

地盤定数の不確実性を考慮した地盤の液状化ハザード

西日本高速道路エンジニアリング中国(株) 正会員 ○佐々川 学
(株) 異設計コンサルタント 正会員 有清 睦
広島工業大学 工学部 フォロー会員 中山 隆弘

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、東北地方をはじめ各地で大規模な災害が起きた。その中で、浦安市など東京湾の沿岸部を中心に生じた液状化による住宅被害は大きな社会的問題となった。その原因のひとつには、地盤の液状化の可能性に対する事前情報が決定的に欠けていたことが挙げられる。確かに地方自治体の多くがHP等で、想定地震に対する液状化の可能性について公表しているが、今後改善すべき点がいくつかの点で残されているように思われる。そのひとつが、地盤定数の不確実性の問題であり、本研究の目的はその問題の解消にある。

ただ、筆者が知る限り、わが国では、これまでこの問題に真正面から取り組んだ例は少ない。例えば参考文献の1)および2)は、数少ない研究の成果と言えるが、液状化の判定において地盤定数の不確実性をモンテカルロシミュレーション法を用いて地震応答解析を行うまでに至ってはいない。

そこで、本研究では、地盤の地震応答解析における極めて重要なパラメータである $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係と土質定数を、モンテカルロシミュレーション法を用いて確率的に評価して、そのことが液状化判定の結果に及ぼす影響を定量的に検討することを主目的とした。

2. 地震による地盤の液状化判定

液状化の判定手法としては、道路橋示方書(耐震設計編)³⁾に取り入れられているFL値法と、岩崎ら⁴⁾により提案されている液状化指数PL値法を基本としている。ただし、地震強さについては、設計震度ではなく、広島県や広島市が地震被害想定を行った際に用いたように、想定地震動に対する地震応答解析⁵⁾を行い、地震時せん断応力を評価している。また、N値及び細粒分含有率の不確実性についても考慮している。

さて、紙面の関係で詳細には書けないが、地震時における地盤の液状化抵抗率FLは式(1)で与えられ、FLが1.0を下回る場合には液状化の可能性は高いと考えられる³⁾。

$$F_L = R/L \quad (1)$$

ここに、Rは動的せん断強度比、Lは地震時せん断応力比である。

液状化指数PLは、FL値を深さ方向に重みをつけて数値積分した値であり、ある地点での液状化の可能性を総合的に評価するための指標である。具体的には式(2)で定義される。

$$P_L = \int_0^{20} F * (10 - 0.5z) dz \quad (2)$$

$$F = 1 - F_L \quad (F_L < 1.0)$$

$$F = 0 \quad (F_L > 1.0)$$

ここに、zは地表面からの深さ(m)である。

次に、液状化の程度の判断については広島県、広島市の地震被害想定を参考に、

30.0 < PL : 液状化の程度が極めて大きい
15.0 < PL ≤ 30.0 : 液状化の程度がかなり大きい
5.0 < PL ≤ 15.0 : 液状化の程度が大きい
0.0 < PL ≤ 5.0 : 液状化の程度は小さい
PL = 0.0 : 液状化の程度はかなり小さい
として考察を行っている。

3. 地盤の地震応答解析

3.1 地震の応答解析プログラム(FDEL)⁵⁾

本プログラムは、地盤の動的変形特性であるせん断剛性G及び減衰特性hとひずみγとの非線形な関係を等価な線形関係に置き換える、いわゆる等価線形化法をベースとした地震応答解析用プログラムである。

また、FDELは重複反射理論を基にした全応力解析である。なお、重複反射理論は水平の成層地盤モデルに、せん断波が鉛直方向に伝播する一次元モデルを理論的に解く方法であるため、極めて簡便であり、また、地表で得られた強震記録からその地盤構造を用いて基盤での入力地震動を推定する逆解析も可能である。

4. 動的変形特性の確率的モデルの設定

動的変形特性 $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係の設定は今津・福武の実験式(3)及び式(4)を用いた⁶⁾。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1+a(\gamma)^b} \quad (3)$$

$$h = c(\gamma)^d \quad (4)$$

式中の、 G/G_0 は繰返しせん断剛性比、 γ はせん断ひずみ、h減衰定数である。表-1に、両式に含まれる係数a~dの統計量を示す。

表-1 係数の統計量

		a	b	c	d
砂	$\mu + \sigma$	1419	0.89	456.7	0.47
	μ	729.7		338	
	$\mu - \sigma$	375.4		250.1	
粘性土	$\mu + \sigma$	381.3	0.79	56.97	0.27
	μ	179.1		46.84	
	$\mu - \sigma$	84.02		38.49	
砂礫	$\mu + \sigma$	640	0.75	90.97	0.3
	μ	392.8		75.36	
	$\mu - \sigma$	241.3		62.38	

ここに、 μ は平均値、 σ は標準偏差である。

本研究では、表-1の a 及び c を正規分布に従う確率変数としてモンテカルロシミュレーションによって求め、式(3)及び(4)に従って $G/G_0 \sim \gamma$ と $h \sim \gamma$ の関係を設定した。

なお、a と c の発生個数は各々1000個であるが、その中から適当に 10, 20, 40, 60, 100 個を選び、各ケースに対して等価線形解析を行っている。

また、動的変形特性の整理として

Hardin-Drnevich モデル⁷⁾(以下 H-D モデルと称す)を採用している。H-D モデルを式(5)(6)に示す。減衰定数は最小値を設定できる式(6)を用いた。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma / \gamma_\gamma} \quad (5)$$

$$h = (h_{max} - h_{min}) \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) + h_{min} \quad (6)$$

式中の、 γ_γ は基準ひずみ、 h_{max} は最大減衰定数、 h_{min} はひずみが小さいときの減衰定数である。

図-1、図-2に、シミュレーションにより作成した 60 ケースの $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ の関係を H-D モデルでフィッティングさせた砂の動的変形特性を示す。また、図-3は、シミュレーションを行い、モデル化した 20 ケースの結果を今津・福武による実験値と比較したものである。これを見る限りでは今津・福武による実験値のばらつきの範囲内に、シミュレーションをした曲線がほぼ収まる結果が得られたといえる。

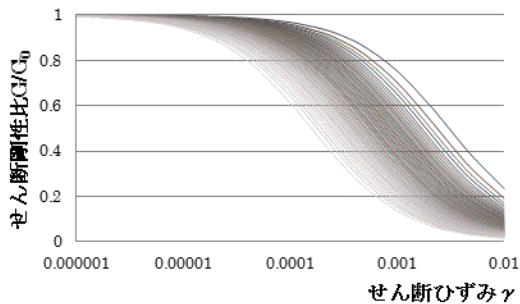


図-1 砂の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線 (60 ケース)

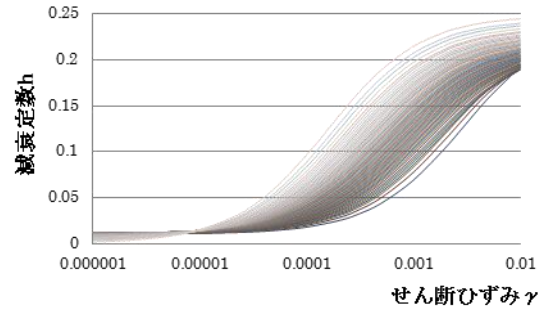


図-2 砂の $h \sim \gamma$ 曲線 (60 ケース)

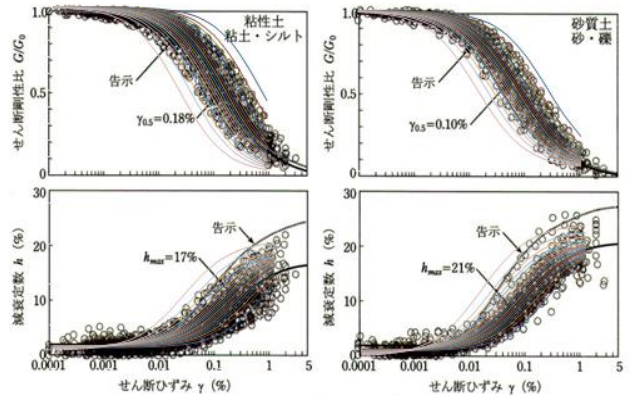


図-3 シミュレーションと実験値との比較

5. 土質定数の不確実性を考慮した動的せん断強度比の確率論的評価

動的せん断強度比Rは鉛直有効応力 σ_v' 、N値、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率FCなどのパラメータによって決定されるが、これらの土質定数は空間的に大きく変動する。そこで、本研究ではN値、細粒分含有率に限ってではあるが、この2つの土質定数を、確定的ではなく確率論的に評価した。評価方法として、表-2に示す岡山大学の西村らの研究による提案式¹⁾等を用いて、正規乱数を1000個発生させ、モンテカルロシミュレーションを行った。表中のNは標準貫入試験から得られるN値、FCは細粒分含有率(%), zは地表面からの深さ(m)である。

表-2 土質パラメータの平均値と標準偏差

変数	平均値 μ	標準偏差 σ
$\log_{10} N$	$-2.895136 \times 10^{-1} + 1.382580z - 7.190219 \times 10^{-1}z^2 + 1.670053 \times 10^{-1}z^3 - 1.891469 \times 10^{-2}z^4 + 1.023769 \times 10^{-3}z^5 - 2.117457 \times 10^{-5}z^6$	0.244
$\log_{10} FC$	$0.7475127 + 0.05834805z$	0.345

シミュレーションの手順は以下の通りである。

1. まず、 $\log_{10} N$ と与えられたデータを $\ln N$ や $\ln FC$ の平均値と標準偏差に換算する。
2. $y = \ln N$ とおけば、 y は正規確率密度関数に従うことになるので、1. で得られた $\ln N$ や $\ln FC$ の平均値と標準偏差を用いて y を数値シミュレーションする。

3. その結果を用いれば、確率量である N 及び FC を求めることができる。なお、N の変動係数 λ_N については、1. の結果を利用して、式(7)で計算できる。

$$\sigma_Y = \sqrt{\ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma_N}{\mu_N}\right)^2\right\}} \quad (7)$$

ここに、 μ_N は N の平均値、 σ_N は N の標準偏差である。また、 $\lambda_N = \sigma_N / \mu_N$ が得られれば、式(8)より N の平均値 μ_N を算出できる。

$$\mu_Y = \ln\left(\frac{\mu_N}{\sqrt{1 + \lambda_N^2}}\right) \quad (8)$$

以上が、N 値の変動係数を求めるための手順であり、FC に関しても同手法で変動係数を求めた。結果として、N 値の変動係数は 0.609 となり、FC の変動係数は 0.938 となった。この結果を活かし、6. ケーススタディでは N 値及び FC の変動係数をそれぞれ 0.6、0.9 とした。

6. ケーススタディ

6. 1 対象地盤モデル

今回注目した箇所は、平成芸予地震の際に液状化が発生した広島市の三菱重工グラウンド付近（以下では単に三菱重工グラウンドと称する）と原爆ドーム付近の 2 箇所である。ここでは、三菱重工グラウンドのみを液状化ハザードの評価、検討の対象とする。

表-3 に広島市消防局から提供していただいた地盤データを示す。因みに地盤は、道路橋示方書の分類法に従えばどちらも III 種地盤である。

なお、地下水位については地表面まで地下水で満たされているものと仮定した。また、FC については、道路橋示方書に掲載されている地質毎の概略値を使用している。

表-3 三菱重工グラウンド付近の地盤データ

	地質	深度 (m)	単位体積重量 (gf/cm ³)	平均 N 値	FC (%)	せん断波速度 (m/s)
1	盛土	1	1.60	5	40	133.5
2	砂	3	1.60	5	10	123.4
3	砂	13	1.70	10	10	173.6
4	砂	28	1.55	5	10	151.1
5	砂	33	1.75	10	10	216.9
6	砂礫	43	2.00	50	0	431.4
7	砂	46	1.80	30	0	312.8
8	基盤		2.50	300	0	700.0

6.2 入力地震動の設定

図-4 は、平成13年3月24日の芸予地震 (Mw6.8) の際に広島市羽衣町で得られた時刻歴波形を K-

NET[®]よりダウンロードしたものである。

最大加速度は 239.8gal である。また、計測震度は 5.3 で、震度階は 5 強である。

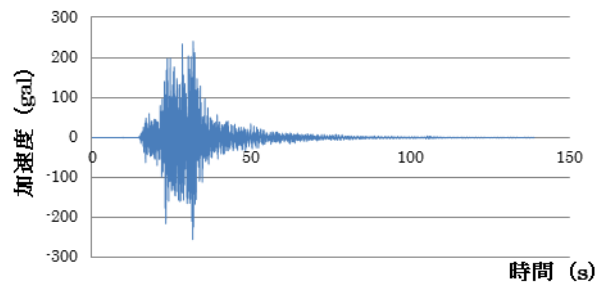


図-4 入力地震動（平成芸予地震）

さらに、今回は平成芸予地震だけでなく、明治38年に起きた芸予地震 (Mw7.25) も評価の対象として用いることにしたが、当然ながら観測記録は無いので、地震波形は上述のものを用いて、振幅特性のみを翠川・大竹が提案した距離減衰式⁹⁾の手法を用いて推定した。

その結果、増幅率は 1.92 倍となり、図-5 を明治芸予地震における広島市の地震動と仮定した。

最大加速度は 460.5gal である。また、計測震度は 5.5 で、震度階は 5 強である。

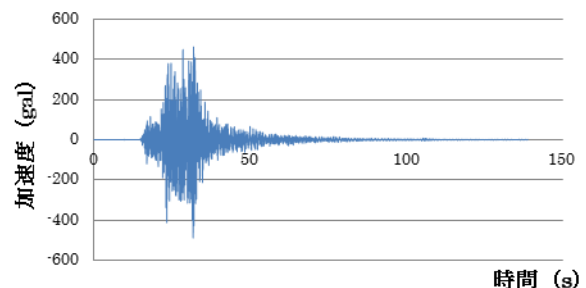


図-5 入力地震動（明治芸予地震：模擬波）

7. 解析結果

等価線形化解析による 100 回のシミュレーションを行い、N 値と細粒分含有率等によって決まる動的せん断強度比の不確実性を考慮した場合としない場合との各層の液状化確率と液状化の程度について述べる。なお、紙面の都合上、ここでは、三菱重工グラウンドに対する結果のみについて述べる。まず、入力地震動を平成芸予地震にした場合の FL 値の頻度分布（ここでは紙面の都合で 2 層目のみを示す）は図-6 の通りである。なお、図(a)が動的せん断強度比の不確実性を考慮しない場合、図(b)が考慮した場合の各層毎の FL 値の頻度分布図である。図より、動的せん断強度比の不確実性を考慮した場合の方が、若干ではあるが、データのばらつきが多くみられ、FL 値の数値が高いことが分かる。このような頻度分布図を用いて各層の液状化確率を示したのが表-4 である。

表より、2層目と4層目は液状化の発生確率が非常に高いことが分かる。なお、明治芸予地震については発表時に詳しく説明する。

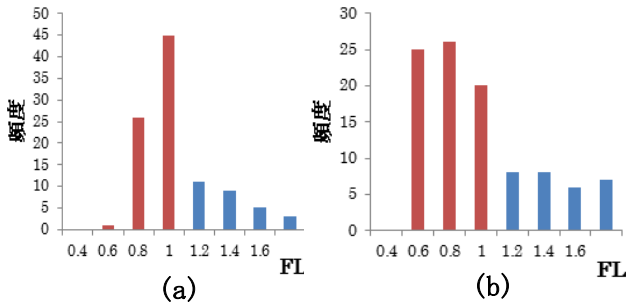


図-6 シミュレーションによる FL 値の頻度分布 (2層目)

表-4 各層の液状化発生確率

		平成芸予地震				明治芸予地震			
		1層	2層	3層	4層	1層	2層	3層	4層
三菱重工グラウンド	(a)	1%	72%	27%	90%	55%	98%	61%	98%
	(b)	39%	71%	38%	80%	64%	93%	71%	92%
原爆ドーム	(a)	52%	97%	85%		98%	98%	98%	
	(b)	52%	84%	83%		80%	92%	89%	

次に図-7に着目地盤のPL値の頻度分布を示す。この図より、本地盤の液状化の程度とその発生確率を評価することができる。表-5には30<PLとなる確率、すなわち液状化の程度が極めて高くなる確率を示したものである。表より、例えば三菱重工グラウンドの場合、平成芸予地震に対しては、N値や細粒分含有率の不確実性を無視して、それらの平均値を用いて評価した場合には、その確率がほぼ0であるのに対し、不確実性を考慮した場合には44%に達することが理解できる。

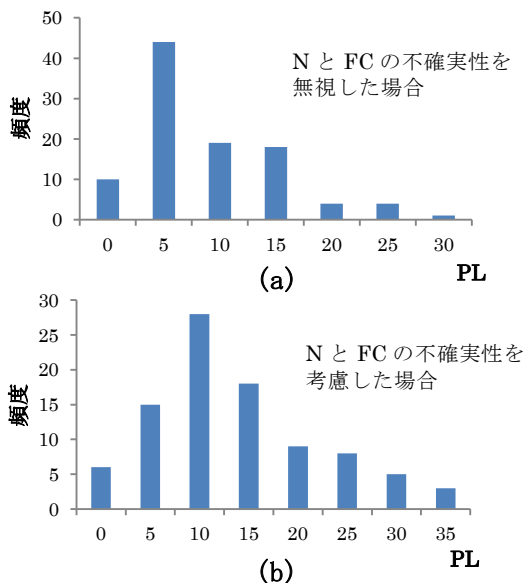


図-7 シミュレーションによる PL 値の頻度分布

表-5 PL値の解析結果

			平成芸予地震	明治芸予地震
			三菱重工グラウンド	(a)
30<PL	0%	11%		
	(b)	平均値	13.5	30.9
		30<PL	44%	49%
原爆ドーム	(a)	平均値	16.2	42
		30<PL	0%	80%
	(b)	平均値	21.5	41.7
		30<PL	31%	82%

8. 結論

得られた主な結論を要約すると以下の通りである。

1. 今津・福武の研究成果で得られた地盤の動的変形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$ 曲線, $h \sim \gamma$ 曲線) の統計資料を基に、両曲線のシミュレーションを行った結果、いずれも両研究者による実験結果とほぼ一致し、その結果は FDEL による地震応答解析に有効に活用できた。
2. 1. の成果を活用し、N 値や細粒分含有率、さらにはせん断ひずみとせん断剛性や減衰定数との関係における不確実性を考慮して等価線形化解析 (FDEL) を行い、想定地震による想定地盤の応答特性のばらつきを定量的に知ることができた。
3. シミュレーション手法によって、三菱重工グラウンドと原爆ドーム周辺の液状化指数の頻度分布を求め、安芸灘断層を震源とする想定地震 (平成芸予地震及び想定明治芸予地震) に対する両地盤の液状化確率と、液状化の程度に対する確率論的検討を行うことができた。

参考文献

- 1) 西村伸一・清水英良・藤井弘章・島田清:液状化対策地盤改良に関する信頼性設計, 土木学会論文集, No.630/III-44, pp.101-111, 1998.9.
- 2) 笠間清伸・善巧企・陳光斉:固化处理砂地盤の材料定数のばらつきを考慮した液状化ポテンシャル, 土木学会地震工学論文集, pp.251-256, 2007.8.
- 3) 道路橋示方書・同解説・耐震設計編 (平成 14 年版), 日本道路協会, 2002
- 4) 岩崎敏男, 龍岡文夫(1980): 地震時地盤液状化の程度と予測について, 土と基礎, 28-4, pp.23-29, 2003.4
- 5) 吉本吉倫: 等価ひずみの周波数依存性を考慮した地盤振動プログラム FDEL, 2002.4
- 6) 今津雅紀・福武毅芳: 動的変形特性のデータ処理に関する一考察, 第 21 回土質工学研究発表会, pp.533-536, 1986.6.
- 7) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, J. SMFD, Proc., ASCE, Vol.98, No.SM7, pp.667-692
- 8) 防災科学技術研究所 強震観測網 K-NET
- 9) 翠川・大竹: 震源深さによる距離減衰特性の違いを考慮した地震動最大加速度, 最大速度の距離減衰式, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集 2002.4.