

高松市における雨水浸透施設の適用性の検討

EFFECTIVENESS OF RAINFALL INFILTRATION FACILITIES IN TAKAMATSU CITY

河原能久¹・橋本勇平²・山崎秀幸³・渡邊健一⁴

Yoshihisa KAWAHARA, Yuhei HASHIMOTO, Hideyuki YAMASAKI and Kenichi WATANABE

¹ フェロー会員 工博 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

² 非会員 株式会社アクティブホーム 岡山支店 (〒700-0936 岡山市富田 151-1)

³ 非会員 株式会社四電技術コンサルタント 環境部 (〒761-0121 香川県木田郡牟礼町大字牟礼 1007-3)

⁴ 学生会員 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

The present study is concerned with feasibility of the rainfall infiltration facilities in Takamatsu city and offers newly obtained fundamental data such as geological map of surface soil layer, hydraulic conductivity of surface soil layer and groundwater level during rainy seasons. Four issues are discussed. First, a new geological map is presented for surface soil layer at 1m depth, which is closely related to infiltration facilities, based on the re-examination of the existing borehole logs and new boring survey. In urbanized area surface soils of 1m thickness show multiple layers of different soil types, reflecting the past land use change. Secondary, an in-situ permeability test was carried out at 39 locations to correlate the hydraulic conductivity of the surface soil layer at 1m depth and its soil type. Thirdly, the depth of groundwater table from the ground surface is reported with water level variation corresponding to rainfall. Finally, the effective areas for infiltration facilities in Takamatsu city are discussed.

Key Words : *rain water infiltration facility, geological map, in-situ permeability test, hydraulic conductivity, groundwater level, field measurement, Takamatsu*

1. はじめに

雨水浸透技術は、洪水時の流出抑制や地下水の涵養、河川の低水流量の増加などに効果のある水循環保全技術である。これは、都市化によって急激に変貌した流域の水循環系を開発前の水循環系に近づけようとする自然共生志向の技術であり、これまでに多くの実績を積み重ねてきている。また、雨水浸透施設技術指針^{1),2)}の作成や自治体による基準・指導要綱の整備が進められる³⁾など、雨水浸透技術は実用化の段階に入っている。

高松市では、湯水時における水資源の確保が焦眉の課題であるが、一方、中心市街地において豪雨時の排水不良による浸水の危険性が残されている。高松市ではこれまでオンサイトの雨水貯留施設の設置が進められてきたが、今後、雨水浸透施設を導入していくべき状況にある。しかし、表層地盤の雨水浸透能力の評価が行われておらず、土質・地下水位の調査や現地浸透試験を実施することが必要である。

本研究は、高松市を対象に雨水浸透施設の導入に必要な基礎的な情報を取得・整理することによって、浸

透施設の適地を明らかにすることを目的としている。具体的には、1)既存のボーリングデータを収集するとともに、新規にボーリングを行い、表層土質区分図を作成すること、2)現地浸透試験を行い、表層土質の浸透能力を評価すること、3)地下水位の高い時期に観測を行い、地下水位の分布図を作成すること、4)浸透施設設置の適地を検討することを行った。以下では、それらの内容を順次説明し、最後に課題を取り纏める。

2. 表層地質区分図の作成

(1) 既存の表層地質区分図の問題点

図-1は、地表面から2m程度の深さにおける地質区分図であり、土地条件図やボーリングデータを基に既に作成されているもの⁴⁾である。高松市の南西部から中央部は香東川が形成した扇状地であり、砂礫層が広がっている。一方、東部は、春日川、新川の氾濫源であり、粘土層と砂質土層が混在している。

この図に基づき、浸透能力を評価するためにボーリングおよび現地浸透実験を行う地点を決定した。図-1にそれらの地点の位置を示してある。調査地点は、小

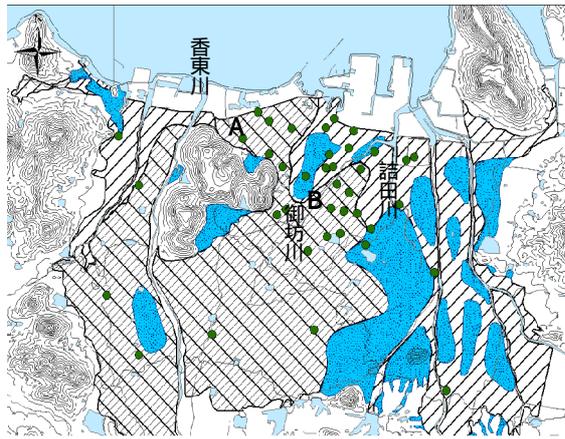


図-1 表層土質区分 (GL-2.0m) と調査地点の位置 (印)

採取地点		紫雲中学校 A	採取地点		今里西脇公園 B
深 度 [L-m]	柱 状 図	記 事	深 度 [L-m]	柱 状 図	記 事
0.1		礫混り砂 (花崗土) 灰褐色 粗～細粒砂が主体、小礫が混る。	0.1		礫混り砂 (花崗土) 灰褐色 粗～細粒砂が主体、φ1cm以下の小 礫とシルト分が少量混る。
0.2		礫混り砂 暗褐色 粗～細粒砂が主体、φ1～3cmの垂角 礫が多く、シルト分が少量混る。	0.2		礫混り粘土質砂 暗褐色
0.3		砂礫 黒灰色 φ1cm以下の小礫と炭殻および粗～ 細粒砂よりなる。	0.3		粗～細粒砂よりなるもの、半固結 状の粘土分と、φ1cm前後の小角礫 が多く混る。
0.4		礫混り砂 暗褐色 中～細粒砂が主体、φ1～5cmの硬質 な砂岩の円礫が多く点在する。	0.4		粗～細粒砂よりなるもの、半固結 状の粘土分と、φ1cm前後の小角礫 が多く混る。
0.5		シルト質砂 暗褐色 粗～細粒砂が主体となるが、半固結 状のシルト分が多く混る。	0.5		粗～細粒砂よりなるもの、半固結 状の粘土分と、φ1cm前後の小角礫 が多く混る。
0.6		玉石混り砂礫 暗褐色 φ1～5cmの硬質な砂岩の円礫が主 体、φ10～15cmの玉石が多く混る。 隙間は粗～細粒砂で充填される。	0.6		粗～細粒砂よりなるもの、半固結 状の粘土分と、φ1cm前後の小角礫 が多く混る。
0.7		シルト質砂 暗褐色 粗～細粒砂が主体となるが、半固結 状のシルト分が多く混る。	0.7		粗～細粒砂よりなるもの、半固結 状の粘土分と、φ1cm前後の小角礫 が多く混る。
0.8		玉石混り砂礫 暗褐色 φ1～5cmの硬質な砂岩の円礫が主 体、φ10～15cmの玉石が多く混る。 隙間は粗～細粒砂で充填される。	0.8		砂混りシルト 灰褐色
0.9		玉石混り砂礫 暗褐色 φ1～5cmの硬質な砂岩の円礫が主 体、φ10～15cmの玉石が多く混る。 隙間は粗～細粒砂で充填される。	0.9		半固結を呈す。土塊は指圧でよう やくバラバラに砕ける。 粗～細粒砂が少量混入する。
1.0		玉石混り砂礫 暗褐色 φ1～5cmの硬質な砂岩の円礫が主 体、φ10～15cmの玉石が多く混る。 隙間は粗～細粒砂で充填される。	1.0		半固結を呈す。土塊は指圧でよう やくバラバラに砕ける。 粗～細粒砂が少量混入する。
1.1		玉石混り砂礫 暗褐色 φ1～5cmの硬質な砂岩の円礫が主 体、φ10～15cmの玉石が多く混る。 隙間は粗～細粒砂で充填される。	1.1		半固結を呈す。土塊は指圧でよう やくバラバラに砕ける。 粗～細粒砂が少量混入する。

図-2 表層地盤の柱状図

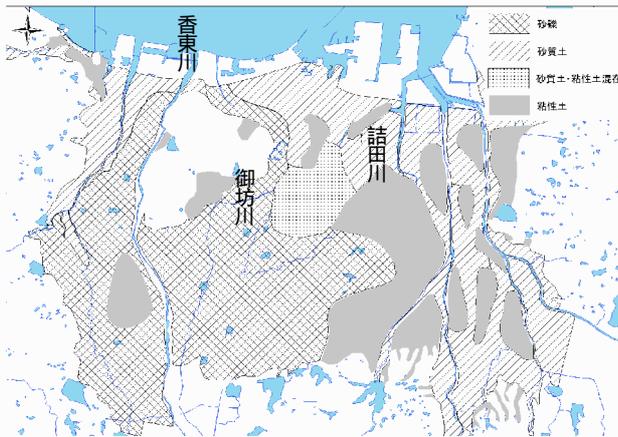


図-3 表層土質区分図 (GL-1m)

中学校 (20 地点) と街区公園 (19 地点) である。調査する小中学校の選定に際しては、まず空間的な配置と様々な地質に対して調査を行うことを重視した。また、街区公園の選定においては、ボーリング機械をはじめとする機器が搬入可能なこと、市街化の進みつつある地域であり、図-1 において砂質土であることなどを目安とした。

一例として、図-2 に、紫雲中学校 (図-1 の A)、今里西脇公園 (図-1 の B) における柱状図を示す。これからは明らかなように、浸透施設の設置に関連する地表面から 1m 程度の深さの土質は均一ではなく、多層の土層で構成されている。また、今里西脇公園のように、図-1 では砂礫層と分類されているが、水田として長らく利用されたために、地表面から 1m 付近の深さに粘性土となっている地点も多数存在することが判明した。このため、図-1 の土質区分図を修正することが必要であると判断し、既存のボーリングデータを見直した。

(2) 深さ 1m での表層地質区分図の作成

図-3 は地表面から 1m 深さでの表層地質区分図である。深さ 1m での土質が判明している地点 (約 400 地点) と今回の調査地点 (図-1 中の地点) でのボーリン

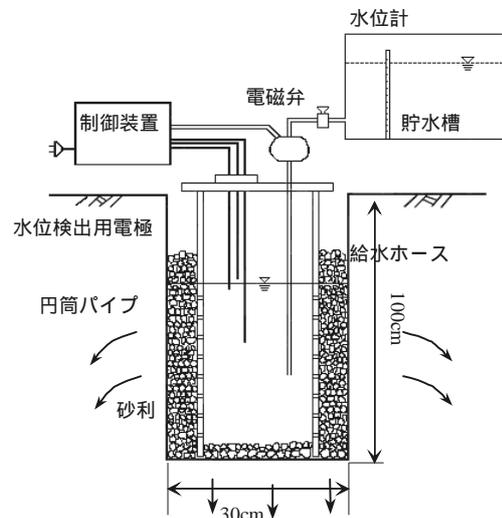


図-4 現地試験装置の概要 (定水位法)

グデータに基づき、図-1 を修正した。最も大きな修正点は、御坊川と詰田川に挟まれる地域の土質を砂質土と粘性土の混在としたことである。

ただし、今回利用できたデータは限られており、図-3 には局地的な地質情報は含めていない。今後、過去の地形図や土地利用図の利用、地元の年長者へのヒアリング、新規のボーリングデータの利用などを行い、表層土質区分図の信頼性を高めていくことが必要である。

2. 現地浸透試験と透水係数の評価

(1) 試験装置の概要

現地浸透試験方法は、設置が容易で注入水量を調節でき、試験結果から予測できる浸透能力の精度や信頼性が高いことが望ましい。今回の調査では、文献^{1),5)}を参考にして、最も広く利用されている簡易型試験法

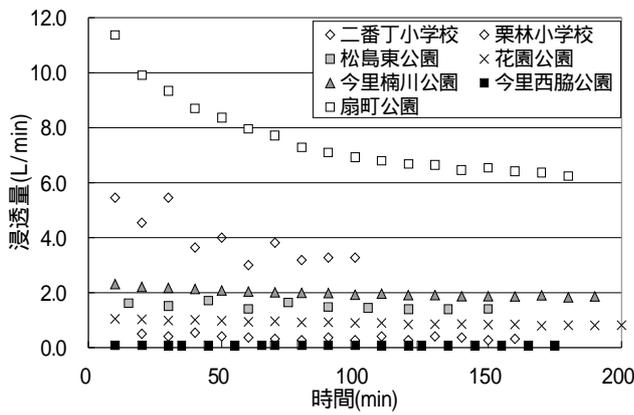


図-5 浸透量の時間的な変化

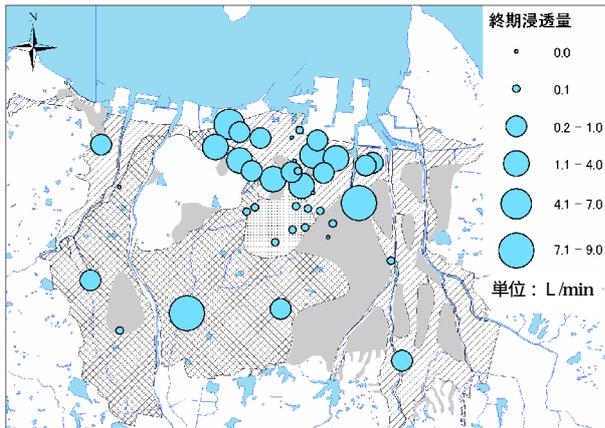


図-6 表層土質区分と終期浸透量の分布

の一つであるボアホール法を用いること、また、ボアホール孔内の水位を一定に保つように水を補給する定水位法を採用することとした。

図-4 に今回使用した実験装置の概要を示す。深さ 1.0m、内径 0.3m のボアホール内に、直径 0.215m の塩ビ製の円筒（側壁に小孔有り）を設置し、底面、側面には、側壁の崩壊を防ぐために砂利を投入した。貯水槽（公園での調査では水道を利用）からボアホール内の水の供給は、電磁弁と制御装置によってコントロールした。水位は電極により計測し、 $60 \pm 1\text{cm}$ あるいは $30 \pm 1\text{cm}$ の範囲で一定に保つようにした。ボアホールへの給水量は、一定時間（5～10 分）ごとの貯水槽の水位あるいは積算流量計の値から算出した。

(3) 浸透試験の手順

今回の調査地点は図-1 に示した小中学校と街区公園である。小中学校での浸透試験は平成 14 年 8 月 27 日～9 月 13 日、また、街区公園での試験は平成 14 年 11 月 11 日～11 月 22 日に実施した。ボーリング位置に関しては、人為的な影響の少ないことや地下埋設物がないこと、ボーリングと現地試験時の機械等の作業スペースを考慮して決定した。また、学校での浸透試験では、学校活動への影響を極力少なくするように努めた。

表-1 土質と終期浸透量

地形	No	調査地点	土質		終期浸透量(L/min)	
			GL-1.0m	主な土質		
旧河道	11	一宮小学校	玉石混り砂礫	砂礫	8.5 *	
	16	紫雲中学校	玉石混り砂礫	砂礫・砂	3.5	
	35	上之町北公園	礫混りシルト質砂	砂礫・砂	0.008	
	36	八ヶ東公園	砂質粘土	砂・粘土	0.009	
	37	中野町公園	礫混り砂	砂	0.56	
	38	亀岡公園	玉石混り砂礫	砂礫	2.1	
扇状地	7	太田小学校	礫混りシルト	シルト	0.08	
	10	多肥小学校	玉石混り砂礫	砂礫・砂	0.75	
	13	円座小学校	砂混りシルト	シルト	0.011	
	14	檜紙小学校	礫混り砂	砂	0.55	
	15	弦打小学校	砂混り粘土	粘土	0.00	
	33	松縄下所公園	砂質シルト	シルト	0.033	
三角州・海岸平野	34	伏石中公園	礫混りシルト質砂	砂	0.010	
	1	二番丁小学校	礫混り粘土質砂	砂	0.30	
	2	四番丁小学校	シルト混り砂	砂	0.14	
	3	新塩屋町小学校	シルト質砂	砂		
	4	松島小学校	シルト質砂	砂	2.8	
	5	花園小学校	シルト質砂	砂礫・砂	0.045	
	6	栗林小学校	シルト混り砂	砂礫・砂	3.3	
	8	木太北部小学校	シルト混り砂	砂	0.32	
	9	木太小学校	シルト混り砂	砂	8.3 *	
	17	玉藻中学校	砂	砂	0.34	
	18	木太中学校	シルト	シルト	0.00	
	20	勝賀中学校	玉石混り砂礫	砂礫・砂	0.43	
	21	袖場川公園	シルト・礫混り砂	砂	0.025	
	22	新開西公園	シルト質砂	砂	0.33	
	23	松島東公園	シルト質砂	砂	1.4	
	24	木太北部公園	シルト質砂	砂	0.40	
	25	花園第一公園	粘土質砂	砂礫・砂	*	
	26	花園公園	砂質シルト	シルト	0.81	
	27	今里楠川公園	シルト質砂	砂	1.8	
	28	上福岡宮東公園	シルト	粘土・シルト	0.00	
	29	今里西脇公園	砂混りシルト	シルト・粘土	0.076	
	30	松縄西公園	有機質粘土	シルト・粘土	0.014	
	31	松縄東公園	砂混りシルト	シルト	0.012	
	32	下西原公園	粘土	シルト・粘土	0.013	
	39	扇町公園	砂	砂	6.3	
	氾濫原・後背湿地	12	川島小学校	礫混り砂	砂	0.45
		19	協和中学校	玉石混り砂礫	砂礫・砂	0.068

浸透試験では、ボアホールの掘削、浸透面や孔内の手入れ、定水位法による試験、原型復帰を行った。ボーリング孔は機械掘削したが、掘削直後に浸透試験を行うことができない場合には、側壁の崩壊防止のために塩ビ製の円筒を投入し、ボアホール上面には落下事故防止用の蓋をした。また、定水位法による浸透試験では、給水量すなわち浸透量がほぼ一定なることを目安とし、2～3 時間程度の通水を行った。

(4) 終期浸透量

図-5 に浸透量の時間的な変化の例を示す。浸透量の多い地点では時間とともに速やかに減少し、一定値に漸近していく。ここでは、浸透試験の結果に次式の曲線を当てはめ、測定最後の時刻の浸透量を終期浸透量とした。

$$Q = at^b \quad (1)$$

ここで、Q：浸透量、t：時間、a、b：定数である。

表-1 に地形、調査地点、地表面下 1.0m の土質、表層を主に構成している土質、終期浸透量を示す。この表より、全く浸透しない地点から終期浸透量が 8 (L/min) を越える地点まで存在することがわかる。なお、一宮小学校、木太小学校、花園第一公園（表中の

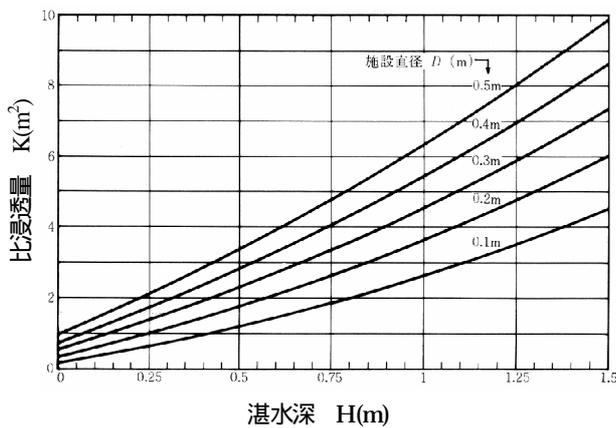


図-7 ポアホール法の比浸透量¹⁾

終期浸透量の欄に*印)では、給水量が浸透量に追いつかなかった。一宮小学校と木太小学校では60cm未満の水位で定常状態となったが、表中の値はその時の給水量から求めたものである。また、花園第一公園では、最大水量を供給したが、ポアホール中に水深が確保できなかったため、終期浸透量が十分に大きいことを確認したのみであった。さらに、紫雲中学校、檀紙小学校、松島東公園、木太北部公園(表中の終期浸透量の欄に印)ではかなりの浸透量が予測されたため、湛水深を30cmとして試験を行った。終期浸透量の欄にはその時の流量を記してある。新塩屋町小学校(表中の終期浸透量の欄に印)においても終期浸透量が得られなかったが、その原因は別である。湛水に伴って、ポアホールの側壁にあった陶製の管の破片に詰まっていた土砂が流出し、漏水が著しくなって、給水が追いつかない事態が発生したためである。

図-6に表-1に示した終期浸透量の分布を表層土質区分とともに示す。高松市中央部に広がる粘性土と砂質土の混在地域には浸透量の小さい地点が多い。これは長らく水田として開発・利用されてきた地域であるためと推測される。また、主な土質が砂礫や砂質土で構成されている地点では、比較的高い浸透量があることが確認できる。

(5) 表層土質の飽和透水係数

雨水浸透施設技術指針(案)¹⁾によれば、土壌物性がかなり異なっても施設規模と湛水深が一致していれば、終期浸透量(Q)と飽和透水係数(k₀)の比(=比浸透量)はほぼ同一の値を示す。すなわち、現地浸透試験から得られる終期浸透量と試験施設の形状、湛水深から求まるK_tの値を図-7から求め、次式から飽和透水係数を算出することができる。

$$k_0 = \frac{Q}{K_t} \quad (2)$$

今回の現地試験では湛水深0.6m、施設直径0.3mで行った。したがって、比浸透量は2.7m²である。また、

表-2 測定地点の飽和透水係数

土質	No	調査地点	k ₀ (cm/s)
砂礫土	10	多肥小学校	4.63×10 ⁻⁴
	11	一宮小学校	5.28×10 ⁻³
	16	紫雲中学校	3.69×10 ⁻³
	19	協和中学校	4.21×10 ⁻⁵
	20	勝賀中学校	2.67×10 ⁻⁴
	38	亀岡公園	1.27×10 ⁻³
砂質土	1	二番丁小学校	1.82×10 ⁻⁴
	2	四番丁小学校	8.42×10 ⁻⁵
	4	松島小学校	1.71×10 ⁻³
	5	花園小学校	2.81×10 ⁻⁵
	6	栗林小学校	2.02×10 ⁻³
	8	木太北部小学校	1.96×10 ⁻⁴
	9	木太小学校	5.14×10 ⁻³
	12	川島小学校	2.81×10 ⁻⁴
	14	檀紙小学校	5.68×10 ⁻⁴
	17	玉藻中学校	2.10×10 ⁻⁴
	21	柚場川公園	1.57×10 ⁻⁵
	22	新開西公園	2.06×10 ⁻⁴
	23	松島東公園	1.46×10 ⁻³
	24	木太北部公園	4.18×10 ⁻⁴
粘性土	27	今里楠川公園	1.14×10 ⁻³
	34	伏石中公園	6.34×10 ⁻⁶
	35	上之町北公園	5.21×10 ⁻⁶
	37	中野町公園	3.49×10 ⁻⁴
	39	扇町公園	3.89×10 ⁻³
	7	太田小学校	4.91×10 ⁻⁵
	13	円座小学校	7.02×10 ⁻⁶
	15	弦打小学校	0.0
	18	木太中学校	0.0
	26	花園公園	5.01×10 ⁻⁴
	28	上福岡宮東公園	0.0
	29	今里西脇公園	4.72×10 ⁻⁵
30	松縄西公園	8.64×10 ⁻⁶	
31	松縄東公園	7.23×10 ⁻⁶	
32	下西原公園	8.18×10 ⁻⁶	
33	松縄下所公園	2.04×10 ⁻⁵	
36	八ヶ東公園	5.75×10 ⁻⁶	

表-3 土質区分別の飽和透水係数(単位:cm/s)

土質	データ数	平均値	最大値	最小値
砂礫土	6	1.83×10 ⁻³	5.28×10 ⁻³	4.21×10 ⁻⁵
砂質土	19	9.43×10 ⁻⁴	5.14×10 ⁻³	5.21×10 ⁻⁶
粘性土	12	5.45×10 ⁻⁵	5.01×10 ⁻⁴	0.0

ポアホールへの給水が浸透に追いつかない地点や湛水深0.3mで試験を行った場合に対しても図-7から比浸透量を算出した。なお、式(2)は、均質で十分な厚さのある不飽和土壌を対象としたものであり、本研究が対象としている多層構造を有する土壌に適用することは本来できない。しかし、個別に、土質の物性値を測定し、浸透理論を適用して飽和透水係数を算出することは、現時点では有効ではないと考え、式(2)で算出される値を換算された飽和透水係数とすることとしている。この点に関しては、今後系統的な検討が必要である。

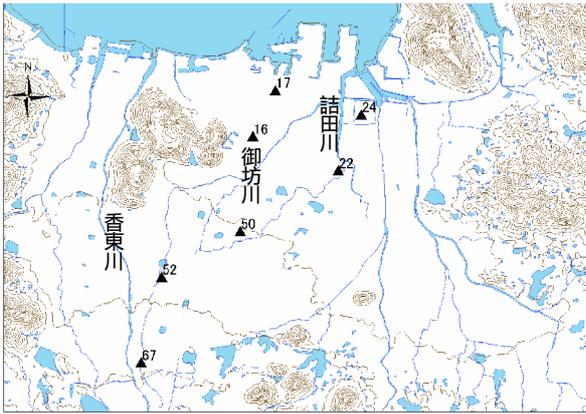


図-8 地下水位の連続観測地点

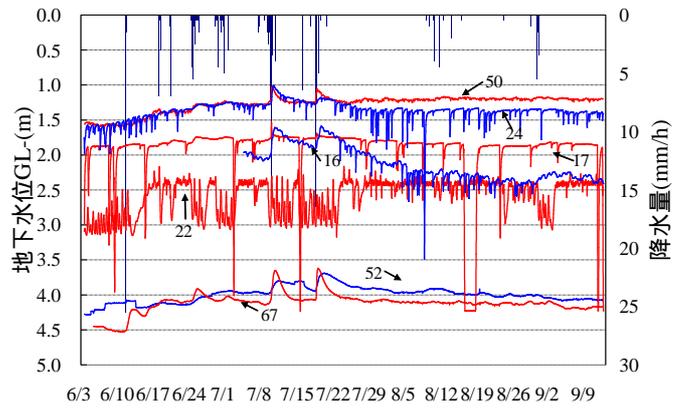


図-9 地下水位の変動特性

表-2 に算出した飽和透水係数を示す．なお，土質区分は，地表面下-1m での土質によって，砂礫土，砂質土，粘性土の3分類とした．飽和透水係数を土質区別に整理した結果を表-3 に示す．飽和透水係数の平均値は砂礫土と砂質土では 10^{-3} cm/s のオーダーである．

4. 地下水位の等値線図の作成

雨水浸透施設の設置場所では地下水面が低いことが望ましい．対象地域では6月から10月にかけて浅層地下水位が上昇する．平成14年3月から平成15年7月にかけて地下水位の連続観測を行った．図-8に観測地

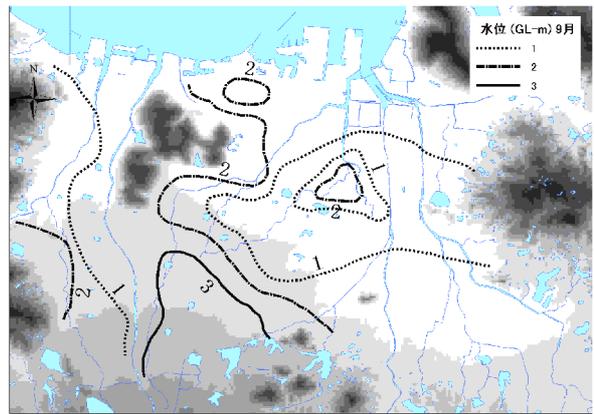


図-10 地表から地下水面までの深さ (GL-m)

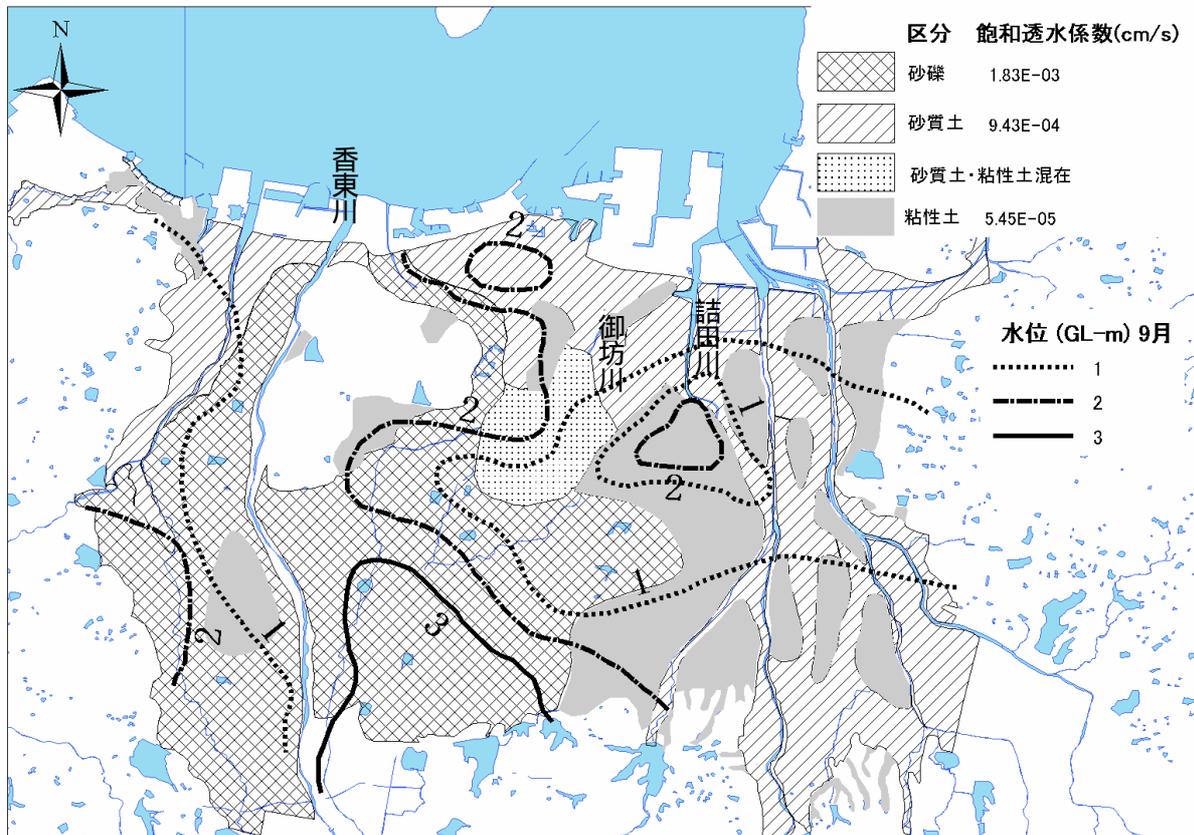


図-11 高松市の雨水浸透能力図

点の位置を、また、図-9に平成14年6月～9月上旬にかけての地下水位の測定結果を示す。地下水位は降雨に鋭敏に反応し、番号17, 24, 50, 52の地点では降雨に対して最大20～25cm程度、番号16, 60の地点では50cm程度上昇している。地点22では降雨の影響が揚水によって目立たなくなっている。

平成14年9月中旬に地下水位の一斉観測を既設の井戸65箇所を利用して行う⁶⁾とともに、国土交通省香川工事事務所から提供いただいた測定結果に基づいて、地下水位の等値線図を作成した。図-10は、地下水面の地表面からの深さの等高線図である。これより、沿岸部や香東川沿いの地域、香東川扇端部から東部にかけて、地下水面の高い地域が広がっていることがわかる。

5. 浸透能力の評価

図-11は表層地質、飽和透水係数、地下水位を重ねて表したものであり、浸透能力を検討する際の基礎的なデータとなる。この図において、土質が砂礫土または砂質土に属し、地下水面の低い地域が浸透施設の設置に適している。北部の中心市街地の一部や香東川扇中央部は適していると考えられる。御坊川と詰田川に挟まれた地域で地下水位が比較的低い地域では、砂質土と粘性土が混在しているため、現地での掘削結果に基づき、通常の雨水枘か浸透枘かを選択することが必要である。

なお、本研究では実際に浸透施設を設置し、その効果を確認する作業は行っておらず、今後の課題としている。

6. まとめ

本研究では、高松市に雨水浸透施設の導入するための基礎資料として、地表面下1mでの表層土質区分図の作成、表層土質の飽和透水係数の算出、地下水位の分布図の作成を行った。また、浸透施設設置の適地を検討した。

作業の過程において発生した次のような問題は今後検討する必要がある。

- 1) 未開発の土地ではなく既存の市街地においては、表層土質に人間の影響が強及んでいる。このため、浸透施設の浸透能力に関連する深さ1mほどの

表層土質を従来の地形分類図から推定することは、困難である。従来のボーリングデータにも表層土質の表記に不明確なものが多い。新規の現地調査結果を集約しておくことが必要である。

- 2) 多層から成る表層土質の飽和透水係数の算出方法が確立されていない。どのような因子が重要であるかをまず明らかにすることが必要である。
- 3) 実際に浸透施設を設置し、今回の調査結果の信頼性を検証することや問題点の整理を行うことが必要である。
- 4) 今回は屋根排水を浸透施設に注入することを考えているが、流入する水質に関する調査も維持管理上から必要である。

高松市では平成15年度から雨水浸透施設の設置に対して補助金を出している。今後、設置後のモニタリングを行うとともに、地下水涵養の効果も測定していく予定である。

謝辞：本研究の実施に際して、(財)香川県科学技術振興財団の産学官共同研究開発事業(代表者：吉野文雄)および科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(代表者：河原能久)の援助を受けた。また、飽和透水係数の算出については、(社)雨水貯留浸透技術協会の忌部正博氏、法政大学の岡泰道先生から助言をいただいた。さらに、現地調査に関しては高松市役所のご協力を、地下水位データに関しては国土交通省香川工事事務所のご協力を得た。末尾ながら感謝いたします。

参考文献

- 1) 社団法人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。
- 2) 社団法人雨水貯留浸透技術協会：雨水浸透施設技術指針(案)、構造・施工・維持管理編、1997。
- 3) 社団法人雨水貯留浸透技術協会：雨水浸透技術のQ&A、水循環-貯留と浸透-、Vol.41, pp.87-92, 2001。
- 4) 高松市：高松市水循環健全化計画 2003-2010年度 pp.8-9, 2003。
- 5) 岡泰道、松井準：簡易な現地浸透試験に基づく地盤の浸透能力の評価方法について、水工学論文集、第45巻、pp.325-330, 2001。
- 6) 河原能久、渡邊健一、橋本美智子：高松地域の不圧地下水の水位・水質に及ぼす灌漑の影響、水工学論文集、第47巻、pp.283-288, 2003。

(2003.9.30受付)