自重解析による河川堤防の耐震対策実験のシミュレーション

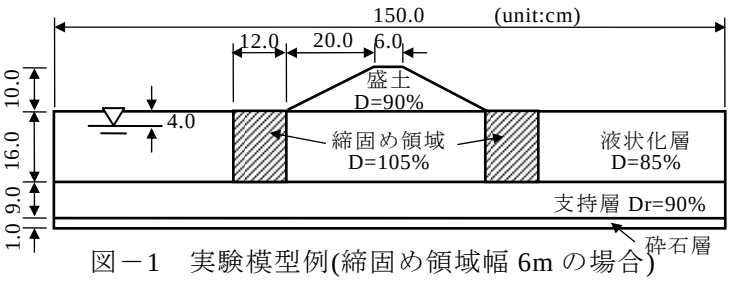
土木研究所　正会員　○豊田耕一
土木研究所　正会員　　杉田秀樹
国土交通省四国地方整備局　正会員　　石原雅規

1. はじめに

地震時における堤防の機能として，被害を受けても浸水等の二次災害を防止することが期待される．「建設省河川砂防技術基準(案)同解説」[1)]によれば，耐震性能評価では地震後の堤防の変形量を評価できることが望まれるとしている．そのため，筆者らは，液状化に伴う変形量を求めるため，安田らの方法[2)]を用いて，河川堤防の地震被害事例を対象とした解析的検討を行ってきた[3)4)]．本研究では，締固め工法による液状化対策が施された堤防の実験[5)]のシミュレーションを行い，天端沈下量低減に着目した対策効果の再現性について検討した．

2. 自重解析手法

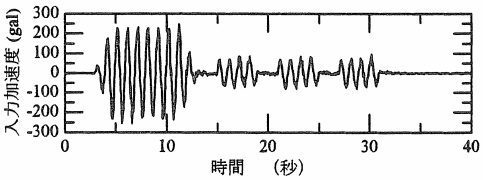
本研究では，液状化層の剛性を低下させ自重による地震時残留変形を求める有限要素法である安田らの方法[2)]を解析手法として用いた．解析は，初期応力解析，液状化による自重解析，圧密沈下解析の順に行い，液状化による自重解析と圧密沈下解析による変形を足し合わせて天端沈下量を求めた．初期応力解析は，全ての要素を線形弾性体とし，自重による初期応力を算出した．液状化による自重解析は，応力解放法[2)]を用いて行った．この時，液状化層の応力－ひずみ関係は下に凸なバイリニアモデルで表現するが，その剛性は液状化強度比 R_L と液状化安全率 F_L から安田・稲垣の式[6)]を元に実被害事例の解析結果などを加味した上で外挿したチャートにより設定した．この剛性チャートについては，文献 4)を参照されたい．非液状化層および盛土は線形弾性体としたが，その剛性は天端中央直下非液状化層下端の要素に引張応力が発生しなくなる上限値をイタレーションにより求めて与えた．その時，簡単のため非液状化層と盛土の初期剛性が異なっても，液状化による自重解析時には非液状化層と盛土に同じ剛性を与えた[3)]．圧密沈下解析では，過剰間隙水圧消散に伴う圧密沈下量を石原・吉嶺の体積ひずみに関する実験[7)]を基に有限要素法により求めた．本研究のような大きな残留変形を伴う事例では，大変形理論や弾塑性非線形解析などを適用することが望ましいが，ここでは簡単のため微小変形理論および液状化による自重解析時の液状化層以外は線形弾性体モデルによる解析を適用した．



図－1　実験模型例(締固め領域幅 6m の場合)

３．解析対象実験の概要および解析条件

解析の対象とした実験は，両法先を締固めた堤防の動的遠心模型実験[5)]である．図－1 に実験模型例を示す．実験は，50G（G は重力加速度）の遠心場において，図－2 に示す入力加速度により加振した．解析は，無対策で入力最大加速度をパラメータとした実験と，入力最大加速度は同じで締固め領域幅をパラメータとした実験を対象とした．表－1 に解析ケースの一覧を示す．解析で与える地表面加速度には，入力波の影響を考慮するため，累積損傷度理論により調整した等価加速度を与えた．解析に用いた物性値の一覧を表－2 に示す．これら物性値は各種の室内試験結果から設定した．



図－2　実験の入力加速度の時刻歴

表－1　解析ケース一覧

解　析ケース	入力最大加速度 (gal)	等価加速度 (gal)	締固め領域幅 (m)
無対策 1	136	114	—
無対策 2	225	159	
無対策 3	430	241	
締固め 1	225	159	6
締固め 2			10

(重力場換算値)

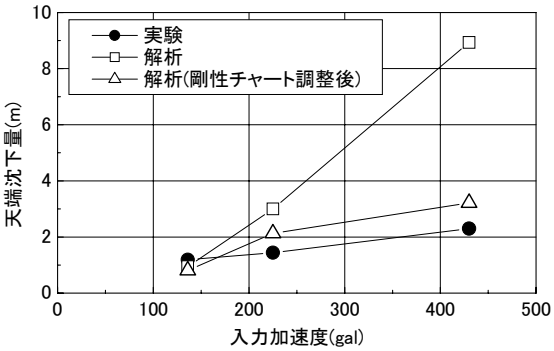
キーワード　液状化，残留変形，自重解析，河川堤防，耐震対策
連絡先　〒305-8516　茨城県つくば市南原１－６　（独）土木研究所耐震研究グループ　TEL:029-879-6771

４．解析結果

実験のシミュレーションの結果を以下に述べる．図－3 に無対策 1～3 の実験と解析の堤防天端沈下量の比較を示す．同図では２つの解析結果を示しているが，□は「**2．自重解析手法**」で述べた剛性チャートによる解析結果であり，加速度が大きいほど実験との差が大きい．この理由としては，微小変形理論の適用範囲を超えていることや，液状化強度比が 0.15 と小さい領域での沈下量の感度が大きいことなどが考えられる．そこで，前述の問題点を含めて，今回の実験結果に見合うように剛性チャートを調整した．△はその解析結果である．入力最大加速度が 225gal と 430gal では，それぞれの実験との差が見られるものの，２つのケースの増分（傾き）は解析と実験でほぼ同じであり，解析は実験の傾向をある程度表していると考えられる．

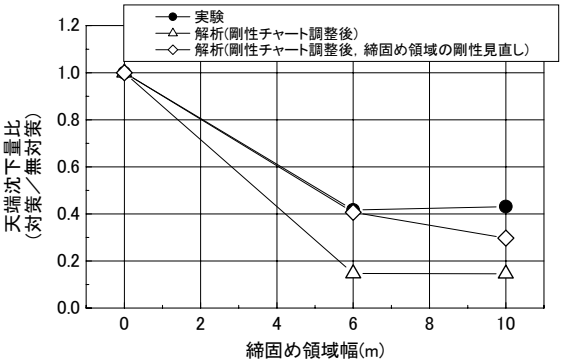
表－2　解析に用いた物性値一覧

		地盤材料	単位体積重量 (kN/m^3)	初期せん断剛性 (kPa)	初期ポアソン比	液状化強度比
盛土		江戸崎砂	17.0	15000	0.333	—
液状化層	水位以浅		15.7	15000		—
	水位以深		18.1			0.15
締固め領域	水位以浅		19.0	22500		—
	水位以深		20.1			0.40
支持層		硅砂	19.7	25000		—



図－3　無対策ケースの実験と解析の沈下量の比較

図－4 に無対策２に対する締固め１および２の天端沈下量比を示す．●で示した実験では，天端沈下量が締固めにより抑制される効果が見られる．△で示した解析結果は，無対策の実験結果に見合うように調整した剛性チャートによるものである．その時，締固め領域の剛性は，液状化層と同様に剛性チャートから設定することを考えたが，締固め領域の F_L（=1.8～2.0）は剛性チャートの適用範囲外であったため，初期せん断剛性が与えらた．この解析結果にも実験と同様に沈下量の抑制効果が見られるが，実験の沈下量よりもかなり小さい結果となった．そこで，締固め１の解析ケースにおいて，締固め領域のせん断剛性を実験の沈下量に一致するように低下させた．◇はその解析結果である．実験では締固め領域幅が 6m と 10m で対策効果に違いは見られないが，解析は対策効果が異なる結果となった．



図－4　対策ケースの実験と解析の沈下量の比較

５．おわりに

自重解析による河川堤防の耐震対策実験のシミュレーションを行った結果，無対策の実験の天端沈下量を定量的に再現するには剛性チャートを見直す必要があること，堤防法先の締固めによる対策効果を再現するには締固め領域の液状化時の剛性を低下させる必要があることが分かった．今後の課題としては，R_L が小さい場合の液状化層の剛性や締固め領域のような F_L が比較的大きい場合の剛性の合理的な設定方法を確立すること，大変形理論や非線形解析を適用することが考えられる．

最後になるが，本研究にあたっては，安田進教授をはじめとする ALID 研究会のメンバーには多大なる協力を頂いている．ここに深く感謝の意を表する．

参考文献

1) 建設省河川局：建設省河川砂防技術基準(案)同解説，1997
2) 安田ら：液状化に伴う流動の簡易評価手法，土木学会論文集，No.638/III-49，pp71-89，1999　など
3) 豊田･石原:自重解析による河川堤防の地震被害事例の解析,第 60 回土木学会年次学術講演会,pp.309-310, 2005
4) 豊田ら：河川堤防の地震被害事例に基づく液状化地盤の剛性に関する検討，日本地震工学会・大会-2005 梗概集，pp.226-227，2005
5) 岡村ら：地盤の液状化による盛土沈下対策工（締固め工法）の効果，第 36 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1343-1344，2001
6) 安田ら：液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性，第 40 回地盤工学研究発表会，2004
7) Ishihara, K. and Yoshimine, M: Evaluation of Settlement in Sand Deposits Following Liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, vol.28, No.1, pp.173-188,1992