

# 雨水貯留浸透施設の計画・評価手法

## —九州大学新キャンパス建設地を対象として—

### TECHNIQUE OF PLANNING AND EVALUATION OF THE FACILITIES OF RAINWATER STORAGE AND INFILTRATION — AT THE NEW CAMPUS OF KYUSHU UNIVERSITY —

南 健太<sup>1</sup>・新井田 浩<sup>2</sup>・神野健二<sup>3</sup>・堤 敦<sup>4</sup>・

広城吉成<sup>5</sup>・下大迫博志<sup>6</sup>・濱里 学<sup>6</sup>・泉谷隆志<sup>6</sup>

Kenta MINAMI, Hiroshi NIIDA, Kenji JINNO, Atsushi TUTUMI

Yoshinari HIROSHIRO, Hiroshi SHIMOOSAKO, Manabu HAMAZATO and Takashi IZUMIYA

- <sup>1</sup>学生会員 九州大学大学院 工学府都市環境システム専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1 )  
<sup>2</sup>正会員 九州大学大学院助教授 新キャンパス計画推進室 ( 同 上 )  
<sup>3</sup>正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境システム科学研究センター ( 同 上 )  
<sup>4</sup>正会員 九州大学大学院工学研究院博士課程 (後期) ( 同 上 )  
<sup>5</sup>正会員 博士 (工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門 ( 同 上 )  
<sup>6</sup>正会員 八千代エンジニアリング (株) 九州支店 (〒810-0062 福岡市中央区荒戸2-1-5大濠公園ビル)

Change in the land use induces the reduction of rainwater infiltration and the increase of surface runoff. It is therefore important to minimize the influence of land use alteration on the infiltration and river discharge. In this research, the facilities of rainwater storage and infiltration for groundwater conservation was planned at the University of Kyushu, and the time series of infiltration of the facilities was calculated by the set of the water balance equations. From this study, the ability of the facilities for rainwater infiltration and flood control was proven. It is expected that the present approach could be useful for designing the facilities of rainwater and infiltration.

**Key Words :** *groundwater conservation, rainwater infiltration, surface runoff, facilities of rainwater storage and infiltration*

## 1. はじめに

流域の水循環系を健全な状態で保全していく上で、開発行為等の流域の改変が降水の浸透・流出過程に与える影響を適切に評価し、開発等による影響を最小限に抑えていくことが重要である。雨水の蒸発散、貯留・浸透、流出のメカニズムをモデル化し、浸透量や流出量を定量化する研究<sup>1)</sup>はこれまでも数多く取り組まれてきており、現在においてもモデルの改良・汎用化に向けた研究<sup>2), 3)</sup>が進められている。また、開発等による雨水浸透量の減少対策として、貯留浸透施設の計画・評価手法<sup>4)</sup>も確立しつつあり、上記の定量化に関する研究成果と合わせて、実流域への適用も試みられている<sup>5)</sup>。

本稿では、これらの成果を参考にしつつ、九州大学で

現在進められている統合移転事業 (新キャンパスの建設事業) を対象とした洪水流出抑制対策<sup>6)</sup>や地下水保全対策<sup>7)</sup>の中で検討された雨水貯留浸透施設の配置計画及び効果に関して、そのプロセスや計算手法を示す。

具体的には、新キャンパス (275ha) に設置されている3号調整池の集水域を対象として、地下水保全を目的とした空隙貯留浸透施設の配置及び施設規模を地下水涵養モデル<sup>8) ~11)</sup>及び貯留・浸透モデルにより検討するとともに、これらを含む雨水貯留浸透施設が洪水の流出抑制に対して及ぼす効果を推定した。

## 2. 対象流域の概要

対象流域 (面積 約 22ha) の概要を図-1 に示す。

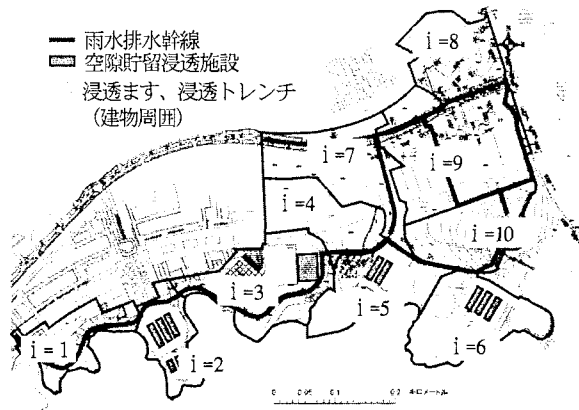


図-1 3号調整池流域の概要

以前は雑木林を主体とした土地利用であったが、現在は造成がなされ、工学系の研究教育棟、理系図書館、給水センターなどが整備中である。将来的には全学教育施設や研究博物館、事務局庁舎などが整備される予定で、建物用地だけでも対象流域の3割近くに及ぶ。流域内には洪水流出抑制施設として容量53,000m<sup>3</sup>の調整池が設置されている。また、地盤の透水係数は現場の浸透試験により確認した結果、10<sup>-5</sup>~10<sup>-4</sup> (cm/sec) であり、比較的透水性の低い地盤となっている。

### 3. 雨水貯留浸透施設の配置方針

雨水貯留浸透施設としては、浸透ます、浸透トレンチ(側溝含む)、透水性舗装および空隙貯留浸透施設を対象とした。施設配置に当たっては、浸透量が減少する場所のできる限り近傍でこれを回復することを基本とした。雨水浸透を阻害する建築物、駐車場、運動施設等の排水施設については、浸透ます及び浸透トレンチを用いることを原則とし、駐車場の仕上げは透水性舗装とした。なお、新キャンパス内の幹線道路は、路線バスを含めてかなりの交通量が想定されることから、水質面での悪影響を考慮して浸透対策の対象域から除外した。

空隙貯留浸透施設については、上記の浸透ます、浸透トレンチを設置しても開発前に対してなお浸透量が不足する場合に設置することとし、設置場所は広場や駐車場、屋外運動施設などの地下を想定し、設置規模は対象流域全体の浸透量が開発前と同等となるよう、以下の計算手法を用いて試行錯誤的に検討した。

### 4. 計算手法

#### (1) 地下水涵養モデルを用いた表面流出量の算定

対象降雨には、1999年に新キャンパス敷地内で観測された10分単位の降雨データをそれぞれ10等分して作成した1分単位の降雨データを用いた。表面流出量は、上

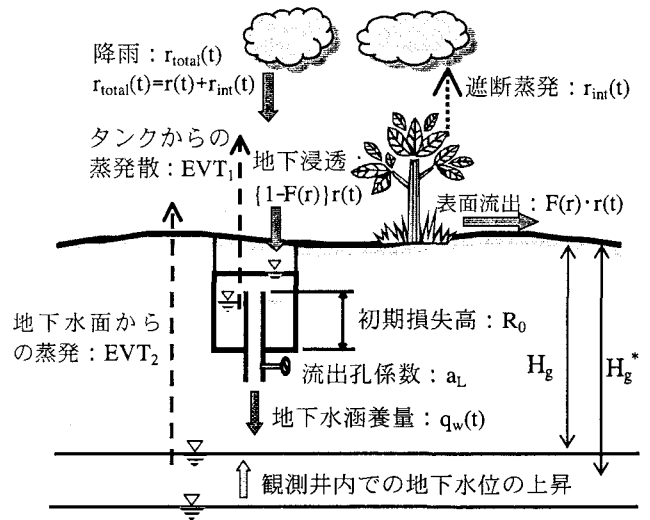


図-2 地下水涵養モデルの概念

表-1 土地利用に応じた表面流出率

| 対象土地利用 | 表面流出率 $F_{\infty}$ |
|--------|--------------------|
| 道路     | 0.8                |
| 緑地・法面  | 0.3                |
| 畑      | 0.2                |
| 建物用地   | 1.0                |
| 運動施設   | 0.6                |
| 駐車場    | 0.8                |
| 透水性舗装  | 0.4                |
| 山地     | 0.3                |

記の降雨データを地下水涵養モデル<sup>8)~11)</sup>に代入することにより算出した。地下水涵養モデルの概要を図-2に示す。

ここで、表面流出量は(1)式で表現することとし、土地利用に応じた表面流出率( $F_0$ )は、技術資料<sup>12)</sup>を参考に表-1のように設定した。その他、地下水涵養モデルに関する定数等の設定方法は堤らの文献<sup>8)~11)</sup>を参照されたい。

$$q_d(t) = \frac{1}{3.6} A \times r(t) \times F(r) \quad (1)$$

ここで、

$$r(t) = r_{total}(t) - r_{im}(t)$$

$$F(r) = \frac{r(t)}{r(t) + r_{1/2}} F_{\infty}$$

$q_d(t)$ : 表面流出量(m<sup>3</sup>/s)

$A$ : 流域面積(m<sup>2</sup>)

$r(t)$ : 地表面での降雨強度(mm/hr)

$r_{total}(t)$ : 全降雨強度(mm/hr)

$r_{im}(t)$ : 遮断蒸発強度(mm/hr)

$F(r)$ : 表面流出率

$F_{\infty}$ :  $F(r)$ の漸近値

$$r_{1/2}: F(r) = \frac{1}{2} F_{\infty} \text{の時の } r(t)$$

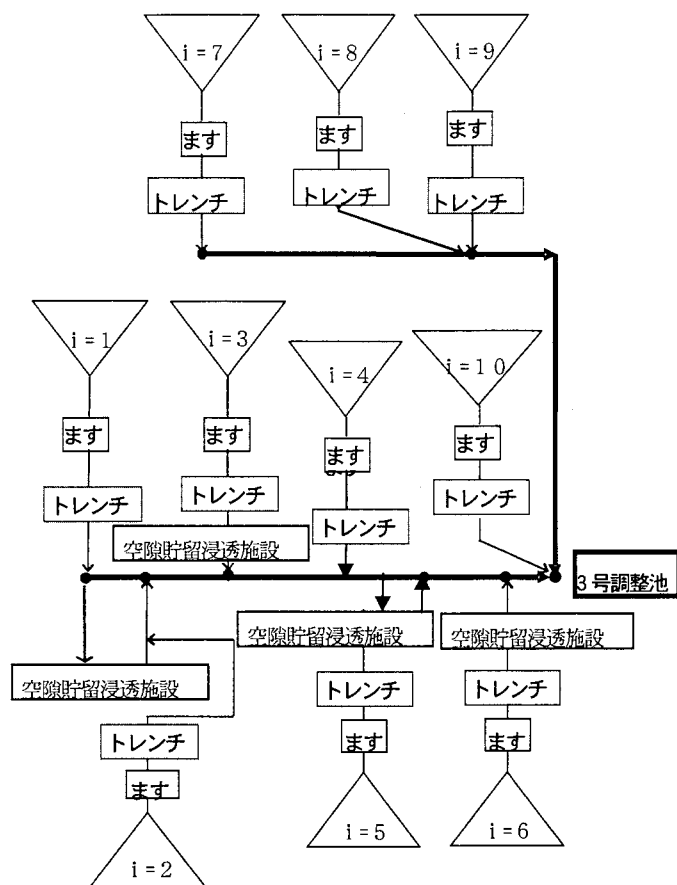


図-3 流域システムモデル図

## (2) 流出システムのモデル化

3号調整池流域を地形や建物配置、雨水排水区等を考慮しながら10の単位流域に分割し、単位流域ごとに、雨水貯留浸透施設の配置を考慮した流出経路を想定して流出システムモデルを作成した。流出システムモデルを図-3に示す。ここで、貯留・浸透解析の簡便化を図るために、浸透ます及び浸透トレンチは単位流域ごとに集約してモデル化し、建物等からの排水は集約化された浸透ます、浸透トレンチを経由して空隙貯留浸透施設に流入させ、ここからの越流水が雨水排水幹線水路を経て調整池に流入することとした。駐車場などに敷設される透水性舗装は、技術資料<sup>12)</sup>を参考に、表面流出率の補正(0.8→0.4)として考慮することとしたため、流出過程としては特段の取り扱いはない。

流出形態としては、雨水貯留浸透施設間の流水移動も含めて、単位流域から幹線排水路までの流出は時間遅れなしの同時発生とし、幹線排水路から3号調整池までは、幹線排水路内の流速を1.5(m/s)と仮定して流路延長に応じた時間遅れを考慮することとした。

## (3) 雨水貯留浸透施設による浸透量等の計算手法

雨水貯留浸透施設による浸透量等の計算は、雨水浸透施設技術指針(案)における貯留浸透モデル<sup>4)</sup>を用いて

表-2 比浸透量算出にあたってのパラメータ

|          | A                | b                         | c                                  |
|----------|------------------|---------------------------|------------------------------------|
| 浸透ます     | 0.120W<br>+0.985 | 7.837W+0.82               | 2.858W-0.283                       |
| 浸透トレンチ   | 0                | 3.093                     | 1.34W+0.677                        |
| 空隙貯留浸透施設 | 0                | 3.297L+(1.971W<br>+4.663) | (1.401W+0.684)L+<br>(1.214W-0.834) |

W: 雨水貯留浸透施設の施設幅(m)

L: 雨水貯留浸透施設の施設延長(m)

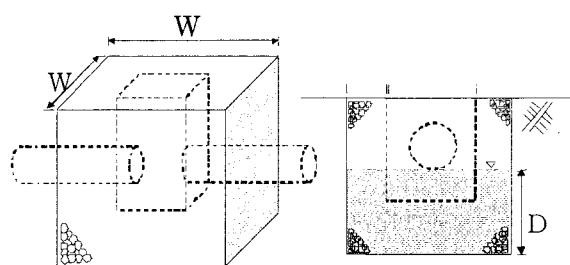


図-4 雨水貯留浸透施設の諸元(浸透ますの場合)

行った。以下にその概要を述べる。

### a) 雨水貯留浸透施設の比浸透量

比浸透量( $K_f$ )とは、雨水貯留浸透施設からの単位浸透量を土壌の飽和透水係数で除した値であり、含水率などの土壌物性が異なっても、施設の形状や施設内水深が同じであれば、ほぼ同一の値をとることが確認されている。比浸透量は施設内水深を $h$ として(2)式により表現され、施設ごとのパラメータ(a, b, c)は表-2のとおりである<sup>4)</sup>。

$$K_f(h) = ah^2 + bh + c \quad (2)$$

ここで、本研究では浸透ますとして $W=1$ の正方形ますを、浸透トレンチとして $W=0.6$ を採用することとした。また、空隙貯留浸透施設については設置場所ごとに必要浸透量を確保するための最小規模として求めた大きさをを用いている。

また、それぞれの施設に対して、排水管の敷設高さを考慮した施設内水深の上限値(越流水深)を与えることとし、浸透ますについては0.55m、浸透トレンチについては0.35m、空隙貯留浸透施設については1.0mとした。浸透ますの場合を例に施設の諸元を図-4に示す。

### b) 浸透量等の計算手法

浸透ます、浸透トレンチ、空隙貯留浸透施設それぞれの浸透量は(3)式により算定される<sup>4)</sup>ことから、各施設の流入・流出に関する連続式(4)及び(4)'式と組み合わせることにより、各施設の施設内水位、浸透量を算出した。

$$q_{inf}(h) = mCK_0K_f(h) \quad (3)$$

表-3 単位流域における雨水貯留浸透施設の規模

| 流域 | 浸透ます<br>(基) | 浸透<br>トレンチ<br>(m) | 透水性<br>舗装<br>(m <sup>2</sup> ) | 空隙貯留<br>浸透施設<br>(m <sup>3</sup> ) |
|----|-------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| ①  | 10          | 143               | 0                              | 0                                 |
| ②  | 17          | 235               | 0                              | 400                               |
| ③  | 35          | 373               | 1,350                          | 300                               |
| ④  | 52          | 733               | 1,250                          | 0                                 |
| ⑤  | 34          | 488               | 1,250                          | 400                               |
| ⑥  | 47          | 654               | 0                              | 300                               |
| ⑦  | 9           | 122               | 0                              | 0                                 |
| ⑧  | 31          | 423               | 0                              | 0                                 |
| ⑨  | 94          | 1,310             | 1,250                          | 0                                 |
| ⑩  | 9           | 128               | 0                              | 0                                 |
| 合計 | 329         | 4,609             | 5,100                          | 1,400                             |

表-4 開発前後の水収支

| 収支項目                    | 開発前     | 開発後     |         |
|-------------------------|---------|---------|---------|
|                         |         | 対策なし    | 対策あり    |
| 降水量(m <sup>3</sup> /年)  | 355,088 | 355,088 | 355,088 |
| 蒸発散量(m <sup>3</sup> /年) | 125,163 | 92,015  | 92,197  |
| 浸透量(m <sup>3</sup> /年)  | 186,396 | 126,595 | 187,443 |
| 透水性舗装                   | 0       | 0       | 2,450   |
| 浸透ます                    | 0       | 0       | 10,385  |
| 浸透トレンチ                  | 0       | 0       | 27,623  |
| 空隙貯留<br>浸透施設            | 0       | 0       | 20,390  |
| 施設小計                    | 0       | 0       | 60,848  |
| その他緑地等                  | 186,396 | 126,595 | 126,595 |
| 流出量(m <sup>3</sup> /年)  | 43,529  | 136,478 | 73,426  |

$$n_e m A \frac{dh}{dt} = -q_{inf}(h) + q_{in}(t) \quad (h < D) \quad (4)$$

$$0 = -q_{inf}(D) + q_{in}(t) - q_{out}(t) \quad (h \geq D) \quad (4)'$$

ここで、

$q_{inf}$ : 施設の浸透量(m<sup>3</sup>/s)

$m$ : 単位流域内の施設延長、基数

$C$ : 目詰まり等による影響係数(0.81)

$K_0$ : 地盤の透水係数(m/s)

$K_f$ : 施設の比浸透量(m<sup>2</sup>)

$n_e$ : 施設の空隙率

$A$ : 施設の面積(m<sup>2</sup>)

$h$ : 施設内水深(m)

$q_{in}$ : 施設への流入量(m<sup>3</sup>/s)

$q_{out}$ : 施設からの流出量(m<sup>3</sup>/s)

$D$ : 施設の越流水深(m)

なお、雨水貯留浸透施設を介した貯留・浸透・流出解析は、小流域での洪水対策に用いられる場面が一般的である。この場合には施設によるピーク流出量の低減効果に関心事となるため、施設内水深を設計水深として一定値に置いて各施設の基準浸透量を求め、これを洪水期間中の全ての時間帯において流出ハイドログラフから差引くなどの計算手法をとるケースが多いようである。

一方本研究は、あくまで雨水浸透量に着目した施設計画を目的としているため、洪水期間中のみならず年間を通じた浸透量の算定が必要であり、(3)～(4)'式を解くにあたって施設内水深( $h$ )を一定値ではなく時間の関数として取り扱っている。

雨水貯留浸透施設における浸透量等の計算は、まず(1)式により単位流域ごとの流出量を算出し、これを浸透ますに対する初期流入量として与え、(3)～(4)'式を用いて浸透ますによる浸透量及び浸透ますからの越流量を算出

する。次に、浸透ますからの越流量を浸透トレンチへの流入量として与え、浸透ますの場合と同様に浸透トレンチによる浸透量及び越流量を算出する。さらに、浸透トレンチからの越流量を空隙貯留浸透施設への流入量として与え、空隙貯留浸透施設による浸透量及び越流量を算出し、最後に3号調整池の流入口において、各単位流域からの流出ハイドログラフを重ね合わせる。ここで、図-3に示すように空隙貯留浸透施設には浸透トレンチからの流入の他、幹線排水路からの取込みも想定しているため、時間遅れを考慮した取込み口での幹線排水路流量も空隙貯留浸透施設への流入量として加算している。

実際の計算にあたっては、(4)式の両辺に未知量が含まれているため、陰解法を用いることとした。(4)式を差分化して右辺にまとめてこれを $f(h)$ とすると(5)式となる。これを、時間ステップを1分としてニュートンラプソン法<sup>13)</sup>を用いて、 $f(h) < 10^{-7}$ となるまで収束計算し、 $h(t)$ を求めた。

$$f(h) = \frac{K_0 \times \Delta t \times K_f(h(t))}{n_e \times A} - \frac{q_{in} \times \Delta t}{m \times n_e \times A} + h(t) - h(t-1) \quad (5)$$

なお、 $h(t)$ の算出にあたって、 $K_f(h(t-1))$ を用いた

陽解法も試みたが、計算期間(1年間)における水収支に800m<sup>3</sup>もの誤差を生じたため、解法として不適であった。

## 5. 雨水貯留浸透施設による地下水涵養効果

上記の計算手法を用いて、開発前の雨水浸透量を満足するための空隙貯留浸透施設の規模を求めた。貯留浸透施設以外の浸透施設は「3. 雨水貯留浸透施設の配置方針」に従って建物周囲等に配置した。施設種別ごとの施設量を表-3に、開発前後での水収支を表-4にそれぞれ示す。ここで、流出量とは降水量から蒸発散量及び雨水浸透量を差引いた量であり、3号調整池への流入量を意

図-5 3号調整池流入量等

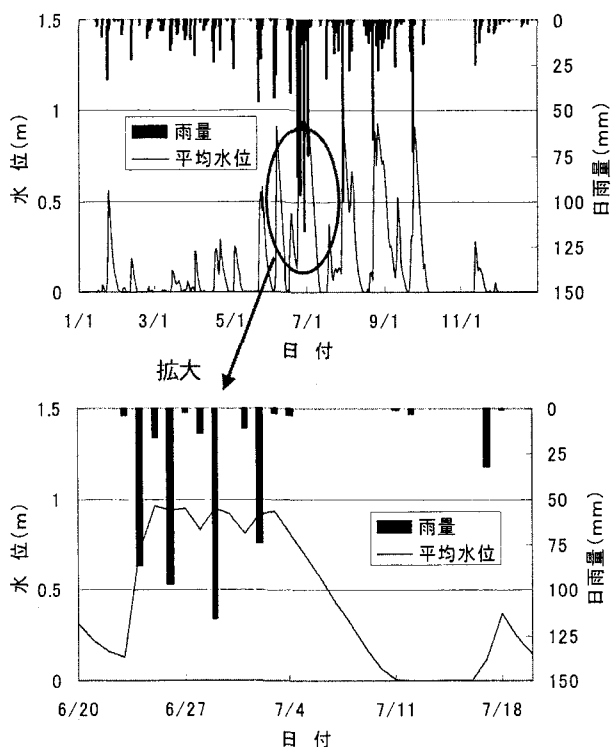
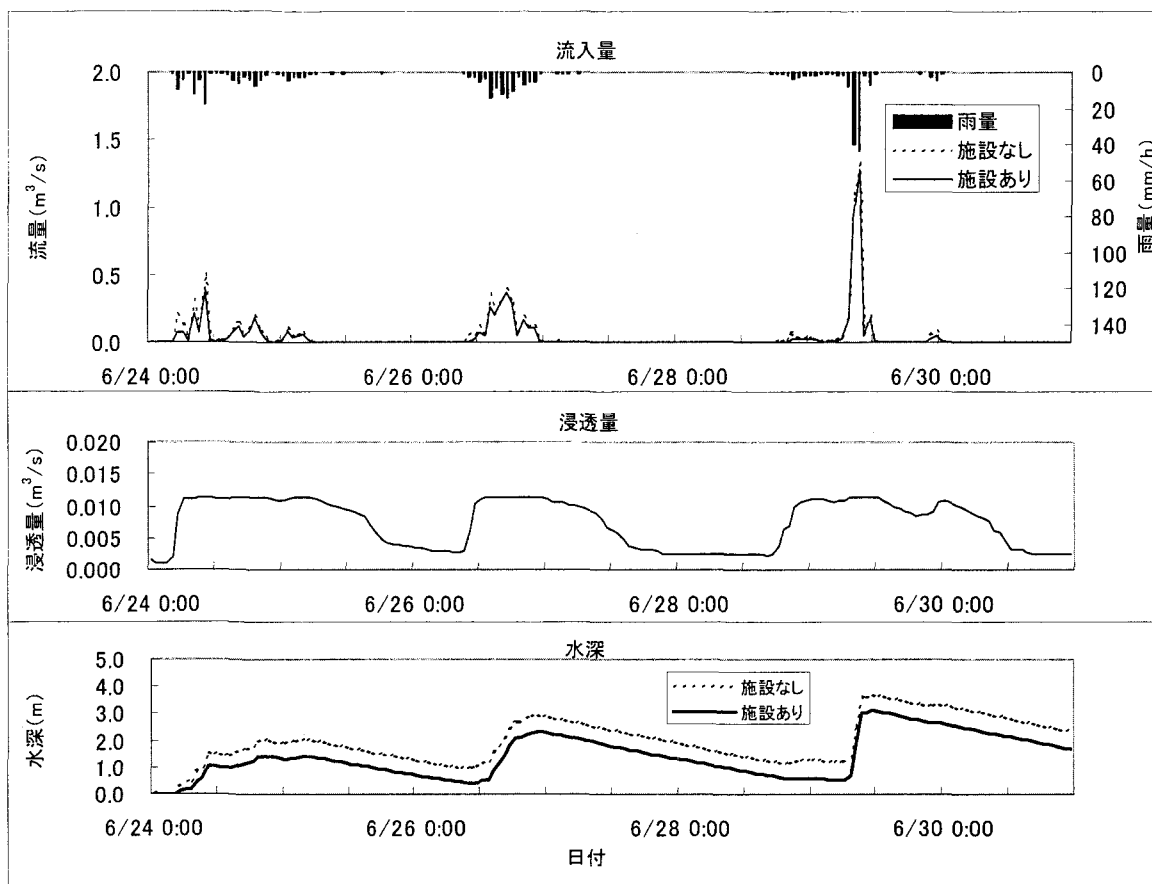


図-6 空隙貯留浸透施設内の平均水位

味している。計算結果では、雨水貯留浸透施設による浸透量は開発前浸透量の約 1/3 に相当すると推定された。特に、施設による浸透量のうち空隙貯留浸透施設による浸透量が 3 割以上を占めており、浸透ますや浸透トレ

チによる降雨時の浸透だけでは不十分であり、所要の浸透量を確保するためには、降雨後に施設における貯留分を一定の時間をかけて浸透させる必要があることが明らかとなった。これは、新キャンパス周辺の地盤透水係数が  $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$  オーダーであり、関東ローム層や沖積地の透水係数に比較してかなり小さい値であるためと考えられる。

## 6. 雨水貯留浸透施設による洪水流出抑制効果

雨水貯留浸透施設による洪水流出抑制効果の評価は、3 号調整池への流入量及び水位変化により行った。検討対象期間のうち、最大流量を記録した洪水 (6/29 洪水) を含む期間の 3 号調整池への流入量、雨水貯留浸透施設による浸透量、及び調整池内水深の変化を図-5 に示す。調整池への流入量については、無降雨若しくは小雨の期間が長く続いた後の洪水に対しては雨水貯留浸透施設による流量低減効果があるものの、無降雨期間が短い連続的な洪水に対してはほとんど効果がない結果となった。これは、雨水貯留浸透施設による浸透量の合計が最大でも  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$  程度であり、調整池への流入量に比較して数%と小さく、実質的に施設による貯留効果が流出抑制に寄与することとなるが、間隔の短い連続的な降雨に対しては施設の排水 (浸透) が追いつかず、貯留効果が十分に発揮されないためと考えられる。施設の貯留効果を

空隙貯留浸透施設の平均水位で説明したものが図-6 である。ここで、平均水位とは、対象流域内の各空隙貯留浸透施設における日平均貯留量の合計量を全施設面積で除した値であり、施設の越流水深である 1.0m を最大値としている。降雨期間中はかなりの頻度で平均水位が高い状態が出現しており、特に最大洪水時には、6/24 の日雨量 86mm 程度で空隙貯留浸透施設がほぼ満杯状態となり、以降 7/3 頃までこの状態が続いている。それ以降は徐々に施設内水位が低下しているが、施設内の雨水が全て浸透するまでには 1 週間以上の期間を要する結果となったことから、空隙貯留浸透施設の容量に対して 100% の貯留効果を期待するためにはこれ以上の無降雨期間が必要であると言える。なお、施設が有効に機能するための無降雨期間の長さは、地盤の透水係数や施設規模、降雨強度などにより規定されるものと考えられる。

一方、調整池の水深変化では、雨水貯留浸透施設によってピーク水深が 16% 程度減少しており、施設による一定の効果が確認できる。ただし、これは 6/24 洪水において現れた効果が、その後の水深変化に影響している結果であり、6/24 以降の洪水における水深上昇量は施設の有無で差がほとんどない。

しかしながら、治水施設の計画にあたっては、一定の降雨継続時間（1 日～2 日程度）内の計画降雨に対して施設規模を設定することが通常であり、調整池のような貯留施設については洪水前に治水容量が 100% 確保されていることが計画の前提であることを考えると、表面流出量の約 45% を浸透させ、洪水前の調整池水位をできるだけ低く抑えるという雨水貯留浸透施設の役割は、調整池計画を担保する観点からも重要な役割と言えよう。

## 7. 結論

本稿では九州大学新キャンパスの 3 号調整池流域において雨水貯留浸透施設を配置した場合の地下水涵養効果と洪水抑制効果を検討した。結果として以下の点が明らかとなった。

- (1) 地盤の透水係数が小さい地域の浸透対策においては、大きな貯留機能を有する空隙貯留浸透施設が有効であり、開発による雨水浸透量の減少を回避するためには、当該施設の設置が不可欠である。
- (2) 地盤の透水係数が小さい地域においては、地下水保全のために計画した雨水貯留浸透施設の施設量では、流出量の低減への寄与は微量であり、これらを洪水流出抑制施設として考慮することは困難である。
- (3) 許容放流量が小さい調整池を流出抑制対策として用いる場合には、洪水前の調整池水位を低く抑えることに寄与する雨水貯留浸透施設の役割が重要である。

また、雨水貯留浸透施設は、我が国の高度経済成長期以降における都市化の中で、洪水時の流出増大や平常時

の河川流量の減少といった形で顕在化した水循環系の歪みを再生するための有力な手段として注目され、施設の機能評価や技術開発などが進められてきたが、実際の導入現場においては、洪水の流出抑制に着目した計画・評価が一般的であった。このような中で、本稿で示した地下水保全に着目した雨水貯留浸透施設の計画・評価アプローチは新しい試みと言える。今後は、湧水や河川流量の回復、持続的な地下水利用などを含めた水循環系の保全・再生の観点から、本研究成果が広く活用されることを期待している。

## 参考文献

- 1) 都市河川小流域における雨水浸透、流出機構の定量化解明研究会：都市域における水循環系の定量化手法、2000。
- 2) 木内豪，賈仰文，戸嶋光映，吉谷純一，倪广恒：農地と都市が混在する流域における WEP MODEL を用いた水循環解析，水工学論文集，第46巻，pp.283-288，2002。
- 3) 天口英雄，安藤義久：SMPTモデルを用いた分布型水循環モデルの改良について，水工学論文集，第46巻，pp.265-270，2002。
- 4) (社)雨水貯留浸透技術協会：雨水浸透施設技術指針（案）調査・計画編，1995。
- 5) 例えば，住宅都市基盤整備公団首都圏開発本部，（財）リバーフロント整備センター：八王子ニュータウン水循環保全システム基本計画報告書，1991。
- 6) 新井田浩，神野健二：特定都市河川浸水被害対策法制定の意義と，これを踏まえた総合的な治水対策立案への試み，土木学会誌，第89巻第7号，pp.69-72，2004。
- 7) 新井田浩，神野健二，広城吉成：地下水保全のための雨水貯留浸透施設の計画－九州大学新キャンパス建設地を対象として－，水循環 貯留と浸透，54号，印刷中，2004。
- 8) 堤敦，神野健二，大枝良直：地下水位上昇期の観測値を用いた雨水の涵養モデル検討，水工学論文集，第45巻，pp.367-372，2001。
- 9) 堤敦，神野健二，森牧人：雨水涵養モデルによる準3次元地下水流動解析と流域の水収支評価，水工学論文集，第46巻，pp.187-192，2002。
- 10) 堤敦，神野健二，森牧人，広城吉成：遮断降雨を考慮した雨水の地下水涵養モデル，水工学論文集，第47巻，pp.277-282，2003。
- 11) 堤敦，神野健二，森牧人，広城吉成：表流水-地下水系水循環機構の解析－九州大学新キャンパス建設地を対象として－，土木学会論文集 No.747/Ⅱ-65，pp.29-40，2003。
- 12) 文部科学省大臣官房文教施設部技術課：土木設計資料，p.47，2001。
- 13) 小国力：Fortran 95，C & Java による新数値計算法－数値計算法とデータ分析－，pp.23-24，1997。

(2004. 9. 30 受付)