

チャオプラヤ川流域を対象にした洪水氾濫— 地下水結合モデルの構築

DEVELOPMENT OF FLOOD INUNDATION-GROUNDWATER COUPLED MODEL FOR CHAO PHRAYA RIVER BASIN

川崎浩司¹・外木場康将²・中辻啓二³

Koji KAWASAKI, Yasumasa SOTOKOBA and Keiji NAKATSUJI

¹ 正会員 博(工) 大阪大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

² 正会員 修(工) 奥村組 梅坂トンネル JV 工事所 (〒633-1216 奈良県宇陀郡曽爾村山粕地内)

³ 正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

In the Chao Phraya River basin, long-term flood inundation frequently occurs, which results in severe damage of rice crops farming and has an effect on groundwater flow system. Flood inundation and groundwater problems, however, have not been examined comprehensively. In the present study, a flood inundation-groundwater coupled model is developed to examine the long-term flood inundation-induced groundwater system. The model consists of two flow models, that is, a depth-averaged flood inundation flow model and a three-dimensional groundwater model, MODFLOW-2000. The validity of the coupled model was confirmed by comparing the numerical results with the theoretical ones for the falling head permeability test. Moreover, application of the model to northern area of Bangkok in Thailand showed the infiltration of inundation water into aquifers affected the groundwater system.

Key Words : *flood inundation-groundwater coupled numerical model, Chao Phraya River basin, depth-averaged inundation flow model, three-dimensional groundwater model*

1. はじめに

熱帯性モンスーン気候に属するタイ国のチャオプラヤ川流域では、年間降水量の約85%が集中する長期の雨季に洪水氾濫が頻発しており、幾度となく人々の生活を脅かしてきた。そのため、国民生活と農業経済の安定化を図る目的で、上・中流域に堤防等が築造された。しかし、このことが中・下流域での洪水氾濫の発生頻度、その影響範囲を増加させることとなった。また、地形が1/50000～1/10000と平坦であるため、氾濫期間は2～4ヶ月と長期間に及ぶ。一方、氾濫常襲の農業地域では、河川氾濫によって運搬・堆積された栄養分の豊富な土壌を利用することにより、稲作農業を行っている。このように、チャオプラヤ川流域では、洪水氾濫は国民の生活に対して負の影響だけでなく利益をもたらすことがある。したがって、ダム・堤防の建設、河床掘削事業などといった、従来、日本で実施してきた災害対策がチャオプラヤ川流域を始め東南アジア河川流域に対して適しているかどうかは疑問が残るところである。

洪水氾濫以外の水問題として、東南アジア諸国では、地下水枯渇問題も挙げられる。ここ数十年、人口増加が

急速に進んでおり、タイ国の首都バンコクを例に挙げると現在の人口は800万人ともいわれている。急速な人口増加や工業化により、水需要が増大し、乾季に深刻な水不足となっている。そのため、地下帯水層から大量に揚水されるようになり、地下水は生活用水・工業用水として今日の人々の生活、産業経済を支えている。しかし、このことが塩水侵入や地盤沈下などの2次的被害を引き起こしている。今まで、揚水量の規制、上水道の整備などの対策が施されてきたが、未だ地下水位が低下している状況であり、早急に解決すべき課題となっている。

このように、チャオプラヤ川流域では、洪水氾濫と地下水枯渇に関して社会的に深刻な問題となっている。そこで、従来別々に検討されてきた洪水氾濫問題と地下水問題を包括的に議論することにより、チャオプラヤ川流域が抱える水問題に対して新しい提案を試みたいと考えている。つまり、洪水氾濫水、地下水を1つの水システムと考え、東南アジアの地域性を考慮した「氾濫・地下水総合管理システム」の提案である。その一例として、地下涵養への氾濫水の有効活用が挙げられる。しかしながら、長期間の洪水氾濫が地下水に及ぼす影響を評価する手段がないのが現状である。

上述した背景に基づき、本論文では、地下帯水層への浸透を考慮できる洪水氾濫—地下水結合モデルを構築し、降水位透水試験による理論との比較より、モデルの妥当性を検証する。さらに、結合モデルをバンコク北部地域に適用し、氾濫水位と地下水頭の時空間変化について考察する。

2. 洪水氾濫—地下水結合モデルの構築

(1) 平面2次元氾濫流モデル

本研究では、氾濫流の面的特性を把握するため、デカルト座標系の平面2次元氾濫流モデル¹⁾を採用する。基礎方程式の離散化に関しては、地下水モデルとの結合、モデル改良の容易さを勘案して、有限差分法とした。具体的には、岩佐²⁾らが開発した平面2次元氾濫モデルを参考に、数値モデルを構築した。

氾濫流モデルの基礎方程式は、式(1)~(3)に示すように、水深方向に積分された連続式と x 方向、 y 方向の運動量保存式から構成される。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(UM)}{\partial x} + \frac{\partial(VM)}{\partial y} \\ = -gH \frac{\partial(H + z_b)}{\partial x} - \frac{gn^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{H^{1/3}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(UN)}{\partial x} + \frac{\partial(VN)}{\partial y} \\ = -gH \frac{\partial(H + z_b)}{\partial y} - \frac{gn^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{H^{1/3}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 M 、 N は x 、 y 方向の流量フラックス、 U 、 V は x 、 y 方向の断面平均流速、 H は水深、 z_b は地盤高、 n はManningの粗度係数、 g は重力加速度、 t は時間である。

まず連続式の離散化に関しては、時間項に前進差分、空間微分項に中央差分を用いて、Leap Frog法により計算した。すなわち、時刻 $(n+2)$ で得られた流量フラックス M 、 N と時刻 $(n+1)$ で算定された水深から、時刻 $(n+3)$ における水深を求めた。一方、運動量保存式に対しては、時間項に前進差分を、移流項、圧力項・摩擦項にそれぞれ1次風上差分、中央差分を適用した。

(2) 3次元地下水モデル

本研究では、地下水解析モデルとして、U.S. Geological Surveyが開発した有限差分法に基づく3次元地下水モデルMODFLOW-2000³⁾を使用した。MODFLOW-2000は、不規則な形状の被圧帯水層、不圧帯水層から構成される地下空間内の定常流、非定常流を計算できる数値モデルである。また、井戸からの揚水、涵養、蒸発散、排水路・

河川・湖沼の底面からの浸透の影響も考慮できる。

地下水モデルの基礎方程式は、式(4)から分かるように、水収支の保存式とダルシーの法則を組み合わせたことにより誘導されたものである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} はそれぞれ x 、 y 、 z 方向の透水係数、 S_s は比貯留係数、 h は地下水頭、 t は時間である。また、 W は土壌の単位体積、単位時間あたりの吸い込み・湧き出し量を表し、水が供給される時は正、排出される時は負を示す。なお、本計算では、地下水の汲み上げや涵養などを考慮していないため $W=0$ とした。また、等方性を有する地質構造を仮定した。

(3) 計算アルゴリズム

前述したように、結合モデルを構築するにあたっては、氾濫が地下水システムに及ぼす影響を表現する必要がある。つまり、地下水と洪水氾濫流の個別の計算のみならず、両流動モデルの結合方法にも留意すべきである。

図-1は洪水氾濫—地下水結合モデルによる計算フローチャートを示す。まず初期条件に基づいて、地下水と氾濫流の現象を個々に計算する。ついで、氾濫水の地下浸透を表現するために、氾濫流モデルから算定された氾濫水位を境界条件として地下水計算を行う。このとき、氾濫水の地下浸透量も同時に算定されるため、得られた浸透量を一格子辺りの面積で除算し浸透水位に換算することにより、浸透後の氾濫水位を算定する。

上述した一連の計算過程を時間ステップごとに繰り返すことにより、洪水氾濫と地下水の流動を結合した時系列計算を行うことができる。なお、地下水の物理現象は、洪水氾濫と比較して時間変化が遅いことから、氾濫流計算と地下水流計算を結合する時間間隔を調整することにより、全計算時間の高速化を図ることが可能となる。つまり、氾濫流計算を短い時間ステップ間隔で繰り返し行い、設定したモデル結合時間に達したときのみ、地下水解析を行うことにする。また、河川からの越流氾濫は考慮しておらず、全川無堤条件で計算を行った。

3. 降水位透水試験による結合モデルの検証

(1) 計算条件

本章では、降水位透水試験による理論との比較より、構築した結合モデルの検証、特に地表水の地下浸透について検討する。ここで、降水位透水試験⁴⁾とは、土の透水係数を決定する室内試験の1つで、スタンドパイプ内の水位低下を測定することにより、土試料の透水係数を算定する方法である。

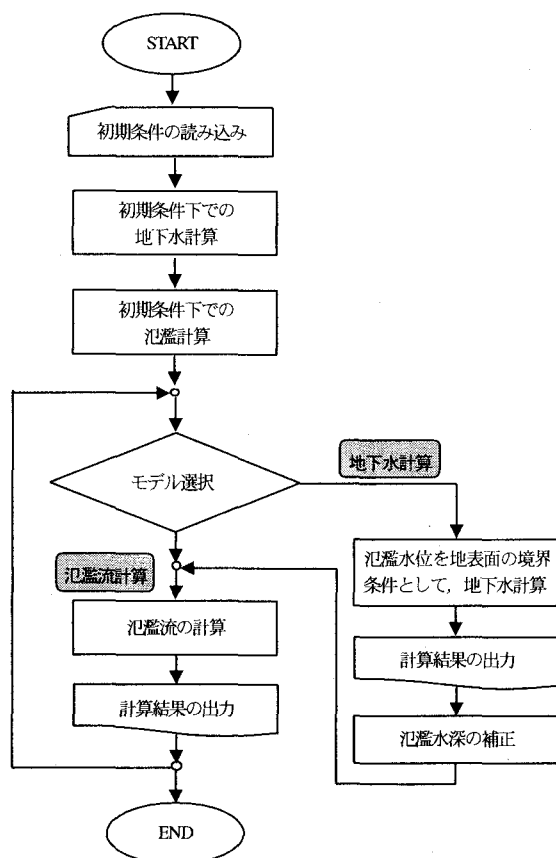


図-1 計算フローチャート

図-2 に示すモデル地形に、降水位透水試験に対する理論を適用すると、式(5)が誘導される。なお、式中の記号は図-2 に示すとおりである。

$$h_2(t) = h_1(t) \times 10^{-\frac{K(t_2-t_1)}{2.3L}} \quad (5)$$

同じく、結合モデルも、図-2 に示すモデル地形に適用する。計算領域は2500m×2500mである。メッシュ間隔を $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$ とし、氾濫流モデルと地下水モデルの計算時間間隔をそれぞれ0.5s、1hとした。

地表水位の時間変化の計算値と理論値を比較することにより、本モデルの妥当性を検証する。また、前述したように、結合モデルでは、氾濫流計算と地下水計算を結合する時間間隔を調整することにより、全体の計算時間の高速化を図ることができる。そのため、結合時間間隔の設定についても考察する。計算条件は、表-1 に示すとおりで、3日間(259200s)の計算を行った。

(2) 計算結果と考察

図-3(a), (b)はそれぞれ Case1-1, Case1-2 に対する地表水位の時間変化を示す。図中の○印、実線はそれぞれ理論値、計算領域中央部での計算値を示す。なお、両ケースの違いは、表-1 に示すように、透水係数の設定値のみ

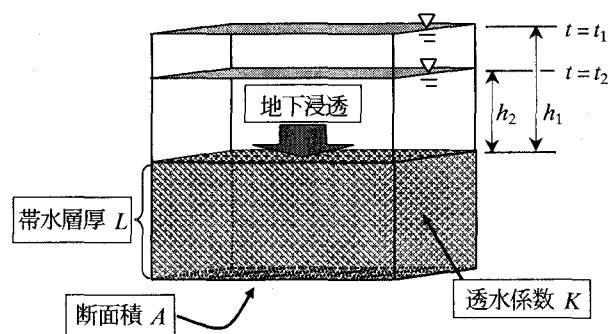


図-2 降水位透水試験に対するモデル地形

表-1 計算ケース

	結合時間間隔	初期水深 h_1	層厚 L	透水係数 K
Case1-1	60min	10m	50m	$1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$
Case1-2	60min	10m	50m	$1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$
Case2-1	30min	10m	50m	$1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$
Case3-1	120min	10m	50m	$1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$

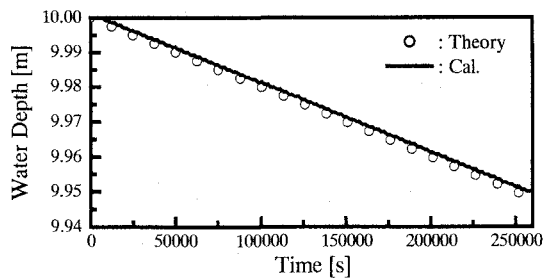
である。両図より、計算値と理論値はほぼ一致しており、氾濫モデルと地下水モデルの結合方法は適切であるといえる。図-3(a)と(b)を比べると、透水係数が大きい Case1-1 の方で水位の低下が大きく、Case1-2 では小さい。このことから、本研究で構築した結合モデルは土壌性質の違いによる地下浸透の影響を表現可能であるといえる。

次に、Case1-1, Case2-1, Case3-1 の計算結果の比較から、氾濫計算と地下水計算の結合時間間隔について検討する。図-4 に、同3ケースに対する計算結果と理論値を示す。Case1-1, Case2-1 の計算結果は、その違いが全く認められず、さらに理論値をほぼ再現している。しかしながら、結合時間間隔が120分と長く設定した Case3-1 では、計算値は滑らかに変化していない上、理論値との間にずれが少し生じている。このことは、過大な結合時間間隔の設定が計算を不安定にさせることを示唆している。さらに、透水係数の設定値によっても、結合時間間隔の最適値が異なることが推測できるため、透水係数の異なる地域を対象に計算する場合には、結合時間間隔の設定に配慮が必要であると考えられる。しかしながら、透水係数を変数とした結合時間間隔の最適値を算定することは困難であると思われる。

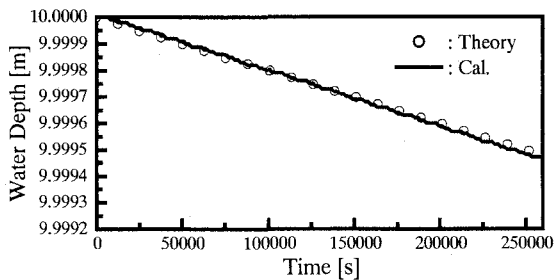
4. 一様勾配を有する河川氾濫域への適用

(1) 計算条件

第3章では、地表水の地下浸透のみの影響について検討したが、洪水氾濫のように表面水が時空間的に変化する場を対象に検証計算をする必要がある。そこで、図-5



(a) Case1-1



(b) Case1-2

図-3 地表水位の時間変化

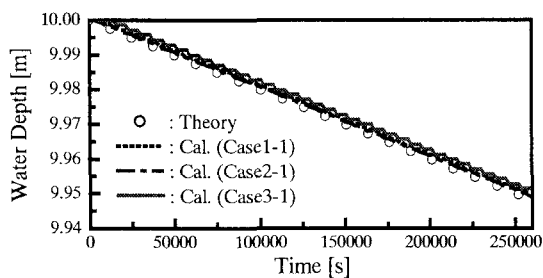


図-4 モデル間の結合時間間隔に関する検討

に示す河川氾濫域に結合モデルを適用し、氾濫水の動的挙動に伴う地下水頭の時空間変化について考察する。

計算領域は直線河川とその左右に広がる氾濫原で構成され、河川勾配と氾濫原の河川流下方向の勾配は $1/10000$ である。地質構造に関しては2つの帯水層とそれらの間に加圧層を設けた。透水係数と比貯留係数は図-5に示すとおりである。本計算では、短い計算時間で強制的に洪水氾濫を発生させたいため、河川の上流端流入量を $50\text{m}^3/\text{s}$ とし、下流端の境界条件を不透過条件とした。したがって、河川水は下流側で堰き止められるため、洪水氾濫が下流端から発生し上流側へと広がっていくことになる。なお、氾濫流モデルと地下水モデルの時間ステップ間隔をそれぞれ 0.5s 、 1h とし、両モデルの結合時間間隔を 1h と設定した。氾濫原の粗度係数に関しては、Xanthopoulos ら⁹⁾が算定した値を参考に、耕作地に相当する値 0.025 を氾濫原全体に設定した。地表面の透水係数は河川、氾濫原ともに $1.0 \times 10^{-7}\text{m/s}$ とし、地表面堆積物の高さは 1.0m と設定した。

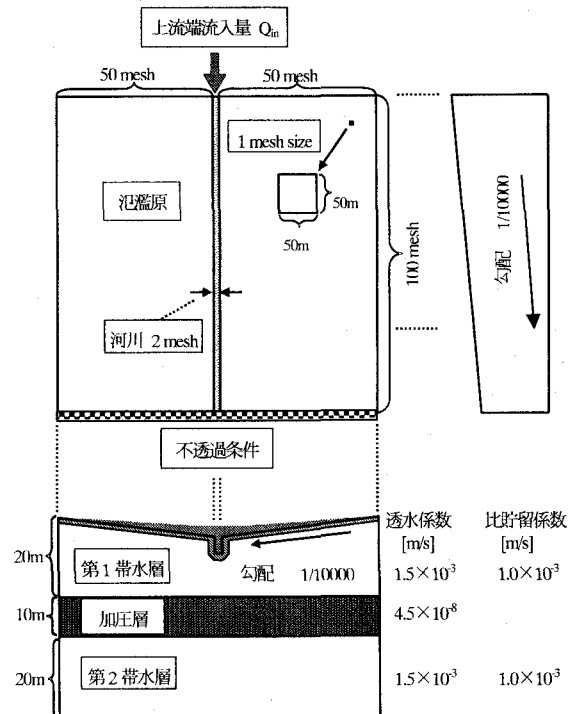
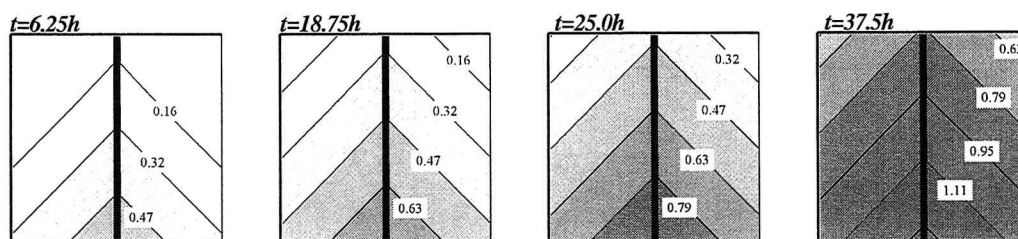


図-5 一様勾配を有する河川氾濫域のモデル地形

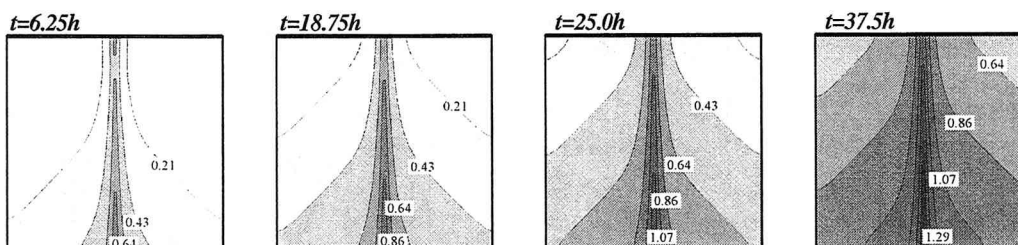
(2) 計算結果と考察

河川氾濫に伴う地下水の解析結果を図-6に示す。(a)は氾濫水深、(b)は第1帯水層の水頭分布の経時変化を表す。図-6(a)からわかるように、下流端の不透過条件のため、時間の経過とともに、下流側から洪水氾濫が発生し、上流側に伝播していく。定量的な評価ではないが、この計算結果は予想した傾向を示すことから、洪水氾濫流の再現性は良好であると考えられる。一方、図-6(b)から、第1帯水層での地下水頭は氾濫状況に応じて変化していることが確認される。氾濫水の動的挙動と同様、下流側から上流側へと水平方向の地下水流動が生じている。したがって、氾濫流モデルと地下水流モデルの動的な結合が良好に機能していることが実証される。紙面の関係上図示しないが、第2帯水層における地下水頭の経時変化をみると、第1帯水層と第2帯水層では地下水頭の空間分布に差異が生じており、水平方向流動のみならず、加圧層を通過する鉛直方向流動も発生していることが確認された。

以上のことから、結合モデルは洪水氾濫による地下水頭の影響を表現しているといえる。さらに、第3章で述べた降水位透水試験による理論値との比較結果と合わせて判断すると、本研究で構築した結合モデルは、実際の地形に適用した場合においても、氾濫流に伴う地下水頭の変化特性を表現することができると考えられる。



(a) 氾濫水位 [m]



(b) 第1帯水層の水頭分布 [m]

図-6 一様勾配を伴う河川流域の洪水氾濫-地下水頭の計算結果

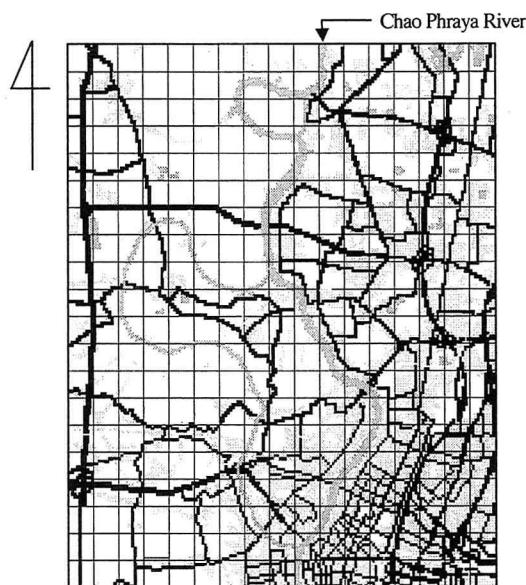


図-7 計算対象領域 (バンコク北部地区)

5. バンコク北部地区への適用

(1) 計算対象領域の概要と計算条件

本章では、構築した結合モデルを、図-7に示すバンコク北部地区 (Rathum Thani~Nonthaburi) に適用する。対象地域は、東西 17km、南北 20km であり、中央にチャオプラヤ川が北から南に流れている。左岸側には都市部が広がり道路網 (図中の黒線) も発達し、右岸側は主に耕作地である。この地域は上・下流側でボトルネックが存在し、1995 年の洪水時では堤防が決壊し、大規模な氾濫が生じている。さらに、都市部の発達により地下水問題も取り上げられている地域である。

河川の設定条件は、上流端の流量が計算開始 4 時間で $3000\text{m}^3/\text{s}$ となるように線形的に増加させ、河川下流端の

流出量を $100\text{m}^3/\text{s}$ とした。地表面の利用形態を、未開発地・水田、河川・湖沼、都市部、道路・線路に 4 分類し、粗度係数を $0.025\sim0.067$ の範囲で設定した⁵⁾。一方、地表面透水係数は土地利用形態によらず $1.0\times10^{-7}\text{m/s}$ と一定にした。地質構造は、現地データを入手していないため、不圧帯水層、加圧層、被圧帯水層の 3 層構造を仮定し、前章で用いた透水係数と比貯留係数の値を採用した。初期水頭はゼロとした。水平方向のメッシュ間隔を $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$ と設定し、氾濫流モデルと地下水モデルの計算時間ステップ間隔をそれぞれ 0.5s, 1h, モデル間の結合時間間隔を 1h とした。また、線路の高さ設定に関しては式(2), (3)中の地盤高 z_b を変えることにより考慮した。

(2) 計算結果と考察

図-8 は氾濫水位と各帯水層の水頭の経時変化である。なお、図-8(a)中の点線は線路を示す。図-8(a)から分かるように、上流側から氾濫が始まり、徐々に氾濫域が広がっている。一方、下流部では氾濫水が線路 (高さ 2.0m) を回りこんでいく様子がみられる。横倉・須賀⁶⁾が指摘しているように、これは盛土形式の線路が堤防の役割をしており、東南アジア諸国の洪水氾濫の一特色を表している。図-8(b), (c)をみると、河川底面を中心に高い地下水頭分布が広がっており河底からの浸透影響が大きいといえる。また、氾濫に伴い地下水頭が時空間的に変化していることも認められる。このことは洪水氾濫が地下水システムに何らかの影響を及ぼしていることを示す。したがって、チャオプラヤ川流域では洪水氾濫と地下水の問題を包括的に取り扱うことが重要であると推察される。しかし、本計算で使用した帯水層定数は現地データに基づいていないため、今後より詳細に検討する必要がある。

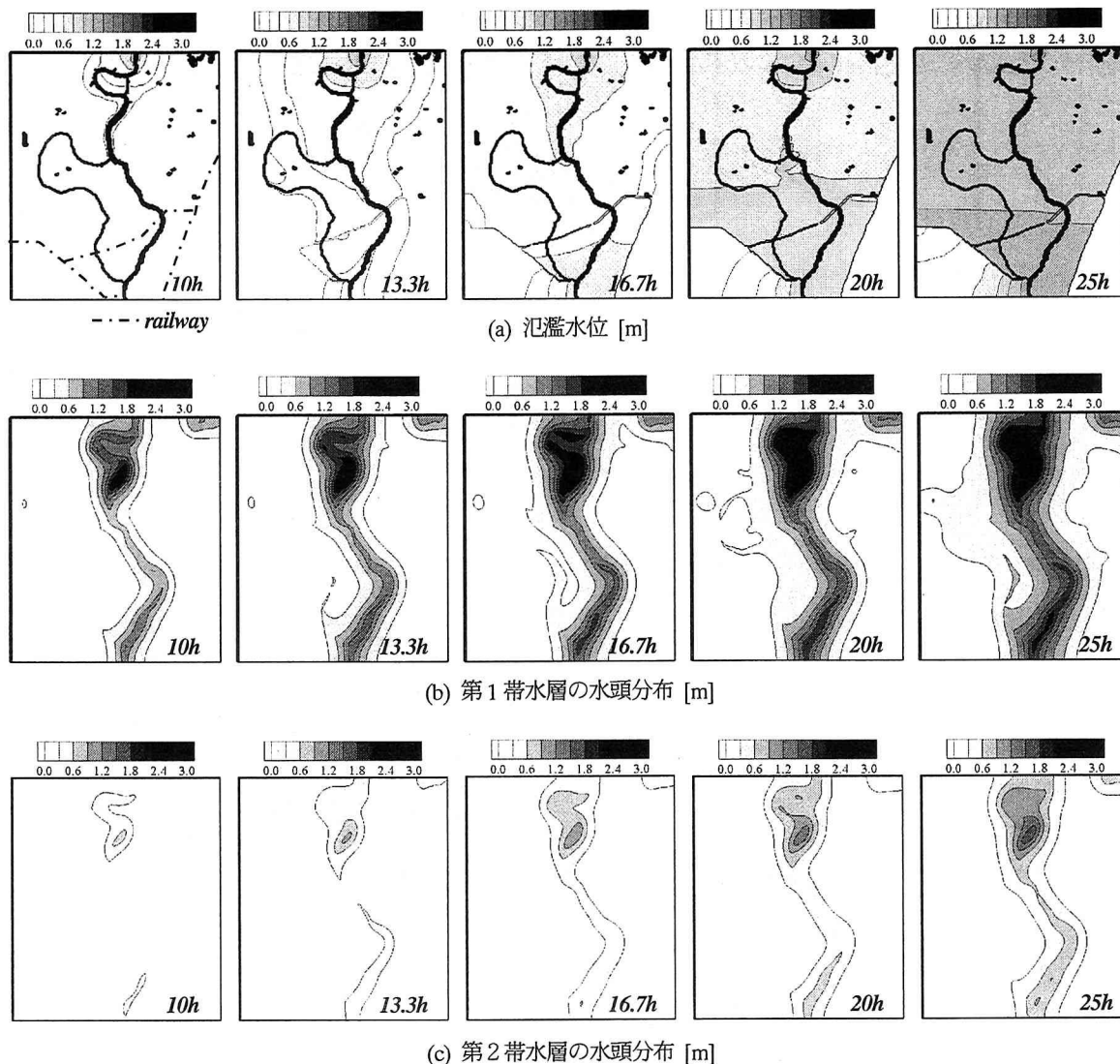


図-8 バンコク北部地区における氾濫水位と地下水頭の経時変化

6. おわりに

本研究では、チャオプラヤ川流域の水問題の現状をふまえ、洪水氾濫と地下水を同時に解析できる洪水氾濫－地下水結合モデルを構築した。そして、降水位透水試験の理論式と比較することにより、本数値モデルの妥当性を検証した。また、一様勾配河川域での洪水氾濫、バンコク北部地区におけるチャオプラヤ川の洪水氾濫の解析に結合モデルを適用した。その結果、氾濫水の動的挙動に伴い、帯水層の水頭が時空間的に変化することがわかり、洪水氾濫が地下水システムに何らかの影響を及ぼしていることが判明した。

今後、地下水システムへの洪水氾濫の影響がより顕著に現れるといわれるチャオプラヤ川流域Chai Nat～Sing Buri地区に結合モデルを適用し、現地データに基づいた洪水氾濫－地下水システムを議論する予定である。

参考文献

- 1) 岩佐義朗：数値水理学，丸善，pp.144-149，1995。
- 2) 岩佐義朗，井上和也，水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，pp.305-317，1980。
- 3) Arlen W. Harbaugh, Edward R. Banta, Mary C. Hill, and Michale G. McDonald: MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground Water Model - User Guide To Modularization Concepts And Ground-Water Flow Process, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 2000。
- 4) 河野伊一郎：地下水工学，鹿島出版会，pp.88-89，1989。
- 5) 土木学会：水理公式集，丸善，p131，1999。
- 6) 横倉順治，須賀堯三：開発途上国の氾濫原道路とその橋梁計画のありかた 河川防災の視点から，水工学論文集，第44巻，pp.337-342，2000。

(2002. 9. 30受付)