

流れ方向を考慮した浸透破壊の発生・拡大

岐阜大学工学部 正会員 宇野尚雄 ○杉井俊夫
 岐阜県 正会員 山田謹吾
 戸田建設(株) 長谷川智幸

1. まえがき

著者らが過去に行った実験では、浸透破壊の発生条件の一つであるTerzaghiの限界動水勾配は実験値に対して概ね首肯できることを確認してきた¹⁾。しかし、Terzaghi式は鉛直一次元透水場での破壊を対象としており、水平透水場では適用できない。また、Terzaghiは矢板回りの破壊条件を仮定のうえに、半理論、半経験的なものとして挙げており、その適用限界も指摘されている。そこで、本研究は水中重量と透水力の作用線が異なる水平一次元における限界動水勾配を考え、実験をもとに検討した。また、実験から求めた水平一次元における限界動水勾配をもとに、二次元流れに対する浸透破壊の発生・拡大シミュレーションと実験を行い、流れ方向を考慮した場合の浸透破壊の発生条件の究明、拡大のシミュレーションを試みている。

2. 水平一次元浸透破壊実験

鉛直一次元浸透破壊では、均質、一様な試料で、壁面摩擦（拘束圧）が無視できる場合、有効応力がゼロとなり破壊が発生し、土粒子の性状・噛み合いによる影響はほぼ無視できるものであった。しかし、水平一次元浸透破壊では、力の作用線方向の違いから、土粒子の流動化に対する抵抗に土粒子の性状が、大きく関わっているものと予想される。また、その崩壊規模は小さいものの地盤内に水みちを作り浸透距離を短くする原因となり、大きな破壊につながる恐れがある。そこで次のような実験を試み、水平一次元における限界値、影響要因について調べた。

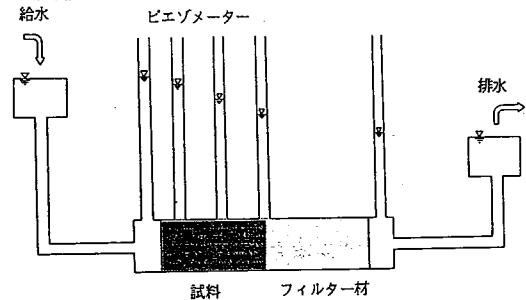


図-1 水平一次元浸透破壊実験装置

2.1 実験概要

水平一次元浸透破壊実験装置は図-1の概略図に示すように、定水位を保つための上流給水タンク、下流排水タンク、試料およびフィルター材を充填するアクリル製パイプ、試料にかかる実水頭を測定するための5本のピエゾメーターで構成されている。今回の実験では、これらの粒子性状による影響をより顕著なものとして観察するために、各材料を一定の粒径にしぼり、ふるい分けをしたものを試料とした。一次元浸透流を保つため、下流側に、試料の境界を鉛直となるようフィルター材を充填している。（表-1、表-2）

表-1 試料の G_s 、最大および最小乾燥重量

試料	比重	最大乾燥重量 γ_{dmax} [gf/cm ³]	最小乾燥重量 γ_{dmin} [gf/cm ³]
標準砂	2.645	1.67	1.36
GB1	2.498	1.61	1.44
GB2	2.491	1.59	1.45

(注：GBはガラスビーズを示す)

表-2 試料およびフィルター材の粒径

試料名称	試料の粒径 [μ m]	フィルター材の 粒径 [μ m]
標準砂	180~212	850~1000
GB1	180~212	850~1000
GB2	355~425	(注)

(注)GB2のフィルター材は、適当な粒径のガラスビーズがなかったため、粒径が5mm程度と850~1000[μ m]という2種類のガラスビーズを約2:1の割合で混合したものを用いた。

鉛直状態に固定した透水管に給水タンクより水を満たし、乾燥重量 γ_d より計算した重量の試料を5層に分け、各層ごとに水中落下させることにより均一に締固め、所定の体積にすることで設定密度を与えている。ここで試料長は概ね25cmとしている。さらにフィルター材を同様に詰めてセットし、その後、静かに透水管を水平に固定した。水頭差0cmの状態ですばらく放置した後、給水タンクを段階的に上

Occurrence and Progression of Seepage Failure considering the Effect of Flow Direction :
 TAKAO UNO (Gifu Univ.), TOSHIO SUGII (Gifu Univ.), KINGO YAMADA (Gifu Pref. Office),
 TOMOYUKI HASEGAWA (Toda Construction Co.,Ltd)

昇させ、水頭差を徐々に大きくしていった。標準砂、GB2の場合、上昇の割合は1cmずつとした。GB1を用いた実験では、上昇の割合を最初1cmずつ（動水勾配0.1程度まで）、それ以降は0.5cmずつ上昇させた。各段階において浸透流量が一定に落ちつくまで待ち、これをその段階における流量として測定した。併せて、その段階でのピエゾ水頭及び土粒子の様子をそれぞれ観測・観察した。

2.2 実験結果

(a) 破壊形態

試料の挙動についての観察事項を以下に列挙する。

①粒子移動：動水勾配がある値（水平の場合の限界動水勾配であると考えられる）に達するかあるいは近づいた段階で、おもに試料の下流側境界付近で見られた。

②糸状水みち：試料粒子が移動したことにより生ずる路状の間隙である。これは、糸状の細い水みちで①と同段階か、もしくはその後の段階で見られる。粒子移動の発展したもので、粒子移動とほぼ同地点に見られるものである。

③局部水みち：糸状水みちが拡大伸長したもので、ある程度水みちが拡大した後、粒子の移動が停止し、水みちが試料全体に至らず、部分的に水みちが存在するものである。

④全体水みち：試料の下流側境界付近で発生した水みちが拡大しつつ上流側に伸び、ついには試料上流側境界面に達し、試料全体にわたる水みちが見られるものである。

図-2に破壊形態を示す。

標準砂では①粒子移動が見られ、それが②糸状水みちに発展し、ほとんどの場合が③局部水みちにとどまり、全体水みちに発展したケースは見られなかった。中には②糸状水みち以上に破壊が拡大しないケースもあった。

ガラスビーズを用いた実験では、GB1とGB2で破壊形態の移り変わりの上でほとんど同じ状態を呈した。まず①粒子移動に始まり、②の糸状水みちがごく短時間見られ、④の全体水みちに至る、あるいは②糸状水みちと呼べる形態は見られず、④全体水みちに至るといって進行した。観察結果から、試料粒径および土粒子が洗掘により流出するフィルター材の間隙の大きさが同じ条件である場合、粒子形状が角張った方が粒子の回転に対する自由度が低くて流動化しにくく、破壊の進行・拡大が抑制されることが考えられる。以上の観察の結果より、標準砂のような粒子形状が角張った試料では、粒子が洗い流されても目詰まりを起こし易く大きな破壊に進行しにくい、ガラスビーズのような流動化し易い試料では、破壊の進行速度も速く、大きな破壊につながる危険性があることが推察された。

(b) 破壊発生の認定

標準砂では、全体水みちには至らず、流量の急増は見られないため、浸透破壊の発生の認定は、“水みちの拡大に先じた粒子の移動の発生段階”とした。具体的に言えば、①粒子移動が起こった段階、あるいは起こらなかった場合に

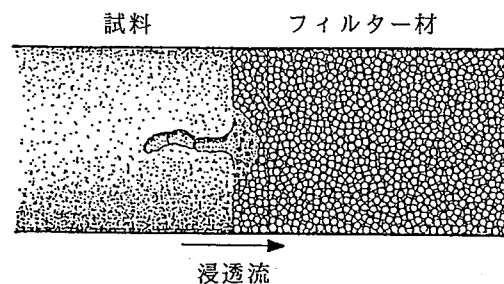


図-2 破壊形態

表-3 水平一次元浸透破壊実験結果

No	試料名称	試料の乾燥重量 [gf/cm ³]	試料の相対密度 [%]	フィルター材の乾燥重量 [gf/cm ²]	限界動水勾配 i	i'/i _c	透水係数 [cm/s]
1	標準砂	1.53	59.9	1.53	0.116	0.12	0.06196
2	標準砂	1.55	66.1	1.49	0.252	0.26	0.04168
3	標準砂	1.58	75.0	1.49	0.280	0.28	0.03297
4	標準砂	1.53	59.9	1.53	0.168	0.18	0.04629
5	標準砂	1.50	50.3	1.50	0.208	0.22	0.03566
6	標準砂	1.57	72.1	1.49	0.232	0.24	0.02784
7	標準砂	1.54	63.0	1.48	0.176	0.18	0.03566
8	標準砂	1.48	47.0	1.49	0.240	0.26	0.03350
9	標準砂	1.47	40.3	1.49	0.180	0.20	0.05067
10	GB1	1.56	72.9	1.50	0.188	0.20	0.02786
11	GB1	1.57	78.4	1.51	0.188	0.20	0.02712
12	GB1	1.54	61.5	1.52	0.168	0.18	0.03138
13	GB1	1.53	55.7	1.51	0.140	0.15	0.04381
14	GB1	1.55	67.2	1.51	0.164	0.18	0.02954
15	GB1	1.58	83.9	1.51	0.184	0.19	0.02642
16	GB1	1.52	49.8	1.51	0.144	0.16	0.04373
17	GB2	1.55	73.3	1.53	0.236	0.32	0.07532
18	GB2	1.53	59.4	1.53	0.260	0.28	0.08272
19	GB2	1.58	93.4	1.52	0.304	0.32	0.05949
20	標準砂	1.55	66.1	1.55	-	-	0.03092
21	標準砂	1.50	50.3	1.50	破壊しなかつた	-	0.03963
22	標準砂	1.53	59.9	1.51	破壊しなかつた	-	0.03327
23	標準砂	1.54	63.0	1.51	破壊しなかつた	-	0.02406
24	標準砂	1.56	69.0	1.50	破壊しなかつた	-	0.02397
25	標準砂	1.56	69.0	1.50	破壊しなかつた	-	0.02122
26	標準砂	1.56	69.0	1.50	破壊しなかつた	-	0.02514
27	標準砂	1.49	47.0	1.53	破壊しなかつた	-	0.02895
28	標準砂	1.62	86.4	1.49	破壊しなかつた	-	0.01900

は、②糸状水みちの発生時とする。なお、フィルター材が先に述べたような条件であるが故に、粒子が単にフィルター材の間隙中に移動しただけで水みちに発展しない場合は破壊とみなしていない。実験結果一覧を表-3にまとめた。

2.2 水平透水場における力のつり合いと土粒子性状が与える破壊条件への影響

(a) 乾燥重量による影響

標準砂における I' / i_c (= (水平方向の限界動水勾配) / (鉛直方向の限界動水勾配)) と乾燥重量 γ_a の関係を図-3に示す。この図から、水平一次元透水場における限界動水勾配は、鉛直一次元透水場での理論値 i_c の1.5~3.0割程度の小さな値となることが分かる。この図からは、抵抗要因の一つであると予想された γ_a の影響を読みとることができないが、乾燥重量 γ_a と透水係数 k [cm/s] の関係 (図-4) より、 k は γ_a が小さくなるほど大きくなるべきところが図中の $\gamma_a = 1.5$ [gf/cm³] 以下の3ケースについては、この傾向が当てはめ難いくらい k が小さく評価されていることがわかった。これについて、 $\gamma_a = 1.5$ [gf/cm³] 以下という相対密度が小さい緩い試料 ($D_r \leq 50.3\%$) では、パイプを鉛直方向にして試料を水中落下させて充填した後、続いてフィルター材を水中落下させて充填する際に、その境界部分が混合してしまうことを確認しており、結果的にその部分では試料中他の部分よりも締固まった状態となったためだと推察され、全体の透水性はこの透水性の低い部分に支配されたものと考えられる。そこで、以下に述べる考察では、 $\gamma_a = 1.55$ [gf/cm³] 以下の3ケースの結果は、試料とフィルター材の境界部分に目詰まりといった不備があったとして排除して考えることとする。先ほど示した図-3は図-5となり、 γ_a が大きくなるほど破壊が発生し易い傾向が明らかとなった。なお、GB1及びGB2についても図-6、図-7より同様の傾向が見られる。

(b) 粒子形状による影響

粒径が等しい標準砂とGB1の比較を行った(図-5、図-6)。これより、標準砂の場合には抵抗係数が0.15~0.3程度に分布しているのに対し、GB1では0.14~0.2程度の小さ

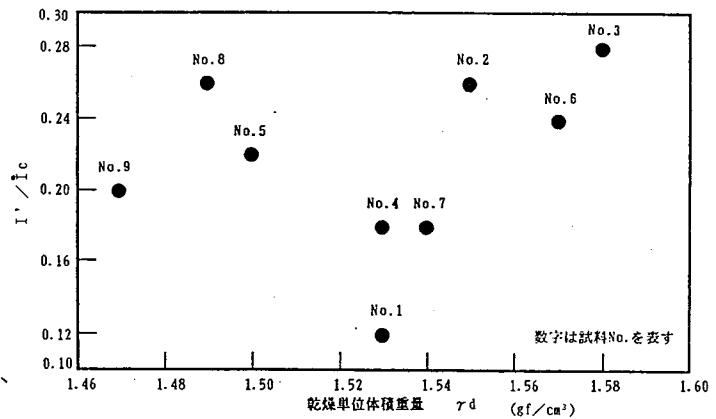


図-3 乾燥重量と動水勾配の比との関係(標準砂)

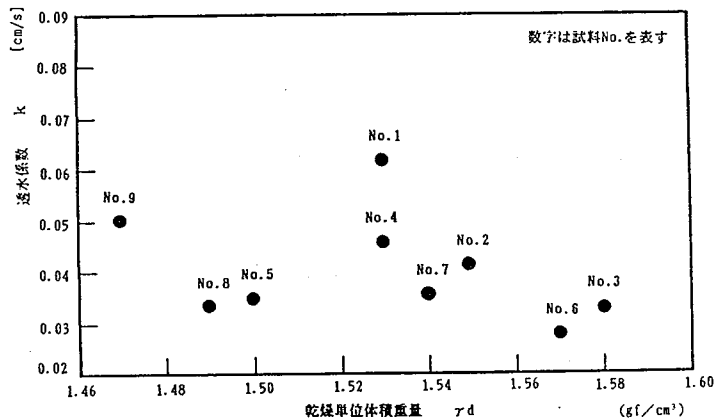


図-4 乾燥重量と透水係数との関係(標準砂)

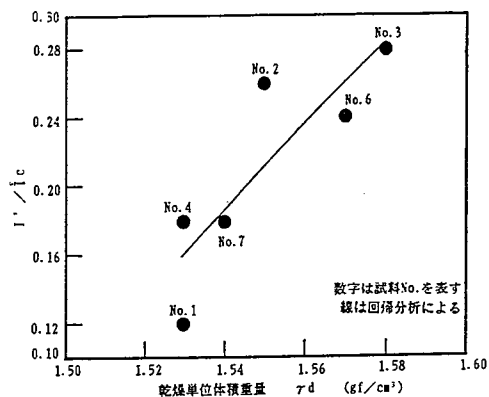


図-5 乾燥重量と動水勾配の比との関係(標準砂)

な値となっていることが分かる。標準砂では粒子形状が粗く粒子間の摩擦係数が大きいに対して、GB1では形状がなめらかであるために粒子間の摩擦係数が小さいことによるものであると推察される。

標準砂の場合、破壊に対する抵抗係数が乾燥重量 γ_a により大きな影響を受けているのに対し、GB1では γ_a による影響が小さいということがいえよう。

(c) 粒径による影響

図-6、図-7のGB1及びGB2の2つのグラフから以下のことが考察される。GB1は抵抗係数が0.14~0.2程度の範囲に分布しているのに対し、GB2では0.28~0.35の範囲に分布しており、粒径が大きくなるほど、抵抗係数が増す傾向を示している。また、 γ_a による影響は両者とも類似していることが言えよう。これは、粒径の違いによる噛み合い(インターロッキング)の違いに起因するものと考えられ、粒径が大きくなるほど粒子が粒子を越えて移動する際のギャップが大きくなるためであると推察する。さらに、ガラスビーズが丸みのある粒子形状であることから粒子間の摩擦係数は小さく、噛み合い強さの要因である γ_a による影響はいずれも小さい結果になったと考察する。

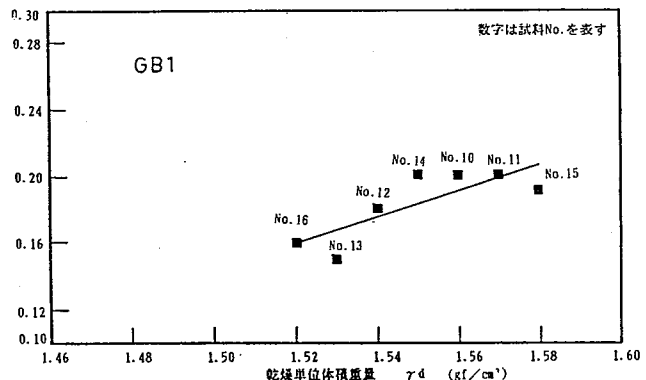


図-6 乾燥重量と動水勾配の比との関係 (GB1)

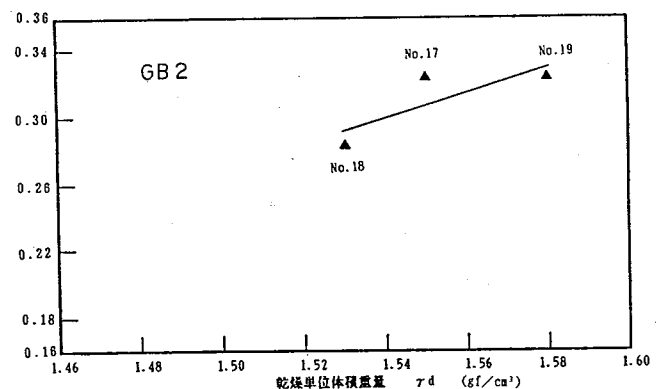


図-7 乾燥重量と動水勾配の比との関係 (GB2)

3. 流れ方向を考慮した二次元浸透破壊の解析

3.1 破壊発生可能領域の特定

二次元透水場における破壊発生条件について、鉛直方向流れが卓越する地盤においてはTerzaghi式による破壊の予測は可能であると考えられるが、水平方向の流れが卓越する地盤においては、適応が難しい。ここではTerzaghi式の拡張として流れ方向に対する限界動水勾配を仮定し、各要素がこの限界値に達するときの地盤全体に作用する水頭差の分布により図-8に示す解析領域の破壊発生可能領域を求める。

(a) 解析方法

① 破壊発生の限界値が浸透流の方向によって異なると仮定し、鉛直($\theta = 90^\circ$)の時にTerzaghiの限界動水勾配 i_c とした場合の θ による変化割合(係数 α)を考える。図-9のように鉛直方向に長軸 1 、水平方向に短軸 β の半楕円を考える。短軸 β の大きさは0.3, 0.7, 1.0の3ケースを仮定した。 $\beta = 0.3$ は水平一次元浸透破壊実験で得られた値であり、 $\beta = 0.7$ は久楽ら²⁾の結果を参考にした。

半楕円の中心とそこから最大動水勾配の方向 θ に引い

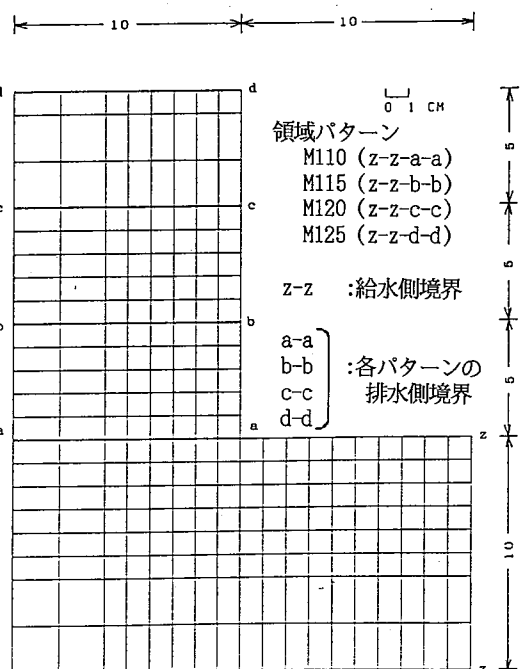


図-8 解析領域

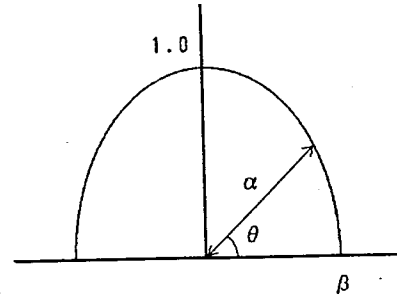
た直線が半楕円と交わる点との距離を係数 α と仮定して、各要素について計算する。係数 α は式(1)となる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\beta^2}{1 + \beta^2 \cdot \tan^2 \theta} \cdot (1 + \tan^2 \theta)} \quad (1)$$

ただし、 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$

$\theta = 90^\circ$ のときは $\alpha = 1.0$

$180^\circ < \theta < 360^\circ$ のときは $\alpha = \beta$ である。



②各要素での水平方向流れを考慮した限界動水勾配 $i_c \alpha$ を式(2)で計算する。

$$i_c \alpha = \alpha \cdot i_c \quad \dots \dots (0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ) \quad (2)$$

図-9 係数 α の求め方

なお、 i_c の計算には、比重 $G_s = 2.645$ [無次元]、乾燥重量 $\gamma_a = 1.60$ [gf/cm³]を用いている($i_c = 0.9951$)。

③各要素において、限界動水勾配 $i_c \alpha$ に達するような地盤全体に作用する水頭差 $H \alpha$ を計算する。

(b) 結果及び考察

図-10, 図-11, 図-12, 図-13に解析結果を示した。(I)は $\theta = 0$ の場合に $\beta = 0.3$, (II)は $\beta = 0.7$ として半楕円を仮定したときの結果であり、(III)は同じく $\beta = 1.0$ として半円を仮定したときの結果である。図

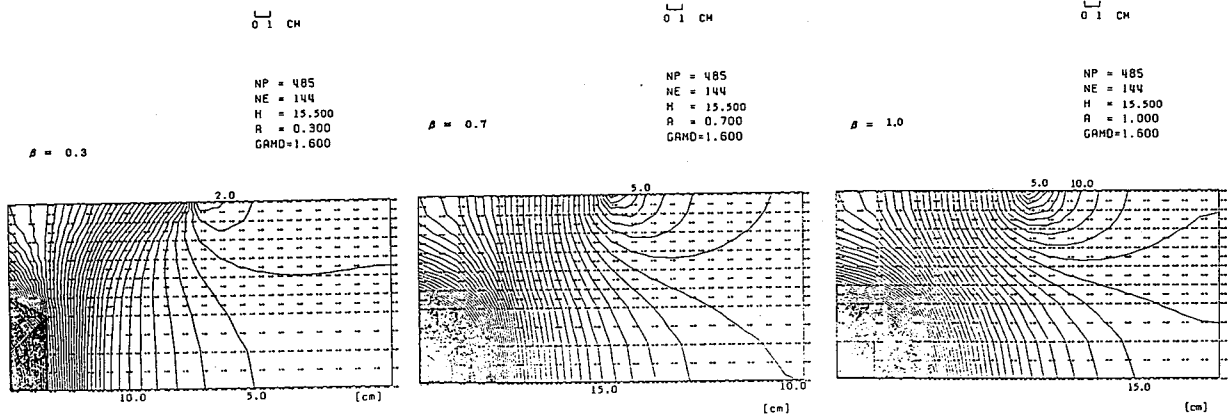


図-10 (I) 破壊発生可能領域(M110) $\beta = 0.3$

図-10 (II) 破壊発生可能領域(M110) $\beta = 0.7$

図-10 (III) 破壊発生可能領域(M110) $\beta = 1.0$

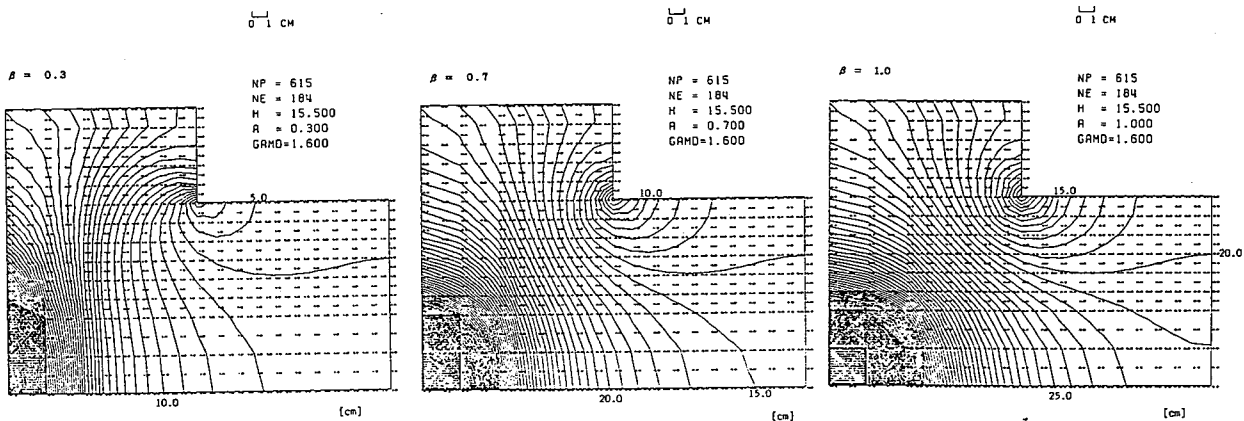


図-11 (I) 破壊発生可能領域(M115) $\beta = 0.3$

図-11 (II) 破壊発生可能領域(M115) $\beta = 0.7$

図-11 (III) 破壊発生可能領域(M115) $\beta = 1.0$

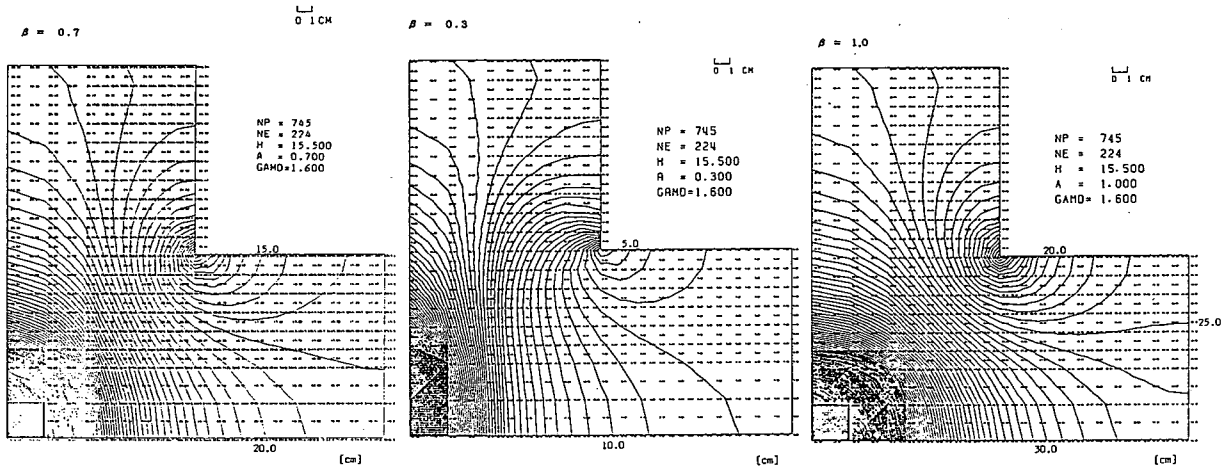


図-12 (I) 破壊発生可能領域(M120) $\beta=0.3$ 図-12 (II) 破壊発生可能領域(M120) $\beta=0.7$ 図-12 (III) 破壊発生可能領域(M120) $\beta=1.0$

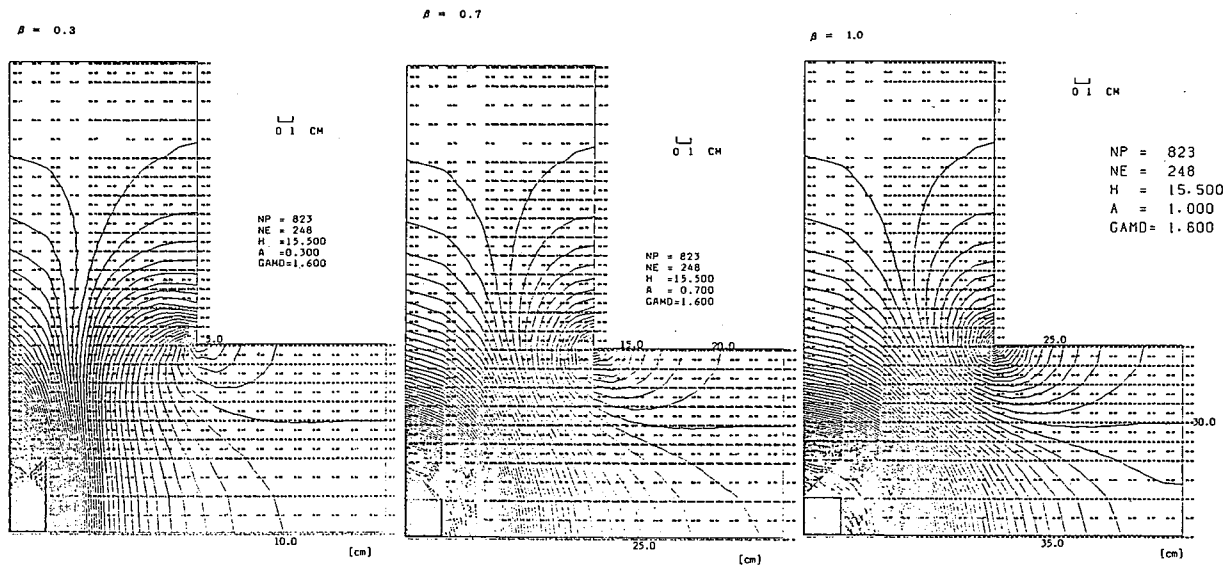


図-13 (I) 破壊発生可能領域(M125) $\beta=0.3$ 図-13 (II) 破壊発生可能領域(M125) $\beta=0.7$ 図-13 (III) 破壊発生可能領域(M125) $\beta=1.0$

は、図-8の給水側z-zと排水側(例えばM110の場合はa-a)の水頭差を1cmずつ増加させていった場合の破壊発生可能領域の拡大(または $H\alpha$ のコンター)を示したものである。

全ての図の下流地表面部においては、流れが鉛直成分のみとなるため α による影響はなく、各パターンにおいて $H\alpha$ の値は等しくなっている。しかし、水平成分が存在する要素では、(III),(II),(I)の順に $H\alpha$ の値は次第に小さくなっている。例えば、M115で $H\alpha$ が最小となる(最も早く破壊発生可能領域になる)屈曲部の要素では、(III)で9.1cm,(II)で7.4cm,(I)で3.7cmとなり、破壊発生可能領域の出現の早さの違いが理解される。

$H\alpha$ の分布状況としては、M115とM120及びM125では(III) $\beta=1.0$ のときは屈曲部を中心にほぼ同心円状に領域が発生していくが、(I) $\beta=0.3$ や(II) $\beta=0.7$ では水平浸透流部分側(図の右側)に歪んだ拡大をする傾向が見られる。特に(I)のように β が小さいほど顕著な傾向を示している。このことは、浸透力の作用方向を無視して破壊発生の限界値として i_c を使用した場合、限界水頭差 $H\alpha$ が異なるだけでなく、破壊の発生箇所が位置的に異なる可能性もあり得ることを示唆している。また、M110では、破壊発生可能領域の拡大速度は異なるものの、他のパターンに比べ、拡大傾向が類似している(β の影響が少ない)と見ることができる。これは、全体の流れが水平流れとなる部分が多く、 β が異なる解析をしても相対的に限界水頭差 $H\alpha$ が変化するだけであると考えられる。

3.2 破壊の拡大のシミュレーション

(a) 解析方法

破壊の拡大シミュレーションでは、限界動水勾配 i_{c0} に達した要素は破壊状態に達したと見なすが、要素全体ともに体積変化や変形は起こさず、要素内部で構造変化を生じ透水係数のみが増大すると仮定した。初期の透水係数 $k = 0.0165$ [cm/s]、破壊後の透水係数 $k' = 0.0200$ [cm/s] を仮定し、FEMによる二次元定常浸透流解析で反復計算を行い、破壊域の拡大状況を求めた。なお、 $i_c = 0.9951$ (比重 $G_s = 2.645$ 、乾燥重量 $\gamma_d = 1.60$ [gf/cm³])、 β には先の実験結果に近い値 β 値 ($= i' / i$) $= 0.3$ と、これより大きな $\beta = 0.7$ を用いた。

(b) 解析結果と考察

図-14は、以上の条件のもとで、水頭差 ΔH の増加に伴う破壊域の進行過程である。 $\beta = 0.3$ では、 $\Delta H = 2.1$ cmで破壊領域が発生、 $\Delta H = 3.9$ cmで上流・下流がつながる結果が得られた。 $\beta = 0.7$ の場合には、 $\Delta H = 4.2$ cmで破壊域発生、 $\Delta H = 8.7$ cmで上流・下流がつながる結果となった。 β の影響が破壊域発生点、拡大の様子の違いも表れていることが分かる。なお、著者らが行った同サイズ(標準砂使用)の二次元モデルの実験結果では、 $\Delta H = 2.6$ cmで部分的に土粒子を噴き、 $\Delta H = 4.3$ cmで上流・下流がつながる結果を得ており、この結果では β の値は 0.3 に近いものといえよう。

しかし、破壊域の進行速度は破壊後の透水係数の値に強く影響することにより、シミュレート時には破壊後の透水係数を正しく設定する必要があると考えられる。また、上・下流貫通後、計算を継続すると破壊域はともに下方へ広がり、現実と矛盾する結果となった。これは、今回 α を深さの関数として評価していないことや、破壊域の限界(透水係数、流量の関係)を考慮していないことによると考えられた。

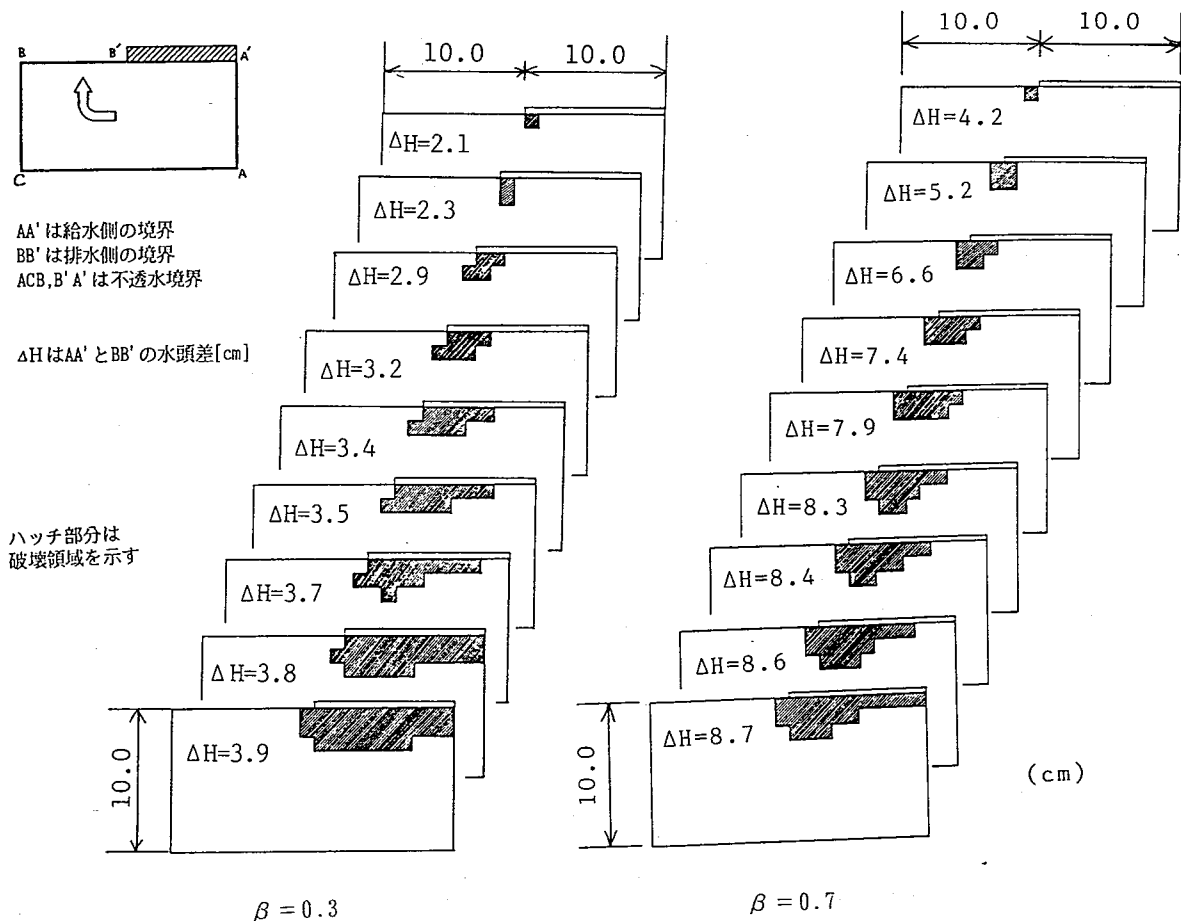


図-14 破壊の拡大過程

4. あとがき

水平一次元浸透破壊実験の結果、 i'/i_c は、標準砂：0.15～0.30、GB1：0.14～0.2、GB2：0.28～0.35という値を取る結果となり、これを摩擦角として考えると、標準砂： $8.5^\circ \sim 16.5^\circ$ 、GB1： $8.0^\circ \sim 11.0^\circ$ 、GB2： $15.5^\circ \sim 19.0^\circ$ となった。このように鉛直一次元に比べ0.10～0.30と小さい限界値を示す結果となったが、現在のところ、その値となる理由については明確な説明を加えるに至っておらず、その値の意味するものの解釈が難しいところは認めざるを得ない。しかし、実地盤における不均質な間隙を有する弱部、層の境界または破壊が進行していく過程での破壊条件を定量的に表しており、有意な結果が得られたと考えられる。

流れ方向を考慮した限界動水勾配を仮定したシミュレーションにより、ほぼ実験を再現する結果が得られたが、破壊域の進行速度は破壊後の透水係数の値に強く影響することにより、シミュレート時には破壊後の透水係数を正しく設定する必要があると考えられる。また、上・下流貫通後、計算を継続すると破壊域はともに下方へ拡がり、現実と矛盾する結果となった。これは、今回 α を深さの関数として評価していないことや、破壊域の限界（透水係数、流量の関係）を考慮していないことによると考えられ、さらに検討する必要があると考えられる。

本研究は文部省科学研究費、一般研究(C),No.63550360（代表 宇野尚雄）の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 杉井俊夫・佐藤 健・宇野尚雄・山田謹吾：浸透破壊の発生プロセスと土の非均質性，土と基礎，Vol. 37, PP.17-22,1989.
- 2) 久楽勝行・吉岡 淳・佐藤正博：水平方向浸透流下における砂地盤のパイピングについて，第20回土質工学研究発表会講演集，PP.1483～1484，1985.
- 3) 宇野尚雄・杉井俊夫・長谷川智幸：水平一次元流れによる浸透破壊について，土木学会中部支部発表講演概要集，PP.258～259,1990.
- 4) 宇野尚雄・杉井俊夫・山田謹吾：土の浸透破壊の発生機構に関する研究，土木学会中部支部発表講演概要集，PP.260～261,1990.