地盤と建設
Vol. 26, No. 1, 2008

現場データに基づく空港盛土の地盤強度の不均質性に関する一考察

A Study on the Heterogeneity of Ground Strength in the Airport Embankments based on the In-situ Soil Tests

秦　吉弥　Yoshiya HATA　（日本工営（株）中央研究所）
一井康二　Koji ICHII　（広島大学大学院工学研究科）
加納誠二　Seiji KANO　（広島大学大学院工学研究科）
土田　孝　Takashi TSUCHIDA　（広島大学大学院工学研究科）

地盤材料が本質的に不均質性を有していることは，従来から広く知られており，盛土を耐震設計の対象とする場合，地盤強度の不均質性を考慮することは重要であるが，現在の盛土の耐震設計において，地盤強度の不均質性の影響が考慮されているのは数少ない．近年，地盤強度の不均質性が地震時における盛土斜面の安定性に及ぼす影響を評価する研究が報告されているが，地盤強度の不均質性の度合が予め仮定されているものが多い．これまで盛土内の地盤強度やその不均質特性はあまり明らかになっていないことから，本研究では，日本国内における空港盛土の土質試験データの収集整理を行い，空港盛土の地盤強度やその不均質特性に関する検討を行った．

キーワード：盛土，斜面安定，粘着力，内部摩擦角，細粒分含有率　（IGC：D06, E06）

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震以降，盛土についてもレベル２地震動に対して耐震性を確保する必要性が指摘された [1]．しかしながら，レベル２地震動に対して安全率１以上とすることには無理が生じるため安全率によらず直接，盛土の変形・変位量を照査する設計法が求められている [2]．

一方で，地盤材料が本質的に不均質性を有していることは，従来から広く知られており [3]，盛土に限らず土構造物を耐震設計の対象とする場合，地盤強度の不均質性を考慮することは重要であるものと考えられる．しかしながら現在の土構造物の耐震設計 [4),5)]において，地盤強度の不均質性の影響が考慮されているのは数少ない [4]．通常，地盤強度は均質であると仮定されて行われているのが現状である [5]．土構造物を施工する際，地盤強度を均質にすることは非常に困難であり，この仮定は地震時における盛土の残留変位量を用いて盛土崩壊の定量評価を容易に行うための仮定の１つにすぎない．近年，モンテカルロシミュレーションを用いて，地盤強度の不均質性が地震時における盛土斜面の安定性，すなわちすべり安全率や滑動変形量に及ぼす影響を評価する研究が報告されている [6),7)]．しかしながら実際の現場における地盤強度の不均質特性が反映されている研究 [6)]は数少なく，地盤強度の不均質性の度合を予め仮定した研究 [7)]が多いのが現状である．盛土は標準法勾配の採用や締固め規定の採用などにより施工されることが多いこと，地震被災時においても比較的容易かつ早急に復旧されるため，施工時や被災時に地盤強度試験が実施されるのは稀である．そのために，盛土内の地盤強度特性やその不均質特性はあまり明らかになっていない．

そこで本研究では，これまで比較的数多くの地盤強度試験が実施されている日本国内における空港盛土の土質試験データの収集整理を行った．そしてデータを分析することによって，空港盛土の地盤強度特性やその不均質特性に関する検討を行った．

2. 地盤強度特性概要

表-1 に収集整理した空港盛土の地盤強度データ [8)-24)]の一覧を示す．対象としたのは日本国内に存在し高盛土斜面を有する空港盛土の土質試験データである．収集した資料の種類としては，既往の研究論文 [8)-10)]，空港土木工事報告会資料 [11)-17)]，工事誌 [18)-24)]の一般公開資料に加え，空港事務所よりご提供いただいた資料であり，具体的な空港名称については匿名とさせていただきたい．また個々のデータの詳細に関しては，把握できていない部分もあるためご了承いただきたい．収集したデータについては，主に地盤強度(粘着力 c・内部摩擦角 ϕ)に関するデータに着目して整理を行った．三軸圧縮試験の条件としては，非圧密非排水(UU)条件，圧密非排水(CU)条件，圧密排水(CD)条件の３種類とした．なお，$\overline{\mathrm{CU}}$ 試験は，粘着力 c' はほとんど 0 に近く，また内部摩擦角 ϕ' は CD 試験の内部摩擦角 ϕ_d とほぼ等しくなると考えられるため，ここでは対象外とした．

表-1 収集整理した空港盛土の地盤強度データ一覧（参考文献8)-24)）

試験条件	地盤強度	各種パラメータ	Airport A 礫混じり砂	Airport B 砂質土	Airport C 礫混じり砂	Airport D 砂質土	Airport E 砂質土	Airport F 砂質土	Airport G 砂質土	Airport H 砂質土	Airport I 火山灰質砂	Airport J 砂質土	平均値
UU条件	粘着力 c	サンプリング数	23	-	11	-	-	-	-	-	-	8	14.0
		平均値(kPa)	50.6	-	65.4	-	-	-	-	-	-	51.4	55.8
		変動係数	0.196	-	0.462	-	-	-	-	-	-	0.335	0.331
	摩擦角 ϕ	サンプリング数	23	-	11	-	-	-	-	-	-	8	14.0
		平均値(deg.)	39.5	-	11.1	-	-	-	-	-	-	18.4	23.0
		変動係数	0.057	-	0.760	-	-	-	-	-	-	0.281	0.366
	相関係数 (c vs ϕ)		-0.402	-	-0.186	-	-	-	-	-	-	-0.381	-0.323
CU条件	粘着力 c	サンプリング数	-	-	14	-	4	-	6	-	14	6	8.8
		平均値(kPa)	-	-	12.2	-	4.7	-	67.1	-	7.0	12.5	20.7
		変動係数	-	-	1.068	-	0.626	-	0.603	-	0.880	0.841	0.804
	摩擦角 ϕ	サンプリング数	-	-	14	-	4	-	6	-	14	6	8.8
		平均値(deg.)	-	-	33.2	-	33.3	-	22.3	-	33.5	36.8	31.8
		変動係数	-	-	0.192	-	0.065	-	0.316	-	0.105	0.074	0.150
	相関係数 (c vs ϕ)		-	-	-0.811	-	-0.783	-	-0.655	-	-0.778	-0.479	-0.701
CD条件	粘着力 c	サンプリング数	-	7	-	5	4	9	6	9	-	10	7.1
		平均値(kPa)	-	24.1	-	28.7	33.1	35.8	81.7	48.9	-	13.0	37.9
		変動係数	-	0.477	-	0.178	0.264	0.494	0.145	0.182	-	0.958	0.386
	摩擦角 ϕ	サンプリング数	-	7	-	5	4	9	6	9	-	10	7.1
		平均値(deg.)	-	33.3	-	37.1	31.7	30.1	27.4	31.2	-	33.5	32.0
		変動係数	-	0.133	-	0.072	0.157	0.104	0.203	0.048	-	0.115	0.119
	相関係数 (c vs ϕ)		-	-0.100	-	-0.810	-0.870	-0.572	-0.554	-0.490	-	-0.359	-0.536

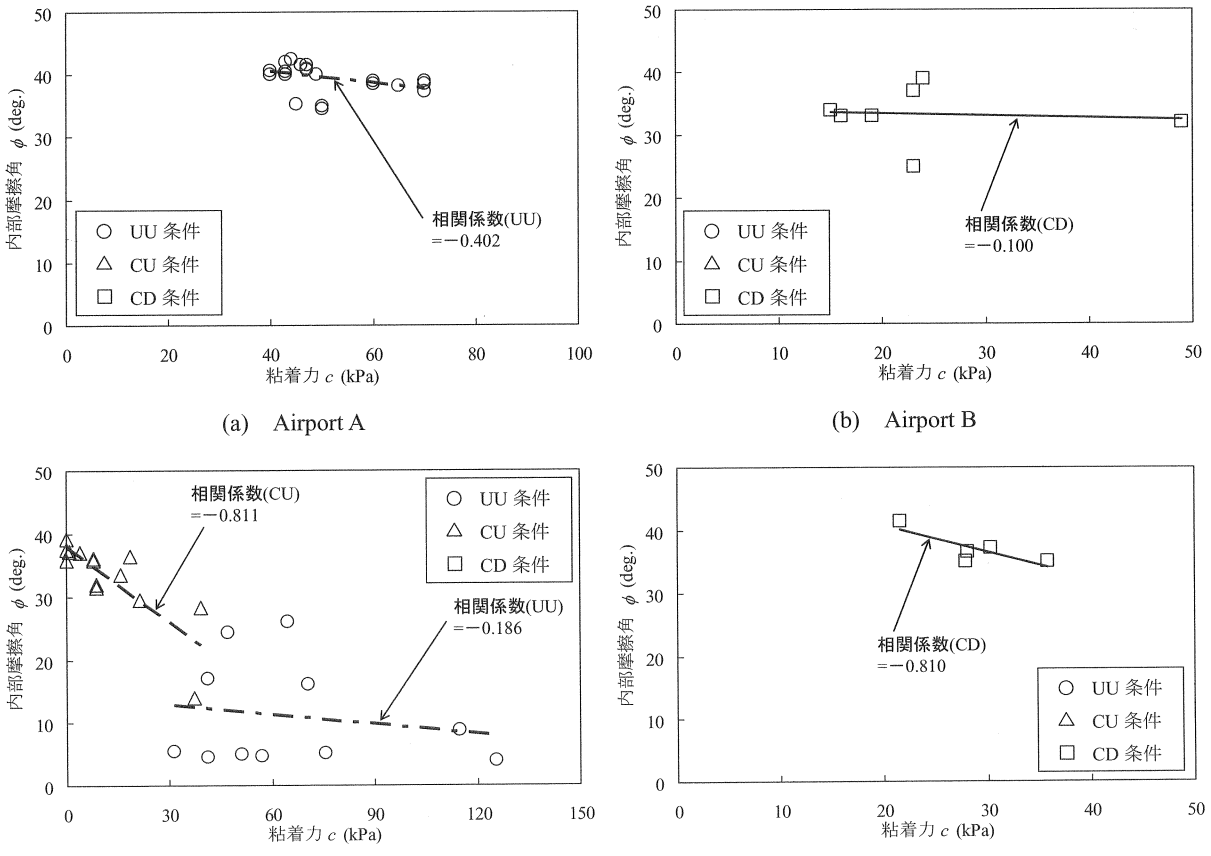
また供試体は指定の締固め度になるよう密度・含水比調整して作成され，水浸状態で試験が実施されているものが多いことを確認している．**表-1** より Airport A および Airport C の礫混じり砂や Airport I の火山灰質砂を含めて主に砂質土を盛土材料としているケースを対象としているため，三軸試験の条件としても CU 条件および CD 条件のケースが多く，同じ空港内においても複数の条件で三軸試験が行われている事例も存在することがわかる．

地盤強度の不均質度合を表現する指標の１つである変動係数(=標準偏差／平均値)に着目すると，UU 条件では粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の不均質度合は，両者の変動係数の平均値はともに 0.3 程度であり，大きな差異は確認できない．一方で，地震時における盛土斜面の安定問題に使用されることが多い CU 条件および CD 条件では，粘着力 c のほうが内部摩擦角 ϕ に比べ，変動係数の平均値が大きい傾向にある．また内部摩擦角 ϕ における変動係数の平均値の比較については，CU 条件と CD 条件において大きな差異は確認できない．

既往の研究[25),26)]では，粘着力 c の変動係数として V_c=0.3 程度および内部摩擦角 ϕ の変動係数として V_ϕ=0.1 程度の値が採用されるケースが多いが，これらの採用値は CD 試験の変動係数の平均値(V_c=0.386, V_ϕ=0.119)と概ね一致していることを確認することができる．

3. 粘着力と内部摩擦角の関係

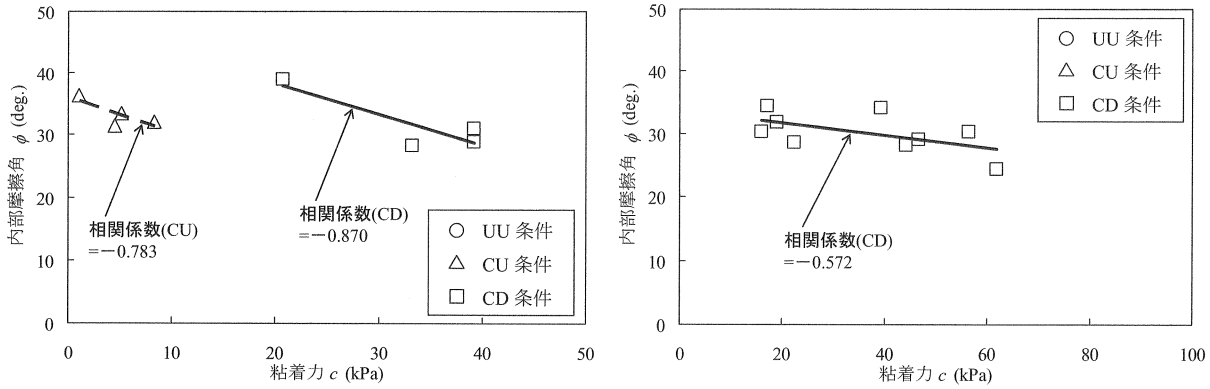
図-1 に各空港における粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の関係を示す．同図の横軸にあたる粘着力の最大値の表示が 50, 100, 150(kPa)とそれぞれ異なっていることに留意されたい．この図より，UU 条件では粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の相関性が低いものと考えられ，相関係数の平均値が-0.323 となっている(**表-1** 参照)．一方で，この図より CU 条件および CD 条件では，粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の間には概ね負の相関関係が成立していることを確認することができ，相関係数の平均値は CU 条件で-0.701，CD 条件で-0.536 となっている(**表-1** 参照)．既往の研究[25),26),27)]では，粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の関係について，相関を考慮していない研究[27)]，正の相関を採用している研究[25)]，負の相関を採用している研究[26)]がそれぞれ存在するが，本結果を参考にすれば粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の関係として負の相関を考慮した２次元正規分布[28)]に基づいたモンテカルロシミュレーションにより地盤強度の不均質性を表現するなどのアプローチの採用[29)]が推奨される．



(a) Airport A　(b) Airport B

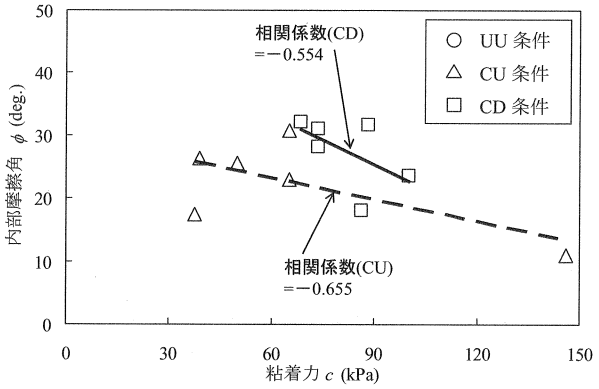
(c) Airport C　(d) Airport D

図-1 粘着力と内部摩擦角の関係

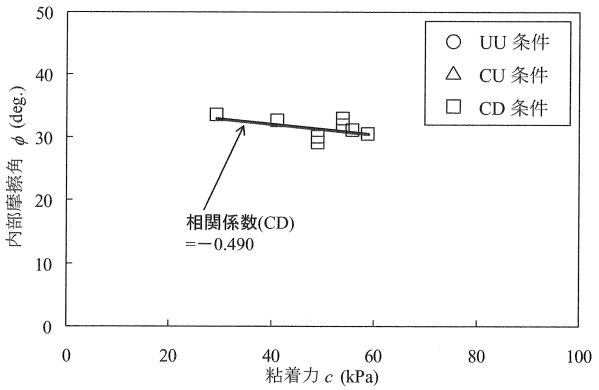


(e) Airport E

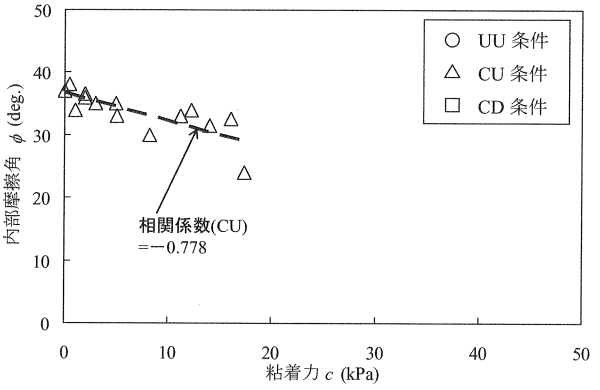
(f) Airport F



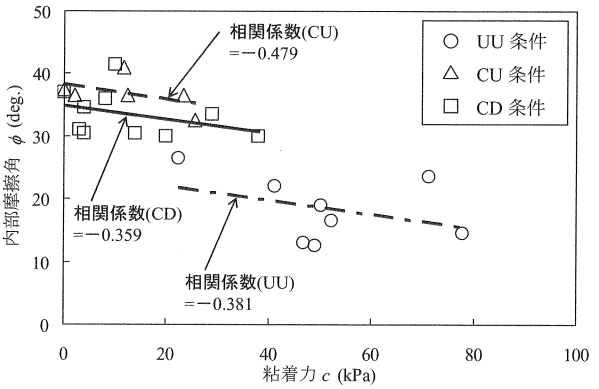
(g) Airport G



(h) Airport H



(i) Airport I



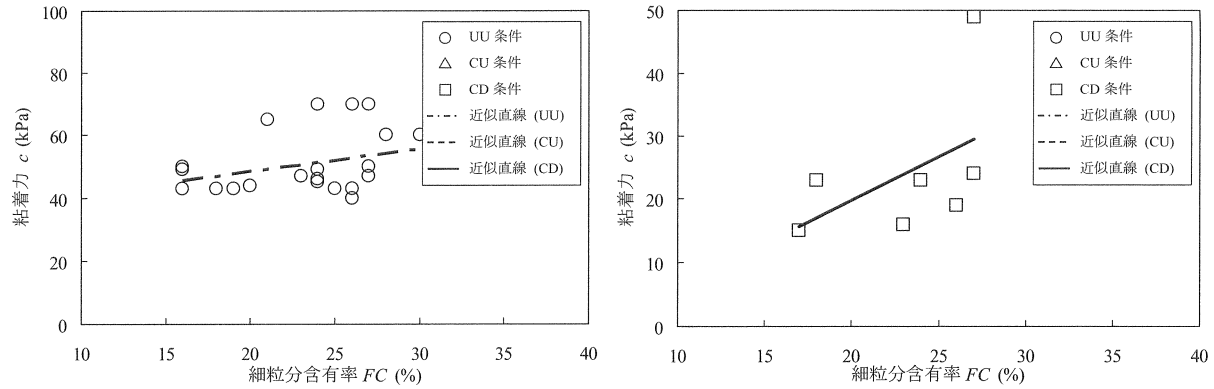
(j) Airport J

図-1 粘着力と内部摩擦角の関係（続き）

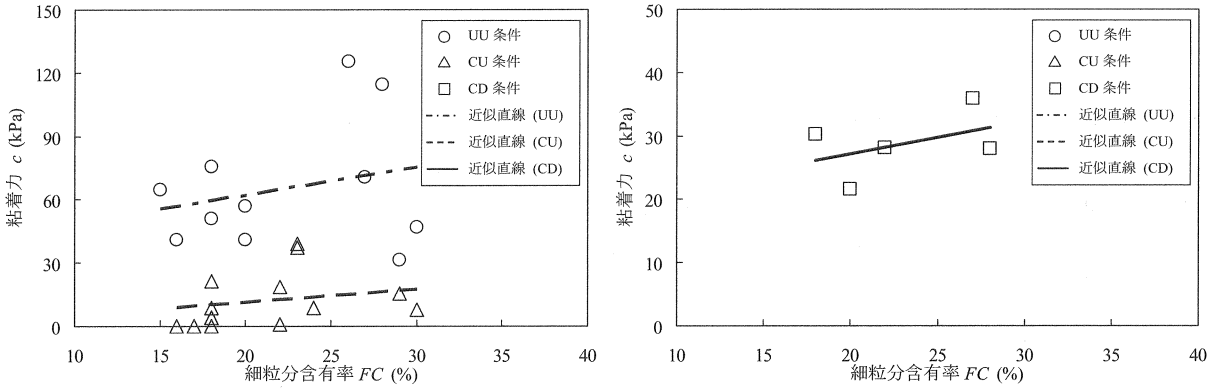
4. 細粒分含有率と粘着力の関係

図-2 に各空港における細粒分含有率 *FC* と粘着力 *c* の関係を示す．同図の縦軸にあたる粘着力 *c* の最大値の表示が 50, 100, 150(kPa)とそれぞれ異なっていることに留意されたい．この図より，土質材料が火山灰質砂である Airport I を除いて，細粒分 *FC* の増加に伴って粘着力 *c* が大きくなる傾向を確認することができ，この傾向は三軸試験の試験条件にはあまり依存していない．また CU 条件で得られた粘着力 c_{cu} は他の試験条件による結果に比べてバラツキが大きく，変動係数の平均値も 0.804 と比較的大きな値となっている（**表-1** 参照）．

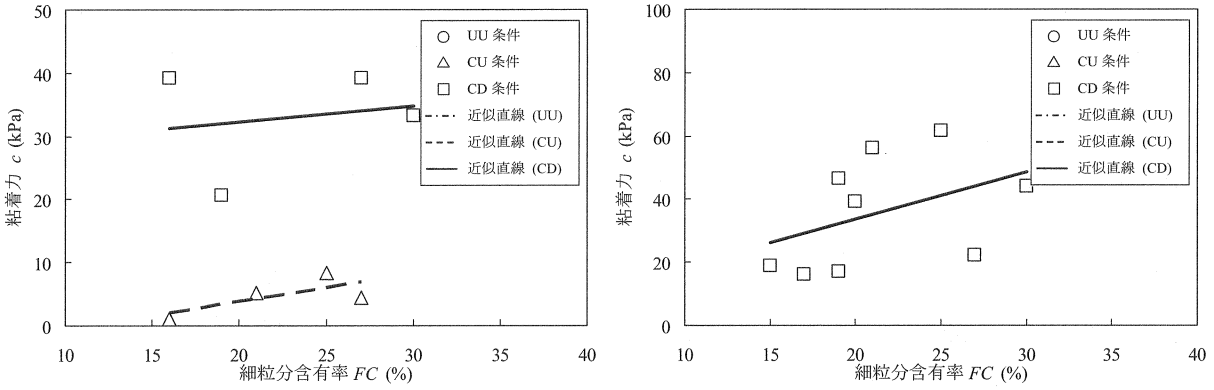
礫材を除けば，砂質土であっても地震時に発揮される土の強度は非排水強度(CU 試験強度)であると考えられる [9]．しかしながら本検討結果によれば，仮に CU 試験結果で比較的大きな粘着力 c_{cu} が得られた場合でも，粘着力の不均質性の影響が非常に大きいことが予想されるため，盛土の耐震性評価で使用する粘着力の設定には十分に留意する必要があるものと考えられる．



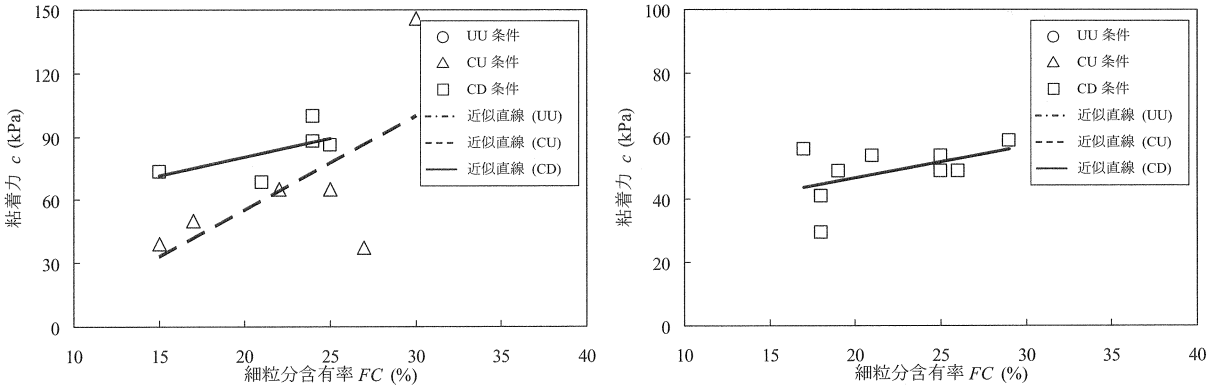
(a) Airport A　　(b) Airport B



(c) Airport C　　(d) Airport D

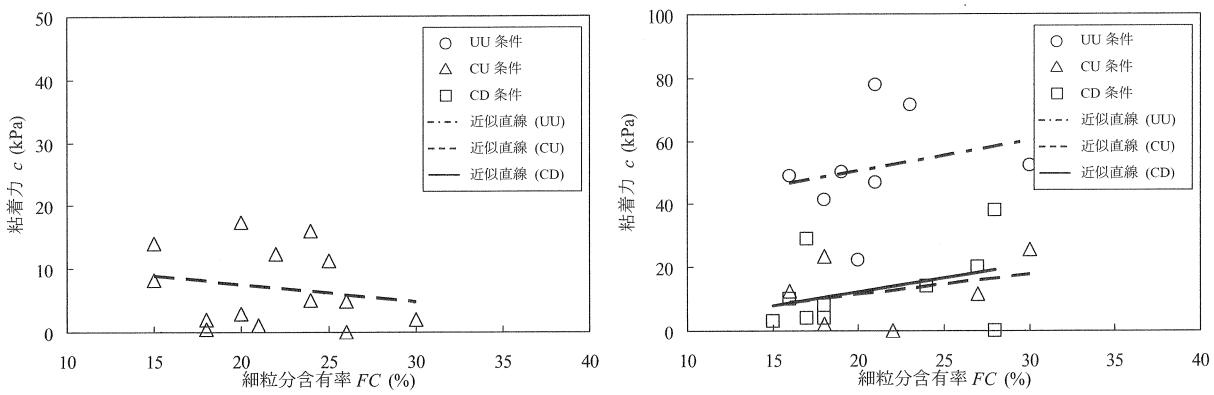


(e) Airport E　　(f) Airport F



(g) Airport G　　(h) Airport H

図-2　細粒分含有率と粘着力の関係



(i) Airport I　　(j) Airport J

図-2 細粒分含有率と粘着力の関係（続き）

5. 細粒分含有率と内部摩擦角の関係

図-3 に各空港における細粒分含有率 *FC* と内部摩擦角 ϕ の関係を示す．この図より，細粒分 *FC* の増加に伴って内部摩擦角 ϕ は一定値を示す傾向もしくは緩やかに低下する傾向を確認することができる．特に CD 条件による結果では，細粒分 *FC* の増加に伴い内部摩擦角 ϕ は減少する傾向が比較的強い．また UU 条件で得られた内部摩擦角 ϕ_u は他の試験条件による結果に比べてバラツキが大きく，変動係数の平均値も 0.366 と比較的大きな値となっている（**表-1** 参照）．

同図には，CD 試験結果のケースを対象として次式[30]により内部摩擦角 ϕ を推定した結果についても示している．

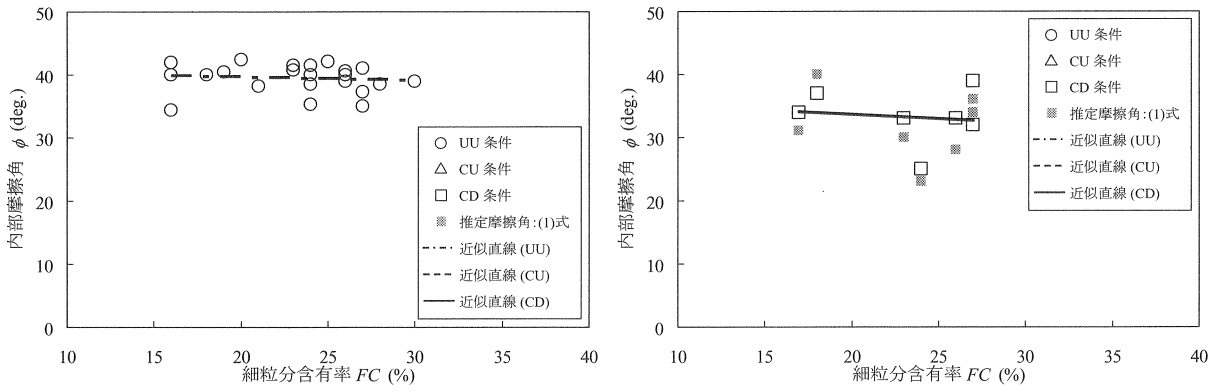
$$\phi = 25 + 3.2\sqrt{\frac{100N}{70+\sigma'_{v0}}} \qquad (1)$$

ここに，*N* は標準貫入試験値および σ'_{v0} は標準貫入試験値を測定した深度における有効土被り圧(kPa)である．N 値から推定した内部摩擦角と試験結果による内部摩擦角を比較すると，推定値は試験値と比較して小さめの値を示す傾向がある．この傾向より，耐震検討上は安全側といえるが，過大設計となる恐れもあるため，適用に際しては留意する必要があるものと考えられる．

6. まとめ

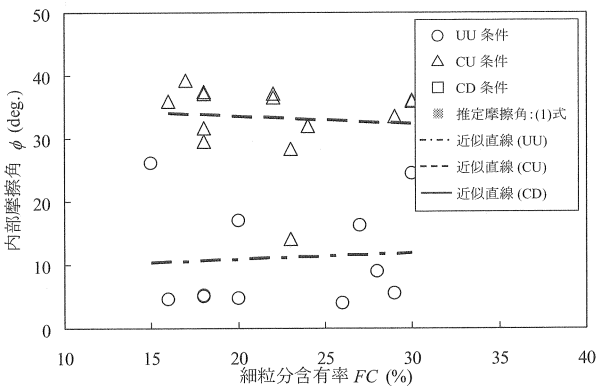
本研究では，日本国内における空港盛土の土質試験データの収集整理を行い，空港盛土の地盤強度特性やその不均質特性に関する検討を行った．得られた知見を以下に示す．

1) 三軸試験結果において CU 条件および CD 条件では，内部摩擦角よりも粘着力のほうが地盤強度の不均質度合を示す変動係数の値が大きい．
2) 三軸試験結果において CU 条件および CD 条件では，粘着力と内部摩擦角の間には，負の相関関係が成立している可能性が高い．
3) 細粒分の増加に伴って粘着力も増加する傾向があり，この傾向は三軸試験条件にはあまり依存しない．
4) 細粒分の増加に伴って内部摩擦角は一定値を示す傾向もしくは緩やかに低下する傾向があり，特に CD 条件では，細粒分の増加に伴い内部摩擦角は減少する傾向が比較的強い．

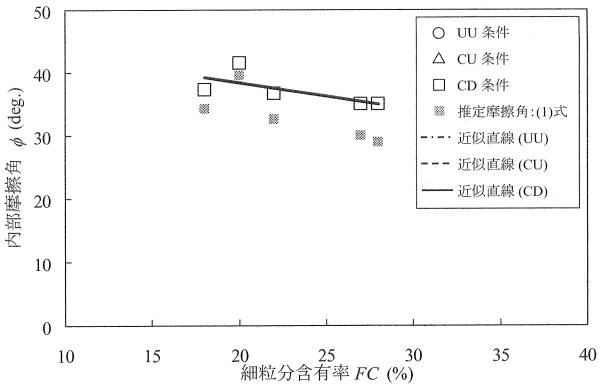


(a) Airport A　　(b) Airport B

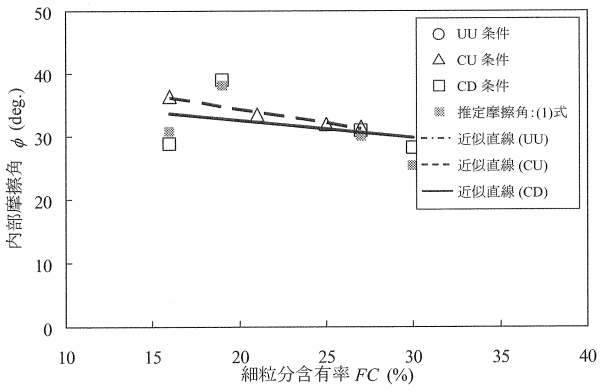
図-3 細粒分含有率と内部摩擦角の関係



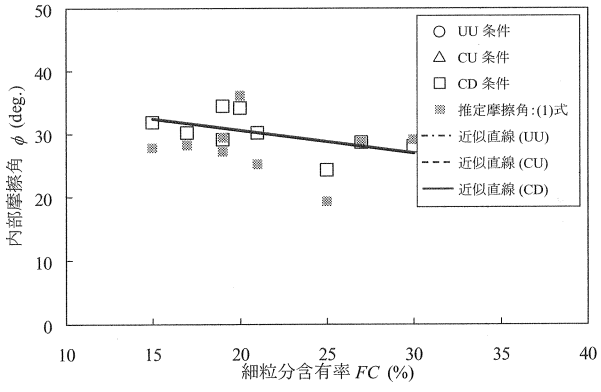
(c) Airport C



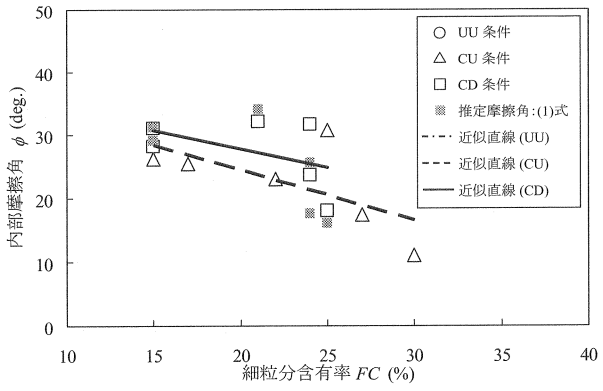
(d) Airport D



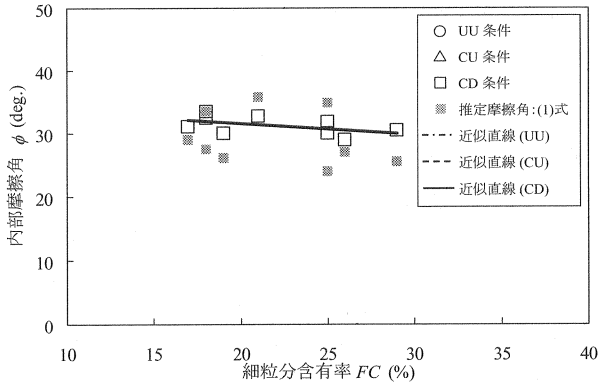
(e) Airport E



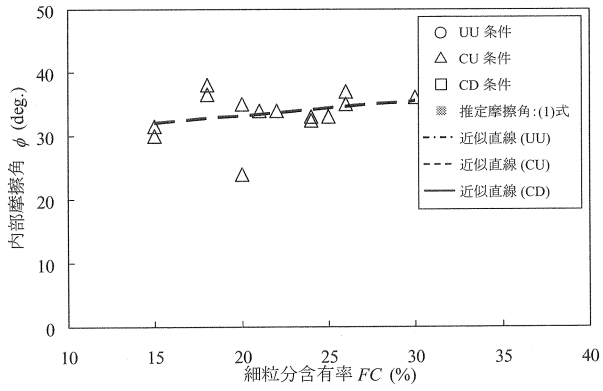
(f) Airport F



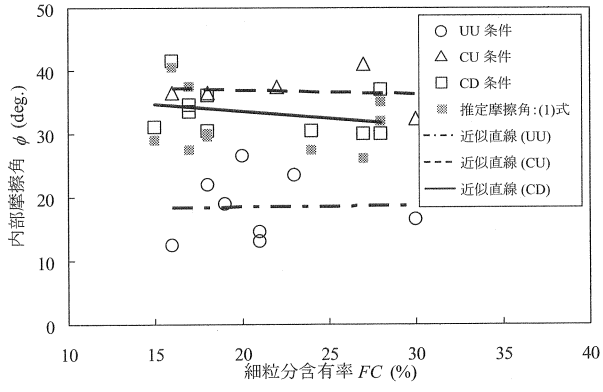
(g) Airport G



(h) Airport H



(i) Airport I



(j) Airport J

図-3 細粒分含有率と内部摩擦角の関係（続き）

5) N 値から推定した内部摩擦角と試験結果による内部摩擦角を比較すると，CD 条件において推定値は試験値と比較して小さめの値を示す傾向がある．

なお，本稿で示した結果は，限られた試験数量のものであり，統計量の議論に耐えない場合もあるため，今後のデータの蓄積により傾向が変わる可能性があることに留意されたい．今後はより詳細な検討を行い(空港盛土の密度管理や土質材料の準備状況などを考慮)，土質定数の空間的な不均質性の把握に努めていく予定である．

謝辞

本稿で使用した各種データの一部は，国土交通省北海道開発局函館開発建設部函館港湾事務所ならびに秋田県北秋田地域振興局大館能代空港管理事務所よりご提供いただいた．本工事の調査，設計，施工に携わった多くの関係各位に感謝の意を表します．

参考文献

1) (社)土木学会：土木構造物に関する第３次提言と解説，第８章，土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会，pp.29-34, 2000.

2) (社)地盤工学会：土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集，土構造物の地震時における許容変形と性能設計に関する研究委員会，322p., 2007.

3) たとえば松尾稔，黒田勝彦：盛土建設のための土質調査と盛土の安定性に関する研究，土木学会論文報告集，第 196 号，pp.75-86, 1971.

4) たとえば鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，土構造物，丸善，703p, 2007.

5) たとえば(財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木施設設計基準，国土交通省航空局監修，2005.

6) たとえば Hata, Y., Ichii, K., Tsuchida, T., Kano, S. and Yamashita, N.: A practical method for identifying parameters on the seismic design of embankments, *Georisk*, Vol.2, No.1, pp.28-40, 2008.

7) たとえば田中博文，沖村孝，鳥居宣之：盛土の地震応答特性評価に地盤の空間的不均質性が及ぼす影響，土木学会地震工学論文集，Vol.28, No.5, 2005.

8) 井合進，一井康二，佐藤幸博，桑島隆一：高盛土の地震応答解析，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.10, pp.1,557-1,562, 1998.

9) 土田孝，松田繁樹，西田ふみ：高盛土空港の地震時斜面安定解析に関する一考察，第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集(CD-ROM)，No.914, pp.1827-1828, 2003.

10) 秦吉弥，一井康二，土田孝，山下典彦：現場データを用いた盛土の耐震信頼性設計へのアプローチ，構造物の安全性・信頼性(JCOSSAR 2007)論文集，Vol.6, pp.333-338, 2007.

11) 青森県土木部青森空港建設事務所：青森空港試験盛土工事について，第 18 回空港土木工事報告会資料，1983.

12) 第三港湾建設局広島港工事事務所：新広島空港大規模土工の施工管理について，第 27 回空港土木工事報告会資料, 1992.

13) 岡山県岡山空港建設事務所：「大規模土工の施工管理について」岡山空港，第 27 回空港土木工事報告会資料, 1992.

14) 和歌山県土木部港湾課南紀白浜空港整備室，和歌山県南紀白浜空港建設事務所：南紀白浜空港の南側盛土工事，第 34 回空港土木工事報告会資料, 1999.

15) 兵庫県土木部但馬空港建設事務所：「大規模土工事の施工管理について」但馬空港，第 27 回空港土木工事報告会資料, 1992.

16) 兵庫県土木部交通政策局：但馬空港建設事業について，第 29 回空港土木工事報告会資料, 1994.

17) 秋田県土木部大館能代空港建設事務所：大館能代空港における急速大規模土工の施工について，第 31 回空港土木工事報告会資料, 1996.

18) 島根県：石見空港工事誌，石見空港工事誌編纂委員会, 1994.

19) 青森県：新青森空港工事誌，新青森空港工事誌編集委員会, 1988.

20) 運輸省第三港湾建設局広島港工事事務所：新広島空港工事誌, 1994.

21) 岡山県：新岡山空港工事誌（技術編），新岡山空港工事誌編集委員会, 1990.

22) 和歌山県：南紀白浜空港工事誌，和歌山県土木部港湾課南紀白浜空港整備室，和歌山県南紀白浜空港建設事務所，日本工営株式会社, 1997.

23) 兵庫県：但馬空港工事誌，土木部空港整備課県立但馬空港管理事務所, 1996.

24) 秋田県：大館能代空港工事誌，大館能代空港工事誌編纂委員会, 1999.

25) たとえば田中博文，山下典彦：地盤強度の不均質性が盛土の耐震安定指標に与える影響，土木学会地震工学論文集(CD-ROM)，Vol.28, No.50, 2005.

26) たとえば秦吉弥，山下典彦：地震動特性が地盤強度のバラツキに起因する盛土のすべり変位量の変動に及ぼす影響に関する一考察，地盤工学シンポジウム論文集, Vol.50, No.60, pp.421-428, 2005.

27) たとえば中村晋，澤田純男，吉田望：変形量を考慮した土構造物の地震リスクの評価手法，土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)，Vol.62，III-449, pp.895-896, 2007.

28) たとえば星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，208p., 1986.

29) Hata, Y., Ichii, K., Tsuchida, T., Kano, S. and Yamashita, N.: Effect of Heterogeneous Soil Strength on the Seismic Residual Displacement of Embankments, Proc. of 4thGEESD, ASCE, Sacramento, U.S.A, 2008.

30) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，国土交通省港湾局監修，1485p., 2007.

(2008 年 6 月 30 日　受付)