

超過降雨を考慮した雨水排除施設の検討 Design of Urban Stormwater Drainage for Extreme Rainfall Events

木内 豪*, 栗城 稔**

By Tsuyoshi KINOUCHI and Minoru KURIKI

It has been a great concern to minimize flood damage in the event of extreme rainfall beyond design level. In this paper, a structural method is presented with the concept that the urban drainage system must work properly to exclude stormwater in case of design rainfall events, while it should detain stormwater for a while to disperse inundation and reduce peak discharge into a receiving river in the event of extreme rainfall. To realize the concept, the hydrological effect of road detention and associated inlet structure are investigated.

The hydraulic function of the inlet, which comprises three phases of outflow depending on the water stage in front of the inlet, is modeled and numerical simulations are carried out to see its hydrological effect. The results showed that transversal road slope, length and the inlet configuration influence the efficiency of the road detention, and that it reduces outflow to 1/3 of incoming flow. The synthetic effect of road detention on runoff reduction is also computed in a small urbanized watershed using a distributed flow routing model.

Key words: Storm drainage, Extreme rainfall, Road detention, Inlet structure

1. はじめに—超過降雨を考慮した雨水排除システムの提案

都市雨水の面的排水機能を受持つ下水道や排水路は限られた規模の降雨を対象にその整備が計られている。その規模は一般に5年から10年であり、これをこえる規模の降雨（以下、超過降雨と呼ぶ）があった場合には浸水が生じたり、予想以上の流量を下流に放出することになる。都市雨水排除システムは計画規模以下の降雨を完全に排水するものであるが、超過降雨に対しては、例え浸水が生じてもその範囲を分散させて被害の総額を最小にするように機能することが望ましい。このような超過降雨を考慮した雨水排除システムは流域に散在する複数の超過降雨対応型治水構造物により構成する必要がある。

超過降雨対応型治水構造物の定義を「超過降雨時に雨水の分散に伴う浸水被害の最小化と流出抑制の期待できる治水構造物」とする。雨水の分散化を図る構造物としては、既に小規模分散型の浸透施設や貯流施設が各地で数多く用いられている。しかし、これらが必ずしも超過降雨対応型とは言えない。貯留施設では、計画規模までの降雨に対する流出抑制効果はあっても、貯留容量を上回る流入に対してはもはや流出抑制効果は期待できない。浸透施設は超過降雨に対して一定の流出抑制効果があるので、ここで定義される超過降雨対応型施設の一種と考えられる。

上記の定義を水深（あるいは貯留高さ）と流量の関係で表したのが図-1で、①は超過降雨対応型の場合、②は従来型の関係である。

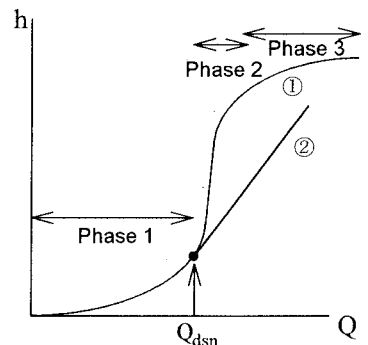


図-1 水深(h)と流量(Q)の関係

* 建設省土木研究所都市河川研究室 研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭一番地)

** 同 都市河川研究室 室 長

Phase 1：ある基準点での計画流量を Q_{asn} とすると、 $h = aQ^b$ と表される。例えば、流域と河川の関係を考える
と、河川の計画規模相当までの降雨は流域から排除しても支障はない。

Phase 2：超過降雨対応型施設の場合、超過降雨に対しては水深や貯留高の変化量(dh/dQ)は計画規模までの降雨
に比べて大きくなり、そのため、流量や流出量の変化は小さい。これにより、超過降雨のときでも河川への
負荷を最小限にし、その分を流域で一旦貯留することになる。これは、流域内に暮らす人々の生活や経済活動
に支障のない範囲であれば少々の水たまりができて構わないという考え方に基づいている。

Phase 3：降雨規模が非常に大きい場合にも流域内の貯留により対応しようとする、流域内に浸水などの問
題が生じてしまう可能性がある。そこで、排水先でもかなりの量を受け入れてもらい、一方の排水元の流域で
も許容されうる範囲で最大限の貯留を行う。この基本的な考え方も雨水の分散化であるが、一種の"痛みわけ"
である。

2. 超過降雨対応型治水構造物の具体例

1で説明した概念に基づく構造物の具体例として道路側溝や下水道などの都市排水路網に連結している流入
施設(雨水マス)を超過降雨対応型にして道路貯留を行なった場合の治水効果について検討した。

雨水マスの機能は路面排水を迅速に行うことにあるが、超過降雨対応型では、計画規模かそれ以下の降雨の
場合には速やかに雨水を排除する機能を果たし、かつ、超過降雨の際にはある程度の路面湛水を許容して下流
への流出を抑制して、流域全体での治水経済効果を高めようというねらいがある。そこで、平坦な路面に対し
て図-1に示した概念を満たす図-2のような構造を考えた。

平坦な道路の場合、雨水マスを利用した道路貯留の効果を把握するための基礎式は以下のように表される。
路面上の雨水の流れはkinematic wave式(1)で表し、雨水マスからの流出量 Q_{out} と道路からの流入量 Q_{in} の差が道路
面上に貯留されるとするも(式(2))。貯留現象と路面上のkinematic wave流れは互いに影響しあわないと仮定
する。到達時間が非常に短い場合はkinematic wave式の代わりに合理式を用いてもほとんど雨水マスへの流入
量の算定結果に違いは出ない。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = r, q = \alpha h^m, \alpha = \sqrt{i}/n, m = 5/3 \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} \quad (2)$$

ここに、 h : 路面上の水深、 q : 単位幅流量、 r : 降雨強度、 n : マニ
ングの粗度係数、 i : 道路の横断勾配である。雨水マスには計画規模以
下の雨水を取り込む取水口と越流水を取り込む余水吐がある。流
出量 Q_{out} は雨水マス前面の水位 H に応じて次のように変化すると仮
定する。なお、流出係数 C は一定値を用いた。

$$1) H \leq a \text{ のとき } Q_{\text{out}} = B_g H \sqrt{gH} \quad (3)$$

$$2) a \leq H \leq z_1 \text{ のとき } Q_{\text{out}} = C a B_g \sqrt{2gH}, C=0.6 \quad (4)$$

$$3) z_1 \leq H \text{ のとき } Q_{\text{out}} = C a B_g \sqrt{2gH} + C_s B_g (H - z_1)^{3/2} \quad (5)$$

$$C_s = 1.785 + 0.237(H - z_1)/z_1^{1/2}$$

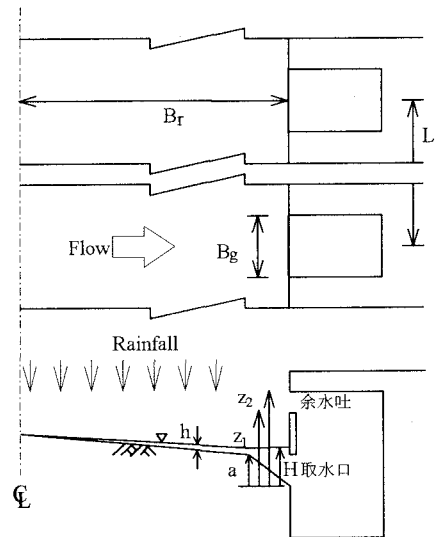


図-2 超過降雨対応型の雨水マスの構造

計画規模以下の降雨に対しては道路交通への影響を考えて1)の状態での
流下としなければならない。取水口の高さ a と幅 B_g は雨水マスの間隔 L （1
つの雨水マスが受け持つ道路延長）、降雨規模、流達時間等を考慮して決
定する必要がある。道路面の流達時間 t_c (分)は式(6)により算定する²⁾。ここ
に、 B_i (m): 道路幅員/2、 r (mm/hr): 降雨強度、 n : マニングの粗度係数、 i : 道路の横断勾配である。

$$t_c = \frac{6.993 B_i^{0.6} n^{0.6}}{r^{0.4} i^{0.3}} \quad (6)$$

3. オンサイトにおける流出抑制効果

超過降雨対応型雨水マスの流出抑制効果を見るため、式(1)～(5)を用いた調節計算を行なった。流出抑制効果を支配するパラメータとして道路横断勾配、取水口の大きさ(a, B_g)、道路半幅B_r、降雨継続時間の単位時間を対象とし、雨水マス下流への流出量Q_{out}、道路横断方向の浸水幅、浸水時間により評価した。なお、浸水とは雨水マス前面の水位Hに関してH>aとなった状態を意味する。

図3と4は、流入量、流出量、湛水深H(=前面水位)の時間変化の計算結果を示しておりa = 5 cm, B_r = 5.0 mである。図-3の到達時間は式(6)により定め、図-4は5分とした。取水口前面の水深がa(= 5 cm)を上回った時点から流出抑制効果が発揮されていることがわかる。なお、コンクリートやアスファルトの道路横断勾配は通常1.5～2%に設定される³⁾が、ここでは横断勾配を1%として計算した。また、横断勾配1%の場合について流入量Q_mと流出量Q_{out}、浸水幅、浸水時間の関係を取水口の高さa毎に示したものが図-5～7である。ここで、東京都の下水道設計に用いられる降雨強度式のうちw=1/2の降雨に対して雨水マスの設計を行なって設計流量Q_{dsn}を求めた。外力はw=1/2, 1/3, 1/5, 1/10, 1/30, 1/50の中央集中型降雨波形(全継続時間60分)とした。流達時間は式(6)により算出した。図-5から、取水口の開口高さaが大きいほど流出抑制効果が高く、a=7.0cmでは設計流量の3倍以上の流入に対して設計流量の1.1

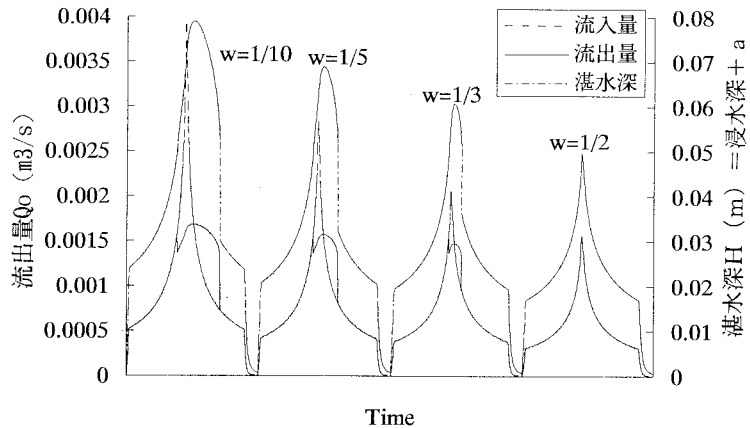


図-3 降雨規模別の流出抑制効果(到達時間式(6))

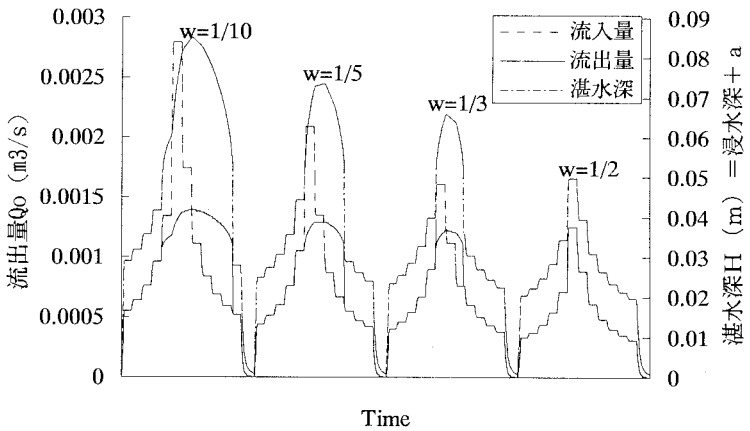


図-4 降雨規模別の流出抑制効果(到達時間 5 分)

倍程度の流出に留まっている。しかし、浸水幅はいずれの外力に対してもa=7.0cmの時が最も大きくw=1/50に対しては路面の8割以上が浸水していることになる。このときの浸水深(H-a)は取水口前面で約4cmであった(図-6の縦軸の読みを1/20にすると浸水深となる)。また、浸水時間は外力規模の増加に伴い長くなり、w=1/50に対しては24～36分程度となった。

次に、道路横断勾配の影響について見てみる。その際、a=5.0cm(その時のB_gはw=1/2に対して4.5cm)に固定した。図-8～10は流入量Q_mと流出量Q_{out}、浸水幅、浸水時間の関係を横断勾配別に示したもので、勾配が大きくなるほど流出量は増加する一方、浸水幅、浸水時間は減少する傾向にある。これは、道路勾配が大きいと貯留容量が少なくなること起因している。勾配i=0.002の場合、外力規模によらずほぼ一定の流出量となる反面、道路全面が浸水することがわかる。

道路半幅B_rの影響を見るため、i=0.01, a=5 cmの場合について上記と同様の整理をした結果が図-11～13である。道路幅が大きいと流入量Q_mも増大するため勾配一定のもとでは、道路幅の増大に伴って湛水深が大きくなりQ_{out}/Q_{dsn}を指標とする流出抑制効果も小さくなる。また、雨水マス1個当りの受け持つ道路長Lの長さを変

えても流出抑制効果には影響が無かった。

以上のように流出抑制と路面浸水はトレードオフの関係にあるため、超過降雨に対して適当な雨水マス形状を決めるには、浸水幅と浸水時間から交通に及ぼす時間損失を算出し、流出抑制効果（道路貯留のかわりに各戸貯留施設等で同等の流出抑制効果を発揮するにはどの程度の費用がかかるか）と比較を行なう必要がある。

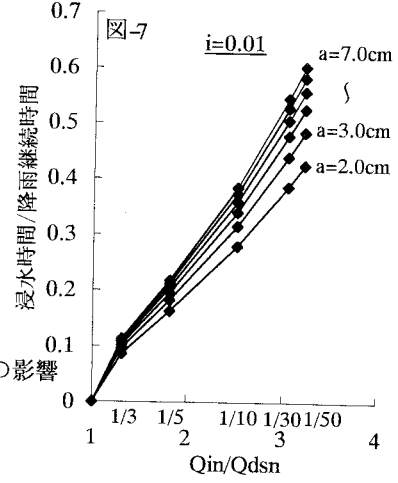
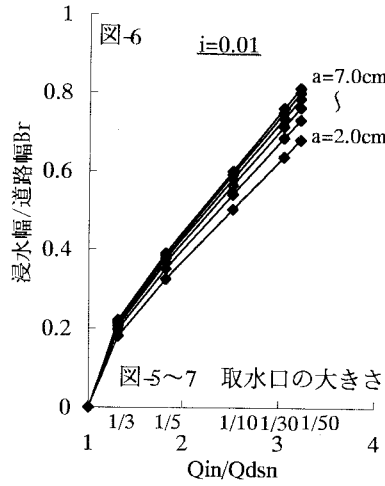
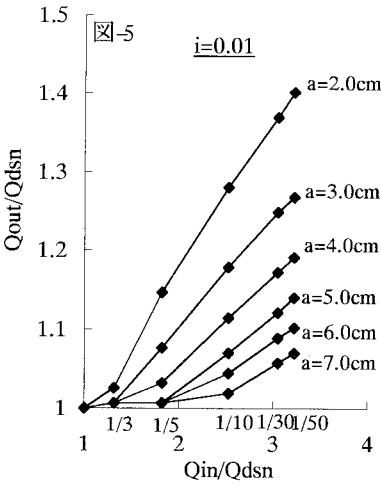


図-5～7 取水口の大きさの影響

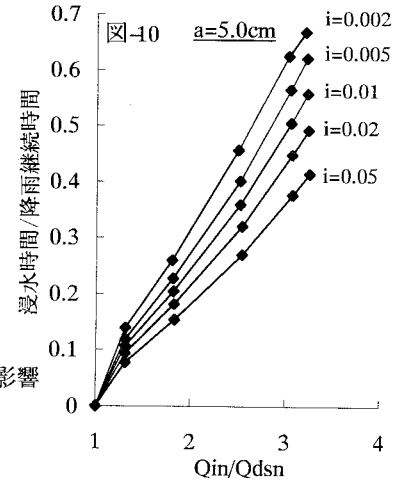
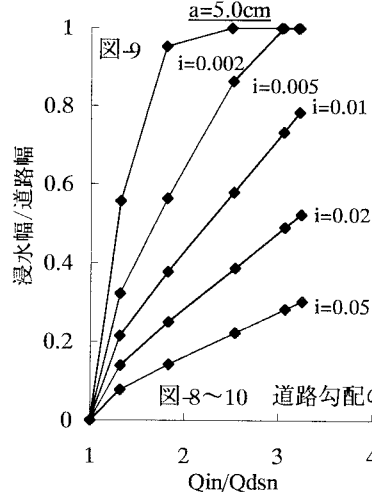
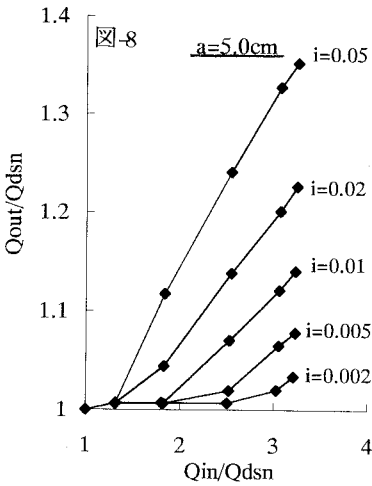


図-8～10 道路勾配の影響

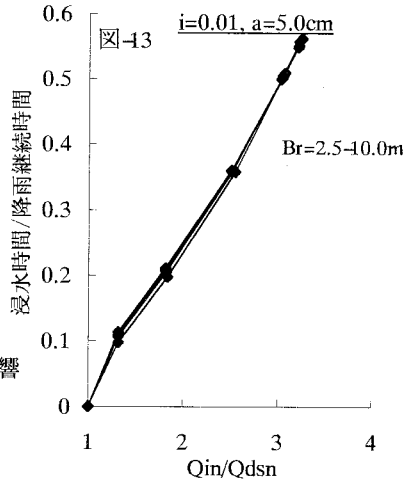
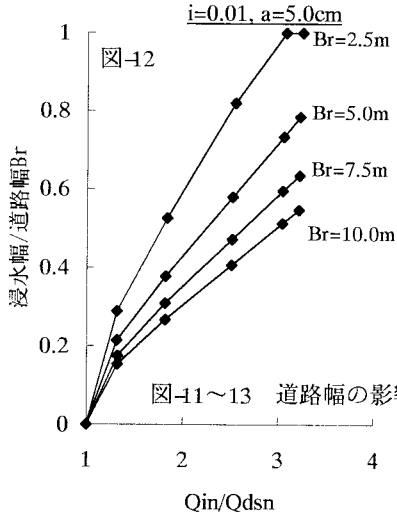
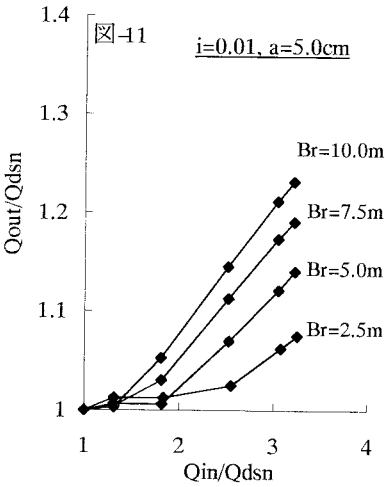


図-11～13 道路幅の影響

4. 小流域における合成された流出抑制効果

4.1 検討の概要

3節の検討から、道路面上に落下した雨水を道路上で最大4cm程度の浸水を許容して貯留すれば、雨水を直ちに排除した場合に比べピーク流出量を最大30%程度に削減できることがわかった。しかしながら、実際の都市域地表面の雨水流下経路は非常に複雑で、歩道に降った雨は道路に流れ出る可能性もあるが、道路以外の民地などからの流出は一部地面に浸透しながらも、直接排水系統（側溝や下水道）に流れ込むので、必ずしも流域全体に降った雨水が道路という調節池を通過するとは限らない。そこで、そのような流下経路の違いを考慮して、流域全体で見た場合の道路貯留の効果というものがどのくらいなのかを流出モデルにより試算した。

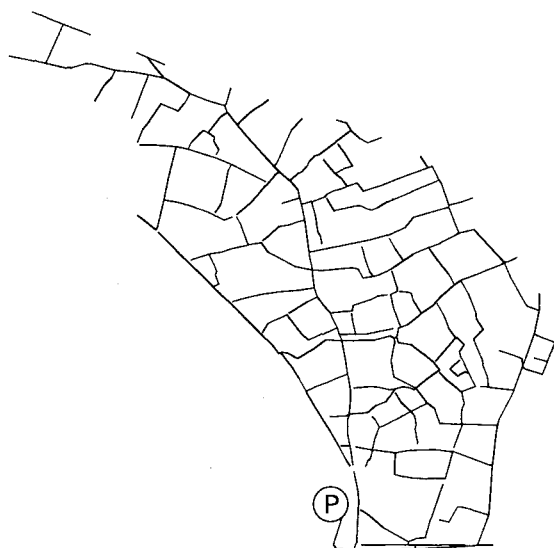


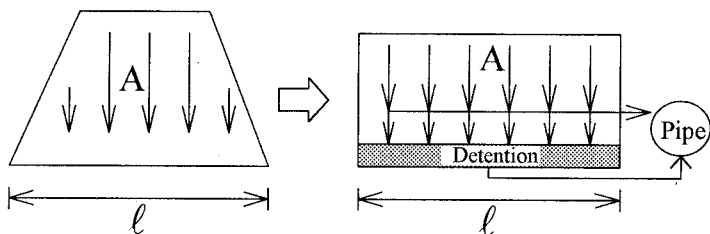
図-14 検討対象排水区の下水道網

計算対象とした流域は面積61haの下水道排水区で図-14に示す下水道網となっている。本排水区の下水道計画における流出係数は0.5である。流域の土地利用は住宅地が全体の面積の約65%、工業用地が約16%、空き地・公園・緑地が約5%、道路は約10%を占める(ちなみに、東京都23区の道路面積は約20%にのぼる)。実際の流域では地盤の高低差があり、道路にも縦断勾配があるから、現状では水平な道路を対象とした3節における検討が適用し得ない状況もあると考えられるが、丘陵地を除けば、道路の縦断勾配を少なくしたり、交差点部で盛土するなどして戦略的に超過降雨時における道路面の調節池化を図ることができると考えられる。

4.2 流出モデル

使用したモデルは下水道管路網内の流れを不定流式（あるいは拡散波近似式）により詳細に追跡できるもので、マンホールでの貯留効果を考慮し、開水路流れから圧力流れ、さらに地表面に浸水する状況まで計算できるものである⁴⁾。このようなモデルを用いれば合理式で設計された下水道排水区の超過降雨に対する応答を知ることができる。モデルの基礎式や構成については既に報告しているのでここでの説明は避けるが、地表面流出過程については道路貯留のモデル化と関連するので簡単に説明を加える。

下水道の施設計画では各管路の単位集水域を現地踏査などから定めて、三角形や台形で近似して表す。本モデルの場合にはこの単位集水域を一旦矩形に変換してからkinematic wave式を適用している。直接排水系統に流出する分はkinematic wave式により算定され、残りの分は道路



上に一時貯留される。道路貯留の基礎方程式は前述の通りであるが、3.で説明したように取水口の形状によっては流出量の最大値を設計値 Q_{dsn} の一定率 α 以下に抑えることができると調節時における Q_{out} の時間的な変化が小さいことがわかったので、次のように簡略化した調節計算を流出モデルの中に組み込んだ。

$$Q_{out} = Q_{in} \quad (\text{when } Q_{in} < \alpha Q_{dsn})$$

$$dV/dt = Q_{in} - Q_{out}, \quad Q_{out} = \alpha Q_{dsn} \quad (\text{when } Q_{in} > \alpha Q_{dsn})$$

ここに、 V :道路貯留量、 α :3.の調節計算から求まる Q_{out} の最大値/ Q_{dsn} で $\alpha=1.122$ となった。

4.3 適用結果

前述の排水区における調節計算結果を図-15に示す。道路半幅は5mとし、取水口は $w=1/3$ に対して浸水が生じないように設計した。道路の流出係数は1.0で、道路へ流出してくるのは道路自体と周辺の境界領域からの雨水に限られるとし、境界領域の面積は道路面積の0%、100%、200%と設定し、流出係数が0.5であることを考慮してそれぞれ分担率20%、40%、60%と表示した。対象降雨には東京都の10年確率中央集中型降雨（継続時間は3時間）を用いた。道路自体からの雨水を貯留しただけ（分担率20%）では排水区全体での流出抑制という点ではあまり効果がないが、周辺領域からの流入も受け入れると、分担率40%では75%程度に排水区末端での最大流出量を削減できることがわかる。図-16は、計算結果を用いて最大流出量、排水区平均の道路内最大湛水深と分担率の関係性をまとめたものである。流出抑制効果の得られた分担率40%の場合、湛水深は約10cmとなることから、道路交通に大きな障害が生じることが予想される。なお、計画規模以下の降雨では、境界領域からの雨水の受け入れを行わないような工夫が必要である。

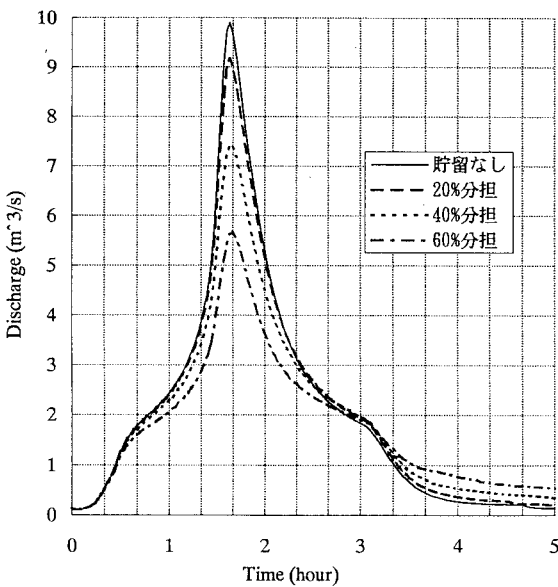


図-15 道路貯留による流出抑制効果の計算結果

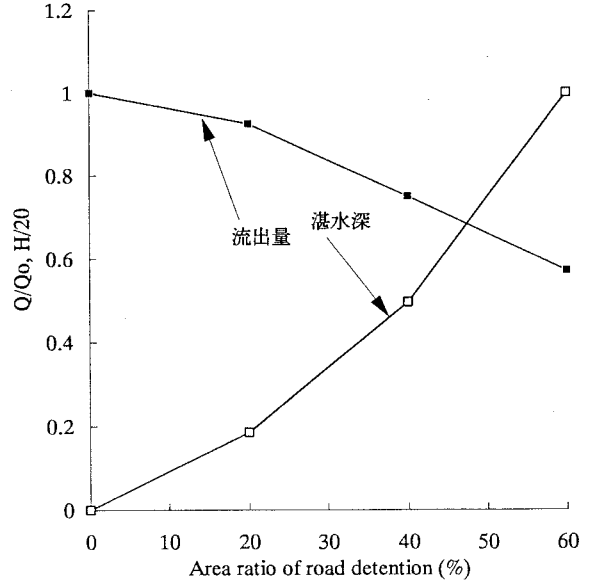


図-16 最大流出量と最大湛水深の計算結果

5. 結論

本検討により次の結論が得られた。

- 1)今回対象とした取水口を用いれば道路上への超過降雨の流出抑制という点では大きな効果があり、流出抑制効果には取水口の大きさ、道路勾配や道路幅などが影響する。
- 2)超過降雨時の道路貯留対策を流域全体に適用した場合、道路自体の流域に占める面積が10%で周辺の同程度の面積からも集水すると75%に最大流量を抑制できる。既存の道路のみではなく、公共用地や業務用駐車場にも同様の施設を用いることも可能であり、他の超過降雨対応型施設との組み合わせでより大きな効果を発揮することができるであろう。

本文はあくまでも都市水文的な見地からの検討により道路貯留の効果を示したもので、交通安全上の問題や交通への支障に対する合意形成の問題などについては別途議論を要する。

参考文献

- 1)土木学会編、昭和46年版水理公式集、pp.256.
- 2)Morgali, J. R., and R. K. Linsley, Computer analysis of overland flow, J.Hyd.Div., A.S.C.E., Vol.91, no.HY3, 1965.
- 3)日本道路協会、道路土工排水工指針、pp.25、S62.6.
- 4)建設省土木研究所総合治水研究室、都市域の流出・氾濫モデルについて、1993.3.