

堤防の長期的な水分量の変動

朱偉¹・山村和也²

¹正会員 工博 日本大学副手 生産工学部土木工学科 (〒275 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

²正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

河川堤防の崩壊は降雨、洪水の浸透作用によって引き起こされることが多い。降雨、河川水位の変動、地表面からの蒸発散などにより堤防への水の流入、流出が繰り返され、堤体土の水分量は絶えず変化している。

堤防崩壊の直接の原因となる豪雨あるいは洪水による浸透には事前の堤体土の含水量、すなわち、初期条件が大きな影響を持つので、堤防の安定性の評価には長期的な水の浸透、排水にもとづく堤防内部の水分量の分布およびその変動を明らかにすることが必要になる。本研究では堤防の水分量の長期的変動を調べるため、堤防の水分量の変化をRI水分計によって観測し、得られた測定結果にもとづき浸透解析を行って、堤体土の水分量の季節的な変動の特徴を明らかにした。

Key Words : levee, water content, rain infiltration, evapotranspiration, FEM, slope stability, saturated-unsaturated seepage flow

1. はじめに

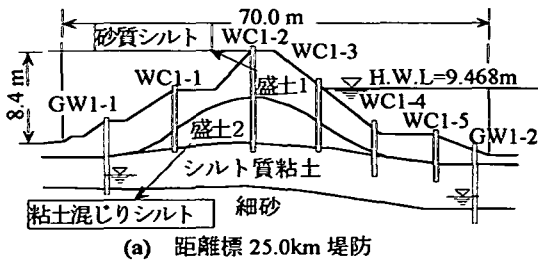
河川堤防のり面は通常の状態である限り、高い安定性を持つと思われるが、降雨や洪水による水の浸透に伴って、その安定性が低下し、崩壊に至る事例は少なくない。浸透水が土構造物の安定性に与える影響について、従来、降雨や洪水による浸透作用を中心に破壊のメカニズムや安定性の評価などが研究されてきた。八木ら¹⁾は斜面崩壊に降雨量の影響が大きく、限界降雨量を設置することで斜面崩壊を予知する方法を提案している。杉井ら²⁾は堤防における水の浸透に降雨強度、パターンの影響を検討し、降雨と洪水の同時作用について研究した。筆者ら³⁾は江戸川で行われた実物大の模型堤防実験による浸透や破壊の過程を分析し、事前降雨が降雨浸透時の堤防の安定性に影響を与えていることを明らかにした。さらに、このような事前降雨および河川水位上昇などによる浸透履歴は同様にその後起きる洪水による浸透に大きく影響することを実物大模型堤防の灌水実験結果の分析⁴⁾から明らかにした。このような観点から、水の浸透を受けている堤防の安定性を適切に評価するためには、対象とする単一の浸透作用だけではなく、それ以前の一定期間にわたる土の水分状態を適切に把握することが必要となる。安定性評価のための浸透流解析を行う場合、堤防の水分量は季節あるいは気象条件によって変わるので、どのような初期条件を用いるかが問題となる。

現在まで、堤防における降雨時あるいは洪水時の

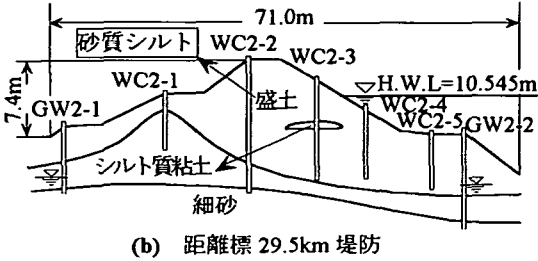
浸透は研究されているが、堤防の水分量と気象条件、季節あるいは堤体の土質などとの関係を調べた例がなく、堤体土の水分量がどのように変化しているのか把握できていない。このような理由から、堤防の長期的な水分量の変化を実際の堤防で観測し、長期間における、①浸透現象の特徴、②堤体土の水分量変化の傾向と変化量、③堤体土の水分量分布、水分量変化に影響を与える要素、④堤防の水分量変化の推定について検討する。

2. 観測堤防および観測方法

観測箇所は江戸川左岸の河口からの距離標 25.0 km(千葉県松戸市主水新田)および 29.5 km(千葉県流山市下花輪)の2箇所である。観測堤防は平面上堤防法線がほぼ直線的な場所にあり、その断面および観測孔の位置などを図-1に示す。堤防は主に砂質シルト、粘土混じりシルトで造られ、地盤はシルト質粘土とその下の細砂層から成り、河川の中下流でよく見られる土質構成である。堤体には土の水分量を測定する水分観測孔(WC)5本と基礎地盤の細砂層の地下水位を観測する水位観測孔(GW)2本を設置し、土の水分量は挿入型RI水分計を用い、深さ方向0.5~1.0mの間隔で測定する。また、地下水位は触針式のテスターを用いて測定する。観測は降雨の多い時期には1週間、降雨の少ない季節には2~3週間の間隔で行われた。



(a) 距離標 25.0km 堤防



(b) 距離標 29.5km 堤防

図-1 観測堤防の断面および観測孔の位置

RI水分計は後方散乱型であり、ガンマ線源は ^{60}Co 、中性子線源は ^{252}Cf である。観測は1回につき1分間とし、標準体について10回、また堤体の各測定点について3回ずつ測定する。湿潤密度と水分量の95%信頼度における測定誤差($\Delta\rho_w, \Delta\rho_m$)は、式(1)⁹⁾で計算する。

$$\Delta\rho = \frac{1.96R}{\chi} \sqrt{\frac{1}{Nt} + \frac{1}{St_s}} \quad (1)$$

ここに、 R :係数率比

$\chi = \partial R / \partial \rho$:校正曲線の分解能

ρ :湿潤密度あるいは水分量 (g/cm^3)

t :現場測定時間 (min)

t_s :標準体測定時間 (min)

N :現場で測定した平均係数率

S :標準体で測定した平均係数率

計算結果から湿潤密度については $\Delta\rho_w = 0.063 \sim 0.09 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、水分量については $\Delta\rho_m = 0.006 \sim 0.011 \text{ g}/\text{cm}^3$ の値を得た。

先年江戸川降雨浸透実験⁹⁾を実施しているが、この実験で使用した同型の水分計を本観測にも用いており、堤防土質も類似しているので当時求めた校正曲線を参照した。観測結果から算出された水分量の精度を確かめるために、実測湿潤密度から実測水分量を差引き乾燥密度を求めてみた。乾燥密度は全期間を通じ変化しないはずであるが、測定点で観測した土の乾燥密度はおおよそ $0.09 \text{ g}/\text{cm}^3$ の範囲内で変動していることが示された。しかし、この変動幅は湿潤密度の95%信頼度のほぼ誤差範囲内であるため、測定値は一応良好な精度を持っているものと考えられる。

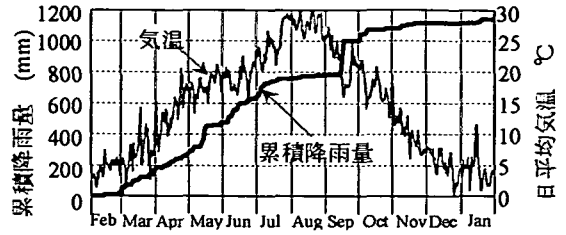


図-2 1995年2月～1996年1月の気象条件

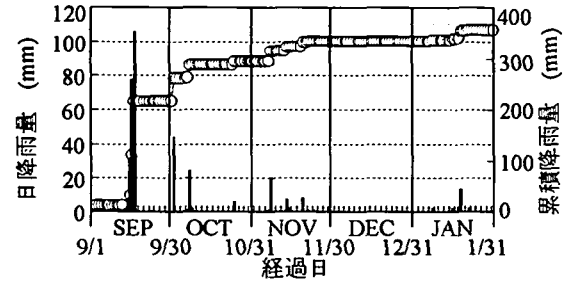


図-3 観測期間の降雨データ

表-1 観測期間の日降雨量と降雨分布

降雨特性 期間	日降雨量 (mm)					降雨日 (day)	晴天日 (day)	降雨量 (mm)
	0~5	6~10	11~20	20~50	>50			
9/1~9/12	1	0	0	0	0	1	11	1
9/13~9/19	0	0	0	1	2	3	4	216
9/20~9/27	1	0	0	0	0	1	7	1
9/28~10/11	2	0	0	2	0	4	10	71
10/12~11/24	4	3	1	0	0	8	36	46
11/25~1/31	4	0	1	0	0	5	63	22

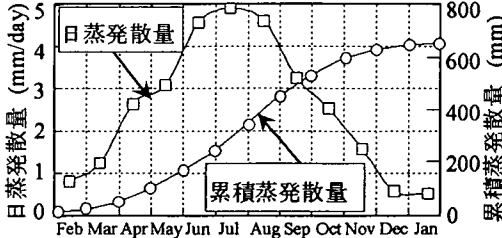
3. 測定期間の気象条件

降雨、気温は日本気象協会我孫子気象観測所のデータを用いた。1995年の降雨は梅雨期と台風期に集中し、夏の7月～8月と冬の11月～1996年1月は降雨が少ない(図-2)。年間降雨量は1200mm未満でありこの地域の平均年間降雨量の1500mmと比べ少なく、雨の少ない年に当たっていた。日平均気温は8月をピークとして、0~30°Cの範囲で変化し、特に8月は例年より気温が高かった。

堤防の観測は1995年9月～1996年1月の5ヶ月間に実施した。観測実施前の梅雨期には降雨があったが、7月下旬から9月上旬の2ヶ月間はほとんど雨がなく、気温が高かった。観測期間の降雨データを図-3に、日降雨量と降雨分布を表-1に示す。観測期間中には降雨日が22日あるが、降雨のない日が131日で圧倒的に多かった。22回の降雨日のうち日降雨量5mm以下のものが12回も占めており、観測期間中の累積降雨量357mmの2/3が9月13日～19日の間の台風による大雨であった。全期間を通して比較的雨の少ない年であったと考えられる。

表-2 解析に用いた堤防の土質定数

土質	$k_v(\text{cm/sec})$	$\theta_s(\%)$	$\theta_r(\%)$	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	n
砂質シルト	5.0×10^{-4}	54	10	0.012	1.5
粘土混じりシルト	3.0×10^{-4}	54	15	0.010	1.2
シルト質粘土(地盤)	5.0×10^{-5}	54	20	0.008	1.1
細砂(地盤)	5.0×10^{-3}	48	8	0.038	3.6



(1995年2月~1996年1月)

図-4 Thornthwaite 法による蒸発散量の推定値

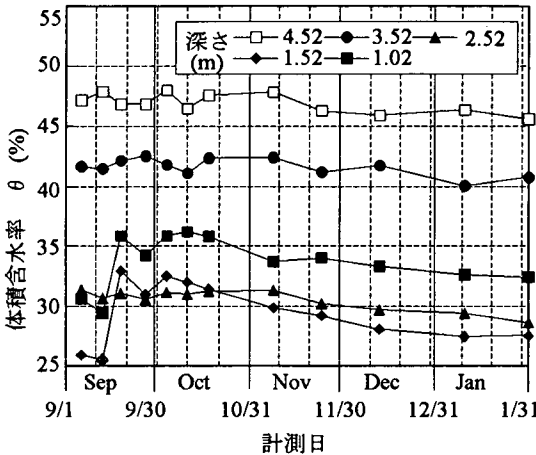


図-5 WC1-3 における体積含水率の変化(実測結果)

4. FEM 飽和-不飽和浸透解析

FEM 飽和-不飽和浸透解析は Neuman⁷⁾の方法にもとづいて行った。距離標25.0kmの堤防断面を地盤を含めて 432要素, 468節点のメッシュに分割し, 堤防表面を流量既知境界として降雨の浸透と蒸発散を扱い, 降雨強度が堤防の浸透能を超えた場合に表面流出が生じると考える。観測された細砂層の地下水位のデータを既知条件として境界に用いる。水分特性曲線は類似した砂質シルトであった江戸川実験堤防⁶⁾の築堤材料の実験値を用い, 不飽和透水係数は van Genuchten の関数モデルによる推定値を用いる⁸⁾。土質の異なる盛土や地盤については, その土の種類に応じて, 水分特性曲線を仮定し, 実測した体積含水率の変化と解析結果が一致するように試行錯誤を重ねた。最終的に, 実測値と解析結果が最もよく合致した表-2に示す土質定数を求めた。ただし, 表に示す k_v は垂直方向の透水係数で, 水平方向の透水係

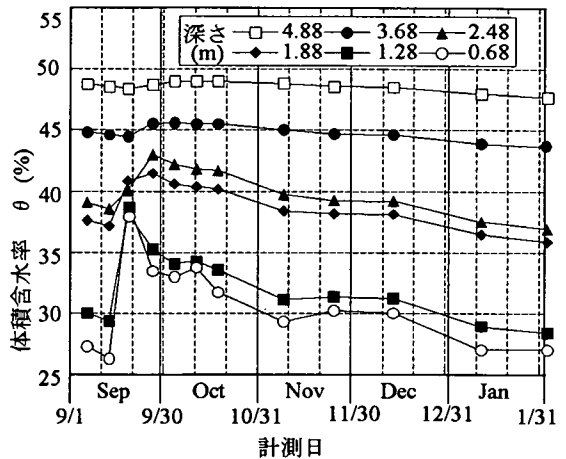


図-6 WC1-3 における体積含水率の変化(解析結果)

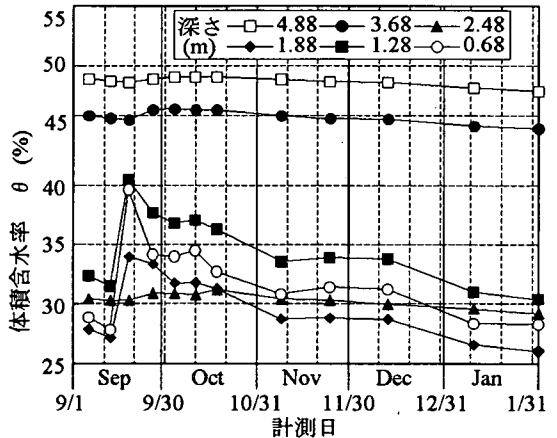


図-7 土質変化を考慮した解析結果

数を k_H とし, $k_v: k_H=1:3$ の異方性を考えた。また, van Genuchten の関数モデルのパラメータ $\theta_s, \theta_r, \alpha, n$ がそれぞれの土の水分特性曲線と不飽和透水係数を反映している。ここで, θ_s は飽和体積含水率で実測値の平均値を用る。 θ_r は最小体積含水率である。 α は土の限界毛管水頭の逆数にほぼ等しく, n は水分特性曲線の勾配に関連するパラメータである。

解析には 1995年2月~1996年1月の間を対象とした。初期条件は冬季であることを考えて土の含水量は比較的小さい状態を用いた。降雨は図-2に示したデータを用いる。降雨のない日は堤防表面からの蒸発散を考える。蒸発散量は Thornthwaite⁹⁾を用いて, 気温のデータ(図-2)より推定した。結果を図-4に示す。

図-5には観測された堤体土の水分量の変化を示し, 図-6には FEM の解析結果を示す。解析結果と実測値を比較すると水分量の変化の傾向はほぼ一致しているが, 深さ 2.5m 付近の解析水分量と実測値の差が大きい。この原因はこの深さ付近に砂質土が局所的に分布しているためと思われる。このような局所的な土質変化を解析に取り込んだ結果, 図-7のように実

表-3 各観測期間の降雨量および浸透現象の特徴

期間	日月	降雨量(mm)	浸透現象の特徴
(1)	9/1～9/12	1	蒸発散
(2)	9/13～9/19	216	降雨浸透
(3)	9/20～9/27	1	水分再分配・蒸発散
(4)	9/28～10/11	71	繰り返し降雨浸透
(5)	10/12～1/31	68	水分再分配・蒸発散

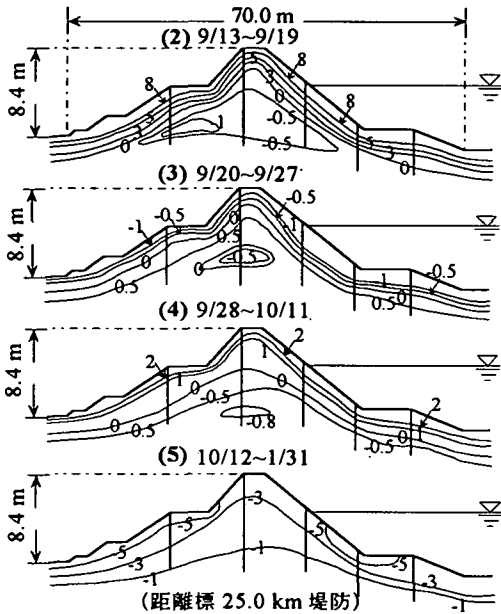


図-8 各期間の体積含水率の変化量 $\Delta \theta$ (%)

測値とほぼ同様な水分変化が得られた。一般的な浸透現象を検討するため、ここでは単純化した解析モデルに置き換え、局所的な影響を除外することにした。

5. 堤防における長期的な浸透現象

堤防は長期間にわたって複雑な浸透作用を受けているが、洪水による水の浸透は頻度が小さいので別に考えれば、浸透現象はおおむね降雨浸透とその後の水分再分配および蒸発散によるものである。実際に、堤防の表面では絶えず降雨浸透と蒸発散が繰り返され、堤体内の水分移動を引き起こしている。

浸透現象の特徴から観測期間を表-3のように5つの小期間に分ける。期間(1)は降雨がなく気温も高かったため、蒸発散の活発な期間と考える。期間(2)では台風による216mmの大雨があり、全期間通じ最も集中した降雨浸透があった。期間(4)にも再び中位の降雨量があったため、繰り返し降雨浸透が作用したと考えられる。期間(3)、(5)には20mm以上の降雨がなく、降雨が少ないので、水分の移動は主に水分再分配と蒸発散によると考える。このように浸透現象と水分量変化を考え、堤防における長期的な浸透現象を分析する。

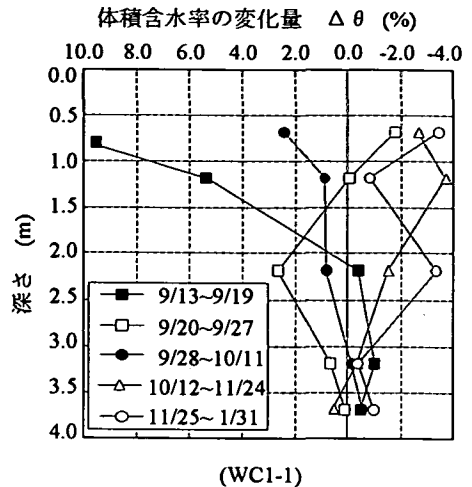


図-9 各期間の体積含水率の変化量

(1) 堤防における長期間の降雨浸透

降雨浸透は堤防の安定性に大きく影響する。すなわち、降雨による浸潤前線の進行とそれに伴う土の水分量の変化が堤防の安定性に関連を持つ。降雨の浸透は堤防の表面から内部へと進んでいくが、のり尻付近では盛土のり面から地盤面までの距離が短く、浸潤前線がいち早く地盤面へ到達する。堤防地盤は難透水性であることが多いので、浸透水は地盤面に溜り、堤防はのり尻付近から飽和する。これによって形成された飽和領域の広がり盛土の安定性に直接影響する。また、浸潤前線の通過に伴った堤体土の水分量の増加が土のせん断抵抗を低下させ、堤防ののり面崩壊の原因になる。しかし、降雨による浸潤前線の進行は初期条件すなわち降雨浸透が始まる時の堤防の水分量の状態によって違うので、降雨浸透を考えるには長期的な浸透現象を含めて考えなければならない。

距離標 25.0 km 堤防で観測された各期間の水分量の変化量を図-8に示す。期間(2)では台風によって9/15に32mm、9/16に78mm、9/17に106mmの降雨があり、降雨強度16mm/hに達していた。観測は降雨の1日後の9/19に行われ、降雨による水分量の変化量を(2)に示す。降雨浸透によって堤防の表層1m程度の水分量が大きく変化し、体積含水率は8%以上の増加が見られた。水分量の増加量は深さが大きくなるに従い小さくなり、表面からある深さに達すると水分量の増加量は0となった。その深さより深いところでは土の水分量は引続き僅かずつ減少傾向を示している。この時点において浸潤前線は水分増加量が0の深さまで進行したと考えられる。さらに、図-9のWC1-1での水分変化量から9/19時点では浸潤前線は深さ2.0m程度まで進行したことが分かる。

期間(4)での降雨は2回あり10/2に降雨量は44mm、降雨強度14mm/h、10/8には降雨量24mm、降雨強度4mm/hであった。9/28～10/11の水分量の変化量を図-8(4)に示す。表層の体積含水率の増加は2%程度で期

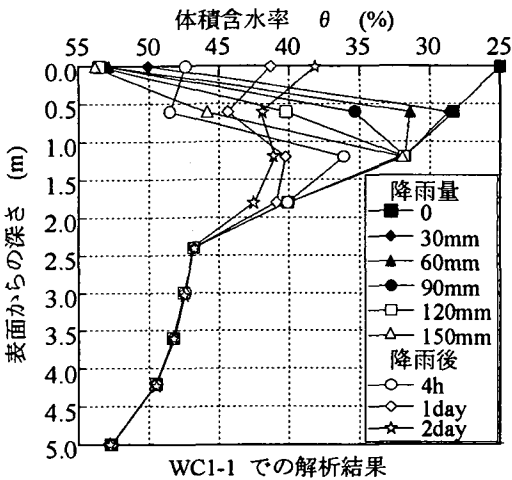


図-10 含水量が低い状態での降雨浸透

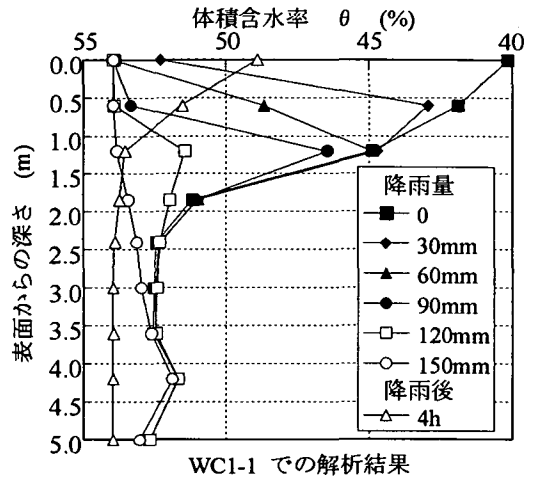


図-11 湿潤な状態での降雨浸透

間(2)より小さい、また浸潤前線は表面から深さ3m程度までに進行したことが図-9から判断できる。

浸潤前線の通過に伴う土の水分量変化に関して、Philip¹⁰⁾、Green-Ampt¹¹⁾は均一な水分量をもつ不飽和地盤について、表面が湛水している場合、湛水面直下の地盤に水分量がほぼ一様の伝達帯が形成され、その最下端に水分量の急変する浸潤前線が存在すると述べている。

堤防においては、初期水分量は表面からの深さによって変わり、浸潤前線の形態が異なる。観測結果に示されているように、降雨による浸潤前線の存在は認められるものの、浸潤前線付近で水分量が急激に変化することなく、ある幅をもつゾーンによって水分量は緩やかに変化し、表面に近ければ水分量の変化は大きくなることが示された。

一般に、のり面崩壊は降雨中あるいは降雨の直後に起きることが多いが、観測結果では降雨による浸潤前線の進行速度はあまり速くないことが示された。期間(2)には連続3日間大雨が降ったにも拘らず降雨の1日後の測定データでは浸潤前線は深さ2~2.5mまで、期間(4)では降雨後3日目で3.0mまでしか進んでいなかった。これには堤防の初めの水分量状態すなわち初期条件と関連がある。期間(2)のときは観測の前ほぼ2ヶ月間にわたり雨の降らない天候が続き、しかも夏期で蒸発散も多かったため、特に表層は乾燥していた。この状態では降雨による浸透水はまず表層の土に吸収され、浸潤前線の進行が遅くなったと考えられる。

初期水分量が降雨浸透に及ぼす影響を調べるため、FEMを用いて、異なった水分量の条件で降雨浸透を解析した。含水量が低い条件での降雨浸透には、95年9月10日の水分量分布を用いる。この時点は堤防に2ヶ月間ほとんど降雨による浸透がなく、高い気温で蒸発散が活発だった時である。次に堤防が湿潤な状態にある時として7月1日の含水量分布を用いる。この時点は梅雨期の末で、その前4ヶ月の間断続的

に600mmの雨が降った。このような初期条件で堤防に15mm/h、累積150mmの降雨を作用させたときの水の浸透を解析した。

計算結果をWCI-1の位置で比較する。図-10には含水量が低い条件、図-11には湿潤な条件での降雨浸透を表している。含水量の低い条件では降雨によって表層の水分量が大きく増加していくが、下方への進行が遅い。降雨量が150mmになると表面は飽和に近い状態になったが、深さ1.5m以下の土の水分量にほとんど変化が見られない。降雨後、浸潤前線は継続して下方へと進行するが、その進行速度はかなり遅くなった。2日後、浸潤前線は深さ2mの深さに到達したものの、この深度での水分量の変化は僅かであった。

湿潤な条件での降雨浸透では表層の水分量が増加しながら下部へ浸透するが、降雨量60mm程度で表面はほぼ飽和に近い状態になった。浸潤前線の進行は速く、降雨量90mmのときに深さ1m付近、150mmのときに3.0mに到達した。3.0m以下では初期水分量が多いため、水分量はほとんど変わらないまま浸潤前線が通過し、浸透水は短時間で地盤面に到達した。降雨終了4時間後には堤防底部に浸潤線の上昇が見られた。

含水量が低い条件での降雨浸透による堤体の水分量の増加は表層にとどまるが、湿潤な条件では水分量の増加は深いところまでに及ぶ。その結果、のり尻部に飽和領域が急速に形成される。すなわち同じ降雨量であっても、初期含水量によって堤防の安定性に与える影響が大きく異なることが明らかである。

(2)堤防における長期的な水分再分配と蒸発散

堤体土の初期の水分量の状態が水の浸透に大きく影響することを述べたが、初期の水分量の状態はその時点以前の降雨履歴、降雨後の水分再分配や蒸発散の過程に左右される。図-8(3)に示す期間(3)の水分変化はこのような過程を表している。図-8(3)は降雨

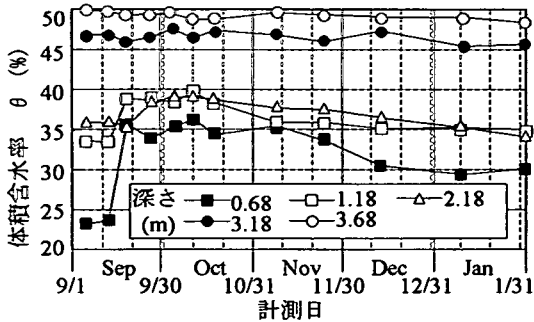


図-12 WCI-1における体積含水率の変化(実測結果)

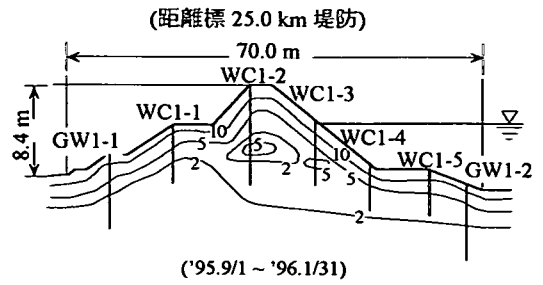


図-13 観測期間の体積含水率の変化量の分布 Δθ (%)

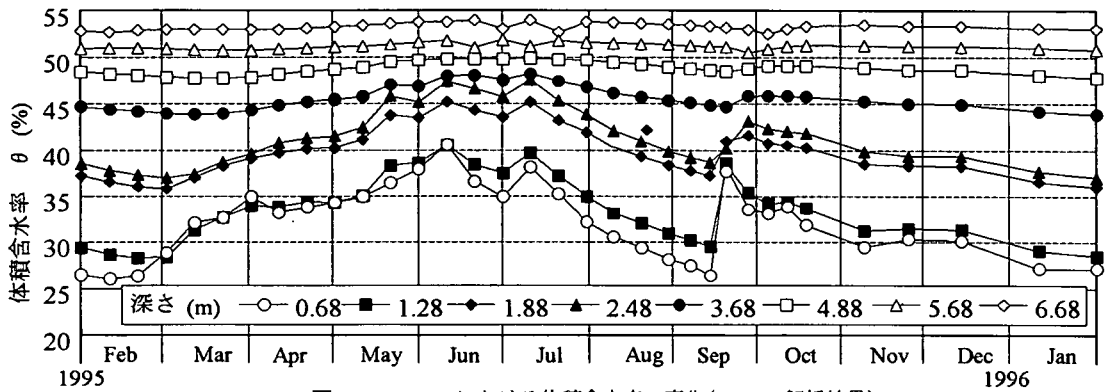


図-14 WCI-3における体積含水率の変化(FEMの解析結果)

浸透水は表層から下方へ移動し、水分量は1%程度変化することおよび下層へいくほど水分量の減少が小さくなり、ある深さでは水分量の変化量が0になることを示している。一般にこの水分量の変化のないところを排水前線と云う。排水前線の下では以前の降雨による水分増加が継続しているが、その上の土では、蒸発散と降雨後の水分再分配によって土の水分量が低下する。図-8(5)の期間(5)は2ヶ月以上降雨の少ない天候が続いた。水分量の低下は小段付近ののり面表層で5%程度の最大値を示し、その下の深さ2.5m程度までは水分量の低下が3%、他の部分については水分量の低下は大体1~3%で少ない。

実際、堤防の表面からは降雨浸透と蒸発散が繰り返されている。表層の土はこれらの作用を受けて、ほぼ同時に水分量増加あるいは減少を繰り返す。しかし、深部の土の水分量の変化にはタイムラグが生じ、また、増減量も深さと共に減衰するため、はっきりした浸潤前線あるいは排水前線が見られない場合が多い。しかし水分量は長い周期の気候条件に従ってゆっくり増加あるいは減少を繰り返す。

降雨の浸透によって短期間で堤体土の水分量は比較的大きく増加するが、降雨後の水分量の減少は長い期間にわたって遅い速度で進んでいる。これは水分再分配と蒸発散の作用は降雨浸透作用に比べて緩慢なためであるが、短期的な降雨浸透と違って常に作用しているため、堤体全体の水分量は季節的にかなり大きな差が生じる。この長期的な水分量の変化

とその傾向を把握することはのみ面崩壊の直接の原因となる豪雨や洪水による浸透作用が堤防の安定性へ及ぼす影響を評価するために重要である。

6. 堤体土の水分量の長期的な変化

(1) 堤体土の水分量の変化

図-5、図-12に25.0km堤防の表、裏のり面で測定した堤体土の水分量の変化を示した。土の水分量は観測の初期には減少する傾向にあったが、9月中旬の台風で水分量が急激に上昇した。台風の後、土の水分量がしばらく低減したが、期間(4)に再び雨が降り、水分量が上昇に転じた。その後、降雨量20mm以下の雨が13回もあったが、降雨量が小さいため、水分量は緩やかに減少を続けた。このような傾向は概ね全ての測線、および距離標29.5kmの堤防にも現れている。観測期間(95.9/1~96.1/31)を通じて測定された体積含水率の変化量を図-13に示した。体積含水率が10%以上の変化を示したのは堤防の表面1m程度の表層だけで、大部分の堤体土の変化は2~5%の範囲にとどまっている。

FEM解析による年間の水分量の変化を図-14に示す。これを見ると年間の水分量は2回の上昇期と2回の低減期が表れている。すなわち梅雨期と台風期には水分量が上昇し、夏と冬の乾燥した時期は水分量が低下した。梅雨を含む4ヶ月の間には、断続的

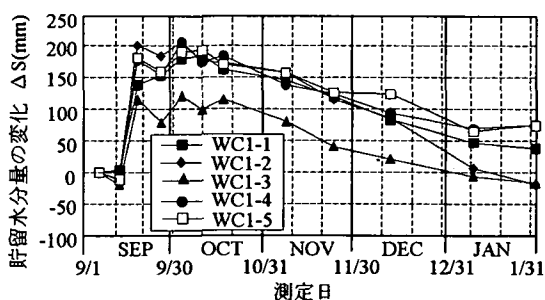


図-15 各測線の貯留水分量の変化(距離標 25.0km 堤防)

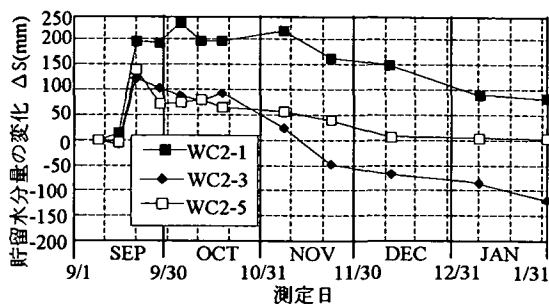


図-16 各測線の貯留水分量の変化(距離標 29.5km 堤防)

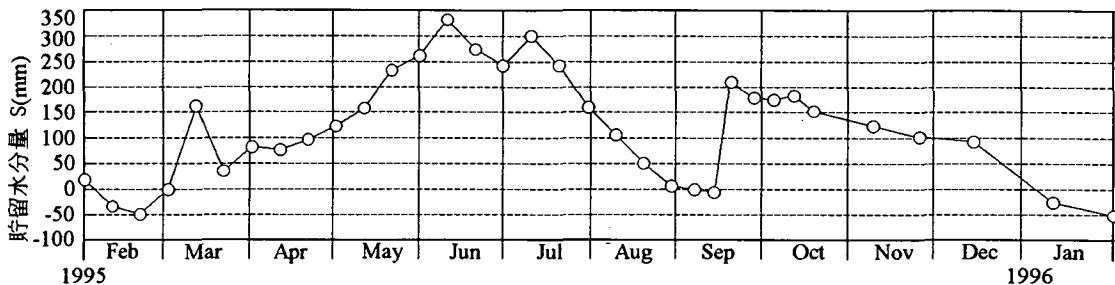


図-17 貯留水分量の変化(FEMの解析結果, 1996年9月6日を0とする)

な雨は多いが、集中した大雨は少なかった。そのため、堤体土の水分上昇は緩やかであったが、降雨の継続期間が長いこと、水分量の増加は深いところまで及んだ。9月中旬の台風による降雨は強く、かつ3日間に集中したため、水分量の上昇は急激であった。次に水分量の減少については、気温の高い7月中旬からの2ヶ月間は蒸発散量が大きく、水分量の減少は著しい。特に、表層の水分量は比較的速く低下した。冬期における水分量の低下は緩やかであるが、期間が長いことため低下量は大きい。このように堤体土の水分量の変化は、気候条件と密接に連動しており、その変化量は降雨あるいは蒸発散の強度および表面からの深度に関係している。浸透作用が強く、作用時間が長いほど、土の水分量の変化は大きく、また、深くまで水分が変化する。観測結果によれば降雨量 20mm以下の雨は概ね深さ 0.5m以浅の土の水分変化を起こさせるが、深さ 0.5m以深の土に顕著な水分は生じない。また一般に深さ 4.0m以下の土の水分変化は小さい。

(2) 堤体内の貯留水分量の変化

季節的に起きる水分変化を量的に把握するために、ここでは堤体内に蓄えられている水を貯留水分と考える。観測データを測線ごとに単位面積を持つ土柱としてその貯留水分量を雨量に換算して表す。

$$S = (10/\rho_w) \sum \rho_{mi} h_i \quad (2)$$

S: 雨量で表した貯留水分量(mm), ρ_{mi} : 測点*i*における水分量(g/cm^3), h_i : 測点*i*が代表する土層の厚さ(cm). ρ_w : 水の密度(g/cm^3). 観測期間に堤体土が

比較的乾燥していた 95年9月6日における貯留水分量を基準値(0mm)とし、観測データから各測線の貯留水分量の変化を求め、図-15、図-16に示す。9月の台風による降雨量は 216mmであったが、各測線ではそれぞれ100~200mmの貯留水分量の増加が観測された。貯留水分量の増加量と降雨量の差は表面流出や測定時まで生じた土中水の移動によるものと考えられる。降雨後各測線における貯留水分量が同じ傾向で減少し、1月末にはほぼ台風前の水分量に戻った。ところが、WC2-1測線の貯留水分量の減少は遅く、1月末になお 100mm近い貯留水分量が残されていた。その原因を分析してみると、この測線付近の土には粘土分が比較的多く含まれているため流出が遅れたと考えられる。

FEMの解析で堤体全体の1年間にわたる水収支を計算してみた。その結果を図-17に示す。図からわかるように2月まで堤体内の貯留水分量は減少しているが、その後は梅雨期の7月上旬まで増加する。特に、5~6月には貯留水分量の上昇が顕著であった。夏に貯留水分量が急速に減少したが、9月の台風で再び上昇した。その後の水分は長期間にわたり緩やかな低減を示した。年間を通じて、貯留水分量に 400mmの差が見られた。

堤体内の貯留水分量は降雨のたびに増加し、その後低下するが、長い期間で見れば、堤防の貯留水分量に湿潤期間と乾燥期間が存在する。観測が行われた 1995年の後半期は降雨量が少なく年降雨量は 1200mmに留まった。関東地方の年平均降雨量は 1500mmであるので、堤防の湿潤期と乾燥期の貯留水分量の差は400mmより大きくなると推定される。

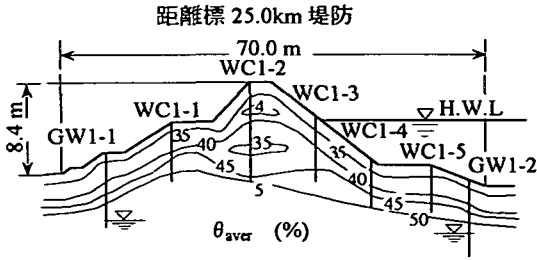


図-18 体積含水率の平均値の分布

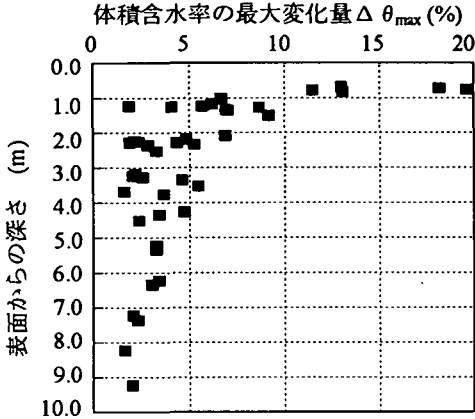


図-19 深さと体積含水率の最大変化量

7. 堤体土の水分量に影響する因子

堤防の安定性に堤体土の水分量が大きく影響するので、ここでは堤体土の水分量とその変化量について述べる。すでに述べたように堤体の水分量が多い時、浸透作用を受けると水の浸透が速く、堤防の安定性は低下しやすい。また、堤体土の水分変化量に影響するのは主に降雨、蒸発散などの気象的な要素であるが、堤体土の水分量は土の種類、堤防断面形状など個々の堤防が持つ特性に左右される。堤防の安定性評価には、これらの影響の検討も欠かせないものと考えられる。

(1) のり面表面からの深さと堤体土の水分量

堤体土の水分量の分布を表すため、観測期間内の体積含水率の平均値を求め、図-18に示す。等水分量線は堤防の表面にほぼ平行に分布しているが、深くなると地下水面に平行になる傾向が見られる。堤防の表面からは降雨浸透や蒸発散など生じ、水が流入、流出して堤体土の水分量を変化させる。堤体内部の土中水は地下水面を基準面とし、各点の全ポテンシャルが高さに比例するように分布しようとする。また地下水位付近以下では土はほぼ飽和しているが、高くなるに従って水分量は減少する。したがって表面付近は土の水分量が低く、地下水面に近づくと水分量は高くなる。そのゆえ、のり尻では地下水面が地表面に近く、水分量の深度方向の変化も大きい。

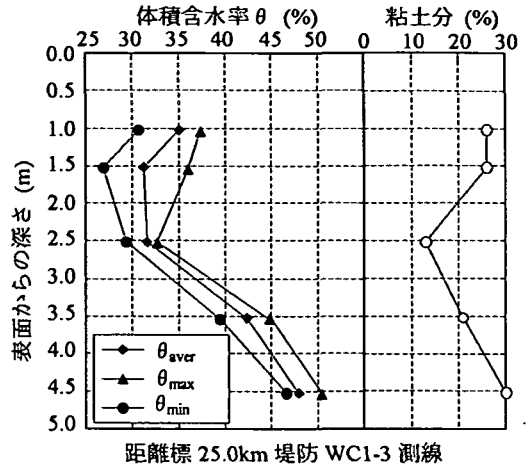


図-20 土の体積含水率と粒度の関係

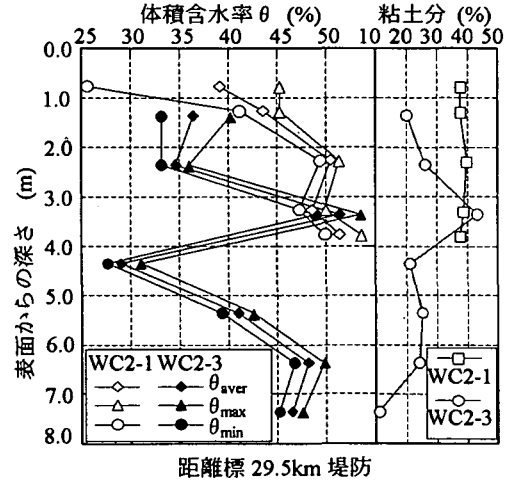


図-21 土の体積含水率と粒度の関係

それに反して堤防の中央部では地下水面と地表が離れているため、深度方向の水分量の変化も小さい。

観測期間における距離標 25.0km堤防の水分変化量の最大値と地表面からの深さの関係を図-19にプロットした。降雨浸透あるいは蒸発散による土の水分量の変化は表層では大きいですが、浸透作用を直接受けている地表面から離れている下部では水分変化量は減衰し、深いほど土の水分量の変化は小さくなる。

(2) 土の種類と水分量

堤体土の種類と水分量の関係を土の粒度分布に着目して分析した。土の粒度構成を砂分、シルト分、粘土分に分けて、それぞれの質量百分率と土の体積含水率の関係を調べた。その結果、粘土分の質量百分率が土の水分量を支配していることが分かった。図-20、図-21にはそれぞれの測線での水分量の観測データおよびボーリングデータにもとづき、粘土分と土の水分量の関係を示した。 θ_{aver} 、 θ_{max} 、 θ_{min} はそれぞれ観測期間内における体積含水率の平均値、最

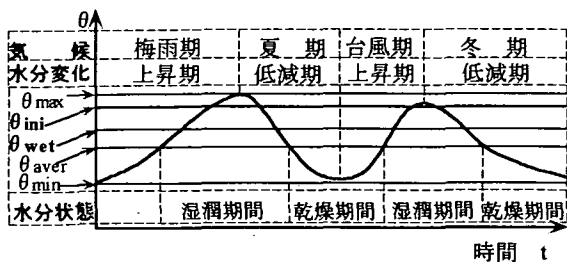


図-22 堤体土の水分量とその変化

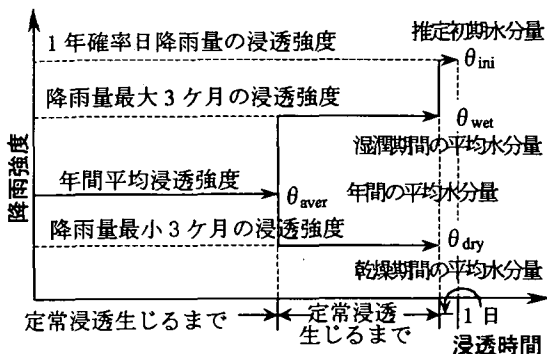


図-23 平均的な浸透強度による堤防の水分量の推定

大値、最小値である。全体的に見て堤体土の水分量は深さ方向に大きくなっていくが、粘土分の含有率が土の種類によって変わるため、その変化が土の水分量に大きく影響する、すなわち、粘土分の質量百分率が大きければ、体積含水率が大きくなる。図-20のWC1-3測線では深さ2.5m付近に粘土分の少ない土が局所的にあるため、体積含水率は小さくなっている。このように堤体土の水分量は土の粒度構成と密接な関連を持っている。

また土の粒度構成は水分変化量にも影響している。図-21に測線WC2-1とWC2-3の粘土分の質量百分率を示している。WC2-1測線の土は粘土分を40%近く占めているが、WC2-3測線において深さ3~4m付近の土を除けば、粘土分25%程度の土がほとんどであった。このため、図-16の測線WC2-1とWC2-3の貯留水分量の変化にかなりの差が生じている。粘土分の多い測線WC2-1の貯留水分量の低下が粘土分の少ない測線WC2-3より遅いのは、水分の流出が遅れるためである。

8. 長期的な水分量変化の概略値の推定

堤体土の水分量を長期的に見れば、大きく変動するのは表層付近である。深部の土は短期間の降雨よりも、長期間の気候条件に従って水分量は期間ごとに上昇または減少の傾向を繰り返す。また、堤防の深部での浸透は地表面の降雨あるいは蒸発散による影響が小さく、降雨量と蒸発散量の差の水分のみが下方へ流れる単一な浸透である。したがって、ある期間の降雨量から蒸発散量を差引いた浸透量にもと

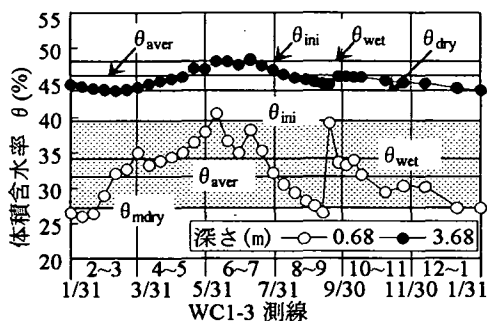


図-24 堤防の水分量の変化と推定水分量

づいた浸透強度の水を堤防表面から浸透させれば、水分量はほぼその期間の平均値になると考えられる。

観測データにもとづいて堤防の水分量の変動を考えてみる。図-22のように堤防には湿潤期間と乾燥期間があって最大値 θ_{max} と最小値 θ_{min} の間を変動している。そこで、ここではまず期間ごとの水分量の概略値の推定方法について述べる。続いて、浸透解析を行う場合の初期水分量 θ_{ini} の設定方法について一試案を示す。堤体の安定性を評価するとき、作用外力である豪雨および計画洪水を定め、浸透解析を行うが、この場合初期水分量 θ_{ini} の値が結果に大きな影響を与えるからである。推定はいずれもFEM解析を用いて行っている。

水分量の年間平均値 θ_{aver} については図-24のように年間の降雨量と蒸発散量の差を求め平均浸透強度を算出する。関東地区では年間降雨量を1500mm、蒸発散量を600mmと考えれば、浸透強度は概ね2.5mm/dayとなる。この浸透強度で浸透が継続し、定常になったときの値を年間平均値 θ_{aver} と考える。次に、湿潤期間の水分量については、水分量の増減が概ね3ヶ月ごとに繰り返されているので、降雨量の多い連続3ヶ月間の平均浸透強度で浸透が継続し定常になったときの水分量を湿潤期間の平均水分量 θ_{wet} と考える。同様に降雨量の少ない3ヶ月の平均浸透強度で乾燥期間の水分量の平均値 θ_{dry} を求める。

図-24は観測堤防に対して試算した結果をWC1-3の測線について表したものである。図には詳細な日降雨量、蒸発散量にもとづいた浸透解析によって求めた水分量の変化を表しているが、年間水分量の平均値 θ_{aver} 、湿潤期間の平均値 θ_{wet} 、乾燥期間の平均値 θ_{dry} は上記の推定法によって求めた値である。その他の深度および測線においても概ね同じ結果が得られている。

次に浸透解析用いる初期含水量 θ_{ini} については、解析結果として安全側の評価になるよう、湿潤期の平均値 θ_{wet} よりさらに大きな水分量を考える。

図-24からも分かるように降雨量の多い3ヶ月の平均浸透強度による浸透では表層部の水分量が高い値にならないため、さらに強い浸透を付加することにした。いろいろな浸透強度と継続時間に対して試算を繰り返した結果、1年確率日降雨量を24時間平均して浸透させた場合、 θ_{max} に近い値になることが確

かめられたので、図-23に示すような手順によって θ_{in} を求めることをここでは提案したい。1年確率日降雨量、言い換えれば1年に1回程度の頻度で起こる大雨は東京付近では100mm/日弱の降雨量である。

9. 結論

実堤防の水分観測と FEM 浸透解析を行って、長期間にわたる堤防への浸透現象の解明に努めた。特に、豪雨、洪水時の浸透問題を解くための初期条件になる土の水分量およびその変化について検討した。得られた主な結論は、以下のようになる。

- (1) 降雨の浸透による浸潤前線の進行と土の水分変化は堤防の初期水分量に大きな関連を持っている。水分量の低い状態では、表層には大きな水分量の増加が見られるが、浸潤前線の進行は遅い。湿潤な状態では水分変化量が小さいが、浸潤前線の進行が速く、堤防のり尻には早期に飽和領域が形成され、堤防の安定性は低下しやすい。
- (2) 長期的な堤防の水分量の変動は降雨浸透のみならず、その後の蒸発散や水分の再分配に左右される。降雨による水の浸透は早期に堤体土の水分量を増加させるが、水分低減はゆっくり進み期間も比較的長い。連続した雨の浸透は堤防全体の水分量を増加させる。
- (3) 堤体土の水分変化は表層部分に大きい下部へ行くに従い変動幅は縮小する。深層の水分量は季節的な気象条件に従って周期的に変動を繰り返す。
- (4) 堤防における水分量には増加期と低減期が見られる。関東地方のような気候条件では降雨量の多い梅雨期、台風期に水分量が増加する。逆に、雨が比較的少ない夏季と冬季には、水分量が減少する。
- (5) 堤体内に貯留される水分量は湿潤期間と乾燥期間には大きな差がある。その差を雨量に換算すると、観測を行った 1995 年では 400mm に達した。この年の降雨量が少なかったことを考えれば、さらに大きな差が生じることが推定される。
- (6) 堤体土の水分分布は一般にのり面表面と地下水面の高さに影響され、表面に近い土の水分量は低く、地下水位に近づくほど、水分量は増加する。また、土の粒度構成によって水分量は異なり、一般に粘土分の多い土の水分量は高い。

(7) 降雨、洪水の浸透に対して初期の水分量の状態すなわち初期条件の相異の影響は大きい。長期的に堤防の水分量は大きく変動するので、適切な初期条件での検討が必要である。簡易的な方法で堤防の最大水分量を推定し、浸透解析の初期条件として用いるのも 1 方法と考えられる。

謝辞：本研究に際して、現場観測の場所を提供していただいた建設省江戸川工事事務所、解析にあたり貴重なご指導をいただいた東洋大学工学部環境建設学科の石田哲朗助教授、また、現場測定に始終協力を惜しまなかった本学修士 2 年生の浜島浩美君に厚く感謝する。なお、本研究は (財) 河川環境管理財団より河川整備基金の助成を受けて実施したものであることを付記し感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 八木則男, 矢田部龍一, 榎明深: 降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量, 土木学会論文集, 第418号/III-13, pp.65-73, 1990.
- 2) 杉井俊夫, 宇野尚雄, 亀井雄介: 浸透解析における降雨浸透の取り扱い方について, 不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集, pp.147-150, 1993.
- 3) 朱偉, 山村和也: 河川堤防の安定性に及ぼす事前降雨の影響, 土木学会第 49 回年次学術講演会発表論文集 III, pp.228-229, 1994.
- 4) 朱偉, 山村和也: 複合した浸透作用が堤防のり面の安定性に及ぼす影響, 第 30 回土質工学研究発表会講演集, pp.1845-1846, 1995.
- 5) (社) 地盤工学会: RI による土の密度試験, 地盤調査法, pp.420-432, 1995.
- 6) (財) 国土開発技術研究センター: 実物大堤防降雨浸透実験結果, 1986.
- 7) Neuman, S.P.: Saturated-Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc., ASCE HY, Vol. 99, No.12, pp.2233-2250, 1973.
- 8) 竹下祐二, 河野伊一郎: 不飽和浸透特性の推定方法とその適用について, 地盤と建設, Vol.11, No.1, pp.95-113, 1993.
- 9) 建設産業調査会: 日本の水収支, 地下水ハンドブック, pp.20-22, 1979.
- 10) Philip, JR.: The Theory of Infiltration, Soil Sci., Vol. 83, pp.345-357; Vol. 84, pp.163-177; pp.257-264; pp.329-339; Vol. 85, pp.278-286; pp.333-337, 1957.
- 11) Green, W.H. & Ampt, G.A.: Studies on Soil Physics, 1, The Flow of Air and Water Through Soils, J. Agr. Sci., 4, 1-24, 1911.

(1996. 8. 29 受付)

LONG RANGE VARIATIONS OF WATER CONTENT OF SOILS IN RIVER EMBANKMENTS

Wei ZHU and Kazuya YAMAMURA

Seepage flow caused by heavy rain and flood is directly related to the slope stability of river embankment. Water content of soils in embankment fluctuates from day to day by the action of infiltration, evapotranspiration and the change in the water level of river and ground water. Seepage flow in the embankment is influenced very much by the water content of soils at the beginning, namely initial conditions. It is necessary to make clear the long range variations of water content of soils for analyzing the seepage flow and evaluating the stability of the embankments. The long term field observations of water content of soils with RI moisture meter have been carried out.

Through the results of observations together with seepage analyses periodic variations in water content of soils and specific features of moisture movement in the embankment are investigated.