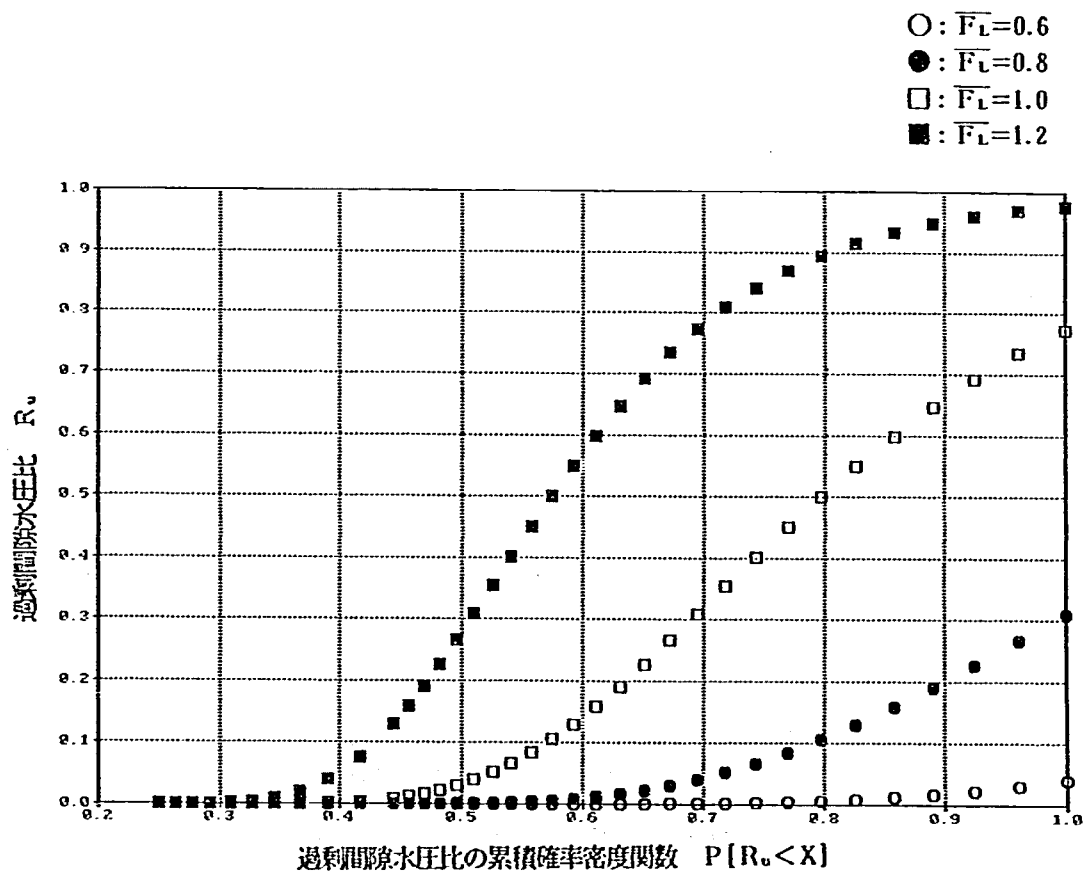


(1) $p = 7$ の場合

図5.6 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの過剰間隙水圧比の累積確率密度関数



(2) $p = 4$ の場合



(3) $p = 2$ の場合

図5.6 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの過剰間隙水圧比の累積確率密度関数

$P[R_u < X]$ は、 $\overline{F_L}$ が小さいときには上に凸、 $\overline{F_L}$ が大きいときには下に凸の関数となった。これらは、それぞれ正規分布のピーク値付近と、ピーク値からかなり離れた領域での、累積確率密度関数の挙動に対応している。

また、 p を小さくすると、各ラインが全体的に図の右側のほうへ移動した。これは、 p を小さくすると過剰間隙水圧が生じやすくなることを意味しており、式(5.2)で p が小さいほうが同じ $\overline{F_L}$ に対する R_u が大きくなることによる。

(2) 過剰間隙水圧比の非超過確率

細粒分含有率が40%未満の場合を対象に液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの、式(5.7)による過剰間隙水圧比の非超過確率 $P[R_u < R_{ud}]$ と液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ の関係を図5.7に示す。 $p_r = 7$ の場合には $P[R_u < R_{ud}] = 0.78$ で一定値であったのに対し、 $p_r = 4$ または2の場合には $\overline{F_L}$ が大きくなると $P[R_u < R_{ud}]$ は急激に減少して最終的にはほとんどゼロとなった。 $p_r = 7$ の場合には、液状化抵抗率の算定値が実際よりもやや安全側であるために $P[R_u < R_{ud}]$ が0.5よりも大きくなったが、 $p_r = 4$ または2の場合には、過剰間隙水圧の発生特性の違いの影響がより支配的であったために $P[R_u < R_{ud}]$ が減少したものと考えられる。

次に、式(5.7)及び式(5.6)から得られた $P[R_u < R_{ud}]$ と過剰間隙水圧比の設計値 R_{ud} の関係を、確率変数の分布形状と対象とする細粒分含有率の範囲を変えた各場合について図5.8に示す。これらの関係は、各場合ともほぼ同一となり、 $p_r = 7$ の場合には $P[R_u < R_{ud}]$ は0.7~0.85程度で一定値、 $p_r = 4$ の場合に $P[R_u < R_{ud}]$ が0.5以上になるのは R_{ud} が0.35~0.5程度以上 ($\overline{F_L}$ が1.10~1.16程度以下に相当) のとき、 $p_r = 2$ の場合に $P[R_u < R_{ud}]$ が0.5以上になるのは R_{ud} が0.7~0.8程度以上 ($\overline{F_L}$ が1.03~1.05程度以下に相当) のときとなった。

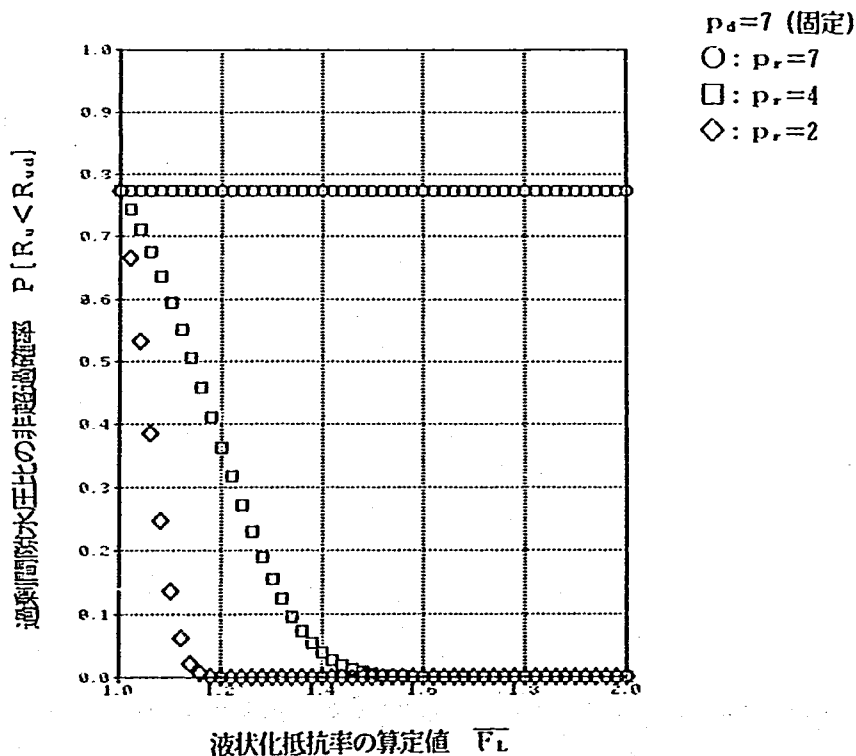
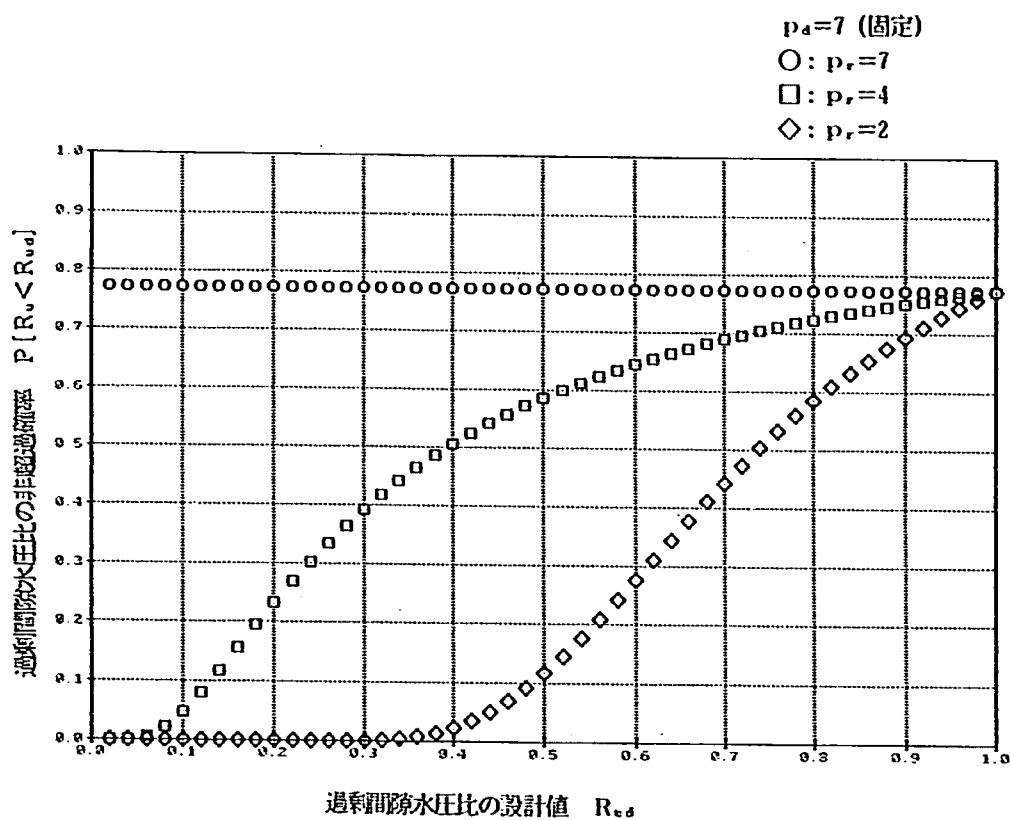
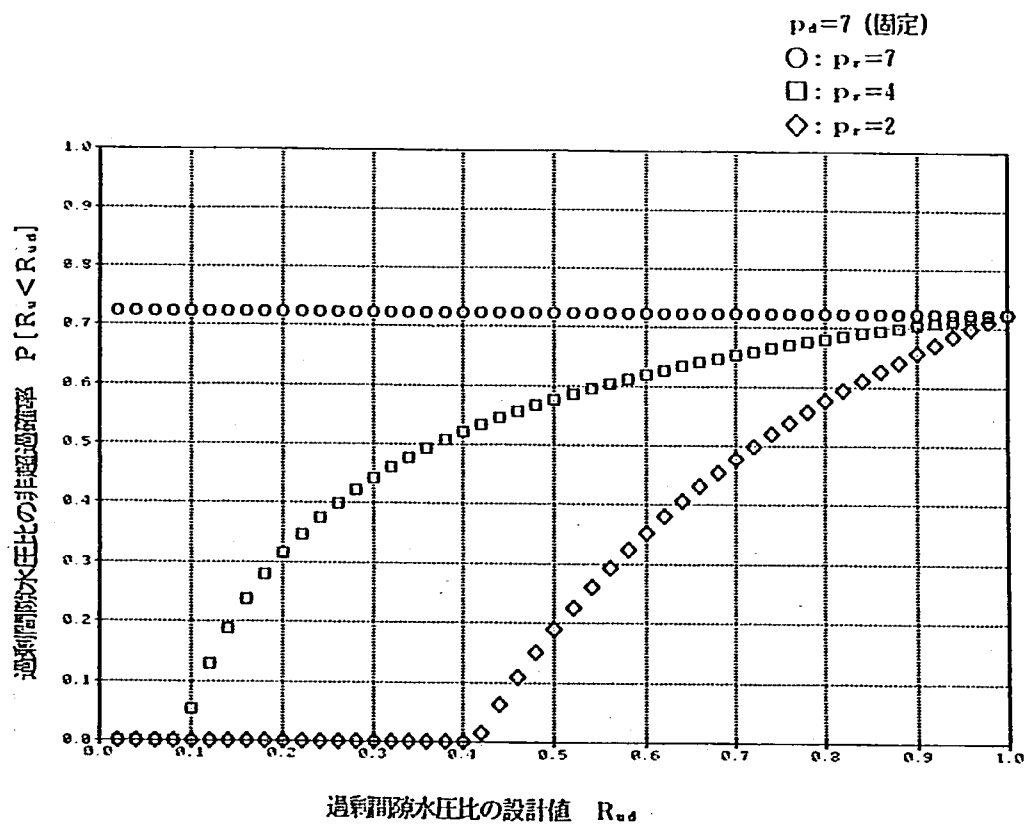


図5.7 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの液状化抵抗率の算定値と過剰間隙水圧比の非超過確率の関係

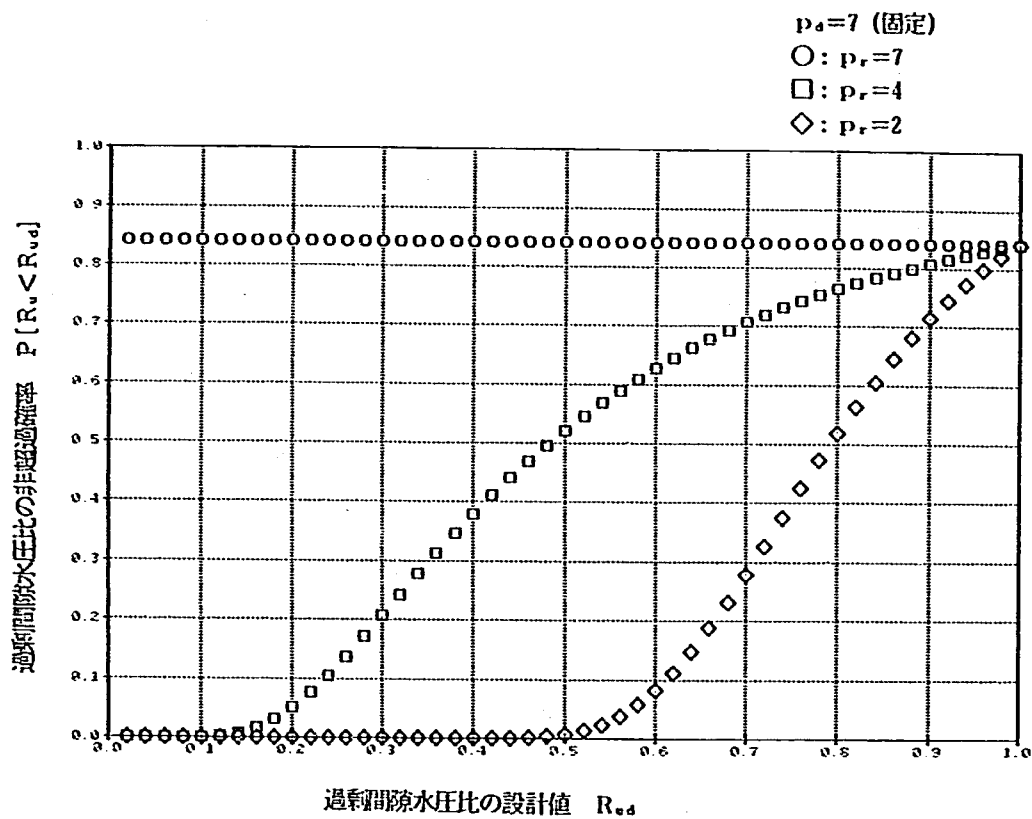


(1) 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき

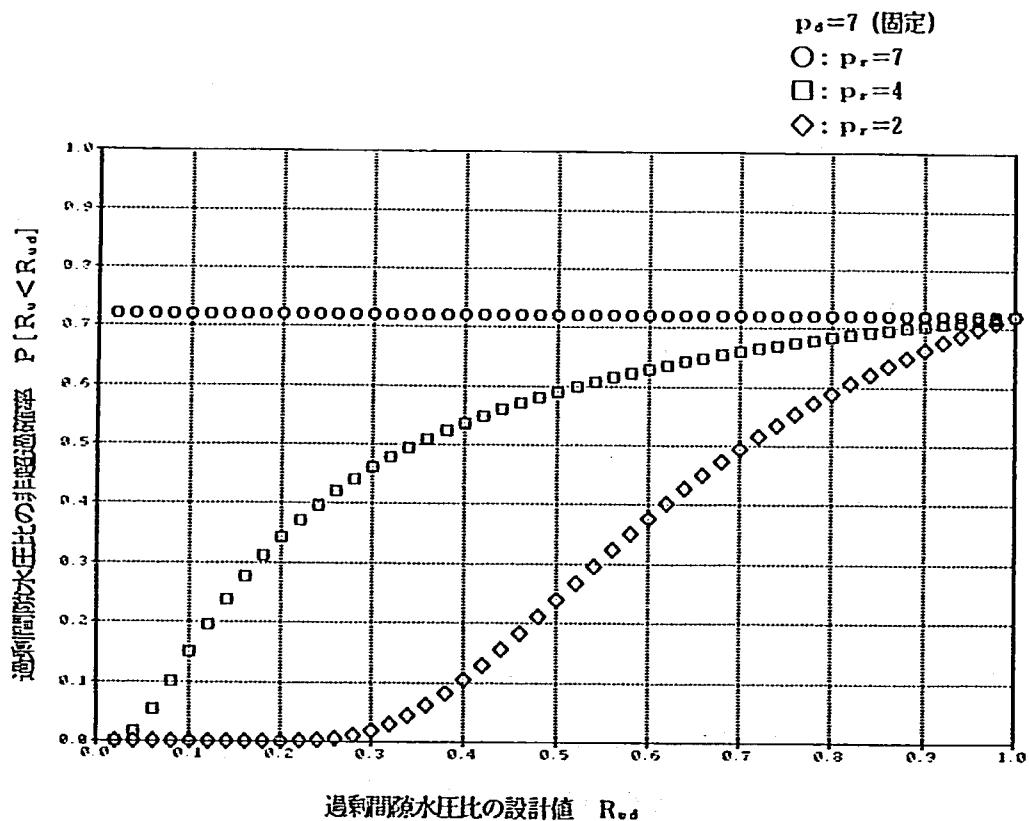


(2) 液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき

図5.8 過剰間隙水圧比の設計値と非超過確率の関係



(3) 細粒分含有率10%未満を対象としたとき (正規分布)



(4) 細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき (正規分布)

図5.8 過剰間隙水圧比の設計値と非超過確率の関係

(3) 過剰間隙水圧比の期待値

確率変数の分布形状と対象とする細粒分含有率の範囲を変えた各場合について、式(5.9)による過剰間隙水圧比の期待値 $E[R_u]$ と液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ の関係を図5.9に、式(5.6)及び式(5.9)から得られた過剰間隙水圧の設計値 R_{ud} と $E[R_u]$ の関係を図5.10に示す。これらの関係も(2)と同様に、確率変数の分布形状と対象とする細粒分含有率の範囲の影響をあまり受けなかった。また、図5.10で $E[R_u] < R_{ud}$ となる R_{ud} の範囲は、 $p_r = 7$ の場合にはすべての R_{ud} 、 $p_r = 4$ の場合には R_{ud} が0.5程度以上 ($\overline{F_L}$ が1.10程度以下に相当) のとき、 $p_r = 2$ の場合には R_{ud} が0.7~0.8程度以上 ($\overline{F_L}$ が1.03~1.05程度以下に相当) のときとなり、(2)において $P[R_u < R_{ud}]$ が0.5以上になる領域とほぼ対応した。

なお、 p_r が小さくなるほど同じ $\overline{F_L}$ または R_{ud} に対する $E[R_u]$ が大きくなったが、ここで用いた $p_r = 2 \sim 7$ の範囲で $\overline{F_L}$ と $E[R_u]$ の関係を図5.9より読み取ると、おおよそ表5.2のようになった。

5.2.2 浮上がり安全率

(1) 確率変数の分布形状と対象とする細粒分含有率の範囲の影響

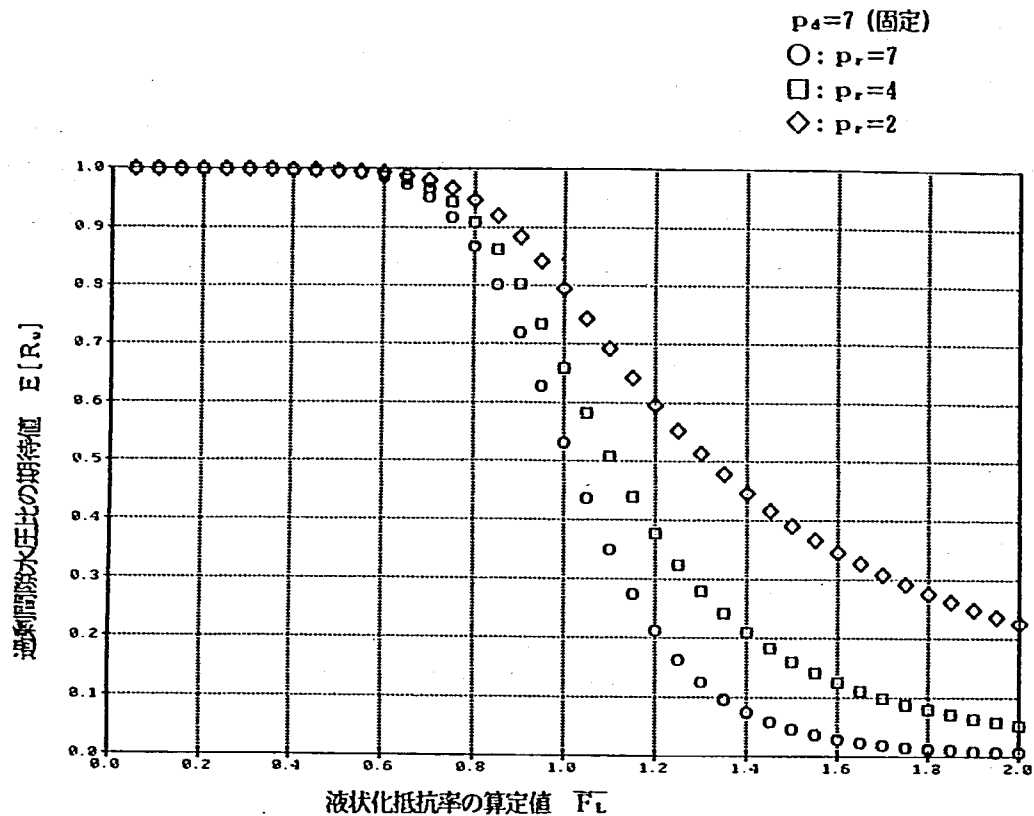
F_{u0} を1.5、 R_s を2/3に固定した場合の、浮上がり安全率の設計値 F_{ud} と浮上がり確率 $P[F_u < 1.0]$ の関係を図5.11に示す。確率変数の分布形状と対象とする細粒分含有率の範囲の影響は小さく、全体的な傾向として以下の点が挙げられる。

- 1) $p_r = 7$ の場合、 $F_{ud} = 1.1$ に対する浮上がり確率は0.05~0.2程度で、その近傍で F_{ud} が0.1変化すると浮上がり確率も約0.1変化する。
- 2) $p_r = 4$ の場合、 $F_{ud} = 1.1$ に対する浮上がり確率は0.4~0.5程度で、その近傍で F_{ud} が変化したときの浮上がり確率の変化量は $p_r = 7$ の場合よりも大きい。
- 3) $p_r = 2$ の場合、 $F_{ud} = 1.1$ に対する浮上がり確率は1.0に近く、 F_{ud} が1.3程度以上になって初めて浮上がり確率が急激に減少する。

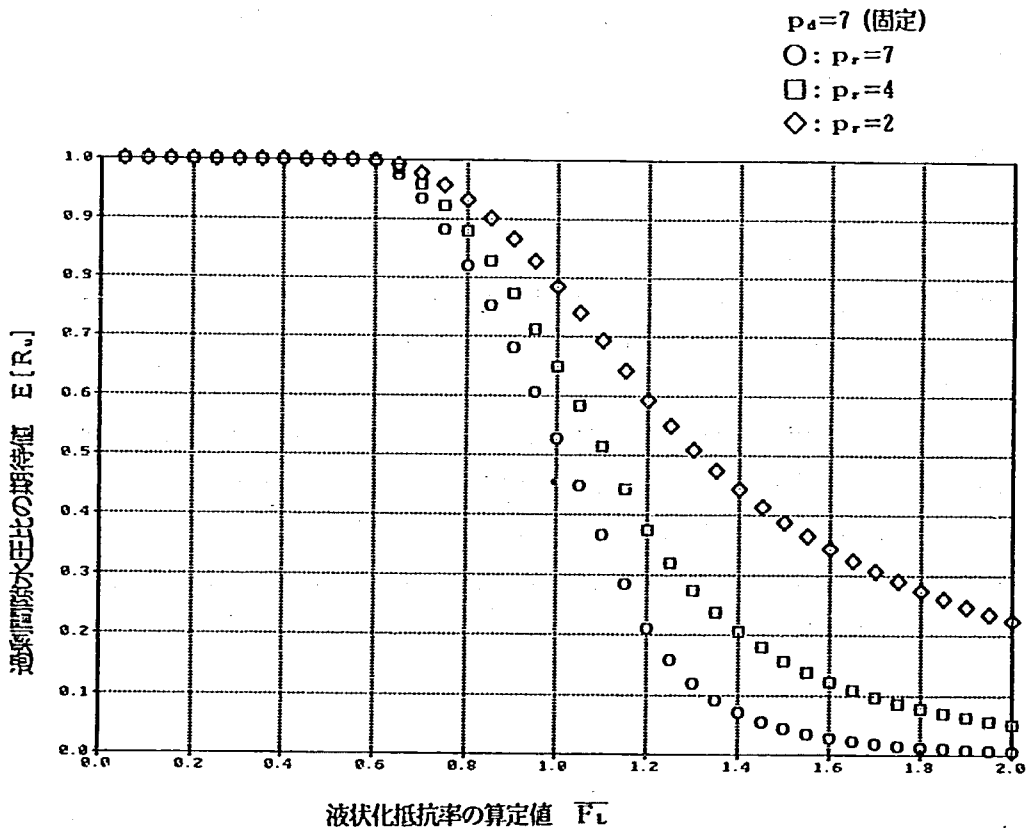
(2) 構造物と地盤の条件の影響

細粒分含有率が40%未満を対象に液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした場合に、構造物と地盤の条件を変えたときの F_{ud} と $P[F_u < 1.0]$ の関係を図5.12に示す。図5.11(1)と比較すると、これらの条件の影響として以下の点が挙げられる。

- 1) F_{u0} が変化しても、 $p_r = 7$ の場合の $F_{ud} = 1.1$ に対する浮上がり確率はあまり変わらないが、 $p_r = 4$ の場合の $F_{ud} = 1.1$ に対する浮上がり確率は0.4程度から0.9程度まで大きく変化する。また、 $p_r = 2$ の場合には、 F_{u0} が大きくなると浮上がり確率が急激に減少し始める F_{ud} も大きくなる。
- 2) R_s が小さくなると、各場合の浮上がり確率が全体的に大きくなる。 $F_{ud} = 1.1$ に対する浮上がり確率は、 $p_r = 7$ の場合でも0.5以上となる。

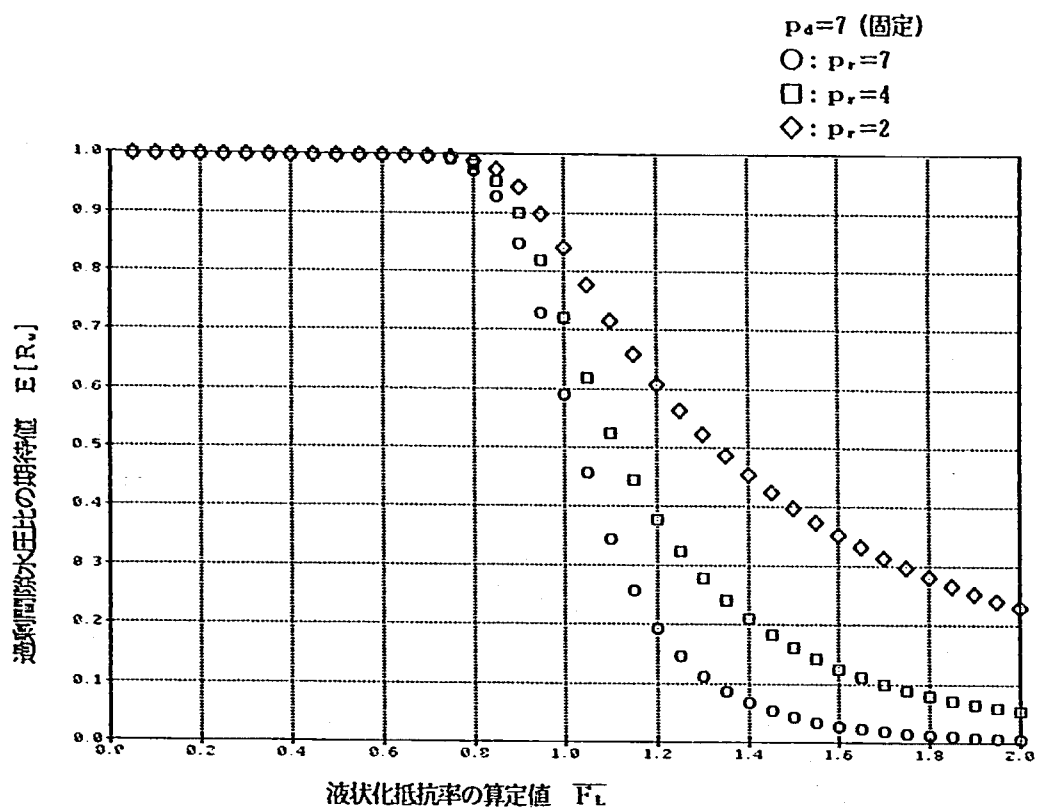


(1) 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき

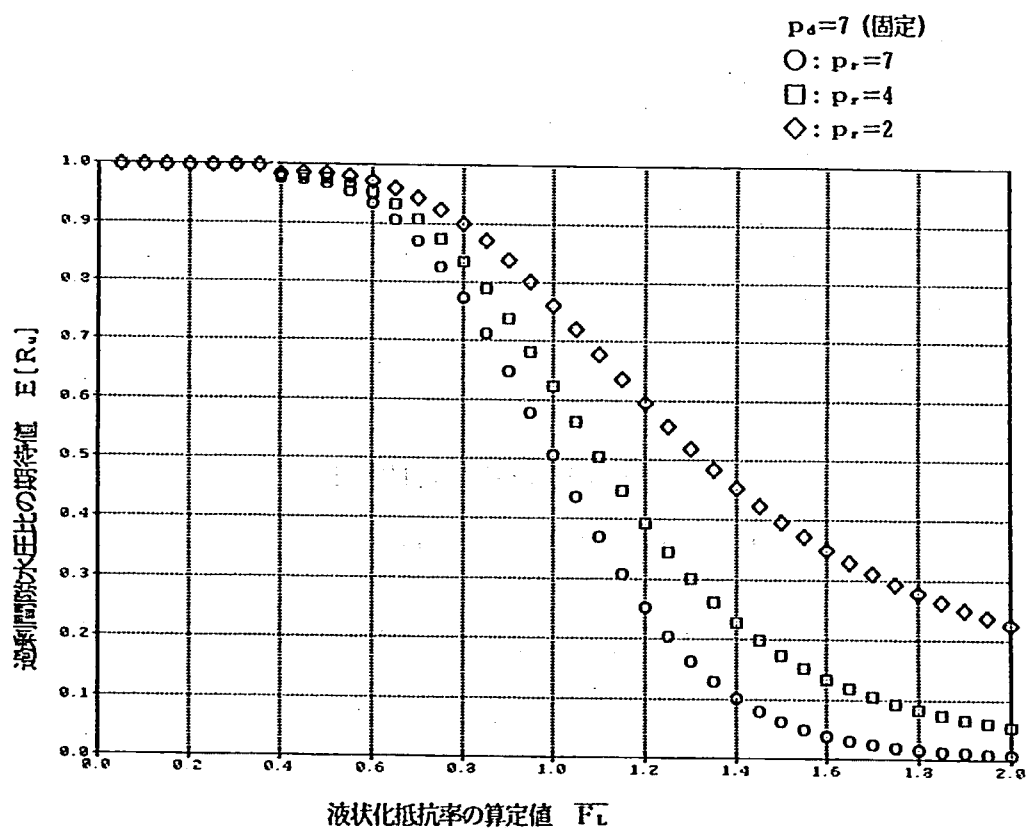


(2) 液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき

図5.9 液状化抵抗率の算定値と過剰間隙水圧比の期待値の関係

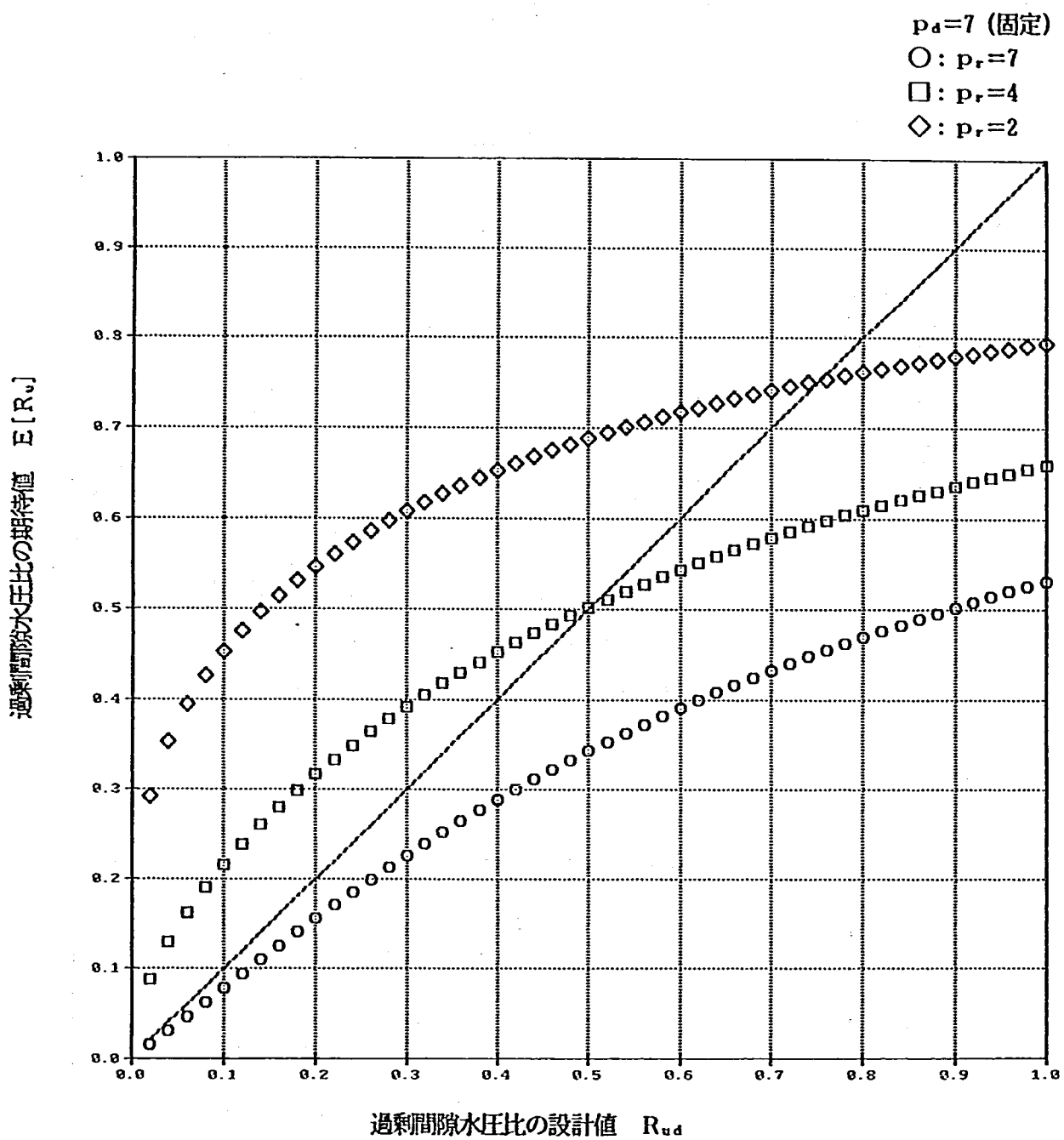


(3) 細粒分含有率10%未満を対象としたとき (正規分布)



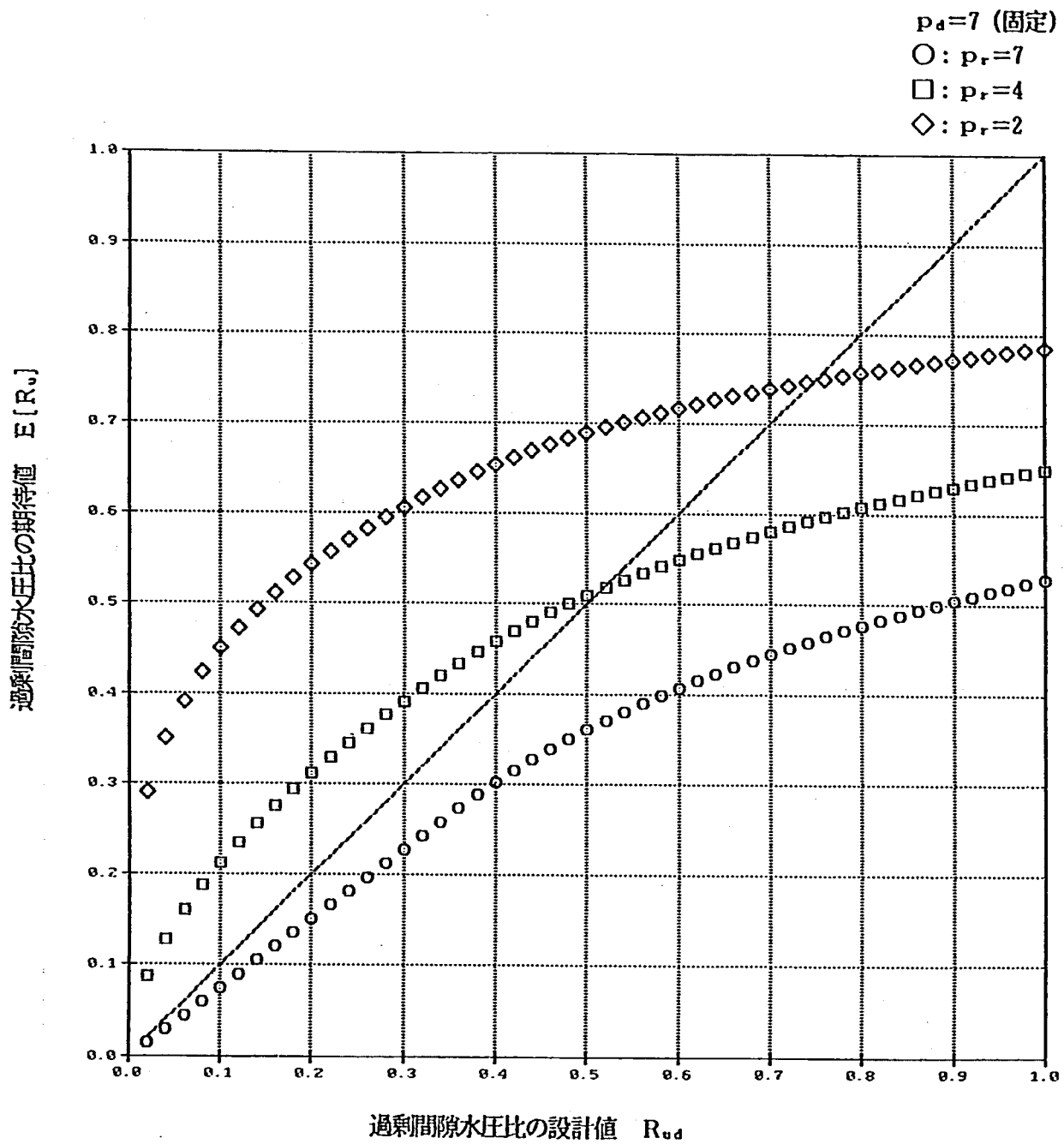
(4) 細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき (正規分布)

図5.9 液状化抵抗率の算定値と過剰間隙水圧比の期待値の関係



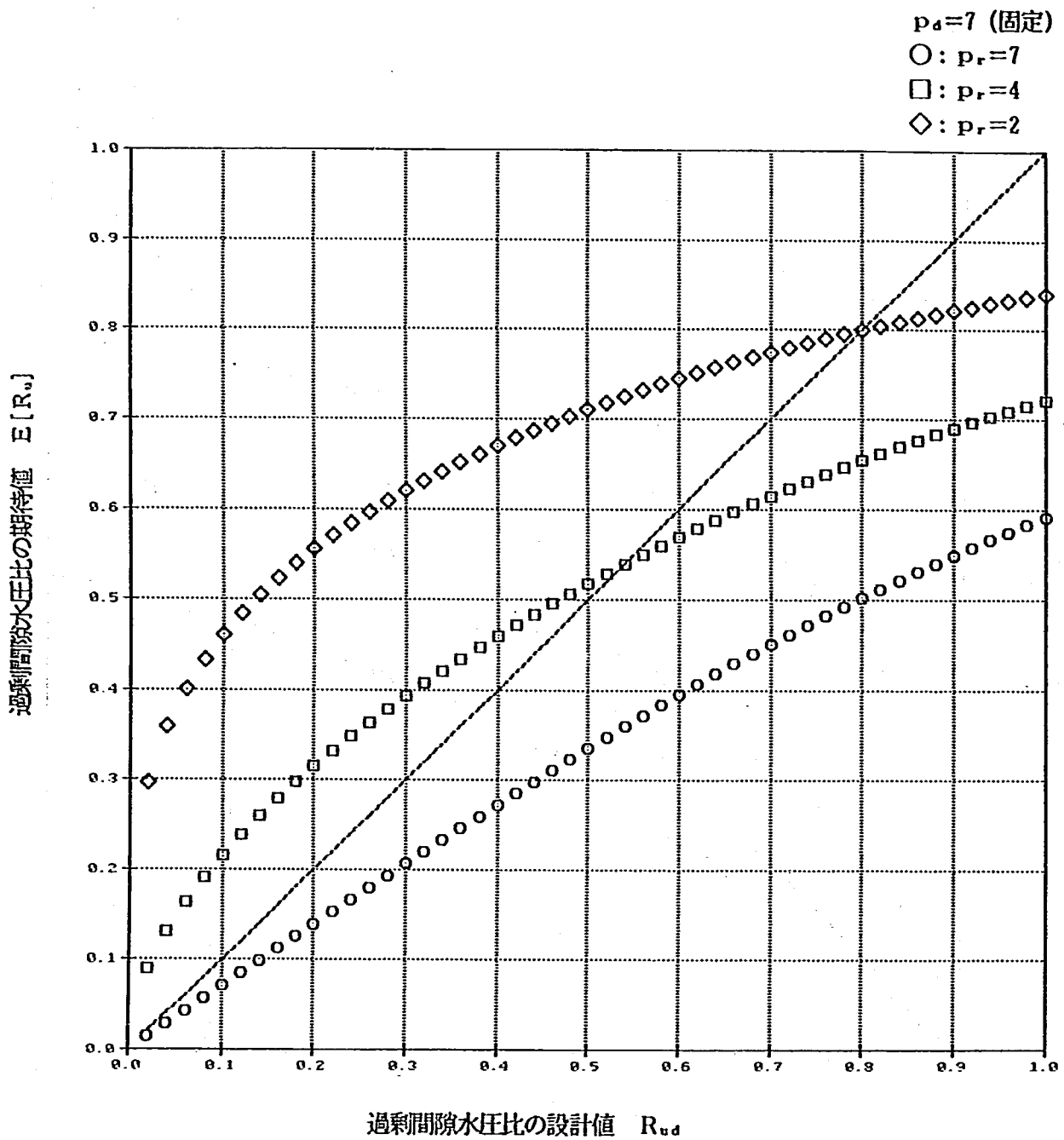
(1) 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき

図5.10 過剰間隙水圧比の設計値と期待値の関係



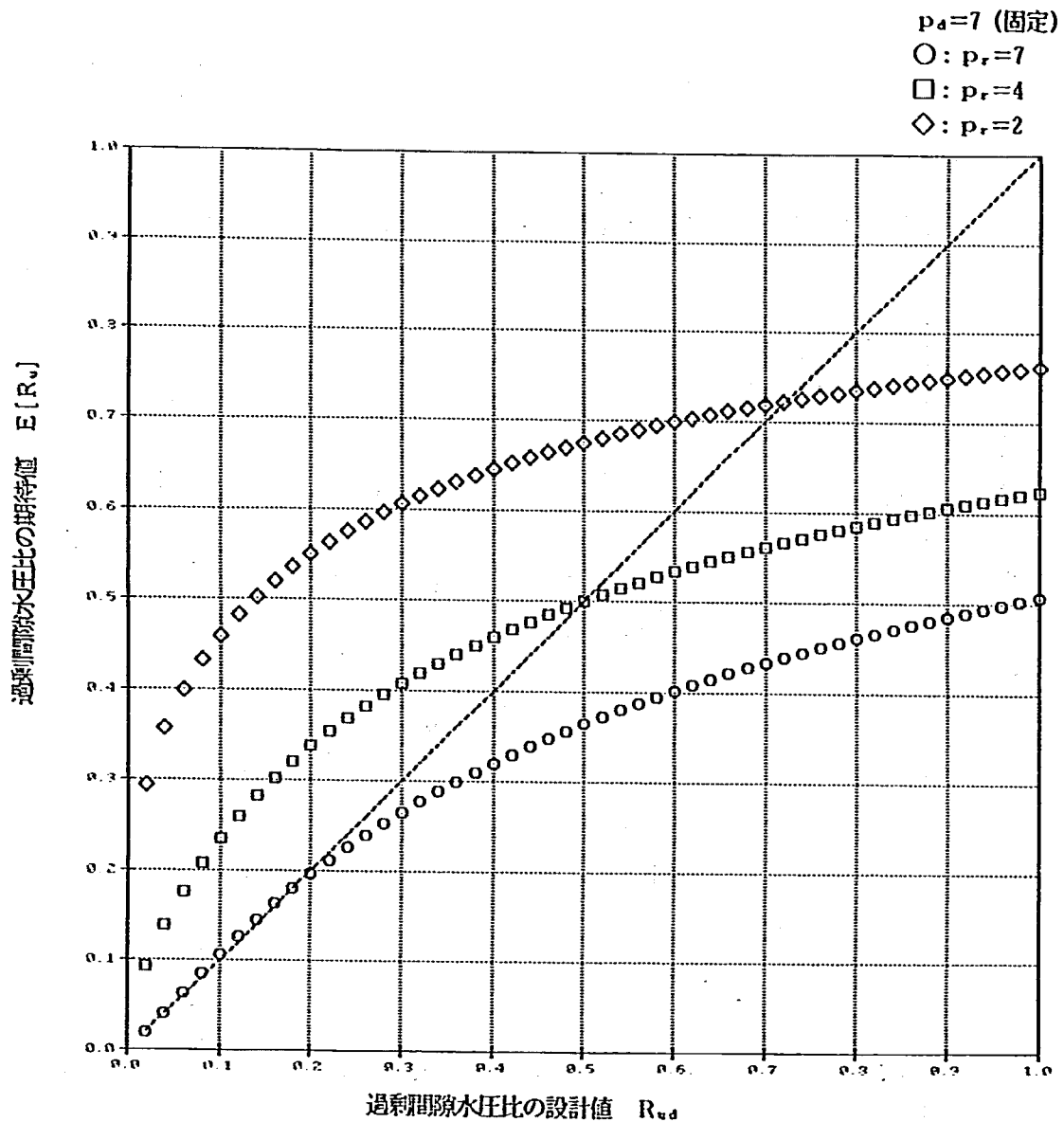
(2) 液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき

図5.10 過剰間隙水圧比の設計値と期待値の関係



(3) 細粒分含有率10%未満を対象としたとき (正規分布)

図5.10 過剰間隙水圧比の設計値と期待値の関係

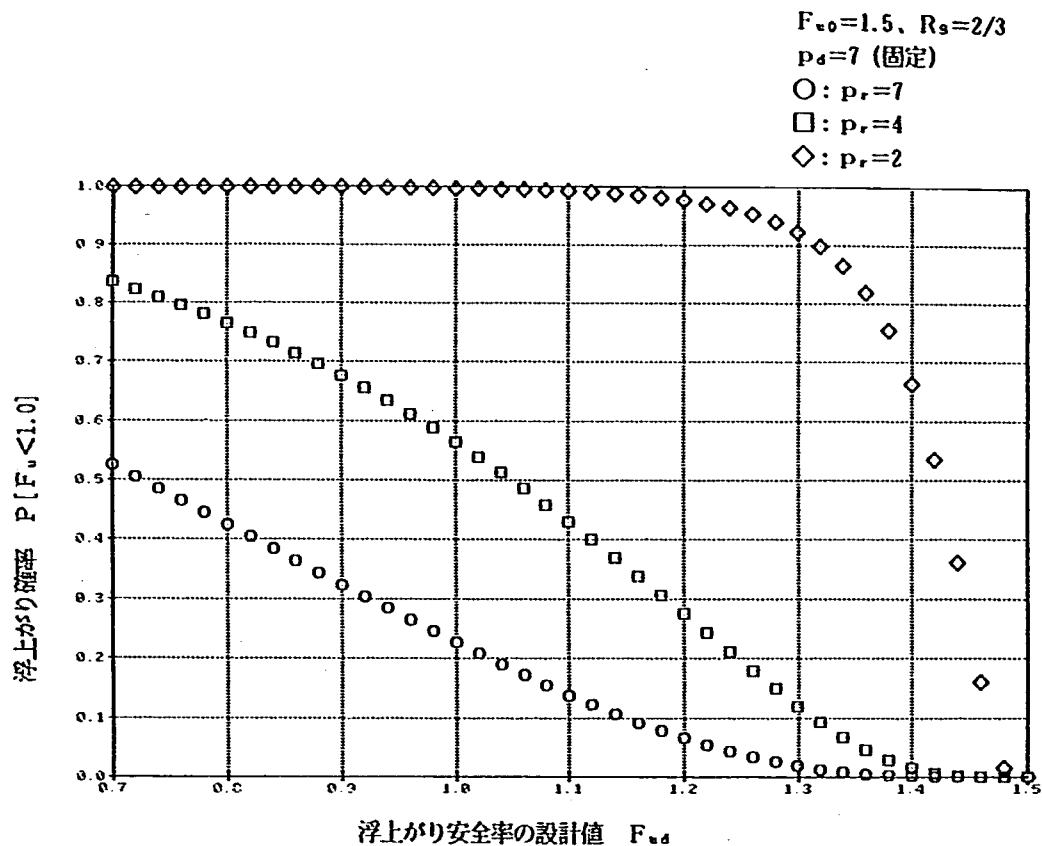


(4) 細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき (正規分布)

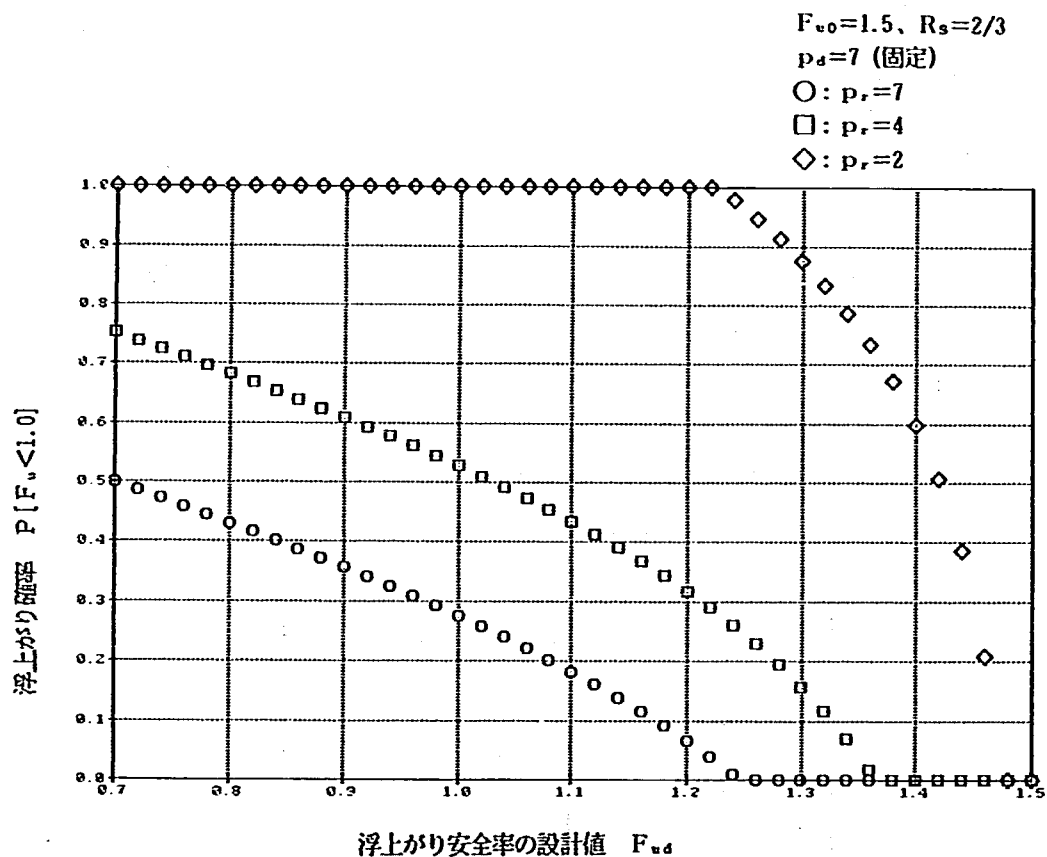
図5.10 過剰間隙水圧比の設計値と期待値の関係

表5.2 液状化抵抗率の算定値に応じた過剰間隙水圧比の期待値の範囲

液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$	過剰間隙水圧比の期待値 $E[R_e]$
~0.6	1.0
0.6~0.8	0.8~1.0
0.8~1.0	0.5~1.0
1.0~1.2	0.2~0.8
1.2~1.5	~0.6
1.5~	~0.4



(1) 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき



(2) 液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき

図5.11 構造物・地盤条件を固定した場合の浮上り安全率の設計値と浮上り確率の関係

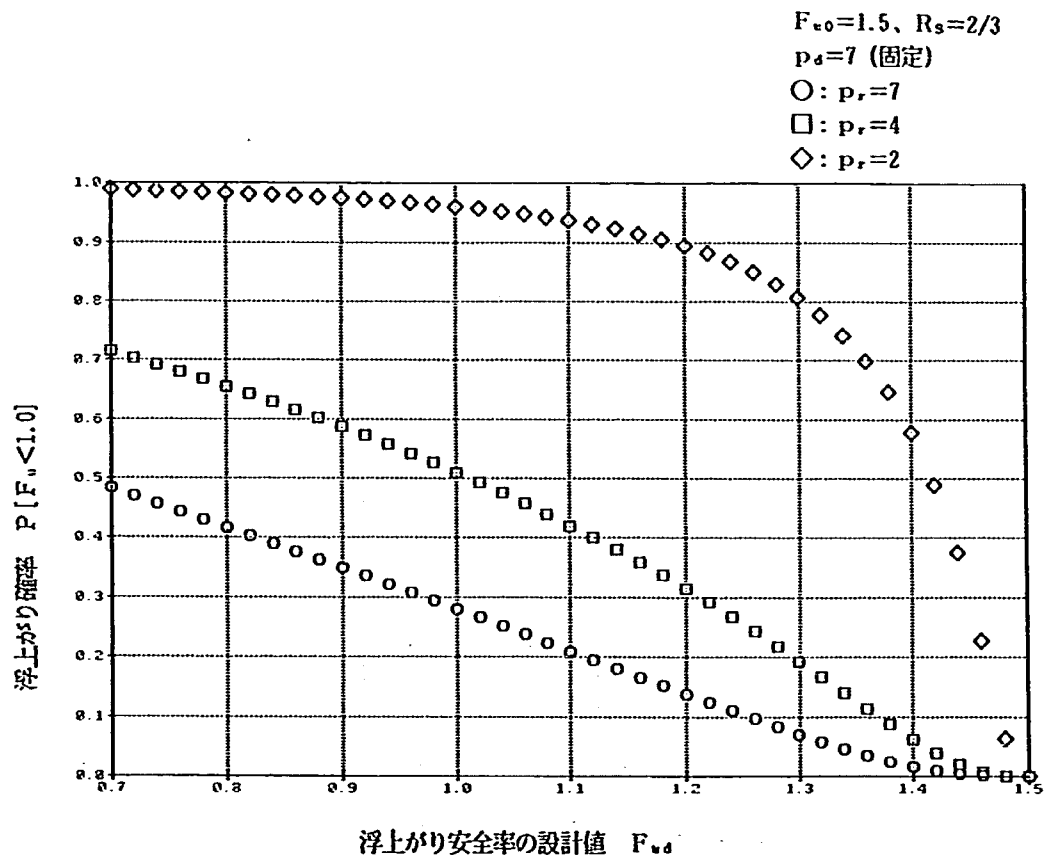
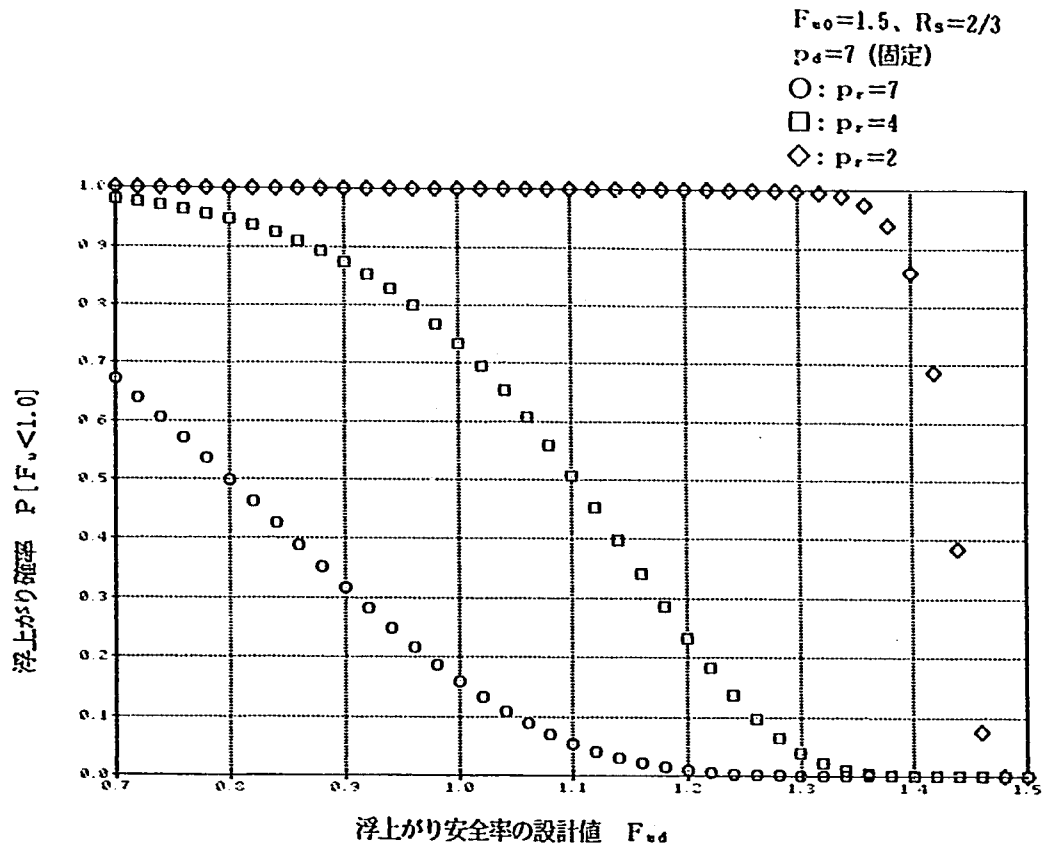
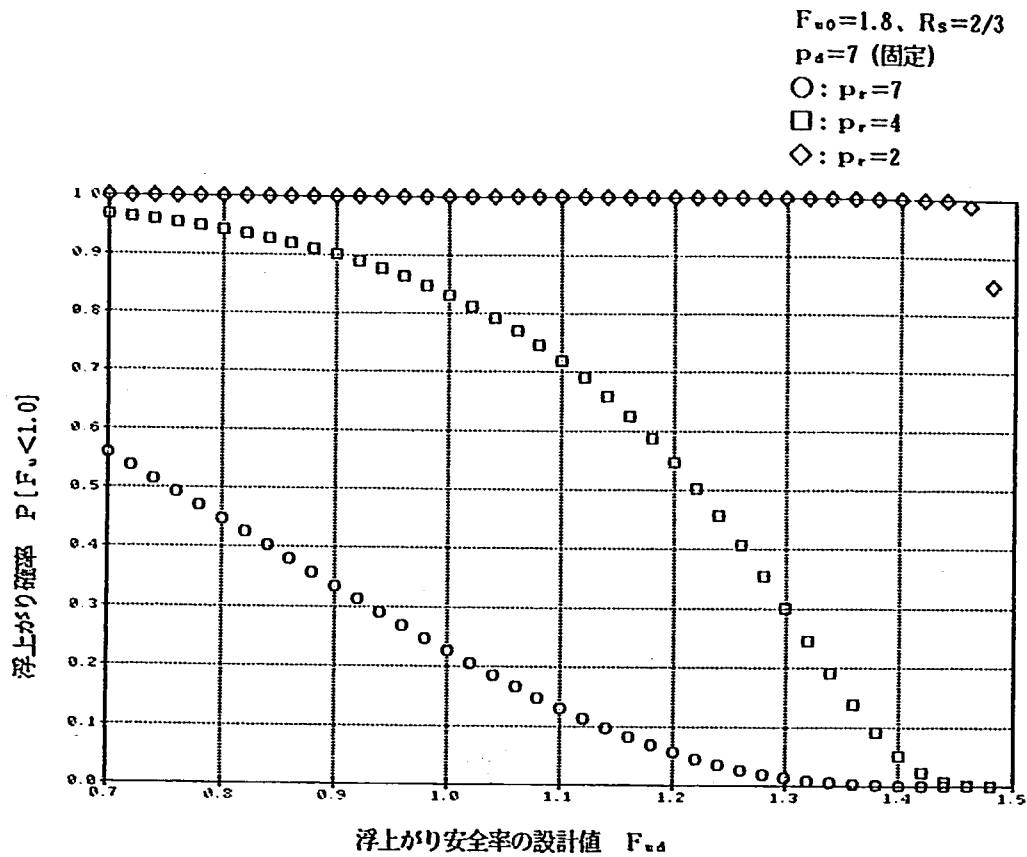
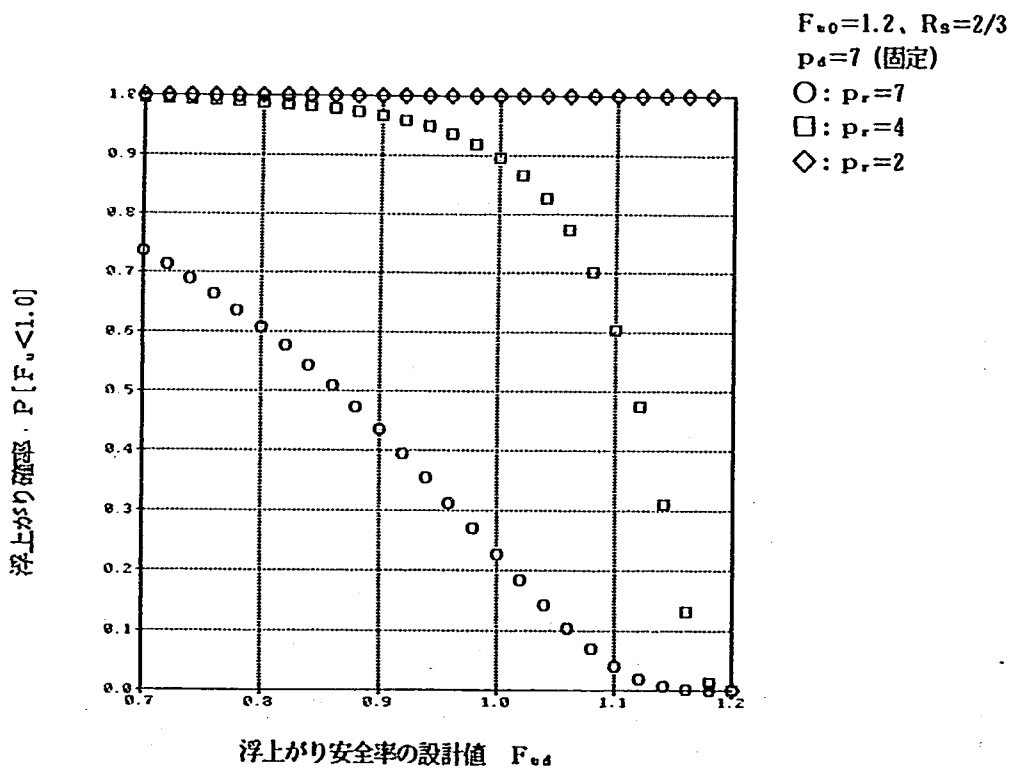


図5.11 構造物・地盤条件を固定した場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がり確率の関係



(1) 常時の浮上がり安全率が大きいとき



(2) 常時の浮上がり安全率が小さいとき

図5.12 構造物・地盤条件を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がり確率の関係

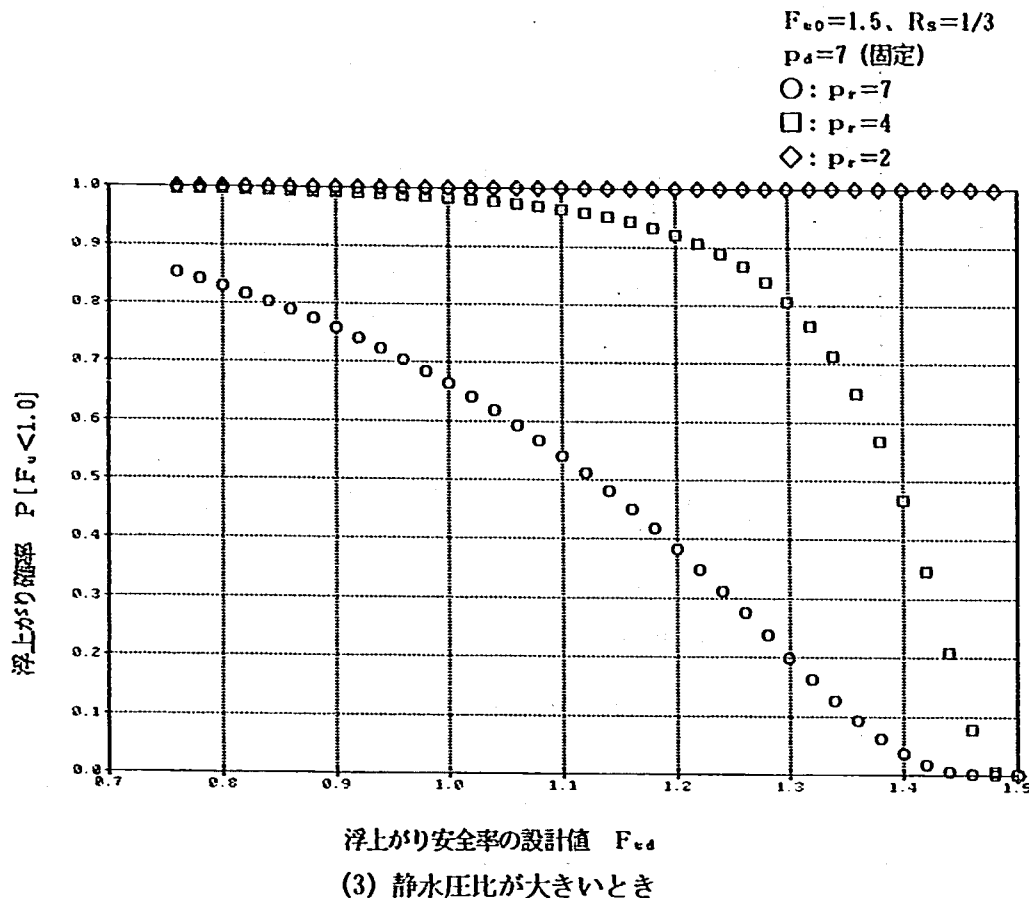


図5.12 構造物・地盤条件を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がり確率の関係

5.2.3 既往の設計基準との比較

(1) 過剰間隙水圧

5.2.1(2)及び(3)より、文献31)に示された方法により求めた過剰間隙水圧比の設計値 R_{ud} は、 $p_r=7$ の場合には常に安全側の評価であるが、 $p_r=4$ または2の場合には R_{ud} が小さい領域では危険側の評価となることがわかった。後者は、過剰間隙水圧の発生特性の違いの影響が支配的であったためで、実際の特性を精度よく推定することができれば、 $p_r=7$ の場合と同様な安全側の評価を行うことができる。

また、文献30)には、砂質地盤上の盛土の地震時安定性の評価に用いる液状化抵抗率と過剰間隙水圧比の関係として、図5.13が示されている。これを図5.9と比較すると、 $p_r=4$ の場合の結果が図5.13とほぼ一致し、 $p_r=7$ の場合には図5.13を用いると過剰間隙水圧比を0.1~0.2程度安全側に評価し、 $p_r=2$ の場合には逆に0.2程度危険側に評価することがわかった。

なお、文献29)には、地盤の変形係数と横方向の地盤反力係数に乘じる低減係数 D_E が、液状化抵抗率と深度の関数として表5.3のように示されている。これは、既往の震災事例の検討結果と振動実験結果を考慮して定められたものであり、液状化抵抗率が1.0よりも大きい場合に低減を行わない、すなわち過剰間隙水圧の発生を考慮しない点が、今回得られた結果とは大きく異なっている。

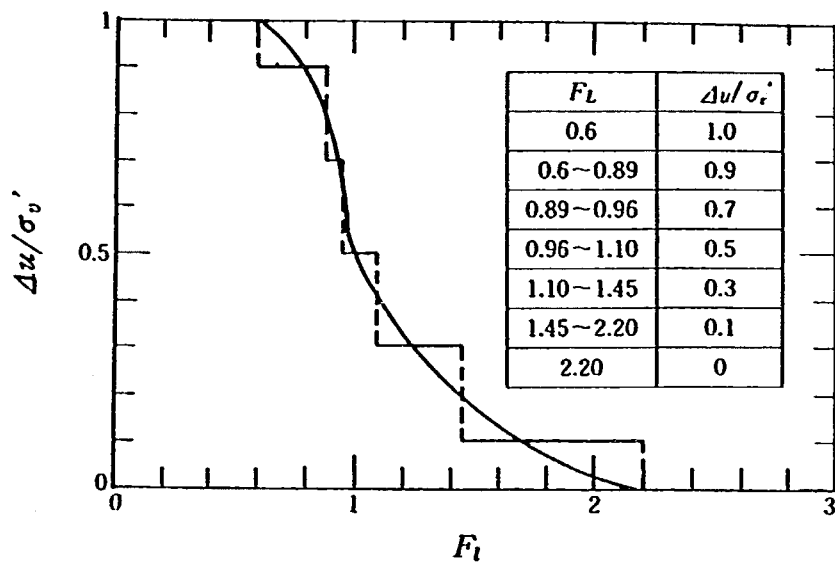


図5.13 液状化抵抗率と過剰間隙水圧比の関係³⁰⁾

表5.3 土質定数に乗じる低減係数²⁹⁾

F_L の範囲	現地盤面からの深度 x (m)	土質定数に乗じる係数 D_E
$F_L \leq 0.6$	$0 \leq x \leq 10$	0
	$10 < x \leq 20$	1/3
$0.6 < F_L \leq 0.8$	$0 \leq x \leq 10$	1/3
	$10 < x \leq 20$	2/3
$0.8 < F_L \leq 1.0$	$0 \leq x \leq 10$	2/3
	$10 < x \leq 20$	1

(2) 浮上がり安全率

5.1.2(1)で述べたように、文献31)では、 F_{ud} が1.1未満のときに液状化の詳細判定を行うものとしている。この限界値に対応する浮上がり確率は、5.2.2より $p_r = 7$ では多くの場合0.2以下であったが、 $p_r = 2$ とすると浮上がり確率はほぼ1.0となり、 p_r の大きさによってかなり異なっていた。 $p_r = 2$ のときに浮上がり確率が急減し始める F_{ud} は、1.1よりもかなり大きく F_{u0} に近い値となっており、設計で $p_d = 7$ を一律に用いることは、場合によってかなり危険側の評価であることがわかった。

一方、 p_r が精度よく推定できるものとし、 $p_d = p_r$ としてその値を3通りに変化させた場合の、図5.11(1)の条件に対応する F_{ud} と浮上がり確率 $P[F_u < 1.0]$ の関係を図5.14に示す。この場合には、 $F_{ud} = 1.1$ に対する浮上がり確率は0.15以下で、 p_r が小さくなるほど浮上がり確率も低下した。また、 $F_{ud} = 1.0$ に対する浮上がり確率は、 p_r の大きさによらず0.23程度と小さかった。これは、過剰間隙水圧の発生特性を精度よく推定することができれば、 F_{ud} の限界値を文献37)のように1.0までゆるめても、設計の信頼性は逆に向上することを示している。

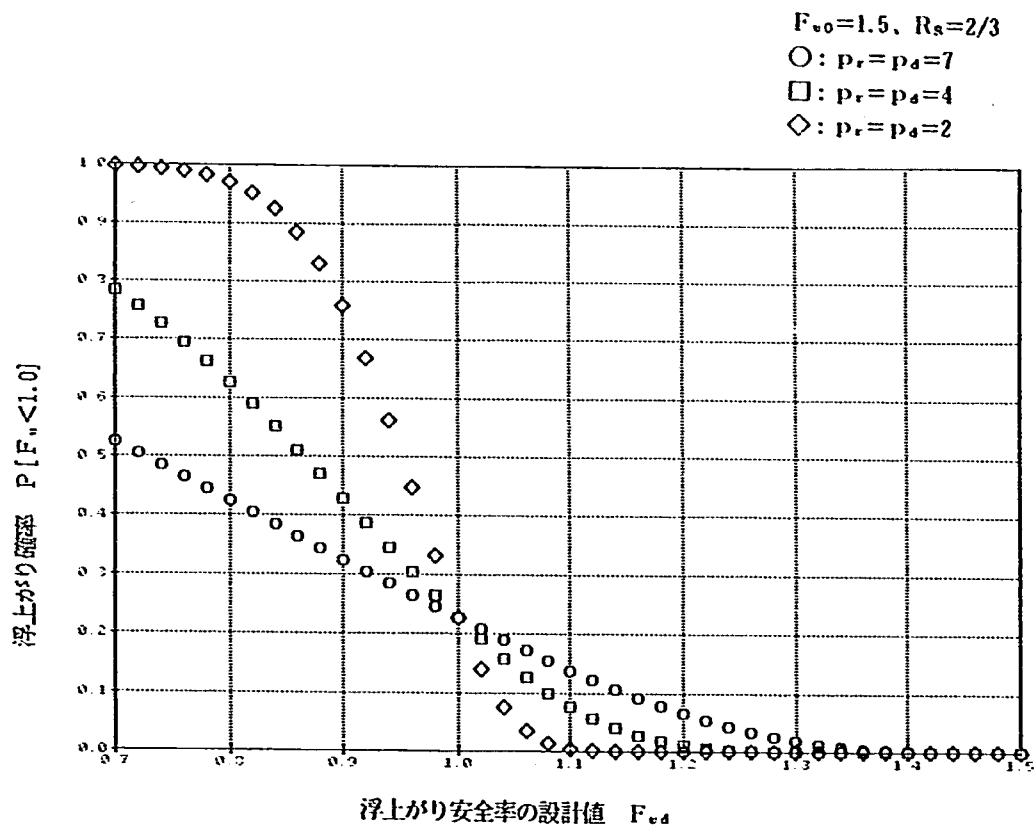


図5.14 過剰間隙水圧の発生特性を精度よく推定した場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がり確率の関係

今後は、上記の特性の推定手法に関する検討を行い、安田ら³⁶⁾が提案しているような簡便な評価手法を設計に導入していく必要があると考えられる。

5.3 ま と め

本章の検討結果をとりまとめると以下ようになる。

- 1) 過剰間隙水圧の発生特性を危険側に評価した場合には、液状化抵抗率の増加に伴い過剰間隙水圧比の非超過確率が急激に減少した。過剰間隙水圧比の期待値と液状化抵抗率の関係として、おおまかではあるが表5.2に示す結果が得られた。
- 2) 浮上がり安全率の設計値が1.1のときの浮上がり確率は、過剰間隙水圧の発生特性が精度よく推定できた場合にはおよそ0.15以下であった。しかし、この特性を設計で固定して用いると、かなり危険側の評価となる場合があった。
- 3) 確率変数の分布形状と対象とする細粒分含有率の範囲が、過剰間隙水圧比と浮上がり安全率の確率的評価結果に及ぼす影響は小さかった。また、構造物と地盤の条件が浮上がり確率の算定結果に及ぼす影響は、過剰間隙水圧の発生特性を危険側に評価した場合に大きく現れた。
- 4) 今後は、過剰間隙水圧の発生特性の推定手法に関する検討を行い、簡便な評価手法を確立する必要がある。

6. 液状化と半地下構造物の浮上がりの平均発生率の算定

構造物の確率的な耐震設計は、本来その供用期間に生じ得るすべての地震の影響を考慮して行われるべきである。しかし、前章までの検討は、1回のある地震動を対象として行われてきた。そこで、地震の平均発生率をマグニチュードの関数として表し、また、 F_L の計算に用いる地表最大加速度を距離減衰式によりマグニチュード及び震央距離から求めた場合の、液状化と半地下構造物の浮上がりの平均発生率について検討を行った。

6.1 検討方法

6.1.1 地震の平均発生率

(1) 地表最大加速度の距離減衰式

地表最大加速度 $a_{\max}$ と地震マグニチュード M 及び震央距離 Δ の関係として、実用上次式が用いられることが多い。

$$a_{\max} = a_1 \cdot 10^{2 \cdot M} \cdot f(\Delta) \quad \dots (6.1)$$

ここに、 a_1 及び a_2 : 係数、 $f(\Delta)$: Δ の関数

例えば、我が国において記録された合計88の加速度記録を地盤種別に応じて分類し、重回帰分析を行った結果として以下の関係³⁷⁾ が得られている。ただし、 $a_{\max}$ の単位はgal、 Δ の単位はkmである。

I 種地盤 (岩盤) に対して :

$$a_{\max} = 987.4 \cdot 10^{0.216 \cdot M} \cdot (\Delta + 30)^{-1.218} \quad \dots (6.2)$$

II 種地盤 (I 種及びIII種のどちらにも属しない洪積地盤及び沖積地盤) に対して :

$$a_{\max} = 232.5 \cdot 10^{0.313 \cdot M} \cdot (\Delta + 30)^{-1.218} \quad \dots (6.3)$$

III 種地盤 (軟弱な沖積地盤) に対して :

$$a_{\max} = 403.8 \cdot 10^{0.265 \cdot M} \cdot (\Delta + 30)^{-1.218} \quad \dots (6.4)$$

なお、式(6.1)を M に関して解くと次式となる。

$$M = \frac{1}{a_2} \cdot \log_{10} \left\{ \frac{a_{\max}}{a_1 \cdot f(\Delta)} \right\} \quad \dots (6.5)$$

(2) 地表最大加速度の平均発生率

マグニチュード M 以上の地震の平均発生率 λ_M は、次式で近似することができる。

$$\lambda_M = 10^{b_1 - b_2 \cdot M} \quad \dots (6.6)$$

ここに、 b_1 及び b_2 ：着目地点周辺の地震活動度に応じた係数

着目地点の周辺に地震源が1点しかないと仮定した場合、地表最大加速度が a_{max} 以上となる地震の平均発生率 λ_a は、式(6.5)を式(6.6)に代入することにより次式として得られる。これは、 a_{max} と λ_a を両対数軸上にプロットすると、傾きが $-(b_2/a_2)$ の直線になることを示している。

$$\lambda_a = 10^{b_1} \cdot \left\{ \frac{a_{max}}{a_1 \cdot f(\Delta)} \right\}^{-(b_2/a_2)} \quad \dots (6.7)$$

一般に、着目地点の周辺に地震源がいくつかある場合には、震央が (x, y) となる地震数の全地震数に対する比として定義した重み付け関数 $w(x, y)$ を導入して、震央位置に関する積分を a_{max} とは独立に行うことにより、 λ_a を次式で表すことができる。この場合にも、 a_{max} と λ_a は両対数軸上で傾きが $-(b_2/a_2)$ の直線となる。

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \iint_S w(x, y) \cdot 10^{b_1} \cdot \left\{ \frac{a_{max}}{a_1 \cdot f(\Delta)} \right\}^{-(b_2/a_2)} \cdot dx \cdot dy \\ &= Q_1 \cdot a_{max}^{-(b_2/a_2)} \quad \dots (6.8) \end{aligned}$$

ただし、

$$Q_1 = 10^{b_1} \cdot \iint_S w(x, y) \cdot \left\{ \frac{1}{a_1 \cdot f(\Delta(x, y))} \right\}^{-(b_2/a_2)} \cdot dx \cdot dy \quad \dots (6.9)$$

ここに、 S ：すべての地震源を含む平面的な積分範囲、 $\Delta(x, y)$ ：震央位置 (x, y) の関数として表される震央距離

なお、最大地表加速度が a_{max} と $a_{max} + da_{max}$ の範囲にあるような地震の発生密度 f_a （その範囲内での平均発生率は $f_a \cdot da_{max}$ となる。）は、上式を a_{max} で微分して符号を変えることにより、次式として表される。

$$f_a = - \frac{d}{da_{max}} \cdot \lambda_a = Q_1 \cdot \frac{b_2}{a_2} \cdot a_{max}^{-(b_2/a_2+1)} \quad \dots (6.10)$$

6.1.2 液状化の平均発生率

(1) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合の定式化

4章で検討を行った液状化確率 P_{LIQ} は、ある地盤条件が与えられ、また、地震マグニチュードの影響を考慮しない場合には、最大地表加速度の関数となる。最大地表加速度が a_{max} と $a_{max} + da_{max}$ の範囲にあるような地震に対する液状化の平均発生率は、地震の平均発生率 $f_a \cdot da_{max}$ と液状化確率 P_{LIQ} の積として求められるので、生じうる全ての地震を考慮した液状化の平均発生率 λ_{LIQ} は次式となる。

$$\lambda_{LIQ} = \int_0^\infty f_a \cdot P_{LIQ} \cdot da_{max} \quad \dots (6.11)$$

λ_{LIQ} を一般化した形で求めるために、ここでは、絶対論的な設計が最大地表加速度 a_{DES} を用いて行われたものと仮定した。このとき、最大地表加速度が a_{DES} 以上となる地震の平均発生率 λ_{DES} は、式(6.8)より次式となる。

$$\lambda_{DES} = Q_1 \cdot a_{DES}^{-(b_2/a_2+1)} \quad \dots (6.12)$$

上式を用いて式(6.10)中の定数項 Q_1 を消去し、式(6.11)に代入すると次式が得られる。

$$\lambda_{LIQ} = \lambda_{DES} \cdot \frac{b_2}{a_2} \cdot \int_0^{\infty} \left(\frac{a_{max}}{a_{DES}} \right)^{-(b_2/a_2+1)} \cdot P_{LIQ} \cdot (a_{DES})^{-1} \cdot da_{max} \quad \dots (6.13)$$

P_{LIQ} として、液状化抵抗率を確率変数とした場合 (式(4.20)参照)、及び動的せん断強度比を確率変数とした場合 (式(4.21)参照) の2通りの計算を行った。

前者の場合、最大地表加速度が a_{max} のときの液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ は、最大地表加速度 a_{DES} を用いて絶対論的な設計を行ったときの液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_{LDES}}$ と次のような関係がある。

$$\frac{\overline{F_L}}{a_{max}} = \frac{a_{DES}}{a_{max}} \cdot \frac{\overline{F_{LDES}}}{r} = \frac{\overline{F_{LDES}}}{r} \quad \dots (6.14)$$

ただし、

$$r = \frac{a_{max}}{a_{DES}} \quad \dots (6.15)$$

これらを用いて、式(6.13)の a_{max} に関する積分を r に関する積分に変換すると、次のようになる。

$$dr = \frac{1}{a_{DES}} \cdot da_{max} \quad \dots (6.16)$$

積分区間 $a_{max} = 0 \sim \infty$ は、 $r = 0 \sim \infty$ に対応する。

∴

$$\lambda_{LIQ} = \lambda_{DES} \cdot \frac{b_2}{a_2} \cdot \int_0^{\infty} r^{-(b_2/a_2+1)} \cdot P_{LIQ}(\overline{F_{LDES}}/r) \cdot dr = Q_2 \cdot \lambda_{DES} \quad \dots (6.17)$$

$$\text{ただし、} Q_2 = \frac{b_2}{a_2} \cdot \int_0^{\infty} r^{-(b_2/a_2+1)} \cdot P_{LIQ}(\overline{F_{LDES}}/r) \cdot dr \quad \dots (6.18)$$

ここに、 $P_{LIQ}(\overline{F_{LDES}}/r)$ ：液状化確率 P_{LIQ} が $\overline{F_{LDES}}/r$ の関数であることを意味する、 Q_2 ：設計地震動以上の地震の平均発生率 λ_{DES} に対する液状化の平均発生率 λ_{LIQ} の比

液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときには、式(4.15)、式(4.20)及び式(4.33)を式(6.18)に代入することにより次式が得られる。

$$Q_2 = \frac{b_2}{a_2} \cdot \int_0^{\infty} r^{-(b_2/a_2+1)} \cdot \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left(\frac{x - \overline{F_{LDES}}/r - m'}{\sigma} \right)^2 \right\} dx \cdot dr \quad \dots (6.19)$$

動的せん断強度比を確率変数として P_{LIQ} を定式化したときにも、上記と同様な手順が適用できるが、ここでは、積分の回数を減らすために以下のような方法で計算を行った。

まず、図6.1を参考にして、式(6.11)を次のように置き換えた。式(6.11)では荷重側での a_{max} の密度分布 f_a に関して積分を行っているのに対し、式(6.20)では抵抗側での液状化が生じる最大地表加速度の限界値を a_{crit} として、その密度分布 f_{acrit} に関して積分を行っている。なお、液状化抵抗率を確率変数とした場合には、4.2.4(2)で述べたことと同様な理由により f_{acrit} が a_{crit} のみの関数として求められないため、この方法は適用できない。

$$\lambda_{LIQ} = \int_0^{\infty} \lambda_a(a_{max}=a_{crit}) \cdot f_{acrit} \cdot da_{crit} \quad \dots (6.20)$$

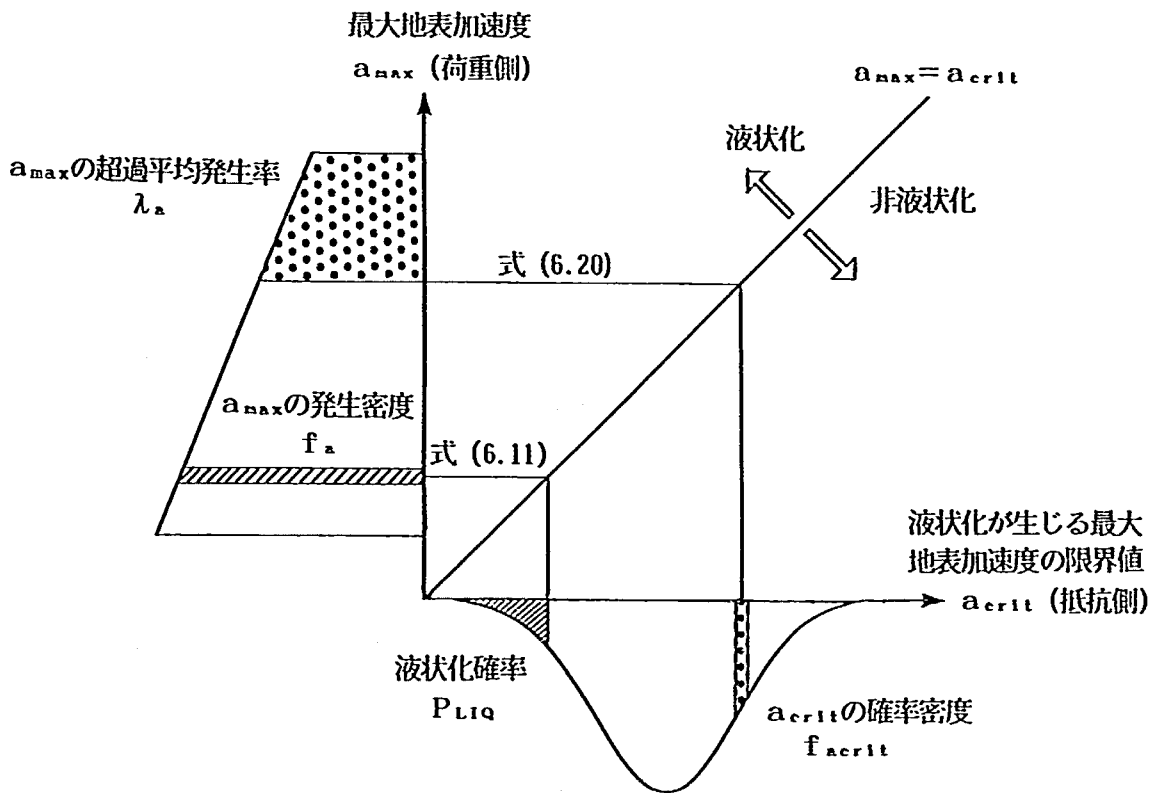


図6.1 荷重側と抵抗側の最大地表加速度の超過平均発生率及び平均発生密度の関係

式(6.12)を用いて式(6.8)中の定数項 Q_1 を消去すると次式が得られる。

$$\lambda_a(a_{max}=a_{crit}) = \lambda_{DES} \cdot \left\{ \frac{a_{crit}}{a_{DES}} \right\}^{-(b2/a2)} = \lambda_{DES} \cdot r_{crit}^{-(b2/a2)} \quad \dots (6.21)$$

$$\text{ただし、} r_{crit} = \frac{a_{crit}}{a_{DES}} \quad \dots (6.22)$$

動的せん断強度比 R の算定値を $\bar{R}$ とし、これに対応する限界最大地表加速度を $\overline{a_{crit}}$ とすると、 a_{crit} と R は比例することから次式が成り立つ。

$$a_{crit} = \frac{\overline{a_{crit}}}{\overline{R}} \cdot R \quad \dots (6.23)$$

上式より、 R の分布を正規分布とした場合には、 f_{acrit} も正規分布となり、平均値と標準偏差がそれぞれ $(\overline{a_{crit}}/\overline{R})$ 倍される。例えば、タイプ2を仮定したときには、式(4.15)、式(4.39)及び式(4.40)を用いることにより f_{acrit} は次式で表される。

$$f_{acrit} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot D_2 \cdot (\overline{a_{crit}}/\overline{R})} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left[\frac{a_{crit} - C_2 \cdot \overline{a_{crit}}}{D_2 \cdot (\overline{a_{crit}}/\overline{R})} \right]^2 \right\} \quad \dots (6.24)$$

ここで、最大地表加速度 a_{DES} を用いて絶対論的な設計を行ったときの液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_{LDES}}$ は、 $\overline{R}$ 及び $\overline{a_{crit}}$ と次のような関係がある。

$$\overline{F_{LDES}} = \frac{\overline{R}}{L_{DES}} = \frac{\overline{a_{crit}}}{a_{DES}} \quad \dots (6.25)$$

ここに、 L_{DES} ：最大地表加速度 a_{DES} を用いたときの地震時せん断応力比

式(6.24)と式(6.21)を式(6.20)に代入して a_{crit} に関する積分を r_{crit} に関する積分に変換し、さらに、上式を用いて係数を整理すると、 λ_{LIQ} と λ_{DES} の比 Q_2 として次式が得られる。

$$Q_2 = \int_0^\infty r_{crit}^{-(b_2/a_2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (D_2/L_{DES})} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left[\frac{r_{crit} - C_2 \cdot \overline{F_{LDES}}}{(D_2/L_{DES})} \right]^2 \right\} dr_{crit} \quad \dots (6.26)$$

タイプ1及びタイプ3について同様な計算を行うと、それぞれ次のような結果となる。タイプ3では、結果が $\overline{F_{LDES}}$ のみの関数となる点が特徴的である。

$$Q_2 = \int_0^\infty r_{crit}^{-(b_2/a_2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (D_1/L_{DES})} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left[\frac{r_{crit} - \overline{F_{LDES}} - C_1/L_{DES}}{(D_1/L_{DES})} \right]^2 \right\} dr_{crit} \quad \dots (6.27)$$

$$Q_2 = \int_0^\infty r_{crit}^{-(b_2/a_2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (D_3 \cdot \overline{F_{LDES}})} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left[\frac{r_{crit} - C_3 \cdot \overline{F_{LDES}}}{(D_3 \cdot \overline{F_{LDES}})} \right]^2 \right\} dr_{crit} \quad \dots (6.28)$$

(2) 地震マグニチュードの影響を考慮する場合の定式化

地震マグニチュード M の影響を考慮して液状化確率 P_{LIQ} を定式化した場合には、液状化の平均発生率 λ_{LIQ} は、 M に関する積分を行うことにより次式を用いて求めることができる。

$$\lambda_{LIQ} = \int_{M_{min}}^{M_{max}} f_M \cdot P_{LIQ} \cdot dM \quad \dots (6.29)$$

$$f_M = -\frac{d}{dM} \lambda_M = \log_e 10 \cdot b_2 \cdot 10^{b_1 - b_2 \cdot M} \quad \dots (6.30)$$

ここに、 f_M ：地震マグニチュードが M と $M+dM$ の範囲にあるような地震の発生密度（その範囲内での平均発生率は $f_M \cdot dM$ となる。 λ_M は式(6.6)を参照。）、 M_{max} ：生じ得る地震マグニチュードの最大値、 M_{min} ：計算で考慮する地震マグニチュードの最小値

P_{LIQ} は M と a_{max} の関数で、また、 a_{max} は M と Δ の関数（式(6.1)参照）であるため、上式を計算するためには Δ の分布が必要となる。ここでは、最も単純な例として、液状化抵抗率を確率変数とした場合について、着目地点の周辺に地震源が1点しかないときの計算を行った。

まず、絶対論的な設計が地震マグニチュード M_{DES} を用いて行われたものと仮定する。すると、マグニチュードが M_{DES} 以上となる地震の平均発生率 λ_{DES} は、 M_{max} の存在を考慮すると式(6.6)より次式となる。

$$\lambda_{DES} = 10^{b_1 - b_2 \cdot M_{DES}} - 10^{b_1 - b_2 \cdot M_{max}} = 10^{b_1 - b_2 \cdot M_{DES}} \cdot (1 - 10^{-b_2 \cdot (M_{max} - M_{DES})}) \quad \dots (6.31)$$

上式を用いて式(6.30)中の定数 b_1 を消去し、式(6.29)に代入すると次式が得られる。

$$\lambda_{LIQ} = \lambda_{DES} \cdot \frac{\log_e 10 \cdot b_2}{1 - 10^{-b_2 \cdot (M_{max} - M_{DES})}} \cdot \int_{M_{min}}^{M_{max}} 10^{-b_2 \cdot (M - M_{DES})} \cdot P_{LIQ} \cdot dM \quad \dots (6.32)$$

M_{DES} に対応する最大地表加速度 a_{DES} と、任意の M に対応する最大地表加速度 a_{max} の比は、式(6.1)より次式として表される。

$$\frac{a_{max}}{a_{DES}} = \frac{a_1 \cdot 10^{a_2 \cdot M} \cdot f(\Delta)}{a_1 \cdot 10^{a_2 \cdot M_{DES}} \cdot f(\Delta)} = 10^{a_2 \cdot (M - M_{DES})} = 10^{a_2 \cdot p} \quad \dots (6.33)$$

$$\text{ただし、} p = M - M_{DES} \quad \dots (6.34)$$

地震マグニチュード M の影響を考慮して液状化確率 P_{LIQ} を定式化していることを考慮すると、地震マグニチュードが M のときの液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_L}$ と、 M_{DES} を用いて絶対論的な設計を行ったときの液状化抵抗率の算定値 $\overline{F_{LDES}}$ の関係は次のようになる（式(4.10)参照）。

$$\frac{\overline{F_L}}{\overline{F_{LDES}}} = \frac{a_{DES}}{a_{max}} \cdot \frac{M_{DES} - 1}{M - 1} \cdot \overline{F_{LDES}} \quad \dots (6.35)$$

これらを用いて、式(6.29)の M に関する積分を p に関する積分に変換すると、液状化抵抗率を確率変数とした場合には、 λ_{LIQ} と λ_{DES} の比 Q_2 として最終的に次式が得られる。

$$Q_2 = \frac{\log_e 10 \cdot b_2}{1 - 10^{-b_2 \cdot (M_{max} - M_{DES})}} \cdot \int_{M_{min} - M_{DES}}^{M_{max} - M_{DES}} 10^{-b_2 \cdot p} \cdot P_{LIQ}(\overline{F_L} = \overline{F_{LDES}} \cdot h(p) / 10^{a_2 \cdot p}) \cdot dp \quad \dots (6.36)$$

$$\text{ただし、} h(p) = \frac{M_{DES} - 1}{p + M_{DES} - 1} \quad \dots (6.37)$$

式中の液状化確率 P_{LiQ} は、正規分布及び一様分布のそれぞれを用いた場合について次式で表される。

正規分布：

$$P_{LiQ} = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left\{ -1/2 \cdot \left[\frac{x - \overline{F}_{LDES} \cdot h(p)/10^{a \cdot 2 \cdot p} + m'}{\sigma} \right]^2 \right\} dx \quad \dots (6.38)$$

一様分布：

$$P_{LiQ} = \begin{cases} 0 & (1 + a' < \overline{F}_{LDES} \cdot h(p)/10^{a \cdot 2 \cdot p}) \\ \frac{1 + a' - \overline{F}_{LDES} \cdot h(p)/10^{a \cdot 2 \cdot p}}{a' + b'} & (1 - b' \leq \overline{F}_{LDES} \cdot h(p)/10^{a \cdot 2 \cdot p} \leq 1 + a') \\ 1 & (\overline{F}_{LDES} \cdot h(p)/10^{a \cdot 2 \cdot p} < 1 - b') \end{cases} \quad \dots (6.39)$$

(3) 計算ケース

表6.1に示すケースについて、 Q_2 （以下では「液状化の平均発生率比」と称する。）と $\overline{F}_{LDES}$ （「設計液状化抵抗率」と称する。）の関係を求めた。地震マグニチュードを考慮しない計算では、対象とする細粒分含有率の範囲と液状化確率の定式化の方法を変えた場合の影響について検討した。また、地震マグニチュードを考慮する計算では、液状化抵抗率を確率変数としたときの分布形状による違いと、マグニチュードの設定値を変えたときの影響について検討した。

表6.1 液状化の平均発生率に関する計算ケース

ケース名	仮定した確率変数及び分布形状	対象事例			
		B	BM	C	D
FL-U	液状化抵抗率（一様分布）	—	○	—	—
FL-N	液状化抵抗率（正規分布）	○	○	○	○
R-N1~N3	動的せん断強度比（正規分布）	○	—	○	○

凡例

○：計算を実施 B：細粒分含有率40%未満 M：地震マグニチュード
 ◎：設定を変えた場合に C：細粒分含有率10%未満 の補正を行った場合
 についても計算を実施 D：細粒分含有率10%以上40%未満
 —：未計算

(4) 係数の設定

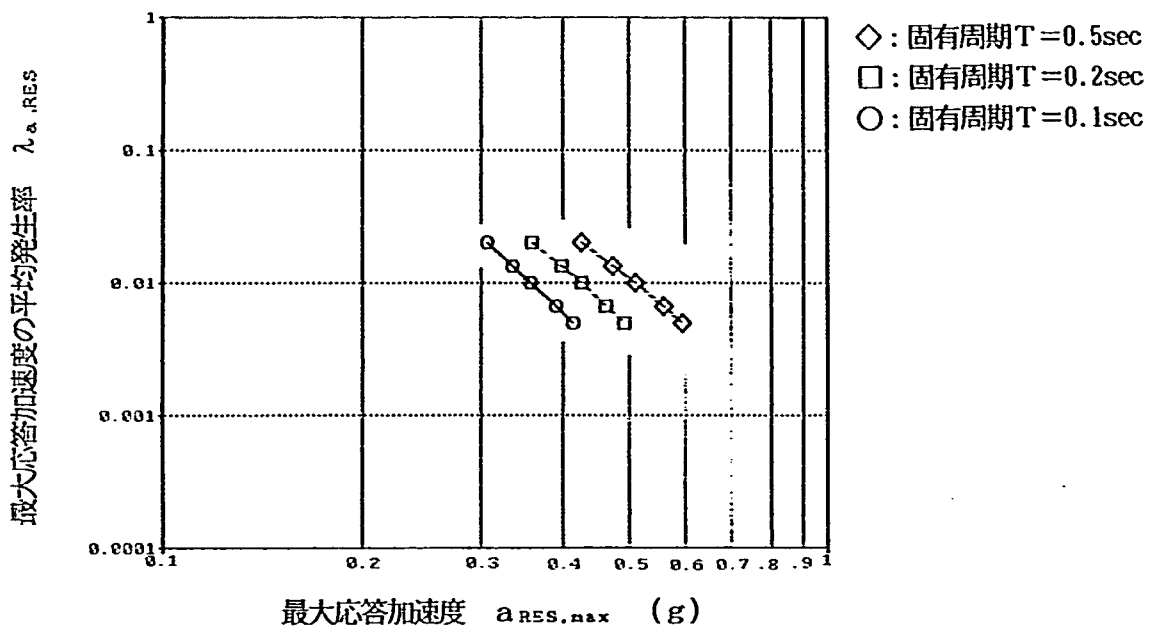
佐々木ら³⁸⁾は、我が国において1885年から1983年までに発生した震源深さ60km以浅の地震を対象に、合計244の地点について、その地点を中心とした半径300kmの範囲における地震の平均発生率から、式(6.6)の係数 b_2 を求めた。その結果、最大値は1.475、最小値は0.673であったが、全体の93%にあたる228地点は0.8~1.1の範囲内になった。

また、液状化の判定が行われる地盤は、6.1.1(1)に示したⅡ種またはⅢ種地盤のどちらかに分類されるが、

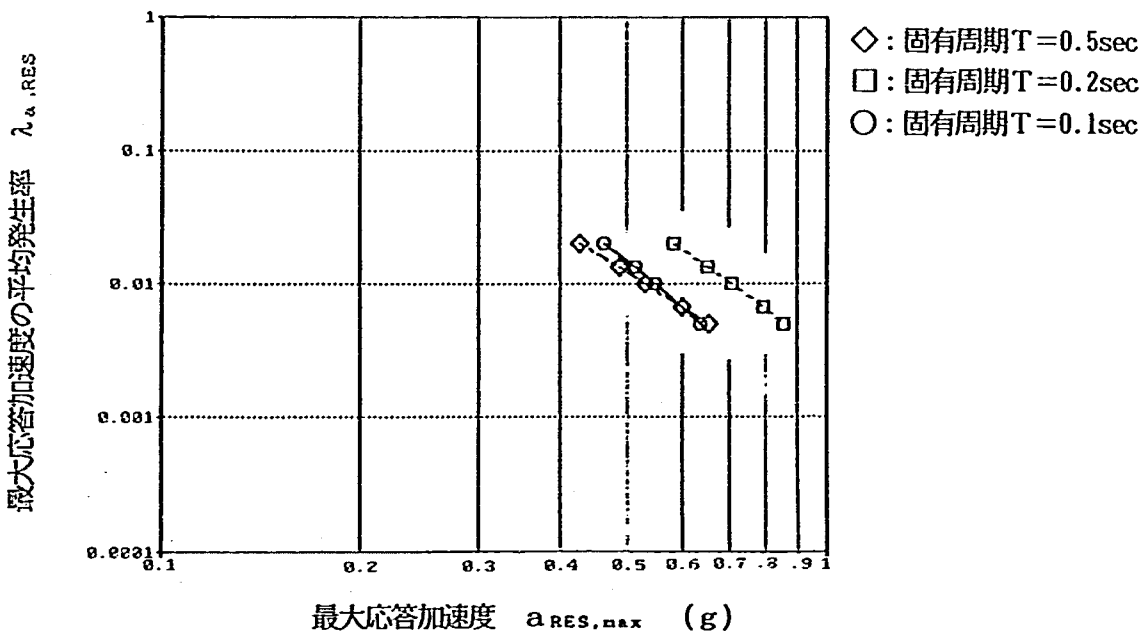
対応する式(6.1)の係数 a_2 は、式(6.3)及び式(6.4)より0.313及び0.265であった。

地震マグニチュードの影響を考慮しない場合の計算では、上記の2つの係数の比が必要となるが、それぞれの値の範囲を考慮して、 b_2/a_2 として2.0、3.0及び4.0の3通りを設定した。また、これに対応させるために、地震マグニチュードの影響を考慮する場合には、 a_2 を0.313または0.265の2通りとして、 b_2/a_2 が2.0、3.0または4.0となるように b_2 を設定して計算を行った。

なお、参考までに、佐々木ら³⁸⁾が求めた東京における加速度応答スペクトルの再現期待値を用いて、Ⅱ種及びⅢ種地盤について式(6.8)の a_{max} と λ_a の関係に相当するものをプロットした結果を図6.2に示す。いずれの場合も両対数軸上でほぼ直線となっており、地表最大加速度についても式(6.8)が成り立つと仮定して問題はないものと思われる。



(1) Ⅱ種地盤



(2) Ⅲ種地盤

図6.2 東京における加速度応答スペクトルの超過平均発生率 (文献38)の結果を用いた)

6.1.3 半地下構造物の浮上がりの平均発生率

(1) 定式化

ここでは、地震マグニチュードの影響を考慮し、液状化抵抗率を確率変数とした場合を対象とした。液状化確率 P_{LIQ} の代わりに浮上がり確率 $P[F_u < 1.0]$ (5.1.2(2)参照) を用いて6.1.2(2)と同様な計算を行うと、浮上がりの平均発生率 λ_{UP} は次式で表される。

$$\lambda_{LIQ} = Q_3 \cdot \lambda_{DES} \quad \dots (6.40)$$

$$Q_3 = \log_e 10 \cdot b_2 \cdot \int_{M_{min}-M_{DES}}^{M_{max}-M_{DES}} 10^{-b_2 \cdot p} \cdot P[F_u < 1.0 \mid \overline{F}_L = \overline{F}_{LDES} \cdot h(p)/10^{a_2 \cdot p}] \cdot dp \quad \dots (6.41)$$

設計マグニチュード M_{DES} を用いて絶対論的な設計を行ったときの浮上がり安全率を F_{uDES} とすると、上式中の $\overline{F}_{LDES}$ は、 F_{uDES} と常時の浮上がり安全率 F_{u0} 及び静水圧比 R_S の関数として置き換えることができる (式(5.11)～式(5.17)参照)。

(2) 計算ケース

表6.1のうち、地震マグニチュードの影響を考慮して、また、一様分布を仮定したいくつかのケースについて、浮上がりの平均発生率比 Q_3 と F_{uDES} の関係を求めた。細粒分含有率40%未満を対象とした。

常時の浮上がり安全率 F_{u0} 、静水圧比 R_S 、及び過剰間隙水圧の発生特性の設定値は、5.1.2と同様である。

6.2. 検討結果及び考察

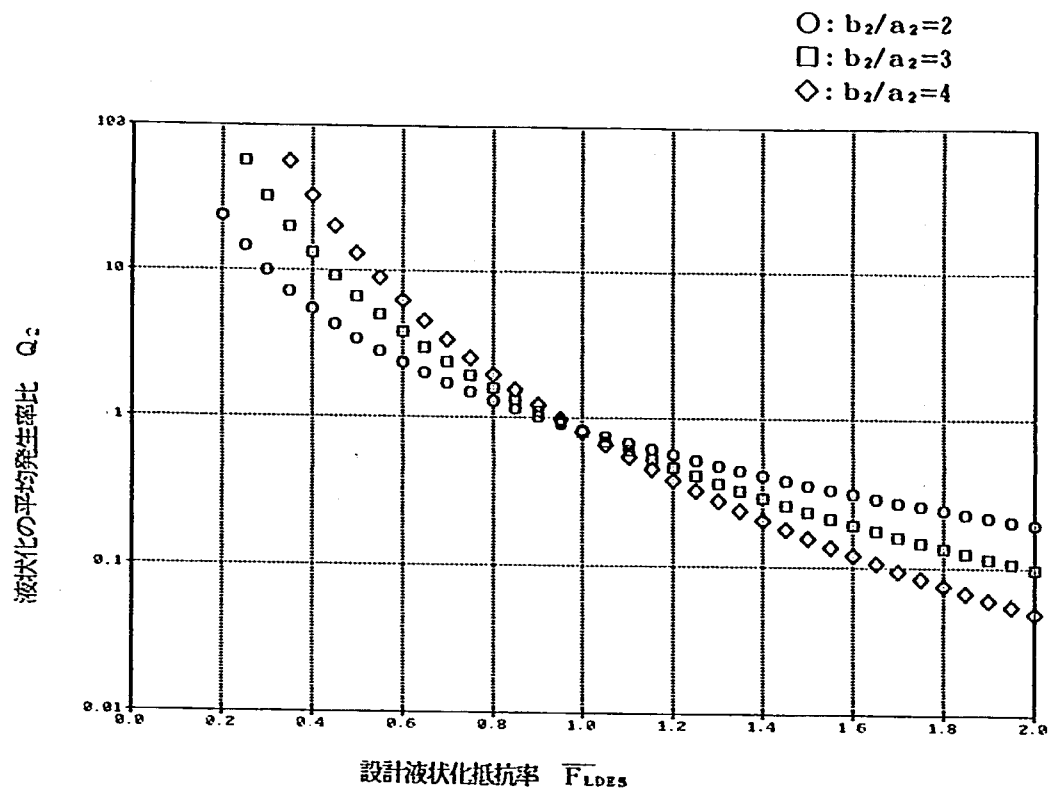
6.2.1 液状化の平均発生率

(1) 地震マグニチュードの影響を考慮しない場合

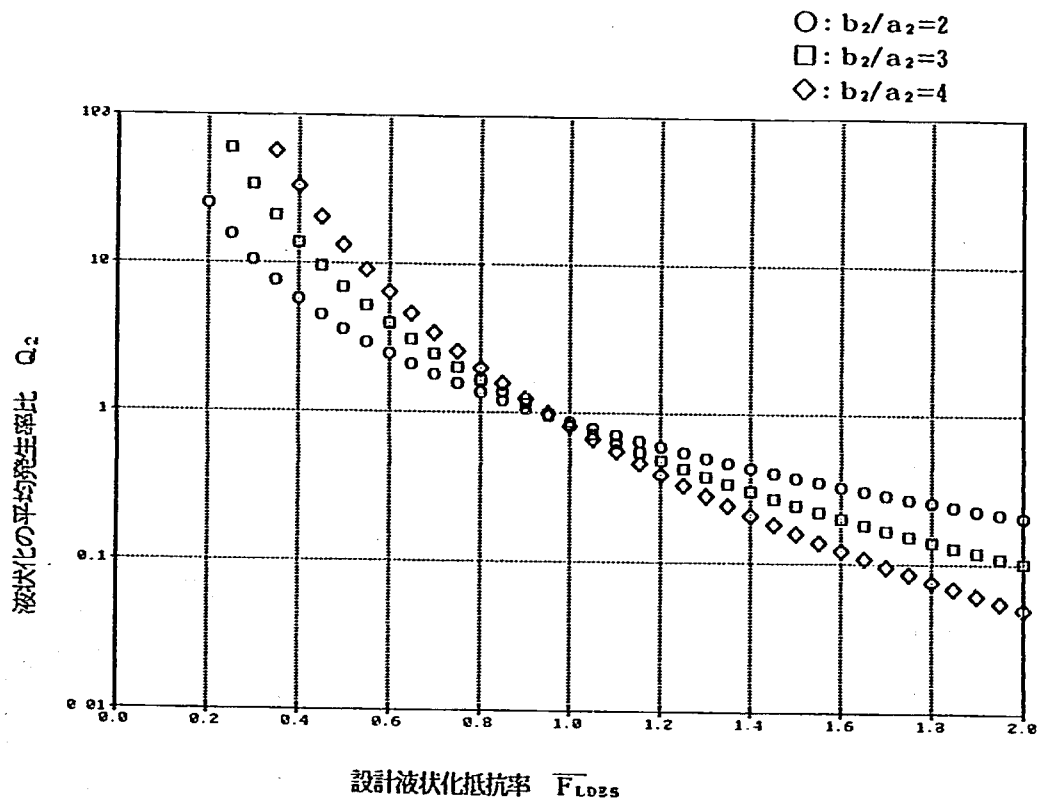
液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたときの、液状化の平均発生率比 Q_2 と設計液状化抵抗率 $\overline{F}_{LDES}$ の関係を図6.3に示す。 $\overline{F}_{LDES}$ が0.9程度で $Q_2=1$ となり、 $\overline{F}_{LDES}$ がそれよりも小さくなると b_2/a_2 が大きいほうが Q_2 が大きく、逆に $\overline{F}_{LDES}$ が大きくなると b_2/a_2 が大きいほうが Q_2 が小さくなった。また、 $Q_2=10$ となるのは $\overline{F}_{LDES}$ が0.3～0.5程度のとき、 $Q_2=0.1$ となるのは $\overline{F}_{LDES}$ が1.6程度以上のときで、これらの傾向は対象とする細粒分含有率の範囲によらなかった。

細粒分含有率40%未満を対象に、動的せん断強度比を正規分布の確率変数としたときの、 Q_2 と $\overline{F}_{LDES}$ の関係を図6.4、図6.5、図6.6に示す。それぞれ、タイプ1、2、3の分布に対応する。図6.3(1)とあわせて比較すると、以下の点が挙げられる。

- 1) タイプ1及びタイプ2では、 $\overline{F}_{LDES}$ がある値よりも小さくなると、 Q_2 が急激に増加する。 $Q_2=1$ となる $\overline{F}_{LDES}$ は、図6.5(1)以外はいずれも0.9程度で、液状化抵抗率を確率変数としたときと一致する。また、 $Q_2=10$ となる $\overline{F}_{LDES}$ の範囲は、液状化抵抗率を確率変数としたときよりも若干大きく、 $Q_2=0.1$ となる $\overline{F}_{LDES}$ の範囲はあまり変わらない。
- 2) タイプ1及びタイプ2では、 L_{DES} が大きくなると b_2/a_2 の影響が相対的に小さくなる。
- 3) タイプ3では、 $b_2/a_2=4.0$ のときに Q_2 が全般的にかなり大きな値となる。 $b_2/a_2=2.0$ 及び3.0のとき

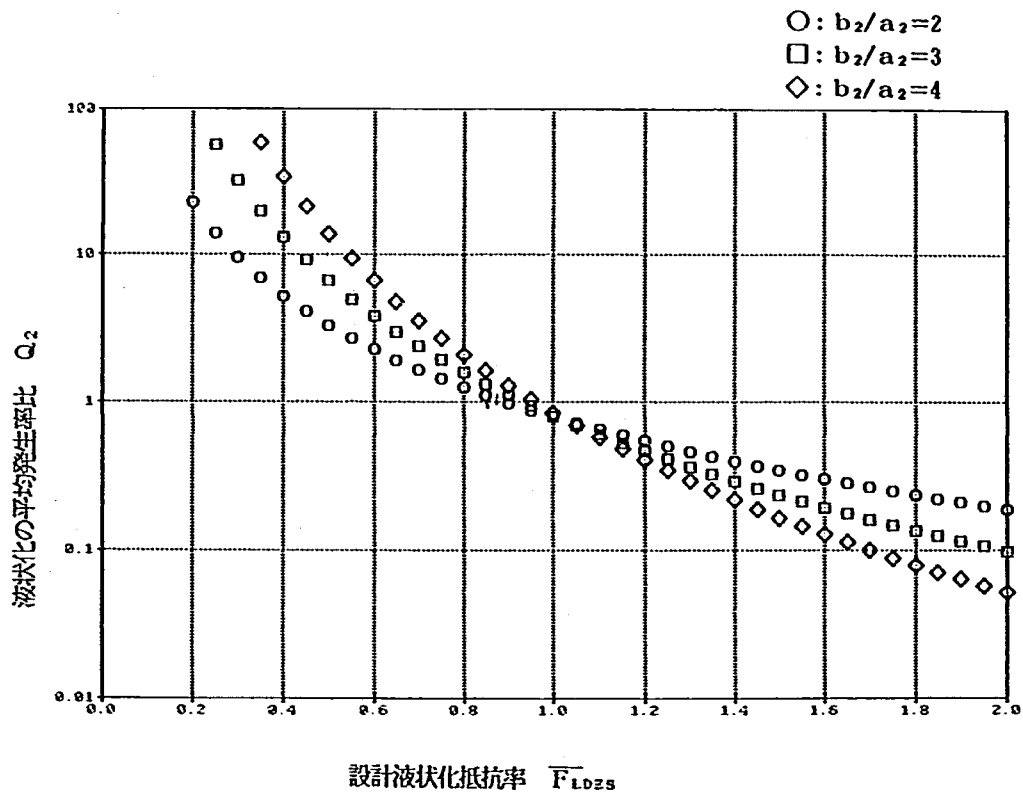


(1) 細粒分含有率40%未満を対象としたとき



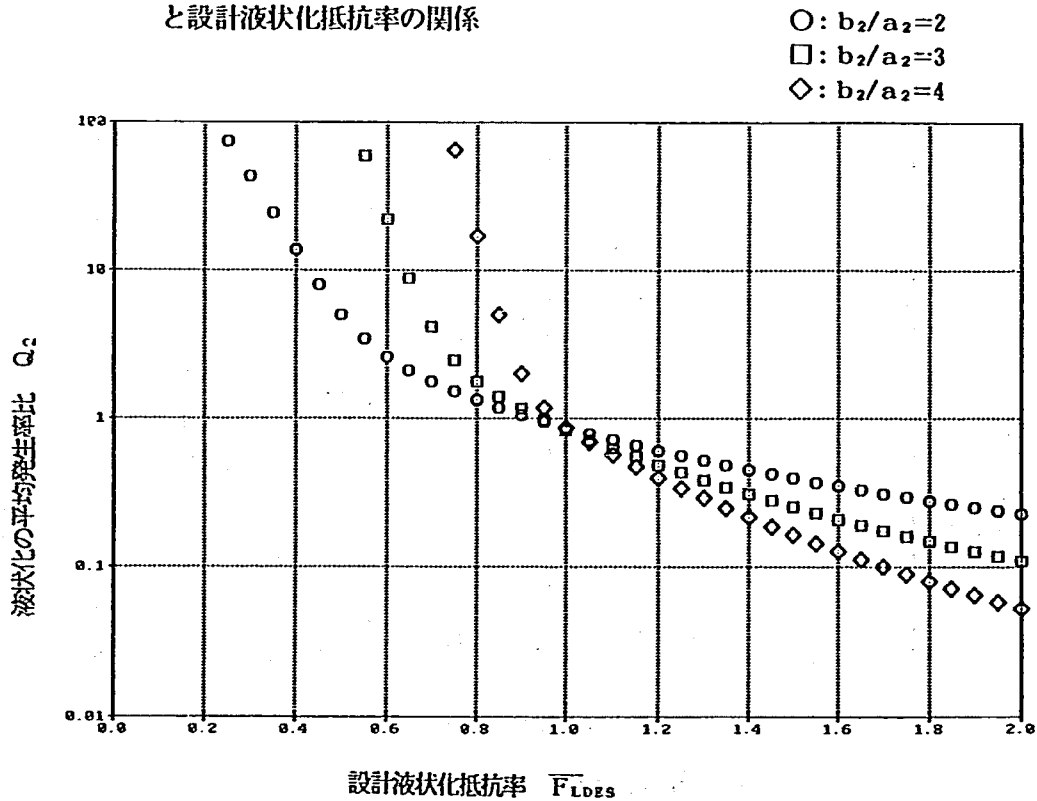
(2) 細粒分含有率10%未満を対象としたとき

図6.3 液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係



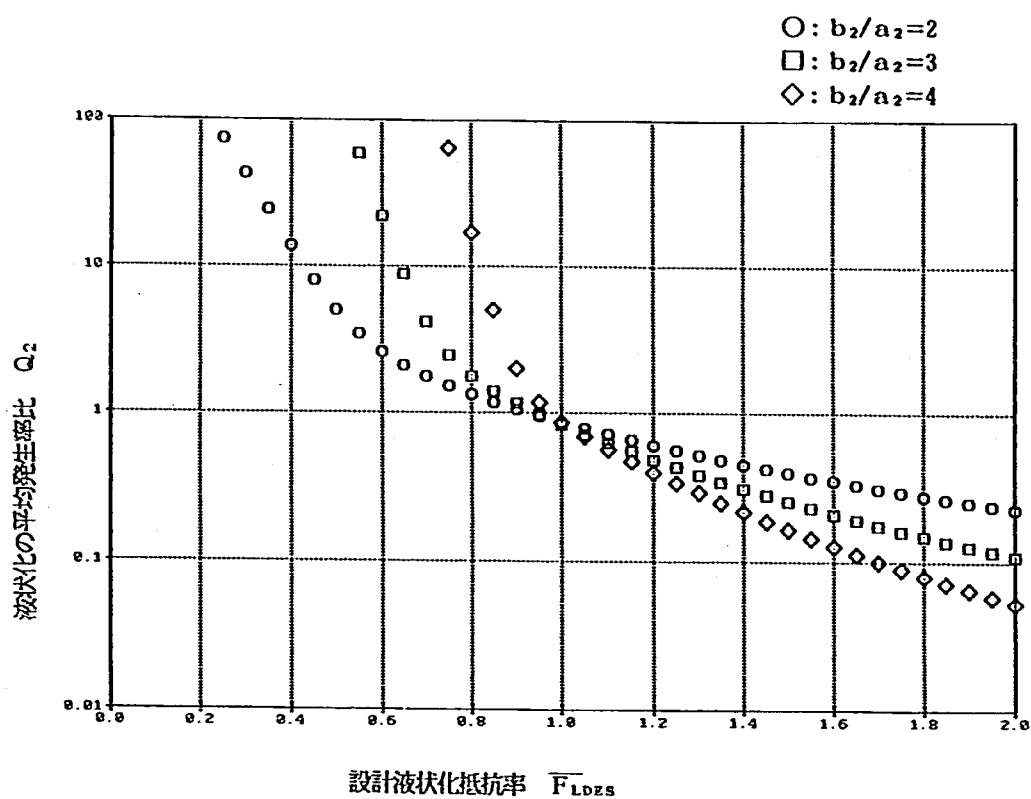
(3) 細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたとき

図6.3 液状化抵抗率を正規分布の確率変数とした場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係

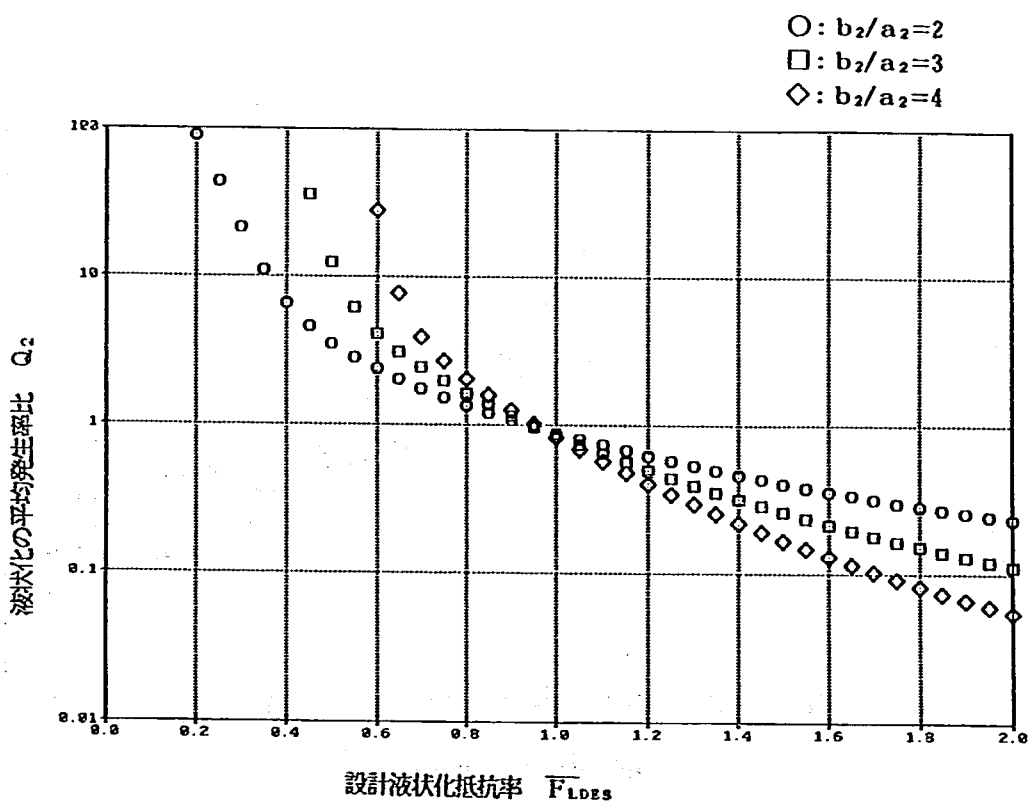


(1) 設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.2$ の場合

図6.4 動的せん断強度比をタイプ1の正規分布としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係 (細粒分含有率40%未満の場合)

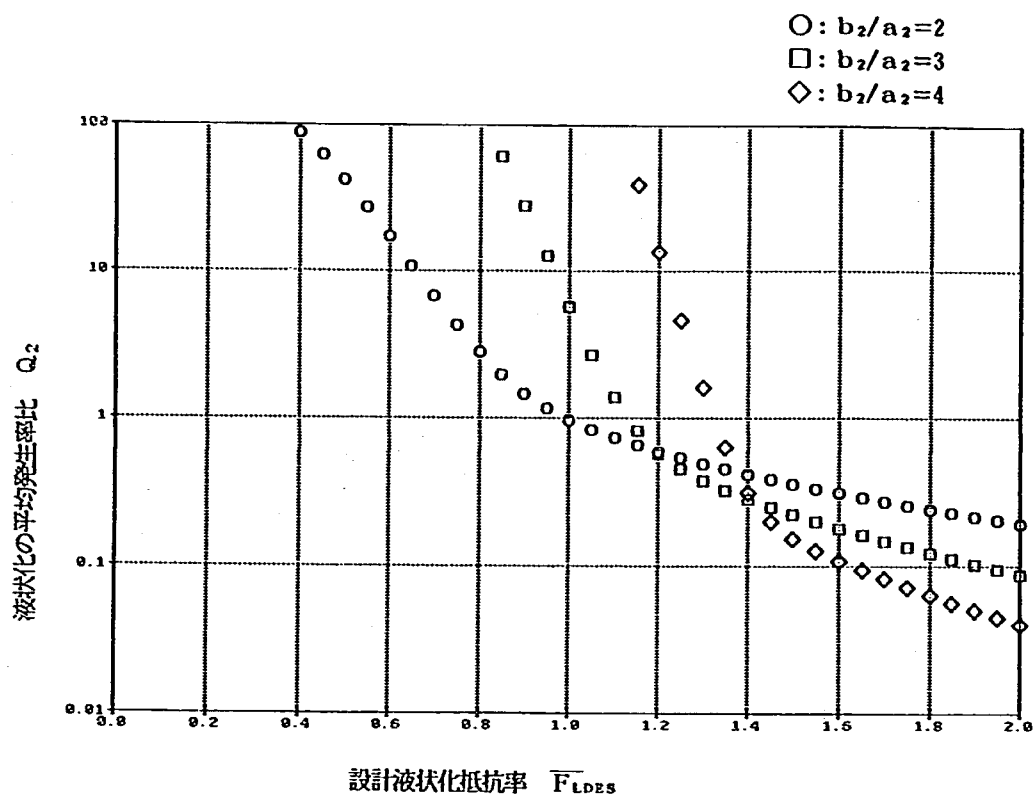


(2) 設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.3$ の場合

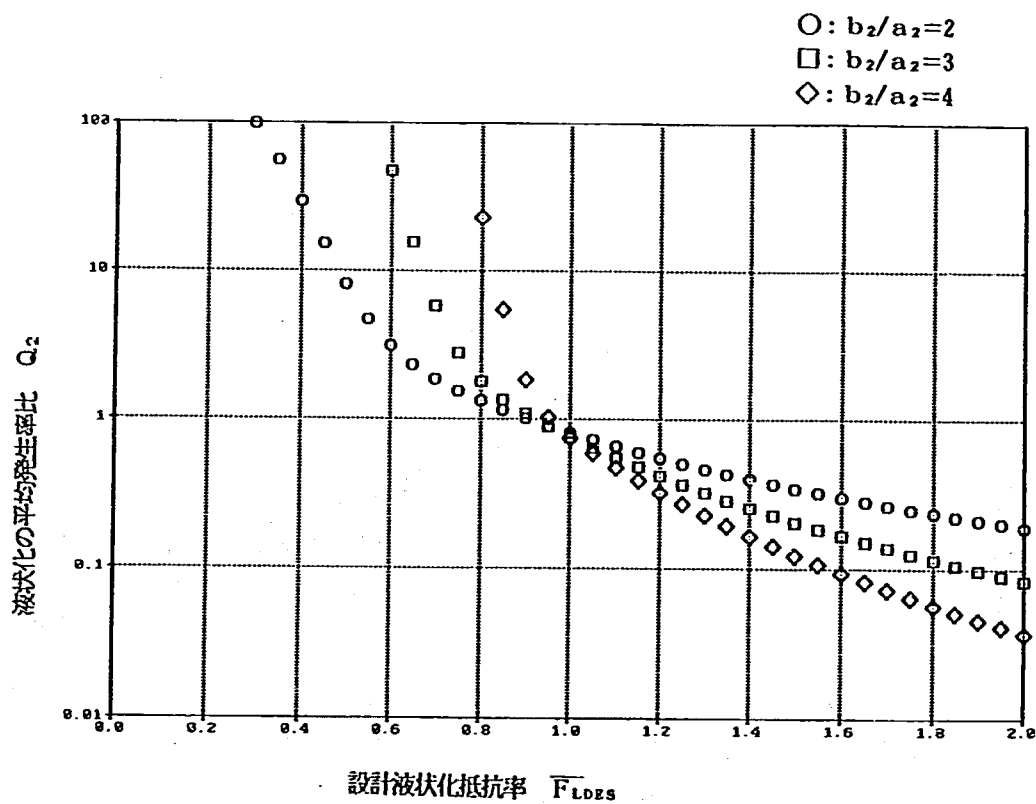


(3) 設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.4$ の場合

図6.4 動的せん断強度比をタイプ1の正規分布としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係(細粒分含有率40%未満の場合)

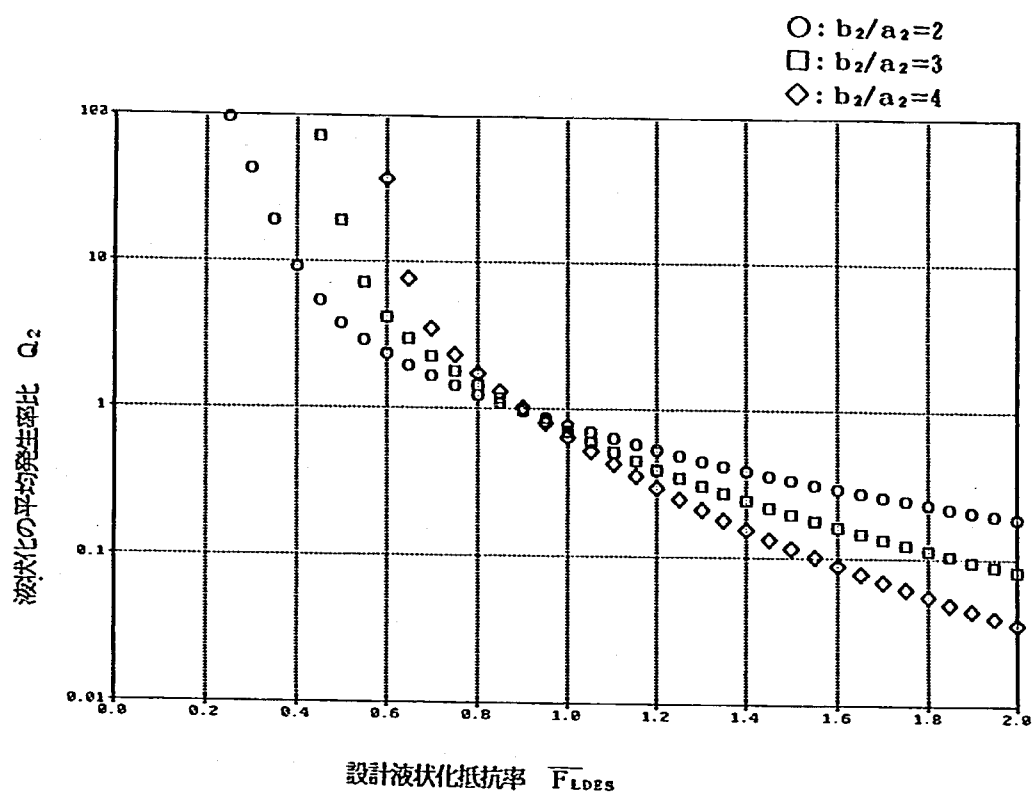


(1) 設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.2$ の場合



(2) 設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.3$ の場合

図6.5 動的せん断強度比をタイプ2の正規分布としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係(細粒分含有率40%未満の場合)



(3) 設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.4$ の場合

図6.5 動的せん断強度比をタイプ2の正規分布としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係 (細粒分含有率40%未満の場合)

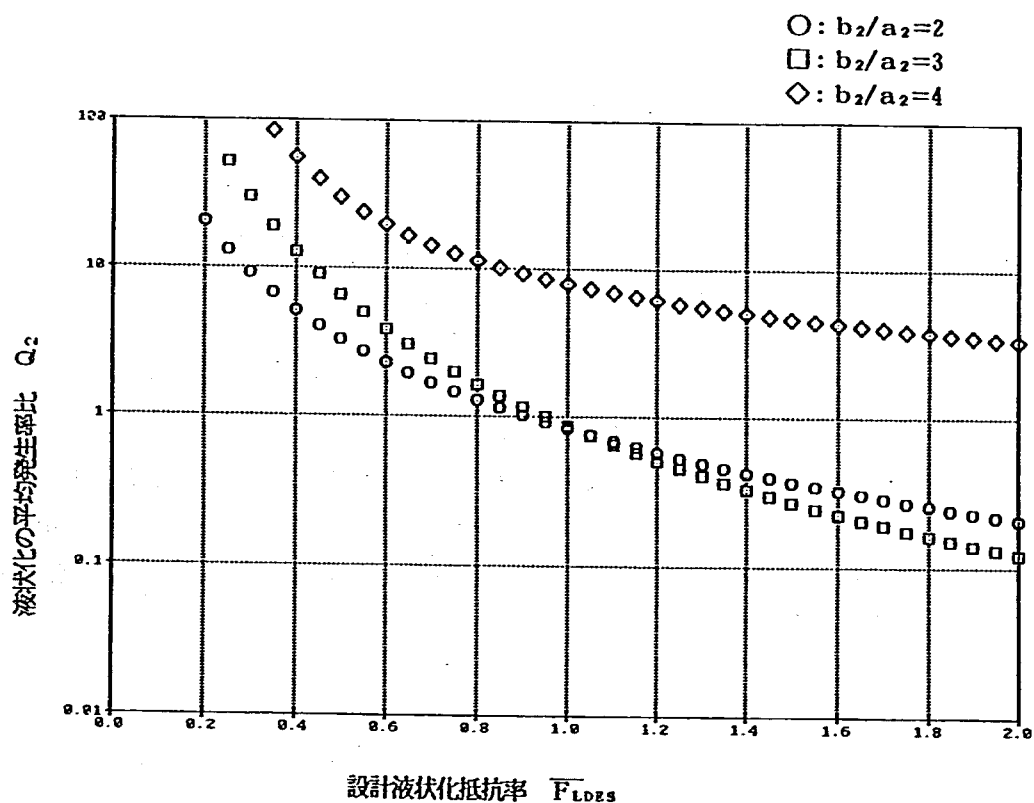


図6.6 動的せん断強度比をタイプ3の正規分布としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係 (細粒分含有率40%未満の場合)

の結果は、液状化抵抗率を確率変数としたときとほぼ一致する。

対象とする細粒分含有率の範囲を変えたときの、各タイプの計算結果を図6.7、図6.8に示す。いずれの場合も、タイプ1及びタイプ2に関しては、上記1)と同様の傾向が見られた。タイプ3に関しては、細粒分含有率10%未満を対象とした図6.7(3)は、液状化抵抗率を確率変数としたときとほぼ一致したのに対し、10%以上40%未満を対象とした図6.8(3)では、 b_2/a_2 が3.0以上になると Q_2 が全般的に10以上となり、表4.10より既往の事例に対する近似度は比較的高かったにもかかわらず、非現実的な結果となった。詳細な理由は未検討であるが、動的せん断強度比の分布の標準偏差が大きくなること、このような非現実的な挙動に関与しているものと考えられる。

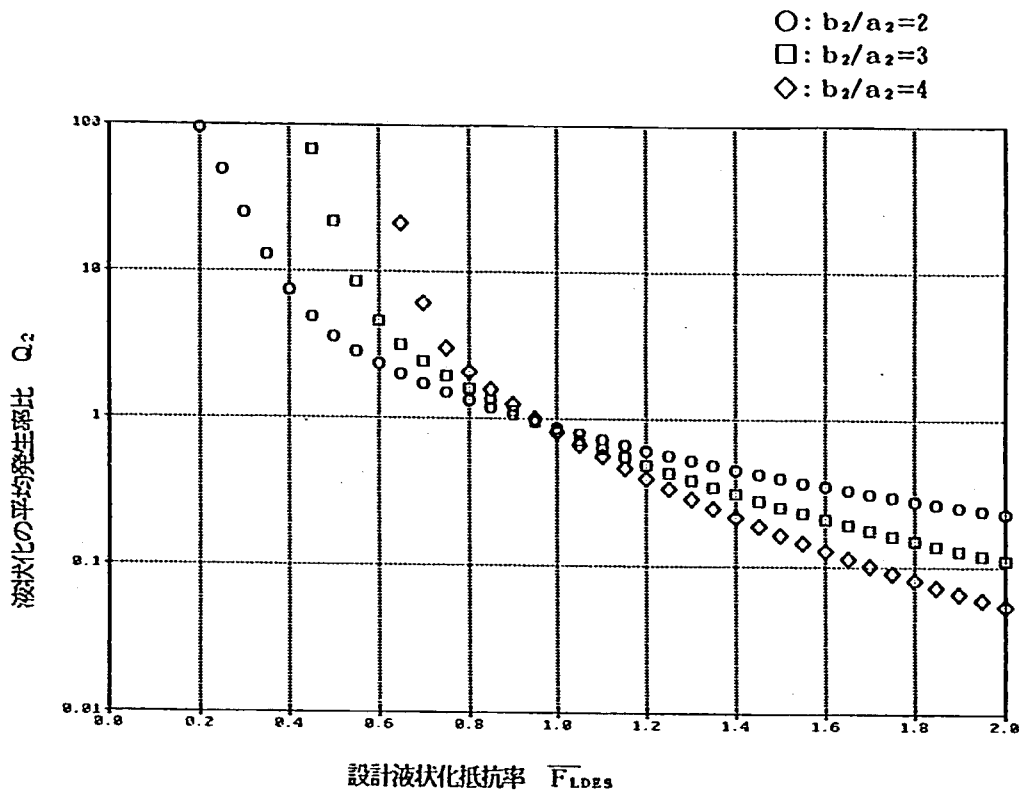
(2) 地震マグニチュードの影響を考慮した場合

細粒分含有率40%未満を対象に、最大マグニチュード $M_{max}=8.5$ 、最小マグニチュード $M_{min}=3.0$ 、設計マグニチュード $M_{DES}=7.5$ としたときの、 Q_2 と $\overline{F}_{LDES}$ の関係を図6.9に示す。(1)及び(2)は、それぞれ液状化抵抗率の分布形状として正規分布及び一様分布を用いた場合の結果であるが、両者はほぼ一致しており、分布形状の影響はほとんどないことがわかる。また、これらの図は $a_2=0.313$ としたときのものであるが、 $a_2=0.265$ とした(3)と比較すると、 a_2 の影響もほとんどないことがわかる。

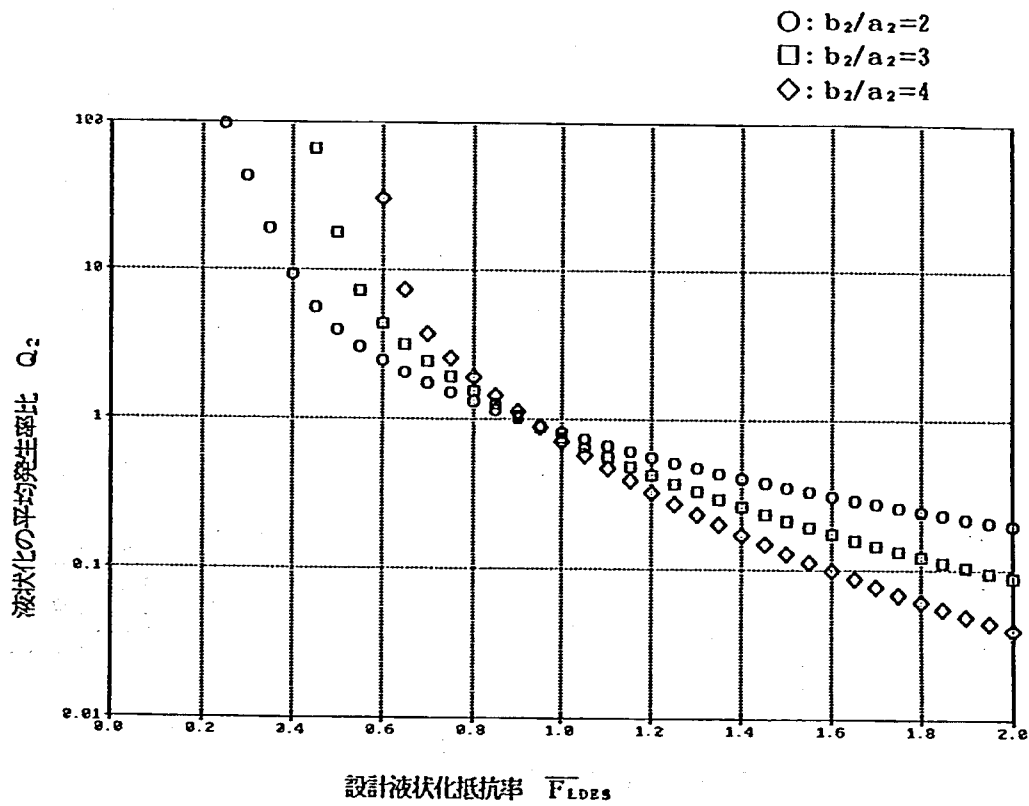
さらに、図6.9(1)を、地震マグニチュードの影響を考慮しない場合の結果である図6.3(1)と比較すると、全般的には Q_2 はあまり変化しておらず、 $\overline{F}_{LDES}$ が非常に小さく、あるいは非常に大きくなったときに地震マグニチュードの影響を考慮した場合のほうが Q_2 が若干小さくなることがわかる。

液状化抵抗率の分布形状として一様分布を用いて、 $a_2=0.313$ とした場合に、 M_{max} 、 M_{min} 及び M_{DES} を変化させたときの Q_2 と $\overline{F}_{LDES}$ の関係を図6.10に示す。対応する図6.9(2)と比較すると、各要因の影響として以下の点が挙げられる。

- 1) M_{min} を大きくすると、 Q_2 が若干小さくなる。これは、式(6.36)中の M に関する積分範囲の変化に対応している。しかし、 Q_2 の差は微小であることから、 $M_{DES}=7.5$ のときには、少なくともマグニチュード6.0以下の地震の影響はきわめて小さいことがわかる。
- 2) M_{max} を大きくすると、 $\overline{F}_{LDES}$ が大きいたときには Q_2 が大きくなり、逆に $\overline{F}_{LDES}$ が小さいときには Q_2 が小さくなる。これは、上述した積分範囲のほかに、式(6.36)の右辺第1項の分母も変化し、それぞれの影響が $\overline{F}_{LDES}$ の大きさによって異なることによるものと考えられる。
- 3) M_{DES} を小さくしたときの Q_2 の変化の傾向は、 M_{max} を大きくしたときと同様である。これは、式(6.36)中の $M_{max}-M_{DES}$ が、どちらの場合も大きくなることによると考えられる。(前者では $M_{min}-M_{DES}$ が変化するが、その影響は、1)と同様に小さいものと考えられる。)
- 4) M_{DES} を大きくしたときの Q_2 の変化の傾向は、当然ながら2)及び3)と反対で、特に、 $\overline{F}_{LDES}$ が大きくなると急激に Q_2 が減少する点が、他のケースと比べて特徴的である。これは、設計で想定している地震動レベルが実際に生じうる最大値に近づいて、 $\overline{F}_{LDES}$ が十分に大きいときには後者の地震に対しても液状化確率が非常に小さくなるためと考えられる。

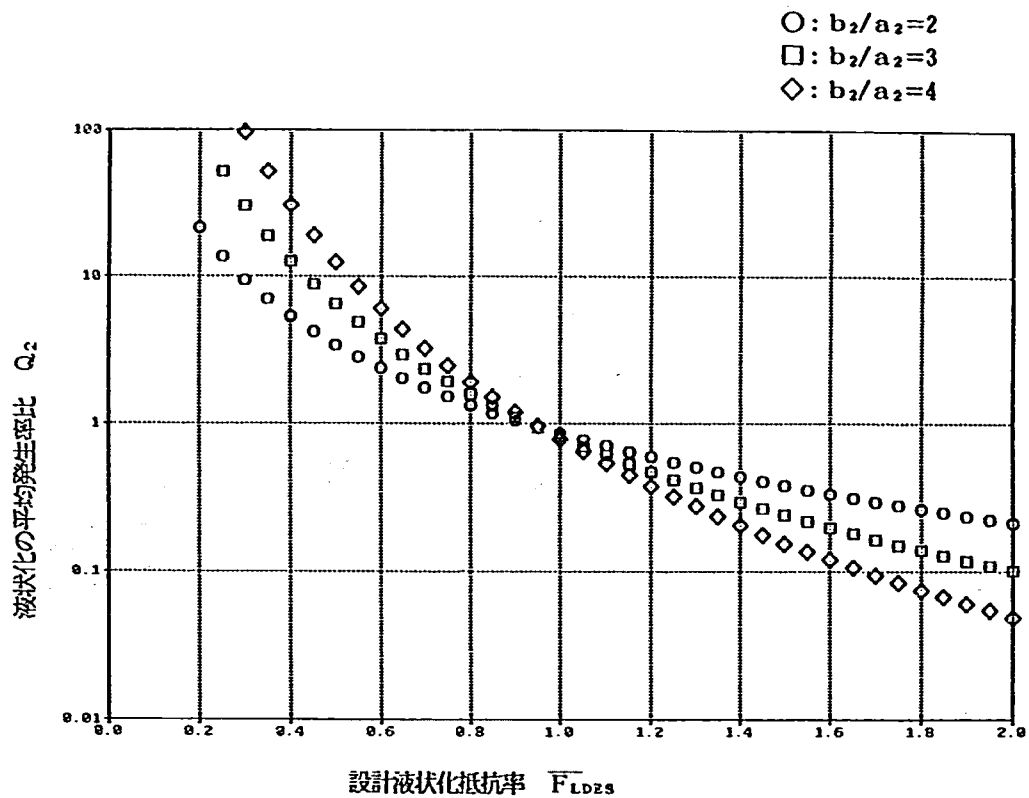


(1) タイプ1 (設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.3$)



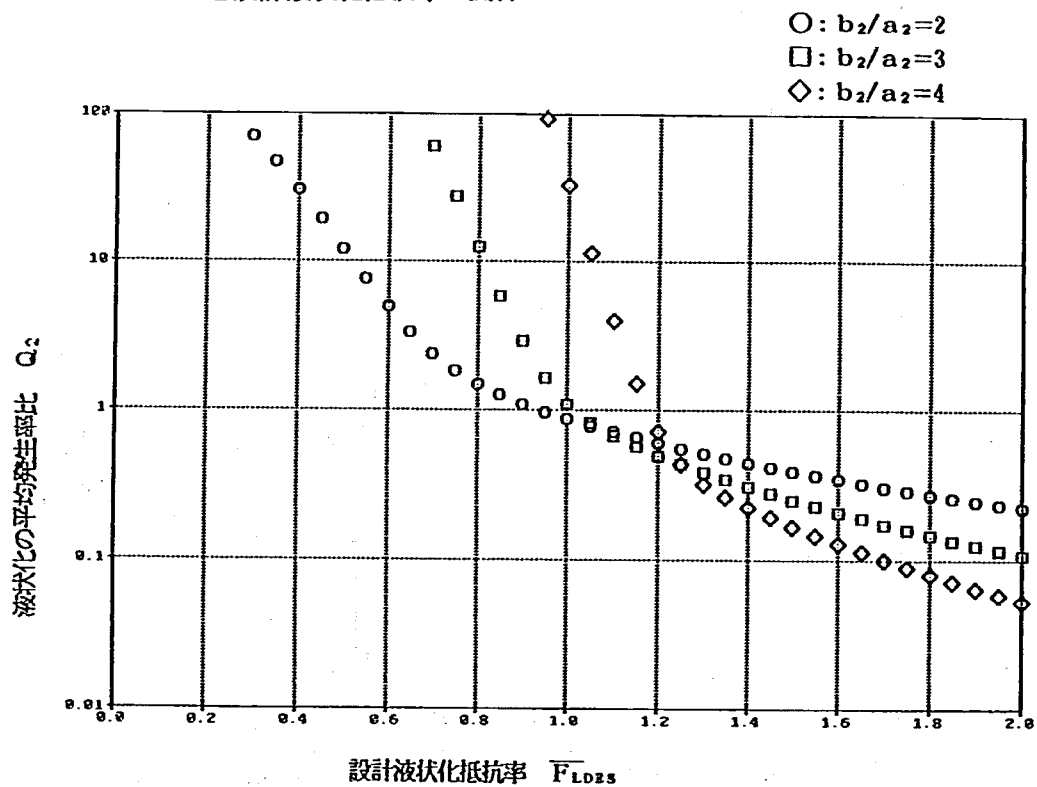
(2) タイプ2 (設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.3$)

図6.7 細粒分含有率10%未満を対象としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係



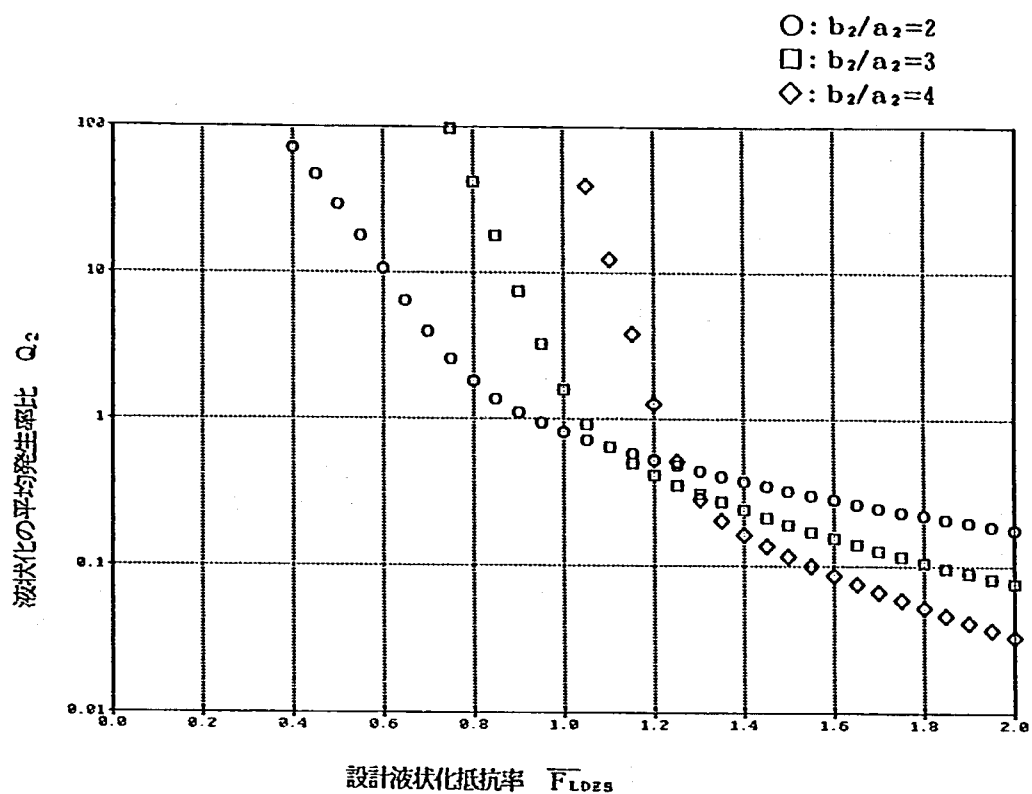
(3) タイプ3

図6.7 細粒分含有率10%未満を対象としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係

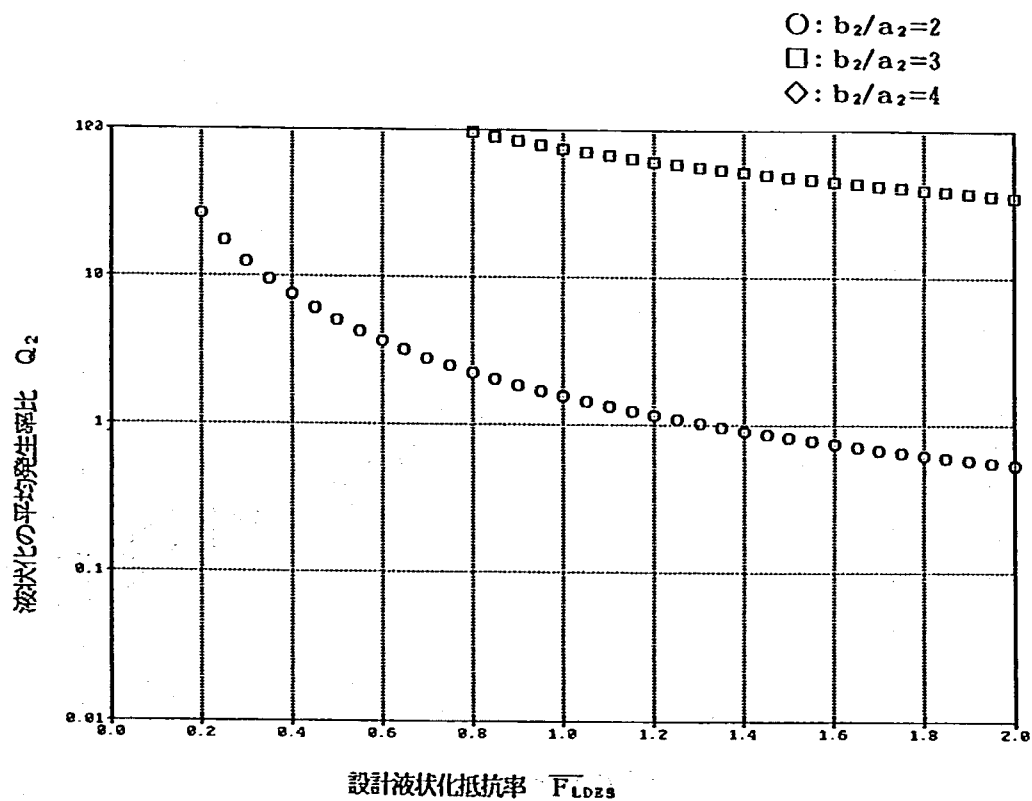


(1) タイプ1 (設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.3$)

図6.8 細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係

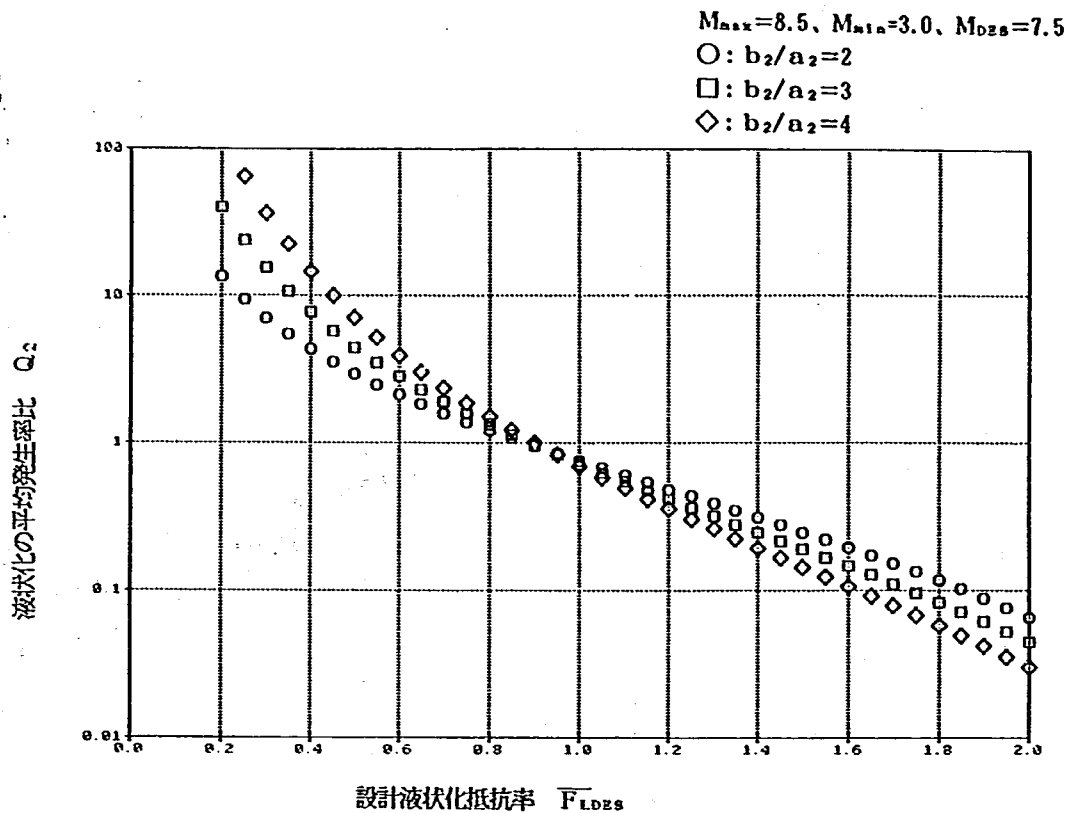


(2) タイプ2 (設計地震時せん断応力比 $L_{DES}=0.3$)

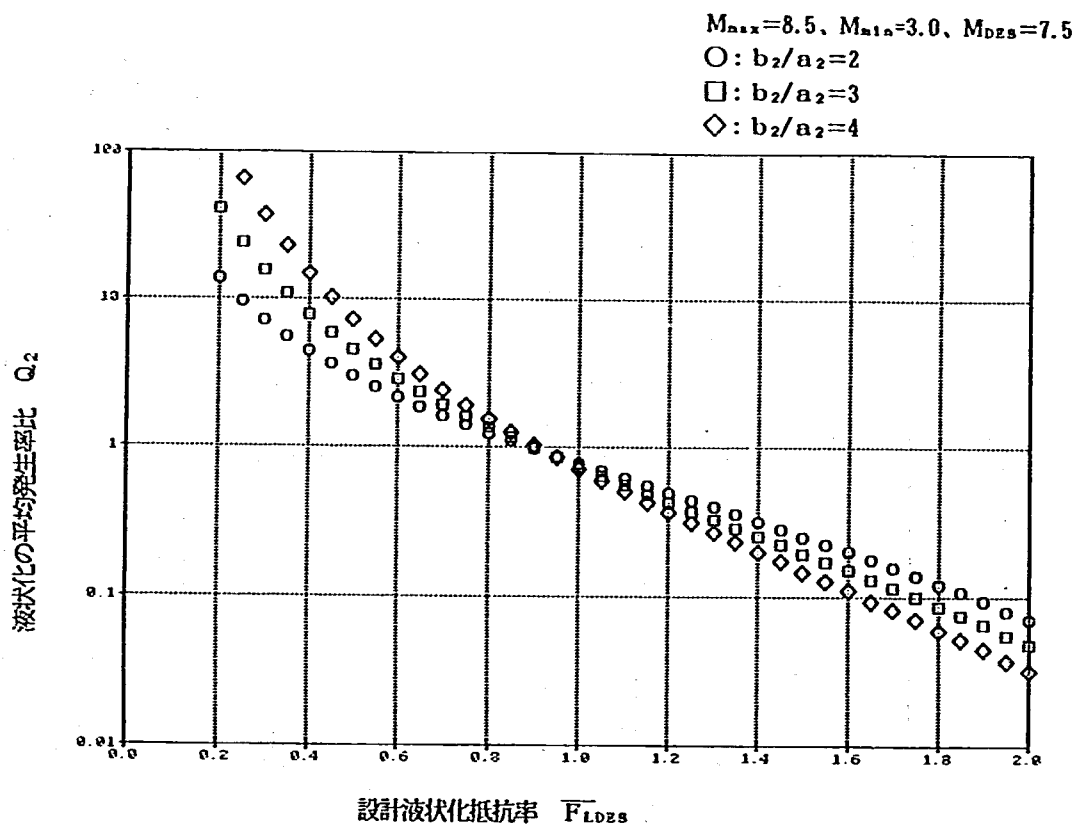


(3) タイプ3

図6.8 細粒分含有率10%以上40%未満を対象としたときの液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係

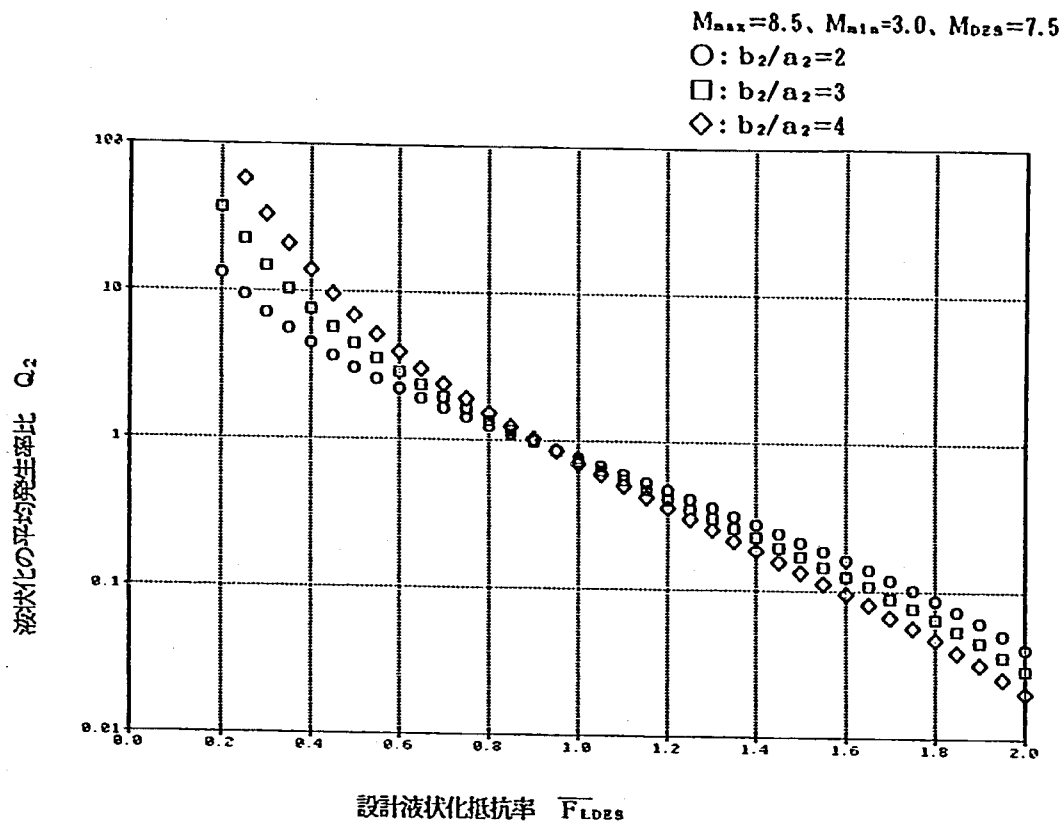


(1) 液状化抵抗率を正規分布の確率変数としたとき ($a_2=0.313$)



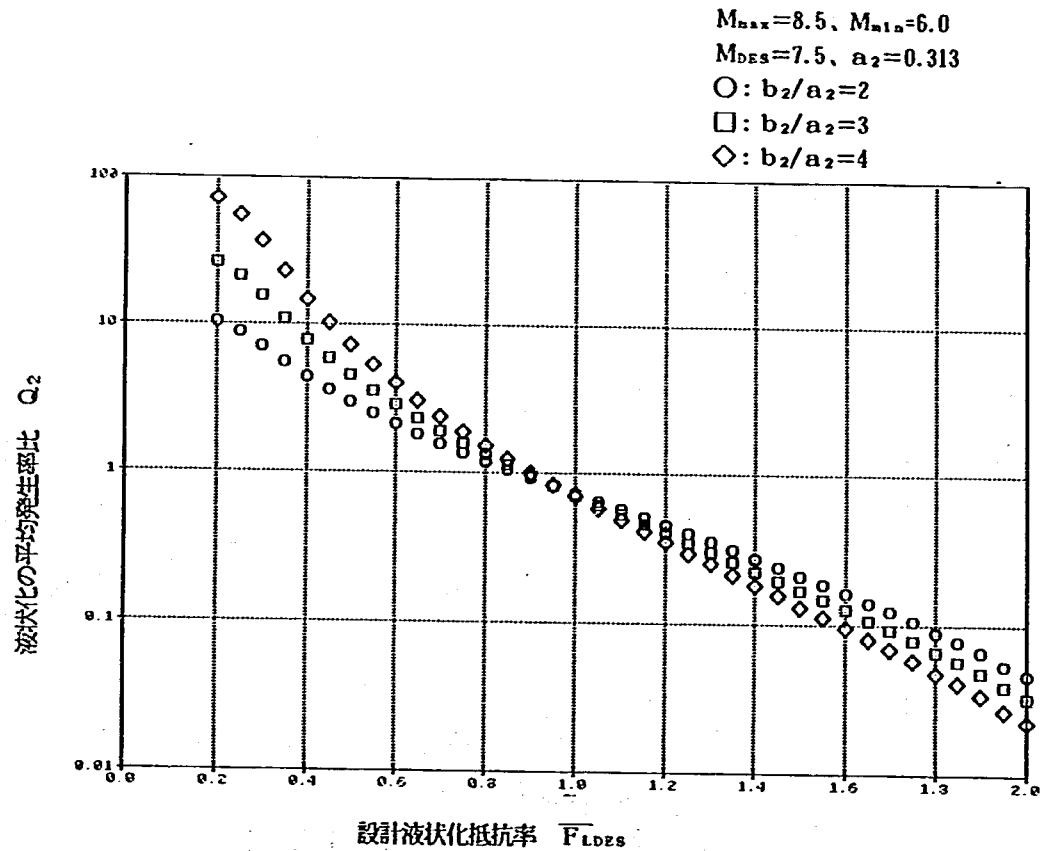
(2) 液状化抵抗率を一様分布の確率変数としたとき ($a_2=0.313$)

図6.9 地震マグニチュードの影響を考慮した場合の液状化の平均発生率比
と設計液状化抵抗率の関係



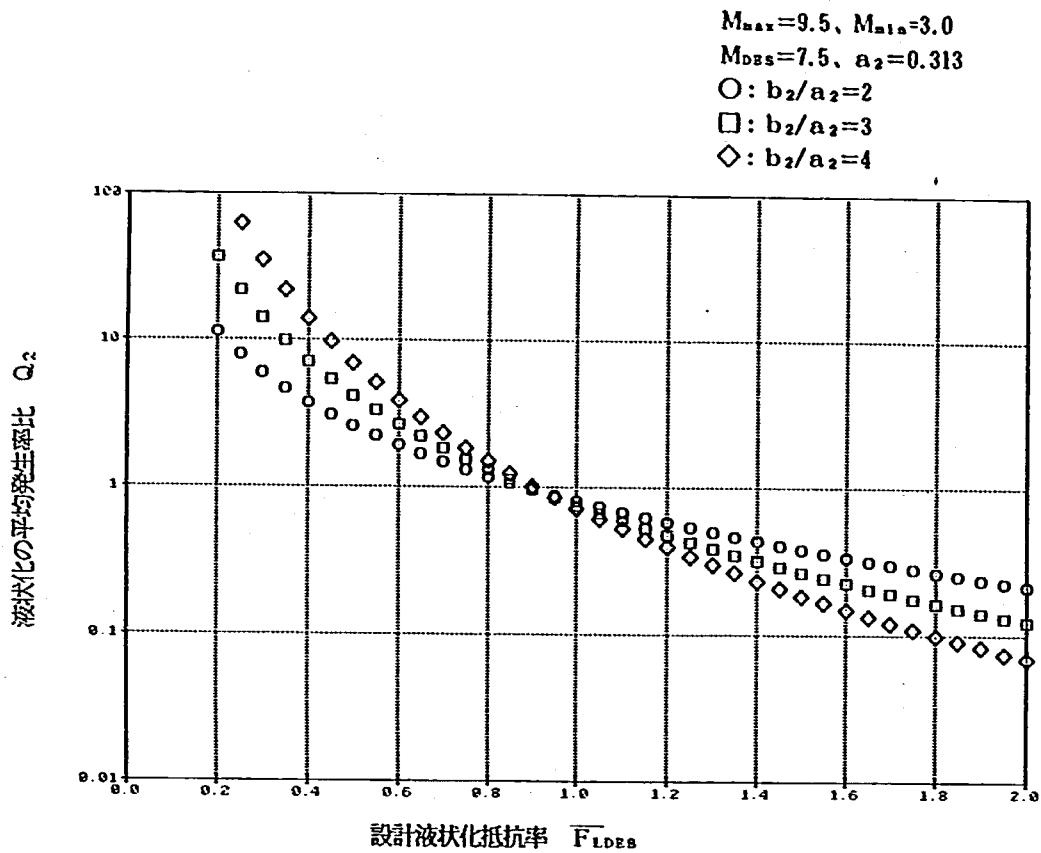
(3) $a_2=0.265$ としたとき (一様分布)

図6.9 地震マグニチュードの影響を考慮した場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係

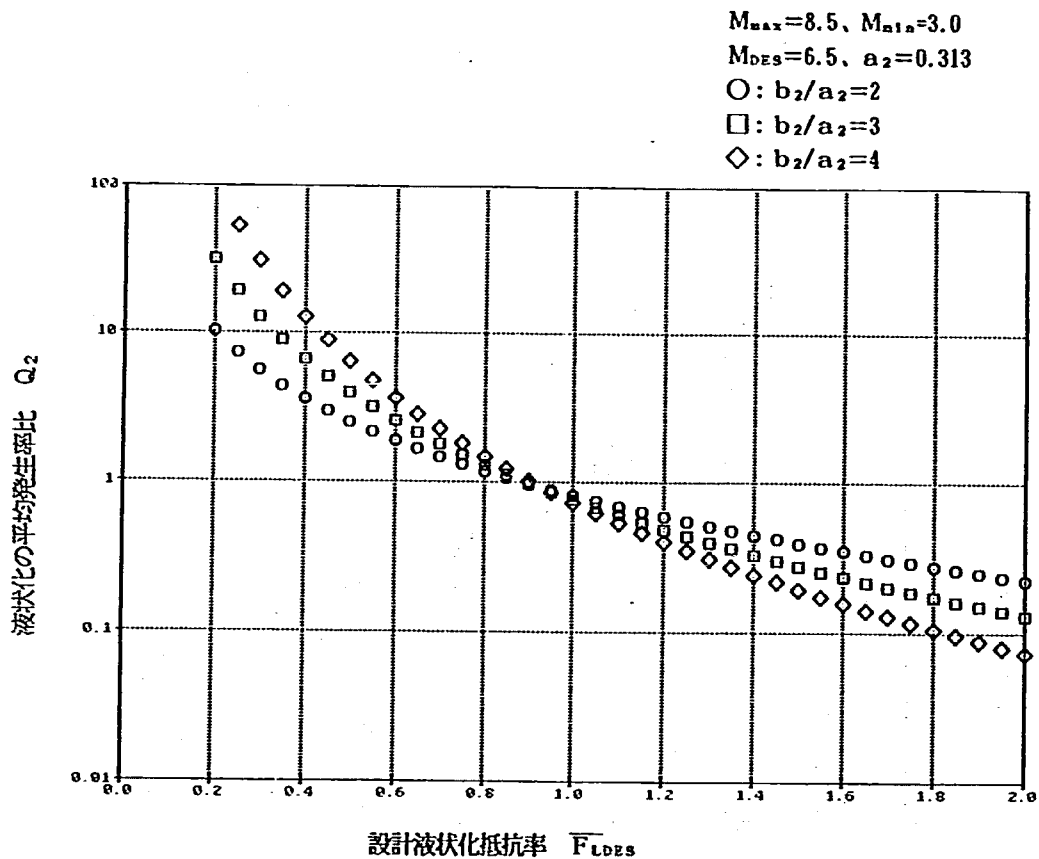


(1) 最小マグニチュードを大きくしたとき

図6.10 地震動の設定値を変えた場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係

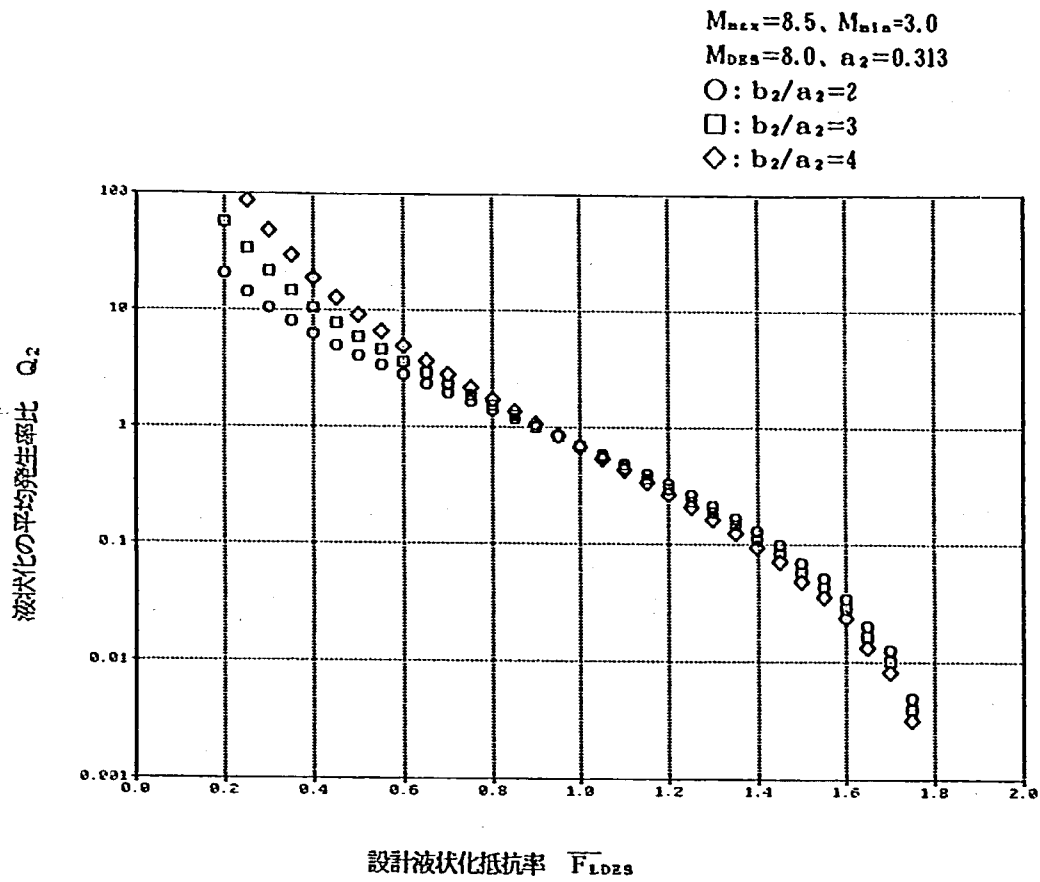


(2) 最大マグニチュードを大きくしたとき



(3) 設計マグニチュードを小さくしたとき

図6.10 地震動の設定値を変えた場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係



(4) 設計マグニチュードを大きくしたとき

図6.10 地震動の設定値を変えた場合の液状化の平均発生率比と設計液状化抵抗率の関係

6.2.2 浮上がりの平均発生率

(1) 過剰間隙水圧の発生特性の影響

$M_{max}=8.5$ 、 $M_{min}=3.0$ 、 $M_{DES}=7.5$ 、 $a_2=0.313$ 、 $F_{u0}=1.5$ 、 $R_S=2/3$ とし、過剰間隙水圧の発生特性として p_d を7に固定して、 p_r を変えた場合の浮上がり安全率の設計値 F_{uDES} と浮上がりの平均発生率比 Q_3 の関係を図6.11に示す。 p_r が小さくなるほど Q_3 が大きくなり、特に、 $p_r=2$ の場合には F_{uDES} が1.1のときの Q_3 は1.0以上で、設計で想定した地震の平均発生率よりも浮上がりの平均発生率のほうが高いという結果が得られた。 Q_3 が1.0以下となる F_{uDES} は、 $p_r=7$ 、4、2のそれぞれに対して0.8、1.1、1.4程度であった。

また、いずれの場合においても、 Q_3 を0.1とするためには F_{uDES} を F_{u0} にかなり近づける必要があり、液化化が問題となるような地盤においてこの条件を満足させることは、実質的にはほとんど不可能であることがわかった。これは、同じ条件で液化化平均発生率比を求めた図6.9(2)において、 Q_2 が0.1以下となる F_{LDES} が1.6程度以上とかなり大きな値であったことと対応している。

なお、これらの図には b_2/a_2 を3通りに変えた結果を示しているが、この値に応じて Q_3 は若干変化するものの、 Q_3 に対する影響度は p_r のほうが大きかった。そこで、以下では b_2/a_2 を3.0に固定して、 p_r を変えた計算を行った。一部のケースでは正規分布を仮定した計算も実施したが、結果は一様分布の場合とほとんど一致していた。

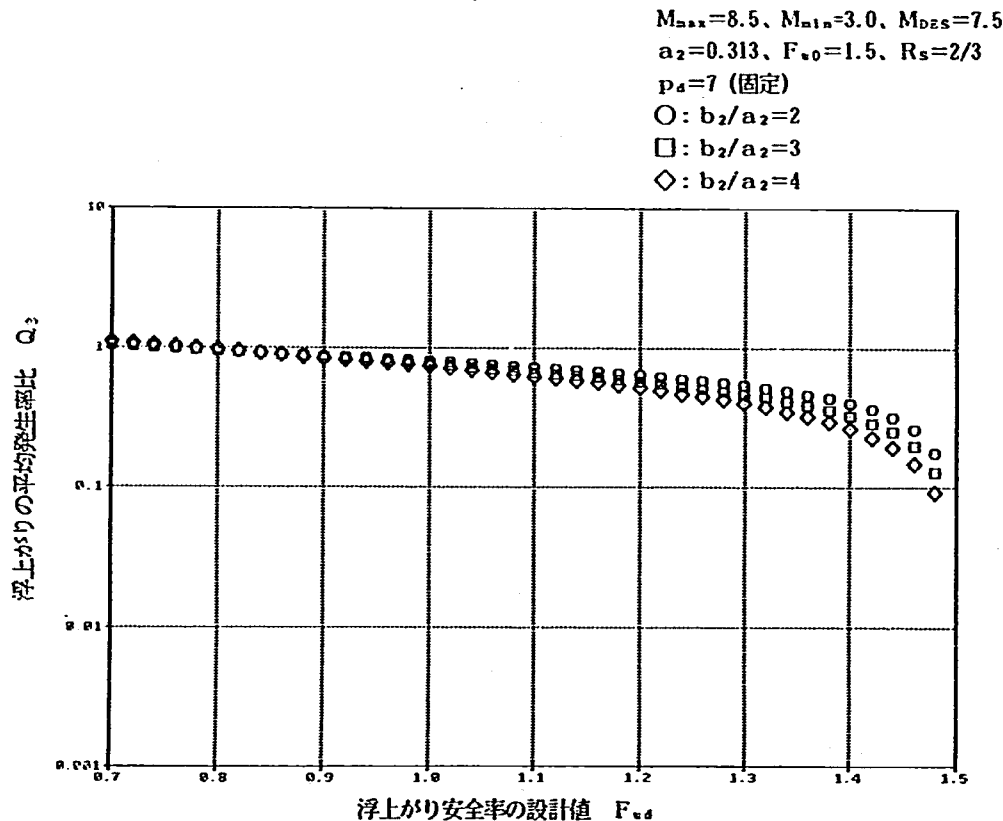


図6.11 過剰間隙水圧の発生特性を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの平均発生率比の関係

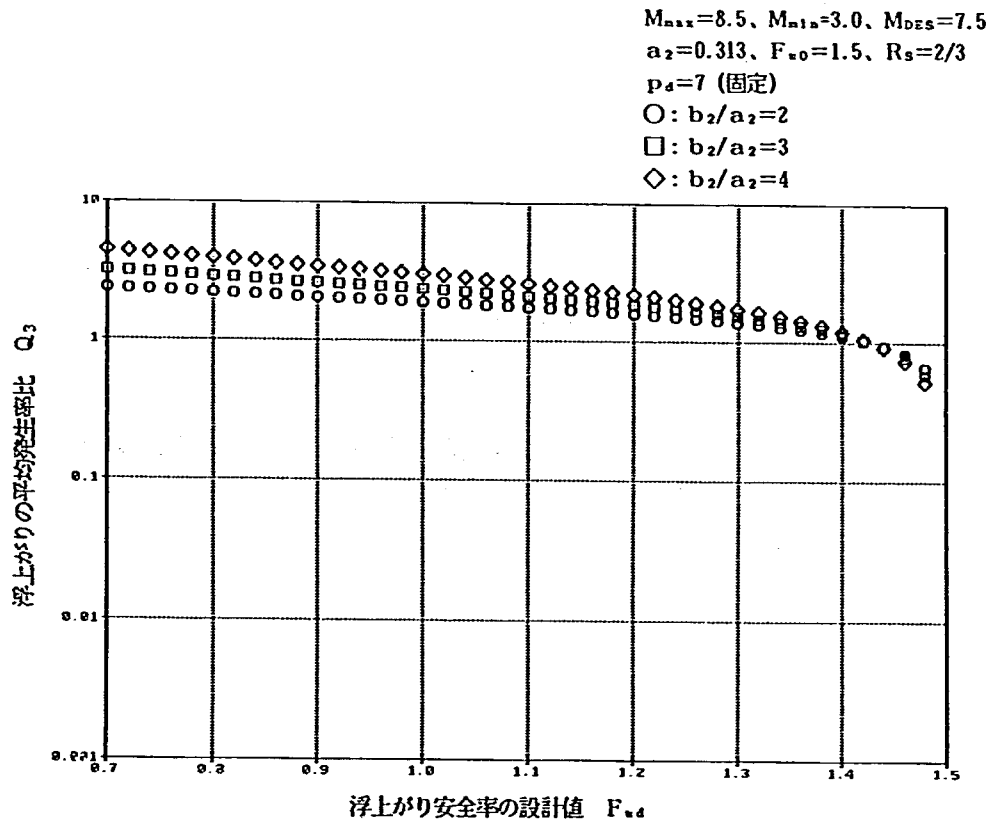
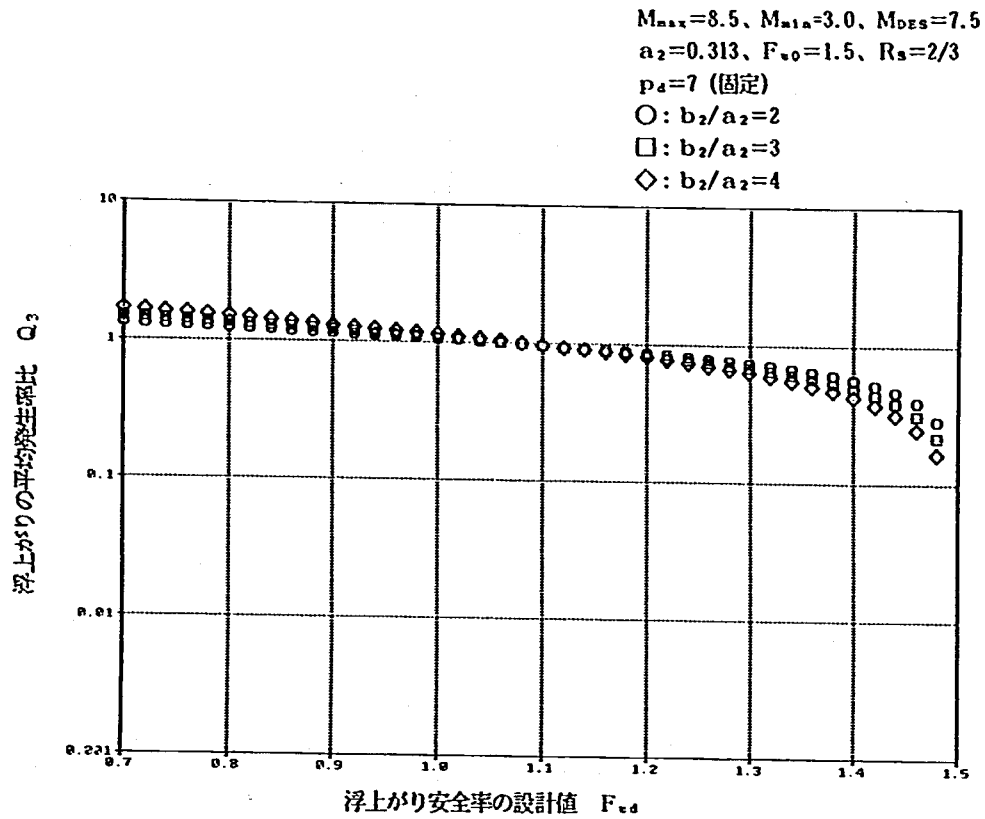


図6.11 過剰間隙水圧の発生特性を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの平均発生率比の関係

(2) 地震動の設定値の影響

M_{DES} と a_2 を変えた場合の結果を図6.12に示す。(1)は、図6.11で $b_2/a_2=3.0$ のときの結果をまとめたものである。(2)は a_2 を変えた場合であるが、結果は(1)とほとんど変わらなかった。(3)は M_{DES} を大きくした場合であるが、 F_{uDES} が大きいときの Q_3 の減少率が(1)よりも大きくなった。これらは、液状化の平均発生率比に関して得られた傾向と一致している。

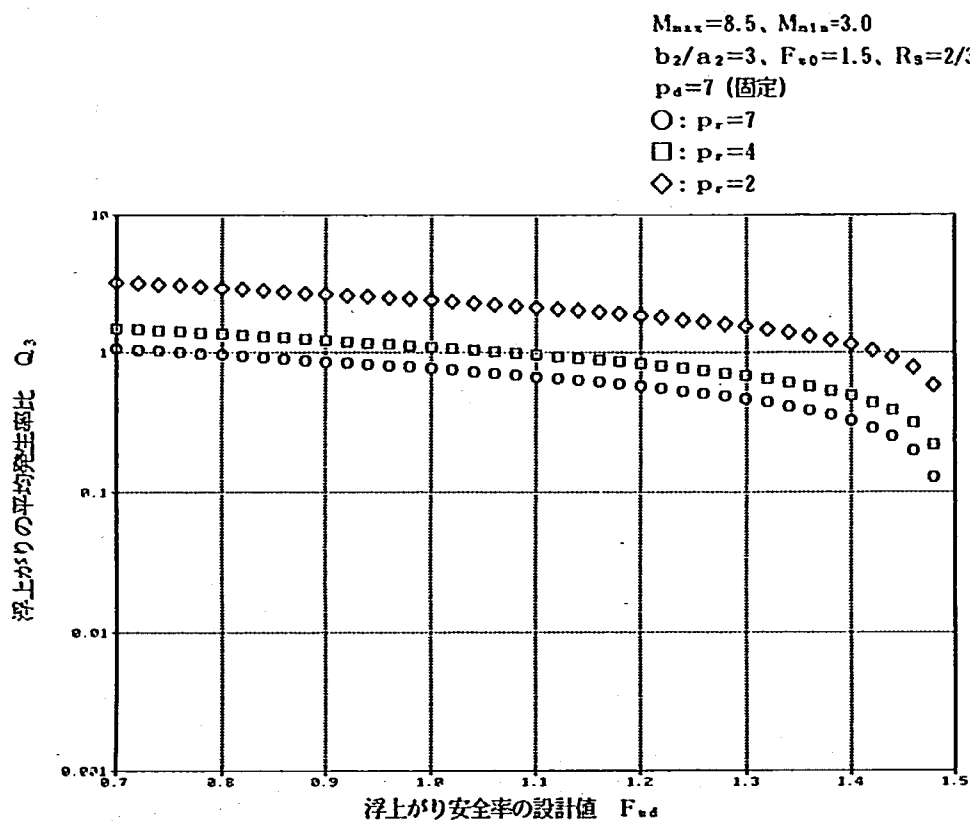
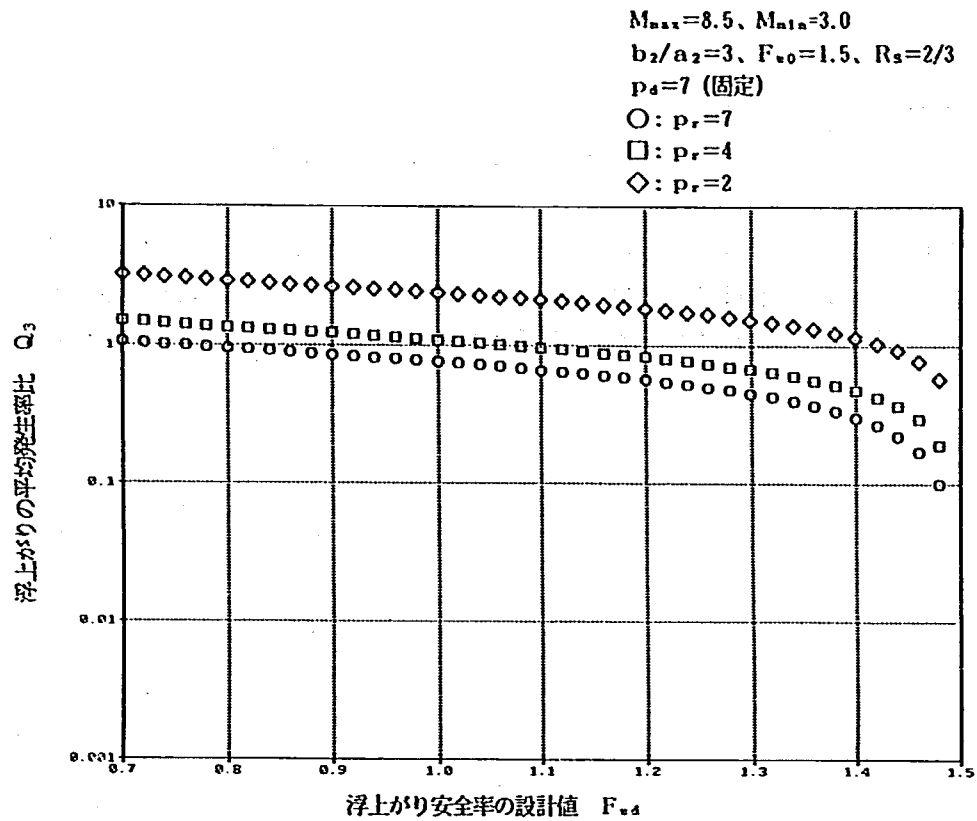
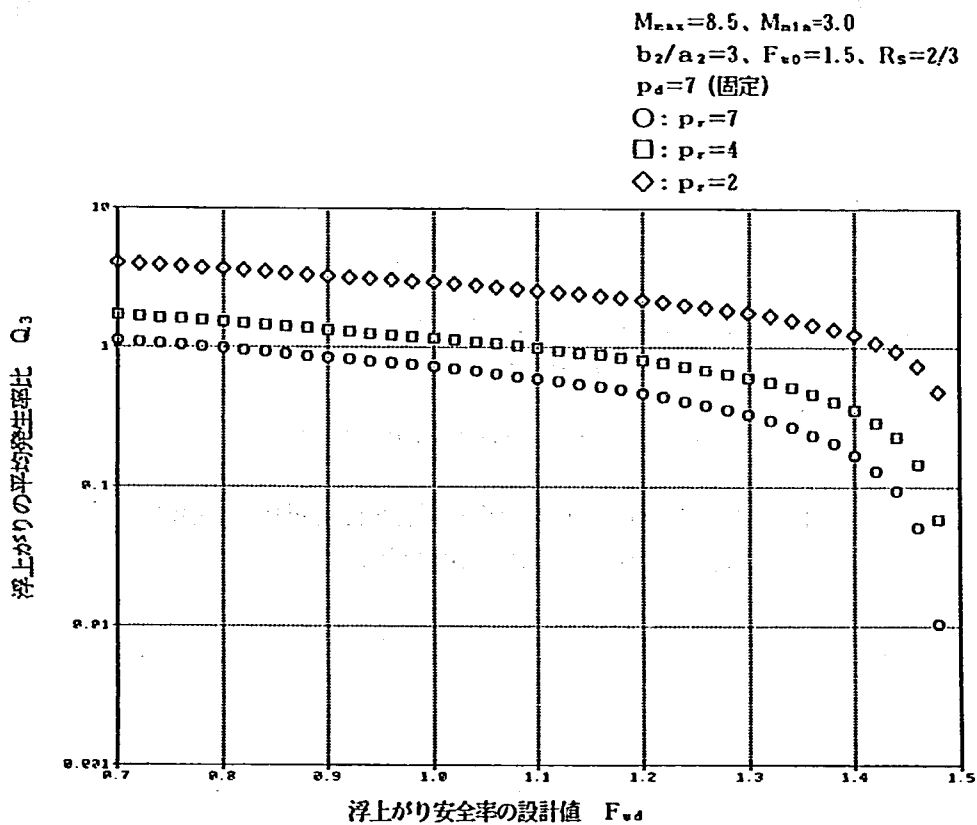


図6.12 地震動の設定値を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの平均発生率比の関係



(2) $a_2=0.265$ のとき ($M_{DES}=7.5$)



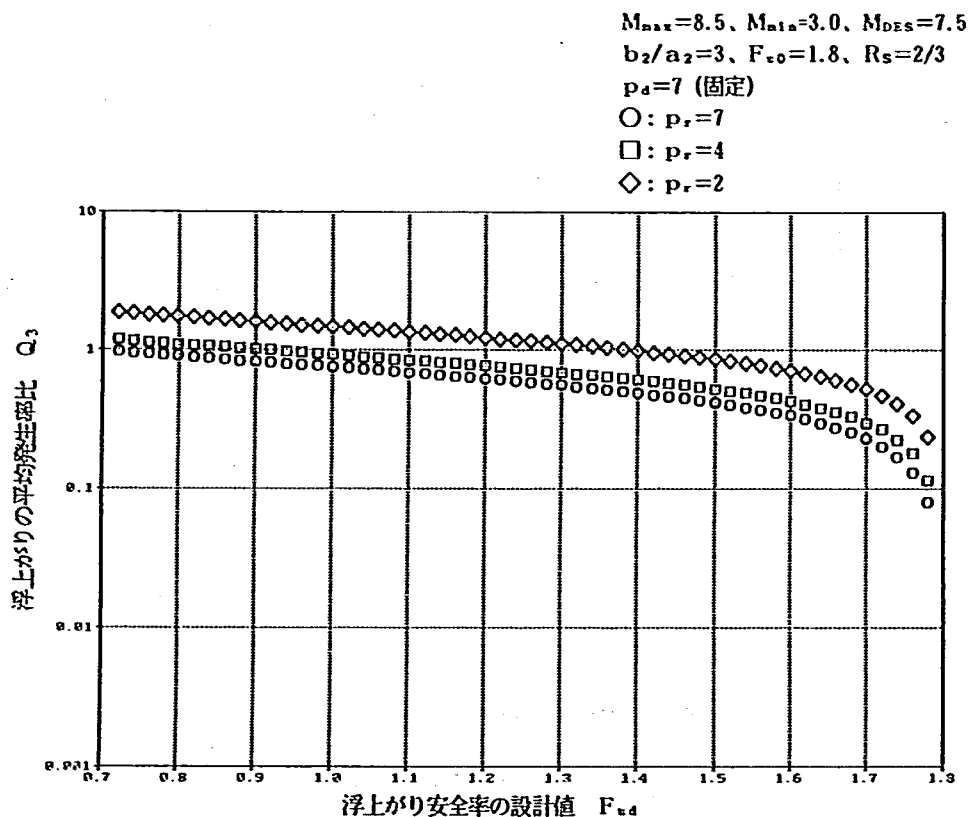
(3) $M_{DES}=8.0$ のとき ($a_2=0.313$)

図6.12 地震動の設定値を変えた場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの平均発生率比の関係

(3) 構造物と地盤の条件の影響

F_{u0} と R_S を変えた場合の結果を図6.13に示す。図6.12(1)と比較すると、これらの条件の影響として以下の点が挙げられる。

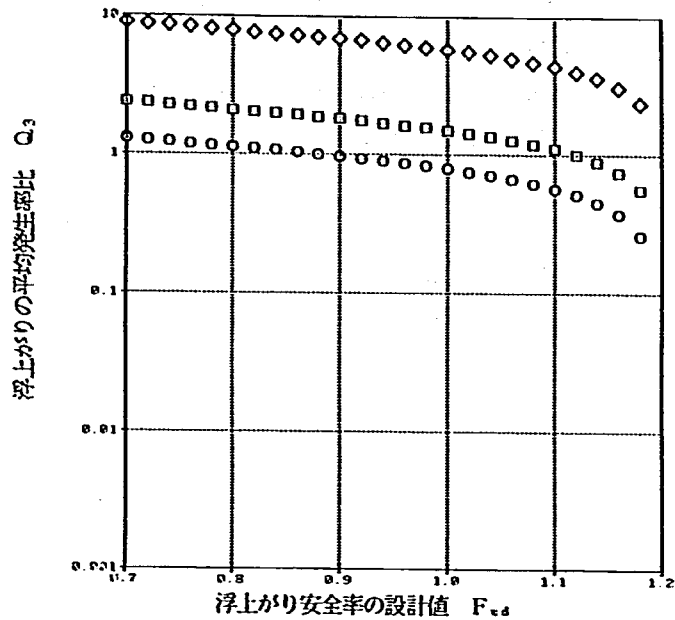
- 1) $p_r=4$ または2の場合には、 F_{u0} が大きくなるほど、同じ F_{uDES} に対応する Q_3 が小さくなる。ただし、 F_{uDES} が F_{u0} に近い値のときには傾向が逆転する。 $p_r=7$ の場合には、 F_{u0} の影響は小さい。
- 2) R_S が小さくなると、 $p_r=4$ または2の場合の F_{uDES} が大きくなる。 $p_r=7$ の場合の R_S の影響は小さい。



(1) 常時の浮上り安全率が大いとき

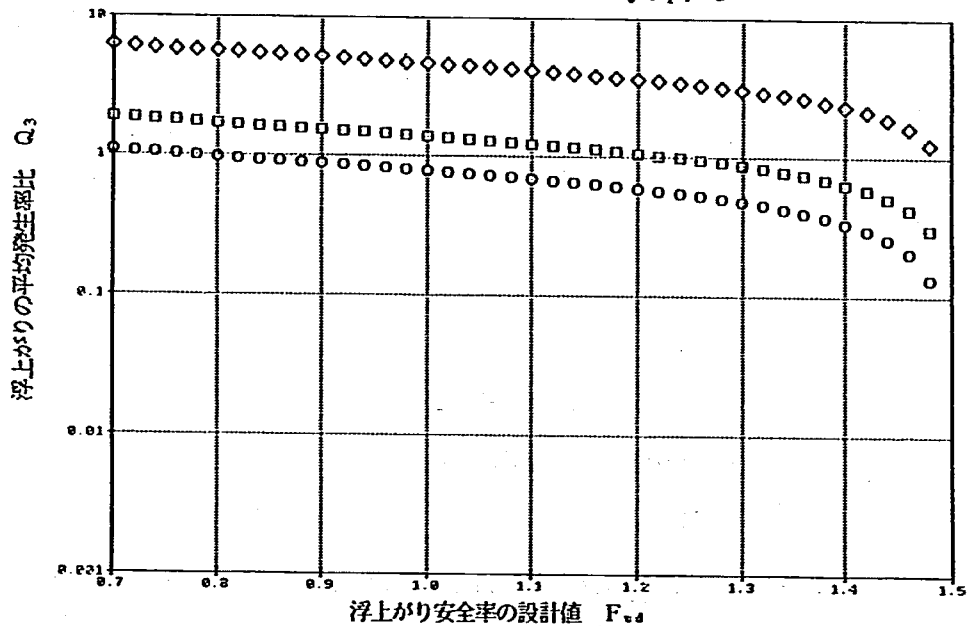
図6.13 構造物・地盤条件を変えた場合の浮上り安全率の設計値と浮上りの平均発生率比の関係

$M_{max}=8.5$, $M_{min}=3.0$, $M_{DES}=7.5$
 $b_2/a_2=3$, $F_{s0}=1.2$, $R_s=2/3$
 $p_d=7$ (固定)
 $\bigcirc$: $p_r=7$
 $\square$: $p_r=4$
 $\diamond$: $p_r=2$



(2) 常時の浮上り安全率が小さいとき

$M_{max}=8.5$, $M_{min}=3.0$, $M_{DES}=7.5$
 $b_2/a_2=3$, $F_{s0}=1.5$, $R_s=1/3$
 $p_d=7$ (固定)
 $\bigcirc$: $p_r=7$
 $\square$: $p_r=4$
 $\diamond$: $p_r=2$



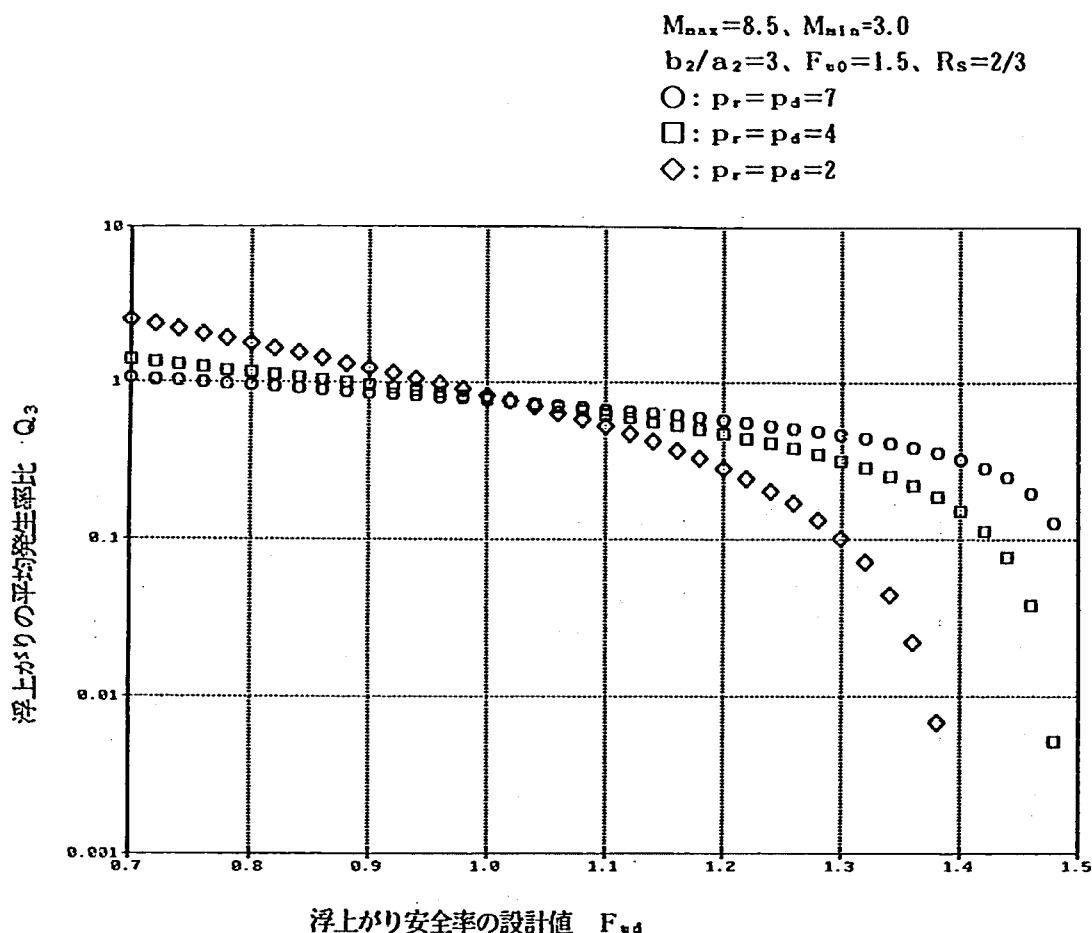
(3) 静水圧比が大きいき

図6.13 構造物・地盤条件を変えた場合の浮上り安全率の設計値
 と浮上りの平均発生率比の関係

(4) 過剰間隙水圧の発生特性の推定精度の影響

過剰間隙水圧の発生特性を何らかの方法により精度よく推定できるものと仮定し、 $p_d = p_r$ としてその値を3通りに変えて計算を行った結果を図6.14に示す。(1)は図6.12(1)に対応したものであるが、各ラインが $F_{uDES}=1.0$ と1.1のあいだで交差し、 $F_{uDES}=1.0$ のときの Q_3 は0.8程度、 $F_{uDES}=1.1$ のときの Q_3 は0.5程度となった。(2)は M_{DES} を大きくした場合のもので、図6.12(3)に対応するが、この場合も同様な結果が得られた。これらは、浮上がり確率に関して得られた傾向(図5.14参照)と、ラインの形状は異なるものの、定性的な面では一致している。

なお、過剰間隙水圧の発生特性の推定手法として、攪乱試料あるいは不攪乱試料の液状化試験を実施することが考えられるが、この場合には液状化強度も同時に推定することができる。これらの試験により得られた過剰間隙水圧の発生特性と液状化強度の信頼性について検討を行うことが、今後の課題として挙げられる。



(1) $M_{DES}=7.5$ のとき

図6.14 過剰間隙水圧の発生特性を精度よく推定した場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの平均発生率比の関係

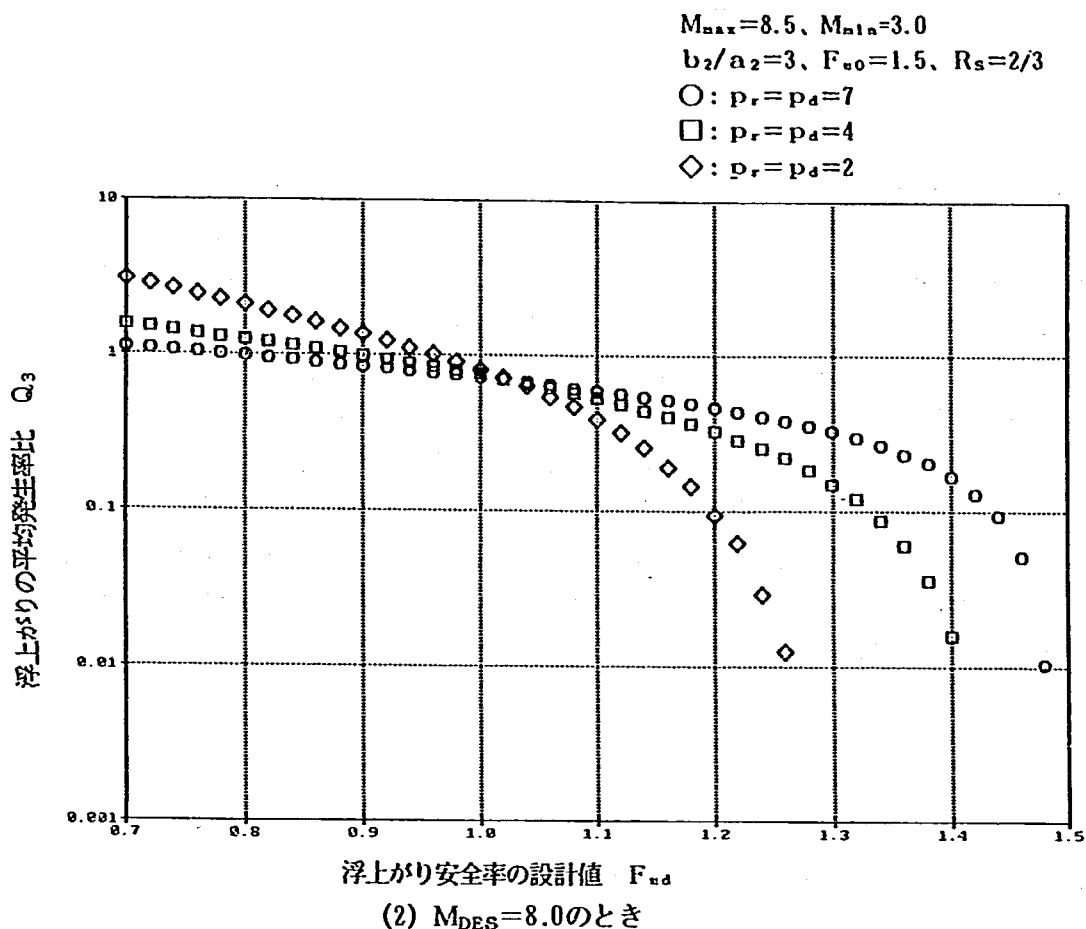


図6.14 過剰間隙水圧の発生特性を精度よく推定した場合の浮上がり安全率の設計値と浮上がりの平均発生率比の関係

6.3 ま と め

本章の検討結果をとりまとめると以下ようになる。

- 1) 液状化抵抗率を確率変数とした場合には、その分布形状が液状化の平均発生率及び浮上がりの平均発生率の計算結果に及ぼす影響は小さかった。地震マグニチュードの影響を考慮しても液状化の平均発生率はあまり変化しないが、設計で想定する地震動のレベルを実際に生じうる最大値に近づけると、液状化抵抗率が十分に大きいときの液状化の平均発生率が急激に減少した。
- 2) 動的せん断強度比を確率変数とした場合には、液状化抵抗率を確率変数とした場合よりも、液状化抵抗率が小さいときに液状化の平均発生率が急激に増加する傾向があり、定式化の方法によっては計算結果が非現実的となる場合もあった。対象とする細粒分含有率の範囲の影響は小さかった。
- 3) 設計で用いる過剰間隙水圧の発生特性を実際の特性よりも危険側に評価すると、浮き上がり安全率の設計値が1.1のときの浮上がりの平均発生率が、設計地震動の平均発生率よりも高くなる場合があった。一方、これを精度よく推定できれば、浮上がりの平均発生率は設計地震動の平均発生率の半分程度に低下した。構造物と地盤の条件の影響は、前者の場合に大きく現れた。
- 4) 今後は、過剰間隙水圧の発生特性と液状化強度を、撓乱または不撓乱試料の液状化試験により推定した場合の信頼性について検討を行う必要がある。

7. 全体のまとめ及び今後の課題

全体の検討結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 既往の液状化・非液状化事例に基づいた液状化確率の定式化では、液状化抵抗率を正規分布の確率変数とする方法が比較的良い近似度を示した。しかし、この方法では、対象とする地震動の範囲外によっては、動的せん断強度比のばらつきを過大あるいは過小評価してしまう可能性があり、地震の平均発生率を考慮して算定した液状化の平均発生率は、動的せん断強度比を確率変数とした場合と多少異なっていた。
- 2) 動的せん断強度比を算定する際に地震マグニチュードの補正を行った場合のほうが、行わない場合よりも常に液状化確率の近似度が高かった。しかし、液状化の平均発生率の算定結果は、補正の影響をあまり受けなかった。また、対象とする細粒分含有率の範囲は、液状化確率の定式化では影響が顕著であったが、半地下構造物の浮上がり確率と液状化の平均発生率の算定結果に及ぼす影響は小さかった。
- 3) 過剰間隙水圧の発生特性が精度よく推定できた場合には、浮上がり安全率の設計値が1.1のときの浮上がり確率はおおよそ0.15以下で、また、浮上がりの平均発生率は設計地震動の平均発生率の半分程度であった。しかし、この特性を設計で固定して用いた場合には、かなり危険側の評価となることがあり、この場合には構造物と地盤の条件の影響が大きく現れた。

今後の課題として、以下の3点が挙げられる。

- 1) シルト質砂の液状化・非液状化事例の収集・検討を行い、判定の信頼性を向上する。
- 2) 過剰間隙水圧の発生特性に関する検討を行い、簡便な評価手法を確立する。
- 3) 攪乱試料及び不攪乱試料の液状化試験結果の信頼性について検討する。

参考文献

- 1) 松尾徳：地盤工学・信頼性設計の理念と実際，技報堂出版，1984.
- 2) 例えば、Anagnos, T. and Kiremidjian, A. S. : A Review of Earthquake Occurrence Models for Seismic Hazard Analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol.3, No.1, pp.3-11, 1988.
- 3) Christian, J. T. and Swiger, W. F. : Statistics of Liquefaction and SPT Results, ASCE, Vol.101, GT11, pp.1135-1150, 1975.
- 4) Ferritto, J. M. and Forrest, J. B. : Siting Structures in Seismic Liquefaction Areas, Proc. of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol.2, pp.225-229, 1977.
- 5) Seed, H.B., and Idriss, I. M. : A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction, ASCE, Vol.97, SM9, pp.1249-1273, 1971.
- 6) Donovan, N. C. : A Stochastic Approach to the Seismic Liquefaction Problem, Proc. 1st International Conference on Applications of Statistics & Probability in Soil & Structural Engineering, Hong Kong, pp.514-535, 1971.
- 7) Youd, T. L. and Perkins, D. M. : Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential, ASCE, Vol.104, GT4, pp.433-446, 1978.
- 8) Yegian, M. K. and Whitman, W. V. : Risk Analysis for Ground Failure by Liquefaction, ASCE, Vol.104, GT7, pp.921-938, 1978.
- 9) McGuire, R. K., Tatsuoka, F., Iwasaki T. and Tokida, K. : Probabilistic Procedures for Assessing Soil Liquefaction Potential, Journal of Research, Public Works Research Institute, Vol.19, 1978.
- 10) McGuire, R. K., Tatsuoka, F., Iwasaki T. and Tokida, K. : Assessment of the Probability of Liquefaction for Water-Saturated Reclaimed Land, Proc. 3rd International Conference on Applications of Statistics & Probability in Soil & Structural Engineering, Sydney, Australia, pp.786-801, 1979.
- 11) 岩崎敏男、龍岡文夫、常田賢一、安田進：地震時地盤液状化の程度の予測について、土と基礎、Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980.
- 12) Halder, A. and Tang, W. H. : Probabilistic Evaluation of Liquefaction Potential, ASCE, Vol.105, GT2, pp.145-163, 1979.
- 13) Fardis, M. N. and Veneziano, D. : Statistical Analysis of Sand Liquefaction, ASCE, Vol.107, GT10, pp.1361-1377, 1981.
- 14) Seed, H. B. and Booker, J. R. : Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, ASCE, Vol.103, GT7, pp.757-768, 1977.
- 15) Fardis, M. N. and Veneziano, D. : Probabilistic Analysis of Deposit Liquefaction, ASCE, Vol.108, GT3, pp.395-417, 1982.
- 16) Chameau, J. L. and Clough G. W. : Probabilistic Pore Pressure Analysis for Seismic Loading, ASCE, Vol.109, GT4, pp.507-524, 1983.
- 17) Atkinson, G. M., Finn, W. D. L. and Charlwood, R. G. : Simple Computation of Liquefaction Probability for Seismic Hazard Applications, Earthquake Spectra, Vol.1, NO.1, pp.107-123, 1984.

- 18) Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, I. : Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, ASCE, Vol.109, GT3, pp.458-482, 1983.
- 19) Liao, S. : Statistical Modelling of Earthquake-induced Liquefaction, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil Engineering, 1986.
- 20) Wang, J. and Kavazanjian, E. : A Nonstationary Probabilistic Model for Pore Pressure Development and Site Response due to Seismic Excitation, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No.84, Stanford University, 1987.
- 21) Vanmarcke, E. H. : Probabilistic Modeling of Soil Profiles, ASCE, Vol.103, GT11, pp.1227-1246, 1977.
- 22) Ootomo, K. and Shinozuka, M. : Two Dimensional Spatial Severity of Liquefaction、第8回日本地震工学シンポジウム, pp.993-998, 1990.
- 23) 松尾稔, 板橋一雄, 佐々木康 : 震度法による河川堤防の破壊例の解析, 土質工学における確率・統計の応用に関するシンポジウム, pp.129-136, 1982.
- 24) 松尾稔, 朝岡顕, 板橋一雄, 進藤博 : 震度法による地震時安定解析の信頼性と盛土斜面の崩壊事例の逆解析, 土質工学における確率・統計の応用に関するシンポジウム, pp.137-144, 1982.
- 25) Whitman, R. V., Liao, S. : Seismic Design of Gravity Retaining Walls, Report No.GL-85-1, U.S. Army Corps of Engineers, 1985
- 26) 北浦勝, 池本敏和, 日比野友亮 : 過剰間隙水圧の上昇を考慮に入れた土構造物の地震時信頼性解析, 第7回日本地震工学シンポジウム, pp.703-708, 1986.
- 27) Tatsumi, Y. and Suzuki, Y. : A Case Study of the Reliability Design of a Revetment by a Stochastic Finite Element Method, Proc. of the 5th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Vancouver, Canada, pp.969-976, 1987.
- 28) Whitman, W. V. : Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.110, GT2, pp.145-188, 1984.
- 29) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、1990.
- 30) 日本道路協会 : 道路土工—軟弱地盤対策工指針、1986.
- 31) 日本道路協会 : 共同溝設計指針、1986.
- 32) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.
- 33) Okusa, S., Arima, S. and Maikuma, H. : Liquefaction of Mine Tailings in the 1978 Izu-Oshima-Kinkai Earthquake, Central Japan, Proc. of 7th World Conf. on Earthquake Engineering, Vol.3, pp.89-96, 1980.
- 34) 古関潤一、高橋晃浩、古賀泰之 : 砂地盤上盛土の動的遠心模型実験 (その3) 、第26回土質工学研究発表会講演集、pp.1041-1044、1991.
- 35) 常田賢一、木全俊雄、吉田精一 : 地盤の流動化特性及びその影響に関する実験的検討、第16回土質工学研究発表会講演集、pp.629-632、1981.
- 36) 安田進 : F_L と過剰間隙水圧比の関係、第21回土質工学研究発表会講演集、pp.841-842、1986.
- 37) 川島一彦、相沢興、高橋和之 : 最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式、土木研究所報告、第166号、1985.

- 38) 佐々木康、田村敬一、相沢興：確率論的手法に基づく地震動強度の再現期待値の試算, 土木研究所資料第2419号、1986.

巻末資料1 計算に用いた液状化・非液状化事例

以下に示す事例は、Liao(1986)¹⁹⁾が編集したデータベースの一部である。

凡例 EARTHQUAKE : 地震の名称

DATE : 発生年月日

MAGNITUDE : マグニチュード

SITE NAME : 地点名

CASE : ケース番号

LIQ1 : 非液状化事例=0、液状化事例=1

SITE : 同じ番号は同一地点であることを示す。

(0はそのケースのみ)

BORC : 同じ番号は同一ボーリングであることを示す。

(0はそのケースのみ)

EARTHQUAKE	DATE	MAGNITUDE	SITE NAME	CASE	LIQI	SITE	BORC
Niigata Sado Island	1802 12/1	6.6	Niigata	0101	0	1	1
			Niigata	0102	0	1	2
Niigata Koshigun	1877 7/22	6.1	Niigata	0201	0	1	1
			Niigata	0202	0	1	2
Mino-Owari	1891 10/28	7.9	Ogaki	0301	1	0	0
			Ginan	0302	1	14	14
			Unuma	0303	1	0	0
			Ogase Pond	0304	1	0	0
Kanto	1923 9/1	7.9	Arakawa 7	0702	1	6	6
			Arakawa 12	0703	1	6	0
			Arakawa 21	0704	1	6	0
			Arakawa 30	0705	1	6	0
			Arakawa 49	0707	0	6	7
Tonankai	1944 12/7	8.0	Komei	1201	1	0	0
			Meiko St.	1202	1	0	0
			Ienaga	1203	1	0	0
			Ginan	1204	1	14	14
Fukui	1948 6/28	7.3	Shonenji	1304	1	0	0
Niigata	1964 6/16	7.5	Niigata	1804	0	1	0
			Niigata	1814	1	1	1
			Niigata	1815	0	1	2
			Niigata	1816	0	1	0
			Niigata	1817	1	1	0
			Niigata	1818	0	1	0
			Niigata	1819	0	1	0
			Showa Bridge 2	1820	1	0	0
			Showa Bridge 4	1821	0	0	0
			Road Site	1822	0	0	0
			River Site	1823	1	0	0

EARTQUAKE	DATE	MAGNITUDE	SITE NAME	CASE	LIQC	SITC	BORC
Tokachi-Oki	1968 5/16	7.9	Nanaehama	2201	1	0	0
			Hachinohe P-1	2206	0	30	0
			Hachinohe P-2	2207	0	30	0
			Hachinohe P-4	2208	0	30	0
			Hachinohe P-5	2209	0	30	0
			Hachinohe P-6	2210	1	30	0
Izu	1978 1/14	7.0	Mochikoshi	3301	1	0	0
Miyagiken- Oki - 1	1978 2/20	6.7	Arahama	3401	0	49	0
			Nakamura 1	3402	0	40	0
			Nakamura 4	3403	1	40	0
			Nakamura 5	3404	0	40	0
			Yuriageka 1	3405	0	41	0
			Yuriageka 2	3406	0	41	0
			Yuriageka 3	3407	0	41	0
			Yuriage Bridge 1	3408	0	42	0
			Yuriage Bridge 2	3409	0	42	0
			Yuriage Bridge 3	3410	0	42	0
			Yuriage Bridge 5	3411	0	42	0
			Oiira 1	3412	0	43	0
			Oiira 2	3413	0	43	0
			Kitawabu 2	3414	0	44	0
			Kitawabu 3	3415	0	44	0
			Shiomi 2	3416	0	45	0
			Shiomi 6	3417	0	45	0
			Hiyori 5	3418	0	46	0
			Hiyori 18	3419	0	46	0
			Nakajima 2	3420	0	47	0
			Nakajima 18	3421	0	47	0
			Sendaikou 1	3422	0	48	0
			Sendaikou 4	3423	0	48	0
			Ishinomaki 2	3424	0	50	50
			Ishinomaki 4	3425	0	50	51

EARTHQUAKE	DATE	MAGNITUDE	SITE NAME	CASE	LIQC	SITC	BORC
Miyagiken- Oki - 2	1978 6/12	7.4	Arahama	3501	1	49	0
			Nakamura 1	3502	0	40	0
			Nakamura 4	3503	1	40	0
			Nakamura 5	3504	1	40	0
			Yuriageka 1	3505	1	41	0
			Yuriageka 2	3506	1	41	0
			Yuriageka 3	3507	0	41	0
			Yuriage Bridge 1	3508	1	42	0
			Yuriage Bridge 2	3509	1	42	0
			Yuriage Bridge 3	3510	1	42	0
			Yuriage Bridge 5	3511	0	42	0
			Oiira 1	3512	1	43	0
			Oiira 2	3513	1	43	0
			Kitawabu 2	3514	1	44	0
			Kitawabu 3	3515	0	44	0
			Shiomi 2	3516	0	45	0
			Shiomi 6	3517	1	45	0
			Hiyori 5	3518	0	46	0
			Hiyori 18	3519	1	46	0
			Nakajima 2	3520	0	47	0
			Nakajima 18	3521	1	47	0
			Sendaikou 1	3522	0	48	0
			Sendaikou 4	3523	0	48	0
			Ishinomaki 2	3524	1	50	50
			Ishinomaki 4	3525	0	50	51
Mid-Chiba	1980 9/25	6.1	Owi Island 1	4101	0	54	54
			Owi Island 1	4103	0	54	54

巻末資料2 液状化・非液状化事例の地盤条件及び液状化抵抗率

大部分の事例が、Tokimatsuら(1983)³²⁾がまとめたものと重複しているが、Liao(1986)¹⁹⁾が可能な限り原典にさかのぼってデータの読みとり等を行ったため、地盤条件に関する数値は若干異なっている。

凡例 CASE: ケース番号

LIQ1: 非液状化事例=0、液状化事例=1

LIQ2: Tokimatsuら(1983)³²⁾による液状化の程度分類

非液状化=0、境界地点=.5、液状化=.7、激しく液状化=1

M: マグニチュード

a_{max} : 最大地表加速度 (g)

WL: 地下水位 (m)

z: 深度 (m)

N: N値

FC: 細粒分含有率 (%) [もとのデータでFCが不明なものは、検討対象より除外した。]

CC: 粘土分含有率 (%)

GC: 粗粒分含有率 (%)

UC: 均等係数

D_{50} : 平均粒径 (mm)

L: 地震時せん断応力比

R: 動的せん断強度比

F_L : 液状化抵抗率

R_M : 地震マグニチュードの影響を考慮した動的せん断強度比

F_{LM} : 地震マグニチュードの影響を考慮した液状化抵抗率

CASE	LIQ1	LIQ2	M	a_{max}	WL	z	N	FC	CC	GC	UC	D ₅₀	L	R	F _L	R _M	F _{LM}
0101	0	0	6.6	.12	1.0	7.0	8	2	0	0	2.5	.3	.196	.223	1.14	.259	1.32
0102	0	0	6.6	.12	1.0	7.0	12	2	0	0	2.5	.3	.196	.270	1.38	.313	1.60
0201	0	0	6.1	.08	1.0	7.0	8	2	0	0	2.5	.3	.131	.223	1.71	.284	2.18
0202	0	0	6.1	.08	1.0	7.0	12	2	0	0	2.5	.3	.131	.270	2.06	.344	2.63
0301	1	1	7.9	.32	.8	13.7	17	5	0	5	3.5	.5	.507	.222	0.44	.209	0.41
0302	1	1	7.9	.32	2.0	9.1	10	5	0	0	2.2	.25	.469	.246	0.52	.231	0.49
0303	1	1	7.9	.32	1.9	6.0	17	3	0	25	3.4	.8	.454	.252	0.55	.237	0.52
0304	1	1	7.9	.32	2.4	5.0	13	4	0	24	6.2	.6	.411	.214	0.52	.202	0.49
0702	1	.7	7.9	.20	4.0	8.0	1	14	15	0	3.4	.25	.244	.100	0.41	.094	0.39
0703	1	.7	7.9	.20	4.0	4.3	2	22	11	3	45.0	.18	.195	.169	0.87	.159	0.82
0704	1	1	7.9	.20	1.0	8.0	16	1	0	0	1.6	.28	.327	.305	0.93	.287	0.88
0705	1	1	7.9	.20	1.0	5.0	12	5	0	0	2.7	.30	.325	.286	0.88	.270	0.83
0707	0	.5	7.9	.20	3.0	8.0	2	33	9	0	25.0	.15	.262	.178	0.68	.168	0.64
1201	1	1	8.0	.20	2.0	2.4	1	25	10	5	30.0	.3	.213	.100	0.47	.092	0.43
1202	1	1	8.0	.20	.5	3.7	1	27	12	2	57.0	.2	.331	.139	0.42	.129	0.39
1203	1	1	8.0	.20	2.5	3.0	2	30	4	0	7.5	.15	.214	.197	0.92	.183	0.85
1204	1	1	8.0	.16	2.0	7.0	10	5	0	0	2.2	.28	.225	.245	1.09	.228	1.01
1304	1	1	7.3	.40	1.2	3.0	3	0	0	0	1.4	.45	.563	.122	0.22	.126	0.22
1804	0	0	7.5	.16	3.7	7.6	8	2	0	0	2.5	.3	.215	.222	1.03	.222	1.03
1814	1	1	7.5	.16	1.0	7.0	8	2	0	0	2.5	.3	.261	.223	0.85	.223	0.85
1815	0	.5	7.5	.16	1.0	7.0	12	2	0	0	2.5	.3	.261	.270	1.03	.270	1.03
1816	0	0	7.5	.18	1.8	7.0	18	2	0	0	2.5	.3	.262	.318	1.21	.318	1.21
1817	1	1	7.5	.16	1.0	10.0	10	2	0	0	2.5	.3	.253	.228	0.90	.228	0.90
1818	0	.5	7.5	.16	1.0	10.0	16	2	0	0	2.5	.3	.257	.284	1.10	.284	1.10
1819	0	0	7.5	.18	2.0	10.0	20	2	0	0	2.5	.3	.266	.308	1.16	.308	1.16
1820	1	1	7.5	.16	.0	4.3	4	10	4	0	6.0	.4	.307	.155	0.51	.155	0.51
1821	0	0	7.5	.18	1.3	6.0	27	0	0	0	1.4	.3	.282	.405	1.44	.405	1.44
1822	0	0	7.5	.18	2.5	6.0	12	0	0	0	1.5	.36	.237	.246	1.04	.246	1.04
1823	1	1	7.5	.16	.6	4.5	6	0	0	0	1.6	.40	.274	.186	0.68	.186	0.68
2201	1	1	7.9	.20	1.0	4.0	5	20	6	0	6.0	.12	.311	.288	0.93	.271	0.87
2206	0	0	7.9	.23	1.0	2.9	14	5	0	0	3.0	.25	.347	.358	1.03	.337	0.97
2207	0	0	7.9	.23	2.0	6.0	28	5	0	0	3.0	.25	.314	.417	1.33	.392	1.25
2208	0	0	7.9	.23	1.0	4.0	16	5	0	0	3.0	.25	.357	.360	1.01	.340	0.95
2209	0	0	7.9	.23	1.6	2.5	11	5	0	0	3.0	.25	.277	.317	1.15	.299	1.08
2210	1	1	7.9	.23	1.2	2.0	1	5	0	0	3.0	.25	.287	.122	0.43	.115	0.40
3301	1	1	7.0	.25	1.0	7.0	1	94	0	0	10.0	.03	.408	.480	1.18	.520	1.27
3401	0	0	6.7	.10	1.0	6.3	10	0	0	0	-1	.60	.164	.185	1.13	.211	1.29
3402	0	0	6.7	.12	.9	3.3	19	4	0	2	-1	.28	.182	.388	2.13	.443	2.43
3403	1	.7	6.7	.12	.5	3.3	5	5	0	18	5.0	.70	.197	.141	0.71	.160	0.81
3404	0	0	6.7	.12	1.3	3.3	7	4	0	2	2.5	.28	.170	.241	1.42	.275	1.62
3405	0	0	6.7	.12	1.8	5.3	2	60	-1	0	-1	.01	.174	.378	2.17	.431	2.47
3406	0	0	6.7	.12	.9	4.3	11	0	0	0	-1	.4	.192	.256	1.34	.292	1.52
3407	0	0	6.7	.12	2.2	5.3	20	0	0	0	-1	.6	.161	.278	1.73	.317	1.97
3408	0	0	6.7	.12	1.7	4.3	4	10	5	1	4.4	.4	.159	.143	0.90	.163	1.03
3409	0	0	6.7	.12	1.3	3.3	13	7	0	43	8.0	1.6	.170	.249	1.47	.284	1.67
3410	0	0	6.7	.12	.3	4.3	8	12	0	5	25.0	1.2	.219	.186	0.85	.212	0.97

CASE	LIQ1	LIQ2	M	a_{max}	WL	z	N	FC	CC	GC	UC	D ₅₀	L	R	F _L	R _M	F _{LM}
3411	0	0	6.7	.12	1.3	7.3	17	17	0	4	-1	.35	.188	.297	1.58	.339	1.80
3412	0	0	6.7	.14	4.3	6.3	9	5	0	0	2.1	.34	.157	.214	1.36	.244	1.55
3413	0	0	6.7	.14	2.4	6.3	8	4	0	0	2.6	.36	.193	.203	1.05	.231	1.20
3414	0	0	6.7	.14	3.0	3.3	11	5	0	0	2.5	.53	.137	.215	1.56	.245	1.78
3415	0	0	6.7	.14	3.0	6.0	23	0	0	0	2.5	.41	.171	.322	1.88	.367	2.14
3416	0	0	6.7	.14	2.5	6.0	10	10	0	0	3.5	.3	.182	.241	1.33	.275	1.51
3417	0	0	6.7	.14	2.5	4.0	6	10	4	0	3.5	.25	.164	.222	1.35	.253	1.54
3418	0	0	6.7	.14	2.5	7.0	21	5	0	0	2.5	.35	.190	.321	1.69	.366	1.92
3419	0	0	6.7	.14	2.5	5.0	9	20	7	0	15.0	.15	.180	.305	1.69	.348	1.93
3420	0	0	6.7	.14	2.5	4.5	10	26	8	0	12.0	.12	.174	.344	1.97	.392	2.25
3421	0	0	6.7	.14	2.5	6.0	12	3	0	2	2.3	.35	.184	.249	1.35	.284	1.54
3422	0	0	6.7	.12	2.4	6.0	15	11	4	0	5.0	.30	.160	.297	1.85	.338	2.11
3423	0	0	6.7	.12	3.6	7.0	17	12	3	0	5.0	.30	.145	.297	2.04	.339	2.33
3424	0	0	6.7	.12	1.4	4.0	4	10	0	0	2.0	.15	.165	.242	1.47	.277	1.68
3425	0	0	6.7	.12	1.4	6.0	15	10	0	0	2.4	.18	.180	.353	1.96	.402	2.23
3501	1	1	7.4	.20	1.0	6.3	10	0	0	0	-1	.60	.328	.185	0.56	.188	0.57
3502	0	0	7.4	.32	.9	3.3	19	4	0	2	-1	.28	.487	.388	0.80	.394	0.81
3503	1	1	7.4	.32	.5	3.3	5	5	0	18	5.0	.70	.526	.141	0.27	.143	0.27
3504	1	.7	7.4	.32	1.3	3.3	7	4	0	2	2.5	.28	.453	.241	0.53	.245	0.54
3505	1	1	7.4	.24	1.8	5.3	2	60	-1	0	-1	.04	.349	.378	1.08	.384	1.10
3506	1	.7	7.4	.24	.9	4.3	11	0	0	0	-1	.4	.384	.256	0.67	.260	0.68
3507	0	0	7.4	.24	2.2	5.3	20	0	0	0	-1	.6	.322	.278	0.86	.283	0.88
3508	1	.7	7.4	.24	1.7	4.3	4	10	5	1	4.4	.4	.317	.143	0.45	.145	0.46
3509	1	1	7.4	.24	1.3	3.3	13	7	0	43	8.0	1.6	.340	.249	0.73	.253	0.75
3510	1	.7	7.4	.24	.3	4.3	8	12	0	5	25.0	1.2	.438	.186	0.42	.189	0.43
3511	0	0	7.4	.24	1.3	7.3	17	17	0	4	-1	.35	.377	.297	0.79	.302	0.80
3512	1	.7	7.4	.24	4.3	6.3	9	5	0	0	2.1	.34	.270	.214	0.79	.217	0.81
3513	1	.7	7.4	.24	2.4	6.3	8	4	0	0	2.6	.36	.330	.203	0.61	.206	0.62
3514	1	.7	7.4	.28	3.0	3.3	11	5	0	0	2.5	.53	.275	.215	0.78	.218	0.79
3515	0	0	7.4	.28	3.0	6.0	23	0	0	0	2.5	.41	.343	.322	0.94	.327	0.95
3516	0	.5	7.4	.24	2.5	6.0	10	10	0	0	3.5	.3	.312	.241	0.77	.245	0.79
3517	1	.7	7.4	.24	2.5	4.0	6	10	4	0	3.5	.25	.281	.222	0.79	.225	0.80
3518	0	0	7.4	.24	2.5	7.0	21	5	0	0	2.5	.35	.326	.321	0.98	.326	1.00
3519	1	.7	7.4	.24	2.5	5.0	9	20	7	0	15.0	.15	.308	.305	0.99	.310	1.00
3520	0	.5	7.4	.24	2.5	4.5	10	26	8	0	12.0	.12	.298	.344	1.15	.349	1.17
3521	1	1	7.4	.24	2.5	6.0	12	3	0	2	2.3	.35	.315	.249	0.79	.253	0.80
3522	0	0	7.4	.24	2.4	6.0	15	11	4	0	5.0	.30	.321	.297	0.93	.301	0.94
3523	0	0	7.4	.24	3.6	7.0	17	12	3	0	5.0	.30	.291	.297	1.02	.302	1.04
3524	1	1	7.4	.20	1.4	4.0	4	10	0	0	2.0	.15	.275	.242	0.88	.246	0.90
3525	0	0	7.4	.20	1.4	6.0	15	10	0	0	2.4	.18	.300	.353	1.18	.358	1.19
4101	0	0	6.1	.10	1.0	6.0	5	13	-1	0	3.0	.18	.170	.239	1.41	.304	1.79
4103	0	0	6.1	.10	1.0	14.3	4	27	-1	-1	-1	.17	.158	.197	1.24	.251	1.58

付録 主な用語の定義

a, b 及び a', b'	: 一様分布を仮定した定式化に用いる係数
a_{crit}	: 液状化が生じる最大地表加速度の限界値
a_{DES}	: 設計マグニチュード M_{DES} に対応する設計最大地表加速度
a_{max}	: 最大地表加速度
a_1, a_2	: 地表最大加速度の距離減衰式で用いる係数
b_1, b_2	: 地震の平均発生率を表す係数
C	: Ferrittoらによる液状化強度比
CC	: 粘土分 (5 μm 以下) 含有率
C_L	: 地震時せん断応力比の補正量
C_R	: 動的せん断強度比の補正量
$C_1 \sim C_3$ 及び $D_1 \sim D_3$	: 正規分布または極値分布を仮定した定式化に用いる係数
D_r	: 相対密度
D_{50}	: 平均粒径
$E[R_u]$	: 過剰間隙水圧比の期待値
e	: 測定誤差
FC	: 細粒分 (74 μm 以下) 含有率
F_L	: 液状化抵抗率
$\overline{F_L}$	: 液状化抵抗率の算定値
$\overline{F_{LDES}}$	: 設計マグニチュード M_{DES} に対応する設計液状化抵抗率
F_{LM}	: 地震マグニチュードの影響を考慮した液状化抵抗率
F_u	: 浮上がり安全率
F_{ud}	: 設計浮上がり安全率
F_{uDES}	: 設計マグニチュード M_{DES} に対応する設計浮上がり安全率
F_{u0}	: 常時の浮上がり安全率
f_a	: 最大地表加速度の発生密度
f_{FL}	: 真の液状化抵抗率の確率密度関数
f_M	: マグニチュード M の地震の発生密度
f_R	: 真の動的せん断強度比の確率密度関数
G	: せん断剛性
GC	: 粗粒分 (2 mm 以上) 含有率
g	: 重力加速度
L	: 地震時せん断応力比 (4.1.4(4)中では対数近似度)
$\overline{L}$	: 地震時せん断応力比の算定値
L_{DES}	: 設計マグニチュード M_{DES} に対応する設計地震時せん断応力比
L_{max}	: 最大対数近似度
LPI	: Yegianらによる液状化可能性指標
M	: 地震マグニチュード
M_{DES}	: 地震マグニチュードの設計値
M_{max}	: 生じ得る地震マグニチュードの最大値

M_{min}	: 計算で考慮する地震マグニチュードの最小値
m	: 平均値
N	: N 値
N_{eq}	: 地震動の等価繰返し回数
N_L	: 液状化までの繰返し回数
N_C	: 繰返し回数
n	: 事例数
p	: 過剰間隙水圧比を液状化抵抗率の関数として表した場合の指数
p_d	: 上記の指数の設計値
p_r	: 上記の指数の実際の値
P_L	: 液状化指数
P_{LIQ}	: 液状化確率
$P[F_u < 1.0]$	: 浮上がり確率
$P[R_u < R_{ud}]$	: 過剰間隙水圧比の非超過確率
$P[R_u < X]$	: 過剰間隙水圧比の累積確率密度関数
Q_2	: 液状化の平均発生率比 ($= \lambda_{LIQ} / \lambda_{DES}$)
Q_3	: 浮上がりの平均発生率比 ($= \lambda_{UP} / \lambda_{DES}$)
R	: 動的せん断強度比
$\bar{R}$	: 動的せん断強度比の算定値
R_{LIQ}	: 液状化事例の比率
R_M	: 地震マグニチュードの影響を考慮した動的せん断強度比
R_S	: 静水圧比
R_u	: 過剰間隙水圧比
R_{ud}	: 過剰間隙水圧比の設計値
r_d	: 深さ方向の補正係数
UC	: 均等係数 ($= D_{60} / D_{10}$)
W	: R_{LIQ} の計算に用いる液状化抵抗率の幅
z	: 深度
Δ	: 震央距離
Δu	: 過剰間隙水圧
λ_a	: 最大地表加速度の超過平均発生率
λ_{DES}	: 設計マグニチュード M_{DES} の地震の平均発生率
λ_{LIQ}	: 液状化の平均発生率
λ_M	: マグニチュード M 以上の地震の平均発生率
λ_{UP}	: 浮上がりの平均発生率
σ	: 標準偏差
σ_v	: 上載圧
σ_v'	: 有効上載圧
τ_d	: 繰返しせん断応力
τ_r	: 繰返しせん断強度

液状化と掘割道路の地震時浮上
がりに対する安定性の確率的評
価法に関する検討

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3172号
平成5年3月(1993)

古 関 潤 一

要 旨

既応の液状化・非液状化事例に基づいて、所定の地震外力に対する液状化の発生確率を液状化抵抗率 F_L の関数として定式化した。この結果を、半地下構造物の地震時浮上がりに対する安定計算に適用し、浮上がり発生確率を算定した。さらに、所定の期間内における地震の平均発生率を考慮して、液状化の平均発生率と半地下構造物の浮上がりの平均発生率の算定を行った。

キーワード：掘割道路，砂地盤，液状化，確率論



郵便はがき

四十一円切
手をはって
下さい。

305-□□

建設省土木研究所
動土質研究室
行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 3172 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印