

気泡混合軽量盛土のせん断挙動に関する研究

防災設計工学研究室 星野 大輔
指導教官 海野 隆哉

1.はじめに

現在気泡混合軽量土（以下軽量土）はその軽量性と施工性の良さから軟弱地盤上や狭隘な箇所での盛土工事などで使用されており、今後ますますの使用範囲が広がると考えられる。これまで軽量盛土をテーマとして、物性・力学特性および盛土構造物への適用性といった研究がなされている。しかし構造物を設計する上で重要な気泡混合軽量土の引張強度を調べた研究が少ない。本研究では軽量土の大型供試体を作製し、垂直荷重および水平荷重を作用させ2軸応力状態を再現し、供試体に斜め引張応力を生じさせる水平荷重試験を行い、軽量盛土が有する水平せん断抵抗力を確認し引張強度を求めた。さらにFEM解析を行い、実験との整合性を検討した。

2.試験装置概要

本試験では図1に示す荷重装置を用いて水平荷重試験を行った。上部装置は油圧式アクチュエーターによる水平荷重をスムーズに伝達させるために剛性が高くかつ簡単な構造とした。上・下部装置内部には水平荷重荷重時に供試体端部の圧縮破壊を防ぎ、供試体全体にせん断力を均一に伝達させる目的でせん断歯を設置した。また供試体側方には鉛直方向のせん断力を与え、水平荷重荷重時の供試体浮上に伴う上・下部の圧縮・引張破壊を防ぐために、同様にせん断歯を設置した浮上り防止装置を配置した。なお下部装置との連結部分には丸鋼を用いてヒンジとし供試体の変形に伴って浮上り防止装置が傾斜する仕組みとした。上部装置の上部には上載圧荷装置を設け油

圧ジャッキによる垂直圧を均等に載荷させる構造とした。

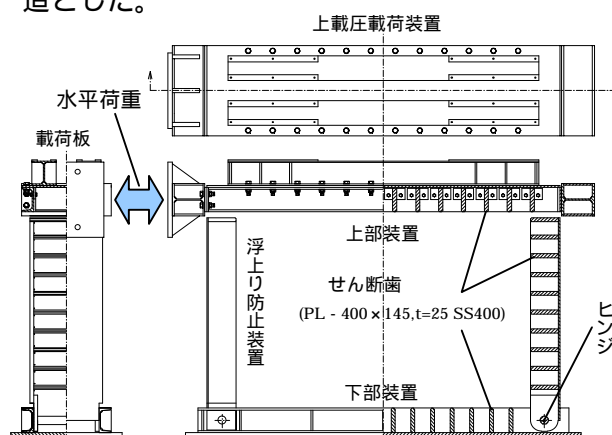


図1 水平荷重試験荷重装置治具

3.供試体作成方法

試験に用いた供試体は、表1の配合設計に基づいて作製した。軽量盛土は固化材と粘土、水を混ぜてスラリー状にしたものに気泡発生装置で発泡させた動物性蛋白系の気泡を混入するプレフォーム方式で作製し、型枠に打設後、所定の強度が発現するまで気中養生を行った。供試体の大きさは、長さ1.8m×高さ1.2m×幅0.4mの直方体とした。

表1 供試体配合

Case	目標密度 (t/m^3)	固化材 (kg/m^3)	粘土 (kg/m^3)	混練水 (kg/m^3)	気泡 (l/m^3)
1,2,4,5	0.680	180	180	297	578
3	0.770	210	210	329	523

4. 試験条件および試験方法

図2に試験概要図、表2に各試験ケースの試験条件を示す。型枠脱型後、所定の寸法にメッシュを切った供試体表面にひずみゲージを貼布した後、反力壁に設置したアクチュエーターを載荷板に連結し、各測定点に変位計を設置する。上載圧載荷用の油圧ジャッキで上載圧を載荷し、アクチュエーターにより水平荷重を与え、荷重増加が見られなくなった段階で終了する。載荷方法は押し引きする交番載荷方式とし、目標載荷重を50kNピッチで増加させる載荷サイクルで試験を行った。また水平荷重・供試体変位・上載圧および供試体表面ひずみは、試験開始から20秒間隔で継続して測定を行った。Case4では浮上り防止装置内に設置したせん断歯有無の影響を調べるため、浮上り防止装置内に気泡混合軽量土が充填しないように板で覆った。Case5では油圧ジャッキによる鉛直変位抑制の影響を調べるため、油圧ジャッキを除去した。

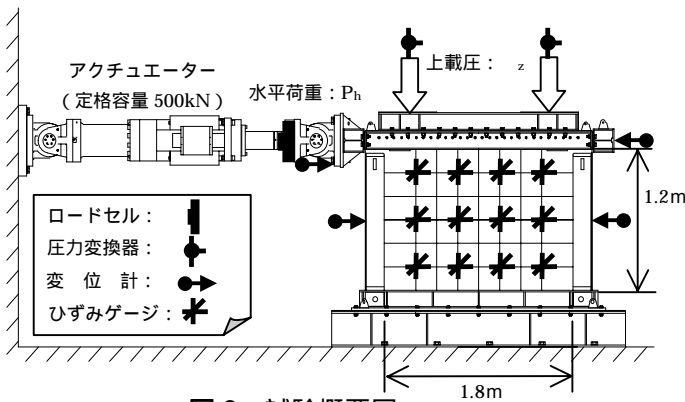


図2 試験概要図

表2 試験条件

Case	目標圧縮強さ q_u (kN/m ²)	上載圧 z (kN/m ²)	備考
1	500	150	基本ケース
2	500	55	列車荷重相当
3	1000	150	
4	500	150	横方向せん断歯無し
5	500		上載圧無し

5. 試験結果

Case2の荷重 - 変位関係を図3に、各ケースのクラック図を図4に示す。また、Case1~5の初期クラック発生荷重 (P_{crack})、最大荷重 (P_{max}) および理論的に求めた斜め引張強さ (σ_{dt}) を表3に示す。全 Case を通じて載荷初期段階では図3のようにほぼ弾性挙動を示し、クラックが発生した後は緩やかな勾配をもって荷重増加した。

Case1, 2, 5を比較すると、供試体に作用する上載圧が大きいほど初期クラック発生荷重・最大荷重共に大きくなった。また、Case1の方がCase2と比べてより勾配の大きなクラックが発生し、Case5ではCase1, 2とは異なり緩やかな勾配を持って水平に近い方向にクラックが発生した。一方、斜め引張強さはばらつきのあるものの、Case1, 2, 5共にほぼ同じ値となっている。上載圧と破壊荷重・クラックの勾配には相関性があり、今回行った試験の範囲では、上載圧が大きいほどせん断抵抗力が大きくなるという結果となった(図5)。

Case1と3を比較すると、空気量が少ないCase3で初期クラック発生荷重が大きくなったが、最大荷重はほぼ同程度の値となった。供試体の空気量は供試体が降伏するまでの範囲内では気泡混合軽量土の変形特性に大きな影響を与えるが、クラック発生後については余り影響していないと思われる。

Case1と4を比較すると、浮上り防止装置内に設置したせん断歯の有無によりCase4では初期クラック発生荷重・最大荷重ともに小さくなった。せん断歯を設置しないCase4では、他のケースより勾配の大きなクラックが発生した。これは横方向に設置したせん断歯が無い事により水平荷重による供試体の変形に伴って供試体が浮上り、供試体全体に鉛直力やせん断力が均一に伝わらなかったため、Case4の荷重増加に影響が出たものと考えられる。全 Case 通じて載荷点付近で局部的な圧縮破壊は見られず供試体全体で破壊しており、Case4以外では正負交番載荷で見られるバ

ツ印状のクラックが発生している事を確認した。

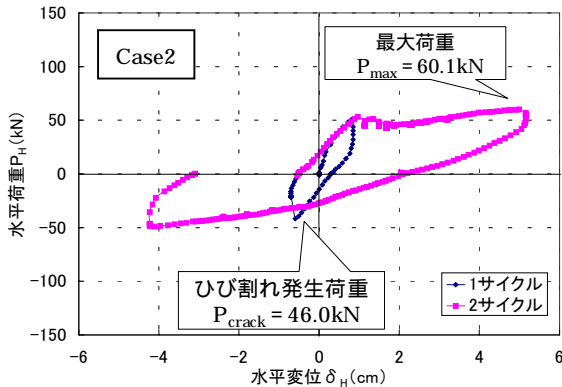


図3 荷重 - 変位関係 (Case2)

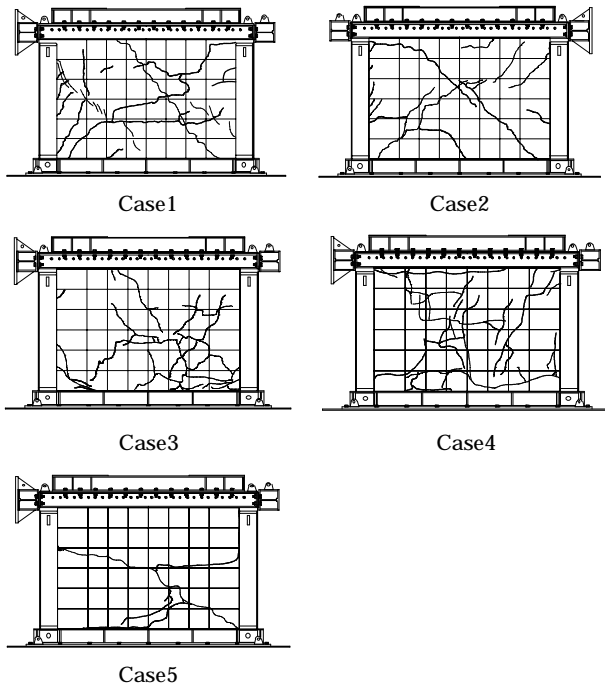


図4 クラック図

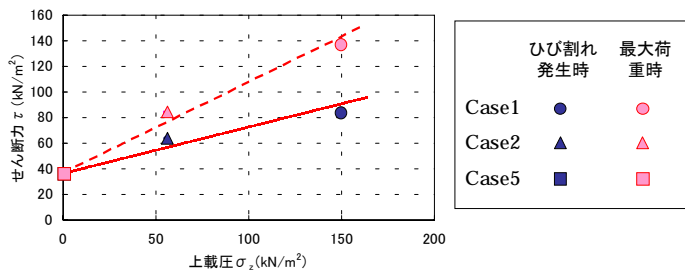


図5 せん断力 - 上載圧関係図

表3 水平載荷試験結果一覧

Case	q_u ¹⁾	z	dt ²⁾	P_{crack}	P_{max}
	(kN/m ²)			(kN)	
1	624.6	156.5	20.5	60.3	98.2
2	650.5	54.2	26.3	46.0	60.1
3	766.6	157.1	37.9	84.4	94.0
4	658.8	156.0	15.7	35.0	50.1
5	535.9	-	26.8	26.8	26.8

1)試験時の一軸圧縮強さ
2) P_{crack} より算出した斜め引張強さ

ここで、表3に示した q_u は試験終了後のブロックサンプリングによる一軸圧縮強さの値を、 dt は初期クラック発生荷重から、式1の斜め引張応力算定式により計算した値である。

$$dt = \frac{\sqrt{\frac{z^2}{z} + 4 \frac{h^2}{z}}}{2} \dots \text{式1}$$

6. 応力分布

図2に示した12箇所のひずみゲージのデータを分析する事により、供試体表面に作用している主応力・せん断力を検討した。今回はCase3で設置した12箇所のひずみゲージ全てにおいて試験開始から終了までのデータを採取できたため、Case3について分析する事とした。なお、ヤング率は試験時の一軸圧縮試験の結果から、211.61MPaとした。1サイクル戻し側(-50kN)では、供試体中央では15kPa前後の応力が作用し四隅方向には30kPa前後の応力が集中しているが、クラックは発生していない(図6)。続いて2サイクル戻し側におけるクラック発生の様子を示す。戻し側83.6kN 載荷時に供試体右側に600kPaにおよぶ応力の集中が確認できた。その次の測定段階において150kPa付近まで応力が開放している事が確認でき、この時点で図7に示す位置にクラックが発生しており、クラックの発生に伴った応力開放が発生した事が伺える。続いて3サイクル目押し側90kN 載荷時において、せん断力が80kPa前後で卓越している付近で多数の

クラックが発生している事が確認でき、応力が卓越している付近でクラックが発生する傾向が分かった(図8)。

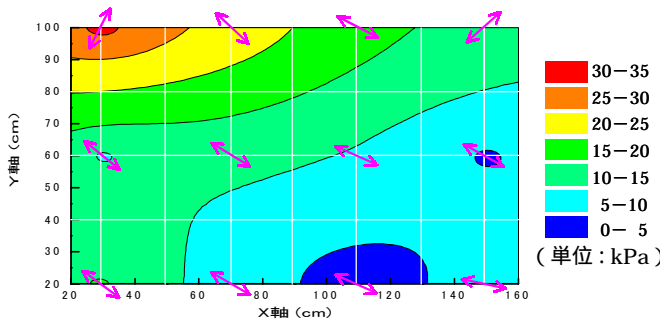


図6 引張り主応力図 1
(1サイクル戻し側 $P_H = -50\text{kN}$)

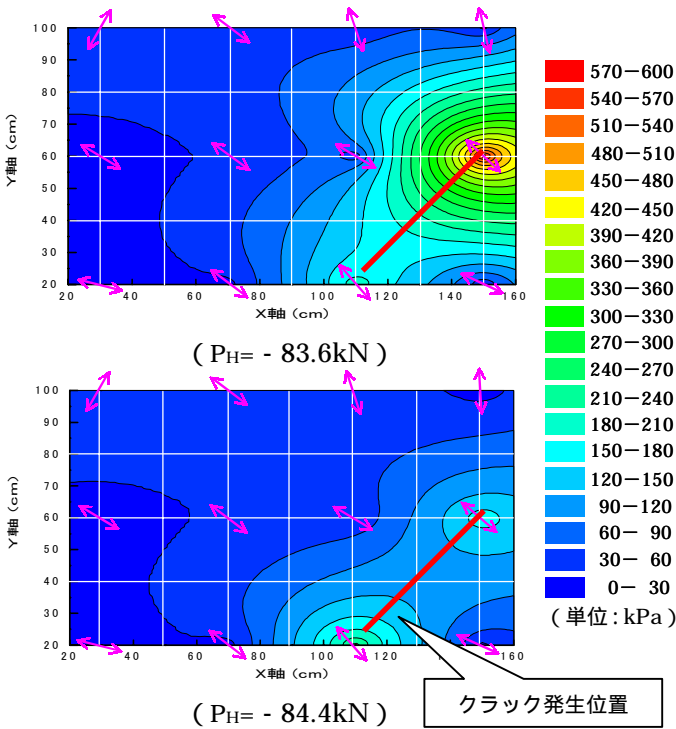


図7-1 クラック発生前後における主応力図 1

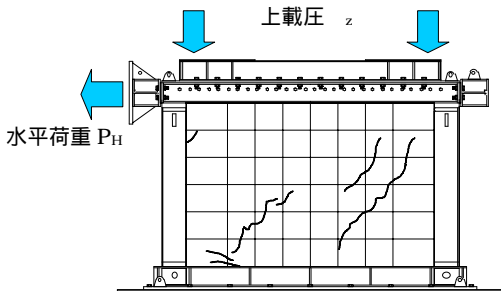


図7-2 クラック発生後におけるクラック図
(2サイクル戻し側 $P_H = -84.4\text{kN}$)

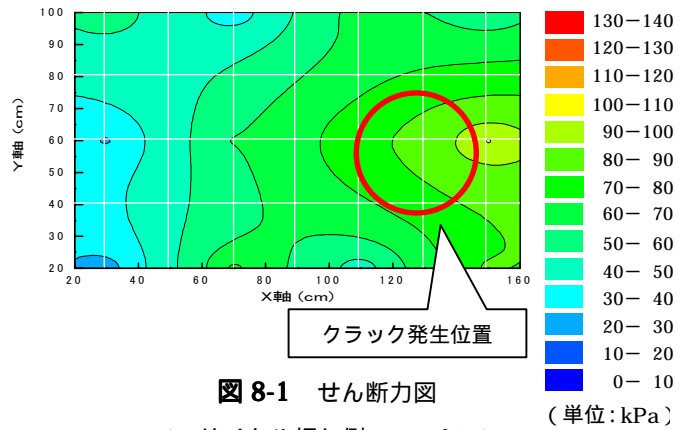


図8-1 せん断力図
(3サイクル押し側 $P_H = 90\text{kN}$)
(単位: kPa)

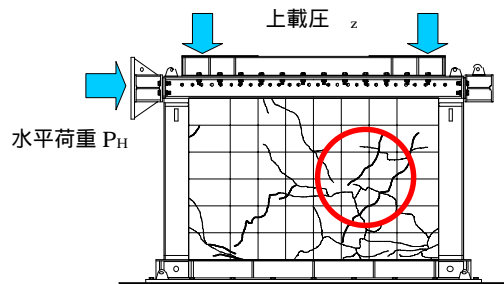


図8-2 クラック図(3サイクル押し側 $P_H = 90\text{kN}$)
細い線が3サイクル目押し側で発生したクラック

7.FEM 解析

本解析で用いたプログラムは WCOMD である。構成則は二軸応力下における鉄筋コンクリートの平面応力 - 平面ひずみ関係で与えられる分散ひび割れモデル¹⁾で、鉄筋やひび割れについて、有限の領域を平面ひずみ - 平面応力の巨視的なモデルで表現し、個々のひび割れの発生や進展よりも部材の全体的な挙動を総合的に把握しようとする方法である。

図9に FEM 解析のメッシュ図を示す。各要素は接点4 中間接点4 の8 接点要素とし、気泡混合軽量土下端は反力を得るため X, Y 方向共に固定とする。上部および側部の濃い要素は荷重治具を表わしている。上載圧は鉛直方向の矢印で、水平荷重は水平方向の矢印で表した節点にそれぞれ荷重する。荷重治具に関する剛性は、各要素の厚さに依存している。そのため、解析で用いる剛性の値は、荷重治具が有する曲げ剛性を求め、その曲げ剛性と等価な剛性を有する要素厚とした。気

泡混合軽量土を RC 要素(鉄筋比は 0) 載荷治具を弾性要素として解析を行った。軽量土については、圧縮強度・単位体積重量・圧縮ひずみピーク値は各 Case 毎の試験終了時に行うブロックサンプリングより算出した値を、引張強度は試験時における初期クラック発生荷重より算出した値を用いた。各入力データを表 4 に示す。

また、ひび割れ面のせん断伝達率(1.0)は、通常のひび割れ面の粗さの時には 1.0 を用い、モルタルあるいは高強度コンクリートではひび割れ面がやや滑らかで、骨材の噛み合わせ効果が少なくなるため低減して用いる。気泡混合軽量土では、コンクリートに比べると粗骨材が入っていない事や、気泡が含まれている事から噛み合わせ効果が小さいと考え 0.5 を用いる事とした。ポアソン比は限りなくゼロに近い値を取るため、0.001 とした。

Case3 における FEM 解析の荷重 - 変位関係およびクラック図を図 10 に、実験および解析結果の比較を表 5 に示す。最大荷重は各 Case 共に解析値が実験値を大幅に上回った。また、一軸圧縮強さの大きい Case3 では勾配がほぼ一致しており、他の Case と比べて一軸圧縮強さが大きい供試体の方が適合性が高い結果となった。解析値が実験値を上回った要因として、本解析で用いた構成則が、二軸応力下における鉄筋コンクリートの平面応力 - 平面ひずみ関係で与えられる分散ひび割れモデルであり、供試体にクラックが発生しても連続体として計算されるため、実際の気泡混合軽量土が有する圧縮・引張り強さよりも強くなり、最大荷重が増加する傾向が見られたと言える。クラック図においては、供試体上部にクラックが集中し実験を再現するには至らず今後の課題となった。

Case3 における FEM 解析でのクラック発生直後の応力コンター図を図 11 に示す。応力コンター図においては、引張り主応力 σ_1 よりも圧縮主応力 σ_2 の方が大きな値を示しているが、実験と

同様引張りで破壊しており、 σ_1 はクラックに沿った形で分布している事が伺える。

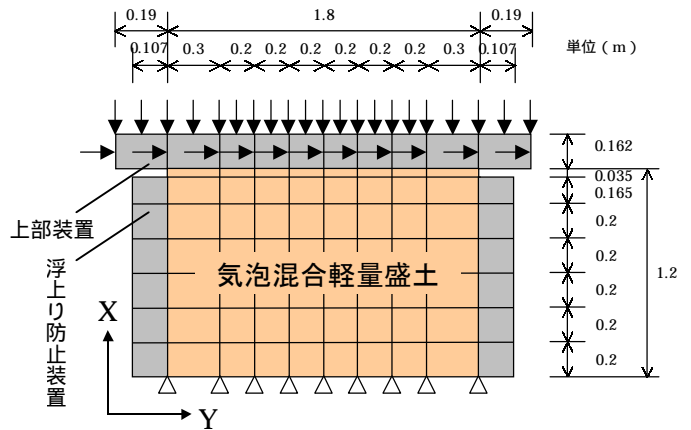


図 9 FEM 解析メッシュ図

表 4 入力データ

要素定義	Case	圧縮強度 q_u (kN/m ²)	引張強度 σ_{dt} (kN/m ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング係数 (kN/m ²)
気泡混合軽量土	RC要素※)	1	624.58	20.49	6.752
	2	650.47	26.28	7.526	-
	3	766.58	37.85	8.261	
	4	658.81	15.69	6.507	
	5	535.83	26.77	6.458	
載荷治具	弾性要素	-	-	7.644 × 10	

要素定義	Case	圧縮ひずみピーク値 ϵ_{max}	ポアソン比	ひび割れ面のせん断伝達率	
気泡混合軽量土	RC要素※)	1	6.610 × 10 ⁻³	0.001	0.5
	2	7.639 × 10 ⁻³			
	3	5.808 × 10 ⁻³			
	4	5.505 × 10 ⁻³			
	5	6.777 × 10 ⁻³			
載荷治具	弾性要素	-	0.300	-	

※)鉄筋比を 0 とする事で無筋コンクリートとして考える

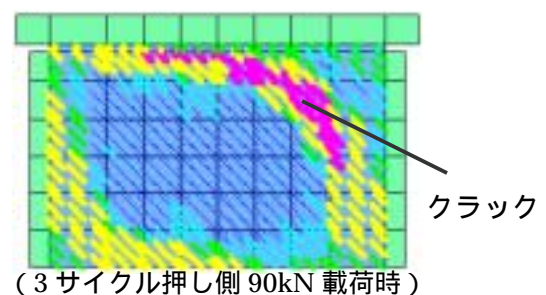
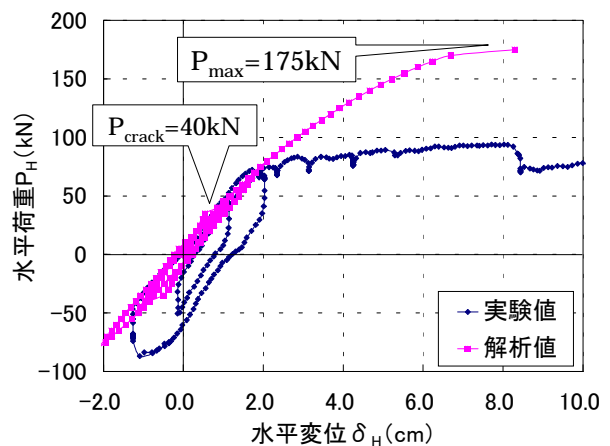


図 10 荷重 - 変位関係およびクラック図

表5 実験・解析結果の比較

Case	Qu (kN/m ²)	実験値		解析値	
		P _{crack} (kN)	P _{max} (kN)	P _{crack} (kN)	P _{max} (kN)
1	624.6	60.3	98.2	20	135
2	650.5	46.0	60.1	30	145
3	766.6	84.4	94.0	40	175
4	658.8	35.0	50.1	35	55
5	535.9	26.8	26.8	-	115

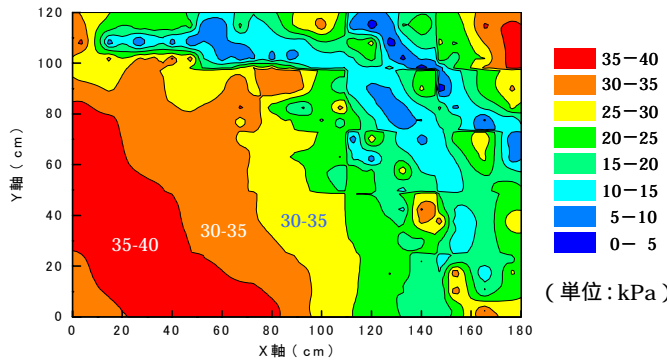


図 11-1 引張り主応力図₁ (40kN 載荷時)

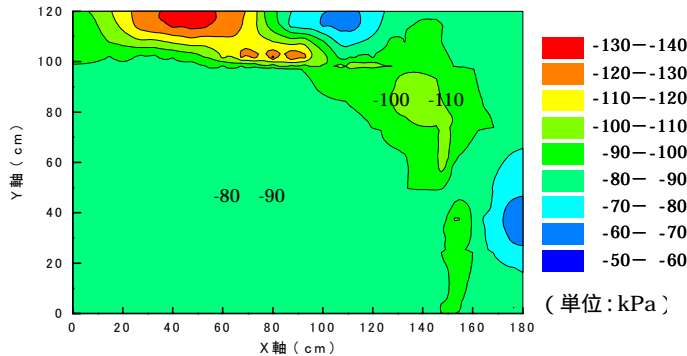


図 11-2 圧縮主応力図₂ (40kN 載荷時)

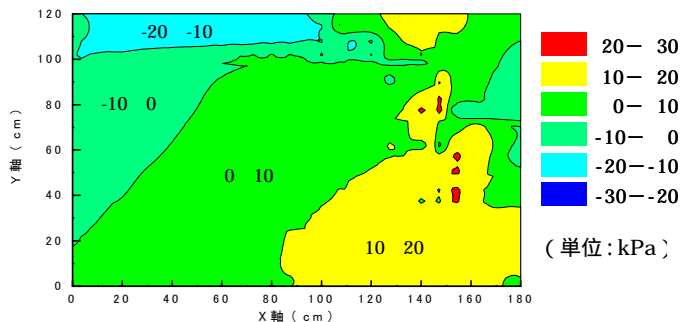


図 11-3 せん断応力図 (40kN 載荷時)

8. 結論

水平載荷試験について

気泡混合軽量土は引張り力に対して非常に弱

い材料であり、初期に発生したクラックが構造上の弱部となり、発生したクラックに追従する形でクラックが進行する。その初期クラックが、供試体の挙動に大きな影響をおよぼす事が分かった。

気泡混合軽量土の2軸応力状態における斜め引張強さは一軸圧縮強さのおよそ20~40分の1と非常に小さく、2軸応力に伴う引張力に対して非常に弱い材料である事が分かった。

また、押し戻しいずれか一方でひび割れが発生しても、その後から発生するクラックは応力状態に余り影響を与えない事が分かった。

ひずみ測定結果について

実験では、押し戻し交番載荷において水平荷重の増加に伴いひずみ(応力)が集中し、その過程においてクラックが発生した。その前後のひずみゲージを分析する事で、クラックの発生に伴った応力開放が発生した事を確認できた。

本試験で用いた載荷装置においても、ひずみゲージのデータは実際のクラック発生時の応力の変化を捉えており、載荷装置および測定方法が妥当な結果であった。

FEM 解析について

どのケースにおいても、最大荷重が実験値を上回り、実験を再現するのは難しい事が分かった。これは本解析プログラムが分散ひび割れモデルであるため、実験では初期に発生したクラックに追従する形でクラックが進行するのに対し、解析では個々のひび割れが全体の挙動には影響を与えないため、最大荷重が上回る結果になったと考えられる。

今後、気泡混合軽量土等に関する更なる解析手法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 岡村甫, 前川宏一; 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5