

格子状地盤改良における格子間隔の簡易設定法の有効性検討

Effectiveness of Simple Method Determining Space for Grid-form Deep Cement Mixing Walls

内田 明彦 Akihiko Uchida*¹ 田屋 裕司 Yuji Taya*²
本多 剛 Tsuyoshi Honda*³ 奥村 剛悠 Takehiro Okumura*⁴

梗概

著者らは、格子状改良壁に囲まれた未改良地盤（格子内地盤）の地震時せん断応力を評価する式（簡易算定式）を提案し、格子状地盤改良の設計に利用してきた¹⁾。しかし、近年の改良強度の増大や東北地方太平洋沖地震のようなマグニチュードの大きな地震動にも適用させることを目的として、簡易算定式を構成する補正係数を見直した。

本報告では、見直した簡易算定式について紹介するとともに、格子状地盤改良が適用された事例について簡易算定式による評価と地震応答解析結果を比較し、簡易算定式の有効性を検討した結果について報告する。

キーワード：液状化、格子状地盤改良、格子間隔

Summary

Authors proposed the simple method in the previous paper that evaluated shear stress of the soil surrounded by the cement mixing walls. In order to improve the reliability of the simple calculation method, the seismic response analysis was conducted with the parameter of the space of grid, the shear modulus of the improved soils, and the improved length. Based on the analysis, three functions that composed the expression were reviewed. The reviewed method can evaluate the maximum shear stress of the soil based on the seismic response analysis.

Keywords: liquefaction, grid-form deep cement mixing walls, space of grid

1 はじめに

格子状地盤改良工法はFig. 1に示すようにセメント系固化材などで地盤を平面的に格子状に改良し、地中壁による地盤の変形抑制によって液状化を抑止する工法である。本工法を液状化対策として利用する場合、想定する地震動や地盤条件に応じて格子間隔を決める必要がある。著者らは、格子壁に囲まれた未改良地盤（格子内地盤）の地震時せん断応力を評価する式（簡易算定式）を提案し、格子状地盤改良の設計に利用してきた¹⁾。しかし、近年の改良強度の増大や東北地方太平洋沖地震のようなマグニチュードの大きな地震動にも適用させることを目的として、簡易算定式を構成する補正係数を見直した²⁾。

本報告では、見直した簡易算定式について紹介するとともに、格子状地盤改良が適用された事例について簡易算定式による評価と地震応答解析結果を比較し、簡易算定式の有効性を検討した結果について報告する。

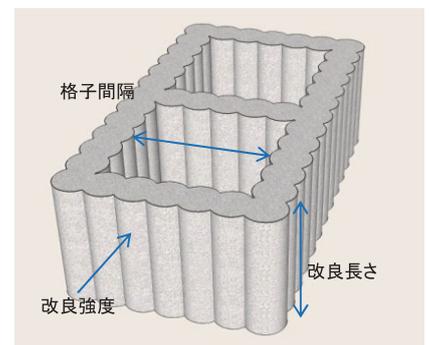


Fig. 1 格子状地盤改良工法
Grid-form deep cement mixing walls

*1 技術研究所 主席研究員 博士（工学） Senior Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*2 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute
*3 技術研究所 主任研究員 博士（工学） Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*4 技術研究所 研究主任 Associate Chief Researcher, Research & Development Institute

2 簡易算定式の概要^{1), 2)}

2.1 簡易算定式の構成

地盤の液状化対策として利用する格子状地盤改良を設計するためには、格子間隔、改良長さ、改良強度などを決める必要がある。対象とする地震動や地盤条件に合わせてこれらの仕様を決めるために、改良壁による地盤の拘束効果を表現可能なFEM解析などによる地震応答解析を行うのが一般的である。著者らは文献1)において、格子間隔、改良体せん断剛性、改良長さをパラメータとしてFig. 2に示す疑似3次元モデルを用いたsuper-FLUSHによる地震応答解析(等価線形)を行い、その結果から得られる格子内地盤中央部における地震時せん断応力を簡易に評価する式として(1)式を提案した。

$$\left(\frac{\tau_d}{\sigma_z'}\right)_{\text{Grid}} = \gamma_n \frac{\alpha_{\max}}{g} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_z'} \cdot \gamma_d' \cdot FL(L) \cdot FG(G) \cdot FH(H) \quad (1)$$

ここに、 $(\tau_d/\sigma_z')_{\text{Grid}}$: 格子内地盤中央部における繰返しせん断応力比, $\gamma_n = 0.1 (M-1)$, M : マグニチュード, α_{\max} : 地表面最大加速度, g : 重力加速度, σ_z : 全応力, σ_z' : 有効応力, γ_d' : 深さ方向の低減係数, $FL(L)$: 格子間隔 L の影響, $FG(G)$: 改良体剛性の影響, $FH(H)$: 改良長さの影響に関する補正係数である。

さらに、文献2)において、改良長さの適用範囲を15mから20mに広げるとともに、検討用地震動に東北地方太平洋沖地震での観測波を加え、地表面最大加速度の目標を設定して地震応答解析を行い、(1)式の補正係数を見直した。地震応答解析の詳細については文献1), 2)を参照されたい。

2.2 補正係数の見直し

補正係数見直しのために実施した解析ケースをTable 1に示す。改良長さ、格子間隔、改良体せん断剛性をパラメータとする地震応答解析を行い、格子内地盤の最大せん断応力を算出した。入力地震動は1995年兵庫県南部地震のポートアイランド鉛直アレイGL-32m記録NS成分(以下、PI波と呼ぶ)と2011年東北太平洋沖地震の夢の島での工学的基盤担当波(以下、夢の島波と呼ぶ)とした。解析における地表面最大加速度の目標値は、細砂層 $H=5\text{m}$ の未改良地盤モデルでPI波に対して 3.5m/s^2 、夢の島波で 2.0m/s^2 を目安とした。解析結果を(1)式で評価するにあたって α_{\max} は未改良地盤での地表面最大加速度(Table 2)とし、解析結果の最大せん断応力 τ_{\max} ～深さ関係を最もよく再現できる低減係数 γ_d' と各解析ケースの補正係数 $F(L)$, $F(G)$, $F(H)$ を求めた。地震動ごとに得られた補正係数のプロットとその平均とした近似式をFig. 3および式(2)～(5)に示す。

$$FL(L) = 0.29 \log_e(L) - 0.12 \quad 4 \leq L(\text{m}) \leq 20 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} FG(G) &= -0.45 \log_e(G) + 3.94 \quad (L \leq 9\text{m}) \\ &= -0.33 \log_e(G) + 3.16 \quad (9\text{m} < L \leq 19\text{m}) \\ &= -0.21 \log_e(G) + 2.38 \quad (19\text{m} < L \leq 20\text{m}) \\ & \quad 350 \leq G(\text{N/mm}^2) \leq 1400 \end{aligned} \quad (3)$$

$$FH(H) = 0.87e^{0.01H} \quad H(\text{m}) \leq 20 \quad (4)$$

$$\gamma_d' = 1 - 0.026z \quad z(\text{m}) \quad (5)$$

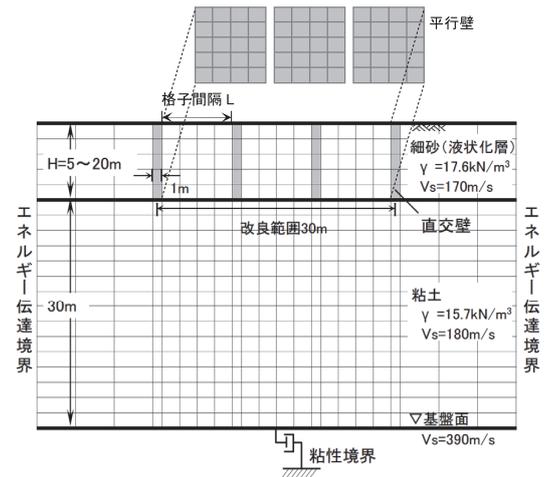


Fig. 2 解析モデル
Analysis model

Table 1 解析ケース
Analysis case

細砂層厚 H (m) (改良長さ)	格子間隔 L (m) (内法)	改良体せん断剛性 G (N/mm ²)
5	2.75, 4, 9, 14, 29	700
10	4, 9, 14	700
15	9, 14, 29	700
20	9, 14, 29	700 $L=9, 29\text{m}$ のみ $G=200, 350, 1400, 2100$ 追加

Table 2 入力地震動と未改良地盤での応答値
Input motions and response on unimproved ground

地震波	入力最大 加速度 (m/s ²)	地表面最大加速度 (m/s ²)			
		$H=5\text{m}$	$H=10\text{m}$	$H=15\text{m}$	$H=20\text{m}$
PI波	3.62	3.5	3.86	3.39	2.68
夢の島波	1.52	1.89	1.7	1.61	1.44

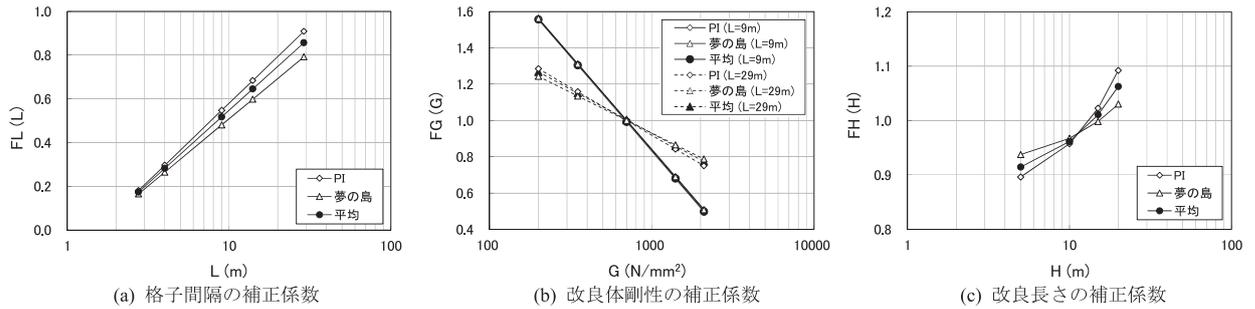


Fig. 3 簡易算定式の補正係数
 Functions of simple calculation method

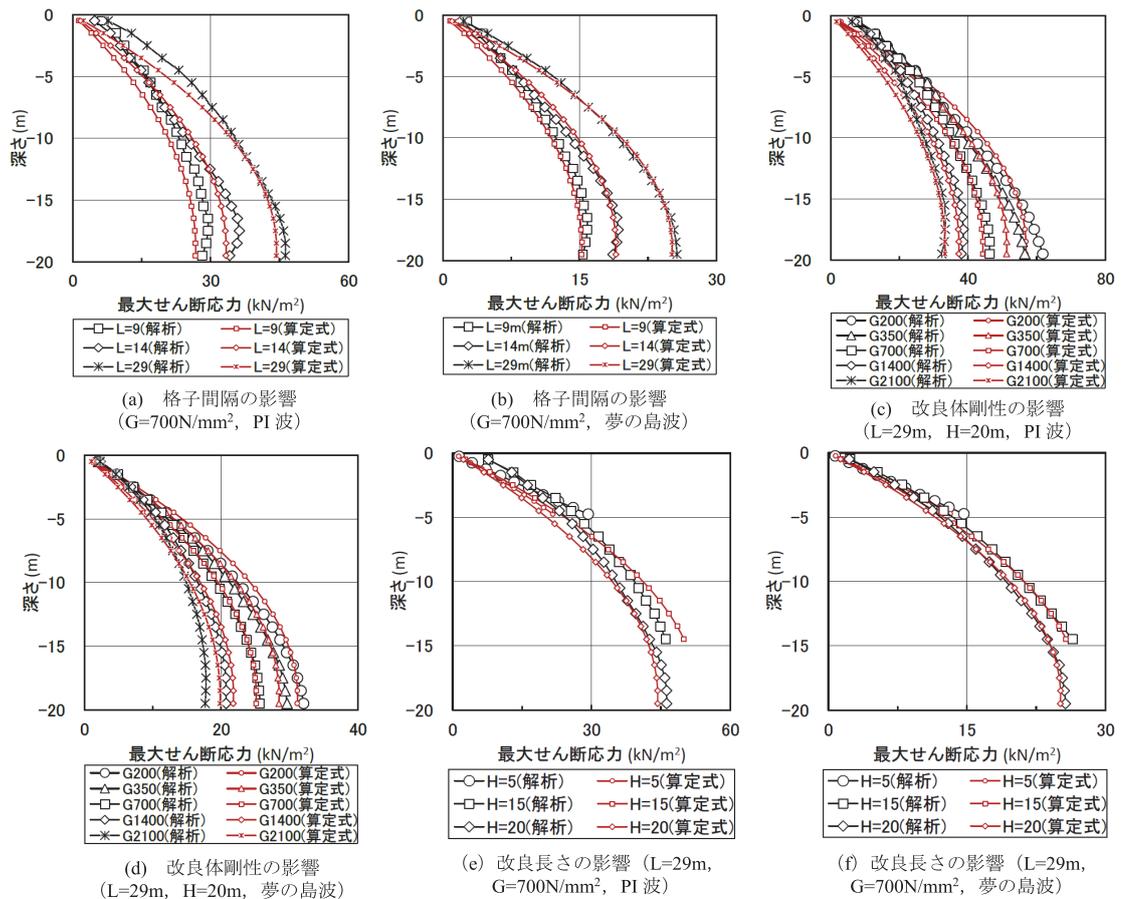


Fig. 4 解析と簡易算定式による格子間地盤の最大せん断応力の比較
 Relationship between analysis and simple calculation method of maximum shear stress of ground

解析結果の τ_{max} とFig. 3の補正係数(平均)を用いて(1)式から求めた τ_{max} をFig. 4に示す。図より本評価式は格子間隔, 改良体剛性, 改良長さ及び地震波の違いによる格子内地盤のせん断応力の変化を概ね評価できることがわかる。

2.3 格子間隔を設定する式

格子内地盤の繰返しせん断応力比が(1)式で評価できると, 格子内地盤のFL値は次式で求めることができる。

$$FL = \left(\frac{\tau_1}{\sigma'_z} \right) / \left(\frac{\tau_d}{\sigma'_z} \right)_{Grid} \quad (6)$$

ここで, (τ_1/σ'_z) : 液状化抵抗比であり, 本論文では建築基礎構造設計指針³⁾に基づいてN値より算定した。

液状化防止のために必要な格子間隔Lは, (6)式に(1)式を代入し補正係数F(L)のLについて解いた次式で算定できる。

$$L = \exp \left[\frac{(\tau_1/\sigma'_z) / \{ FL_d \cdot \gamma_n \cdot (\sigma_{max}/g) \cdot (\sigma_z/\sigma'_z) \cdot \gamma_d \cdot F(G) \cdot F(H) \} + 0.12}{0.29} \right] \quad (7)$$

ここで、 FL_d ：設計上の安全率である。(7)式を利用すれば、格子内地盤のFL値を1.0以上とするための格子間隔を設定することができる。

なお、FG (G) については、Fig. 3 (b) に示すように格子間隔によって影響を受けるので、格子間隔の範囲ごとに異なる (3) 式を採用することとした。

3 適用事例による簡易算定式の検証

提案する簡易算定式の有用性を確認するため、格子状地盤改良工法を適用した複数の事例に対して、簡易算定式による評価と地震応答解析結果とを比較した。Table 3 に適用事例の一覧を示す。

地震応答解析では、最大格子間隔となる範囲を通る部分を解析断面とし、改良範囲である建物幅と同程度の幅を両側に設けた範囲を疑似3次元等価線形解析 (super-FLUSH) によって地盤応答を評価した。解析モデルの1例をFig. 5に示す。建物の施工に伴い掘削される部分については、地盤要素を削除したモデルとした。事例ごとにPS検層結果に基づいて $V_s=400\text{m/s}$ 相当の工学的基盤まで地盤モデルを作成し、告示スペクトル適合波を入力し地震応答解析を行った。改良体の剛性は設計基準強度に応じて設定した。告示スペクトル適合波を振幅調整せずにそのまま工学的基盤に入力した場合の未改良地盤での地表面最大加速度は表中に示している (以下、告示入力と略す)。未改良地盤の応答とはFig. 5における解析対象範囲の最外周部における応答とした。適用事例は告示入力に対して地表面での応答加速度が 3.5m/s^2 未満となるものを選定している。なお、同じ地震波を用いて入力振幅を調整し未改良地盤で地表応答加速度 2.0m/s^2 とした場合 (以下、地表 2.0m/s^2 と略す) の検討も実施した。

簡易算定式による検討では、長方形の格子形状を等価な面積の正方形に換算した格子間隔として応力算定した。格子内地盤の最大せん断応力算定にあたり、地表面最大加速度はTable 3の値と 2.0m/s^2 の2通りとした。

Fig. 6は事例No.3における地震応答解析と簡易算定式による格子内地盤の最大せん断応力 τ_{\max} の比較である。解析では改良範囲となる深度において、未改良地盤に比べて格子内地盤の τ_{\max} が小さくなっている。簡易算定式による τ_{\max} は告示入力、地表 2.0m/s^2 の場合のいずれにおいても解析結果に対して深度の浅い部分でやや大きめの評価となっている。これは、地震応答解析では建物建設に伴う掘削範囲の地盤要素を削除しているが、簡易算定式では地表から算定していることにより、浅い地盤での応力評価に差があるためと考えられる。

Fig. 7は格子内地盤のFL値を簡易算定式と地震応答解析で求めた場合の比較である。簡易算定式のFL値は改良範囲の深度において解析結果より小さくなっており、安全側の評価になっている。

Table 3 適用事例の格子状地盤改良の仕様
 Specifications of ground improvement

No.	改良地盤の緒元							未改良地盤 地表面最大 加速度 (m/s^2)
	最大 格子間隔 (m)		比率 幅/奥行	改良長 m	改良深度 GL-m	改良剛性 N/mm^2	設計基準 強度 N/mm^2	
	幅	奥行						
1	14.6	15.5	0.94	14	1.0~14.0	700	1.5	2.93
2	13.25	14.5	0.91	11.85	4.15~16.0	700	1.5	2.27
3	14.5	14	1.04	7	3.0~10.0	700	1.5	2.98
4	11.2	7.7	1.45	5.45	3.05~8.5	700	1.5	3.32
5	13.4	9.8	1.37	9.3	1.4~10.7	800	1.8	2.78
6	9.75	12.25	0.80	18	1.4~18.0	700	1.5	2.87

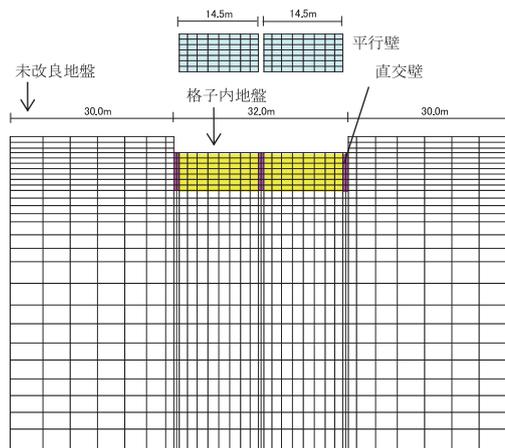


Fig. 5 解析モデル例 (事例3)
 Analysis model (No.3)

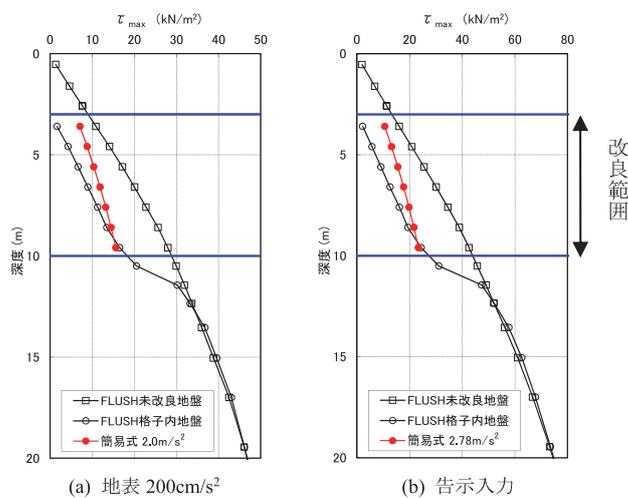


Fig. 6 最大せん断応力 (事例3, 掘削深さ3.0m)
 Maximum shear stress (No.3)

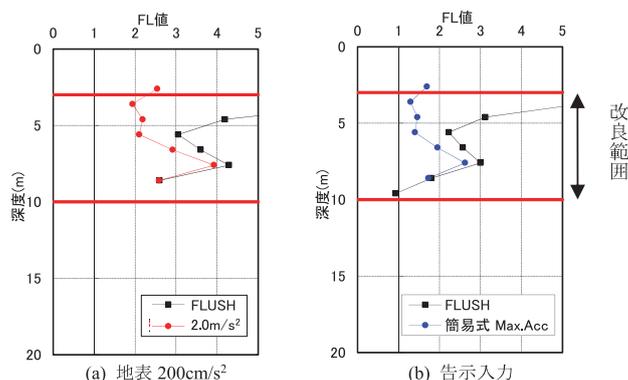


Fig. 7 格子内のFL値
 FL value of ground surrounded by improved walls

Fig. 8, 9は対象事例において改良対象とした深度におけるFL値を簡易算定式と解析結果で比較したものである。Fig. 8は地表 2.0m/s^2 の場合、Fig. 9は告示入力の場合である。告示入力と比較するための簡易算定式における地表面最大加速度はTable 3に示す値とした。Fig. 8 (a), Fig. 9 (a)のGL-5m以浅の範囲では簡易算定式のFL値が解析結果による値よりかなり小さい場合がある。これは、地震応答解析において地盤要素を削除しているが、簡易算定式では地表から算定していることによる差が影響していると考えられる。一方、GL-5~10mおよびGL-10~20mの範囲においては、簡易算定式が解析結果のFL値よりやや小さめである。また、このことはそれぞれの地震動レベルに対して格子状地盤改良の格子間隔を設定する方法として簡易算定式が安全側の評価になっていると言える。

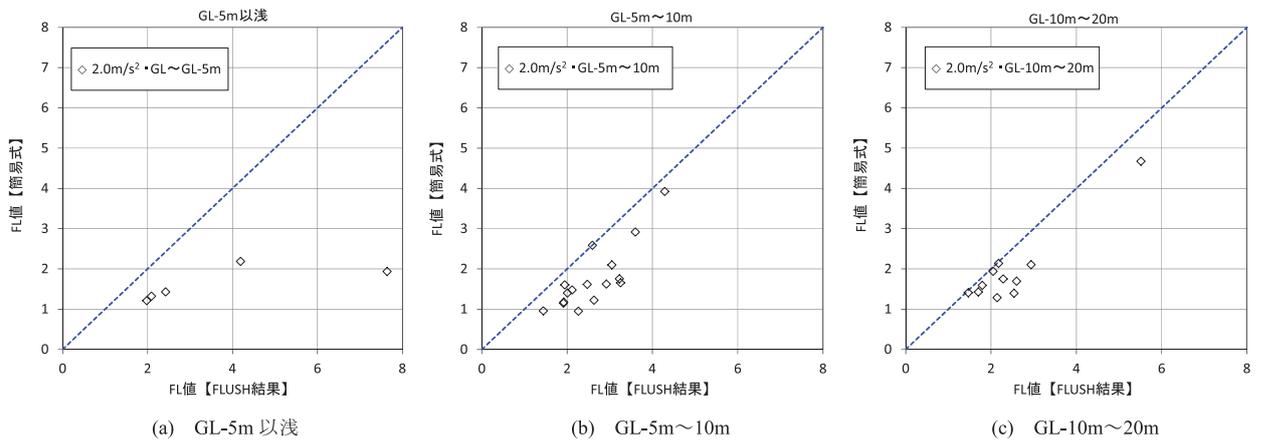


Fig. 8 FL値の比較 ($\alpha_{\max}=2.0\text{m/s}^2$)
 Comparison of FL values ($\alpha_{\max}=2.0\text{m/s}^2$)

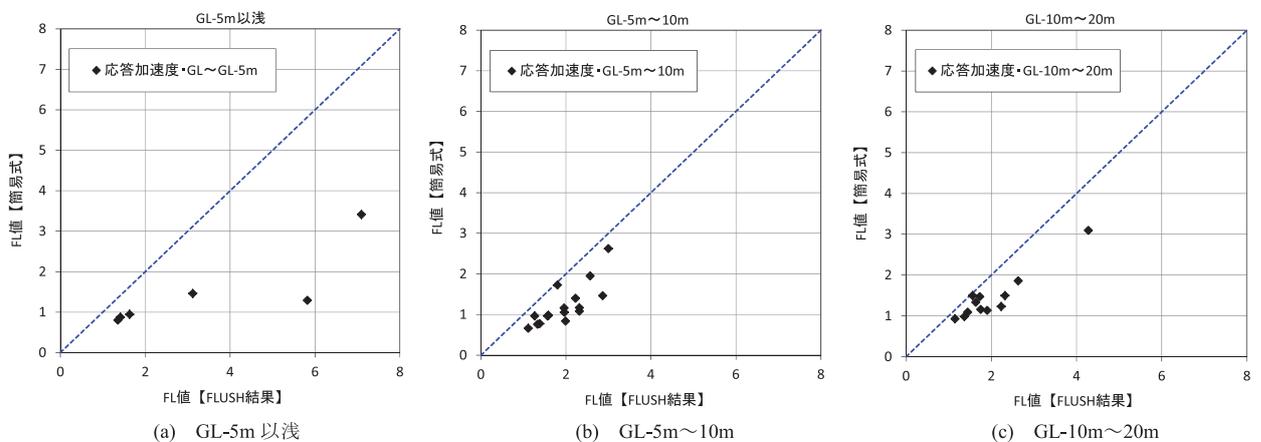


Fig. 9 FL値の比較 (α_{\max} =応答加速度)
 Comparison of FL values (α_{\max} =response of surface)

4 まとめ

地盤の液状化対策として用いる格子状地盤改良工法において、格子間隔を算定する簡易算定式の見直した式を紹介するとともに、適用事例による検証を行った。地表面での応答加速度が 3.5m/s^2 未満の範囲において、簡易算定式で算定したFL値は、地震応答解析結果よりやや小さめの評価になることがわかった。

参考文献

- 1) 田屋裕司, 内田明彦, 吉澤陸博, 鬼丸貞友, 山下清, 津國正一: 格子状地盤改良における格子間隔の簡易設定法, 地盤工学ジャーナル, Vo.I.3, No.3, pp.203-212, 2008年9月
- 2) 内田明彦, 田屋裕司, 本多剛, 津國正一, 小西一生: 格子状地盤改良工法における格子間隔簡易設定法の適用性, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.3, pp.259-267, 2016年9月
- 3) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp.61-72, 2001年10月