杭基礎構造物を対象とした薬液注入による液状化対策の解析的検討

中央復建コンサルタンツ株式会社　正会員　○北原　満
中央復建コンサルタンツ株式会社　正会員　畔取　良典
中央復建コンサルタンツ株式会社　正会員　室谷　耕輔
鉄道総合技術研究所　正会員　澤田　亮

１．はじめに

液状化地盤上に構築された鉄道の既設杭基礎構造物は，液状化の発生に伴う地盤抵抗の減少により，杭の損傷や，変位が大きくなることによる列車走行の安全性が懸念されるため，対策工が必要であると考えられる．そこで，用地範囲が限られる鉄道構造物の液状化対策としては，施工が比較的小規模な薬液注入による固加工法の適用が考えられる．模型杭による静的載荷実験[1)]では，通常起こりうる中規模程度の液状化に対して，杭径相当（1D）の範囲の改良で効果が発揮される事を確認している。また，鉄道の耐震基準[2)]における液状化地盤の杭基礎設計は，液状化抵抗率に応じた低減係数 D_E により地盤の強度定数を低減させることから，薬液注入の効果を設計で反映させる場合は，地盤反力係数を低減することが妥当であると考えられる[3)]．本研究は，文献 1)の実験結果から，薬液注入時の低減係数 D_E の設定を行い，試計算により薬液注入効果を検討する．

２．薬液注入時における低減係数 D_E の設定について

図－１に実験結果から得られた水平変位および杭径と地盤反力係数の関係を示す．ここで，地盤反力係数は，水平変位，水平荷重，杭の剛性から Chang の式を用いて算出したものである．また，**表－１**に非液状化時の地盤反力係数を 1 とした場合の各ケースにおける地盤反力係数の比率を示す．試計算に用いる薬液注入時の低減係数 D_E は，**表－１**の地盤反力係数の比率を反映させて設定する．その設定の方法は，**図－２**に示す設計事例の構造物を用いて解析を行い，得られた水平変位，水平荷重，杭の剛性から実験と同様に Chang の式を用いて地盤反力係数を算出する．次に，任意に地盤反力係数を低減させて同様の解析を行い，初期に設定した地盤反力係数と算出された地盤反力係数の比率が**表－１**の比率になるまで繰り返し解析を行って低減係数 D_E を設定する．

図－２に計算に用いる構造物のモデル，土質条件，液状化対象層を示す。このモデルを用いた解析により設定した低減係数 D_E を**表－２**に示す．設定の結果，中規模液状化時の低減係数 D_E は，無対策 0.13 に対して，4D 改良では 0.94 程度，1D 改良は 0.42 程度まで増加している．また，完全液状化に対しては，4D 改良でも 0.12 まで低減しており，1D 改良は，ほぼゼロに近い 0.03 まで低減する．このように，本解析モデルを用いた検討では，中規模液状化に対して薬液注入効果あると考えられる。

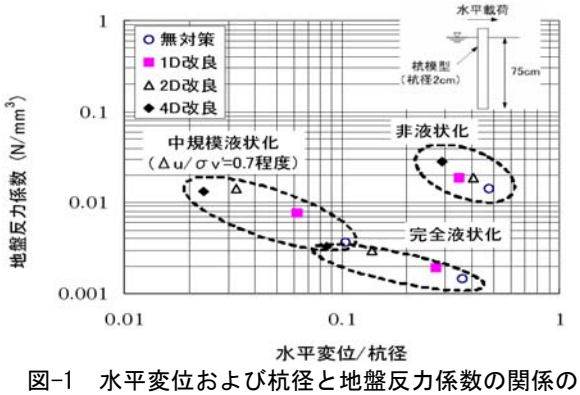


図-1　水平変位および杭径と地盤反力係数の関係の関係

表-1　実験結果の地盤反力係数の比率

液状化程度	薬注範囲	地盤反力係数 (N/mm²)	比率
非液状化	無対策	0.0150	1.00
中規模液状化	4D改良	0.0140	0.93
	1D改良	0.0078	0.52
	無対策	0.0037	0.24
完全液状化	4D改良	0.0033	0.22
	1D改良	0.0020	0.13
	無対策	0.0015	0.10

表-2　低減係数 D_E

ケース	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
薬注範囲	非液状化	中規模液状化時		
		4D改良	1D改良	無対策
杭頭変位(mm)	38.44	40.38	62.794	89.17
杭頭水平荷重(kN)	1057	1055	1052	835
地盤反力係数(kN/m3)	8342	7792	4308	1984
低減係数DE	1.0	0.94	0.42	0.13
ケース	-	ケース5	ケース6	ケース7
薬注範囲	-	完全液状化時		
		4D改良	1D改良	無対策
杭頭変位(mm)	-	91.6	106.46	114.11
杭頭水平荷重(kN)	-	809	634	560
地盤反力係数(kN/m3)	-	1835	1085	838
低減係数DE	-	0.12	0.03	0.0

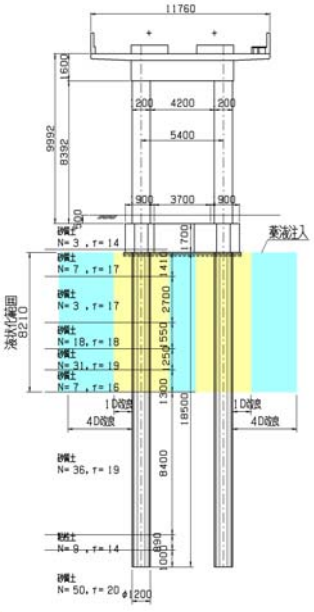
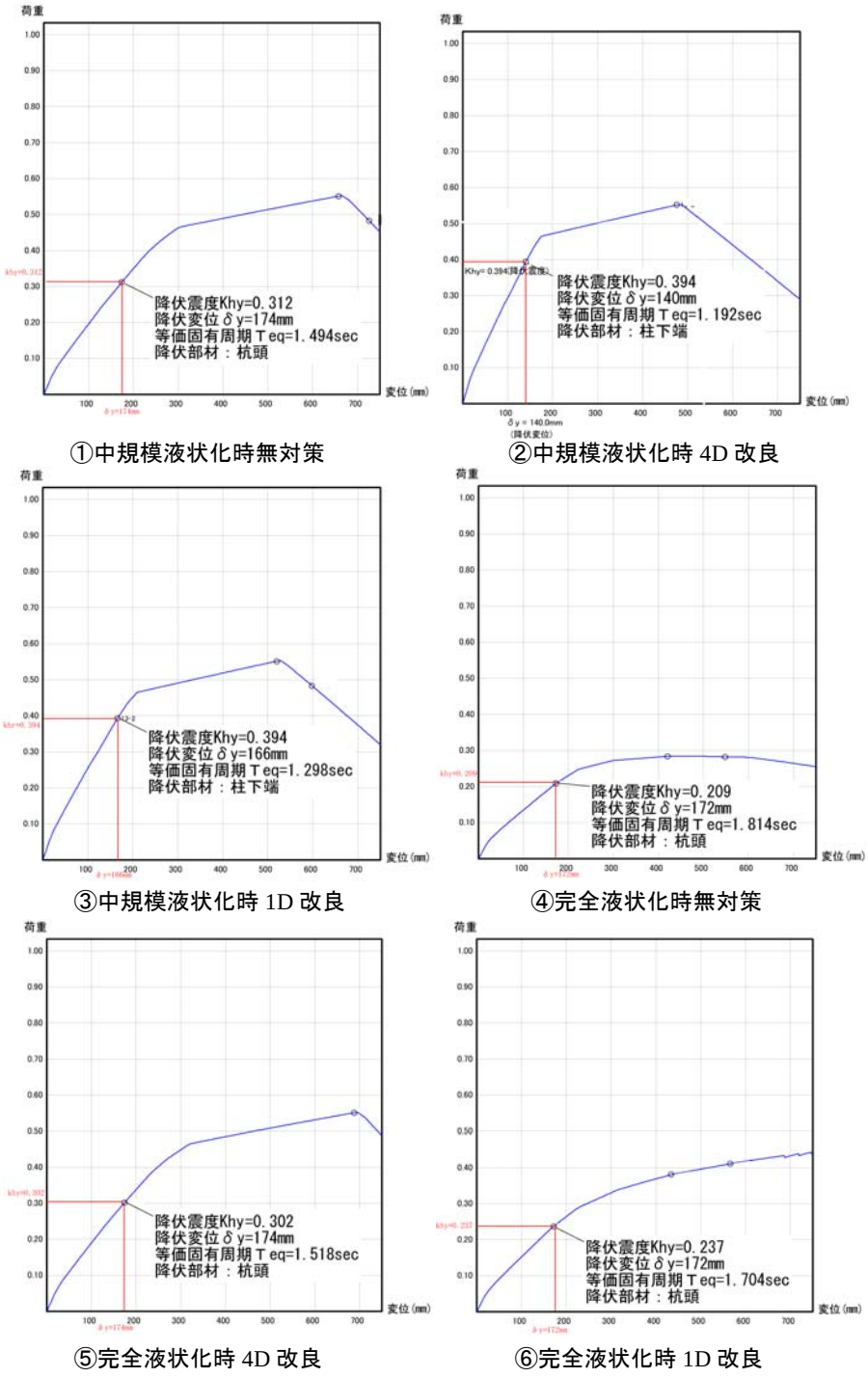


図-2　構造物モデル

Key Words：薬液注入，杭基礎構造物，地盤反力係数，液状化
連絡先：〒533-0033　大阪府東淀川区東中島 4-11-10　TEL 06-6160-2212　FAX 06-6160-1235

３．設定した低減係数 D_E を用いた試計算

設定した低減係数 D_E を用いた試計算結果として，構造物天端における変位と荷重の関係を**図－３**に示す．①中規模液状化時の無対策は，構造物の降伏時の震度（Khy）が 0.312，降伏時の変位（δy）が 174mm である．また，最初に降伏する部材は，杭頭である．②中規模液状化時に 4D の範囲で改良を行うと，降伏震度が 0.394 に増加する．降伏変位は，140mm であり，無対策時の変位の約 80%まで減少する．また，最初に降伏する部材は，薬液注入の効果により杭の損傷が生じず，柱下端が先行降伏する結果となった．③中規模液状化時に 1D の範囲で改良を行った場合は，降伏変位が 166mm となり，無対策時の約 95%である．対策効果としては，4D の範囲で改良を行う場合より小さいが，4D 改良と同様に，先行降伏する部材は，柱下端である．④完全液状化時の無対策は，構造物の降伏震度 0.209，降伏変位 172mm となった．また，最初に降伏する部材は杭頭である．⑤完全液状化時に 4D の範囲で改良を行うと，降伏震度が 0.302 に増加する．しかし、降伏変位は 174mm であり無対策とほぼ同じである．また，先行降伏部材は杭頭であり，中規模液状化時のように柱下端の降伏が先行しない結果となった．これは、4D の範囲で薬液注入を施しても，完全液状化時には低減係数 D_E が 0.12 まで低下していることから，薬液注入による改良が完全液状化時にはあまり寄与しなかったと考えられる．⑥完全液状化時に 1D の範囲で改良を行った場合は，低減係数 DE が 0.03 まで低下していることから、④の無対策時の傾向とほぼ同じとなった．



①中規模液状化時無対策　②中規模液状化時 4D 改良

③中規模液状化時 1D 改良　④完全液状化時無対策

⑤完全液状化時 4D 改良　⑥完全液状化時 1D 改良

図-3　荷重－変位曲線

４．まとめ

本研究では，実験結果を用いた低減係数 D_E の設定と，設定した低減係数 D_E を用いた試計算により薬液注入の効果を検証した．その結果，本検討に用いた試計算では，薬液注入を施すことで中規模液状化時に降伏震度の増加や先行部材の変更などの対策効果が見られた．一方，完全液状化時には，低減係数 D_E がかなり小さくなったため，薬液注入による対策効果はあまり見られない結果となった，今後は，実験やそのシミュレーション、他の設計事例の試計算等を踏まえ，設計に用いる場合の薬液注入の低減係数 D_E について提案したい．

＜参考文献＞1)桐生郷史，澤田亮：杭基礎周面に限定した改良による液状化対策工に関する実験的研究，第 28 回土木学会地震工学会研究発表会，2005 年 8 月　2)（財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）平成 11 年 10 月
3）澤田亮，伊藤晋：薬液注入による杭基礎の液状化対策に関する一考察，第 43 回地盤工学会研究発表会，2008 年 7 月