

砂型造型機構の解明

Cooper-Eaton式を用いた解析

海上保安大学校 前田 安郭

砂層の圧縮充てんメカニズム

J. Wu, J. Jiang, G. Yang and B. Zie : "Application of Finite Element Method to Predict Mould Hardness Distribution of Air-Impact Compacted Sand Mould", AFS Trans., (1996), Paper No. 96-047

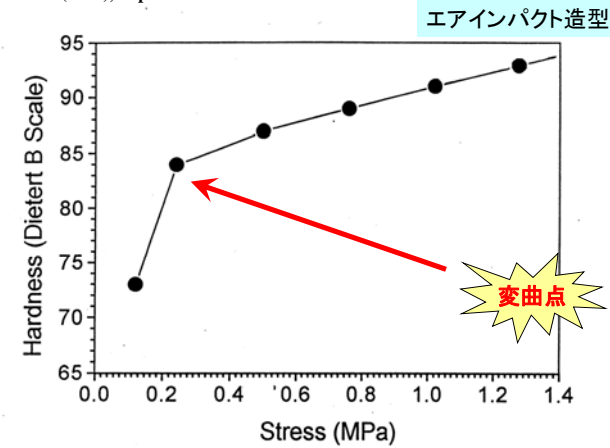


Fig.13 Mould hardness vs. compressive stress curve

砂層の圧縮充てんメカニズム

前田安郭, 寺嶋一彦, 野村宏之 : プローイング造型における三次元粉体圧の挙動と型砂の充てん特性, 鑄物, 63(1991), 889-895

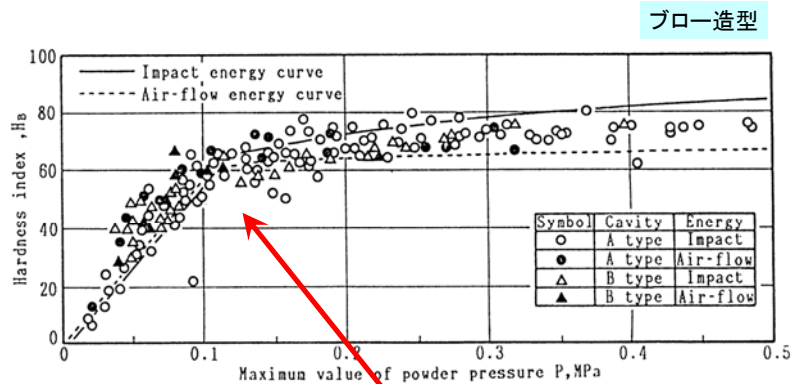
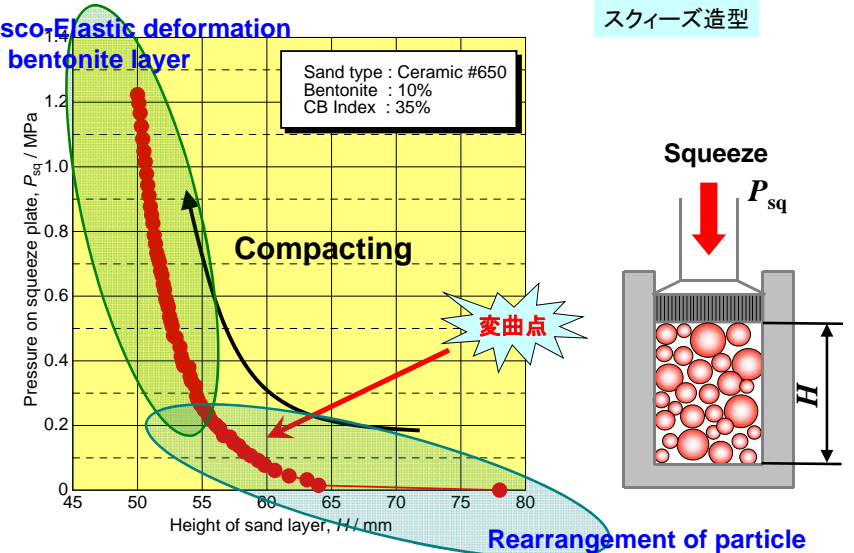


Fig. 9 Relation between maximum value of powder pressure and hardness index

砂層の圧縮充てんメカニズム

Visco-Elastic deformation of bentonite layer



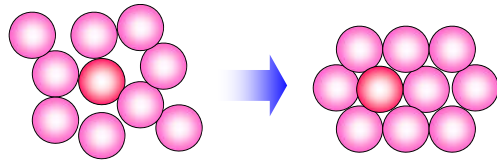
スクイズ造型

Sand type : Ceramic #650
Bentonite : 10%
CB Index : 35%

粉粒体の圧縮メカニズム (Cooper-Eaton)

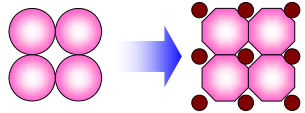
(a) Filling of Large Void

Rearrangement

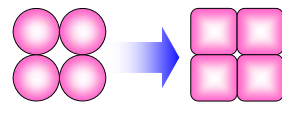


(b) Filling of Small Void

Fragmentation



Plastic flow



Cooper-Eaton式

Cooper-Eaton'の実験式

$$\frac{V(0) - V(P)}{V(0) - V(\infty)} = \underbrace{A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{P}\right)}_{\text{Filling of Large Void}} + \underbrace{(1 - A_1) \exp\left(-\frac{B_2}{P}\right)}_{\text{Filling of Small Void}}$$

$V(P)$: 見かけ容積

P : 圧縮圧力

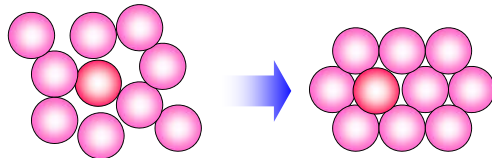
$V(0)$: 無加圧状態での見かけ容積

$V(\infty)$: 空孔が存在しない状態での見かけ容積

生型砂 (粘着層を有する砂) の圧縮メカニズム

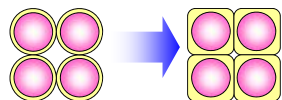
(a) Filling of Large Void

Rearrangement

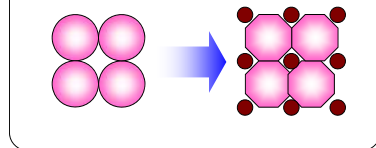


(b) Filling of Small Void

Visco-Elastic flow



Fragmentation



Cooper-Eaton式を用いた実験解析

Cooper-Eatonの実験式

$$\frac{V(0) - V(P)}{V(0) - V(\infty)} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{P}\right) + (1 - A_1) \exp\left(-\frac{B_2}{P}\right)$$

$V(P)$: 生型砂の見かけ容積 $V(0)$: 無加圧状態での見かけ容積

P : 圧縮圧力

$V(\infty)$: 空孔が存在しない状態での見かけ容積

再配列機構による体積減少量

$$\Delta V_1 = (V(0) - V(\infty)) \times A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{P}\right)$$

変形機構による体積減少量

$$\Delta V_2 = (V(0) - V(\infty)) \times (1 - A_1) \exp\left(-\frac{B_2}{P}\right)$$

空隙率と見かけ体積との関係

$$\varepsilon(P) = 1 - \frac{1}{V(P)} \frac{m}{\rho}$$

$\varepsilon(P)$: 生型砂の空隙率

ρ : 生型砂の真密度

m : 生型砂の質量

粒度分布

mm	600	425	300	212	150	106	75	53	PAN	JIS	d_{ave}	ϕ_s
Sn	31	44	63	89	125	178	249	355	631	FN	[μm]	[-]
Ceramic #400	-	11.2	72.4	15.9	0.4	-	-	-	-	65.3	316.6	0.97
Ceramic #650	-	-	2.9	40.3	43.0	12.2	1.7	-	-	117.3	208.5	0.97
Ceramic #950	-	-	1.3	14.5	20.3	44.2	17.8	1.9	-	168.8	152.5	0.97
Ceramic mono400	-	0.6	92.0	7.4	-	-	-	-	-	64.8	355.9	0.97
Ceramic mono1450	-	-	-	-	1.3	90.5	8.2	-	-	183.1	125.5	0.97
Silica A (Flattery)	-	0.8	14.7	41.0	27.7	14.1	1.5	0.1	-	112.2	236.8	0.66
Chromite	26.8	40.0	14.2	9.7	5.4	3.0	0.8	0.2	-	58.3	489.6	0.72
Olivine	0.2	1.4	24.1	34.2	24.6	10.1	3.3	1.4	0.8	113.0	244.9	0.53
Zircon	-	-	0.4	38.2	56.5	4.7	0.1	0.1	-	114.0	207.7	0.88
Silica B (Fremantle)	12.3	32.2	35.6	14.4	3.9	1.4	0.1	0.1	-	61.4	428.9	0.64
Silica C (Mikawa)	-	0.8	14.7	41.0	27.7	14.1	1.5	0.1	-	110.1	232.2	0.63

Unit [mass%]

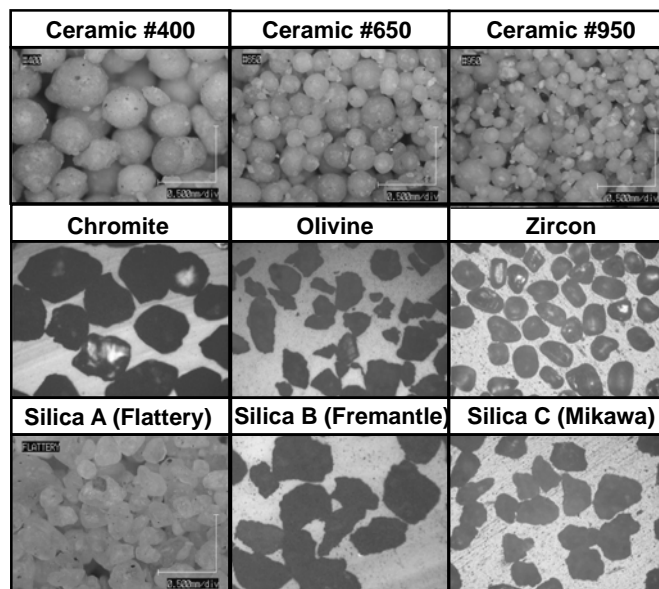
d_{ave} : Average Diameter ϕ_s : Shape Coefficient

生型砂特性

	Ceramic #400	Ceramic #650	Ceramic #950	Ceramic Mono 400	Ceramic Mono 1450	Silica A (Flattery)	Chromite	Olivine	Zircon	Silica B (Fremantle)	Silica C (Mikawa)
Bentonite Content	Na type 8, 10, 12 %										
CB Index	35, 40, 45 %										
Particle Density [kg/m^3]	2700	2700	2700	2700	2700	2600	4500	3200	4700	2600	2650
Bentonite Density [kg/m^3]	780										
Moisture Content* [%]	2.7	2.6	2.5	2.7	2.9	2.6	2.7	3.1	2.5	2.3	2.6

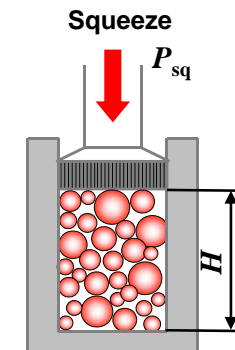
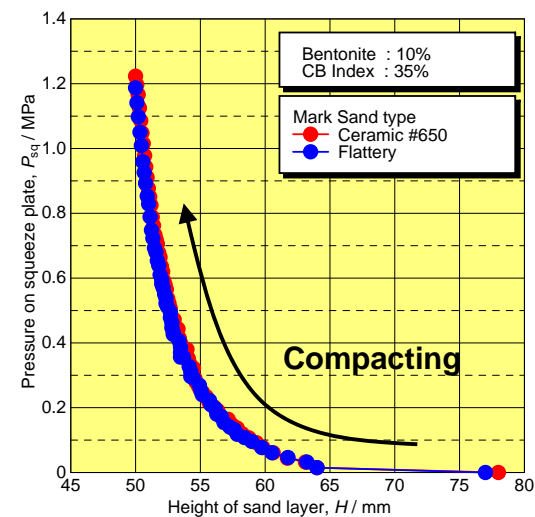
* : The value is in the case of Bentonite 10% and CB35%

生型砂写真

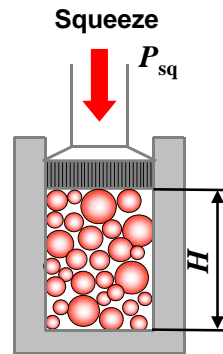
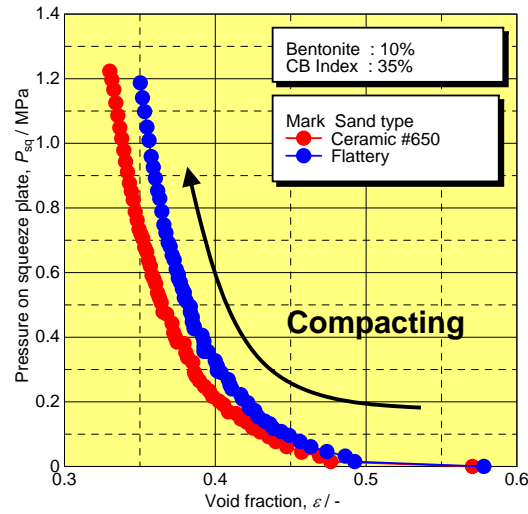


0.5mm

スクイズ圧と砂層高さ

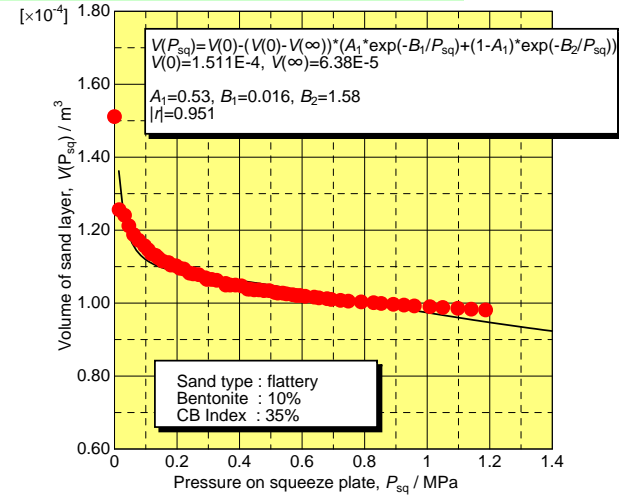


スクィーズ圧と空隙率



Cooper-Eaton式によるフィッティング

$$\frac{V(0) - V(P)}{V(0) - V(\infty)} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{P}\right) + (1 - A_1) \exp\left(-\frac{B_2}{P}\right)$$

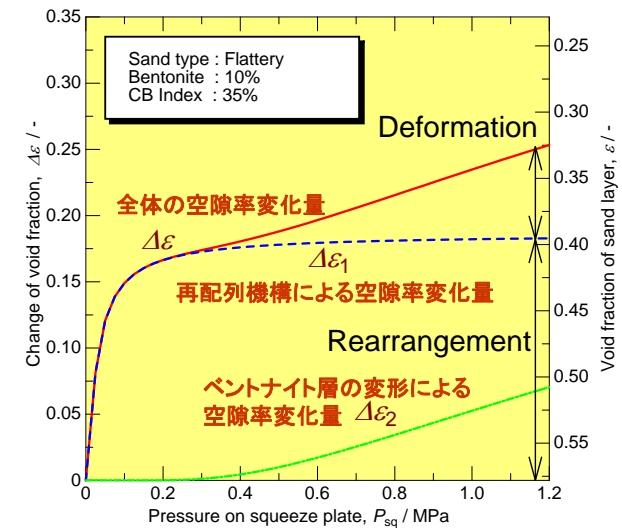


非線形回帰によるフィッティング結果

Bentonite content : 10%
CB index of 35%

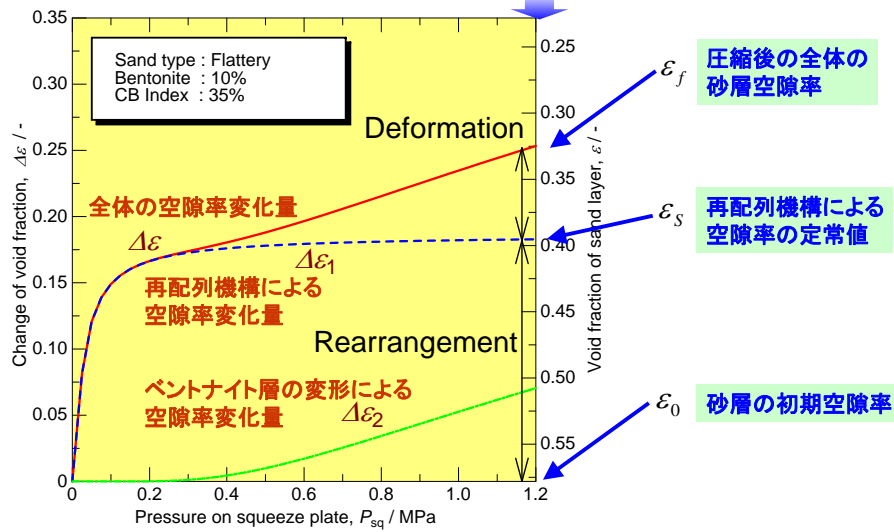
	A_1	B_1	B_2	r	$\frac{\Delta \varepsilon_s}{\Delta \varepsilon}$
Ceramic #400	0.56	0.012	1.82	0.959	77.8
Ceramic #650	0.54	0.014	1.56	0.952	72.7
Ceramic #950	0.51	0.015	1.47	0.946	69.2
Ceramic mono400	0.57	0.015	1.54	0.957	73.5
Ceramic mono1450	0.55	0.013	1.67	0.918	74.9
Silica A (Flattery)	0.53	0.016	1.58	0.951	72.2
Chromites	0.52	0.014	1.57	0.956	69.2
Olivine	0.56	0.015	1.47	0.955	73.0
Zircon	0.50	0.017	1.16	0.972	62.4
Silica B (Fremantle)	0.57	0.011	1.88	0.972	79.7
Silica C (Mikawa)	0.51	0.008	1.90	0.922	76.2

スクィーズ圧縮における空隙率変化

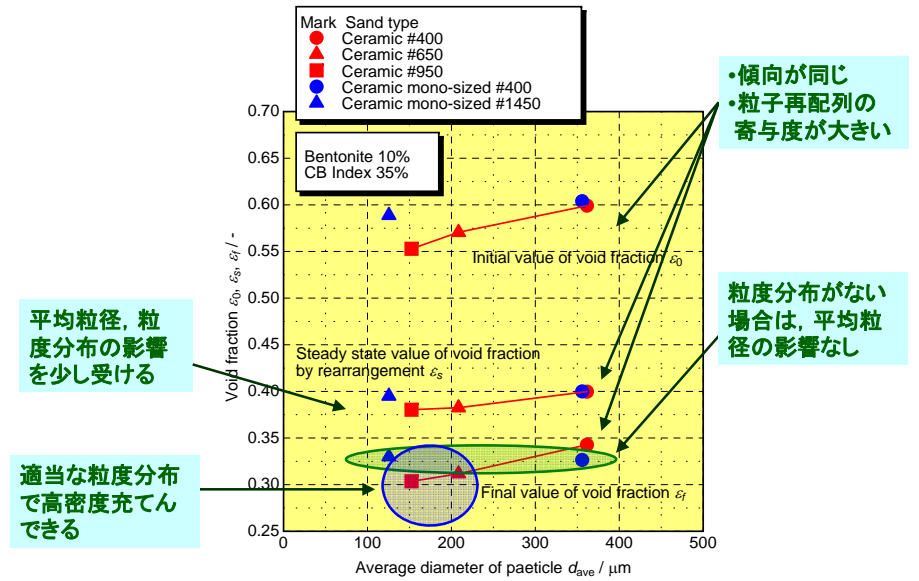


スクィーズ圧縮における空隙率変化

再配列機構による圧縮の定常値となる圧力: 1.2MPa

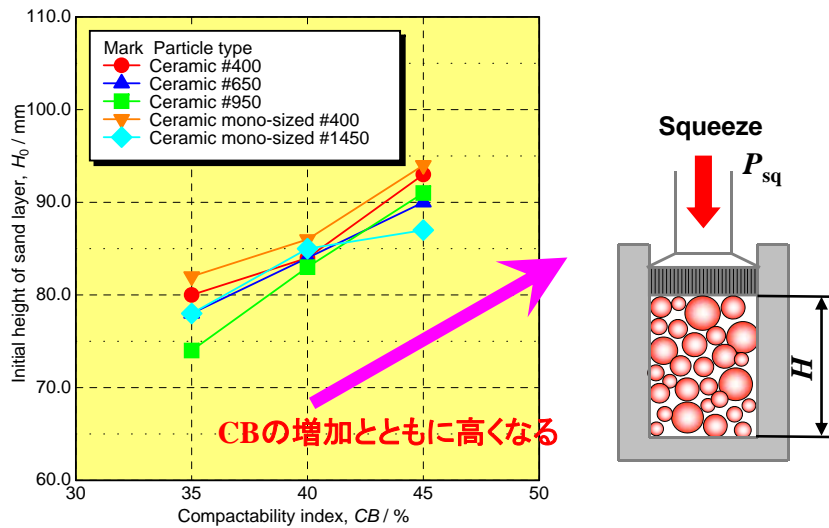


平均粒径と粒度分布の違いによる空隙率



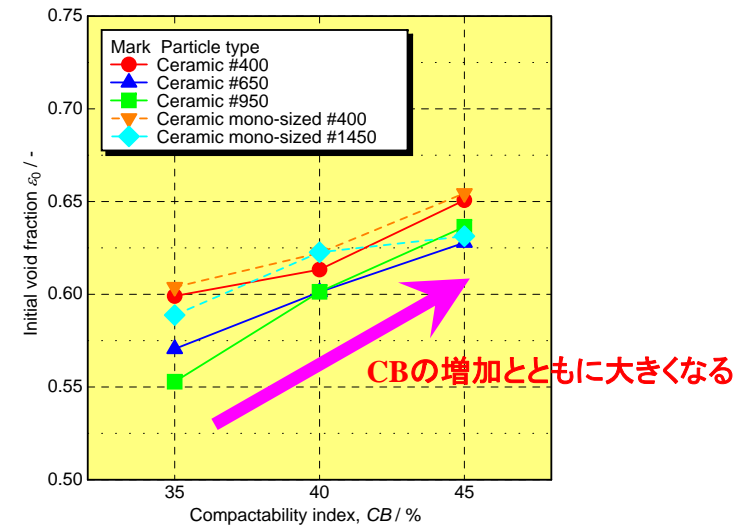
CB値と初期砂層高さの関係

Bentonite content : 10%

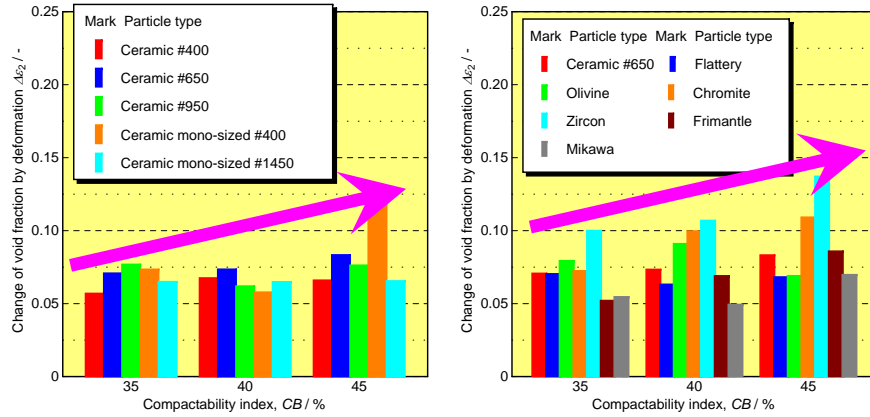


CB値と初期空隙率の関係

Bentonite content : 10%

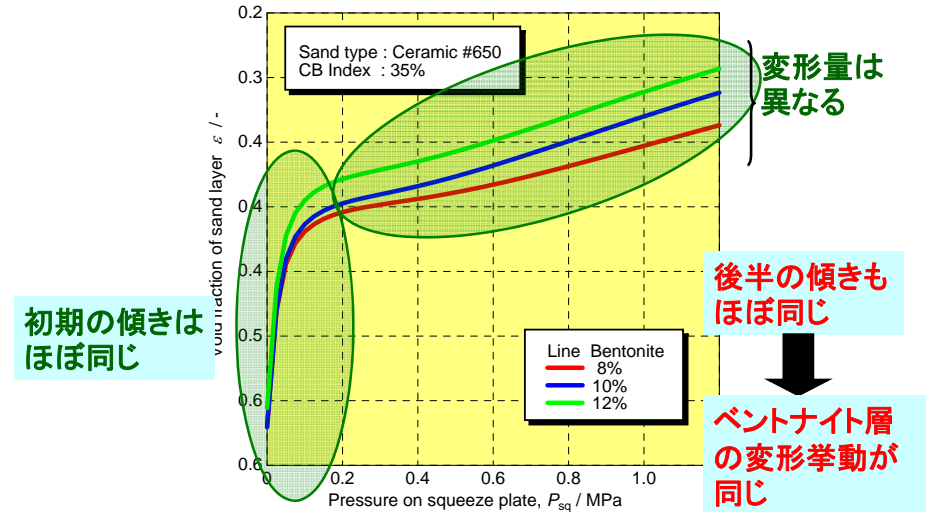


CB値の違いによる粘着層の変形



CBの増加とともにベントナイト層の変形量が増える

ベントナイト配合率の違いによる空隙率変化



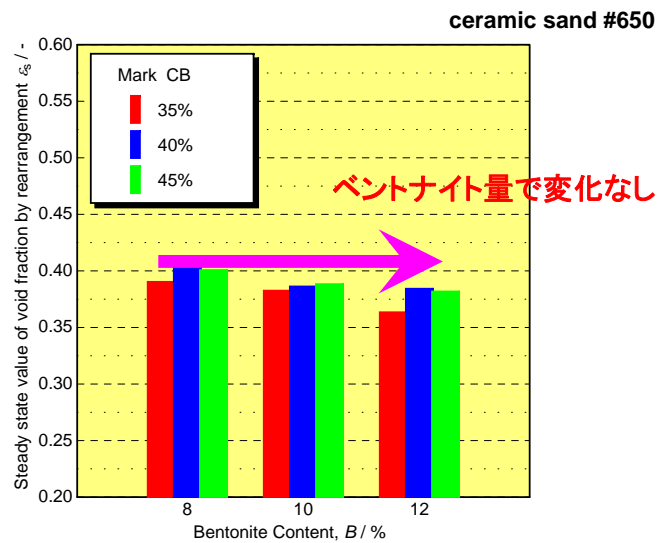
初期の傾きは
ほぼ同じ

変形量は
異なる

後半の傾きも
ほぼ同じ

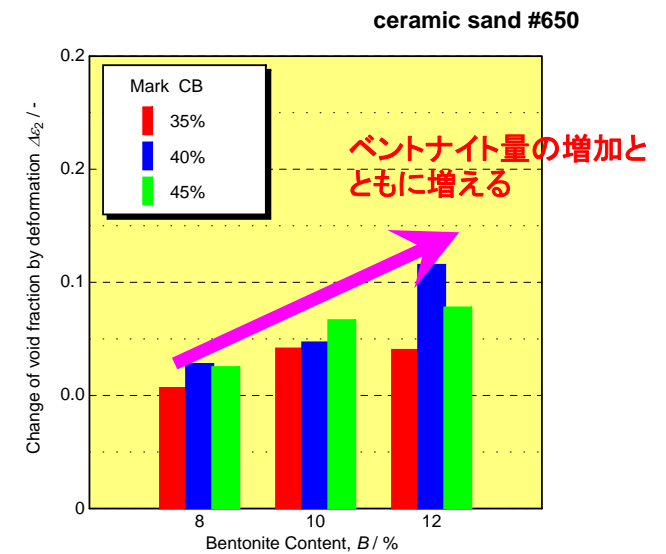
ベントナイト層
の変形挙動が
同じ

ベントナイト配合率の違いによる再配列定常値



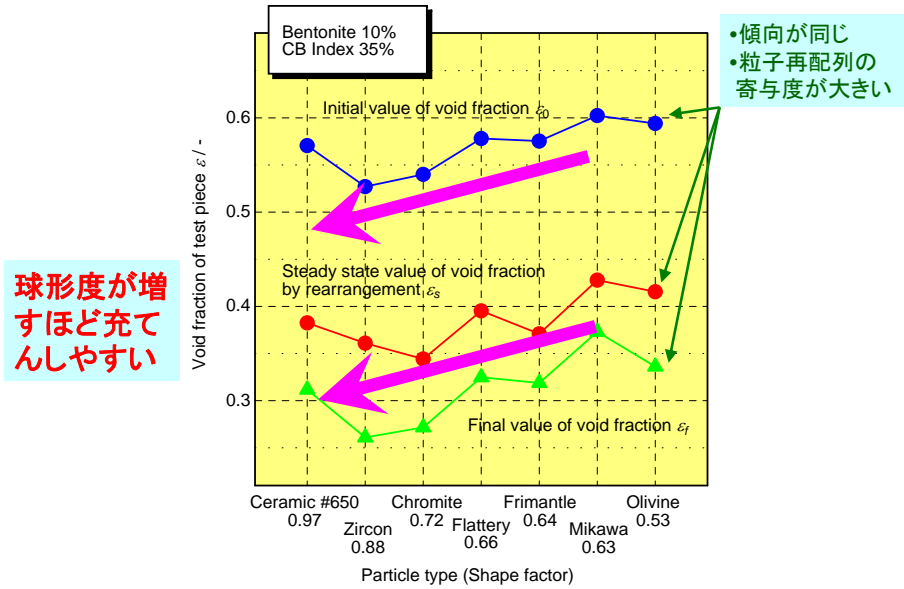
ベントナイト量で変化なし

ベントナイト配合率の違いによる粘着層の変形



ベントナイト量の増加と
ともに増える

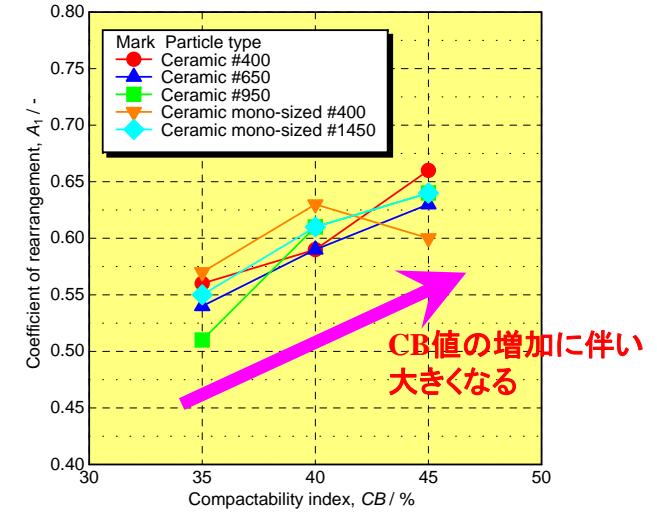
骨材に違いによる空隙率変化



再配列係数 A_1

$$\frac{V(0) - V(P)}{V(0) - V(\infty)} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{P}\right) + (1 - A_1) \exp\left(-\frac{B_2}{P}\right)$$

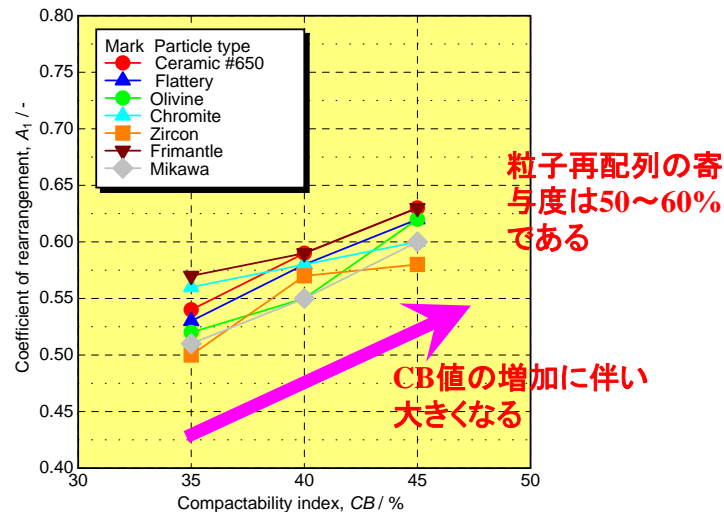
Bentonite content : 10%



再配列係数 A_1

$$\frac{V(0) - V(P)}{V(0) - V(\infty)} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{P}\right) + (1 - A_1) \exp\left(-\frac{B_2}{P}\right)$$

Bentonite content : 10%



スクィーズ圧縮における空隙率変化

Bentonite content : 10%
CB index of 35%

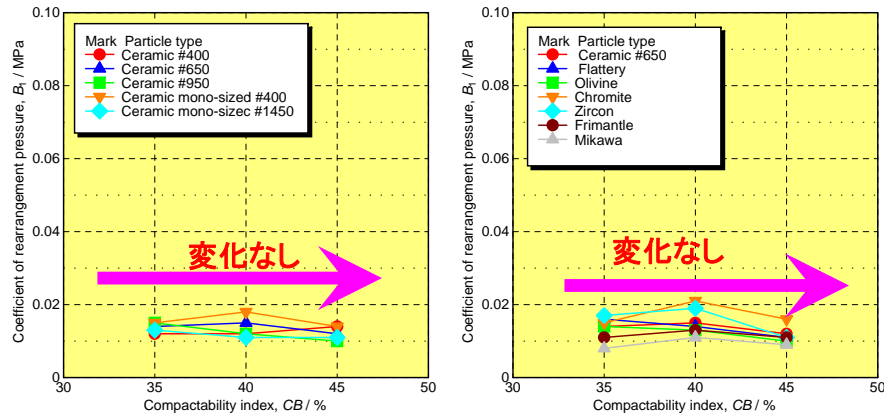
	A_1	B_1	B_2	r	$\frac{\Delta\epsilon_s}{\Delta\epsilon}$
Ceramic #400	0.56	0.012	1.82	0.959	77.8
Ceramic #650	0.54	0.014	1.56	0.952	72.7
Ceramic #950	0.51	0.015	1.47	0.946	69.2
Ceramic mono400	0.57	0.015	1.54	0.957	73.5
Ceramic mono1450	0.55	0.013	1.67	0.918	74.9
Silica A (Flattery)	0.53	0.016	1.58	0.951	72.2
Chromites	0.52	0.014	1.57	0.956	69.2
Olivine	0.56	0.015	1.47	0.955	73.0
Zircon	0.50	0.017	1.16	0.972	62.4
Silica B (Fremantle)	0.57	0.011	1.88	0.972	79.7
Silica C (Mikawa)	0.51	0.008	1.90	0.922	76.2

約70%以上

再配列係数 B_1

$$\frac{V(0)-V(P)}{V(0)-V(\infty)} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{P}\right) + (1-A_1) \exp\left(-\frac{B_2}{P}\right)$$

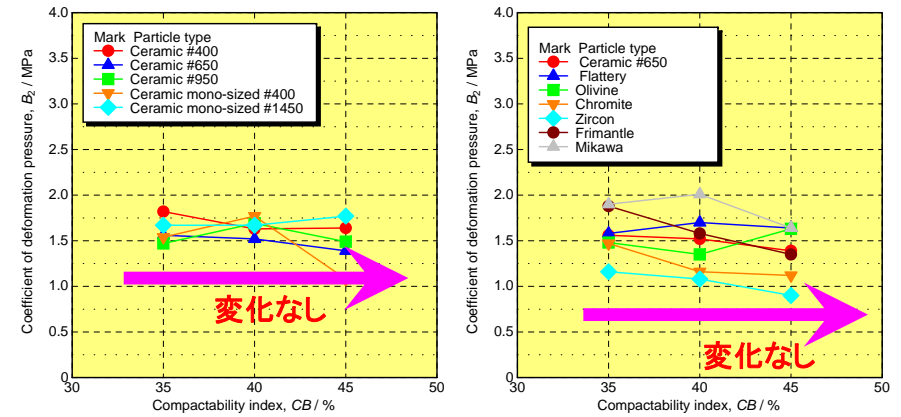
Bentonite content : 10%



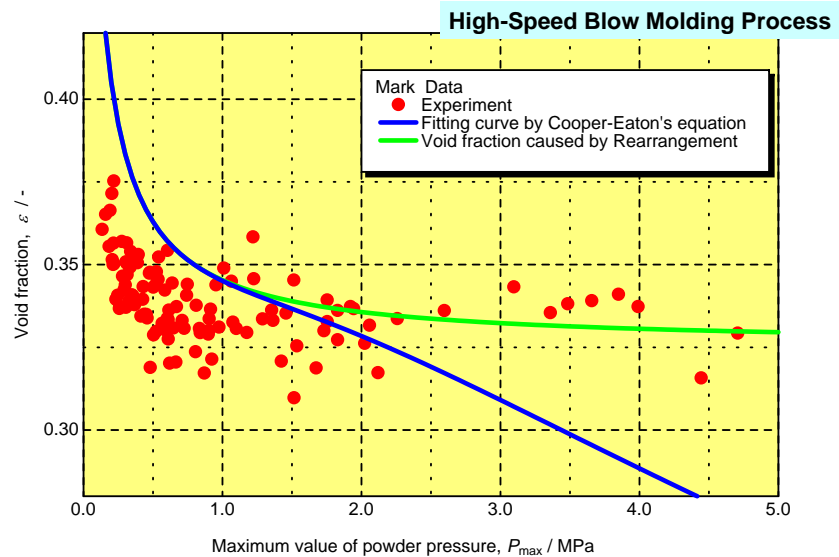
粘着層の変形係数 B_2

$$\frac{V(0)-V(P)}{V(0)-V(\infty)} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{P}\right) + (1-A_1) \exp\left(-\frac{B_2}{P}\right)$$

Bentonite content : 10%



鋳型特性とCooper-Eaton式解析



Cooper-Eaton式による解析のまとめ

生型砂の圧縮挙動を明らかにする新しい方法として、Cooper-Eaton式を用いてスクイーズ圧縮時の空隙率変化を調査した結果、以下のことが明らかになった。

1. Cooper-Eaton式による圧縮挙動解析により、充てん機構を粒子再配列機構によるものと、ベントナイト粘着層の変形によるものとに明確に分離できる。
2. CB値の変化、ベントナイト配合率の違い、骨材変化、すなわち粒度分布や形状係数など粒子特性の違いによる圧縮充てん挙動の変化が明確に表現できる
3. 再配列機構による空隙率変化量は全体変化量の約70%を占める。
4. 造型後の再配列機構による充てんの定常空隙率 ε_s は初期状態の影響を強く受ける。また、粒度分布及び形状係数の影響により、この再配列定常空隙率 ε_s は変化し、造型後の空隙率 ε_r にそのまま反映される。