



地下水位変動に伴う地盤の長期沈下

籠橋, 慶太
飯塚, 敦
河井, 克之

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 16:23-31

(Issue Date)

2012-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011370>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011370>



地下水位変動に伴う地盤の長期沈下

Long-term subsidence of foundation according to fluctuation of groundwater level

籠橋 慶太¹⁾

Kagohashi Keita

飯塚 敦²⁾

Atsushi Iizuka

河井 克之³⁾

Katsuyuki Kawai

概要：日本海沿岸部をはじめとする積雪地帯では、消雪方法の一つとして地下水の利用が行われている。消雪方法として他に塩化ナトリウム等の融雪剤が挙げられるが、効率面または経済面で優位であることから地下水の利用が幅広く行われている。このような地域では近年、地下水の汲み上げが原因と考えられる継続的な地盤沈下の発生が報告されている。兵庫県北部に位置する豊岡盆地でも同様の問題を抱えている。そこで、本研究では豊岡盆地を事例として、地下水位変動を起因とする地盤沈下のメカニズムの推定を行う。また、そこから地盤沈下の抑制対策に繋げることを目的とする。

キーワード：繰返し載荷、構造破壊、クリープ、上負荷面、下負荷面

1. はじめに

豊岡盆地では約 50 年前から消雪を目的とした地下水の利用が行われてきた。そのため、現在では地下水位変動が原因と考えられる地盤沈下が継続的に発生している。地盤沈下による影響は、道路や河川・砂防といった場所で段差の発生等の事例が報告されている。また、2004 年に発生した台風 23 号では、洪水により盆地を流れる円山川の堤防が決壊し、沿岸地域に甚大な浸水被害が及んだ。これは堤防付近で地盤沈下が発生しており、決壊が発生しやすい状況であったことが報告されている。このように、地盤沈下による影響は様々な形で表れていることが分かり、その抑制対策が急がれる。

本研究では豊岡盆地内の豊岡と新田の 2 点(図-1)を対象とした。これらで地盤沈下シミュレーションを行い、地盤沈下の要因を探る。

(1) 地盤沈下の現況

図-2 に豊岡と新田における観測地下水位と累積沈下量の推移を示す。約 17 年間で豊岡では約 14cm, 新田では約 24cm 累積沈下量が観測された。

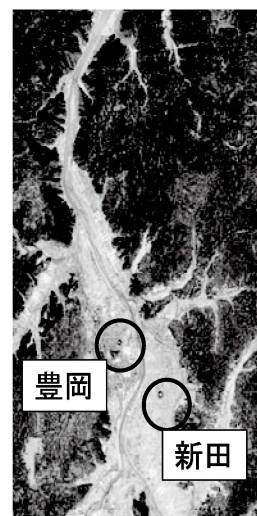


図-1 豊岡盆地地図¹⁾

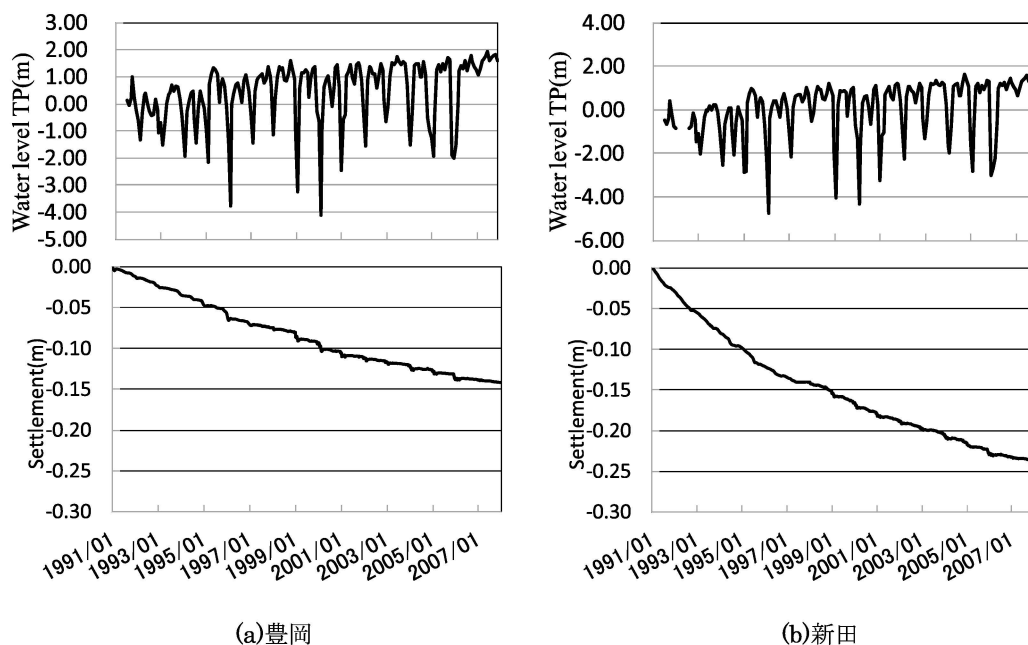


図-2 豊岡と新田の観測地下水位(上図)と観測沈下量(下図)

豊岡盆地では消雪を目的として冬期に集中的に地下水を汲み上げる。図-2 の観測地下水位に見られる急激な低下はそのためであると考えられる。また、観測沈下量について、地下水位が急激に低下する冬期に比較的大きな沈下の発生が観測された。これは、地下水位の低下が沈下の起因となっていることが推測される。

豊岡盆地において、地下水の揚水量に対して涵養量は十分に大きい。そのため、冬期において集中的に揚水を行うことで一時的に地下水位は低下するが、その後夏期に向かうにつれて水位は再び元の状態まで回復する。

(2) 一次元 FEM 圧密沈下解析

図-3 は検討委員会による豊岡の一次元 FEM 圧密沈下解析結果²⁾を示す。1965 年に地下水揚水が始まったと考えられているが、1991 年まで地下水変動が観察されていないため、その期間の地下水位変動を図中に示すように仮定している。

解析結果は観測値を全く再現できていないことがわかる。そこで、豊岡の地盤沈下は通常の圧密沈下だけでなく何らかの複合的要因が関与していることが考えられる。

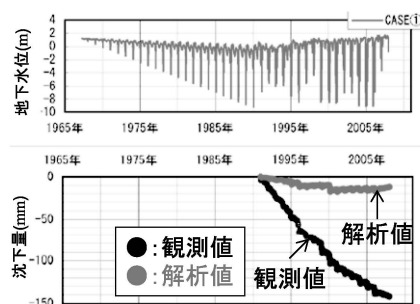


図-3 一次元 FEM 圧密沈下解析結果

(3) 複合的要因の仮定

検討委員会の解析結果から、豊岡盆地の沈下挙動は通常の圧密沈下のみでは再現に至らないと考えられる。そこで本研究では複合的な要因として、「繰返し载荷に伴う塑性ひずみの累積」、「構造破壊」、「クリープ」を仮定した。

a) 繰返し载荷に伴う塑性ひずみの累積

豊岡盆地における地下水位変動の 1 年間のサイクルは冬期に消雪を目的とした揚水のために大きく低下し、夏期には再び回復する。地盤内では水位変動に伴い応力変化が生じる。この応力変化が発生する過程で、過圧密領域から正規圧密領域へ移行する際に塑性ひずみが発生する。豊岡盆地の地下水位は低下、回復のサイクルを毎年繰り返しているため、過圧密領域内にお

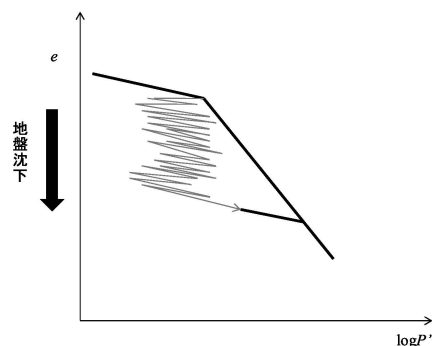


図-4 繰返し载荷に伴う塑性ひずみの累積に伴う $e\text{-log} p'$ 曲線の変化

いても繰返し载荷によって塑性ひずみが累積されると考える。この塑性ひずみの累積が地盤沈下の要因の一つとなっていると推測する。

図-4 は繰返し载荷に伴う塑性ひずみの累積による $e\text{-log}p'$ 曲線の変化を示す。過圧密領域内で塑性ひずみが発生するために、過圧密ラインは下方へシフトする。土の構造自体は保たれているので正規圧密ラインは一定であり、間隙比 e の減少に伴い降伏応力 p_c' は増加する。

b) 構造破壊

自然堆積粘土は年代効果によって土粒子間に粘土特有の構造を持つ。高位構造をもつ粘土の場合、かく乱すると構造が低位化するため、圧密が生じる。豊岡盆地では約 50 年前から消雪場水が行われてきたが、長期水位変動の影響により塑性圧縮を伴う軟化が生じ、土粒子間の構造が崩れることで継続的な地盤沈下が発生すると考える。

図-5 は圧縮曲線に対するかく乱の影響を示す。①はかく乱試料、②は中程度のかく乱試料、③は完全かく乱試料に対する圧縮曲線を示す。かく乱に伴い降伏応力 p_c 、及び圧縮指数 C_c の減少が見られる。また、圧密に伴い各圧縮曲線は徐々に一致する傾向にある。これは高位構造(かく乱)にある試料も、圧縮ひずみの増大に伴い徐々にかく乱され、低位構造(完全かく乱)試料と同じ状態になることを示す。

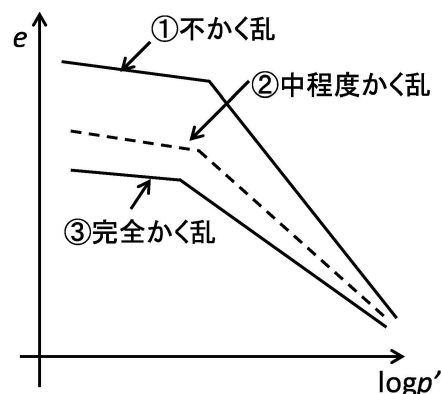


図-5 $e\text{-log}p'$ 曲線に対するかく乱の影響

c) クリープ

粘土は圧縮応力を加えられると骨組構造を変化させて一旦抵抗するが、圧縮応力がそのまま維持されると、骨組構造は圧縮を伴いながら抵抗力のある形に徐々に変化する。前者における圧縮を瞬時圧縮、後者における圧縮を遅延圧縮(クリープ)と呼ぶ。圧密試験では前者を一次圧密、後者を二次圧密と呼ぶ。

図-6 には粘土の圧縮と経時効果を示す。正規圧密粘土の等時圧縮曲線群のうち最右端は瞬時圧縮によるものとみる。正規粘土に圧縮応力を加えると一旦瞬時圧縮曲線にそって $a \rightarrow b$ と圧縮されるが、ある応力 p_0' を維持すると $b \rightarrow c$ 線に沿って遅延圧縮(クリープ)が進行する。 $b \rightarrow c$ 過程で粘土は強度を増し、圧縮性は減少する。この状態の粘土にさらに圧縮応力を加えると、 $c \rightarrow d$ 過程ではわずかな圧縮ひずみが発生し、 $d \rightarrow e$ 過程では急激に圧縮ひずみが増し瞬時圧縮過程に入る。

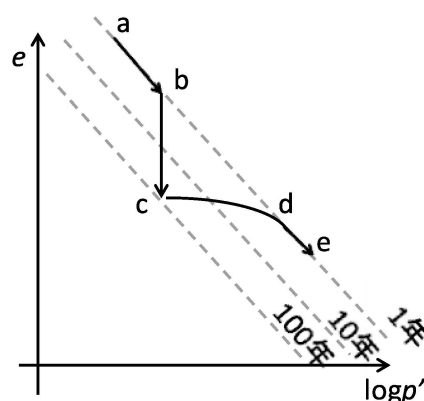


図-6 粘土の圧縮と経時効果

(4) 複合的要因の推測

図-7 に豊岡における 1998 年と 2007 年、新田における 1991 年と 2004 年の過圧密比 OCR の深度分布と $e\text{-log}p'$ 関係を比較したものを示す。必ずしも同一の粘土層における比較ではなく、ばらつきもあるが以下のことが考えられる。

a) 経年に伴い過圧密比 OCR の値が増加している。特に豊岡において顕著にみられる。これは、地水位変動により粘土層に载荷・除荷が繰返されたことで先行圧密圧力が増大したためと考えられる。(繰返し载荷に伴う塑性ひずみの累積)

b) ほぼ同一と考えられる粘土層の $e\text{-log}p'$ 関係を比較すると、時間経過に伴い正規降伏曲線が下方に移動している。これは、特に新田において顕著である。この原因として、まず一つに長期に渡り地下水位変動が生じてきたことで粘土層の間隙構造が崩れたと考えられる。(構造破壊) 地下水位は、標高 30m 付近に位置する下部帯水層から揚水されている。そのため、粘土層上部では地下水位変動の影響が比較的少ないと考えられ、このような粘土層の沈下は二次圧密であるクリープの影響が要因となっていると推測される。

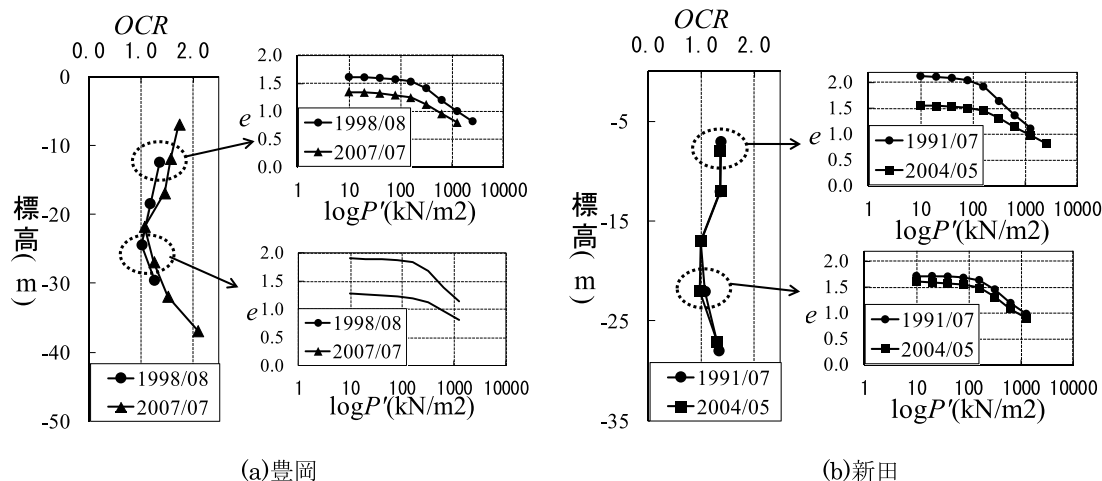


図-7 一次元 FEM 圧密沈下解析結果

2. 土/水連成有限要素解析

本研究では、豊岡と新田それぞれの実地盤をモデル化し、弾塑性構成モデルに組み込むことで沈下挙動の再現を試みる。複合的要因を考慮するために橋口³⁾による下負荷面、浅岡ら⁴⁾による上負荷面の概念が導入された有限要素解析プログラム DACSAR-SS を用いた。また、クリープについては DACSAR-M を用いた。以下、下負荷面と上負荷面の概念と解析の概要について述べる。

(1) 下負荷面、上負荷面の概念

本研究の解析では関口・太田モデルを降伏関数とした。しかし、関口・太田モデルにおいて塑性変形は正規圧密領域でのみ表現され、過圧密領域における繰返しせん断による塑性変形の蓄積は表現できない。そこで、橋口による下負荷面の概念を導入する。下負荷面の導入により、過圧密領域における塑性ひずみの発生、過圧密領域から正規圧密領域への滑らかな移行を表現できる。また、構造破壊による土の塑性変形については浅岡らによる上負荷面の概念を導入する。

下負荷面(subloading surface)と上負荷面(superloading surface)概念図を図-3.1 に示す。図中の p_i' 、 p_0' は、

$$p_i' = \frac{1}{3}(1+2K_i)\sigma_{vi}' \quad (1)$$

$$p_0' = \frac{1}{3}(1+2K_0)\sigma_{v0}' \quad (2)$$

で示される。 σ_{vi}' は初期応力、 σ_{v0}' は見かけの降伏応力である。

上負荷面では、構造が発達した土に対して降伏曲面の外側に相似形の曲面を想定し、その相似比を R^* とする。

$$R^* = \frac{\text{正規降伏曲面}}{\text{上負荷面}} \quad (0 < R^* \leq 1) \quad (3)$$

土の構造が崩れることで塑性変形が発生すると共に、上負荷面は次第に降伏曲面に収縮する。収縮速度を式(3.1)に示す。

$$\dot{R}^* = \frac{a}{D} (R^*)^b (1-R^*)^c \|\dot{\epsilon}^p\| \quad (4)$$

ただし、式中の a 、 b 、 c は上負荷面の収縮速度を制御するパラメータであり、 D はダイラテンシー係数、 $\dot{\epsilon}^p$ は塑性ひずみ速度テンソルである。

次に、上負荷面の内側に相似形の下負荷面を考える。常に現応力は下負荷面上にある。ここで、上負荷面と下負荷面の相似比を R とし、過圧密比として表現される。

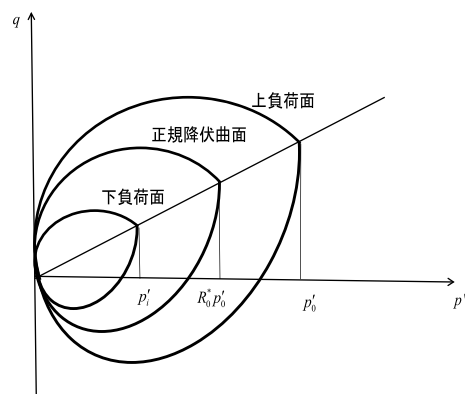


図-7 上負荷面、下負荷面の概念図

$$R = \frac{\text{下負荷面}}{\text{上負荷面}} \quad (5)$$

下負荷面は塑性変形に伴い次第に膨張し、その膨張速度は、式(3.2)の様に表現される。

$$\dot{R} = -\frac{m}{D} \ln R \|\dot{\epsilon}^p\| \quad (6)$$

ここで、フィッティングパラメータ m は下負荷面の膨張速度を制御するパラメータである。下負荷面パラメータ m は、 $m \rightarrow \infty$ の場合は古典弾性モデルに帰着し、 m 値の減少に従い塑性ひずみの累積が顕著に表現される。

(2) 解析方法

図-8 には、豊岡と新田それぞれで行われたボーリング調査結果をもとに作成した解析モデルを示す。豊岡、新田ともに上から順に表層、砂層、粘土層と堆積している。有限要素メッシュは約 1m 毎に区切る。また、粘土層については 4~5m 毎に区切ることで、豊岡では上から粘土層①~④、新田では上から粘土層①~⑤とした。

解析方法について、観測地下水位を参考に解析モデル下端面に水頭変化を与えることでシミュレーションを行った。これは、豊岡盆地では粘土層の下に位置する下部帯水層から揚水を行っていることを参考にしている。解析期間について、豊岡と新田それぞれで二度行われたボーリング調査の時期を参考に、豊岡では 1998 年~2008 年、新田では 1991 年から 2004 年としている。

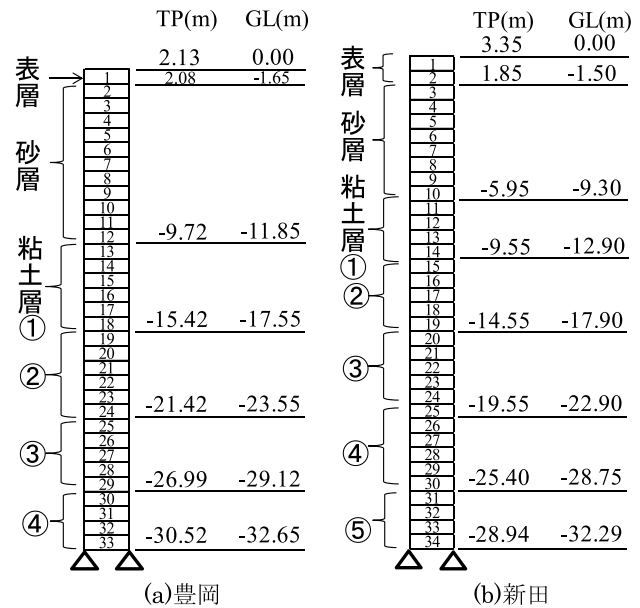


図-8 ボーリング調査をもとに作成した解析モデル

(3) 材料パラメータ

地盤沈下の複合的要因として、繰返し载荷による塑性ひずみと構造破壊、クリープを仮定した。繰返し载荷による塑性ひずみについては下負荷面パラメータ m 、構造破壊については上負荷面パラメータ R^* 、 a 、 b 、 c 、クリープについては α (二次圧密係数)、 $\dot{\nu}_0$ (初期体積ひずみ速度) をフィッティングパラメータとした。また、水頭変化により粘土層に及ぶ応力変化の影響は透水係数 k (m/day) の増大に伴い大きくなるため、透水係数についてもフィッティングパラメータとした。決定の流れとして、まず豊岡と新田それぞれの室内試験結果を参考に降伏応力の比較からパラメータ R^* 、観測値を参考に沈下速度の比較から b 、 c の決定を行った。次に、非排水三軸シミュレーションからパラメータ m と材料パラメータ κ 、圧密シミュレーションの比較からパラメータ a 、透水係数 k を決定した。

表層土、砂層土について線形弾性体と仮定した。材料パラメータはデータが少なく決定が困難であるため西田の論文⁵⁾を参考とし、表-1 に示すよう決定した。その他、材料パラメータについては Iizuka and Ohta⁶⁾の手法を参考に表-1、2 に示すように決定した。粘土層は弾塑性体として扱い、またクリープを考慮する際には弾粘塑性体と仮定した。材料パラメータは Iizuka and Ohta¹¹⁾の手法を参考に、表-2、3 に示すように決定した。

表-1 表層土、砂層土の材料パラメータ

	$\tilde{\lambda}$ (kN/m ²)	$\tilde{\mu}$ (kN/m ²)	K_i	k_x, k_y (m/day)
表層土	8879	4577	1.000	0.010
砂層	3442	1773	1.000	0.042

表-2 材料パラメータ(豊岡)

		粘土層①	粘土層②	粘土層③	粘土層④
	D	0.029	0.035	0.050	0.028
	A	0.486	0.450	0.475	0.500
	M	1.601	1.348	1.375	1.383
	ν'	0.330	0.330	0.330	0.330
	k_x, k_y (m/day)	3.13E-04	1.88E-04	3.29E-04	9.47E-05
	K_0	0.622	0.594	0.645	0.498
	K_i	0.698	0.633	0.650	0.557
	λ	0.243	0.269	0.421	0.174
	e_0	1.584	1.532	1.898	1.224
下負荷面	m	2.0	1.0	2.0	3.0
上負荷面	R^* 初期値	0.81	0.83	0.75	0.49
	a	4.0	4.0	4.0	4.0
	b	1.0	1.0	1.0	1.0
	c	1.0	1.0	1.0	1.0
クリープ	α	8.18E-03	8.18E-03	8.18E-03	8.18E-03
	$\dot{\nu}_0$	1.15E-04	1.15E-04	1.15E-04	1.15E-04

表-3 材料パラメータ(新田)

		粘土層①	粘土層②	粘土層③	粘土層④	粘土層⑤
	D	0.029	0.032	0.041	0.041	0.041
	A	0.486	0.486	0.450	0.475	0.500
	M	1.601	1.601	1.348	1.366	1.383
	ν'	0.330	0.330	0.330	0.330	0.330
	k_x, k_y (m/day)	1.08E-04	8.68E-05	9.72E-05	5.25E-05	1.51E-05
	K_0	0.661	0.574	0.619	0.577	0.553
	K_i	0.738	0.652	0.619	0.596	0.627
	λ	0.291	0.252	0.316	0.321	0.273
	e_0	2.090	1.403	1.596	1.712	1.401
下負荷面	m	2.000	2.000	1.000	2.000	3.000
上負荷面	R^* 初期値	0.70	0.90	1.00	0.92	0.800
	a	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
	b	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	c	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
クリープ	α	8.18E-03	8.18E-03	8.18E-03	8.18E-03	8.18E-03
	$\dot{\nu}_0$	1.64E-04	1.64E-04	1.64E-04	1.64E-04	1.64E-04

3. 解析結果

まず、繰返し載荷と構造破壊の沈下に対する影響度合を確認することを目的として、DACSAR-SSによる解析を行った。豊岡と新田それぞれの解析結果を図-9に示す。

豊岡の解析結果では、地下水位変動が激しい冬期に加え、水位変動が比較的緩やかな夏期の沈下挙動も観測値に近い結果となっているといえる。新田の解析結果では、観測結果を全く再現できていない。これは、新田の地盤沈下は地下水位変動との連動が豊岡に見られるほど確認されず、夏期冬期に関わらず1年を通じて継続的に沈下が発生しているためと考えられる。新田では、繰返し載荷と構造破壊のみでは観測値を再現することが出来ないと推測される。

DACSAR-SSによる解析による解析では、粘性を考慮することができない。そこで、クリープの影響を確認することを目的として、粘性を考慮したDACSAR-Mによる解析を行った。ただし、こちらの解析では構造破壊の影響を考慮することはできない。DACSAR-Mによる豊岡と新田それぞれの解析結果を図-10に示す。

新田の解析結果について1年を通じた継続的な沈下が再現されており、観測値に近い値を再現していると考えられる。新田の沈下では繰返し載荷に加え、クリープによる影響が大きいとされる。豊岡の解析結果では、こちらも1年を通して継続的に沈下が発生する結果となったが、観測値を再現できていないことが分かる。

以上から、豊岡では繰返し載荷と構造破壊、新田では繰返し載荷とクリープが大きく沈下に影響していると考えられる。

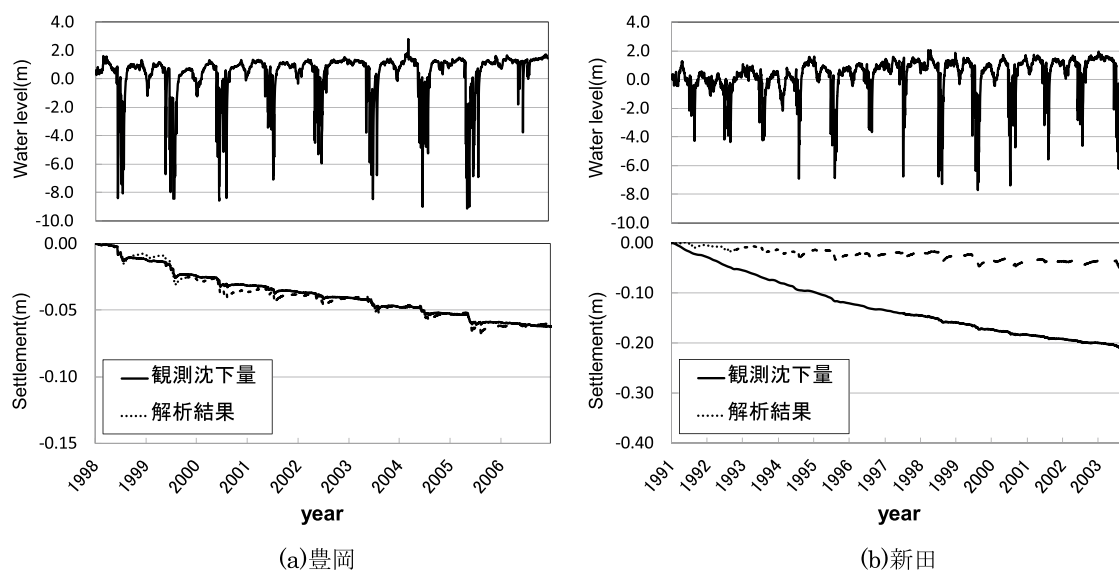


図-9 上・下負荷面を考慮した解析結果

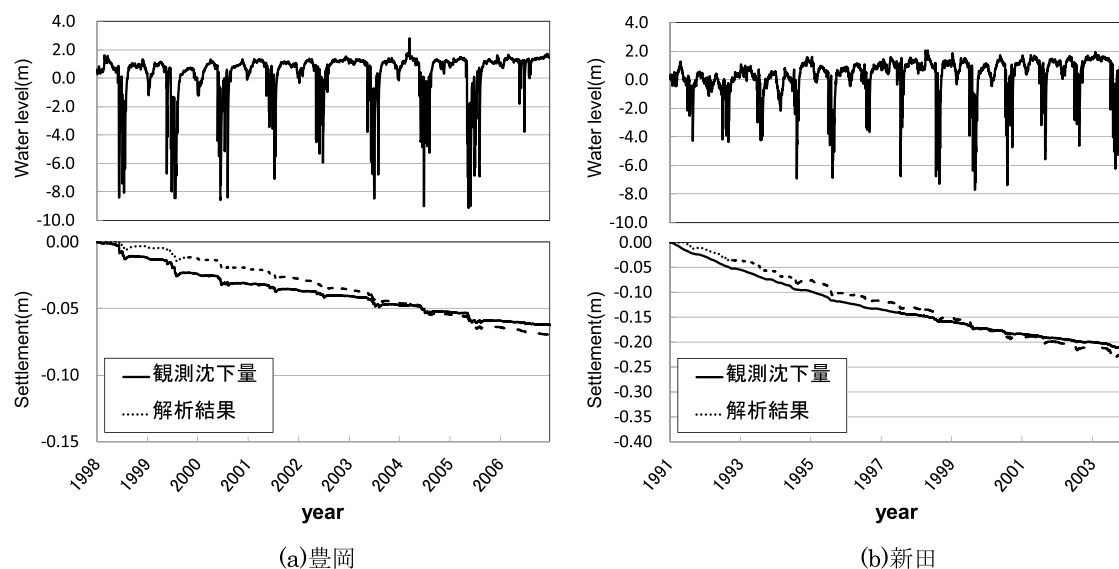


図-10 下負荷面・クリープを考慮した解析結果

4. 考察

(1) 複合的要因の検討

豊岡と新田では、複合的要因に関して異なる解析結果が得られた。これは堆積履歴の違いによるものと考えられる。豊岡盆地の豊岡盆地では、盆地中心を円山川が流れており、その支流として出石川が流れている。円山川の特徴として出石川との合流部までは河川勾配が比較的大きく土砂運搬能力が大きい為、浅層部に礫質土層が厚く堆積する。一方、出石川は円山川との合流部までの河川勾配が比較的小さく、土砂運搬能力も低い為、浅層部に砂質土やシルトが堆積しているという特徴がみられる。かつて円山川と出石川の合流部が現在より下流にあったと推測され、現在の円山川の左岸側と右岸側では堆積環境が異なることが推測される。豊岡は円山川の左岸側、新田は右岸側に位置していることから地盤の堆積環境の違いが原因の一つとして、沈下の要因で異なる結果が得られたと考えられる。

(2) 沈下予測と抑制対策の検討

豊岡地盤沈下対策検討委員会では、地盤沈下抑制に関する提言として10年間で沈下を50%削減することを最終目標とし、その中間目標として5年間で25%の雪消揚水削減により25%の沈下削減を目標としている。そこで、本研究の解析結果をもとに対策案の検討を行う。

図-11には豊岡、新田それぞれの地盤沈下について2007年までの解析結果と、2007年から2012年12月までの沈下予測に関する解析結果を示す。なお、2007年から2012年までの地下水位に関して、2002年から2007年までのものを参考とした。

豊岡の沈下に関して、繰返し载荷に加え、構造破壊の影響が大きいと推測された。そのため、沈下予測では削減した場合とそうでない場合について異なる結果が見られた。豊岡では揚水量を削減することで沈下を抑制できると推測される。

新田の沈下に関して、繰返し载荷に加え、特にクリープ現象の影響が大きい結果だった。クリープ現象は、正規圧密状態にあれば応力変化がない状態で塑性ひずみが発生するため、解析結果では抑制対策による効果は期待されない結果となった。そのため、従来の揚水量の範囲であれば、揚水が沈下促進に大きな影響を与えることは考えにくい。また、豊岡と新田ともに沈下量が低下していることが分かり、沈下は収束傾向にあると考える。

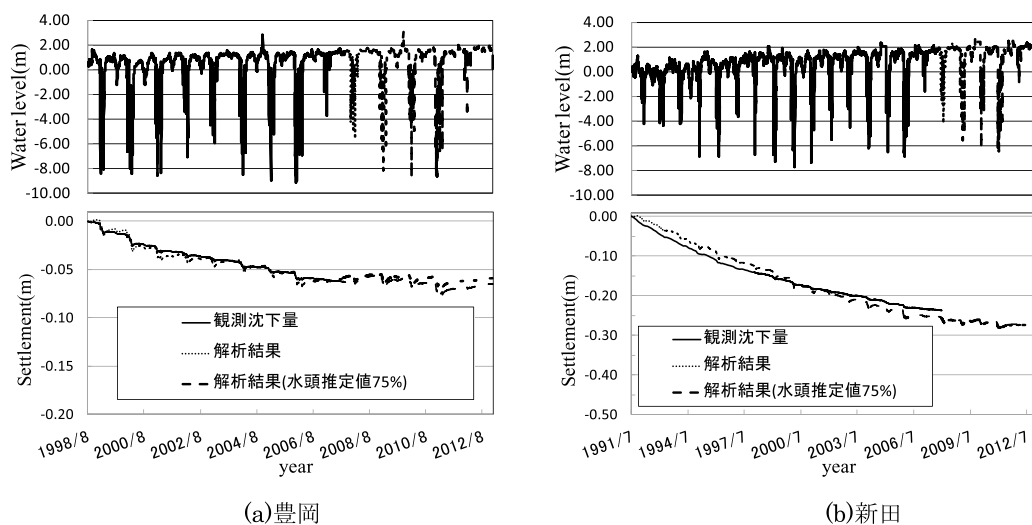


図-11 地盤沈下予測

5. 結論

本研究では、消雪を目的として地下水揚水を行う地域で発生する地盤沈下問題について、豊岡盆地を事例としてそのメカニズムを検証した。

対象とした2地点の解析結果について、豊岡では繰返し塑性と構造破壊、新田では繰返し塑性とクリープが複合的要因となっていると推測された。豊岡と新田で異なる結果となったのは、堆積履歴の違いによるものと推測される。また、解析結果をもとに行った沈下予測結果から、豊岡では揚水量削減により沈下の抑制が期待されることが分かった。新田では、揚水削減による効果は見られなかった、しかし、豊岡と新田ともに沈下の収束傾向に向かうことが分かり、従来の揚水量であっても過剰な沈下は発生しないと推測される。

参考文献

- 1) 豊岡河川国道事務所：空から観る円山川
- 2) 豊岡地盤沈下対策検討委員会資料
- 3) 橋口公一：弾塑性論の新体系—下負荷面の概念—，土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.691-710, 2007.7
- 4) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, No.40, Vol.2, pp.99-110, 2000
- 5) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002
- 6) 西田博文：上部構造物の品質評価法の開発に関する研究，博士論文，神戸大学，2005
- 7) Iizuka, A. and Ohta, H.: A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.

筆者：1) 籠橋慶太，株式会社神戸製鋼所；2) 飯塚敦，都市安全研究センター，教授；3) 河井克之，都市安全研究センター，准教授

Long-term subsidence of foundation according to fluctuation of groundwater level

Kagohashi Keita

Atsushi Iizuka

Katsuyuki Kawai

Abstract

In snow coverage area, ground water has been used for snow melting for a long time. Using ground water is the best way for economy and efficiency. In recent years, generating of land subsidence has been reported in such area. In Toyooka basin, located in north of Hyogo, it has a similar problem. It snows much in Toyooka, records 400-cm snowfall, and ground water has been used for snow melting. Subsidence has also occurred in Toyooka. Pumping of groundwater is considered to be the cause of subsidence. The ground water level decreases because ground water is used a large amount in winter. Fluctuation of the groundwater level affects the foundation. It is important clarify the mechanism of the ground behavior according to the groundwater level fluctuation to solve this problem. But we can't explain the factor in a usual consolidation subsidence alone. This problem involves complex factor. In this research, I consider two things as complex factors. One is accumulation of plasticity strain by repetition load, and another is structure disorder. I try to reappear of subsidence considering those complex factors and clarify the mechanism. It is a purpose of this research to propose better way of pumping groundwater.