

熱-水-応力連成モデルを用いた
ニアフィールド解析評価
(研 究 報 告)

1 9 9 9 年 2 月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Information Section,
Administration Division,
Tokai Works,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

熱-水-応力連成モデルを用いたニアフィールド解析評価 (研 究 報 告)

千々松 正和* , 谷口 航*

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における廃棄体定置後のニアフィールドでは、廃棄体からの放熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧の発生、周辺岩盤の地圧変化などの現象が相互に影響することが予想される。このような、熱-水-応力連成現象を評価することは、ニアフィールド環境の明確化の観点から重要な課題の一つである。

熱-水-応力連成現象を明らかにするためには、まず個々の現象に関わるメカニズムを明らかにする必要がある。そのため、不飽和ベントナイトの伝熱特性、浸潤特性、膨潤特性等に関する各種要素試験が実施されている。本論では、熱-水-応力連成モデルを用い、これらの基本特性試験の解析評価を行なうとともに、モデル上のパラメータを実験結果から逆解析的に算定した。また、各種要素試験の結果得られた物性値を入力データとしてニアフィールドの熱-水連成解析を実施し熱解析と連成解析の比較を行なうとともに、連成解析による緩衝材の再冠水時間の評価を実施した。解析の結果得られた知見は以下の通りである。

- (1) 室内実験から同定された温度勾配水分拡散係数 D_T を用い連成解析を実施した結果、緩衝材の初期含水比が7%、17%のいずれのケースも緩衝材内の最高温度は熱解析で得られた値より小さい結果となった。
- (2) 岩盤からの地下水の供給が無い場合、連成解析により得られる緩衝材内の最高温度は、初期含水比における熱物性値を用いて実施した熱解析で得られる最高温度より高くなる。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

- (3) 緩衝材の初期含水比が高く、温度勾配による水分移動が大きい場合は、連成解析により得られる緩衝材内の最高温度は初期含水比の熱物性値を用いて実施した熱解析で得られる温度より高くなる場合がある。しかし、この場合でも初期含水比が低い場合の熱解析の結果得られる最高温度よりは低くなる。
- (4) 緩衝材の再冠水時間は岩盤の圧力水頭に大きく影響を受けるが、岩盤の透水性が固有透過度で $10^{-13} \sim 10^{-18} \text{m}^2$ （透水係数約 $10^{-6} \text{m/s} \sim 10^{-11} \text{m/s}$ ）の範囲ではその透水性に影響を受けない。
- (5) 温度勾配による水分移動を考慮しない場合に比べ、考慮する場合は再冠水時間は長くなる。長くなる割合は岩盤の圧力水頭が小さいほど大きくなる。圧力水頭が1000mの場合は約2倍であるが、0mの場合は約10倍となる。
- (6) 岩盤の固有透過度が 10^{-15}m^2 （透水係数約 10^{-8}m/s ）程度の場合、緩衝材の初期含水比が再冠水時間に与える影響は小さく、岩盤の圧力水頭が支配的となる。
- (7) 岩盤に亀裂が少なく、岩盤の透水性が基質部の固有透過度と同程度となる場合は、再冠水時間は長くなる。また、緩衝材の初期飽和度にも再冠水時間は依存してくる。この場合も再冠水時間は岩盤内の圧力水頭に最も大きな影響を受け、その割合は岩盤の透水性が大きい場合に比べ大きくなる。岩盤内の圧力水頭が高い場合は岩盤の透水性が高い場合の再冠水時間の2倍程度であるが、圧力水頭が低い場合は再冠水時間が500～1000年程度となることも予想される。
- (8) 二次元軸対称モデルを用い、処分坑道の掘削による水圧低下を考慮したニアフィールドの熱-水-応力連成解析を実施した。その結果、岩盤内の初期圧力水頭が1000m程度であれば、再冠水時間は10～30年程度であると考えられる。

Coupled thermal, hydraulic and mechanical analysis in the near field for geological disposal of high-level radioactive waste

Masakazu Chijimatsu* , Wataru Taniguchi*

ABSTRACT

Geological disposal of high-level radioactive waste (HLW) in Japan is based on a multibarrier system composed of engineered and natural barriers. The engineered barriers are composed of vitrified waste confined within a canister, overpack and buffer material. Highly compacted bentonite clay is considered one of the most promising candidate buffer material mainly because of its low hydraulic conductivity and high adsorption capacity of radionuclides. In a repository for HLW, complex thermal, hydraulic and mechanical (T-H-M) phenomena will take place, involving the interactive processes between radioactive decay heat from the vitrified waste, infiltration of ground water and stress generation due to the earth pressure, the thermal loading and the swelling pressure of the buffer material. In order to evaluate the performance of the buffer material, the coupled T-H-M behaviors within the compacted bentonite have to be modelled. Before establishing a fully coupled T-H-M model, the mechanism of each single phenomenon or partially coupled phenomena should be identified and modelled physically and numerically. Under the unsaturated condition, the water movement within the buffer material has often been expressed as a simple diffusion model with the constant apparent water diffusivity. However, the water movement in the low permeable and unsaturated porous medium has been known as a transfer process in both vapor and liquid phases. Therefore, it is necessary to incorporate the two-phase contribution into the physical model. In this study, the water diffusivity of compacted bentonite is obtained as a function of water content and temperature.

* Tokai Works, Waste Management and Fuel Cycle Research Center,
Waste Isolation Research Division, Barrier Performance Group

The proposed water movement model is constructed by applying the Philip & de Vries' model and Darcy's law. While the water retention curve is measured by the thermocouple psychrometer, van Genuchten model is applied as the water retention curve because the smooth derivative of the water potential with respect to water content is necessary. The parameters of the van Genuchten model are obtained from the back analysis of infiltration test. The water movement due to thermal gradient and the swelling process are also considered. The parameters related to these phenomena are obtained from the laboratory tests by back analysis. The validation of T-H-M model for buffer material is carried out by comparing with the results of BIG-BEN experiment.

The coupled T-H-M processes in the near field are simulated with fully coupled model. The material of buffer is bentonite-sand mixture and dry density is 1.6 g/cm^3 . From the results, the following conclusions are obtained.

- (1) The maximum temperature in the buffer obtained by coupled analysis is compared with that obtained by thermal analysis. Two cases are considered as initial water content in the buffer. One is 7%, which corresponds to natural water content, and the other is 17%, which corresponds to optimized water content by the in-situ compaction. In both cases, maximum temperature in the buffer that is obtained by coupled analysis is lower than that obtained by thermal analysis.
- (2) Re-saturation time of buffer is strongly dependent on the water pressure in the rock mass. However, it is not dependent on the permeability of rock mass if the intrinsic permeability of rock mass is in the $10^{-13} - 10^{-18} \text{ m}^2$ range.
- (3) In the case that the intrinsic permeability of rock mass is approximately 10^{-15} m^2 , the initial water content in the buffer does not exert influence on the re-saturation time of buffer.
- (4) Two dimensional T-H-M analysis in consideration of pore pressure decreasing in the rock mass due to the excavation of drift is carried out. As a result, re-saturation time of buffer is in the 10 - 30 years range if the initial water pressure head is 1000m.

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 熱-水-応力連成モデルの支配方程式	3
2.1 応力の釣り合い式	3
2.2 地下水の連続式	4
2.3 エネルギー保存則	4
第3章 基本特性試験の解析	6
3.1 浸潤試験の解析	6
3.1.1 試験条件	6
3.1.2 パラメータ	6
3.1.3 解析モデル	7
3.1.4 解析結果	7
3.2 温度勾配下における水分移動の解析	14
3.2.1 概要	14
3.2.2 試験条件	14
3.2.3 パラメータ	14
3.2.4 解析モデル	15
3.2.5 解析結果	15
3.3 膨潤試験の解析	20
3.3.1 試験条件	20
3.3.2 パラメータ	20
3.3.3 解析モデル	20
3.3.4 解析結果	20
第4章 熱-水-応力連成モデルの確証解析	26
4.1 加圧浸潤試験の解析	26
4.1.1 概要	26
4.1.2 加圧浸潤試験	26
4.1.3 浸潤試験の解析	26

4.2 緩衝材大型試験の解析	29
4.2.1 概要	29
4.2.2 解析条件	29
4.2.3 パラメータの設定	29
4.2.4 解析結果および考察	30
第5章 ニアフィールド連成解析（熱解析と連成解析の比較）	38
5.1 簡易モデルによる比較	38
5.1.1 解析条件	38
(1) 解析モデル	38
(2) 解析物性値および初期条件，境界条件	38
(3) ガラス固化体の発熱特性	41
5.1.2 解析結果	41
(1) オリジナルの発熱量を用いた計算	41
(2) 2/5 の発熱量を用いた計算（初期含水比が 7% のケース）	44
(3) 1/2 の発熱量を用いた計算（初期含水比が 17% のケース）	52
5.2 釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験結果を用いた比較	60
5.2.1 概要	60
5.2.2 解析モデルおよび解析条件	60
5.2.3 解析物性値	60
5.2.4 結果の比較点	62
5.2.5 解析結果	63
第6章 ニアフィールド連成解析（緩衝材の再冠水時間の評価）	70
6.1 簡易モデルによる検討	70
6.1.1 解析条件	70
(1) 解析モデル	70
(2) 解析物性値および初期条件，境界条件	70
(3) 解析ケース	70
6.1.2 解析結果	75
(1) 2/5 の発熱量を用いた計算（初期含水比が 7% のケース）	75
(2) 1/2 の発熱量を用いた計算（初期含水比が 17% のケース）	86
6.1.3 まとめ	95

6.2 二次元軸対称モデルを用いた検討	96
6.2.1 解析の目的	96
6.2.2 解析条件	96
(1) 解析物性値	96
(2) 解析モデル	100
(3) 初期条件および境界条件	100
(4) 廃棄体の発熱特性	100
6.2.3 解析結果	101
(1) 結果の比較点	101
(2) 熱解析結果	102
(3) 連成解析結果	102
(4) オーバーパック周囲の緩衝材の再冠水時間の比較	117
第7章 おわりに	121
【参考文献】	123

図 表 目 次

(図)

第 1 章

図 1-1 連成現象の概念図	1
----------------------	---

第 3 章

図 3-1 浸潤試験装置	7
図 3-2 ベントナイトの水分拡散係数	8
図 3-3 浸潤試験の解析モデル図	9
図 3-4 ベントナイトの水分特性曲線	10
図 3-5 解析結果と実測値との比較 (ベントナイト KunigelV1)	11
図 3-6 解析結果と実測値との比較 (ベントナイト KunigelOT-9607)	12
図 3-7 解析結果と実測値との比較 (ケイ砂混合材)	13
図 3-8 試験装置 (KID-BEN)	16
図 3-9 温度勾配下の水分移動実験の解析に用いた解析モデル	16
図 3-10 含水比分布の実験値と解析値の比較 (ベントナイト KunigelV1)	17
図 3-11 含水比分布の実験値と解析値の比較 (ベントナイト KunigelOT-9607)	19
図 3-12 含水比分布の実験値と解析値の比較 (ケイ砂混合材)	19
図 3-13 膨潤圧測定試験装置	22
図 3-14 水分ポテンシャルの経時変化 (弾性係数変化, ベントナイト KunigelV1)	22
図 3-15 緩衝材内の応力の経時変化 (弾性係数変化, ベントナイト KunigelV1)	23
図 3-16 含水比の経時変化 (弾性係数変化, ベントナイト KunigelV1)	23
図 3-17 乾燥密度の経時変化 (弾性係数変化, ベントナイト KunigelV1)	23
図 3-18 膨潤応力の実験結果と解析結果の比較 (弾性係数変化, ベントナイト KunigelV1)	24
図 3-19 緩衝材内の応力の経時変化 (弾性係数一定, ベントナイト KunigelV1)	24
図 3-20 含水比の経時変化 (弾性係数一定, ベントナイト KunigelV1)	24
図 3-21 乾燥密度の経時変化 (弾性係数一定, ベントナイト KunigelV1)	25

図 3-22 膨潤応力の実験結果と解析結果の比較

(ベントナイト KunigelOT-9607) 25

図 3-23 膨潤応力の実験結果と解析結果の比較 (ケイ砂混合材) 25

第 4 章

図 4-1 浸潤試験装置 27

図 4-2 大気圧浸潤と加圧浸潤とによる水分分布の比較 27

図 4-3 解析結果と実測値との比較 28

図 4-4 解析モデルの概要図 31

図 4-5 解析メッシュ図 32

図 4-6 緩衝材中の温度分布の経時変化 33

図 4-7 緩衝材中の含水比分布の経時変化 33

図 4-8 膨潤応力の経時変化 34

図 4-9 緩衝材中の温度分布の実測値と解析値の比較 34

図 4-10 緩衝材中の含水比分布の実測値と解析値の比較 35

図 4-11 緩衝材中の膨潤応力の実測値と解析値の比較 35

図 4-12 温度分布 (°C) の実験結果と解析結果の比較 36

図 4-13 緩衝材の鉛直断面での含水比分布 (%) の
実験結果と解析結果の比較 37

第 5 章

図 5-1 解析モデル図 38

図 5-2 解析領域 38

図 5-3 解析に用いた熱物性値 39

図 5-4 D_T の異なるケースの解析結果の比較 40

図 5-5 ガラス固化体の発熱量の経時変化 40

図 5-6 初期含水比が 7% のケースの連成解析と非連成解析の比較 42

図 5-7 初期含水比が 17% のケースの連成解析と非連成解析の比較 43

図 5-8 ケース 1 における連成解析と非連成解析の比較
($D_T=3.5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=7\%$) 45図 5-9 ケース 2 における連成解析と非連成解析の比較
($D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=7\%$) 46図 5-10 ケース 3 における連成解析と非連成解析の比較
($D_T=1.4 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=7\%$) 47

図 5-11	ケース 4 における連成解析と非連成解析の比較 ($D_T=2.1 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=7\%$)	48
図 5-12	ケース 5 における連成解析と非連成解析の比較 ($D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=7\%$)	49
図 5-13	緩衝材内の含水比の経時変化	50
図 5-14	各ケースにおいて緩衝材内側の含水比が 最も低下した時点での含水比分布	51
図 5-15	ケース 1 における連成解析と非連成解析の比較 ($D_T=3.5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=17\%$)	53
図 5-16	ケース 2 における連成解析と非連成解析の比較 ($D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=17\%$)	54
図 5-17	ケース 3 における連成解析と非連成解析の比較 ($D_T=1.4 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=17\%$)	55
図 5-18	ケース 4 における連成解析と非連成解析の比較 ($D_T=2.1 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=17\%$)	56
図 5-19	ケース 5 における連成解析と非連成解析の比較 ($D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $\omega_o=17\%$)	57
図 5-20	緩衝材内の含水比の経時変化	58
図 5-21	各ケースにおいて緩衝材内側の含水比が 最も低下した時点での含水比分布	59
図 5-22	解析モデルの概念図	61
図 5-23	含水比と比熱の関係 (OT-9607)	62
図 5-24	含水比と熱伝導率の関係 (OT-9607)	62
図 5-25	試験坑道平面図	63
図 5-26	熱解析の結果得られた温度分布 (ケース 1, 緩衝材の含水比が 0.0%)	64
図 5-27	熱解析の結果得られた温度分布 (ケース 2, 緩衝材の含水比が 15.0%)	64
図 5-28	熱解析の結果得られた温度分布 (ケース 3, 緩衝材の含水比が 23.6%)	65
図 5-29	連成解析の結果得られた温度分布	65
図 5-30	熱解析および連成解析による緩衝材内の温度の経時変化の比較	66
図 5-31	熱解析および連成解析による岩盤内の温度の経時変化の比較	67
図 5-32	連成解析による緩衝材内の含水比分布の経時変化	69

第6章

図 6-1	岩盤の不飽和浸透特性	75
図 6-2	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の含水比の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_o=1000\text{m}$)	77
図 6-3	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の含水比の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_o=0\text{m}$)	77
図 6-4	岩盤内の緩衝材に接する部分の圧力水頭の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_o=1000\text{m}$)	78
図 6-5	岩盤内の緩衝材に接する部分の圧力水頭の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_o=0\text{m}$)	78
図 6-6	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の含水比の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $P=\text{Fix}$)	79
図 6-7	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の含水比の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)	79
図 6-8	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の含水比の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $P_o=0\text{m}$, $P=\text{Fix}$)	80
図 6-9	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の含水比の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $P_o=0\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)	80
図 6-10	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の温度の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_o=1000\text{m}$)	81
図 6-11	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の温度の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_o=0\text{m}$)	81
図 6-12	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の温度の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $P=\text{Fix}$)	82
図 6-13	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の温度の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)	82
図 6-14	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の温度の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $P_o=0\text{m}$, $P=\text{Fix}$)	83
図 6-15	緩衝材の内側（オハ [°] -ハ [°] ック側）の温度の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $P_o=0\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)	83
図 6-16	緩衝材の外側（岩盤側）の温度の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_o=1000\text{m}$)	84
図 6-17	緩衝材の外側（岩盤側）の温度の経時変化 ($\omega_o=7.0\%$)	84
図 6-18	岩盤の固有透過度と再冠水時間の関係 ($\omega_o=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$)	85

図 6-19	緩衝材の内側（オパーハット側）の温度の経時変化 ($\omega_0=7.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_0=1000\text{m}$)	85
図 6-20	緩衝材の内側（オパーハット側）の含水比の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_0=1000\text{m}$)	87
図 6-21	緩衝材の内側（オパーハット側）の含水比の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_0=0\text{m}$)	87
図 6-22	岩盤内の緩衝材に接する部分の圧力水頭の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_0=1000\text{m}$)	88
図 6-23	岩盤内の緩衝材に接する部分の圧力水頭の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_0=0\text{m}$)	88
図 6-24	緩衝材の内側（オパーハット側）の含水比の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $P_0=1000\text{m}$, $P=\text{Fix}$)	89
図 6-25	緩衝材の内側（オパーハット側）の含水比の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $P_0=1000\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)	89
図 6-26	緩衝材の内側（オパーハット側）の含水比の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $P_0=0\text{m}$, $P=\text{Fix}$)	90
図 6-27	緩衝材の内側（オパーハット側）の含水比の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $P_0=0\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)	90
図 6-28	緩衝材の内側（オパーハット側）の温度の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_0=1000\text{m}$)	91
図 6-29	緩衝材の内側（オパーハット側）の温度の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_0=0\text{m}$)	91
図 6-30	緩衝材の内側（オパーハット側）の温度の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $P_0=1000\text{m}$, $P=\text{Fix}$)	92
図 6-31	緩衝材の内側（オパーハット側）の温度の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $P_0=1000\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)	92
図 6-32	緩衝材の内側（オパーハット側）の温度の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $P_0=0\text{m}$, $P=\text{Fix}$)	93
図 6-33	緩衝材の内側（オパーハット側）の温度の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $P_0=0\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)	93
図 6-34	緩衝材の外側（岩盤側）の温度の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, $P_0=1000\text{m}$)	94
図 6-35	緩衝材の外側（岩盤側）の温度の経時変化 ($\omega_0=17.0\%$)	94
図 6-36	埋め戻し材の不飽和浸透特性	97

図 6-37	岩盤の不飽和浸透特性	97
図 6-38	解析モデルの概念図	98
図 6-39	処分孔周辺のメッシュ図	99
図 6-40	ガラス固化体の発熱量の経時変化	100
図 6-41	解析結果の出力ラインおよび出力点	101
図 6-42	熱解析の結果（モデルの横幅 4.0m）	102
図 6-43	処分坑道掘削後の岩盤内の圧力水頭変化	104
図 6-44	処分坑道掘削後の岩盤内の圧力水頭 [cm] 分布（掘削後 5 年）	105
図 6-45	廃棄体処分後の岩盤内の圧力水頭変化	106
図 6-46	含水比の経時変化（Case01-1）	108
図 6-47	含水比の経時変化（Case01-2）	109
図 6-48	各ケースにおける緩衝材内の含水比の経時変化の比較	111
図 6-49	各ケースにおける埋め戻し材内の含水比の経時変化の比較（点(1)）	112
図 6-50	廃棄体処分後の緩衝材内の含水比分布（Case01-1）	113
図 6-51	廃棄体処分後の緩衝材内の含水比分布（Case03-1）	113
図 6-52	廃棄体処分後の緩衝材内の含水比分布（Case03-2）	114
図 6-53	各ケースにおける温度の経時変化の比較	115
図 6-54	廃棄体処分後の温度分布（処分後 10 年）	116
図 6-55	高水圧帯を含む解析モデル	117
図 6-56	オーバーパック周囲の緩衝材の含水比経時変化	118

(表)

第1章

表 1-1	緩衝材の候補材料	2
-------	----------------	---

第3章

表 3-1	各材料の水分拡散係数の係数の値および固有透過度	7
表 3-2	各材料の VG モデルにおけるパラメータの値	9
表 3-3	試験ケース	14
表 3-4	各材料のパラメータ	14
表 3-5	各材料の(3-5)式におけるパラメータ	15
表 3-6	各材料の初期含水比	20
表 3-7	各材料のパラメータ	20
表 3-8	各材料において同定された F 値	22

第4章

表 4-1	解析に用いたパラメータ一覧	29
-------	---------------------	----

第5章

表 5-1	解析に用いた物性値一覧	40
表 5-2	緩衝材内の最小含水比と最高温度	44
表 5-3	緩衝材内の最小含水比と最高温度	52
表 5-4	解析に用いた物性値一覧	61

第6章

表 6-1	解析ケース	71
表 6-2	解析に用いた物性値一覧	97
表 6-3	解析ケース	100
表 6-4	各ケースにおける再冠水時間の比較	103
表 6-5	解析ケース	117

第1章 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における廃棄体定置後のニアフィールドでは、廃棄体からの放熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧の発生、周辺岩盤の地圧変化などの現象が相互に影響することが予想される。図1-1には廃棄体定置後にニアフィールドにおいて発生すると考えられる連成現象の概念図を示す。このような、熱-水-応力連成現象を評価することは、ニアフィールド環境の明確化の観点から重要な課題の一つである。

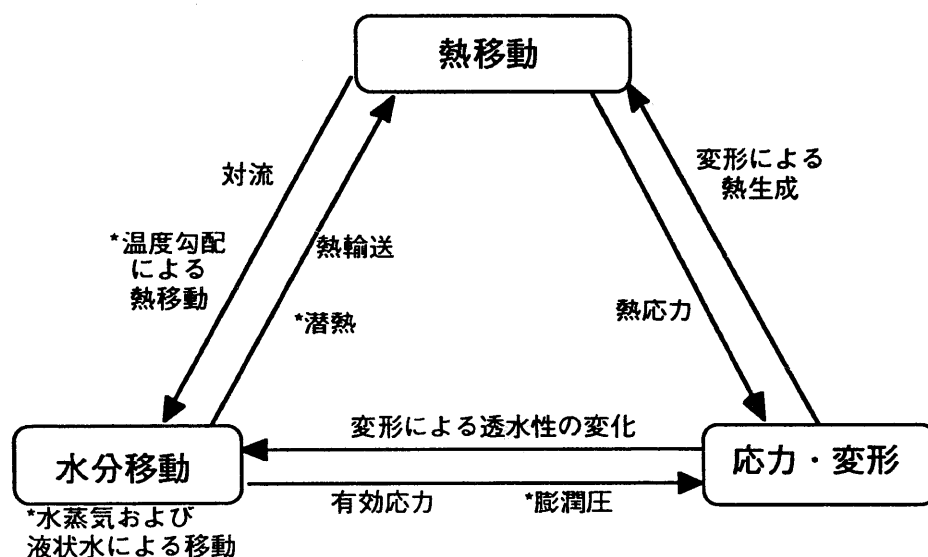


図1-1 連成現象の概念図

熱-水-応力連成現象を明らかにするためには、まず個々の現象に関わるメカニズムを明らかにする必要がある。そのため、不飽和ベントナイトの伝熱特性、浸潤特性、膨潤特性等に関する各種要素試験が実施されている。また、熱-水-応力連成モデルの開発も着実に進んでおり、国際共同研究「DECOVALEX」の中で、これまでに開発したモデルを用いての解析評価を実施している (Jing, L. et al, 1996)。さらに、粘土内の熱-水-応力連成現象に着目した国際共同研究として、「VALUCLAY」が開始された。「VALUCLAY」プロジェクトにおいて、フェーズ1では粘土の基礎物性のデータベースの作成が実施されたが、フェーズ2では不飽和粘土内の熱-水-応力連成モデルの確証が実施されている。

一方、要素試験で得られた関係式等が、実岩盤中で起こるこのような連成現象を適切に表現できるのか確認することは重要なことである。そのためには、実岩盤で起こりうる実規模での連成現象に関するデータを取得することが不可欠である。実岩盤における実規模試験は諸外国では、スウェーデンのSTRIPA PROJECTにおけるバッファマステスト (Pusch, R., et al., 1985)、ベルギーのモル試験場でのBACCHUS試験 (Neerdael, B., et al., 1992)、カナダのURLでのバッファ/コンテナ試験 (B. Kjartansson, et al., 1993)、スイスのグリムゼルでのFEBEX試験 (ENRESA, 1998) 等で実施されている。また、

国内ではコンクリートで模擬した人工岩盤内における緩衝材大型試験（Sato, S., et al., 1991），釜石原位置試験場において粘土充填・熱負荷試験（Fujita, T., et al., 1998）が実施されており連成現象に関するデータの取得が行われている。

現在，緩衝材の材料として，核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC）では表1-1の3種類の粘土が検討されており，これらの材料に関して種々の基本特性試験が実施されている。

表1-1 緩衝材の候補材料

材料名	材質	乾燥密度
ベントナイトKunigel V1	クニゲルV1	1.80g/cm ³
ベントナイトKunigelOT-9607	クニゲルOT-9607	1.65g/cm ³
ケイ砂混合材	クニゲルV1：ケイ砂＝7：3	1.60g/cm ³

本論では，熱-水-応力連成モデルを用い，緩衝材に関する要素試験の解析評価を行なうとともに，モデル上のパラメータを実験結果から逆解析的に算定した。また，各種要素試験の結果得られた物性値を入力データとしてニアフィールドの熱-水連成解析を実施し，熱解析と連成解析の比較および原位置試験において得られたデータと解析との比較を実施した。さらに簡易モデルおよび二次元軸対称モデルを用いて緩衝材が飽和するまでの時間（再冠水時間）の計算を実施した。緩衝材の再冠水時間を評価することは人工バリア定置後のニアフィールド環境を把握する上で重要な要素であるが，今までの検討は温度の影響を考慮しない水理解析による評価が主であった（Andrews, R.W., et al., 1986：動力炉・核燃料開発事業団，1992）。したがって，温度の影響を考慮して再冠水時間を検討することは重要な事項であると考えられる。

第2章 熱-水-応力連成モデルの支配方程式

解析に用いるモデル（千々松ほか，1995）は，大西らによって開発された熱-水-応力連成コード（Ohnishi, Y. et al, 1985）に，不飽和粘土中の水分移動（Philip, J.R. and de Vries, D.A, 1957），温度勾配による水分移動（de Vries, D.A and Afgan, N.H. 1975），浸潤に伴う膨潤圧を考慮した連成モデルである。不飽和粘土中の連成現象を評価するために考慮した項目に関しては図1-1に*で示している。

2.1 応力の釣り合い式

応力の釣り合い式は以下に示す通りである。

$$\left[\frac{1}{2} C_{ijkl} (u_{k,l} + u_{l,k}) - F \pi \delta_{ij} - \beta \delta_{ij} (T - T_0) + \chi \delta_{ij} \rho_l (h - z) \right]_{,j} + \rho b_i = 0 \quad (2-1)$$

ここで， C_{ijkl} は弾性係数マトリックスである。また， χ は不飽和パラメータで，飽和領域で $\chi = 1$ ，不飽和領域で $\chi = 0$ となる。 ρ_l は地下水の密度， ρ は土粒子の密度， b_i は物体力， δ_{ij} はクロネッカーデルタ， π は膨潤圧， F は膨潤応力に寄与する係数である。未知パラメータは，変位ベクトル u_i ，温度 T ，全水頭 h である。また， z は位置水頭である。

β は温度変化によって生じる応力を求めるときの係数で，等方弾性体の場合，次式のようになる。

$$\beta = (3\lambda + 2\mu) \alpha_s \quad (2-2)$$

ここで， α_s は固相の線膨張係数である。 λ ， μ はラメの定数で，次式から求まる。

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2-3)$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2-4)$$

ここで， E はヤング率， ν はポアソン比である。

(2-1)式において，第1項は弾性応力を表す項，第2項は膨潤応力を表す項，第3項は熱応力を表す項，第4項は有効応力の原理により生ずる項（水圧の項），第5項は外部物体力を表す項である。

膨潤圧は浸潤に伴う水分ポテンシャル ψ の増加に伴い発生するものとし，次式で定義する。

$$\pi(\theta_1) = \rho_l g |\Delta\psi| = \rho_l g |\psi(\theta_1) - \psi(\theta_0)| = \rho_l g \left| \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} d\theta \right| \quad (2-5)$$

ここで、 g は重力加速度である。

2.2 地下水の連続式

地下水の連続式は以下に示す通りである。

$$\left\{ \xi \rho_l D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) + (1-\xi) \frac{\rho_l^2 g K}{\mu_l} h_{,i} \right\}_{,i} + \{ \rho_l D_T T_{,i} \}_{,i} - \rho_{l0} n S_r \rho_l g \beta_p \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_l \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_l S_r \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho_{l0} n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2-6)$$

ここで、 D_θ は水分拡散係数、 θ は体積含水率、 ψ は圧力水頭（水分ポテンシャル）、 K は固有透過度、 ξ は不飽和パラメータで飽和領域で $\xi=0$ 、不飽和領域で $\xi=1$ である。 μ_l は水の動粘性係数、 ρ_{l0} は初期状態の地下水の密度、 ρ_l は地下水の密度、 g は重力加速度、 D_T は温度勾配による水分移動に関する係数、 n は間隙率、 S_r は飽和度、 β_p は水の圧縮係数、 β_T は水の熱膨張係数である。

(2-6)式において、第1項は水蒸気移動を表す項、第2項は液状水移動を表す項、第3項は温度勾配による水分移動を表す項、第4項は水頭の変化による間隙流体の密度変化を表す項、第5項は飽和度の変化を表す項、第6項は多孔質の骨格変化を表す項、第7項は温度変化による間隙流体の密度変化を表す項である。

2.3 エネルギー保存則

エネルギーの保存則は以下に示す通りである。

$$\begin{aligned} & (\rho C_v)_m \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho_l C_{vl} V_l T_{,i} - K_{Tm} T_{,ii} + L \left\{ D_{\theta v} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) \right\}_{,i} \\ & + n S_r T \frac{\beta_T}{\beta_p} \left\{ \xi D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) + (1-\xi) \frac{\rho_l g K}{\mu_l} h_{,i} + D_T T_{,i} \right\}_{,i} \\ & + \frac{1}{2} (1-n) \beta T \frac{\partial}{\partial t} (u_{i,j} + u_{j,i}) \delta_{ij} = 0 \end{aligned} \quad (2-7)$$

ここで、 V_l は地下水の流速、 L は単位体積あたりの水蒸気の潜熱、 $D_{\theta v}$ は水蒸気拡散係数である。

$(\rho C_v)_m$ は水と骨格粒子からなる場の比熱で、次式で求まる。

$$(\rho C_v)_m = n S_r \rho_l C_{vl} + (1-n) \rho_s C_{vs} \quad (2-8)$$

ここで、 C_{vl} は水の比熱、 C_{vs} は固相の比熱である。

K_{Tm} は水と骨格粒子からなる場の熱伝導係数で、次式で求まる。

$$K_{Tm} = n S_r K_{Tl} + (1 - n) K_{Ts} \quad (2-9)$$

ここで、 K_{Tl} は水の熱伝導係数、 K_{Ts} は固相の熱伝導係数である。

(2-7)式において、第1項は温度変化による内部エネルギーの変化を表す項、第2項は熱対流による内部エネルギーの変化を表す項、第3項は熱伝導による内部エネルギーの変化を表す項、第4項は水蒸気に相変化することによる内部エネルギーの変化を表す項、第5項は間隙水圧の変化による内部エネルギーの変化を表す項、第6項は固相の変化によって生じる可逆的な内部エネルギーの変化を表す項である。

第3章 基本特性試験の解析

3.1 浸潤試験の解析

3.1.1 試験条件

浸潤試験に使用した供試体の寸法は直径20.0×高さ20.0mmである。乾燥させた試料を図3-1に示す試験装置内に所定の乾燥密度になるように圧縮充填し供試体を作成する。所定の温度に保たれた蒸留水の中に試験装置を浸け、試験装置の下端から供試体に蒸留水を浸潤させる。所定の時間が経過した後、供試体を取り出し、2mmずつにスライスし、それぞれの含水比を測定し、水分分布曲線を作成する。試験温度は、25、40、60℃である。

3.1.2 パラメータ

浸潤試験より得られた水分分布曲線から水分拡散係数の実験式が得られている（鈴木他，1996）。解析に用いた水分拡散係数 D_θ [cm^2/s]の実験式は(3-1)式の通りである。圧縮ベントナイト中の水分移動は、水蒸気および液状水の二相で移動することが知られており（Philip.J.R.and de Vries, D.A., 1957, 中野, 1991），水分拡散係数 D_θ は水蒸気による拡散係数 $D_{\theta v}$ と液状水による拡散係数 $D_{\theta l}$ の和として表した。各材料において得られた(3-1)式のパラメータは表3-1に示すものである。また、各材料の固有透過度 $K[\text{m}^2]$ も表3-1に示す（松本ほか, 1997）。図3-2には各温度において得られた水分拡散係数の実測値および(3-1)式により計算される各温度の水分拡散係数を示す。

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta l} = \frac{a_1 (\theta - \theta_s)}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_s)} + \frac{a_2 \theta}{b_2(\theta - b_2)} \quad (3-1)$$

ここで、 θ は体積含水率 [cm^3/cm^3]、 θ_s は飽和体積含水率である。

今回使用した熱-水-応力連成モデルは不飽和浸透を水分拡散係数と不飽和水分特性（体積含水率—負の圧力水頭関係）から計算している。不飽和水分特性にはvan Genuchtenによる関数モデルを適用した（van Genuchten, M., 1980）。本モデルによると有効飽和度 S_e および比水分容量 $C(\theta)$ は次式で表される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \{1 + |\alpha \psi^n|^{-m} \quad (\alpha > 0) \quad (3-2)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (0 < m < 1, n > 1) \quad (3-3)$$

$$C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \alpha (n-1) (\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \quad (3-4)$$

ここで、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小含水量である。

ここでは、水分拡散係数を既知として水理解析を実施し、実測の水分分布曲線と計算結果が一致するように不飽和水分特性を同定した。

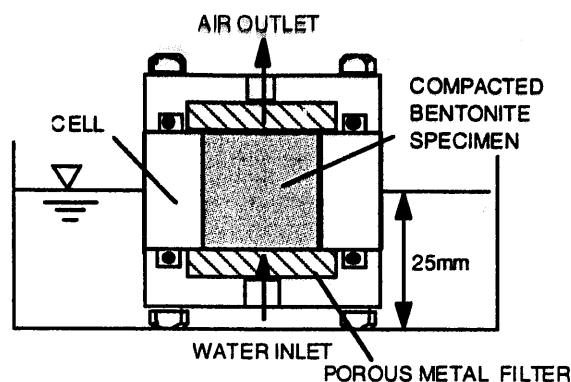


図3-1 浸潤試験装置

表3-1 各材料の水分拡散係数の係数の値および固有透過度

係数	ベントナイトKunigelV1	ベントナイトKunigelOT-9607	ケイ砂混合材
a_1	$1.76 \times 10^{-8} T - 3.04 \times 10^{-7}$	$3.68 \times 10^{-8} T - 2.08 \times 10^{-7}$	$2.99 \times 10^{-8} T - 3.74 \times 10^{-7}$
a_2	$-1.48 \times 10^{-7} T + 2.98 \times 10^{-6}$	$-3.58 \times 10^{-9} T - 2.19 \times 10^{-7}$	$-1.50 \times 10^{-8} T + 1.49 \times 10^{-7}$
b_1	-3.68×10^{-3}	-1.00×10^{-3}	-2.49×10^{-3}
b_2	$5.22 \times 10^{-3} T + 2.68 \times 10^{-1}$	0.41	$5.59 \times 10^{-4} T + 3.93 \times 10^{-1}$
θ_s	0.333	0.389	0.403
K	4.00×10^{-21}	2.00×10^{-20}	4.00×10^{-20}

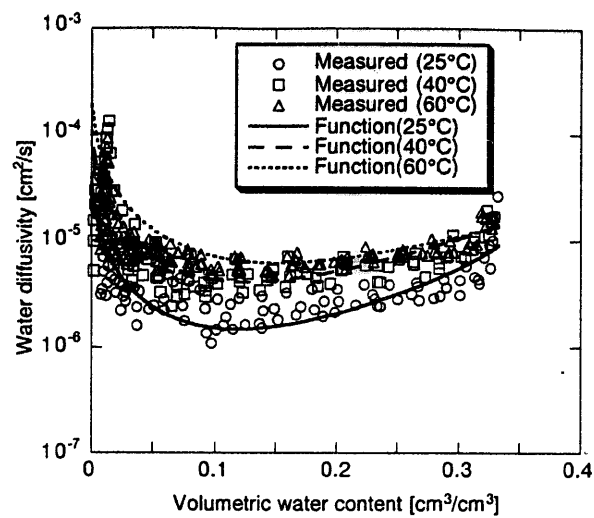
 T ; 温度[℃]

3.1.3 解析モデル

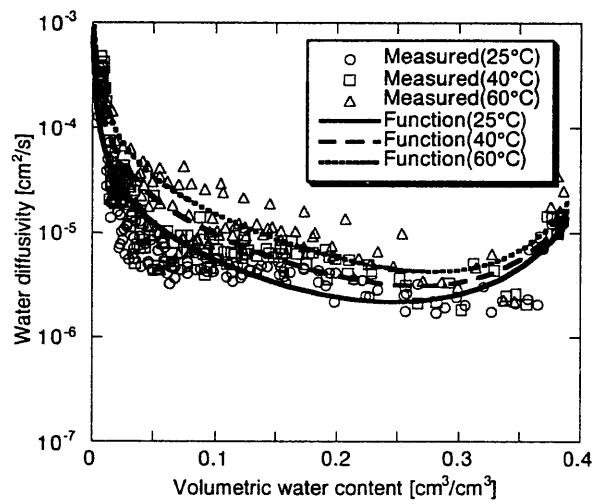
図3-3に浸潤試験の解析に用いた解析モデルを示す。解析は二次元軸対称モデルで実施し、側面および上端の境界は不透水とし、下部は大気圧で固定とした。また、応力および熱の項は考慮せず、水理解析のみとした。ベントナイトの初期含水比は0.5%とし、これに対応する各材料のポテンシャル値を初期値として与えた。

3.1.4 解析結果

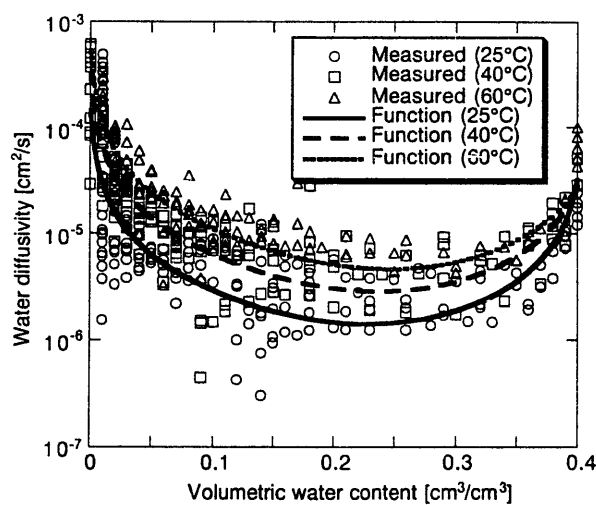
図3-4には負の圧力水頭の実測値と数値解析により同定された不飽和浸透特性を示す。各材料のvan Genuchtenによる関数モデルにおけるパラメータ θ_s , θ_r , α , n は表3-2のようになった。また、図3-5～3-7に各材料の水分分布の解析結果と実測値の比較を示す。それぞれ、(a)は温度25℃、(b)は温度40℃、(c)は温度60℃の場合である。実験では、温度が高くなるほど浸潤速度が速くなっており、解析結果はこの実測値を良く再現している。各温度において実測結果をほぼ再現できており、また、その際に同定された不飽和水分特性も実測値とそれほど大きな差はない。



(a) ベントナイト KunigelV1



(b) ベントナイト KunigelOT-9607



(c) ケイ砂混合材

図3-2 ベントナイトの水分拡散係数

表3-2 各材料のVGモデルにおけるパラメータの値

	ベントナイトKunigelV1	ベントナイトKunigelOT-9607	ケイ砂混合材
θ_s [-]	0.333	0.389	0.403
θ_r [-]	0.000	0.000	0.000
α [1/cm]	6.0×10^{-6}	1.5×10^{-5}	8.0×10^{-5}
n [-]	2.5	1.8	1.6

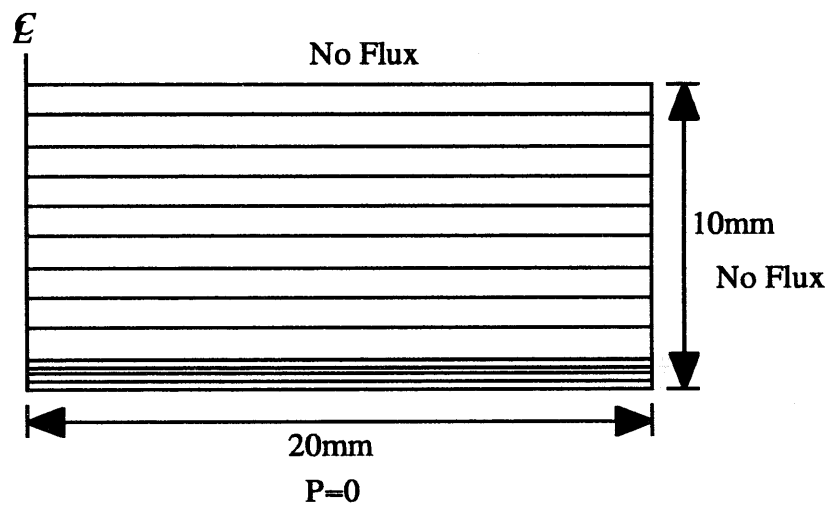
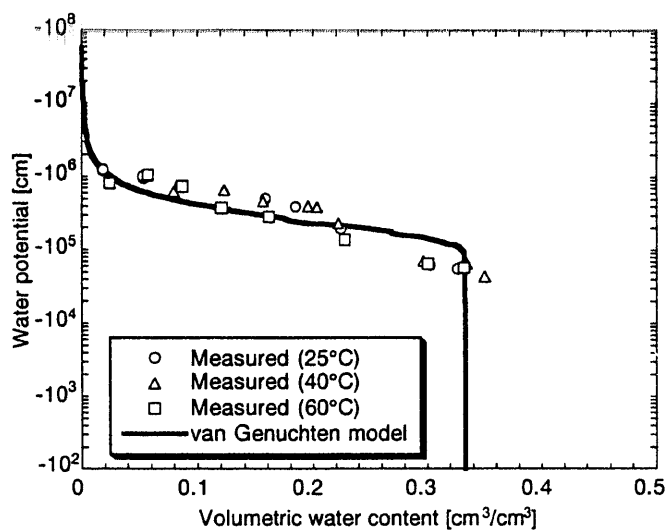
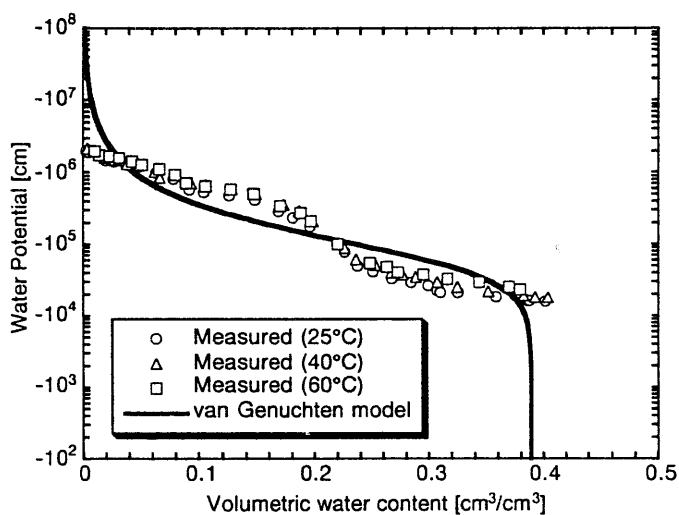


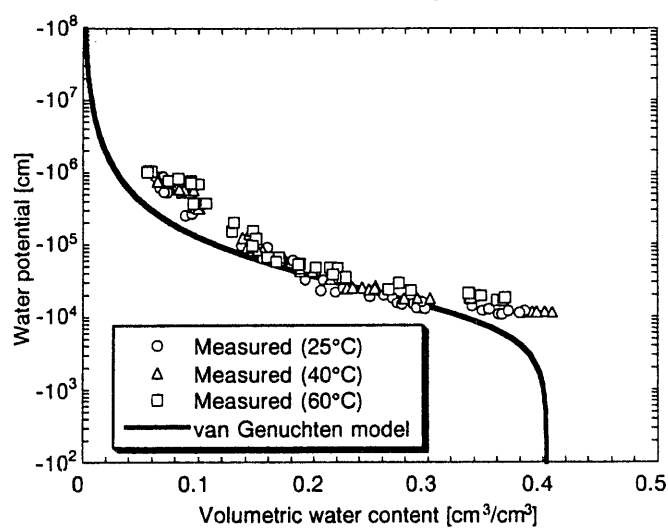
図3-3 浸潤試験の解析モデル図



(a) ベントナイト Kunigel V1



(b) ベントナイト Kunigel OT-9607



(c) ケイ砂混合材

図3-4 ベントナイトの水分特性曲線

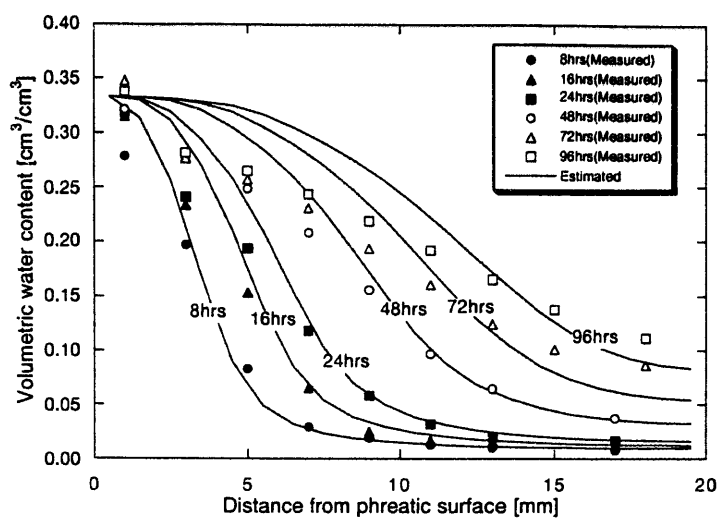
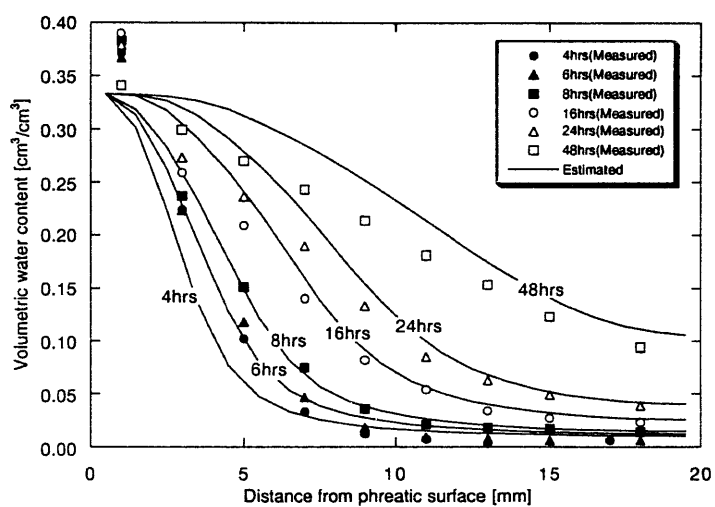
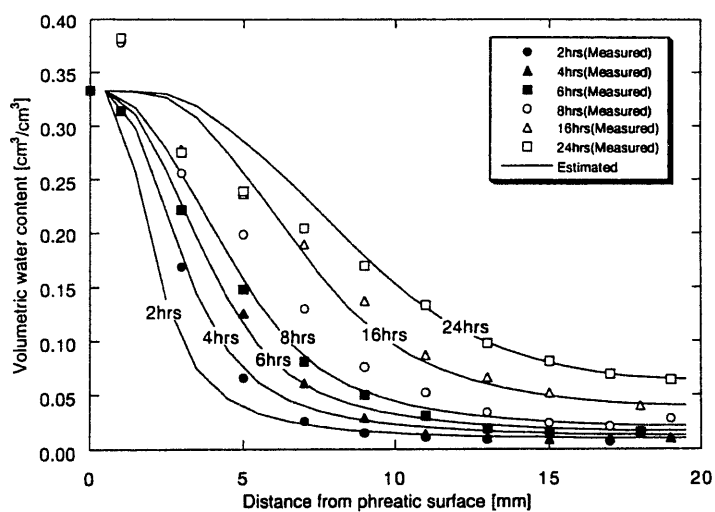
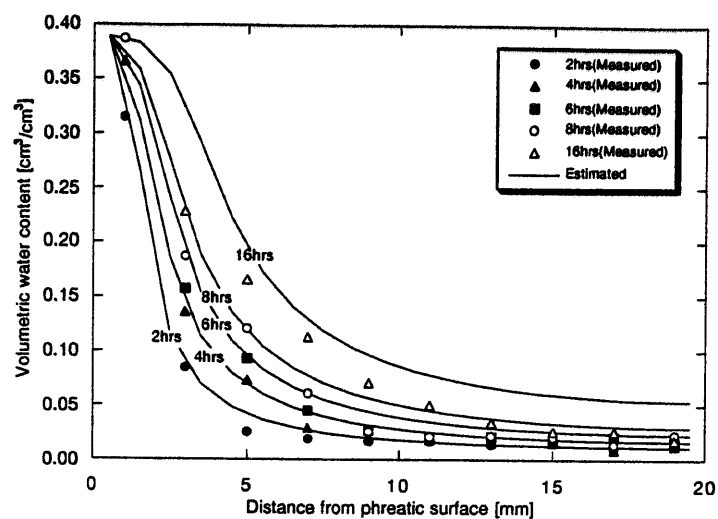
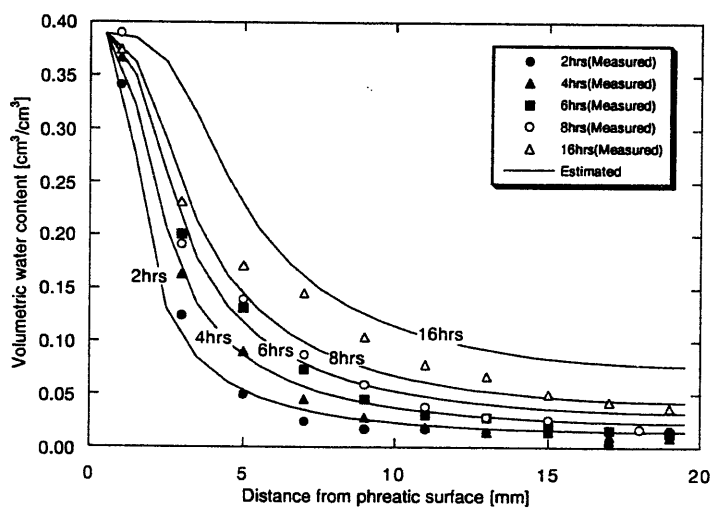
(a)温度 25°C (b)温度 40°C (c)温度 60°C

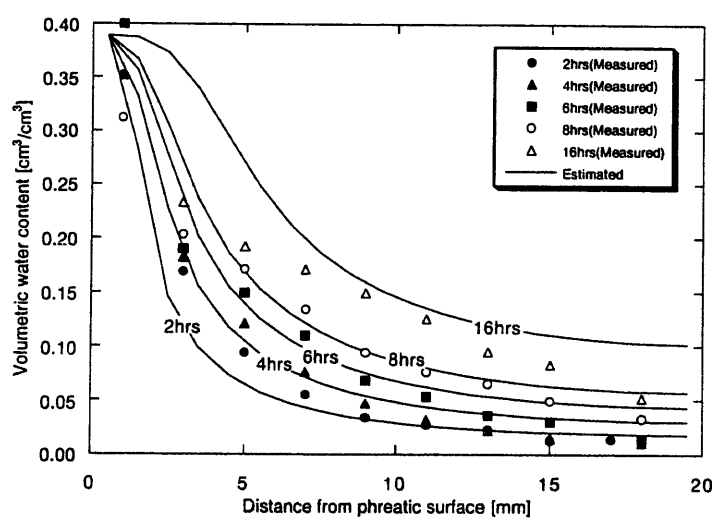
図3-5 解析結果と実測値との比較 (ベントナイトKunigelV1)



(a)温度25°C



(b)温度40°C



(c)温度60°C

図3-6 解析結果と実測値との比較 (ベントナイトKunigelOT-9607)

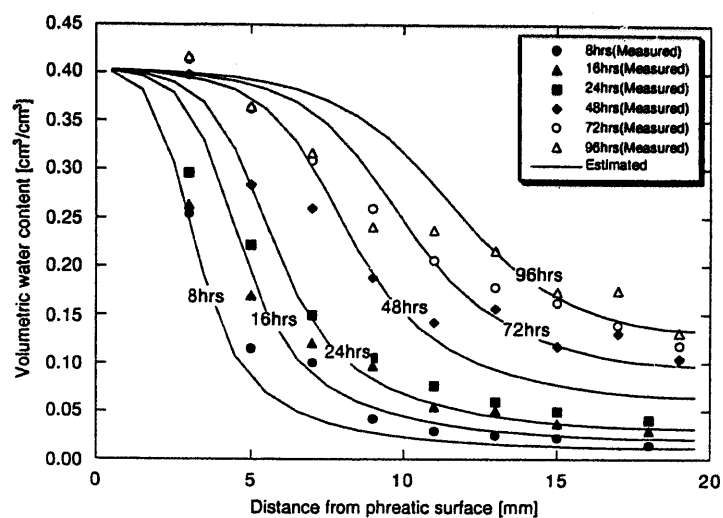
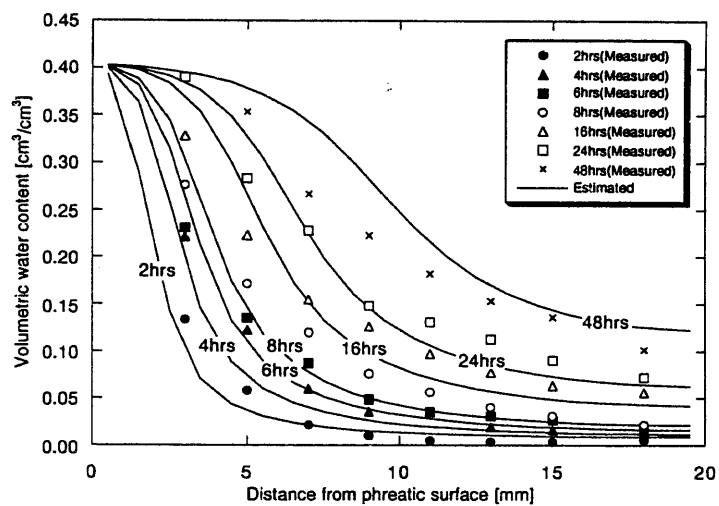
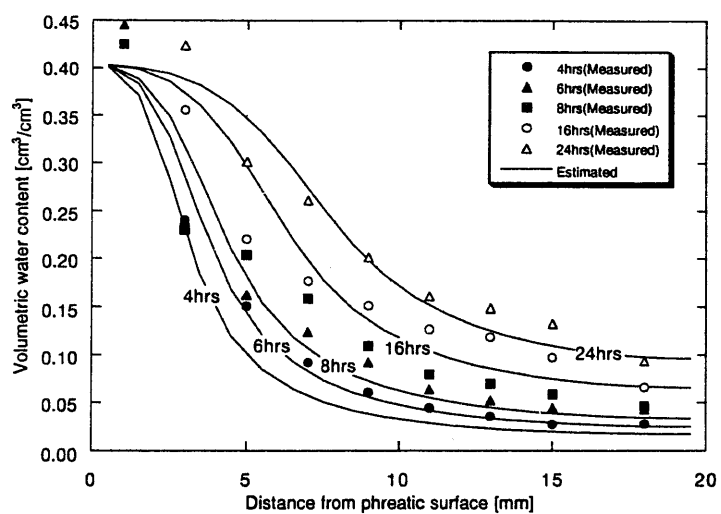
(a) 温度 25°C (b) 温度 40°C (c) 温度 60°C

図3-7 解析結果と実測値との比較 (ケイ砂混合材)

3.2 温度勾配下における水分移動の解析

3.2.1 概要

一般に温度勾配による水分移動に関する係数 D_T （温度勾配水分拡散係数）の評価は、水理学的境界条件を与えなくても内部の水分分布が不均一になることによる水分勾配の影響が生じるため、簡単ではない。ここでは、(2-6) 式のモデルを用いた解析を行なうことにより、 D_T の値を逆解析に算定することとした。実験値としては試験装置KID-BENを用いて行なわれた温度勾配下の水分移動実験結果を用いる。また、ケイ砂混合材に関する実験結果についてはBörgessonらにより実施された温度勾配下の水分移動実験結果を用いた（Börgesson, L., et al, 1994）。

3.2.2 試験条件

試験装置の概要を図3-8に示す。供試体の寸法は直径50.0×高さ100.0mmである。なお、Börgessonらの実験における供試体の大きさは直径50.0×高さ50.0mmである。各材料において試験装置の上端，下端を所定の温度で固定し，一定の温度勾配下のもとで試験を実施した。試験装置は2個からなっており，(b)に示す温度測定用セルで温度の経時変化を測定し，一定時間経過後(a)に示す水分量測定用セルで供試体内の含水量分布を測定する。各材料における試験ケースは以下の通りである。

表3-3 試験ケース

	ヘントナイトKunigelV1				ヘントナイトKunigelOT-9607	ケイ砂混合材
上端温度[℃]	25				40	30
下端温度[℃]	45				60	60
供試体長[cm]	10				10	5
初期含水比[%]	6.0	9.7	12.8	14.9	16.5	9.2

3.2.3 パラメータ

解析に用いた水分拡散係数および水分特性曲線は図3-2および図3-4に示すものである。また，各材料の熱物性は表3-4の通りである。熱物性は含水比 ω [%]の関数としている（鈴木ほか，1999）。

表3-4 各材料のパラメータ

	ヘントナイトKunigelV1	ヘントナイトKunigelOT-9607	ケイ砂混合材
熱伝導率 [W/m/K]	5.58×10^{-1} $+6.17 \times 10^{-2} \omega +$ $-5.28 \times 10^{-4} \omega^2$ $-9.67 \times 10^{-6} \omega^3$	$0.050 \omega + 0.503$	4.44×10^{-1} $+1.38 \times 10^{-2} \omega +$ $+6.14 \times 10^{-3} \omega^2$ $-1.69 \times 10^{-4} \omega^3$
比熱 [kJ/kg/K]	$\frac{32.3 + 4.18 \omega}{100 + \omega}$	$\frac{42.6 + 4.18 \omega}{100 + \omega}$	$\frac{34.1 + 4.18 \omega}{100 + \omega}$

(2-6)式における温度勾配水分拡散係数 D_T は次式のように設定した。

$$D_T = D_{T_0} \exp \left(\alpha_T \frac{T - T_0}{T_0} \right) \quad (3-5)$$

ここで、 D_{T_0} は基準となる係数の値、 T_0 は基準温度、 α_T は温度に対する非線形性の度合を調整するパラメータでスカラー量である。

3.2.4 解析モデル

図3-9に温度勾配下の水分移動実験の解析に用いた解析モデルを示す。(a)はベントナイトKunigelV1およびKunigel OT-9607を用いた実験の解析に用いたモデル、(b)はケイ砂混合材を用いた実験の解析に用いたモデルである。解析は二次元軸対称モデルで実施し、全境界を不透水とした。熱に関しては、上端および下端を所定の温度で固定とし、側面は断熱とした。また、応力の項は考慮せず、熱-水連成解析とした。

3.2.5 解析結果

図3-10にベントナイトKunigelV1の場合の含水比分布の実験値と解析値の比較を示す。試験時間は96時間後である。横軸は下端（高温側）からの距離を表わす。(a)は初期含水比6.0%、(b)は初期含水比9.7%、(c)は初期含水比12.8%、(d)は初期含水比14.9%のケースである。(3-5)式におけるパラメータはすべて同じであり、表3-5に示すベントナイトKunigelV1の値を用いた。初期含水比が小さいケースでは、測定結果に比べ試料両端の水分移動が大きい結果となっている。しかし、その他のケースはほぼ測定結果を再現できた。図3-11にはベントナイトKunigelOT-9607の場合の結果を示す。試験時間は400時間である。図3-12にはケイ砂混合材の場合の結果を示す。試験時間は96時間である。両者ともほぼ解析結果と実験値とが一致している。

各材料を対象に実施した解析の結果同定された(3-5)式における各パラメータの値は表3-5の通りである。

表3-5 各材料の(3-5)式におけるパラメータ

	ベントナイトKunigelV1	ベントナイトKunigelOT-9607	ケイ砂混合材
D_0 [$\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$]	2.0×10^{-8}	1.0×10^{-7}	7.0×10^{-8}
T_0 [$^\circ\text{C}$]	-	10.0	-
α_T [-]	0.0	0.1	0.0

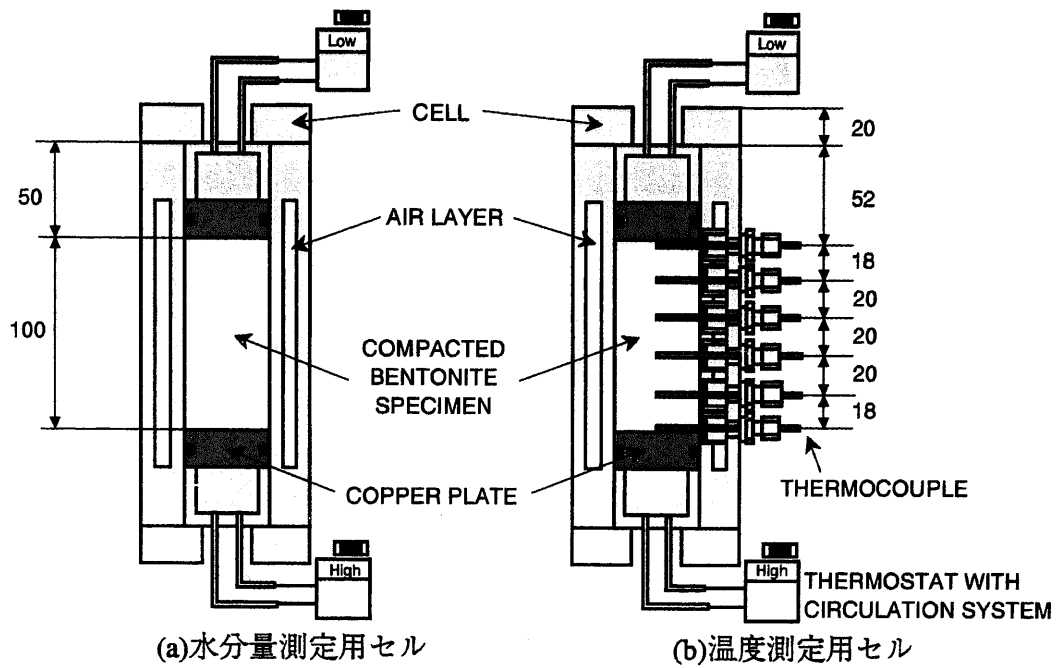


図3-8 試験装置 (KID-BEN) [Unit : mm]

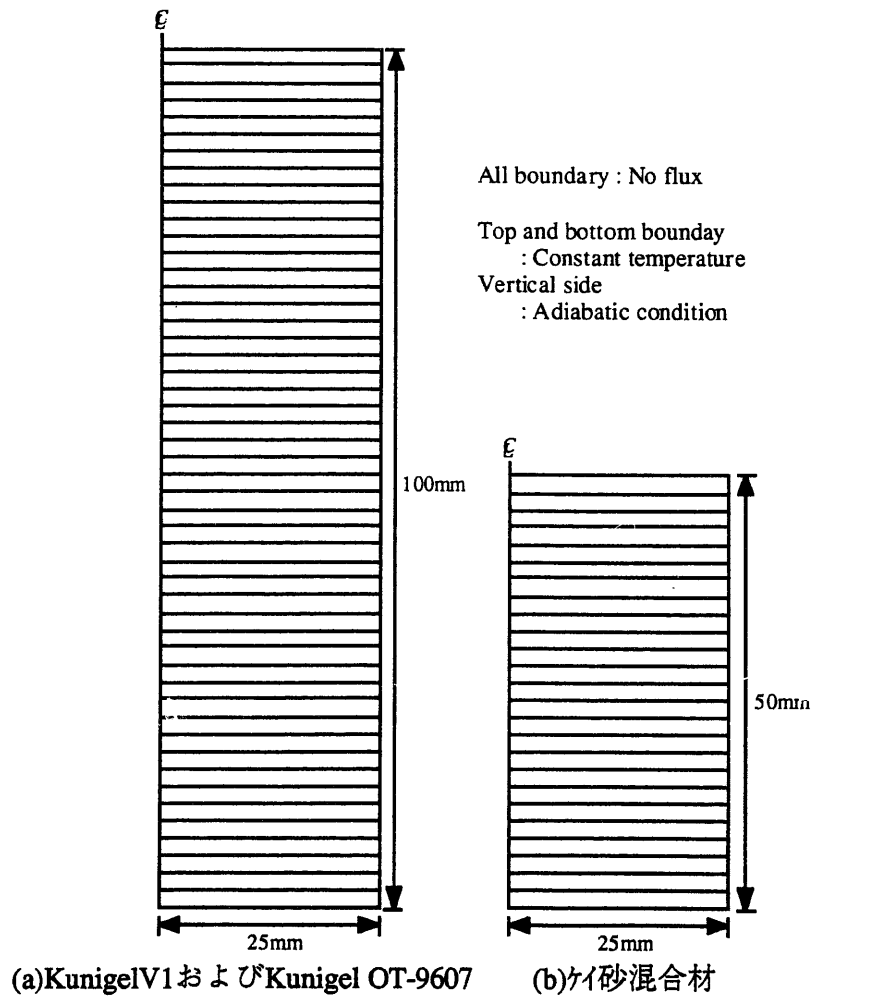
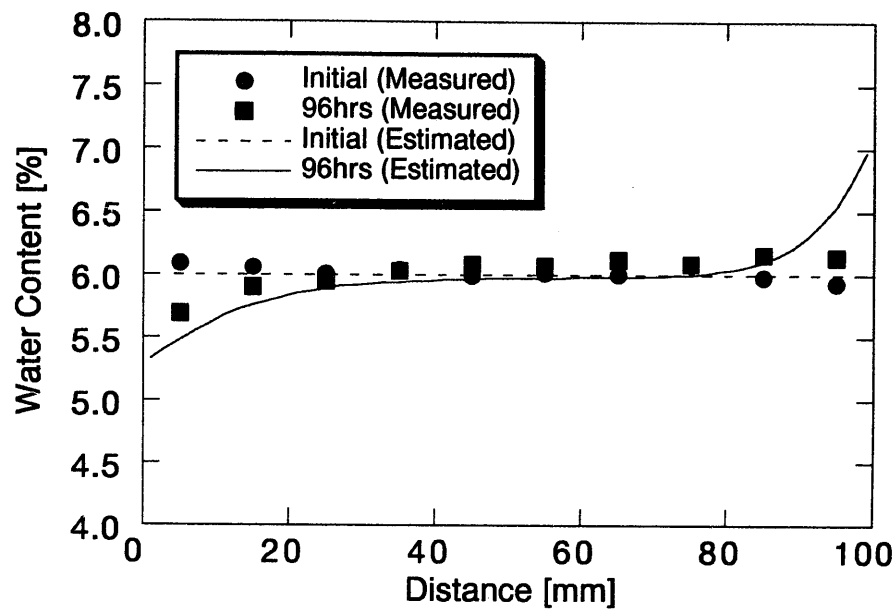
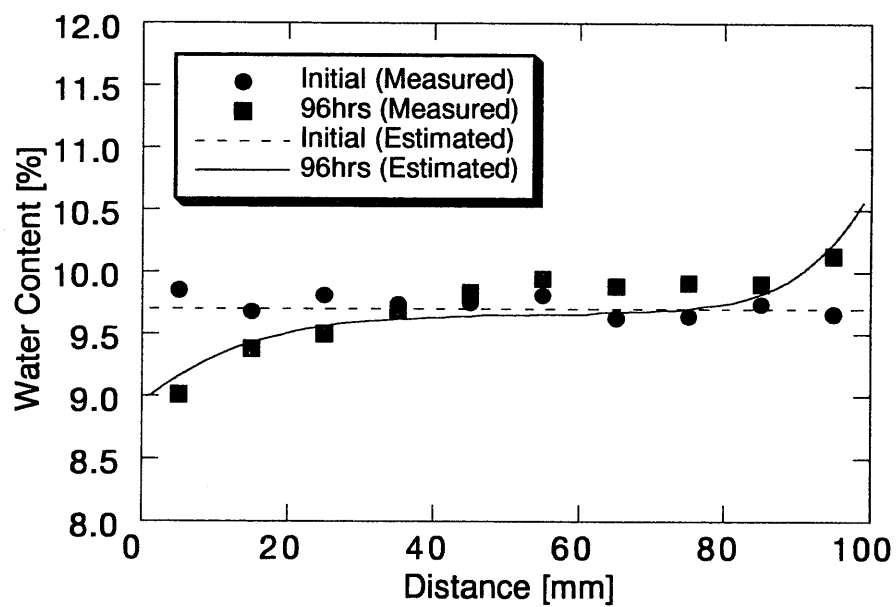


図3-9 温度勾配下の水分移動実験の解析に用いた解析モデル

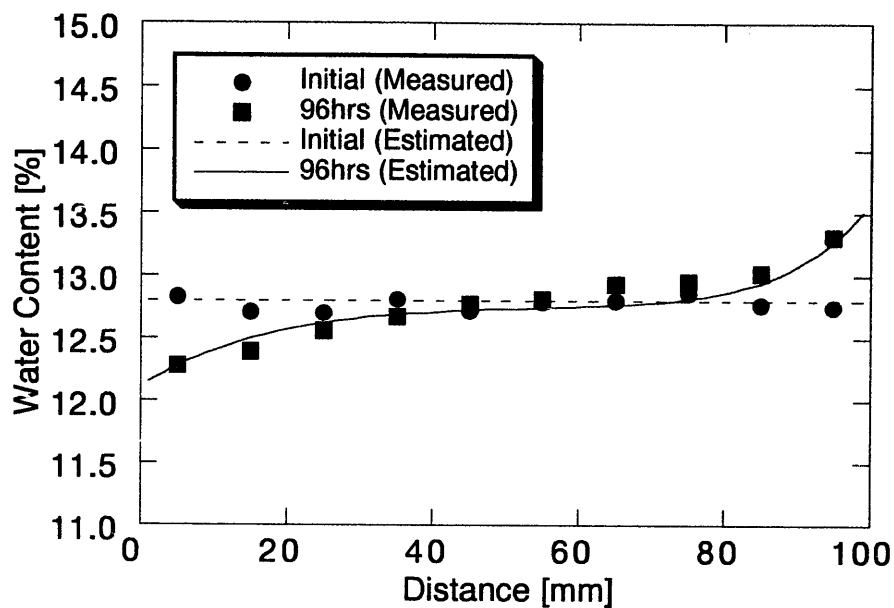


(b) 初期含水比=6.0%

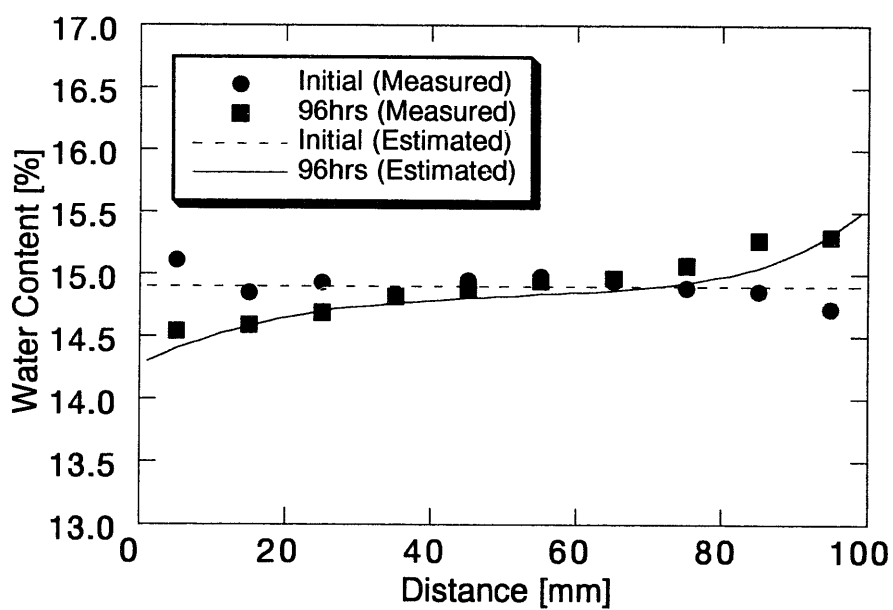


(b) 初期含水比=9.7%

図3-10 含水比分布の実験値と解析値の比較（ベントナイトKunigelV1）



(c) 初期含水比=12.8%



(d) 初期含水比=14.9%

図3-10 含水比分布の実験値と解析値の比較（ベントナイトKunigelV1, 続き）

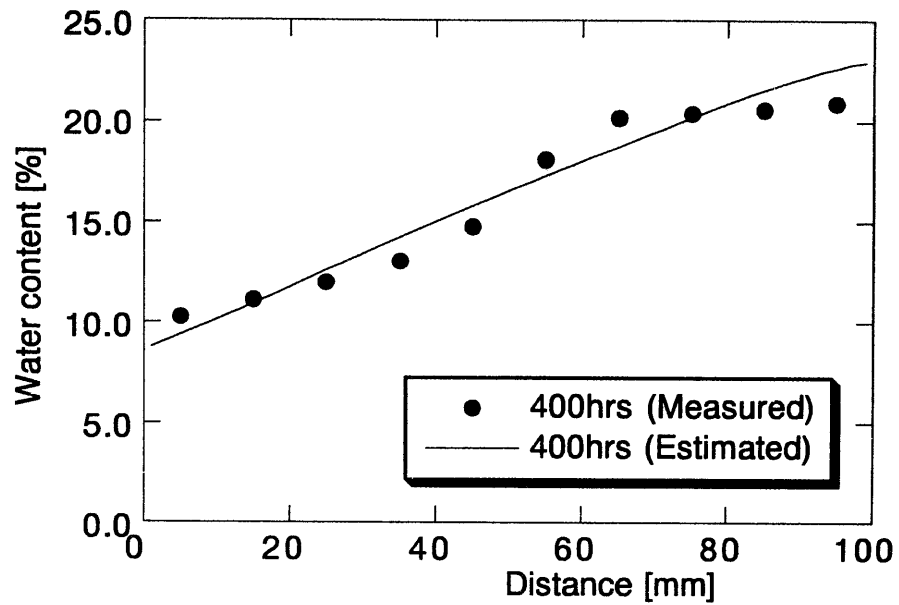


図3-11 含水比分布の実験値と解析値の比較（ベントナイトKunigelOT-9607）

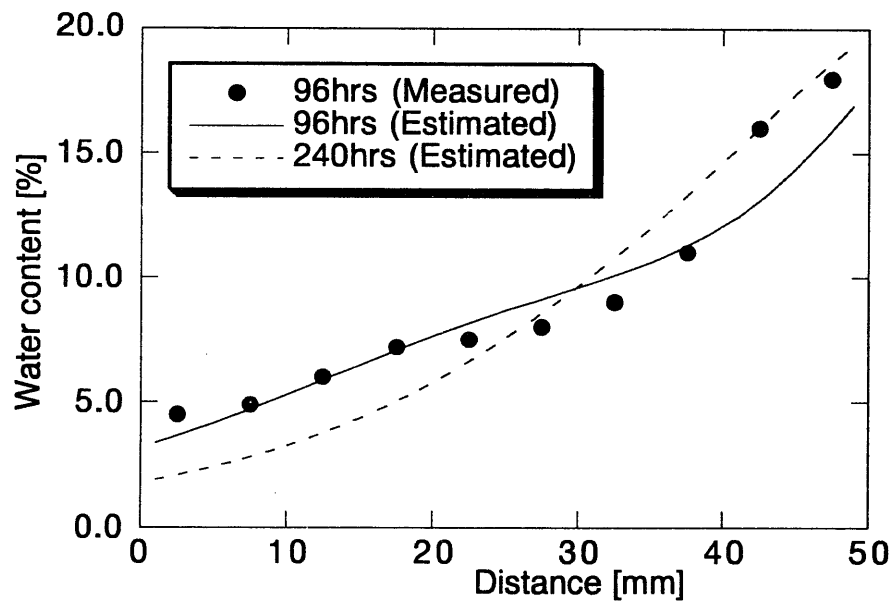


図3-12 含水比分布の実験値と解析値の比較（ケイ砂混合材）

3.3 膨潤試験の解析

3.3.1 試験条件

ベントナイトの膨潤応力を測定する装置の概要を図3-13に示す。供試体の寸法は直径20.0×高さ20.0mmである。各試料の初期含水比は表3-6の通りである。

表3-6 各材料の初期含水比

	ベントナイトKunigelV1	ベントナイトKunigelOT-9607	ケイ砂混合材
初期含水比	9.0%	16.0%	6.0%

3.3.2 パラメータ

解析に用いた水分拡散係数および水分特性曲線は図3-2および図3-4に示すものである。また、各材料の弾性係数、ポアソン比としては表3-7に示す値を用いた。弾性係数は含水比の関数としている。

表3-7 各材料のパラメータ

	ベントナイトKunigelV1	ベントナイトKunigelOT-9607	ケイ砂混合材
弾性係数[MPa]	1140.0 - 55.64 ω	254.9 - 8.854 ω	58.74 - 1.87 ω
ポアソン比[-]	0.3	0.3	0.3

ω ; 含水比 [%]

3.3.3 解析モデル

解析には浸潤解析に用いたものと同じモデル（図3-3）を用いた。水理的境界条件に関しては浸潤試験と同様に側面および上端の境界は不透水とし、下部は大気圧で固定とした。また、水-応力の連成解析とし、力学的境界条件としては全面スライド境界とした。

3.3.4 解析結果

供試体内部において膨潤圧が発生したときに拘束境界面に作用する応力をここでは膨潤応力と定義する。膨潤応力の値はベントナイトの微視的構造による影響等により膨潤圧とは必ずしも等しくならない（中野ほか，1984）。

したがって、膨潤応力に寄与する膨潤圧 π' は、膨潤圧 π にある係数を乗じた次式で表わされ则认为る。

$$\pi' = F\pi \quad (3-6)$$

現在のところ、係数 F を理論的に求めることは困難であるので、ここでは図3-13に示す試験装置で得られた実測の膨潤応力のデータから F を求めることとした。

図3-14～図3-17にはベントナイトKunigelV1の場合の解析結果を示す。弾性係数は含水比の関数とし、表3-7に示す式を用いた。図3-14には供試体の各高さにおける水分ポテンシャルの経時変化を示す。凡例は供試体下部、すなわち浸潤面からの距離である。同図より浸潤開始より約150時間で供試体全体の水分ポテンシャルの値が0になっていることが分かる。図3-15には供試体の各高さにおける応力の経時変化を示す。供試体内部の応力が拘束境界面に作用する膨潤応力に等しいと考え、この応力値が膨潤応力の値に一致するように F の値を求めた。図3-15は F が0.160の時の結果である。図3-14と図3-15を比べると膨潤応力の発生状況は水分ポテンシャルの変化状況と一致していることがわかる。これは、(2-5)式に示すように水分ポテンシャルの変化量が膨潤圧になるというモデルを用いたためである。図3-16には含水比の経時変化を示す。含水比が一定となり供試体内が飽和になる時間は水分ポテンシャルが一定になる、すなわち膨潤圧の発生がなくなる時間に比べて早いことがわかる。これは、図3-4の水分特性曲線において限界毛管水頭（飽和体積含水率における曲線の立ち上がり）が高いため、水分ポテンシャルの値がまだ大きい時点でベントナイトは飽和となっていることに起因している。また、図3-15、3-16をみると供試体内の各位置において応力値および飽和含水比の値が異なっていることが分かる。図3-17には各位置における乾燥密度の変化を示す。初期においては浸潤面に近い位置が膨潤による影響で密度が低下し、反対面はそのため密度が大きくなっている。浸潤が進むに連れ上部が膨潤により密度が低下していき、最初膨潤により密度が低下していた部分の密度が高くなっている。そして、弾性係数を含水比の関数としているため、最終的に密度が均一に戻らず、ばらついた結果となっている。ここでは、内部において発生した最大の応力を膨潤応力とし、実測結果との比較を行なった。図3-18に、膨潤応力の実測値と計算結果との比較を示す。実験では膨潤応力は試験開始後早期から発生しているが、解析結果ではこれに比べ膨潤応力の発生は遅れた結果となった。

図3-19～3-21には、弾性係数を一定とした場合の応力、含水比、乾燥密度の経時変化を示す。弾性係数を一定とした場合は、最終的に内部の乾燥密度が均一にもどるため、含水比および応力の値は供試体内部で一定となった。弾性係数を変化させたケースと一定としたケースを比較すると、変形は大きく異なっているものの、含水比の変化はそれほど大きく異なっていない。これは、飽和浸透特性を密度等の関数としていないためであると考えられる。膨潤試験の結果を精度良く再現するには浸透特性を密度等の関数にして解析を実施することが必要である。また、膨潤試験時の供試体内部の水分量変化および密度変化を測定することも必要となってくると思われる。

図3-21、3-22にはベントナイトKunigelOT-9607およびケイ砂混合材の場合の、膨潤応力の実験値と解析値との比較を示す。解析は弾性係数を含水比の関数として実施している。また、実験はベントナイトKunigelOT-9607に関しては3回、ケイ砂混合材に関しては5回実施している。実験結果は、各回ごとに異なる挙動を示してい

る。特にケイ砂混合材の場合は、最終的な値も異なっている。今回の同定には、実験の結果、膨潤応力の値が最大になったケースに関して実施した。同定された F の値は表3-8の通りである。これらの F の値は、最終的な膨潤応力の値が実験値と解析値で一致するように同定されている。今回の試験の場合、ベントナイトKunigelV1の場合は、試験開始早期に膨潤圧は発生し定常となっている。しかし、ベントナイトKunigelOT-9607、ケイ砂混合材の場合は、膨潤圧の値は緩やかに上昇している。今回用いた解析モデルは水分ポテンシャルの変化量が膨潤圧の発生に寄与していると考えているモデルであるため、膨潤圧の発生状況は供試体内の浸潤状況に大きく依存している。すなわち、今回の計算では、ベントナイトKunigelV1に比べ、ベントナイトKunigelOT-9607およびケイ砂混合材の方が浸潤が早いため、当然後者の方が、膨潤圧の発生は速く、定常に達するまでの時間は短くなってくる。

表3-8 各材料において同定された F 値

	ベントナイトKunigelV1	ベントナイトKunigelOT-9607	ケイ砂混合材
F 値	0.160	0.120	0.050

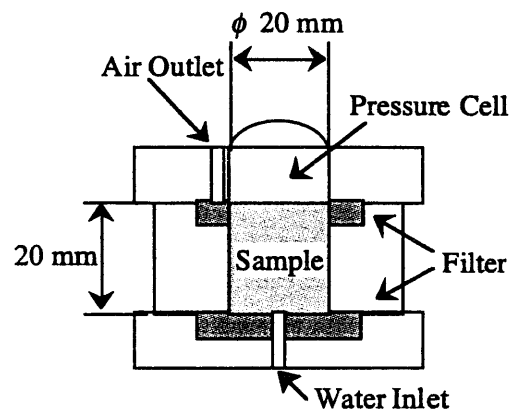


図3-13 膨潤圧測定試験装置

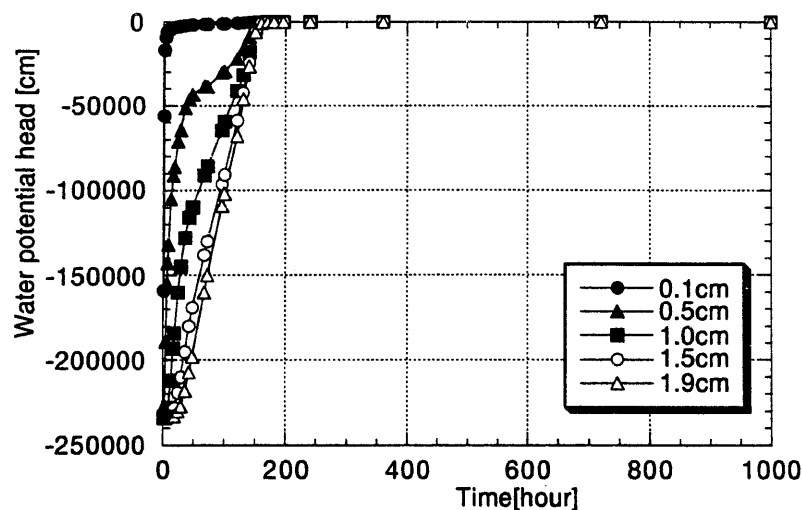


図3-14 水分ポテンシャルの経時変化（弾性係数変化，ベントナイトKunigelV1）

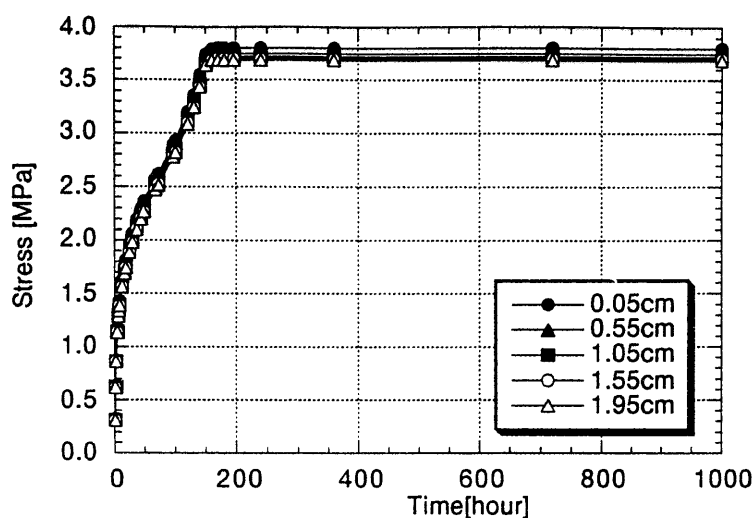


図3-15 緩衝材内の応力の経時変化（弾性係数変化，ベントナイトKunigelV1）

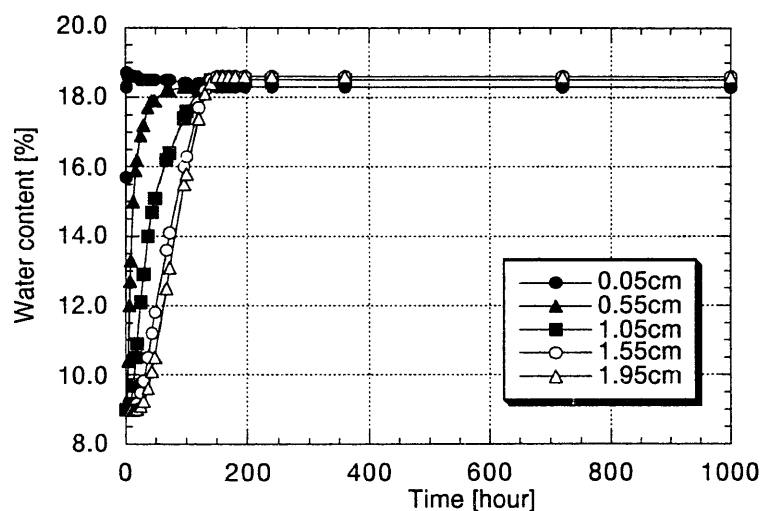


図3-16 含水比の経時変化（弾性係数変化，ベントナイトKunigelV1）

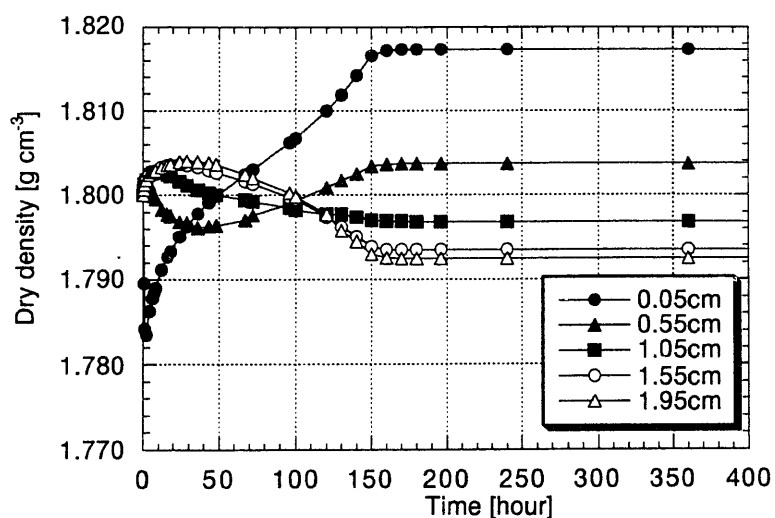


図3-17 乾燥密度の経時変化（弾性係数変化，ベントナイトKunigelV1）

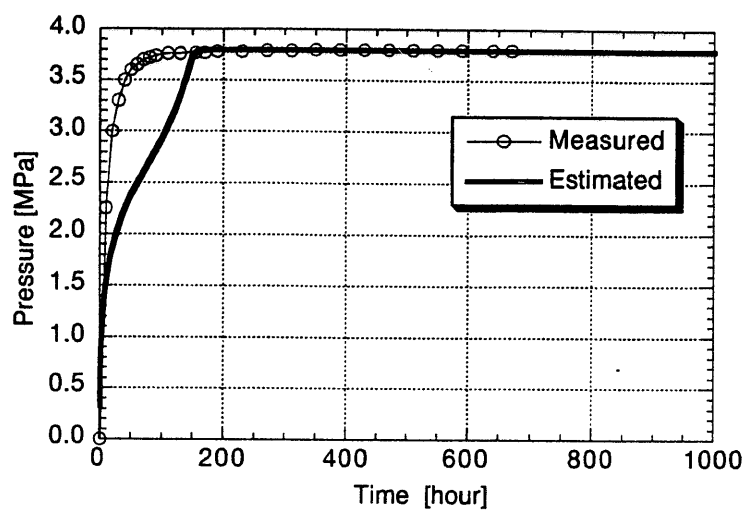


図3-18 膨潤応力の実験結果と解析結果の比較
(弾性係数変化, ペントナイトKunigelV1)

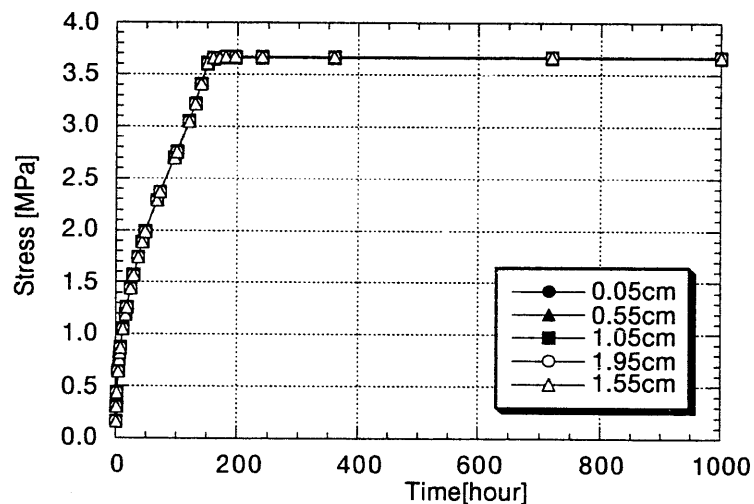


図3-19 緩衝材内の応力の経時変化 (弾性係数一定, ペントナイトKunigelV1)

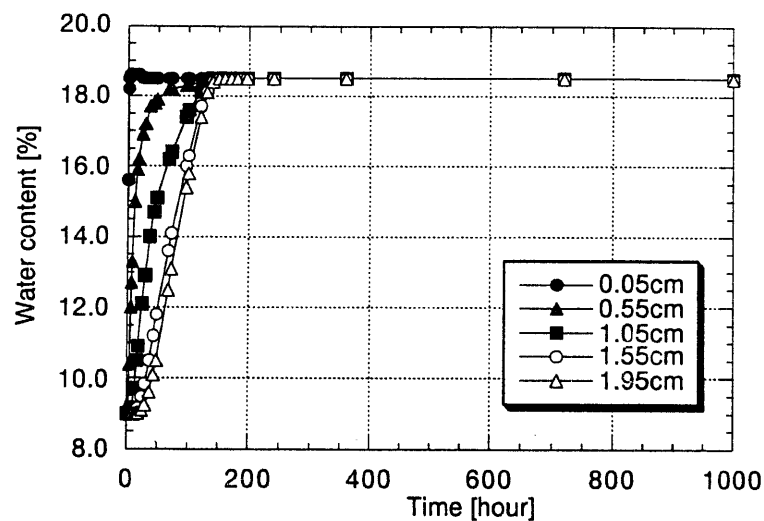


図3-20 含水比の経時変化 (弾性係数一定, ペントナイトKunigelV1)

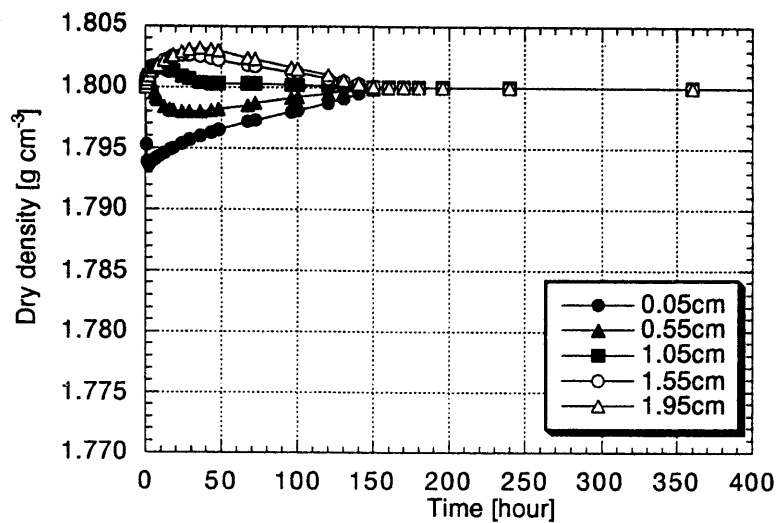


図3-21 乾燥密度の経時変化（弾性係数一定，ベントナイトKunigelV1）

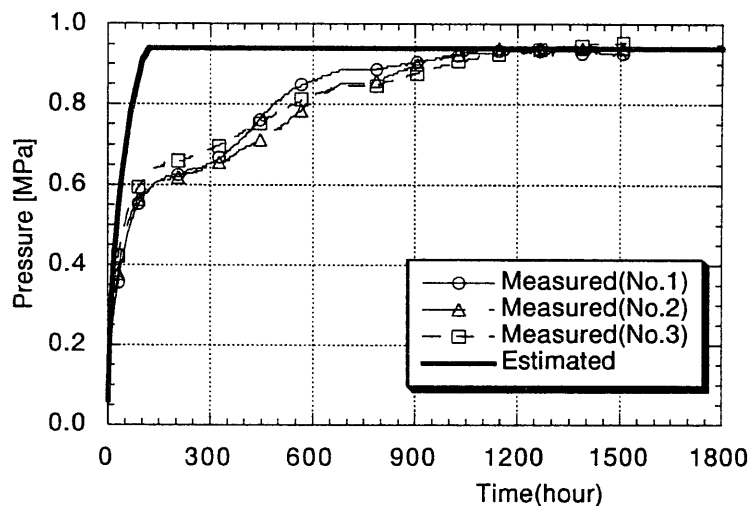


図3-22 膨潤応力の実験結果と解析結果の比較（ベントナイトKunigelOT-9607）

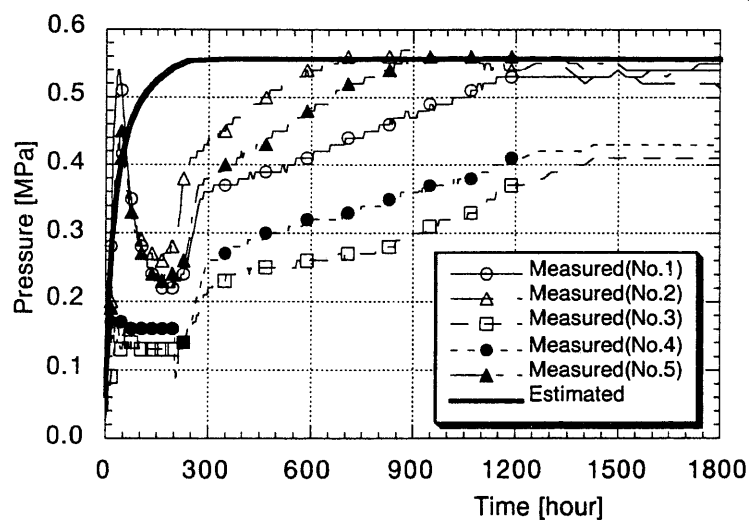


図3-23 膨潤応力の実験結果と解析結果の比較（ケイ砂混合材）

第4章 熱-水-応力連成モデルの検証解析

4.1 加圧浸潤試験の解析

4.1.1 概要

不飽和領域における水分移動を水分拡散係数を用いた拡散方程式を用いて水分移動を表現する場合、未知数は(4-1)式に示すように通常水分量である。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (4-1)$$

しかし、今回使用するモデルの元々の未知数は圧力水頭であるため、次式に示すように水分拡散係数に比水分容量($\partial \theta / \partial \psi$)を乗じて、水分勾配の代りに圧力勾配で水分が移動する式を用いる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \quad (4-2)$$

したがって、今回使用するモデルでは水分量と負の圧力水頭の関係として水分特性曲線が必要となってくる。また、第3章で述べたように、解析に使用する水分拡散係数は、大気圧力下での浸潤試験により得られたものである。しかし、実際は大気圧力より高い水圧が緩衝材にかかると考えられる。拡散方程式の場合、未知数が水分量であるため、飽和時は全て飽和の水分量となり大気圧より高い水圧を表現することは出来ない。今回のモデルは未知数が圧力水頭であるためこのような高い圧力を表現することが可能であるが、使用する水分拡散係数は大気圧力下での浸潤により算出されたものであるため、実際にこのような高圧力による浸潤挙動を今回使用した物性値で表現できるのか確認しておく必要がある。そこで、ここでは大気圧より高い圧力による浸潤試験(加圧浸潤試験)を実施し、今回のモデルによる解析で表現可能であるか確認を実施した。

4.1.2 加圧浸潤試験

図4-1に浸潤試験装置の概要を示す。(a)は大気圧力による浸潤試験装置、(b)は加圧浸潤試験装置である。供試体の大きさは第3章で述べた浸潤試験と同様に直径20mm×高さ20mmである。試験に使用した供試体はベントナイト単体材料(ベントナイトKunigelV1)で乾燥密度が1.8g/cm³である。また、加圧浸潤試験時の加圧力は0.8MPaとした。図4-2に大気圧浸潤試験と加圧浸潤試験とで得られた供試体内の水分分布の比較を示す。加圧することにより水分移動が早くなっていることがわかる。

4.1.3 浸潤試験の解析

解析には第3章で設定されたベントナイト単体材料の水分拡散係数および不飽和水

分特性曲線を用いた。解析モデルは図3-2と同じである。モデルの下端部を大気圧圧力あるいは0.8MPaで固定とし、他の境界は不透水とし、水理解析を実施した。図4-3に実測値と解析値との比較を示す。(a)は大気圧力による浸潤、(b)は加圧力による浸潤である。解析も加圧することにより水分の移動が早くなっており、また、実測値とも良い一致を示している。すなわち、本モデルにより、高圧力による浸潤挙動を再現できるものと考えられる。

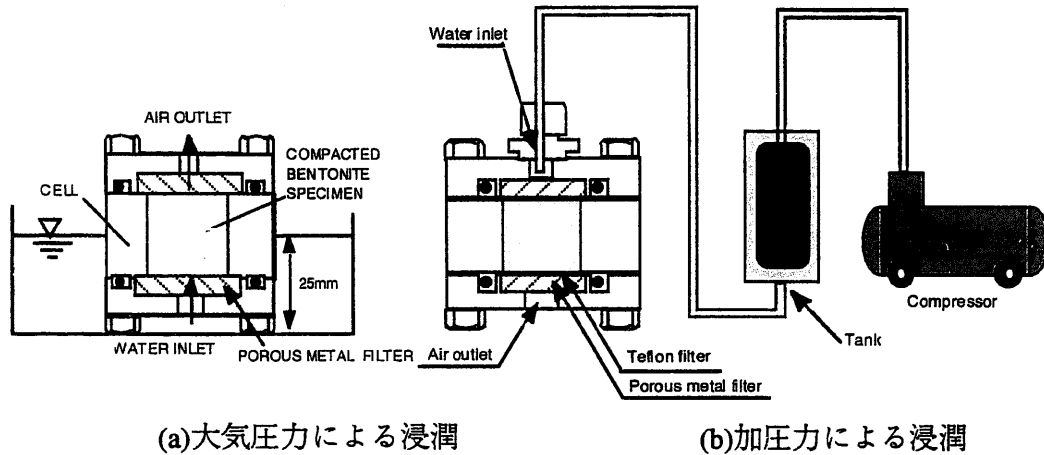
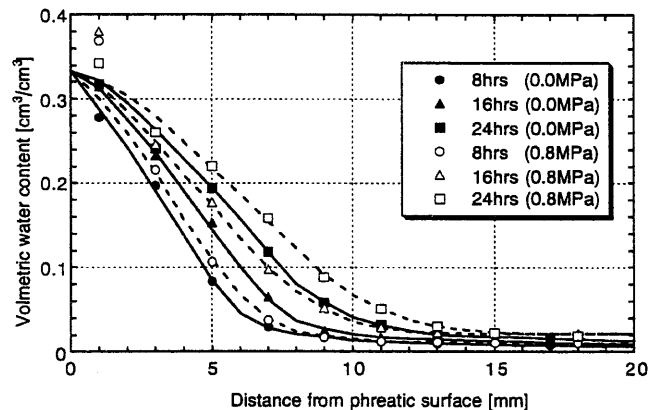
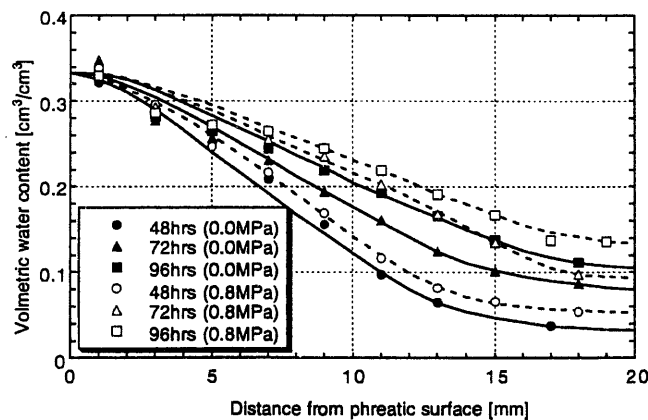


図4-1 浸潤試験装置

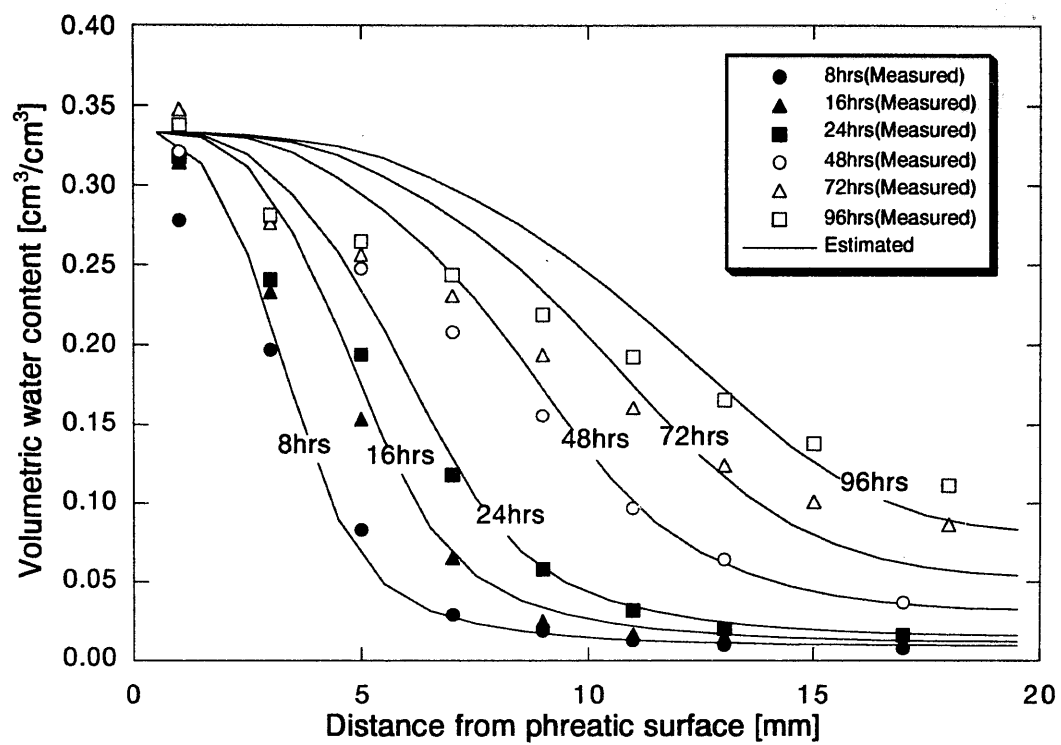


(a)8時間から24時間後

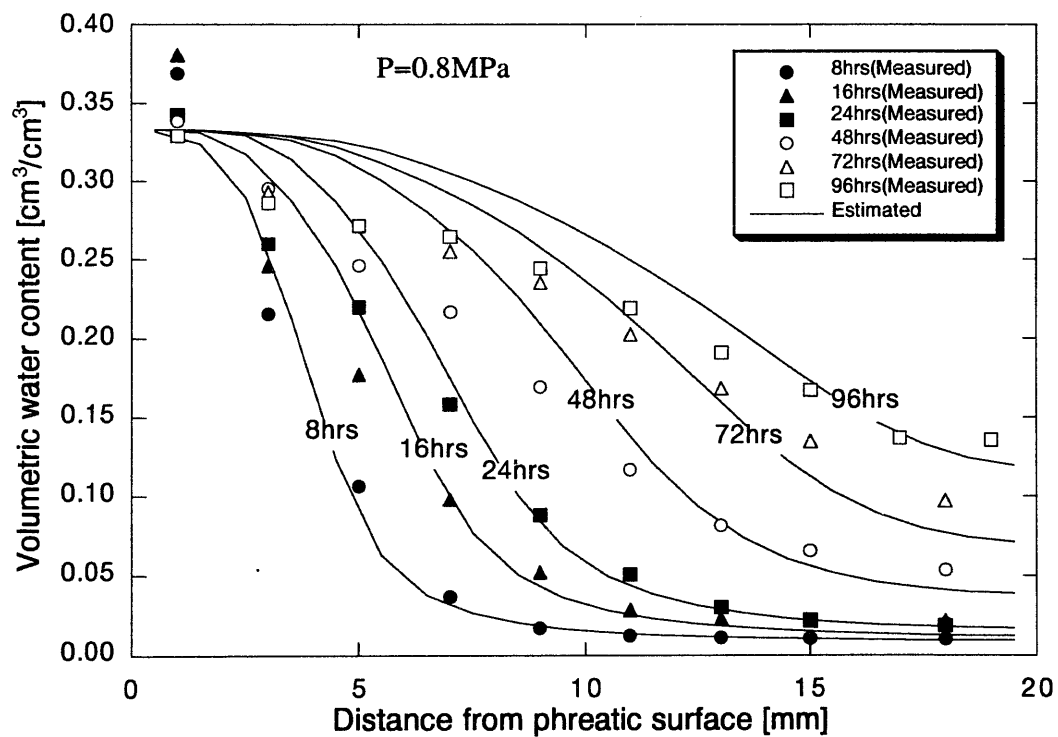


(b)48時間から96時間後

図4-2 大気圧浸潤と加圧浸潤とによる水分分布の比較



(a)大気圧浸潤



(b)加圧浸潤

図4-3 解析結果と実測値との比較

4.2 緩衝材大型試験の解析

4.2.1 概要

ここでは、第3章で設定された物性値を用い緩衝材大型試験（Sato,S., et al., 1991）の解析を行ない、同実験で得られた緩衝材中の温度分布状況、水分分布変化状況等について解析結果と比較検討を行ない、熱-水-応力連成モデルの確証を実施する。

4.2.2 解析条件

解析モデルの概要を図4-4に示す。解析は2次元軸対称で実施した。解析に用いた有限要素メッシュを図4-5に示す。緩衝材はケイ砂混合材であり、初期乾燥密度は 1.6g/cm^3 、初期含水比は16.6%である。解析は、ヒーター中心を軸にした軸対称問題として行なう。初期温度は 13.9°C であり、発熱は図4-4のHeat sourceと書いたガラスビーズ部分から均一に発熱するものとする。緩衝材への注水は注水孔に当たる節点の水圧を固定することにより注入状態を表現する。温度の境界条件として上端部および底部を熱伝達境界とし、側部は温度固定境界とした。固定温度は各解析ステップにおいて、実測の温度データを用いた。発熱量、注入水圧、および熱伝達境界における熱伝達係数は以下の値を用いた。

発熱量；0.8 kW

注入水圧；0.05 MPa

熱伝達係数； $1.0\text{ W/m}^2\text{K}$

4.2.3 パラメータの設定

各材料のパラメータについては表4-1に示す値を用いる。緩衝材の水分拡散係数、水分特性曲線、温度勾配水分拡散係数および膨潤圧係数としては、前節で同定された値を用いる。

表4-1 解析に用いたパラメーター一覧

パラメータ	コンクリート	緩衝材	オーバーパック	ガラスビーズ	空気層
弾性係数 [MPa]	2.50×10^4	表3-7	2.00×10^5	8.20×10^4	8.30×10^2
ポアソン比 [-]	0.167	0.300	0.300	0.300	0.450
密度 [g/cm^3]	2.30	1.87	7.80	1.60	1.00×10^{-3}
固有透過度 [m^2]	1.00×10^{-21}	4.00×10^{-20}	1.00×10^{-30}	2.50×10^{-11}	3.30×10^{-8}
比熱 [kJ/kg/K]	0.75	表3-4	0.46	0.84	1.00
熱伝導係数 [W/m/K]	1.88	表3-4	53.0	0.255	0.0729
熱膨張係数 [$1/\text{K}$]	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}	1.64×10^{-6}	1.00×10^{-6}	3.60×10^{-3}

4.2.4 解析結果および考察

図4-6に緩衝材中の温度分布、図4-7に緩衝材中の含水比分布の経時変化の解析結果を示す。距離は緩衝材中のヒーター側からの距離である。すなわち、 $x=0\text{cm}$ がオーバーパックに接した空気層側であり、 $x=30\text{cm}$ が注水孔側である。また、高さはヒーターの中心部における高さである。図4-8にはヒーター中心高さにおける緩衝材の外側部における膨潤応力の経時変化の解析結果を示す。

図4-6より温度は試験開始5ヶ月後程度までは時間と共に急激に上昇していることが分かる。そして、その後温度の上昇は緩やかとなり、ほぼ定常となっている。図4-7より加熱開始1日後で緩衝材は注水孔側3cmの付近まで一様に含水比が低下していることが分かる。図4-6によるとこの時点での温度上昇はまだ少ない。そして、注水により注水孔側では含水比は徐々に高くなっている。オーバーパック側の加熱による水分の移動は注水孔側の水分移動に比べて小さいが、1年後程度まで徐々に含水比は小さくなっている。そして、加熱および注入開始後約3年後に水分分布はほぼ定常となっている。定常時においては、オーバーパックから5cmの付近までは、加熱による水分移動により含水比は初期より小さくなっており、それ以降は浸潤により含水比は初期より高くなっている。図4-8より計算により得られた膨潤圧は約0.4MPaであった。膨潤圧は試験開始後約900日後までは急激に増加しており、その後は徐々に緩やかになっている。図4-7、4-8より水の移動がある状態では膨潤圧は発生しているが、浸潤分布が定常になると膨潤圧の発生はなくなることが分かる。

図4-9に1ヶ月後、5ヶ月後および20ヶ月後の緩衝材中の温度分布の実験値と解析結果の比較を示す。また、図4-10に5ヶ月後および20ヶ月後の緩衝材中の含水比分布の実験値と解析結果の比較を示す。位置は図4-6、4-7と同じである。また、図4-11には緩衝材中の各観測地点における膨潤圧の経時変化と解析による膨潤圧の経時変化の比較を示す。図4-12には領域全体の温度分布の実験結果と解析結果を示す。図4-12の(a)は5ヶ月後の実験結果、(b)は5ヶ月後の解析結果である。(c)は1ヶ月後の解析結果である。また図4-13は5ヶ月後、20ヶ月後の含水比分布である。(a)、(b)はそれぞれ異なる2断面における5ヶ月後の実験結果で、(c)は5ヶ月後の解析結果である。また(d)、(e)はそれぞれ異なる2断面における20ヶ月後の実験結果で、(c)は20ヶ月後の解析結果である。図4-9より1、5、20ヶ月後の全てにおいて、温度勾配は解析値、実験値ともほぼ同じになっている。値については、1ヶ月後は解析値は実験値とよい一致を示しているが、5ヶ月後は解析値は実験値に比べ2℃程度高い値を示している。この要因としては、境界条件の設定が考えられる。今回の解析では、上部および下部の熱伝達係数は仮定値を用いた。また、側面についても、実測値は中心高さの1点のみであるが、その値を全側面に固定値として与えている。図4-12において温度分布の5ヶ月後の実験結果と解析結果を見てみると、モデルの内部においては温度分布の傾向は良く似ている。境界部については、観測点の個数が少ないために十分な計測が出来ないので、解析値との比較は難しいが、解析においては境界条件をどのように設定するかがより正確な解析の実施には重要となってくる。

次に緩衝材中の水分移動状況について比較する。図4-10より実験値との比較では、

5ヶ月後においては解析の方が浸潤が遅いが、20ヶ月後ではほぼ一致している。実験値においては浸潤側で含水比が乾燥密度 1.6g/cm^3 における理論飽和含水比より大きな値を示している。これは膨潤圧の発生に伴う密度低下に起因していると考えられるが、解析ではこの現象は充分には表現できていない。図4-13より緩衝材全体の含水比分布を比較してみると、オーバーパック側壁部外側の部分については乾燥密度 1.6g/cm^3 における理論飽和含水比より高くなっている部分を除けばほぼ傾向は一致していると考えられる。しかし、測定可能な位置は限られており、緩衝材上部、下部においての実験値と解析値の比較は出来ていない。解析では、オーバーパックの側壁部分の緩衝材に比べ、上部、下部の緩衝材の方が含水比の低下量は大きくなっている。これは図4-12の温度分布によると上下部の方が温度の上昇が大きく、また、水の注入が横方向からによるものと思われる。実験値においても、オーバーパックの上部の緩衝材の含水比は小さくなっており、良く現象を再現できている。

図4-11は膨潤応力の経時変化の実験値と解析値の比較である。実験では、各測定位置において膨潤応力の値に違いが見られる。解析値は、上部の(1)の部分(-1.0m)は他の部分に比べ小さな値となっているが、その他の部分の値はほぼ同じであり、測定値ほどばらつきは見られない。-2.5mから-4.5m地点の解析値は実験値の最大値(3)および(4)とほぼ同じ値となっており、解析結果は実測の最大値は再現できていると考えられる。

以上より、実測値と若干の差異はあるものの本連成モデルを用いることによりある程度は連成現象を再現できることが分かった。

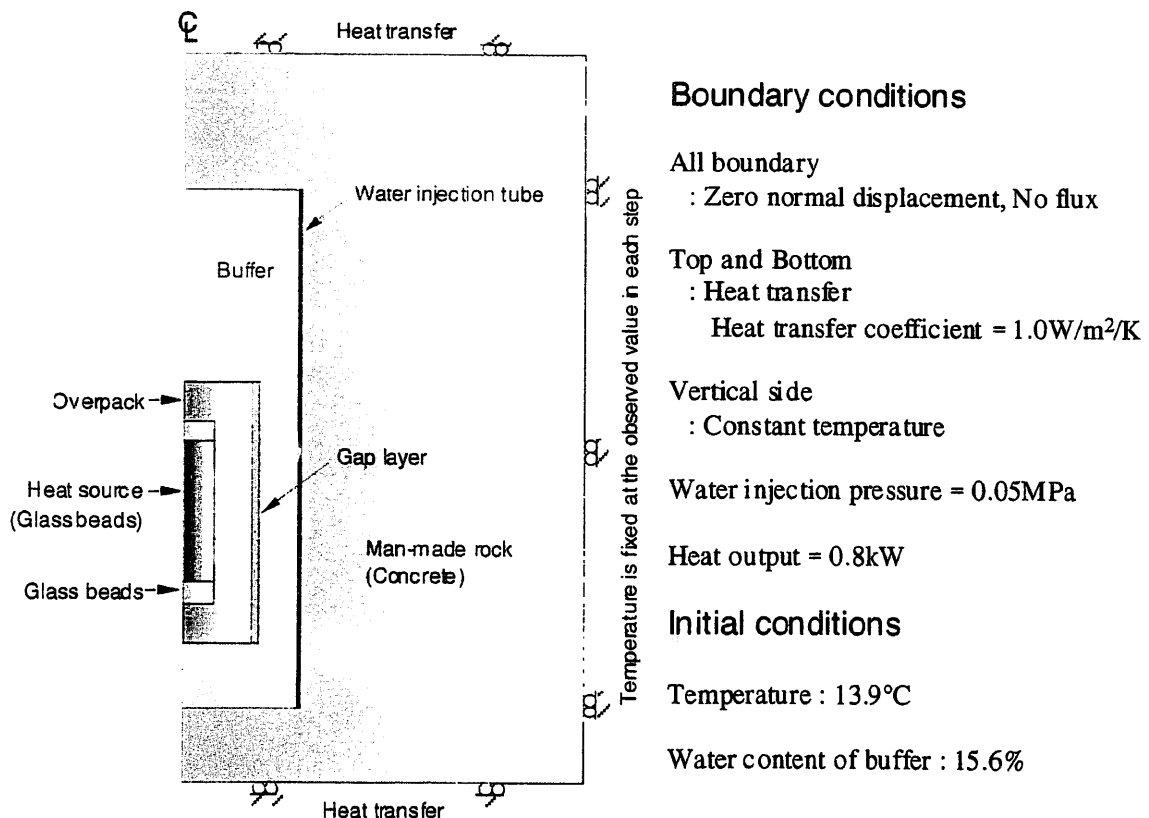


図4-4 解析モデルの概要図

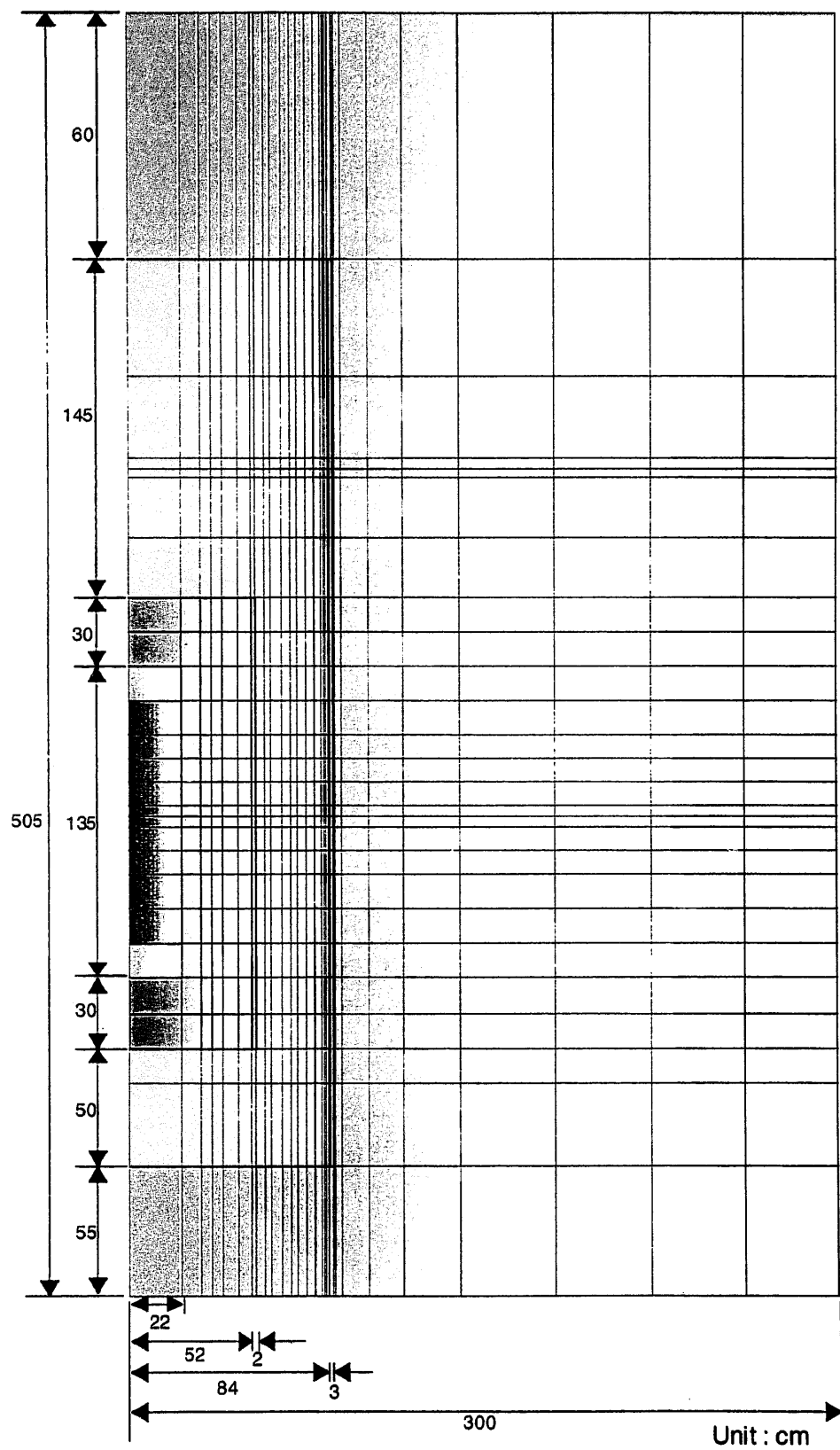


図4-5 解析メッシュ図

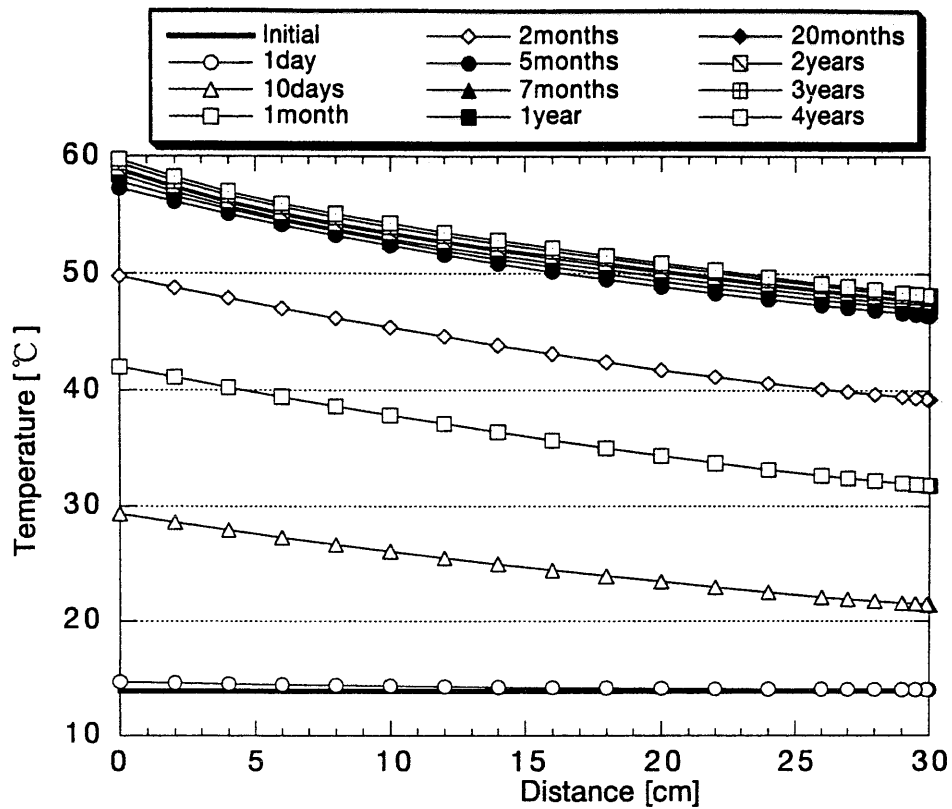


図4-6 緩衝材中の温度分布の経時変化

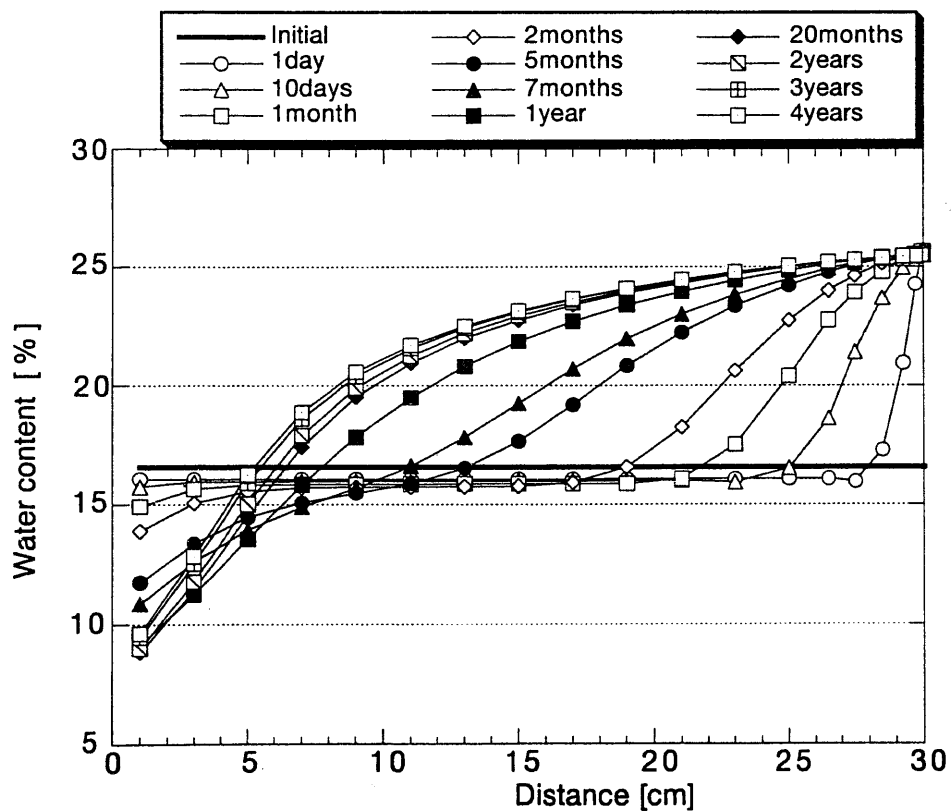


図4-7 緩衝材中の含水比分布の経時変化

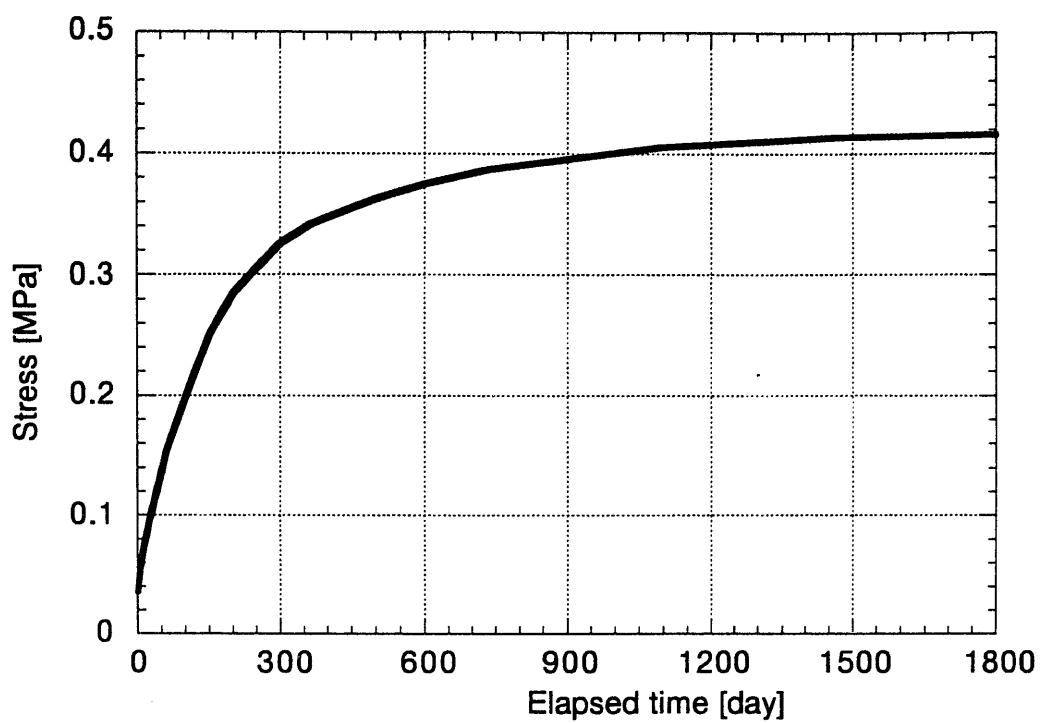


図4-8 膨潤応力の経時変化

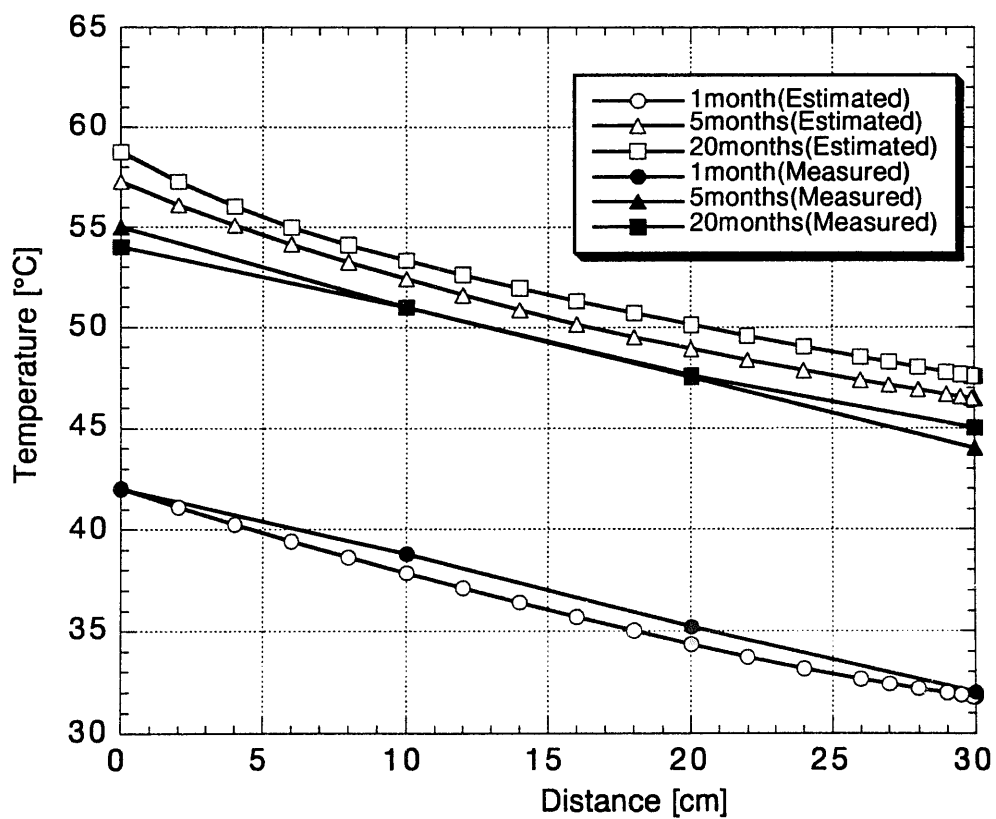


図4-9 緩衝材中の温度分布の実測値と解析値の比較

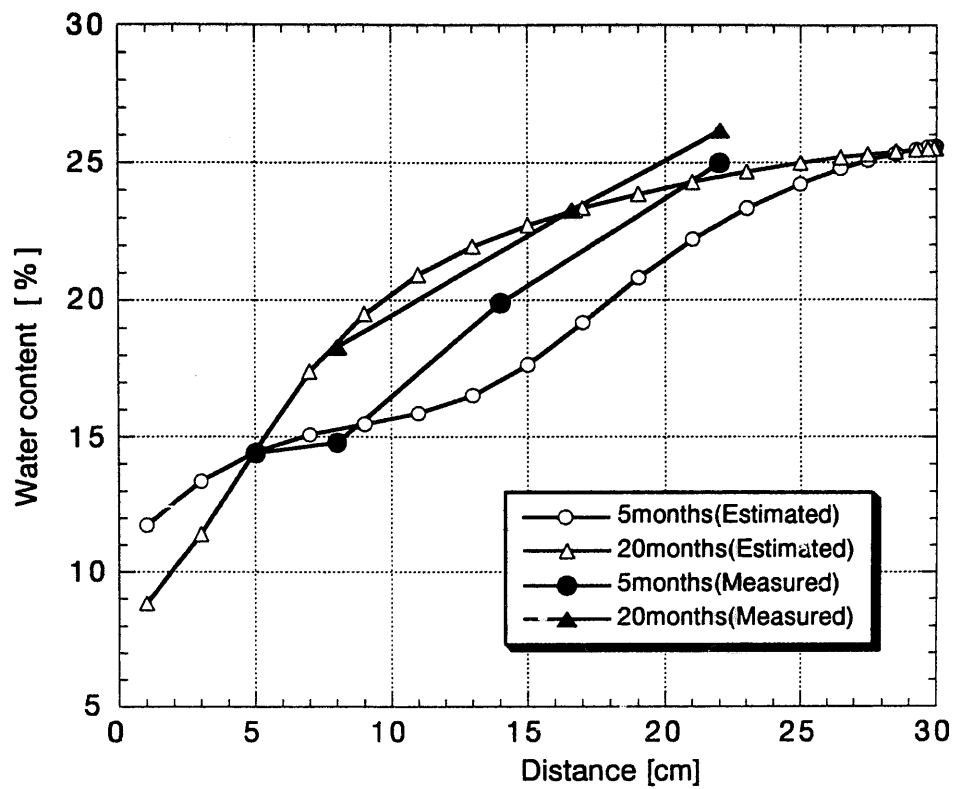


図4-10 緩衝材中の含水比分布の実測値と解析値の比較

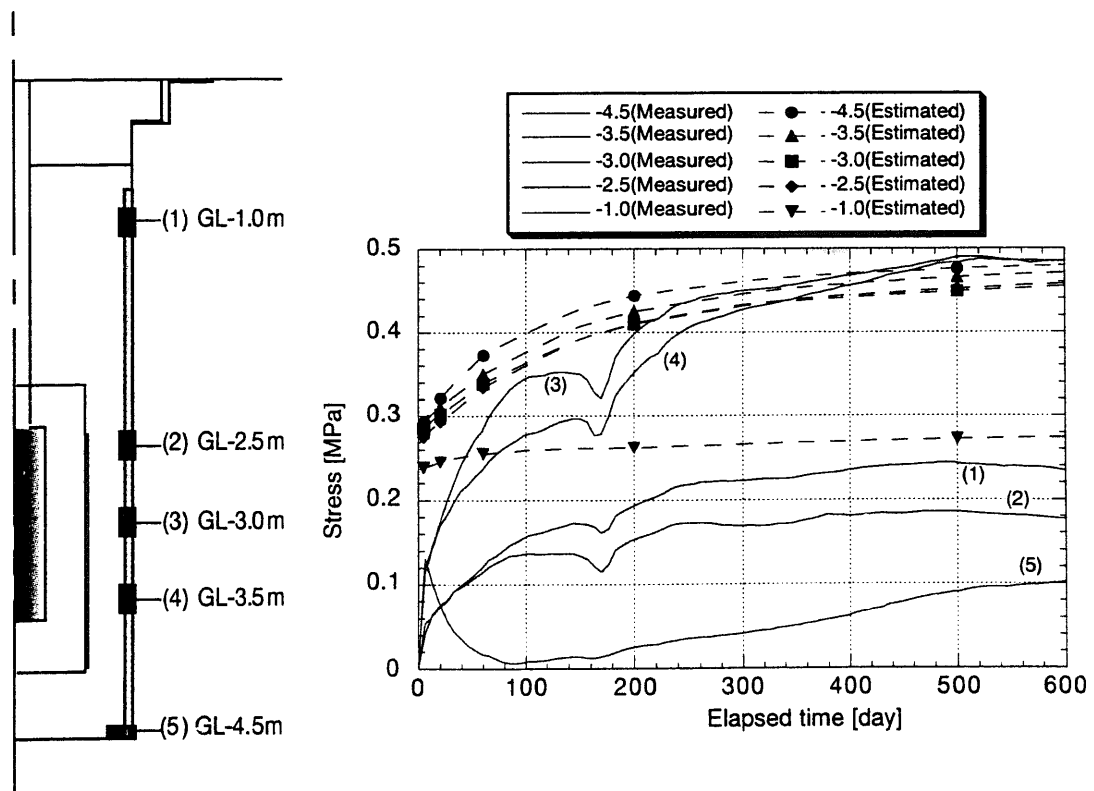
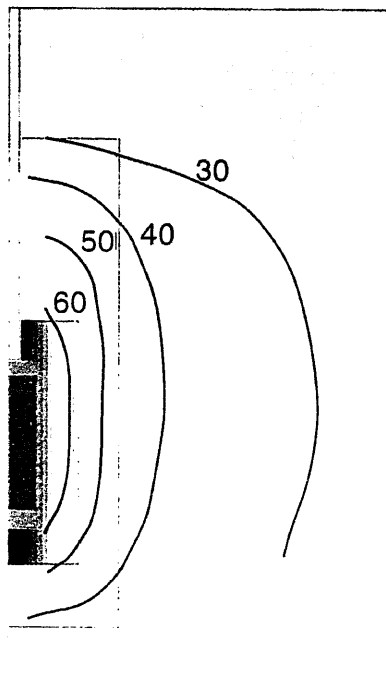
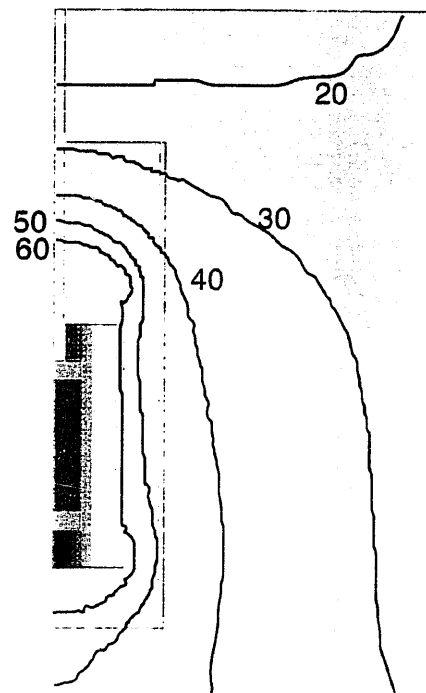


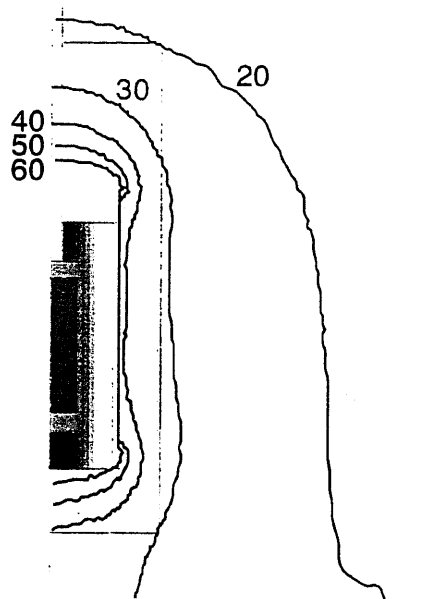
図4-11 緩衝材中の膨潤応力の実測値と解析値の比較



(a) 実験結果 (5 ヶ月後)

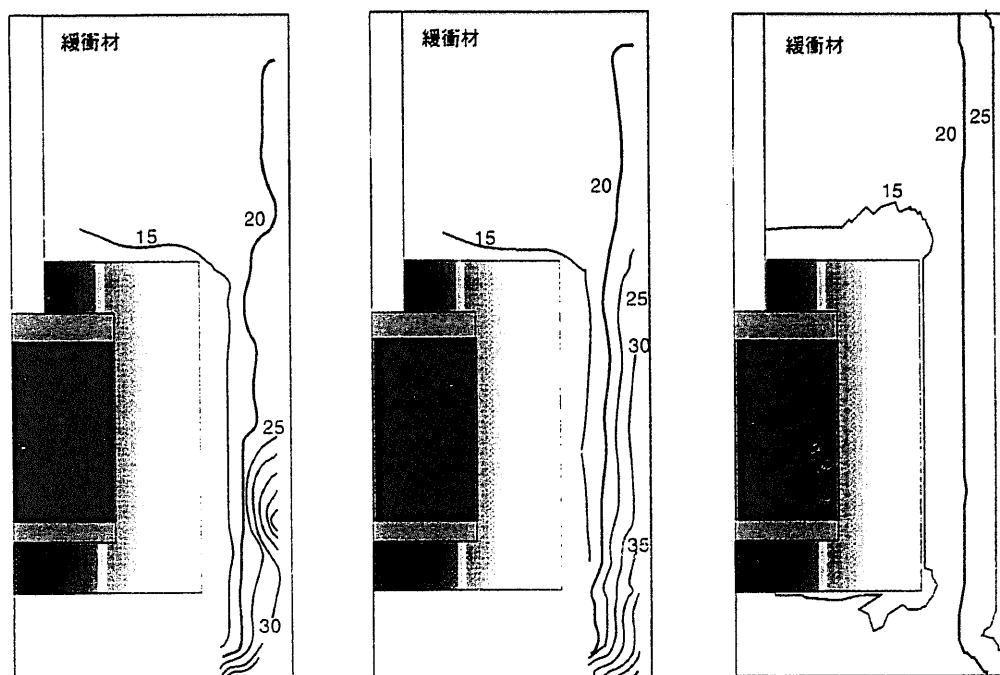


(b) 解析結果 (5 ヶ月後)



(c) 解析結果 (1 ヶ月後)

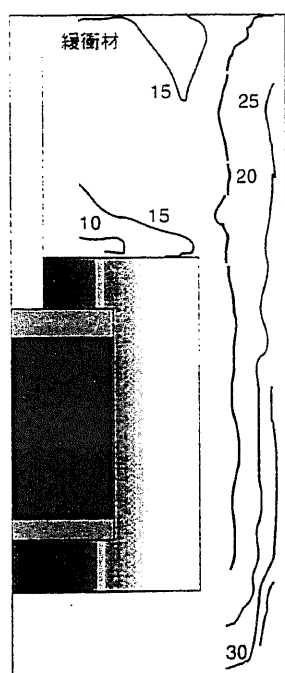
図4-12 温度分布 (°C) の実験結果と解析結果の比較



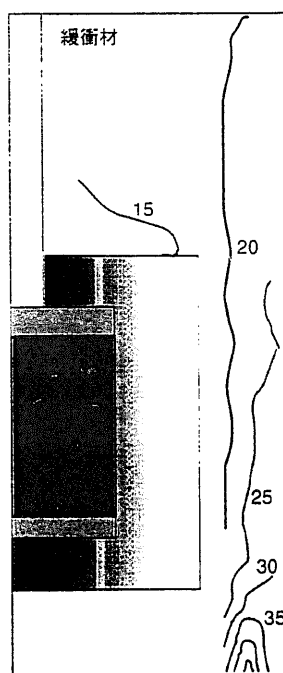
(a) 実験結果
5ヶ月後
断面1 (No.1~6)

(b) 実験結果
5ヶ月後
断面1 (No.7~12)

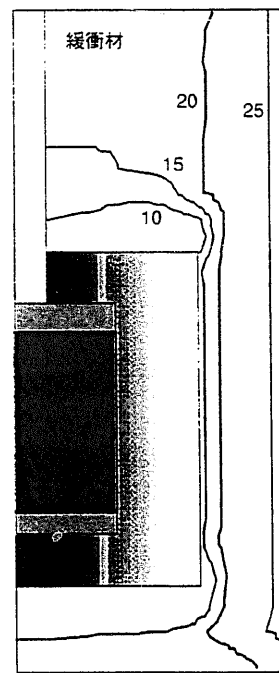
(c) 解析結果
5ヶ月後



(d) 実験結果
20ヶ月後
断面1 (No.1~6)



(e) 実験結果
20ヶ月後
断面1 (No.7~12)



(f) 解析結果
20ヶ月後

図4-13 緩衝材の鉛直断面での含水比分布(%)の実験結果と解析結果の比較

第5章 ニアフィールド連成解析（熱解析と連成解析の比較）

5.1 簡易モデルによる比較

5.1.1 解析条件

（1）解析モデル

解析は軸対称モデルで行なう。解析モデル図を図5-1に示す。本モデルの解析領域は処分孔縦置方式の処分モデルにおける図5-2に示す領域である。ガラス固化体，オーバーパック，緩衝材の厚さはそれぞれ22cm，19cm，70cmである。緩衝材はケイ砂混合材（30wt%， $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ）とした。また，領域の外側までの距離は1000mとした。

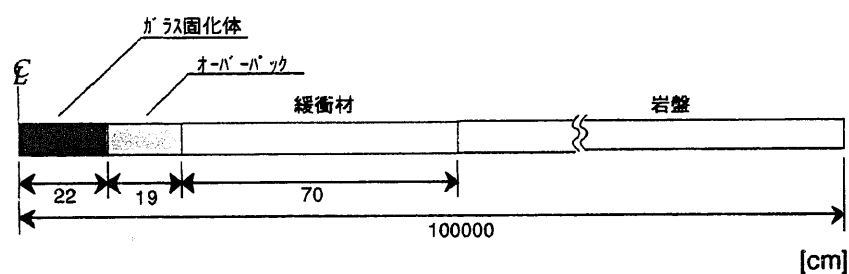


図5-1 解析モデル図

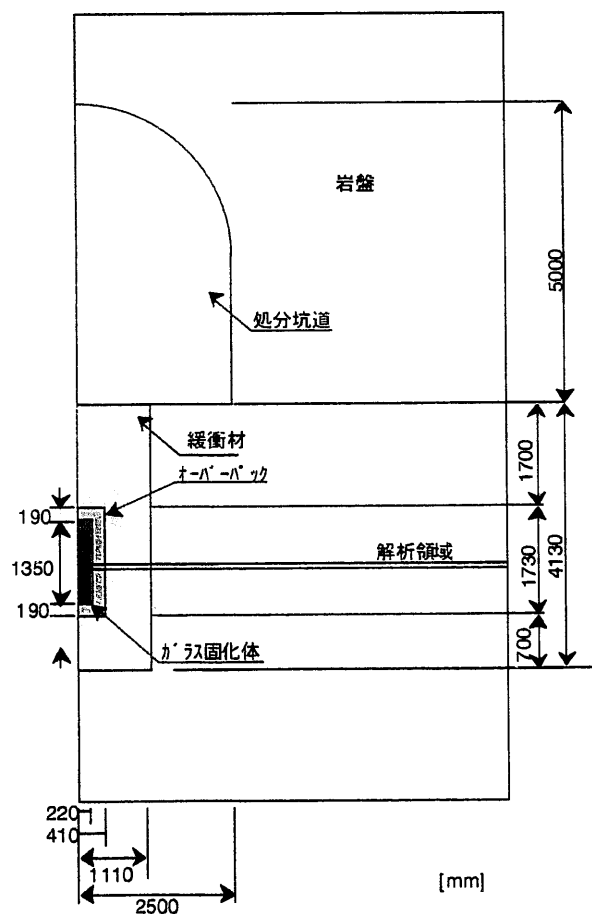


図5-2 解析領域

(2) 解析物性値および初期条件, 境界条件

解析に用いた物性値は表5-1の通りである。緩衝材の熱物性は次式にあるように含水比の関数として与えた。(5-1), (5-2)式から得られる熱伝導率[W/m/K], 比熱[kJ/kg/K]は図5-3のようになる。

$$\text{比熱} \quad : c = \frac{34.1 + 4.18\omega}{100 + \omega} \quad (5-1)$$

$$\text{熱伝導率} \quad : \lambda = 4.44 \times 10^{-1} + 1.38 \times 10^{-2}\omega + 6.14 \times 10^{-3}\omega^2 - 1.69 \times 10^{-4}\omega^3 \quad (5-2)$$

ここで, ω は含水比[%]である。

また, 緩衝材の不飽和浸透特性に関しては第3章で設定された値を用いた。熱解析と連成解析を比較する場合, 連成解析では熱による水分移動が大きく影響すると考えられるため, 温度勾配による水分移動に関しては第3章で同定された値を参考にパラメータスタディーを行なった。図5-4に3.2節で実施した要素試験の解析で D_T の値の異なるケースの結果と実測値との比較を示す。含水比分布は試験開始後4日後のものである。横軸は温度を60℃で固定した下端からの距離を表わす。すなわち $x=50\text{mm}$ の点が温度を30℃で固定した上端面である。同図より, D_T を $7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ としたものが最も実測値と良く一致していることが分かる。またを大きくすると水分移動も大きくなっている。

解析領域の初期温度は45℃とした。これは, 地表面の温度を15℃とし, 深度方向に3℃/100mの温度勾配を与えた場合の解析対象領域(深度1000m)の温度に相当する。ガラス固化体には発熱量の経時変化を与え, モデルの外側部を初期温度で固定とした。水理的条件として, 岩盤内の間隙水圧は0.0MPa(大気圧相当)で固定値とした。実際の岩盤には最大で10.0MPa程度の水圧(静水圧相当)が作用すると考えられるが, 本節では岩盤から緩衝材への地下水の供給が少ないケース(緩衝材がより乾くケース)を検討することが重要であると考えられるため, 岩盤内の間隙水圧は0.0MPaとした。また, 緩衝材内は初期の含水比に相当する水分ポテンシャルを与えた。

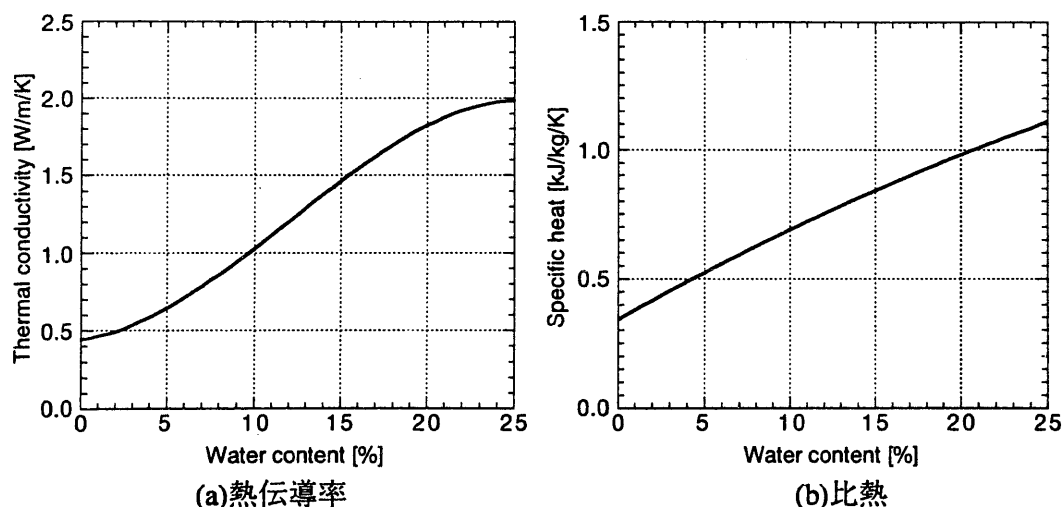


図5-3 解析に用いた熱物性値

表5-1 解析に用いた物性値一覧

物性値	ガラス固化体	オーバーパック	緩衝材	岩盤
乾燥密度 [g/cm^3]	2.80	7.80	1.60	2.70
固有透過度 [m^2]	1.0×10^{-30}	1.0×10^{-30}	4.0×10^{-20}	1.0×10^{-15}
比熱 [$\text{kJ}/\text{kg}/\text{K}$]	0.96	0.46	(5-1) 式	0.84
熱伝導率 [$\text{W}/\text{m}/\text{K}$]	1.2	53.0	(5-2) 式	2.9

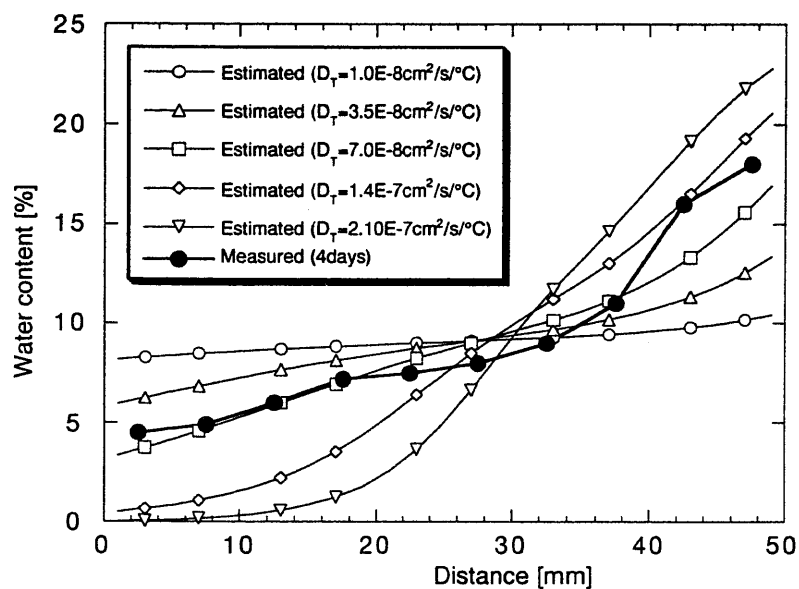
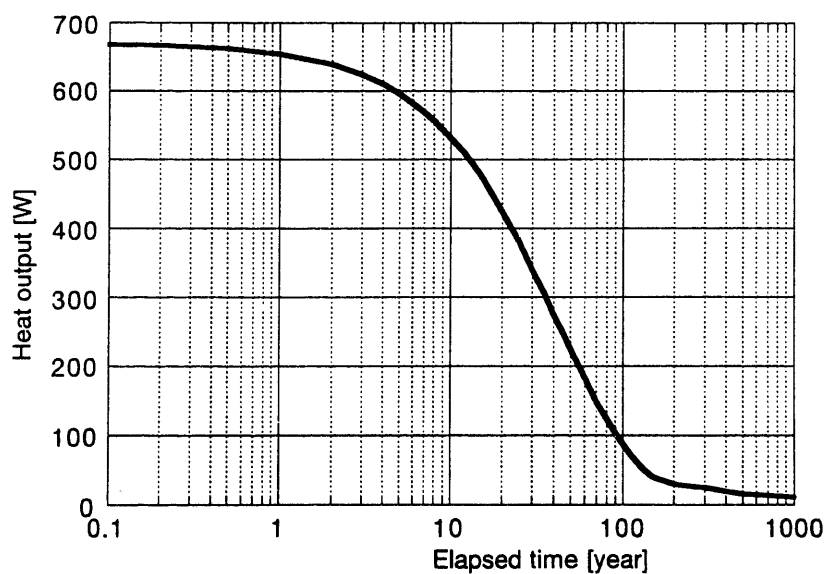
図5-4 D_r の異なるケースの解析結果の比較

図5-5 ガラス固化体の発熱量の経時変化

(3) ガラス固化体の発熱特性

本解析で使用するガラス固化体の発熱量の経時変化を図5-5に示す。解析では、ガラス固化体に相当する要素に単位体積当たりの発熱量を与えた。

5.1.2 解析結果

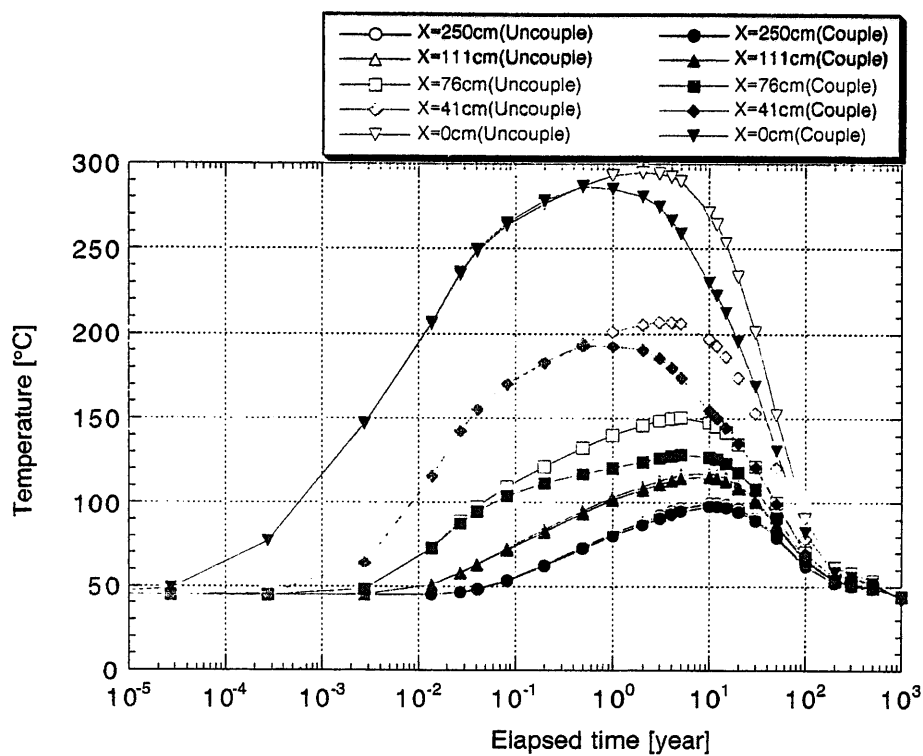
(1) オリジナルの発熱量を用いた計算

ここでは図5-5に示す発熱特性を用い、解析を実施した。緩衝材の初期含水比としては7%、17%の2ケースを実施した。これは、それぞれケイ砂混合材の自然含水比、原位置締固め施工における最適含水比に相当する。解析は各含水比に関して、熱解析、浸潤解析および熱-水連成解析を実施し、連成解析と非連成解析の比較を行なった。

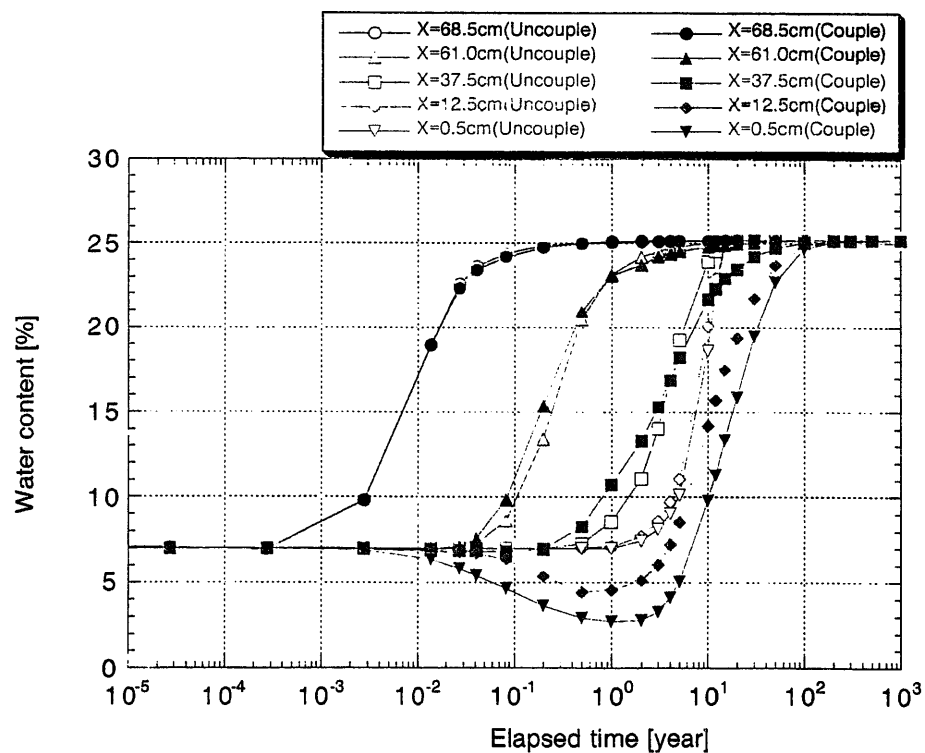
図5-6には初期含水比 ω_0 が7%、図5-7には ω_0 が17%のケースの結果を示す。(a)が温度の経時変化、(b)が緩衝材内の含水比の経時変化である。凡例のXは(a)では解析モデル左端からの距離、(b)では緩衝材の左端からの距離である。すなわち、(a)では $X=41\text{cm}$ の地点が緩衝材の左端の位置となる。

温度に関してはどちらの含水比のケースもかなり高い温度となっており、熱解析の結果では ω_0 が7%のケースの緩衝材内の最高温度は約203℃、 ω_0 が17%のケースでは約163℃となっている。これは、解析モデルが図5-1に示すようなものであるため熱が3次元的に伝達しないためである。熱解析と連成解析を比較すると、どちらの含水比のケースも熱解析に比べ連成解析の方が緩衝材内の最高温度が低くなっている。解析初期は熱解析の結果も連成解析の結果も温度の経時変化は同じ傾向を示しているが、0.1年経過した頃、すなわち、緩衝材の外側から10cm程度の部分の含水比が増加し始めたころから連成解析の方が温度が低くなってきている。この後、連成解析では緩衝材の内側が温度勾配による水分移動により初期より含水比が低くなっているにも関わらず温度は熱解析より低くなっている。また、初期含水比が小さいケースの方が、熱解析と連成解析の温度差が大きくなっている。緩衝材は含水比が低い方が熱伝導率が小さいため、緩衝材内の最高温度は高くなる。連成解析を実施すると、緩衝材の内側は含水比が低下し熱伝導率が小さくなり、緩衝材の外側は含水比が増加し熱伝導率が大きくなる。この両者に関しては、緩衝材の外側の含水比が増加する方が影響が大きくなるものと思われ、その結果、初期含水比の熱物性を用いて実施した熱解析の結果得られた最高温度の値より連成解析で得られた値の方が小さくなるものと考えられる。また、緩衝材が飽和する時間に関しては、どちらの含水比のケースも、連成解析の場合の方が10倍程度遅くなっている。これは、連成解析の場合、温度の影響により緩衝材内側の含水比が低下するためである。

次節では、緩衝材内の温度が約100℃以下となるように発熱量を、 ω_0 が7%のケースでは2/5、 ω_0 が17%のケースでは1/2とし、検討を行なった。

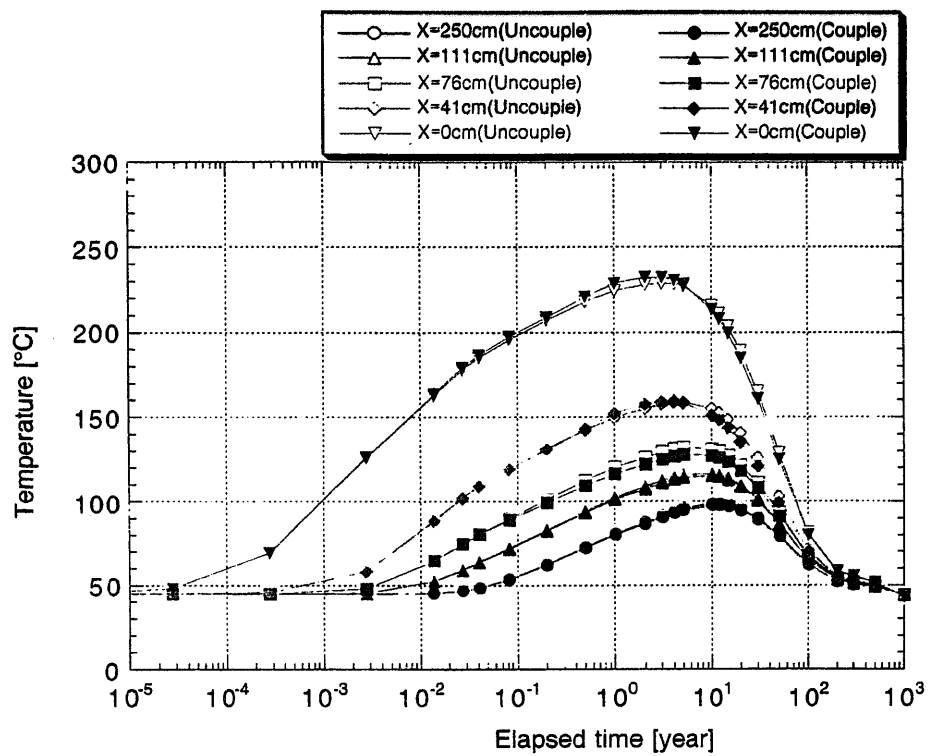


(a)温度の経時変化

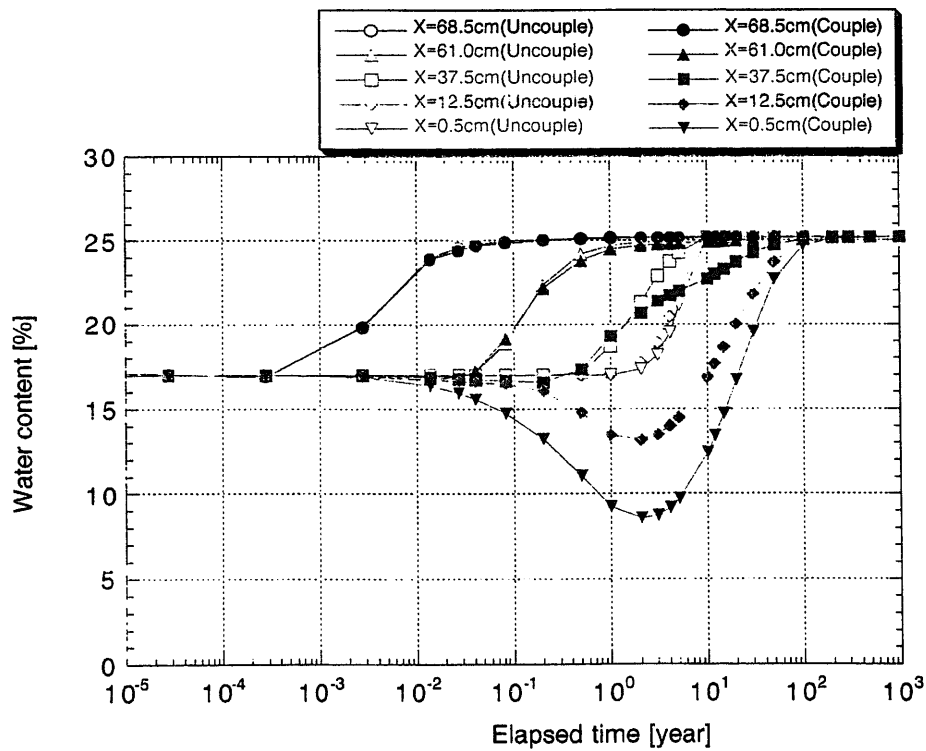


(b)緩衝材内の含水比の経時変化

図5-6 初期含水比が7%のケースの連成解析と非連成解析の比較



(a)温度の経時変化



(b)緩衝材内の含水比の経時変化

図5-7 初期含水比が17%のケースの連成解析と非連成解析の比較

(2) 2/5の発熱量を用いた計算（初期含水比が7%のケース）

本節では図5-5に示す発熱特性を2/5に低減させた値を用い解析を実施した。また、緩衝材の初期の含水比は7%とした。ここでは温度勾配による水分移動に関する係数 D_T の影響をみるため以下に示す4ケースの D_T の値を用い計算を行なった。第3章において同定された D_T はケース2の値である。

ケース1： $D_T=3.5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ （ケース2 $\times 0.5$ ）

ケース2： $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$

ケース3： $D_T=1.4 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ （ケース2 $\times 2.0$ ）

ケース4： $D_T=2.1 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ （ケース2 $\times 3.0$ ）

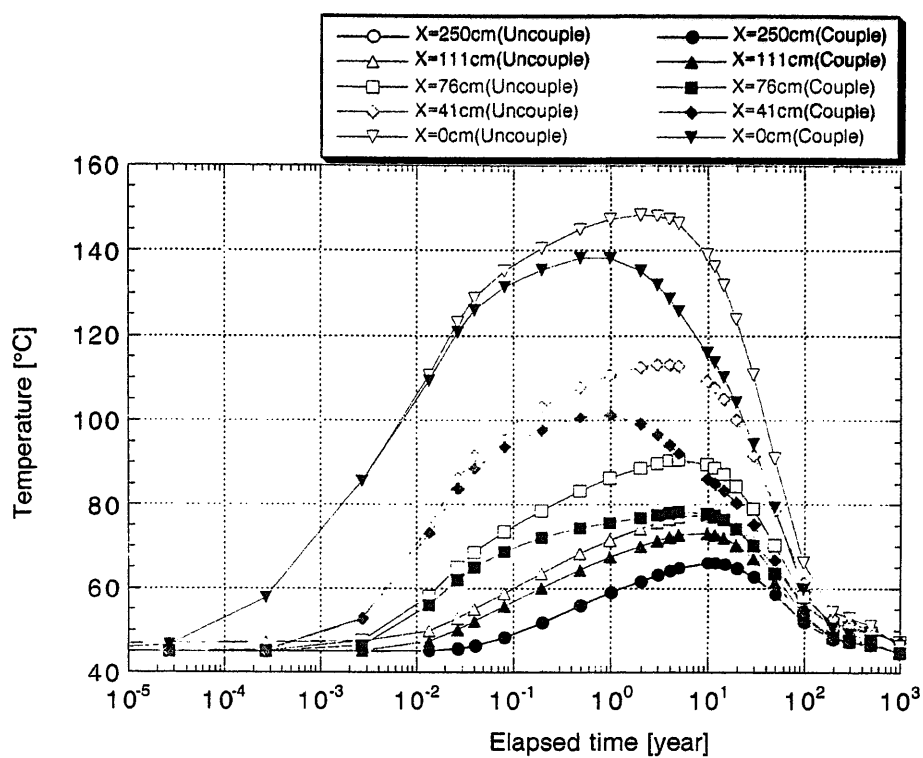
また、ケース5として、岩盤からの地下水の供給が無いケースを実施した。すなわちケース5では緩衝材内部のみで水が移動している。ケース5における D_T は第3章で同定された値（ $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ ）を用いた。

図5-8～5-12に各ケースにおける計算結果を非連成解析と比較したものを示す。(a)が温度の経時変化、(b)が緩衝材内の含水比の経時変化である。凡例のXは(a)では解析モデル左端からの距離、(b)では緩衝材の左端からの距離である。すなわち、(a)では $X=41\text{cm}$ の地点が緩衝材の左端の位置となる。

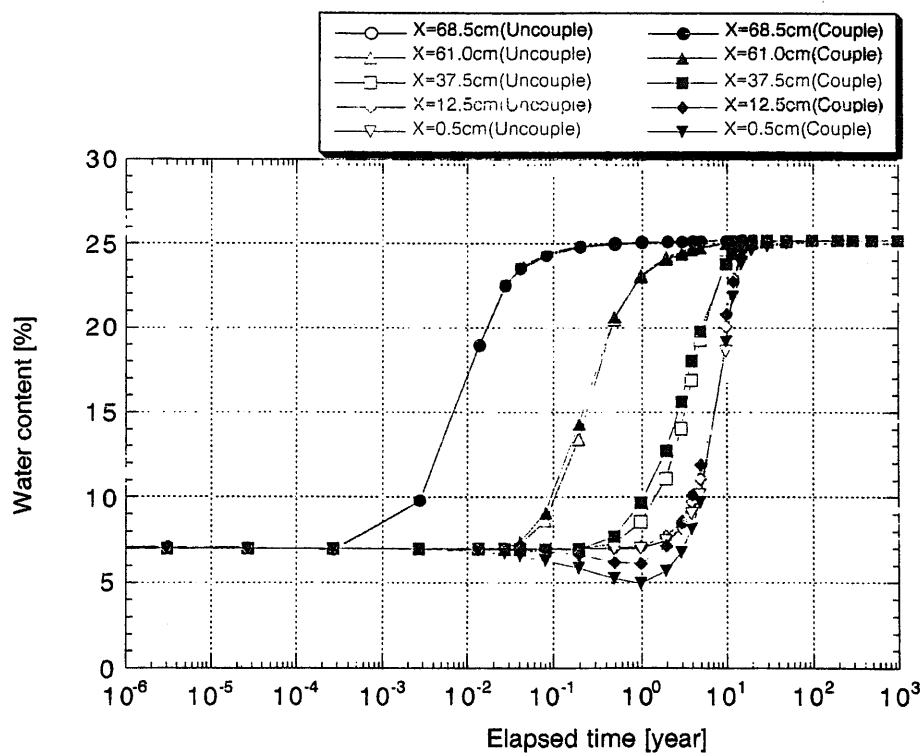
ケース1から4までの含水比の経時変化を比べると、 D_T の値が大きくなるにつれて緩衝材の内側が乾く度合いが大きくなっている様子が分かる。また、 D_T の値が大きくなるにつれて含水比が最小となる時間が遅くなっている。すなわち、緩衝材が初期より乾いている期間が長くなっている。温度について見てみると、 D_T の値が大きくなるにつれて緩衝材内の最高温度は高くなっているが、そのいずれも初期含水比の熱物性を用いて実施した非連成の熱解析の値よりは小さくなっている。ケース5の場合、岩盤からの水の供給が無いため温度勾配により初期においては緩衝材内の水分が内側から外側に移動しているが、温度が下がった後は全て初期の含水比に戻っている。このケースのみ最高温度が熱解析より高くなっている。表5-2に各ケースにおける緩衝材内の最高温度と最小含水比およびそれらの生じた時間を示す。図5-13には0.5年から4年後までの各ケースにおける含水比の分布を示す。また、図5-14には、各ケースにおいて最も緩衝材内側が乾いた時点における含水比の分布を示す。

表5-2 緩衝材内の最小含水比と最高温度

	最小含水比 [%]	時間 [year]	最高温度 [℃]	時間 [year]
非連成解析	7.0	—	113.2	4
ケース1	5.0	1	101.4	1
ケース2	3.5	1	103.4	1
ケース3	2.6	3	104.0	1
ケース4	2.0	4	103.4	1
ケース5	2.8	10	113.4	3



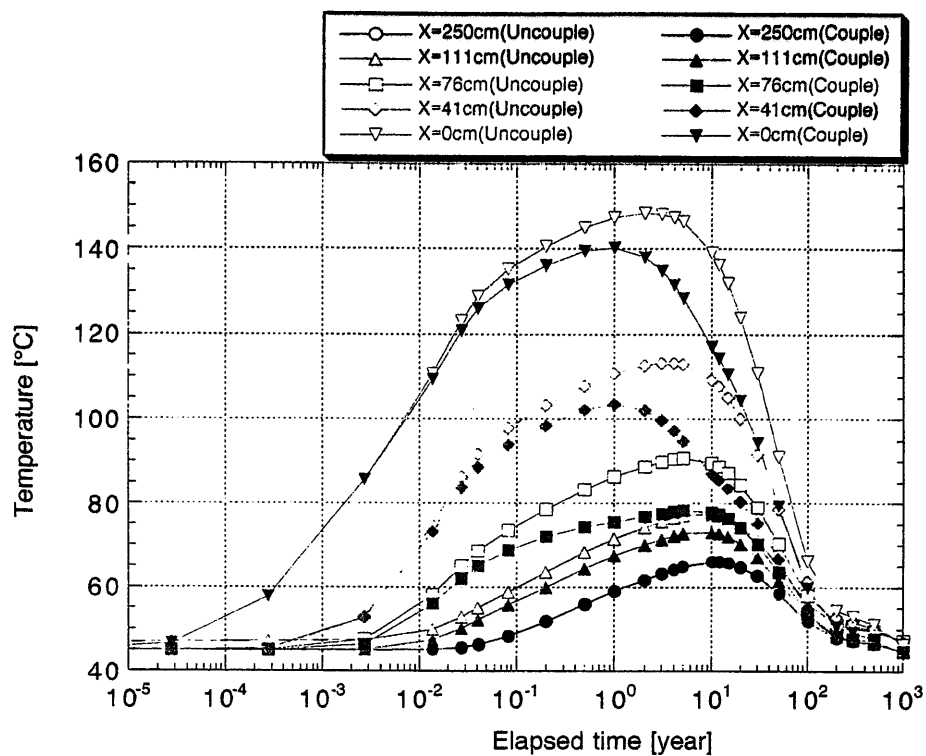
(a)温度の経時変化



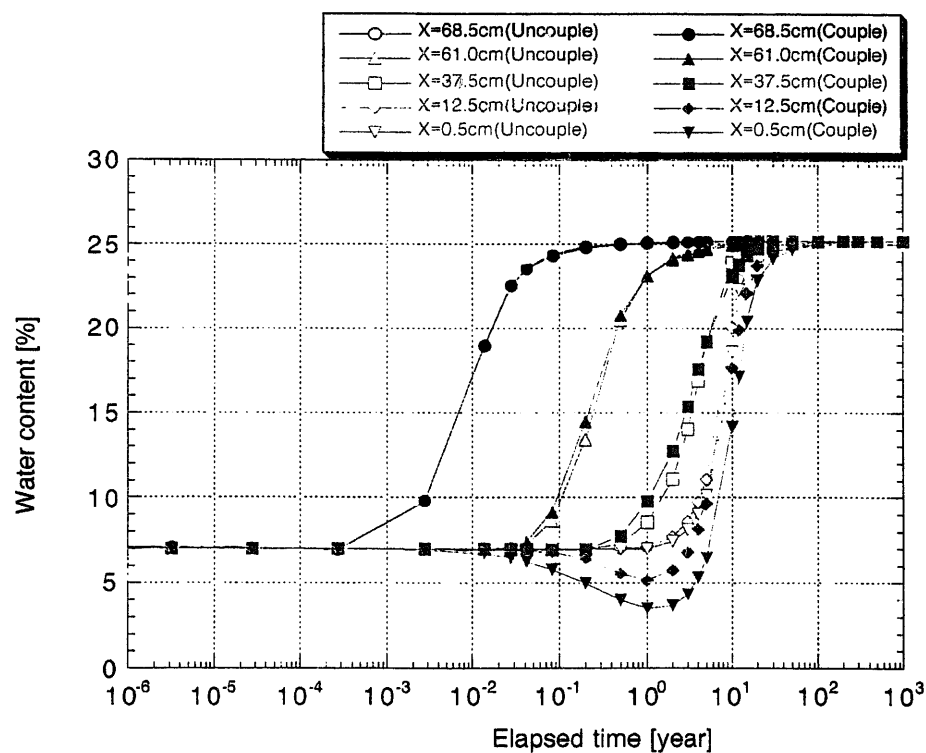
(b)緩衝材内の含水比の経時変化

図5-8 ケース 1 における連成解析と非連成解析の比較

 $(D_T = 3.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, \omega_o = 7\%)$



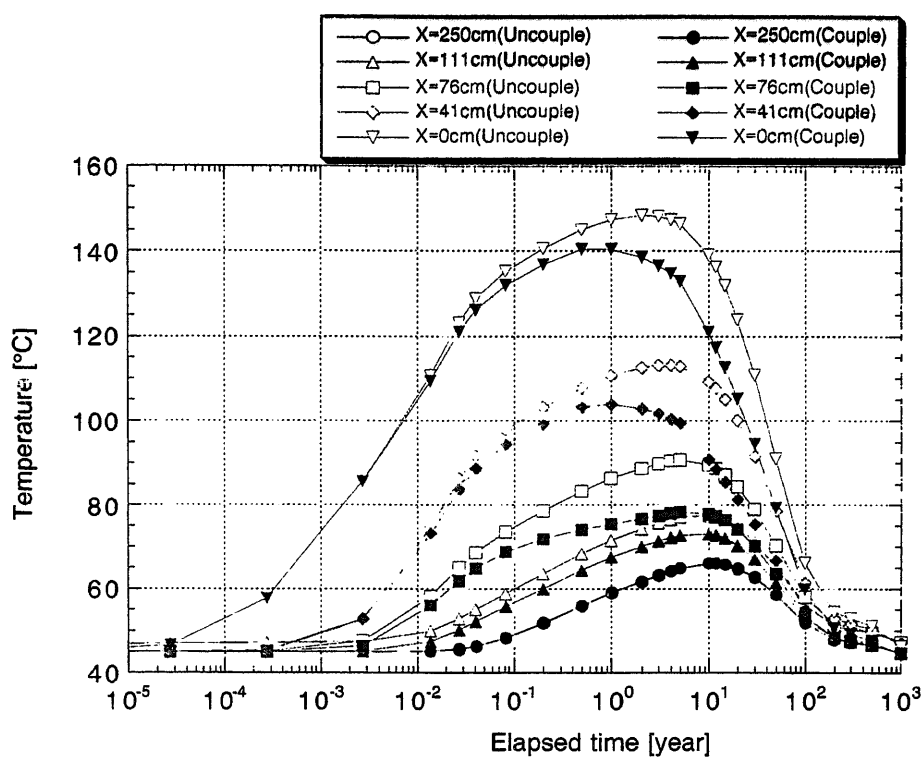
(a) 温度の経時変化



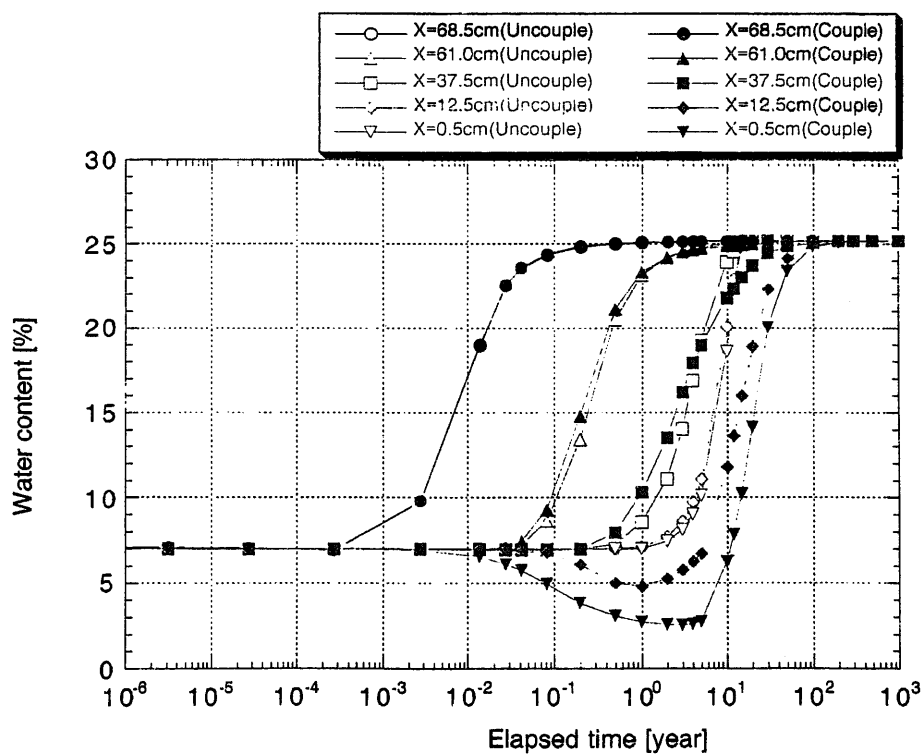
(b) 緩衝材内の含水比の経時変化

図5-9 ケース 2 における連成解析と非連成解析の比較

 $(D_T = 7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, \omega_o = 7\%)$



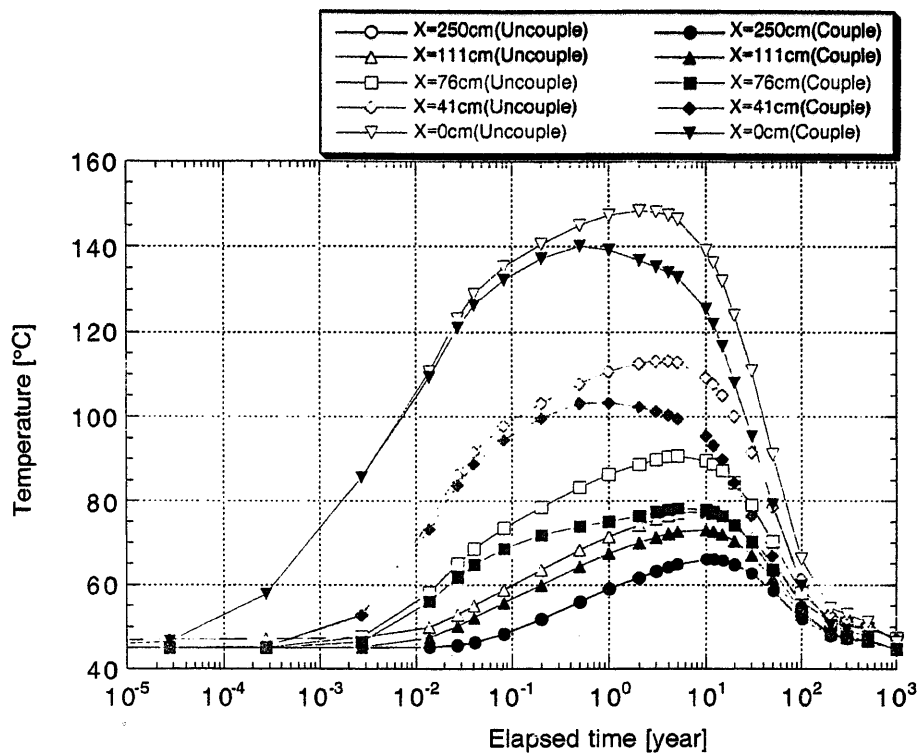
(a) 温度の経時変化



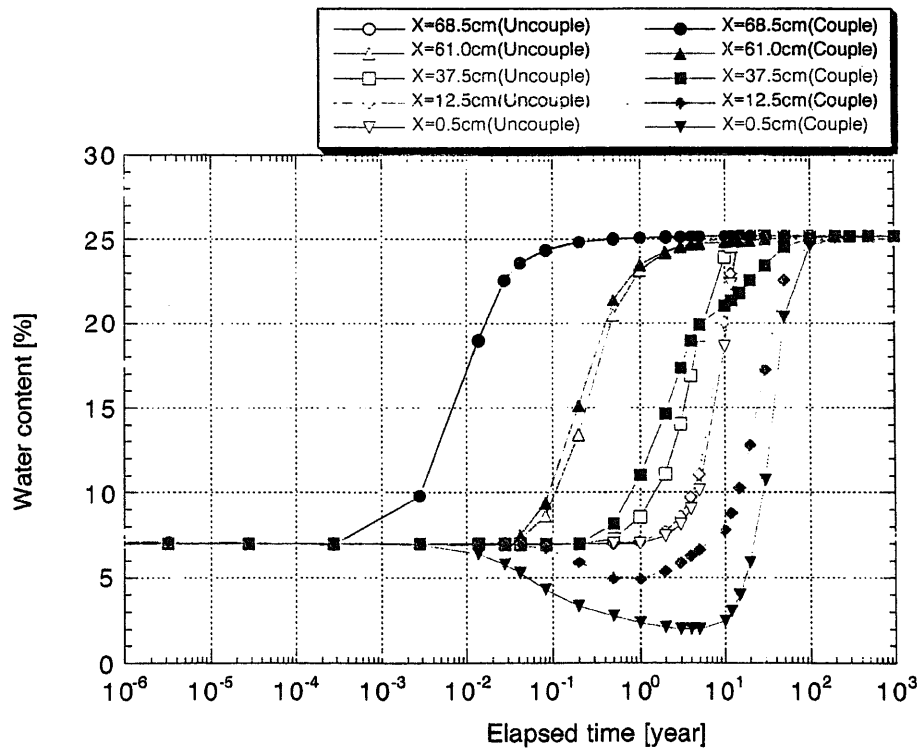
(b) 緩衝材内の含水比の経時変化

図5-10 ケース 3 における連成解析と非連成解析の比較

 $(D_T = 1.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s/}^\circ\text{C}, \omega_o = 7\%)$



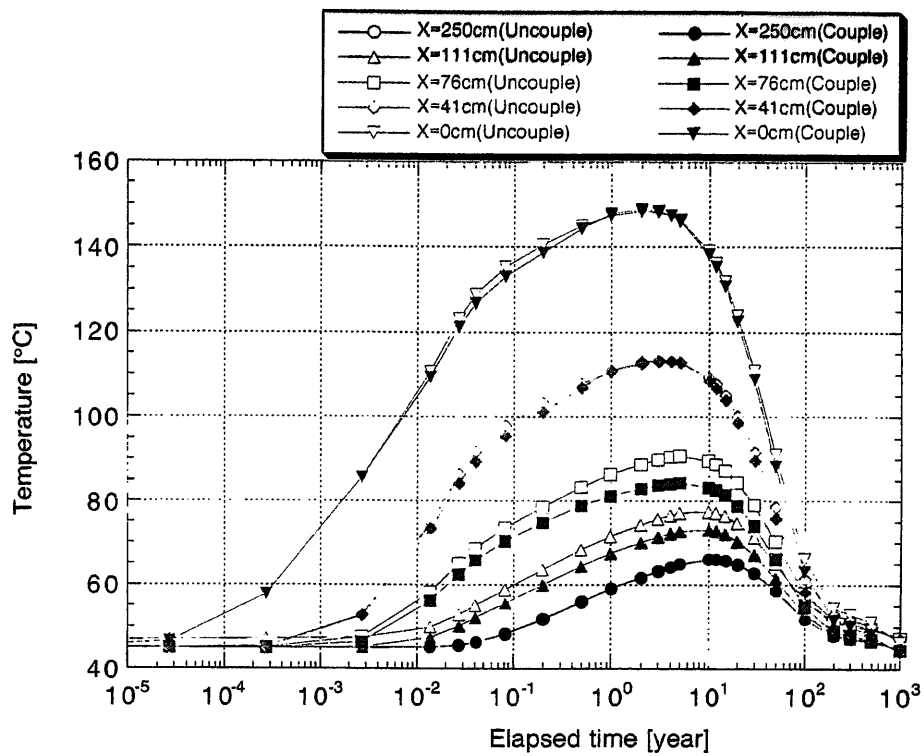
(a)温度の経時変化



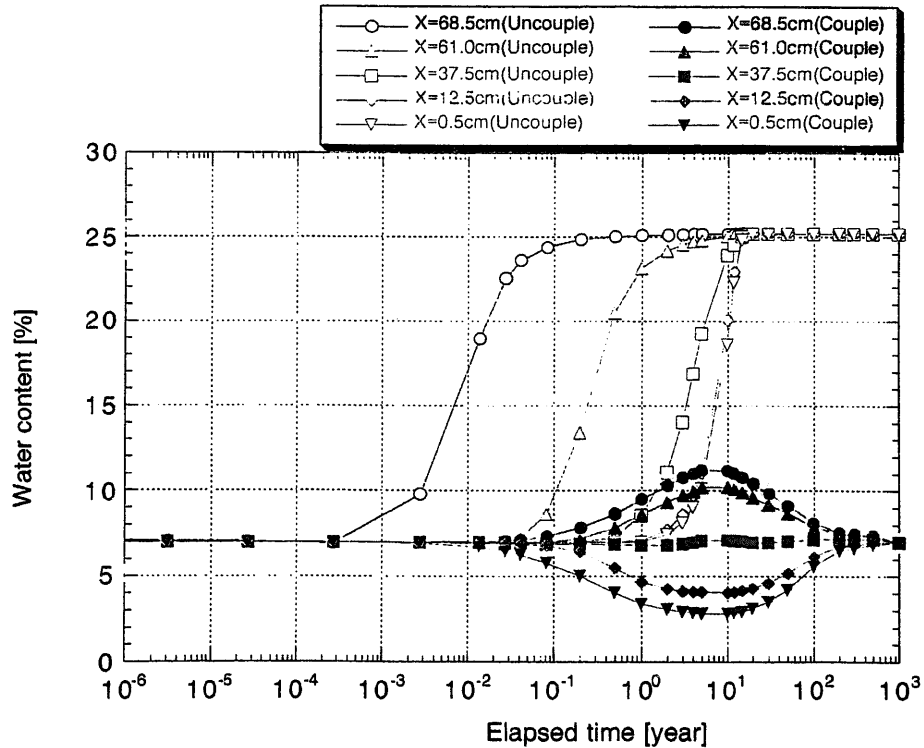
(b)緩衝材内の含水比の経時変化

図5-11 ケース 4 における連成解析と非連成解析の比較

$$(D_T = 2.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, \omega_o = 7\%)$$



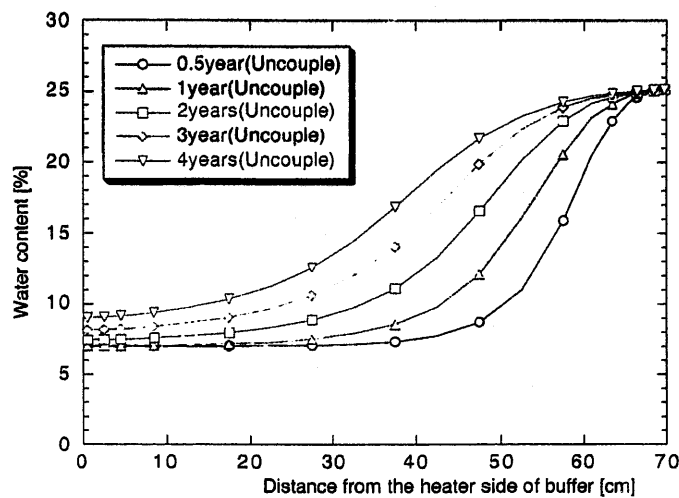
(a)温度の経時変化



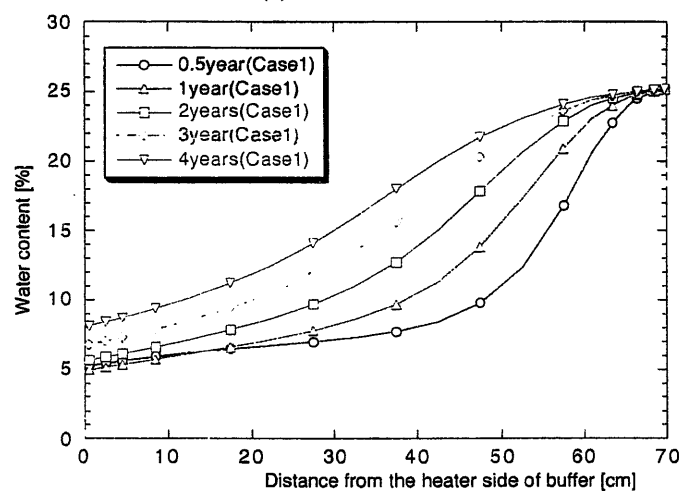
(b)緩衝材内の含水比の経時変化

図5-12 ケース5における連成解析と非連成解析の比較

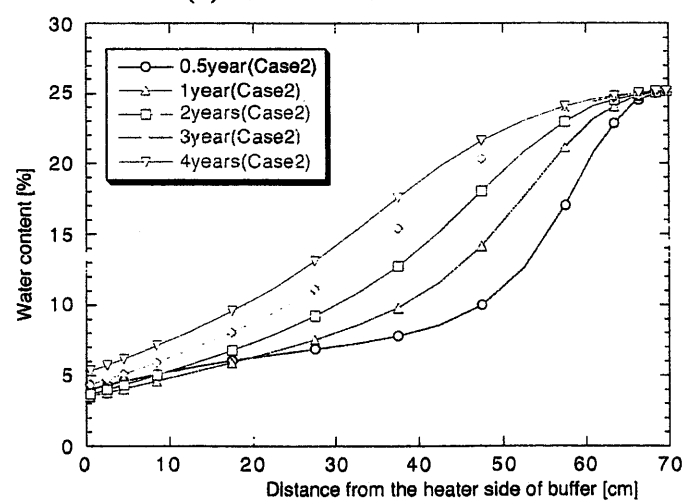
$$(D_T = 7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, \omega_o = 7\%)$$



(a) 非連成解析

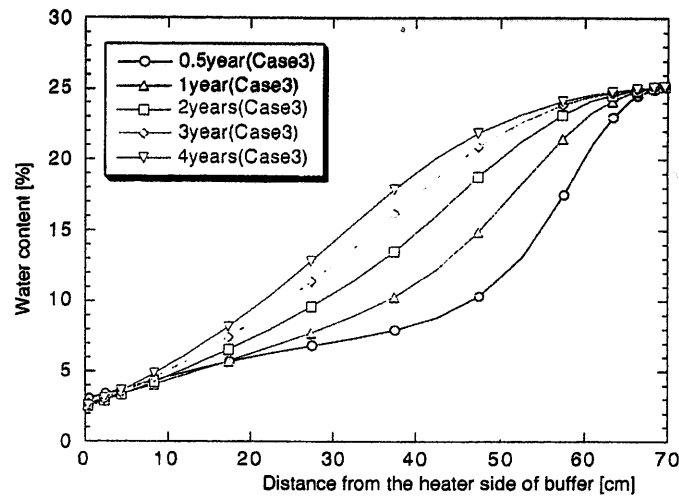


(b) 連成解析 (ケース 1)

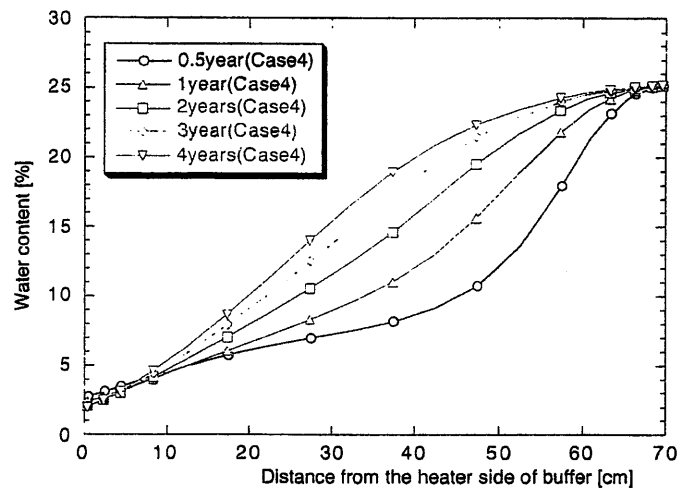


(c) 連成解析 (ケース 2)

図5-13 緩衝材内の含水比の経時変化



(d) 連成解析 (ケース 3)



(e) 連成解析 (ケース 4)

図5-13 緩衝材内の含水比の経時変化 (続き)

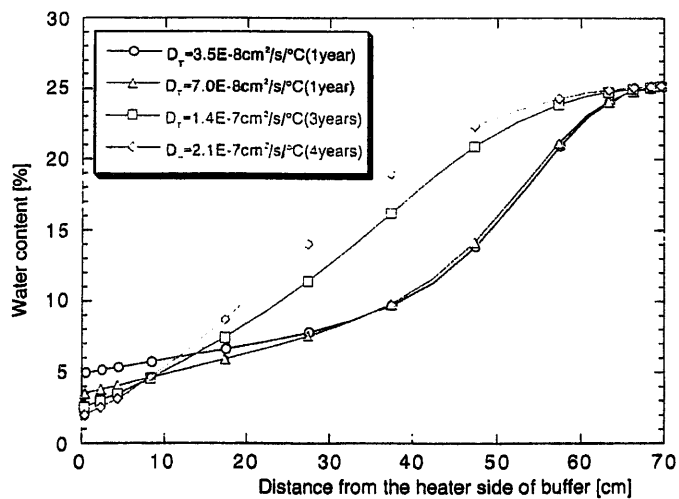


図5-14 各ケースにおいて緩衝材内側の含水比が最も低下した時点での含水比分布

(3) 1/2の発熱量を用いた計算（初期含水比が17%のケース）

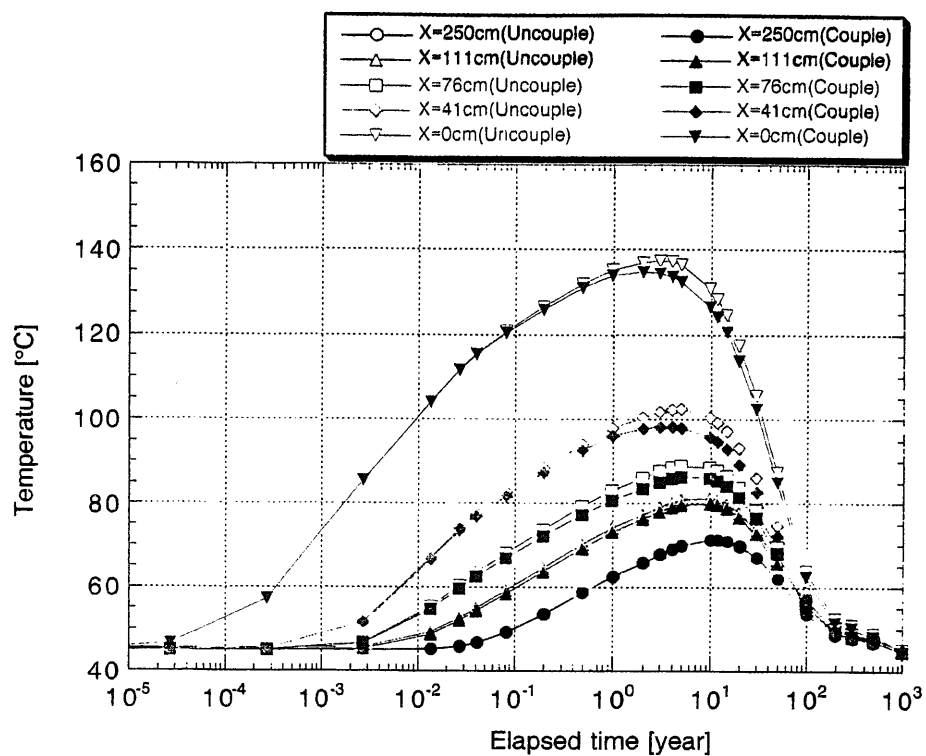
本節では図5-5に示す発熱特性を1/2に低減させた値を用い解析を実施した。また、緩衝材の初期の含水比は17%とした。本節でも前節と同じ5ケースに関して解析を実施した。

図5-15～5-19に各ケースにおける計算結果を非連成解析と比較したものを示す。(a)が温度の経時変化、(b)が緩衝材内の含水比の経時変化である。凡例のXは(a)では解析モデル左端からの距離、(b)では緩衝材の左端からの距離である。すなわち、(a)では $X=41\text{cm}$ の地点が緩衝材の左端の位置となる。また、表5-3に各ケースにおける緩衝材内の最高温度と最小含水比およびそれらの生じた時間を示す。

D_T の違いによる結果の差は初期含水比が7%のケースと同様である。すなわち、 D_T の値が大きくなるにつれて緩衝材の内側が乾く度合いが大きくなっており、また含水比が最小となる時間が遅くなっている。しかし、初期含水比が7%のケースと比べると緩衝材内側が初期より乾いている期間は長くなっておりその低下の度合いも大きくなっている。特にケース4になるとその期間が約50年となっており、その結果、初期含水比の熱物性を用いて実施した非連成の熱解析に比べて最高温度が高くなっている。ケース5の場合もケース4と同様に緩衝材の含水比が初期含水比より低くなっている期間が長く、その結果、熱解析に比べて最高温度が高くなっている。しかし、第3章で同定された D_T の値を用いて行なったケース2の解析で得られた最高温度は熱解析で得られた最高温度より小さくなっている。また、ケース4の場合でも、緩衝材内の最高温度は非連成解析に比べ4.5℃高いのみである。図5-6、5-7より初期含水比7%と17%のケースの熱解析では最高温度で約40℃の差がある。したがって、ケース4において得られた最高温度の値は初期含水比を7%として実施した熱解析の結果得られる最高温度よりは小さくなっていると考えられる。図5-20には1年から10年後までの各ケースにおける含水比の分布を示す。また、図5-21には、各ケースにおいて最も緩衝材内側が乾いた時点における含水比の分布を示す。

表5-3 緩衝材内の最小含水比と最高温度

	最小含水比 [%]	時間 [year]	最高温度 [℃]	時間 [year]
非連成解析	17.0	—	102.4	5
ケース 1	14.4	1	98.3	3
ケース 2	11.7	2	99.6	3
ケース 3	6.6	4	103.5	4
ケース 4	3.4	10	106.9	5
ケース 5	8.8	10	105.0	5



(a)温度の経時変化

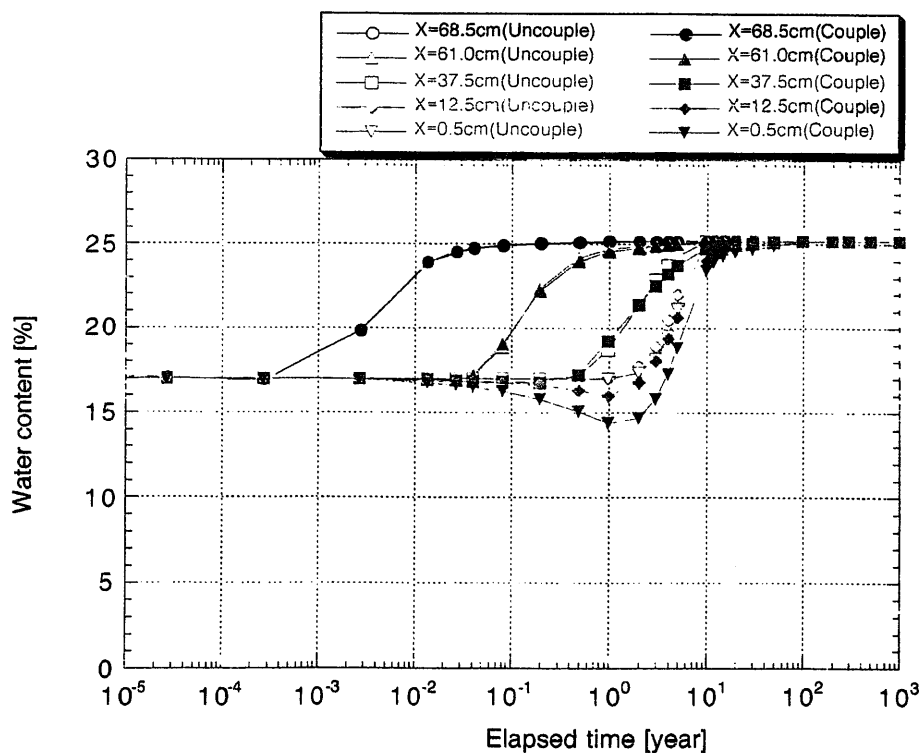
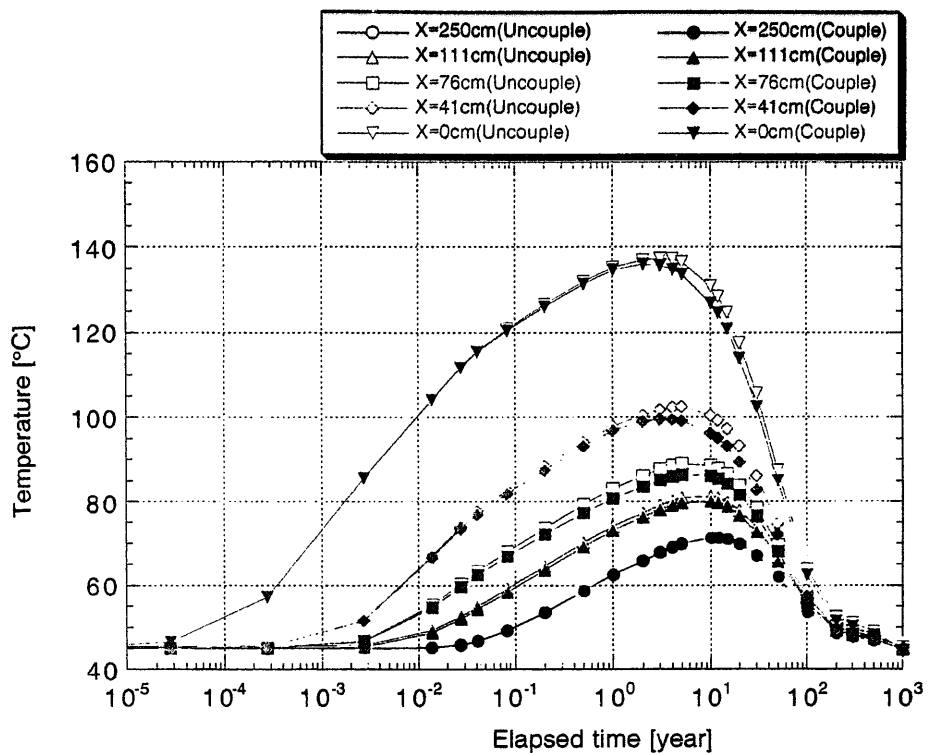


図5-15 ケース1における連成解析と非連成解析の比較
 $(D_T = 3.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, \omega_o = 17\%)$



(a) 温度の経時変化

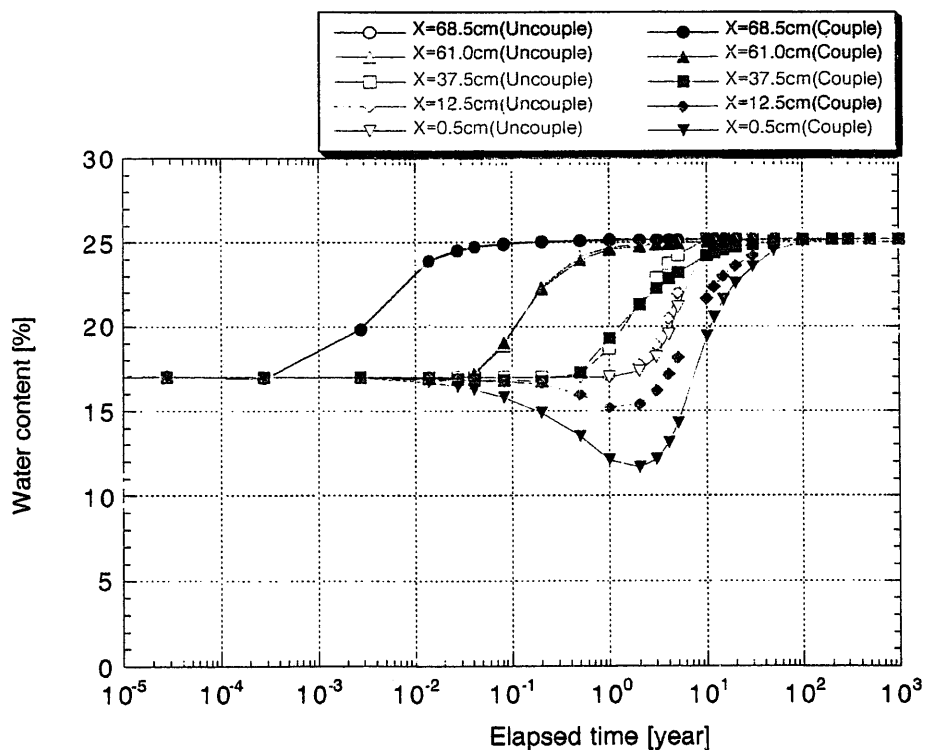
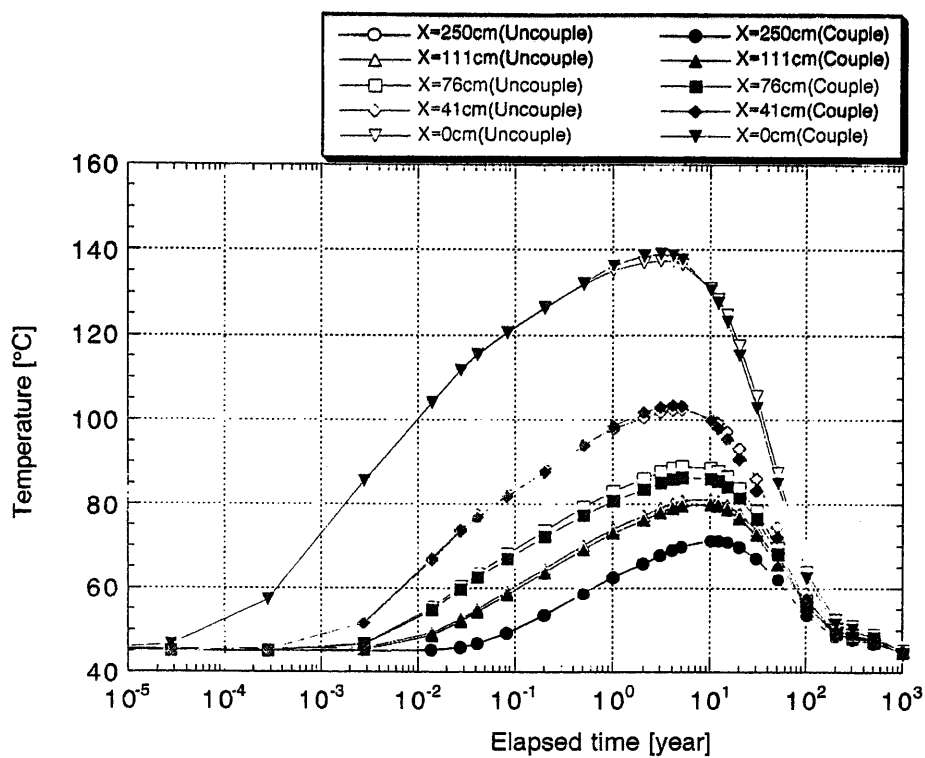


図5-16 ケース 2 における連成解析と非連成解析の比較
 $(D_T = 7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, \omega_o = 17\%)$



(a) 温度の経時変化

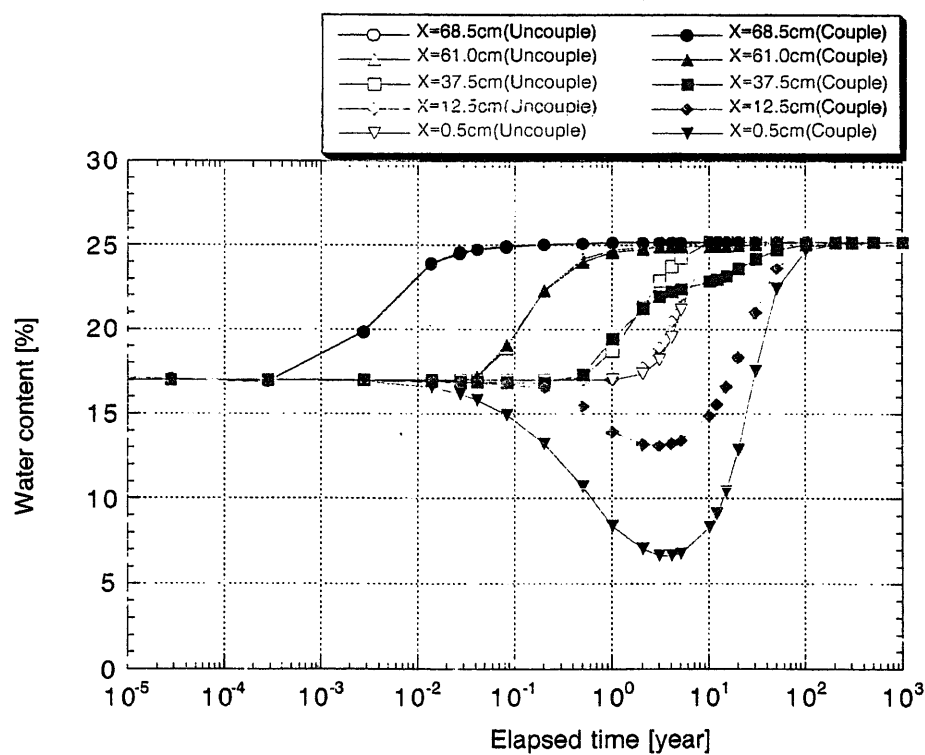
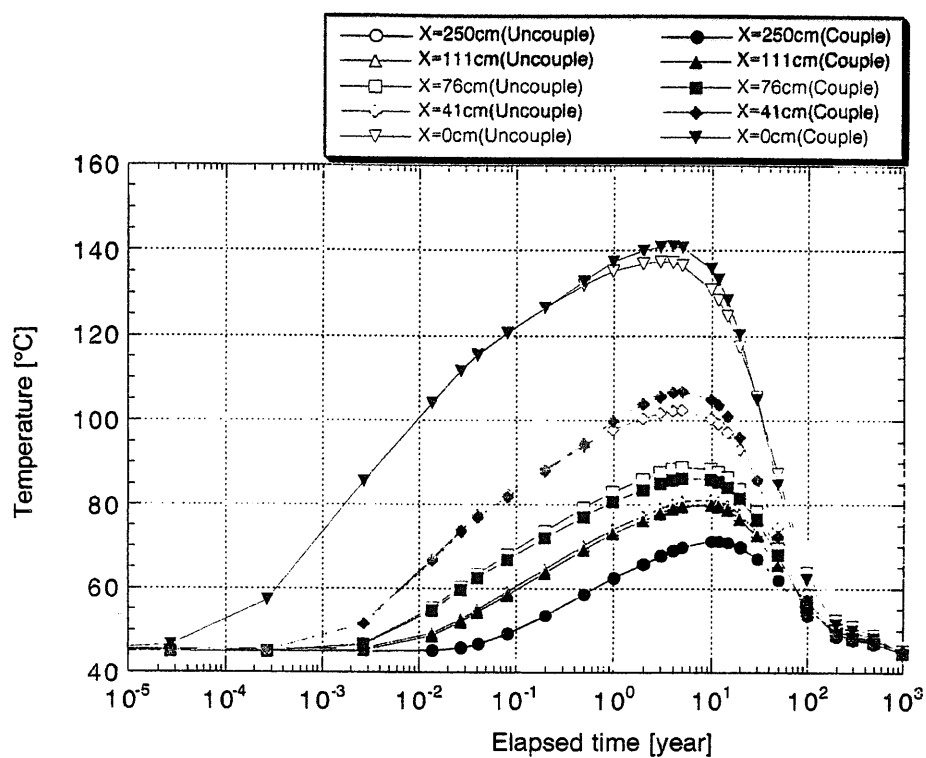


図5-17 ケース 3 における連成解析と非連成解析の比較
 $(D_T = 1.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s/}^\circ\text{C}), \omega_o = 17\%$



(a)温度の経時変化

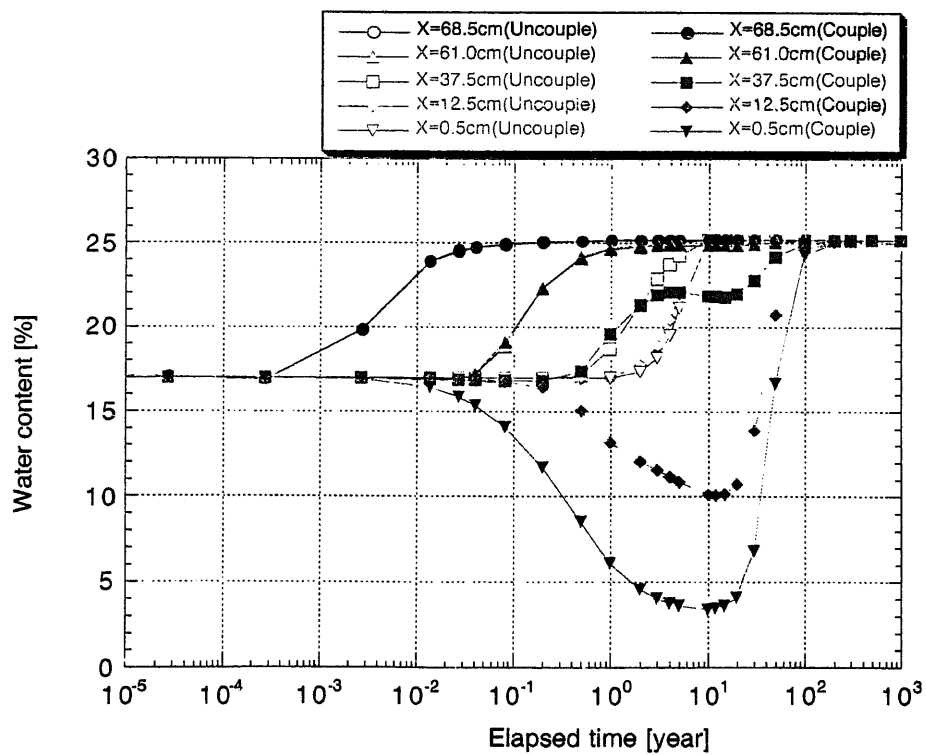
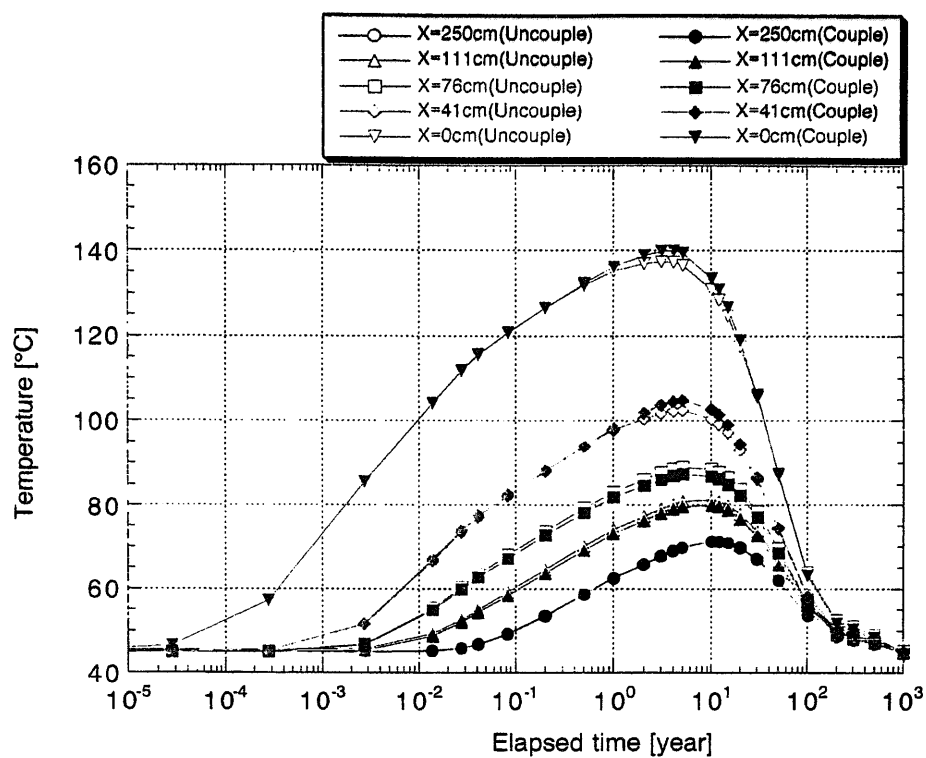


図5-18 ケース4における連成解析と非連成解析の比較
 $(D_T = 2.1 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, \omega_o = 17\%)$



(a)温度の経時変化

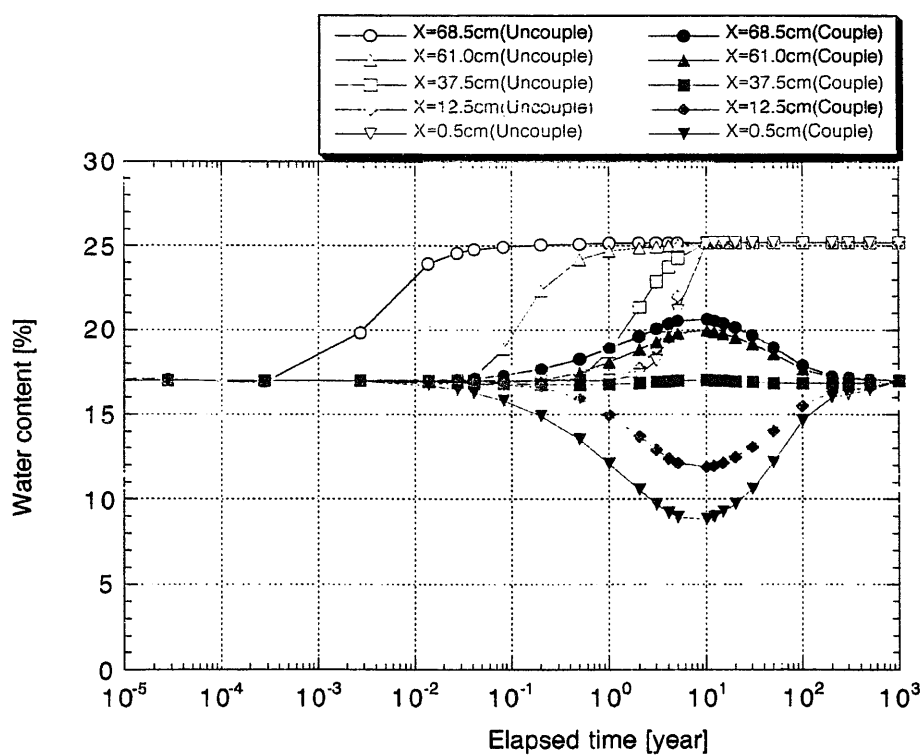
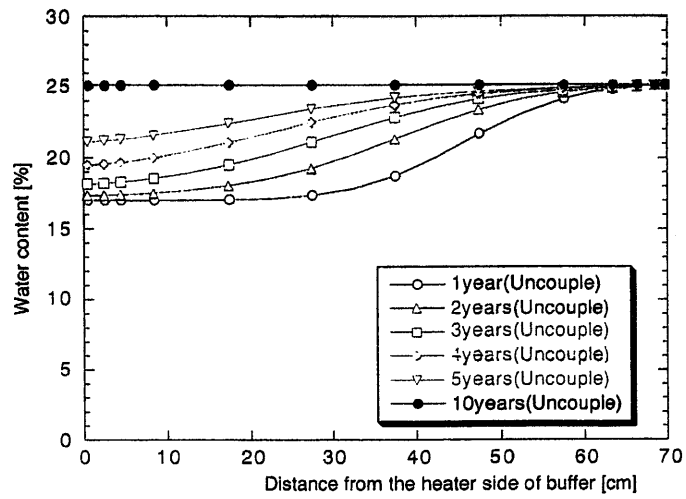
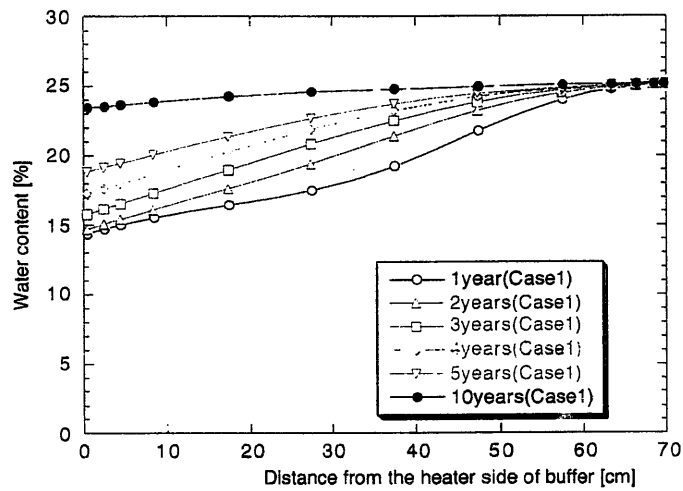


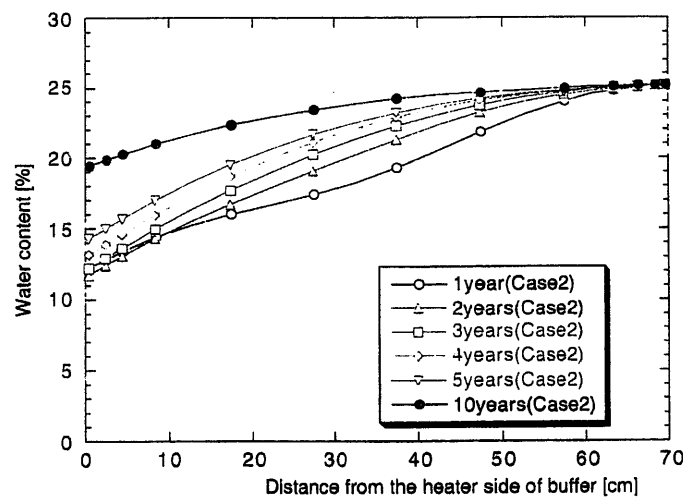
図5-19 ケース5における連成解析と非連成解析の比較
 $(D_T = 7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, \omega_o = 17\%)$



(a) 非連成解析

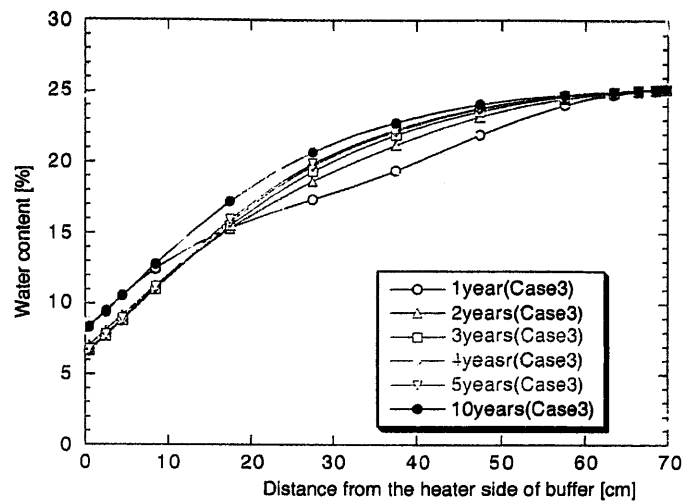


(b) 連成解析 (ケース 1)

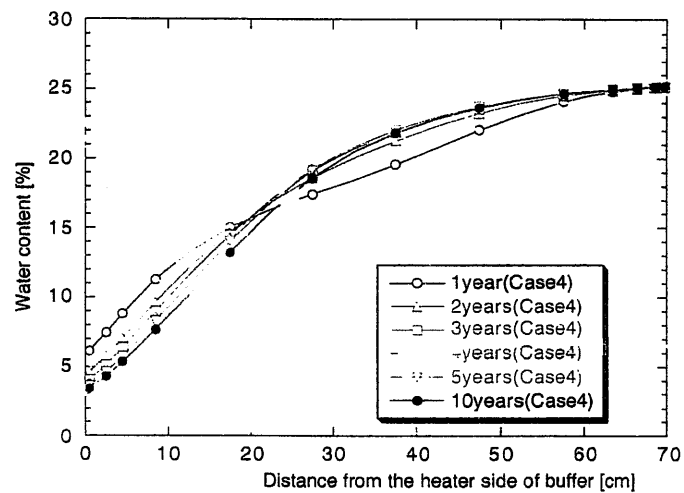


(c) 連成解析 (ケース 2)

図5-20 緩衝材内の含水比の経時変化



(d) 連成解析 (ケース 3)



(e) 連成解析 (ケース 4)

図5-20 緩衝材内の含水比の経時変化 (続き)

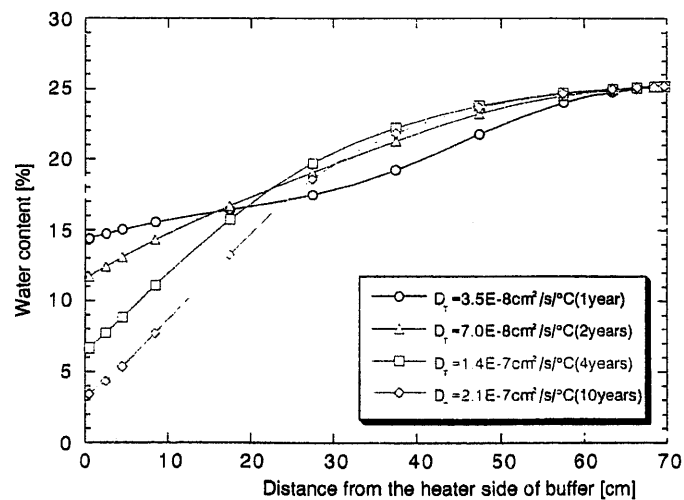


図5-21 各ケースにおいて緩衝材内側の含水比が最も低下した時点での含水比分布

5.2 釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験結果を用いた比較

5.2.1 概要

前節において熱解析と連成解析との比較を実施したところ、連成解析の結果得られる温度の値は、初期含水比を用いて実施した熱解析の結果得られる温度の値より小さくなった。しかし、前節で実施したのはあくまで数値計算のみであるので、実際に前節のような結果が得られるかを確認するためには、原位置で取得したデータと比較していくことが重要である。そこで本章では、実岩盤条件下での熱-水-応力連成現象を評価することを目的に釜石原位置試験場において実施した粘土充填・熱負荷試験（Fujita, T. et al, 1994）の結果得られた温度の計測結果を用いて検討を行なった。

5.2.2 解析モデルおよび解析条件

解析は二次元軸対称モデルで実施した。図5-22に解析モデルの概念図を示す。解析対象はヒーター、緩衝材、蓋、岩盤であり、モデルの大きさは20m×20mである。また、緩衝材はベントナイトKunigel OT-9607である。

5.2.3 解析物性値

緩衝材の水分拡散係数、水分特性曲線および温度勾配による水分移動に関する係数は第3章で設定されたKunigel OT-9607の値を用いた。また、緩衝材の熱物性は、次式に示すように含水比 ω [%]の関数として得られている。

$$\text{比熱 [kJ/kg/K]} \quad : C = \frac{42.6 + 4.18 \omega}{100 + \omega} \quad (5-3)$$

$$\text{熱伝導率 [W/m/K]} \quad : \lambda = 0.050 \omega + 0.503 \quad (5-4)$$

熱解析における緩衝材の熱物性は図5-23および図5-24に示すような3ケースを設定した。ケース1は含水比0%，ケース2は初期含水比（15%），ケース3は飽和含水比（23.6%）における熱物性である。連成解析の際には、緩衝材の初期含水比は15%とし、岩盤の初期水圧は地表面に40cmの水位のある静水圧状態とした。境界は初期水圧で固定とした。また、ヒーターの温度は100℃で固定とし、境界は全て初期温度（12.3℃）で固定とした。岩盤、ヒーター、蓋の物性については表5-4に示すものを用いた。岩盤の透水係数は、周辺の試験孔を用いて実施した透水試験の結果得られた値の幾何平均値である（Chijimatsu, M. et al, 1996b）。

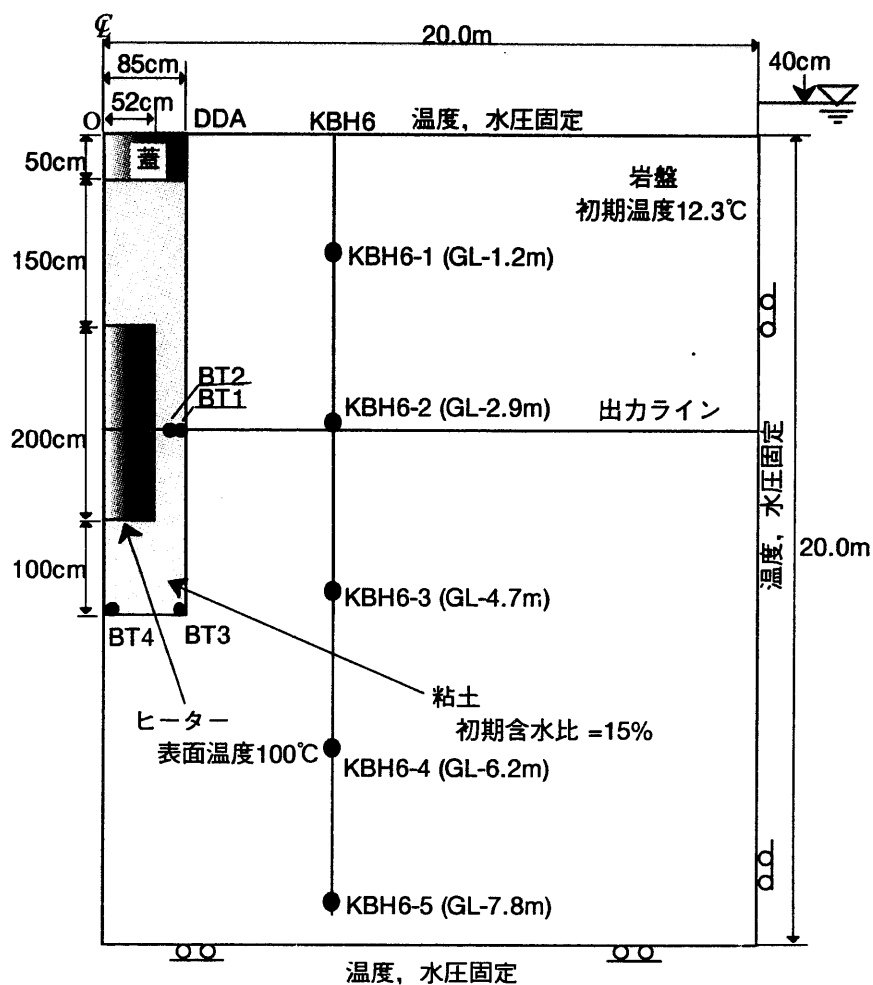


図5-22 解析モデルの概念図

表5-4 解析に用いた物性値一覧

物性値	ヒーター, 蓋	緩衝材	岩盤
密度 [g/cm ³]	7.80	2.04	2.75
固有透過度 [m ²]	1.0×10^{-30}	2.0×10^{-20}	1.98×10^{-16}
比熱 [kJ/kg/K]	0.46	(5-3) 式	0.833
熱伝導率 [W/m/K]	53.0	(5-4) 式	2.71

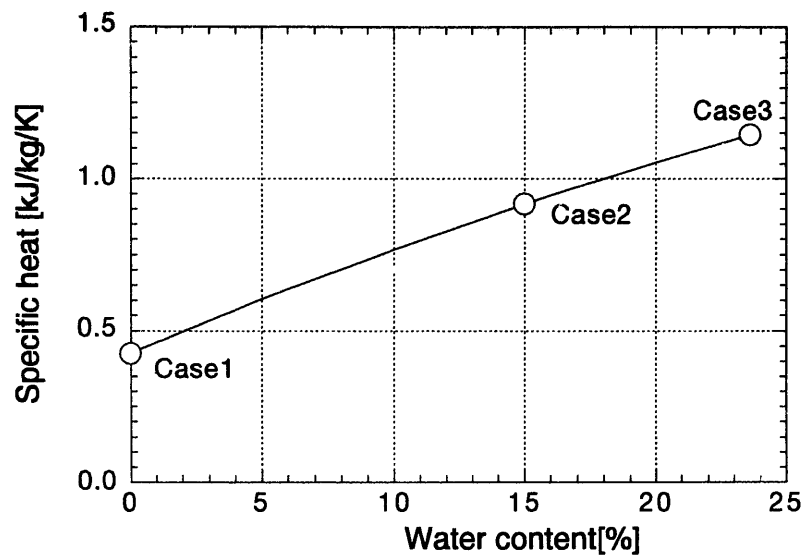


図5-23 含水比と比熱の関係 (OT-9607)

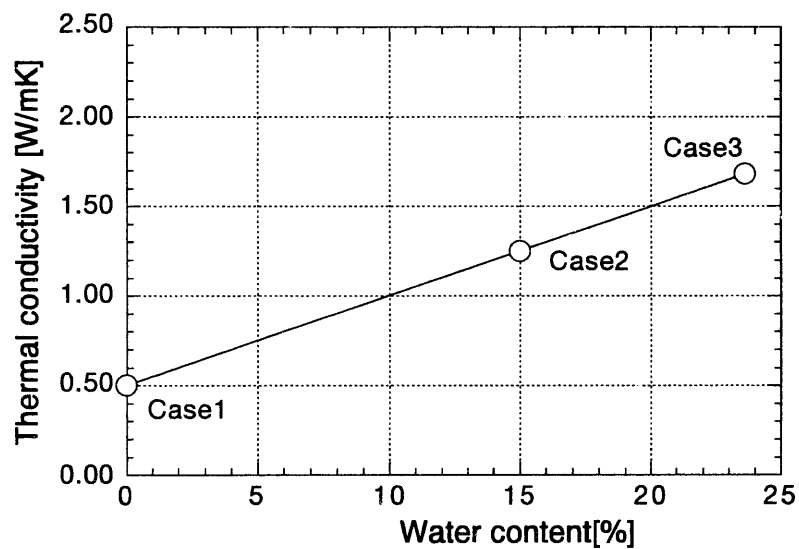


図5-24 含水比と熱伝導率の関係 (OT-9607)

5.2.4 結果の比較点

図5-25に試験坑道の床盤平面図 (Chijimatsu, M. et al, 1996a) を示す。緩衝材内の計測は図5-25に示す3断面 (Sugita, Y. et al, 1997) で実施した。解析は軸対称モデルで実施しており、解析との比較を行なう側線をここではO-DDA断面とした。また、岩盤内に関しては側線O-DDAの延長線上に近い試験孔KBH6内の測定点を比較対象とした。図5-22には、比較対象点の位置も示している。

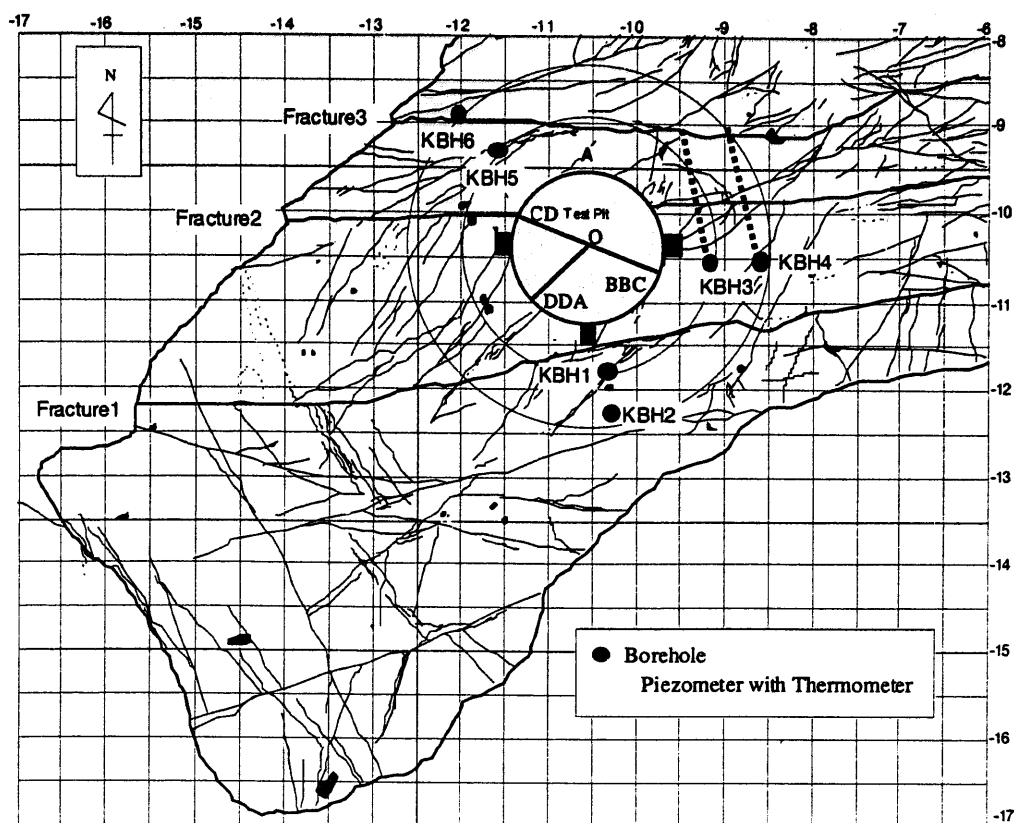


図5-25 試験坑道平面図

5.2.5 解析結果

図5-26～5-29には加熱開始より1カ月後の温度コンターを示す。図5-26は熱解析のケース1，図5-27は熱解析のケース2，図5-28は熱解析のケース3，図5-29は連成解析の結果である。緩衝材の飽和度が高くなるにつれて温度の広がりが大きくなっている。図5-30には緩衝材内の温度の経時変化を示す。熱解析の結果を比較すると，ケース2，すなわち，緩衝材の熱物性として初期含水比の時の物性を用いたものが実測値と最も良い一致を示している。また，連成解析の結果も実測値に近い値となっている。熱解析のケース2の結果と連成解析の結果を比べると全てにおいて連成解析の結果の方が値が小さくなっており，これは第4章で得られた結果と同じである。図5-31には試験孔KBH6における温度の経時変化の実測値と解析値の比較を示す。岩盤内でも，緩衝材内と同様に熱解析のケース2および連成解析の結果が実測値と近い値となっており，さらに，ケース2と連成解析の結果を比べると連成解析の方が値が小さくなっている。連成解析で得られた緩衝材内の中心高さにおける含水比分布の経時変化は図5-32のようになっている。緩衝材のヒーター側半分は初期含水比より低く，岩盤側の半分は初期含水比より高くなっている。

以上より，今回の試験のように発熱部の温度を固定として実施した試験の場合でも，非連成の熱解析で温度分布を評価しようとする場合は，緩衝材の熱物性としては初期含水比の時の値を用いたものが最も良く実測値と一致することがわかった。

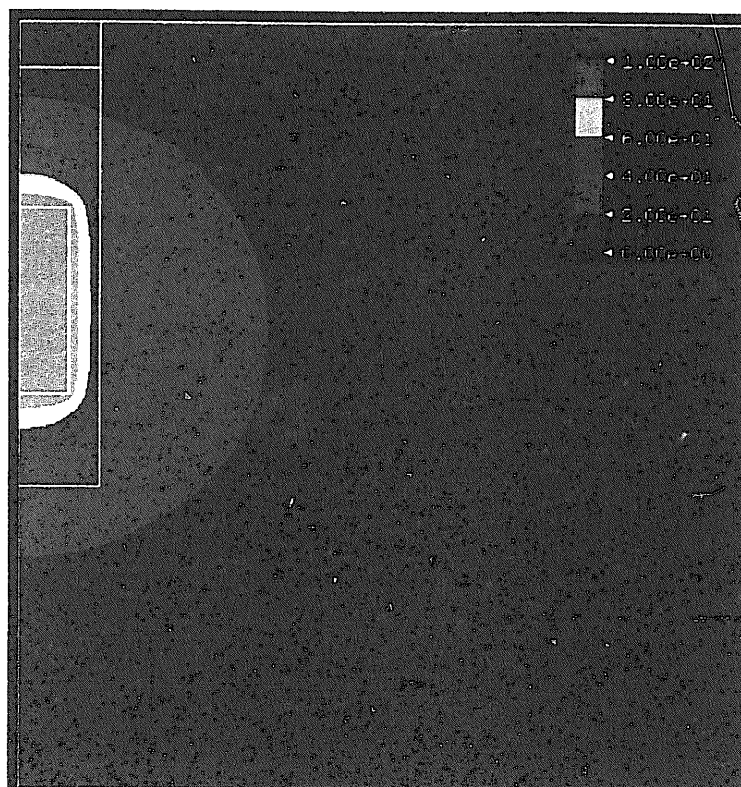


図5-26 熱解析の結果得られた温度分布
(ケース1, 緩衝材の含水比が0.0%)

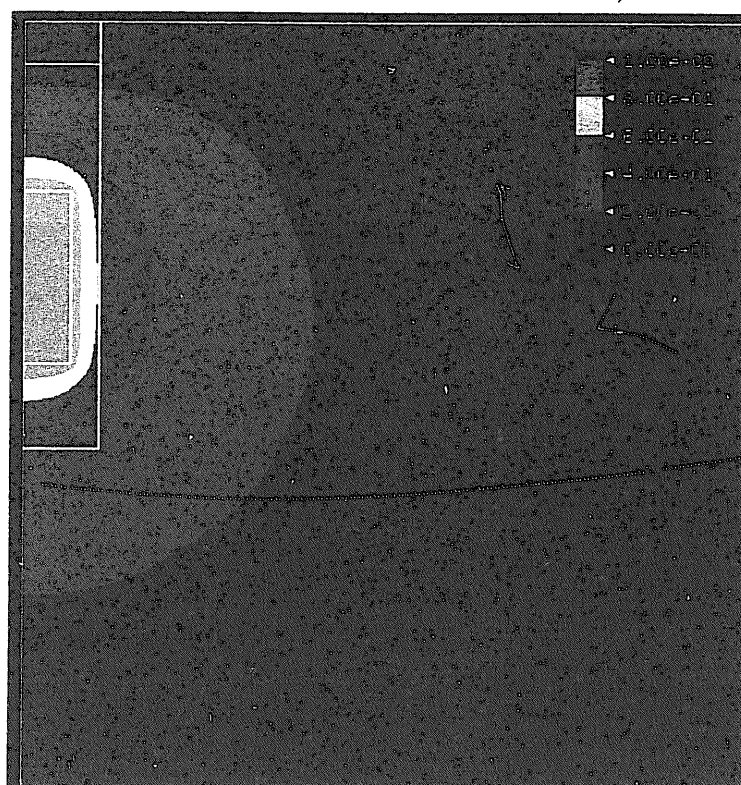


図5-27 熱解析の結果得られた温度分布
(ケース2, 緩衝材の含水比が15.0%)

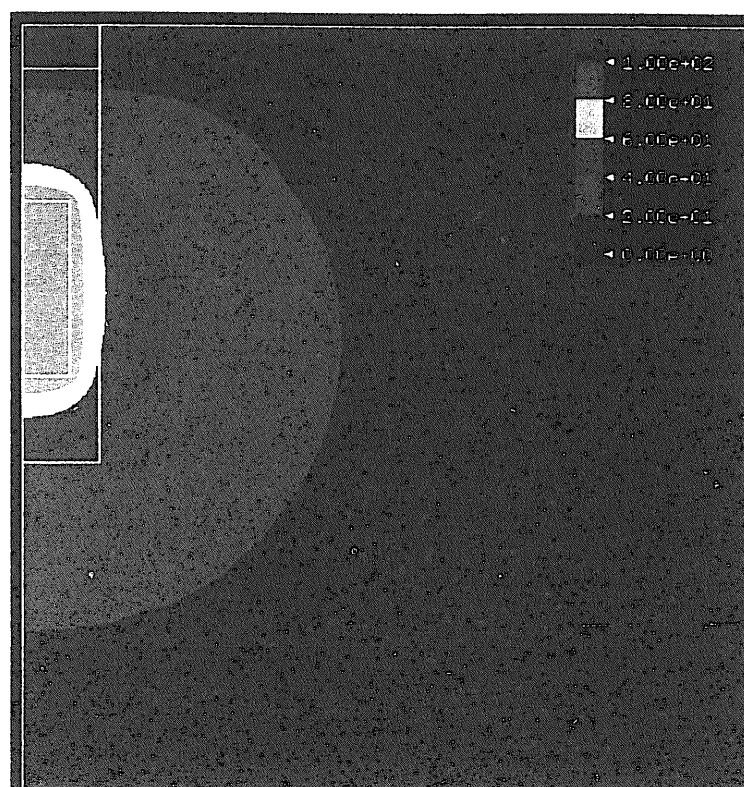


図5-28 熱解析の結果得られた温度分布
(ケース 3, 緩衝材の含水比が23.6%)

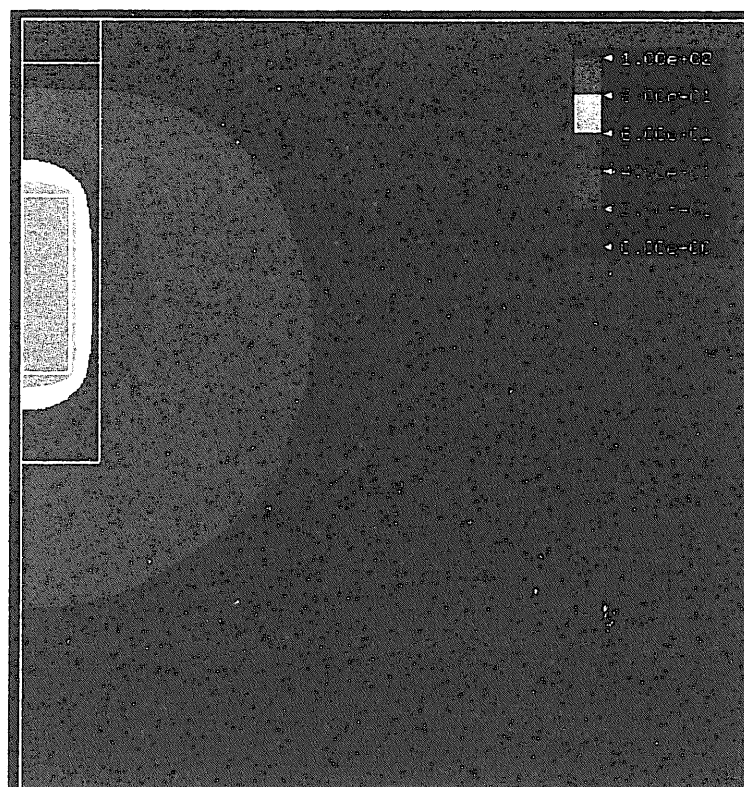
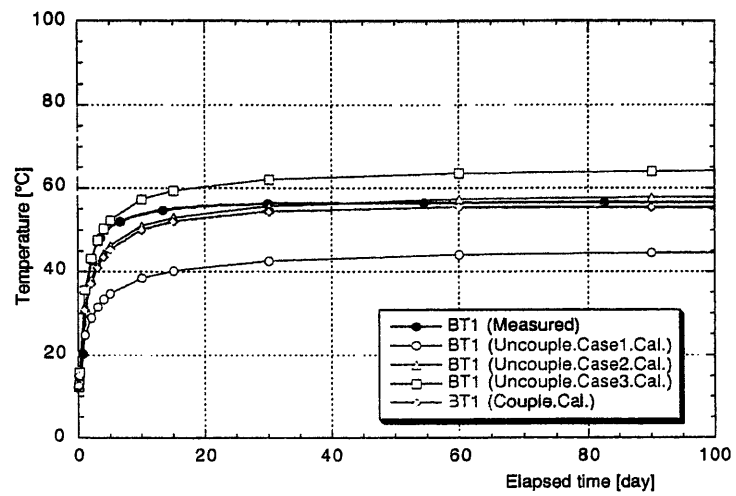
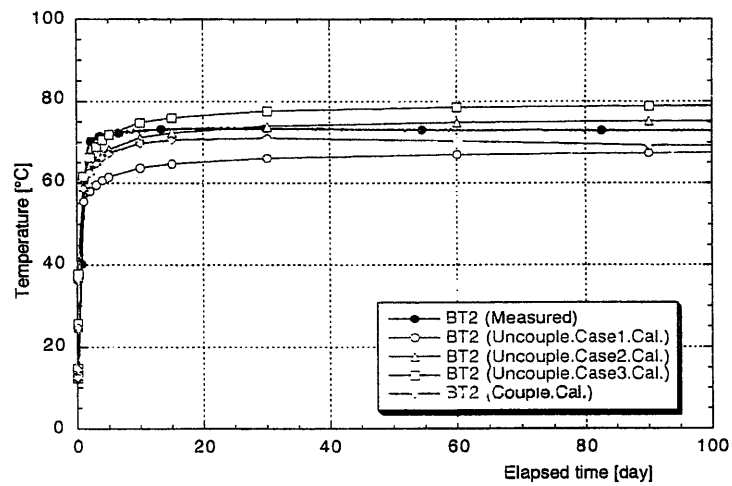


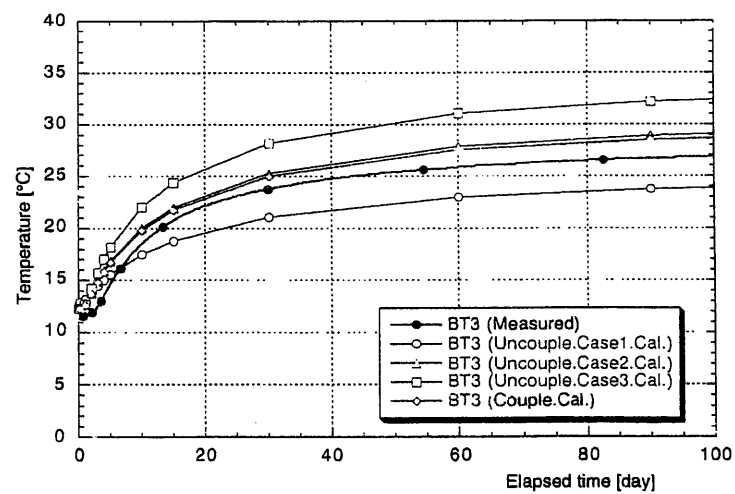
図5-29 連成解析の結果得られた温度分布



(a)BT1

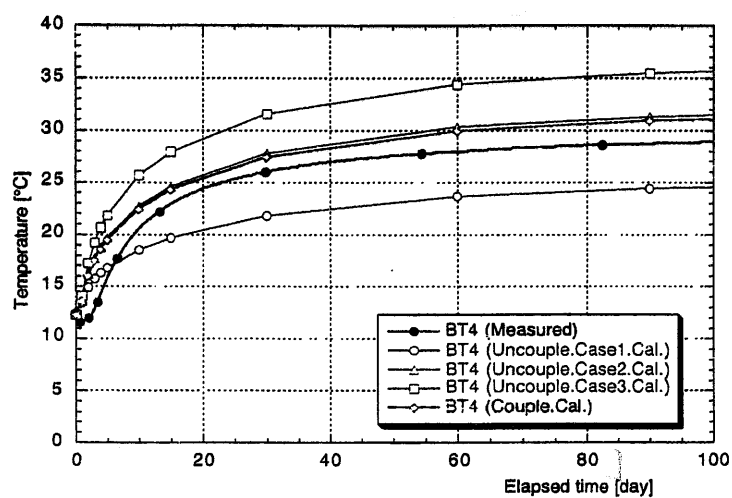


(b)BT2



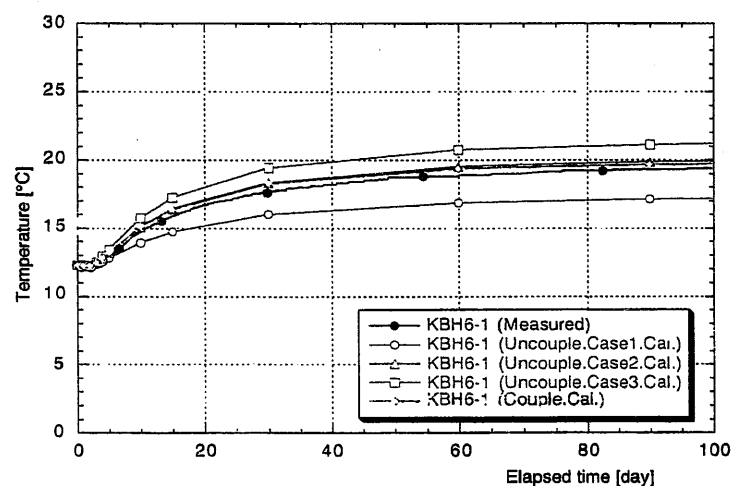
(c)BT3

図5-30 熱解析および連成解析による緩衝材内の温度の経時変化の比較

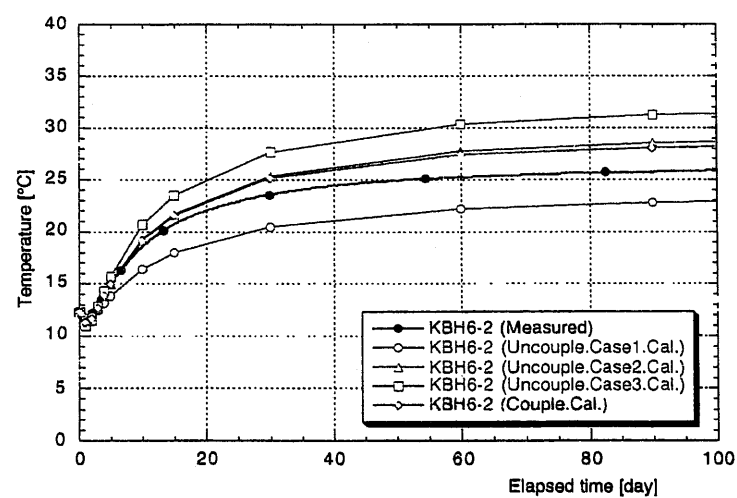


(d)BT4

図5-30 熱解析および連成解析による緩衝材内の温度の経時変化の比較 (続き)

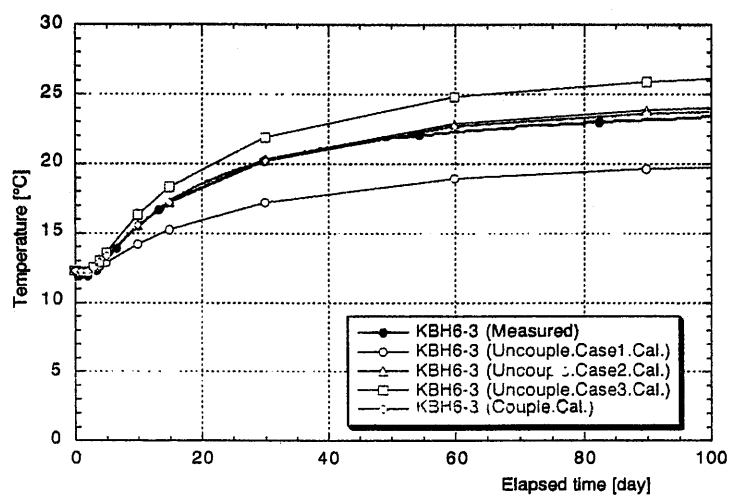


(a)KBH6-1

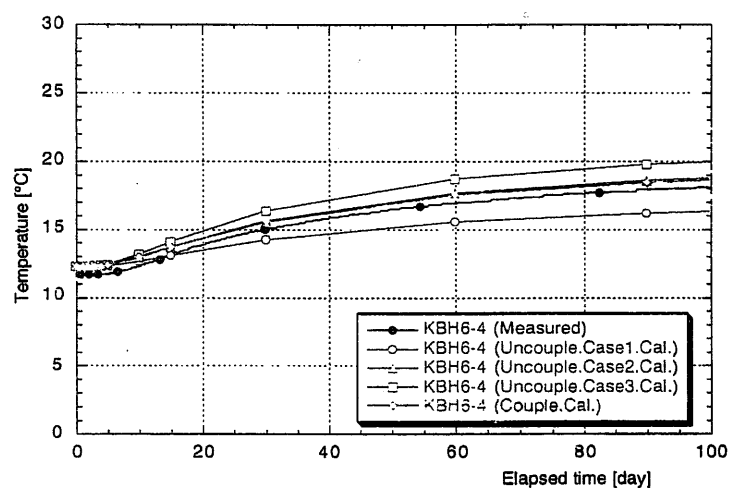


(b)KBH6-2

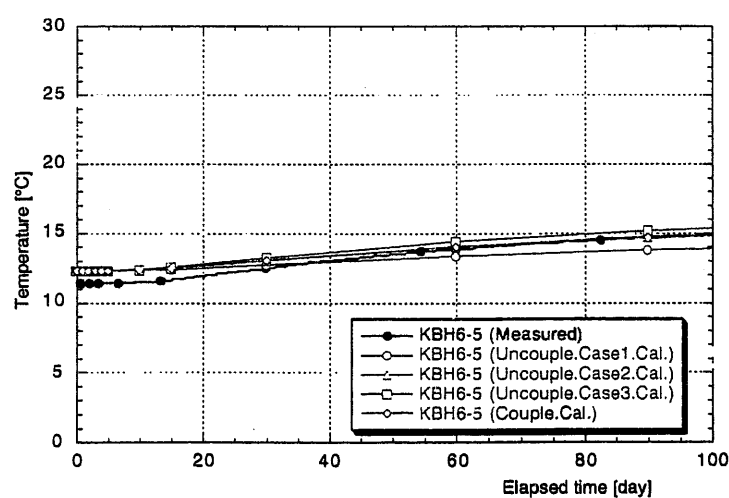
図5-31 熱解析および連成解析による岩盤内の温度の経時変化の比較



(c)KBH6-3



(d)KBH6-4



(e)KBH6-5

図5-31 熱解析および連成解析による岩盤内の温度の経時変化の比較 (続き)

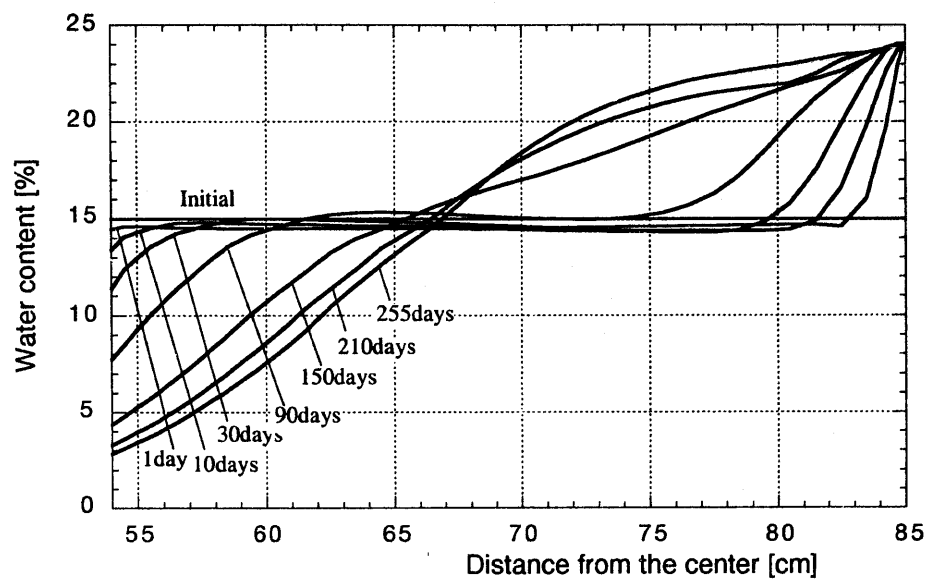


図5-32 連成解析による緩衝材内の含水比分布の経時変化

第6章 ニアフィールド連成解析（緩衝材の再冠水時間の評価）

6.1 簡易モデルによる検討

6.1.1 解析条件

（1）解析モデル

解析モデルは第5.1節で用いた図5-1に示すものと同じである。解析対象は、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材および岩盤である。緩衝材はケイ砂混合材（30wt%, 1.6g/cm^3 ）である。

（2）解析物性値および初期条件、境界条件

解析に用いた物性値に関しても第5.1節と同じものを用いた。また、解析領域の初期温度は 45°C とした。これは、地表面の温度を 15°C とし、深度方向に $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ の温度勾配を与えた場合の解析対象領域（深度 1000m ）の温度に相当する。ガラス固化体には発熱量の経時変化を与え、モデルの外側部を初期温度で固定とした。解析は緩衝材の含水比が7%, 17%の2ケースに関して実施し、発熱量に関しては第5.1節と同じくそれぞれ図5-5の発熱特性を $2/5$, $1/2$ にした。

（3）解析ケース

解析ケースを表6-1に示す。解析は緩衝材の初期含水比、温度勾配水分拡散係数 D_T 、岩盤内の圧力水頭および透水性をパラメータとして実施した。岩盤内の圧力水頭に関しては初期値で固定するケースと変動するケースを検討した。岩盤の圧力水頭に関しては、地層処分の深度が 1000m 程度と考えられているため（動力炉・核燃料開発事業団, 1992）、この場合の静水圧相当（ 1000m ）と大気圧相当（ 0m ）の2ケースを実施した。実際の処分場深度が 1000m 程度であれば、人工バリアに作用する水圧はこの両者の間に存在するものと考えられる。また、変動するケースに関しては岩盤の透水性をパラメータとしている。岩盤内の地下水流れは、既存データの分析に基づくと、多くの岩種では亀裂が支配的になることが確認されており、一部の新第三紀堆積岩においては、亀裂以外に粒子間隙内の流れも有意であることが観察されている。すなわち、岩盤内の地下水浸透は、亀裂内の流れが支配的な亀裂性岩盤および、粒子間隙内の流れが支配的な多孔質岩盤とで個々にモデル化されている。しかし、既往のデータによると、わが国の岩盤の地下深部における巨視的な透水係数は、亀裂性岩盤および多孔質岩盤に拘らず概ね $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{m/s}$ オーダー程度と考えられている。そこで、ここではこの値を参考に岩盤の固有透過度を $10^{-13} \sim 10^{-17} \text{m}^2$ の範囲に設定して解析を実施した。また、亀裂の全く無い場合を想定して岩盤の固有透過度が 10^{-20}m^2 （岩盤の基質部の透水性に相当する）のケースも設定した。岩盤内の圧力水頭が変動するケースの際には、解析モデルの外側境界を初期水頭で固定とし、岩盤内の不飽和水分特性としては図6-1に示すものを用いた（Watanabe, K., 1991）。

表6-1 解析ケース

緩衝材 初期含水比 ω_o [%]	D_r [cm ² /(s·℃)]	岩盤圧力水頭 P_o [m]	岩盤固有透過度 K [m ²]	解析ケース
7.0	0.0	1000.0 (Fix)		Case 7-0-1-0
		1000.0 (Variable)	1.0E-13	Case 7-0-1-1
			1.0E-14	Case 7-0-1-2
			1.0E-15	Case 7-0-1-3
			1.0E-16	Case 7-0-1-4
			1.0E-17	Case 7-0-1-5
			1.0E-20	Case 7-0-1-6
		0.0 (Fix)		Case 7-0-2-0
		0.0 (Variable)	1.0E-13	Case 7-0-2-1
			1.0E-14	Case 7-0-2-2
			1.0E-15	Case 7-0-2-3
			1.0E-16	Case 7-0-2-4
			1.0E-17	Case 7-0-2-5
			1.0E-20	Case 7-0-2-6
	1.0E-8	1000.0 (Fix)		Case 7-1-1-0
		1000.0 (Variable)	1.0E-13	Case 7-1-1-1
			1.0E-14	Case 7-1-1-2
			1.0E-15	Case 7-1-1-3
			1.0E-16	Case 7-1-1-4
			1.0E-17	Case 7-1-1-5
			1.0E-20	Case 7-1-1-6
		0.0 (Fix)		Case 7-1-2-0
		0.0 (Variable)	1.0E-13	Case 7-1-2-1
			1.0E-14	Case 7-1-2-2
			1.0E-15	Case 7-1-2-3
			1.0E-16	Case 7-1-2-4
			1.0E-17	Case 7-1-2-5
			1.0E-20	Case 7-1-2-6

表6-1 解析ケース (続き)

緩衝材 初期含水比 ω_0 [%]	D_T [cm ² /(s·℃)]	岩盤圧力水頭 P_0 [m]	岩盤固有透過度 K [m ²]	解析ケース
7.0	7.0E-8	1000.0 (Fix)	.	Case 7-2-1-0
		1000.0 (Variable)	1.0E-13	Case 7-2-1-1
			1.0E-14	Case 7-2-1-2
			1.0E-15	Case 7-2-1-3
			1.0E-16	Case 7-2-1-4
			1.0E-17	Case 7-2-1-5
			1.0E-20	Case 7-2-1-6
		0.0 (Fix)		Case 7-2-2-0
		0.0 (Variable)	1.0E-13	Case 7-2-2-1
			1.0E-14	Case 7-2-2-2
			1.0E-15	Case 7-2-2-3
			1.0E-16	Case 7-2-2-4
			1.0E-17	Case 7-2-2-5
			1.0E-20	Case 7-2-2-6
	2.0E-7	1000.0 (Fix)		Case 7-3-1-0
		1000.0 (Variable)	1.0E-13	Case 7-3-1-1
			1.0E-14	Case 7-3-1-2
			1.0E-15	Case 7-3-1-3
			1.0E-16	Case 7-3-1-4
			1.0E-17	Case 7-3-1-5
			1.0E-20	Case 7-3-1-6
		0.0 (Fix)		Case 7-3-2-0
		0.0 (Variable)	1.0E-13	Case 7-3-2-1
			1.0E-14	Case 7-3-2-2
			1.0E-15	Case 7-3-2-3
			1.0E-16	Case 7-3-2-4
			1.0E-17	Case 7-3-2-5
			1.0E-20	Case 7-3-2-6

表6-1 解析ケース（続き）

緩衝材 初期含水比 ω_o [%]	D_T [cm ² /(s·°C)]	岩盤圧力水頭 P_o [m]	岩盤固有透過度 K [m ²]	解析ケース
17.0	0.0	1000.0 (Fix)		Case 17-0-1-0
		1000.0 (Variable)	1.0E-13	Case 17-0-1-1
			1.0E-14	Case 17-0-1-2
			1.0E-15	Case 17-0-1-3
			1.0E-16	Case 17-0-1-4
			1.0E-17	Case 17-0-1-5
			1.0E-20	Case 17-0-1-6
		0.0 (Fix)		Case 17-0-2-0
		0.0 (Variable)	1.0E-13	Case 17-0-2-1
			1.0E-14	Case 17-0-2-2
			1.0E-15	Case 17-0-2-3
			1.0E-16	Case 17-0-2-4
			1.0E-17	Case 17-0-2-5
			1.0E-20	Case 17-0-2-6
	1.0E-8	1000.0 (Fix)		Case 17-1-1-0
		1000.0 (Variable)	1.0E-13	Case 17-1-1-1
			1.0E-14	Case 17-1-1-2
			1.0E-15	Case 17-1-1-3
			1.0E-16	Case 17-1-1-4
			1.0E-17	Case 17-1-1-5
			1.0E-20	Case 17-1-1-6
		0.0 (Fix)		Case 17-1-2-0
		0.0 (Variable)	1.0E-13	Case 17-1-2-1
			1.0E-14	Case 17-1-2-2
			1.0E-15	Case 17-1-2-3
			1.0E-16	Case 17-1-2-4
			1.0E-17	Case 17-1-2-5
			1.0E-20	Case 17-1-2-6

表6-1 解析ケース (続き)

緩衝材 初期含水比 ω_o [%]	D_T [cm ² /(s·℃)]	岩盤圧力水頭 P_o [m]	岩盤固有透過度 K [m ²]	解析ケース
17.0	7.0E-8	1000.0 (Fix)		Case 17-2-1-0
		1000.0 (Variable)	1.0E-13	Case 17-2-1-1
			1.0E-14	Case 17-2-1-2
			1.0E-15	Case 17-2-1-3
			1.0E-16	Case 17-2-1-4
			1.0E-17	Case 17-2-1-5
			1.0E-20	Case 17-2-1-6
		0.0 (Fix)		Case 17-2-2-0
		0.0 (Variable)	1.0E-13	Case 17-2-2-1
			1.0E-14	Case 17-2-2-2
			1.0E-15	Case 17-2-2-3
			1.0E-16	Case 17-2-2-4
			1.0E-17	Case 17-2-2-5
			1.0E-20	Case 17-2-2-6
	2.0E-7	1000.0 (Fix)		Case 17-3-1-0
		1000.0 (Variable)	1.0E-13	Case 17-3-1-1
			1.0E-14	Case 17-3-1-2
			1.0E-15	Case 17-3-1-3
			1.0E-16	Case 17-3-1-4
			1.0E-17	Case 17-3-1-5
			1.0E-20	Case 17-3-1-6
		0.0 (Fix)		Case 17-3-2-0
		0.0 (Variable)	1.0E-13	Case 17-3-2-1
			1.0E-14	Case 17-3-2-2
			1.0E-15	Case 17-3-2-3
			1.0E-16	Case 17-3-2-4
			1.0E-17	Case 17-3-2-5
			1.0E-20	Case 17-3-2-6

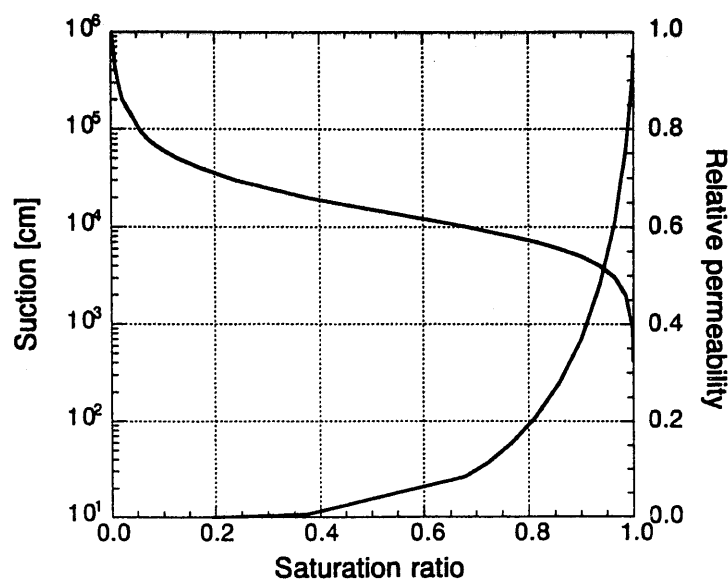


図6-1 岩盤の不飽和浸透特性

6.1.2 解析結果

(1) 2/5の発熱量を用いた計算（初期含水比が7%のケース）

図6-2に緩衝材の初期含水比が7.0%、温度勾配水分拡散係数 D_r が $0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ 、岩盤の初期圧力水頭 P_0 が1000mで岩盤の透水性が異なる7ケースの緩衝材の含水比の経時変化を示す。出力点は緩衝材の最も内側のオーバーパックに接している部分である。岩盤の水圧を固定とした場合、および固有透過度が $10^{-13}\sim 10^{-17}\text{m}^2$ とした場合は全て同じ結果となった。この場合、緩衝材が飽和になるのに要する期間（再冠水時間）は約4年である。固有透過度が 10^{-20}m^2 のケースのみ再冠水時間が長くなっており、この場合約8年である。図6-3には初期圧力水頭が0mのケースの結果を示す。全体的には岩盤の初期圧力水頭が1000mの場合に比べ再冠水時間が長くなっており、この場合も固有透過度が 10^{-20}m^2 のケースのみ他のケースに比べ再冠水時間が長くなっている。そして、他のケースとの差は初期圧力水頭が1000mの時に比べ格段に大きくなっている。再冠水時間は岩盤の水圧を固定とした場合、および固有透過度が $10^{-13}\sim 10^{-17}\text{m}^2$ とした場合は約15年、固有透過度が 10^{-20}m^2 のケースで約1000年である。

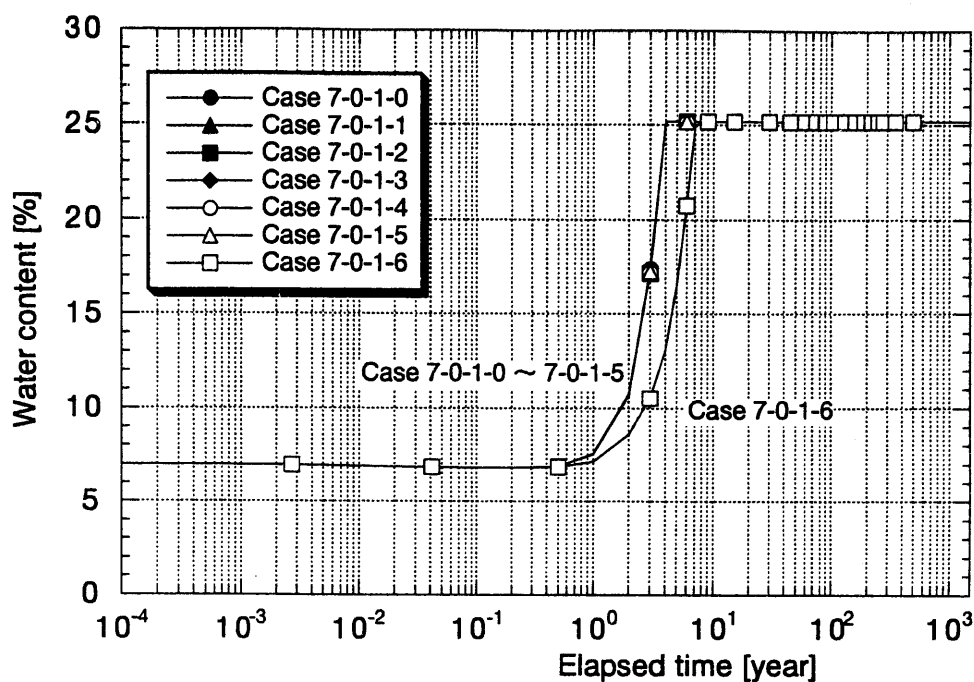
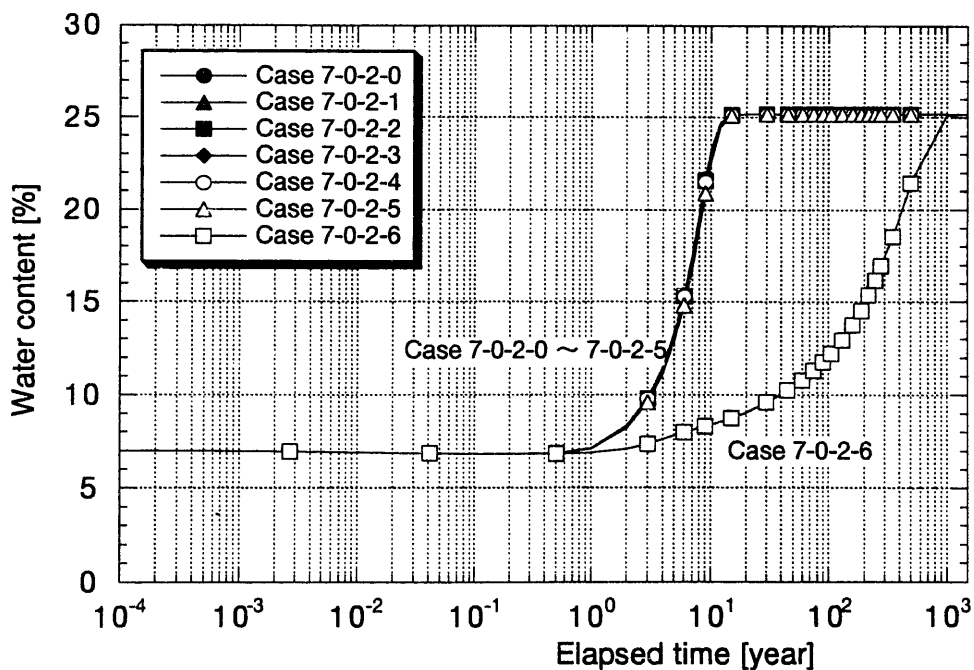
図6-4、6-5には同じケースにおける岩盤の緩衝材に接している部分の圧力水頭の経時変化を示す。岩盤内の圧力水頭を固定したケースでは岩盤内の圧力水頭は当然一定となっているが、その他の圧力水頭が変動するケースでは圧力水頭は初期値より低下している。岩盤の固有透過度が小さくなるにつれて圧力水頭が初期値より小さくなる期間が長くなっており、特に固有透過度が 10^{-20}m^2 のケースは値もかなり小さくかつ期間も約1000mとなっている。以上より、岩盤の透水性により岩盤内の圧力水頭の値は大きく変化するが、固有透過度が $10^{-13}\sim 10^{-17}\text{m}^2$ 程度であれば、緩衝材の浸潤挙動は岩盤の透水性に影響されない結果となった。この場合、緩衝材の浸潤挙動に影響を与える外的要因は岩盤の初期圧力水頭であるといえる。

図6-6、6-7には岩盤の初期圧力水頭が1000mのケースの D_r の違いによる含水比の経

時変化の比較を示す。図6-6が岩盤の圧力水頭が固定の場合（岩盤の圧力水頭が変動し、固有透過度が $10^{-13} \sim 10^{-17} \text{m}^2$ の場合も同じ結果である）、図6-7が岩盤の固有透過度が 10^{-20}m^2 の場合である。 D_r の値が大きくなるにつれて緩衝材が初期より含水比が小さくなる割合が大きくなっているため再冠水時間が長くなっている。岩盤の圧力水頭が固定で、 D_r が $0.0 \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ の時の再冠水時間が最も短く約4年である。一方、 D_r として室内試験で同定された値（ $7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ ）を用いた場合は、岩盤の圧力水頭が固定の場合が再冠水時間が約5年、固有透過度が 10^{-20}m^2 の場合が約100年である。図6-8、6-9には岩盤の初期圧力水頭が0mのケースの D_r の違いによる含水比の経時変化の比較を示している。図6-8が岩盤の圧力水頭が固定の場合、図6-9が岩盤の固有透過度が 10^{-20}m^2 の場合である。この場合は圧力水頭が1000mの場合に比べ、 D_r の影響が大きくなっている。岩盤の圧力水頭が固定で、 D_r が $0.0 \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ の時の再冠水時間が約10年、 D_r が $7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ の場合が約80年となった。岩盤の固有透過度が 10^{-20}m^2 の場合は D_r による差はなく、全て再冠水時間は1000年となった。

図6-10、6-11には岩盤の透水性の違いによる緩衝材内側の温度の経時変化の比較を示す。緩衝材内の圧力水頭が1000mの場合も0mの場合も、岩盤の固有透過度が 10^{-20}m^2 のケースのみ他と比べ最高温度が高くなっている。図6-2、6-3にあるようにこのケースのみ緩衝材の再冠水時間が長いため、緩衝材内の温度も他と比べ高くなっている。また、岩盤内の圧力水頭が1000mの場合の方が0mの場合に比べ再冠水時間が短いため緩衝材内の最高温度も低くなっている。図6-12～6-15には D_r の違いによる緩衝材内側の温度の経時変化の違いを示す。 D_r が大きくなるほど含水比が初期より低下する割合およびその期間が長くなっているため最高温度の値は大きくなる。また、岩盤内の初期圧力水頭が大きいほど早期に緩衝材が飽和となるため、最高温度の値は小さくなる。図6-16、6-17には緩衝材の外側部分の温度の経時変化を示す。図6-16が岩盤の透水の違いによる比較、図6-17が岩盤の初期圧力水頭および D_r の違いによる比較である。外側部分に関しては全てのケースにおいて早期に飽和するため D_r の影響による温度の差はない。

図6-18には、再冠水時間に関して岩盤の固有透過度のパラメータスタディーを実施した結果を示す。この時、 D_r は $7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ とした。また、岩盤の固有透過度は 10^{-13}m^2 から 10^{-21}m^2 とした。 10^{-13}m^2 から 10^{-18}m^2 までは再冠水時間は一定であり、岩盤の固有透過度の影響はない。固有透過度が 10^{-18}m^2 以下の場合には固有透過度の減少に伴い、再冠水時間は長くなっている。特に岩盤の初期圧力水頭が小さい場合はその影響を大きく受ける結果となった。図6-19には、岩盤の初期圧力水頭が0.0mの場合の温度の経時変化を示す。同図には熱解析の結果も示している。熱解析の際には緩衝材の熱物性は初期含水比の時の値を用いている。岩盤の透水性が小さいほど、再冠水時間が長くなるため最高温度は高くなる。しかし、岩盤の固有透過度が 10^{-21}m^2 であり、再冠水時間が1000年以上となったケースでも最高温度は熱解析の結果よりは小さくなる。

図6-2 緩衝材の内側（オハ⁺ハ⁺ハ⁺側）の含水比の経時変化
 $(\omega_o=7.0\%, D_f=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, P_o=1000\text{m})$
Case 7-0-1-0 : $P=\text{Fix}$, Case 7-0-1-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 7-0-1-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 7-0-1-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$ Case 7-0-1-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 7-0-1-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 7-0-1-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$ 図6-3 緩衝材の内側（オハ⁺ハ⁺ハ⁺側）の含水比の経時変化
 $(\omega_o=7.0\%, D_f=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, P_o=0\text{m})$
Case 7-0-2-0 : $P=\text{Fix}$, Case 7-0-2-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 7-0-2-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 7-0-2-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$ Case 7-0-2-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 7-0-2-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 7-0-2-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

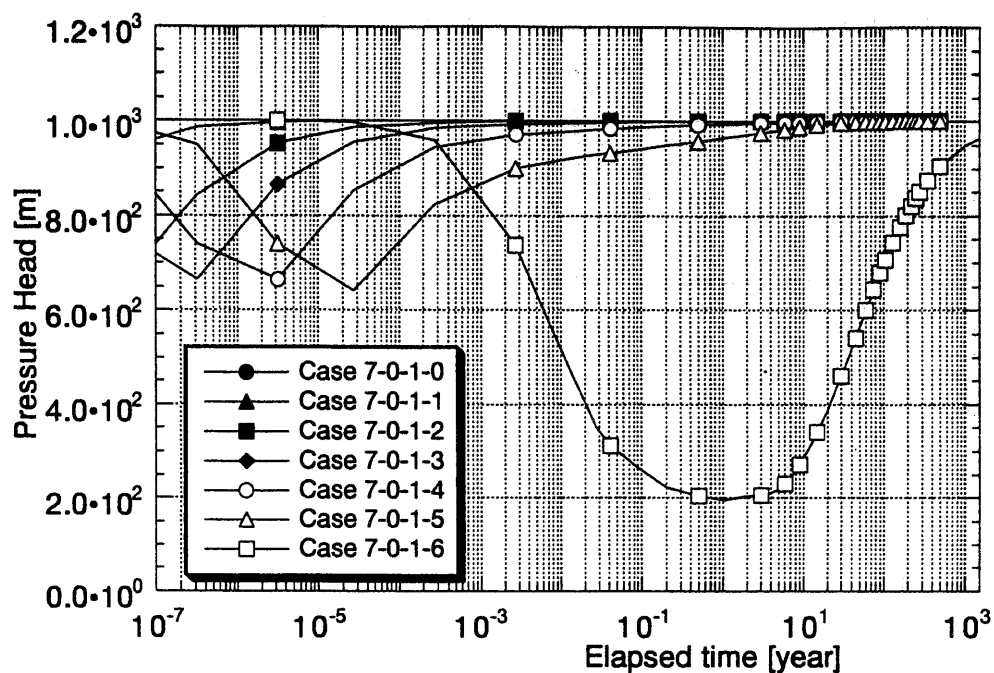


図6-4 岩盤内の緩衝材に接する部分の圧力水頭の経時変化

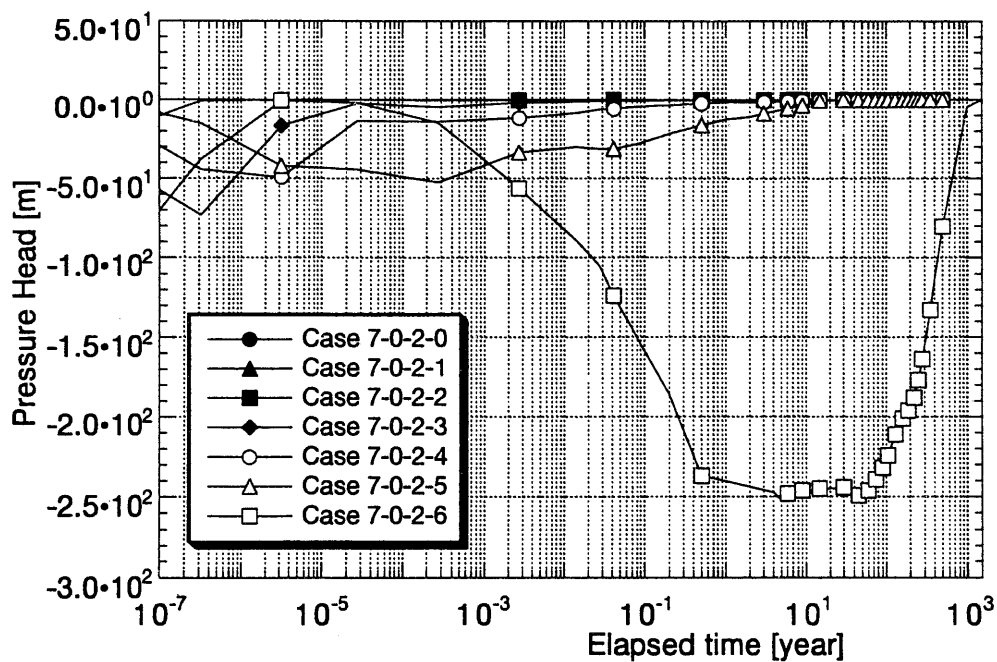
 $(\omega_o=7.0\%, D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P_o=1000\text{m})$
Case 7-0-1-0 : $P=\text{Fix}$, Case 7-0-1-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 7-0-1-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 7-0-1-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$ Case 7-0-1-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 7-0-1-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 7-0-1-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$ 

図6-5 岩盤内の緩衝材に接する部分の圧力水頭の経時変化

 $(\omega_o=7.0\%, D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P_o=0\text{m})$
Case 7-0-2-0 : $P=\text{Fix}$, Case 7-0-2-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 7-0-2-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 7-0-2-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$ Case 7-0-2-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 7-0-2-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 7-0-2-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

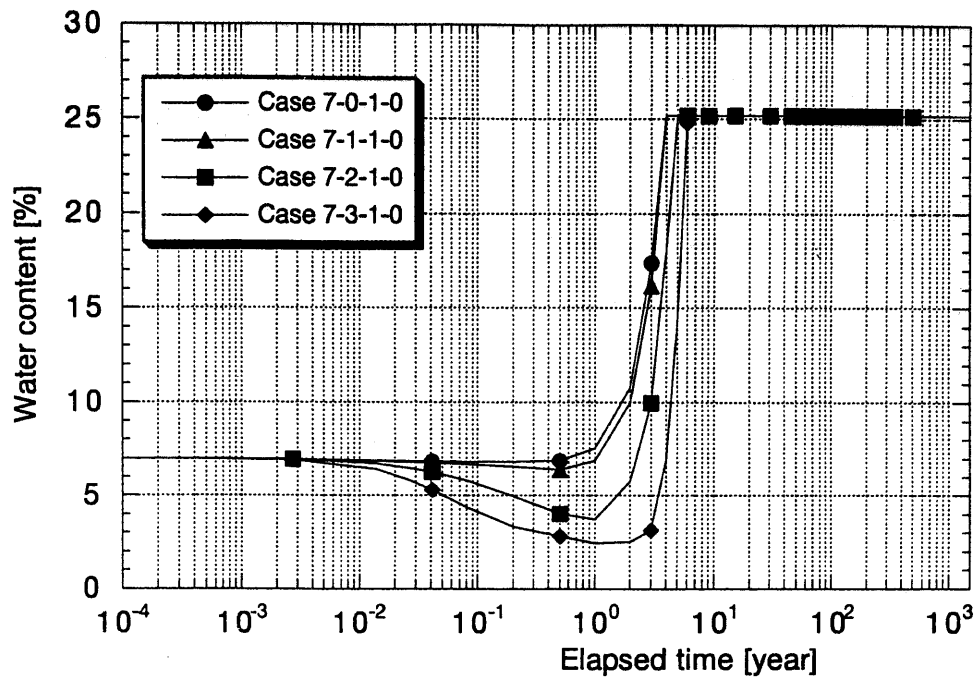


図6-6 緩衝材の内側（オーバーハック側）の含水比の経時変化

($\omega_o=7.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $P=\text{Fix}$)

Case 7-0-1-0 : $D_r=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-1-1-0 : $D_r=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

Case 7-2-1-0 : $D_r=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-3-1-0 : $D_r=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

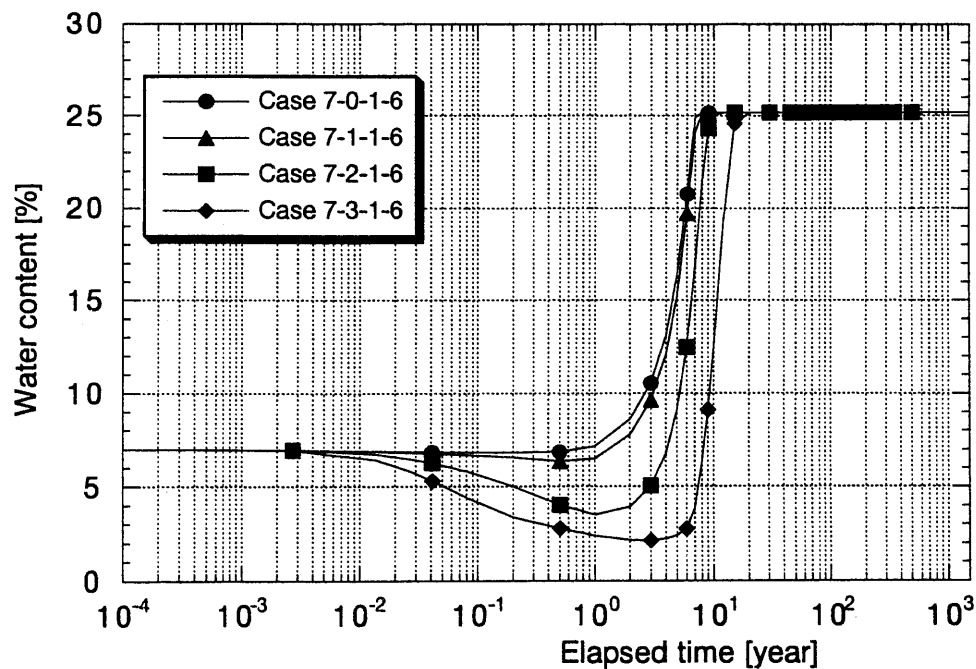


図6-7 緩衝材の内側（オーバーハック側）の含水比の経時変化

($\omega_o=7.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)

Case 7-0-1-6 : $D_r=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-1-1-6 : $D_r=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

Case 7-2-1-6 : $D_r=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-3-1-6 : $D_r=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

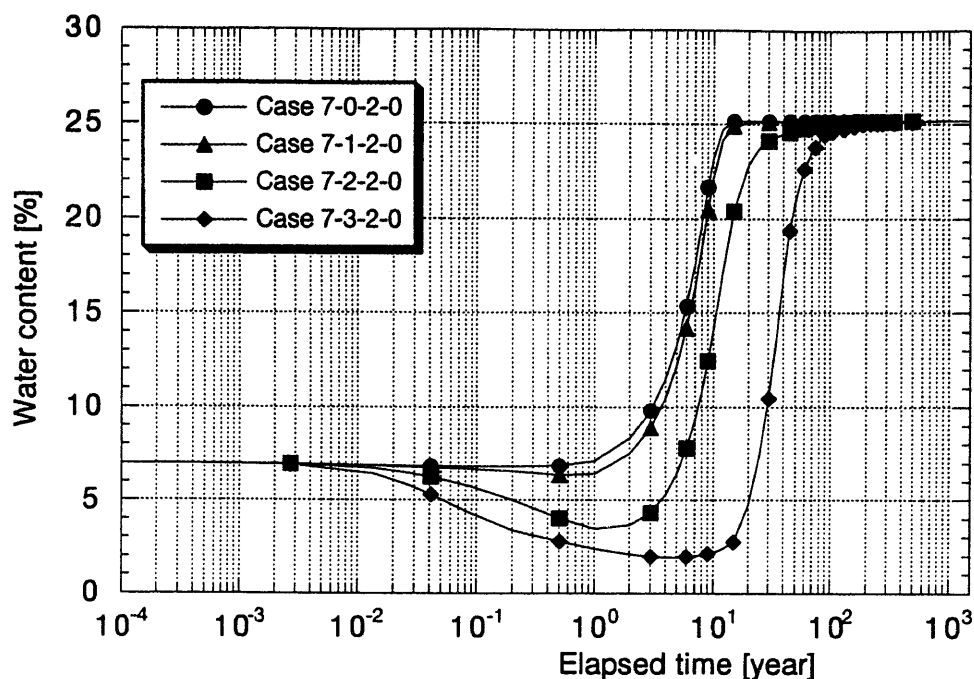


図6-8 緩衝材の内側（オーバーハック側）の含水比の経時変化

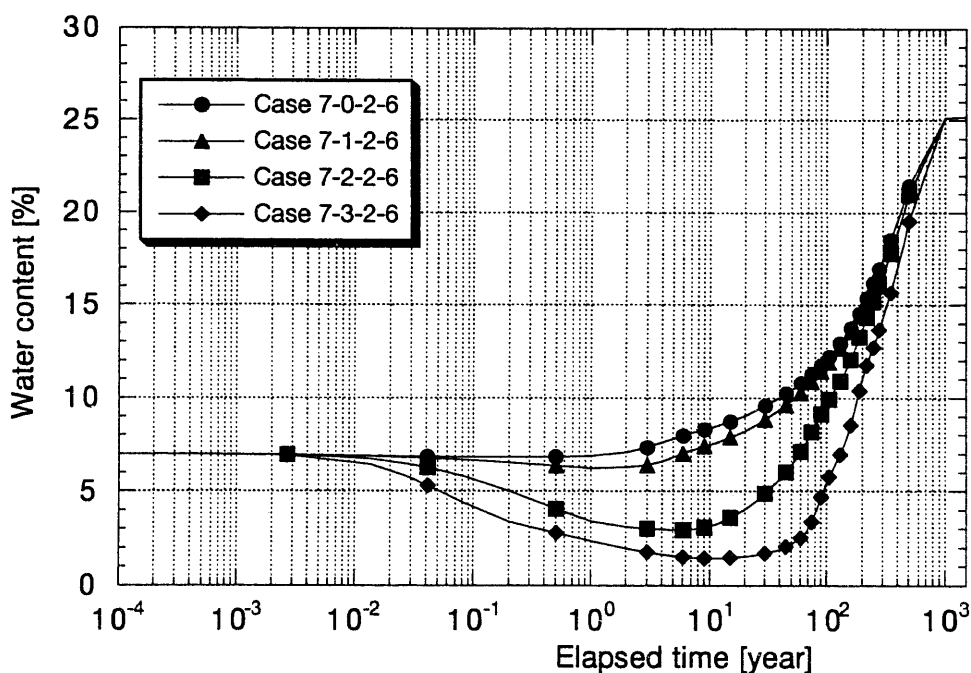
 $(\omega_o=7.0\%, P_o=0\text{m}, P=\text{Fix})$
Case 7-0-2-0 : $D_r=0.0 \times 10^0 \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-1-0-0 : $D_r=1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ Case 7-2-2-0 : $D_r=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-3-0-0 : $D_r=2.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ 

図6-9 緩衝材の内側（オーバーハック側）の含水比の経時変化

 $(\omega_o=7.0\%, P_o=0\text{m}, K=10^{-20}\text{m}^2)$
Case 7-0-2-6 : $D_r=0.0 \times 10^0 \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-1-2-6 : $D_r=1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ Case 7-2-2-6 : $D_r=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-3-2-6 : $D_r=2.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

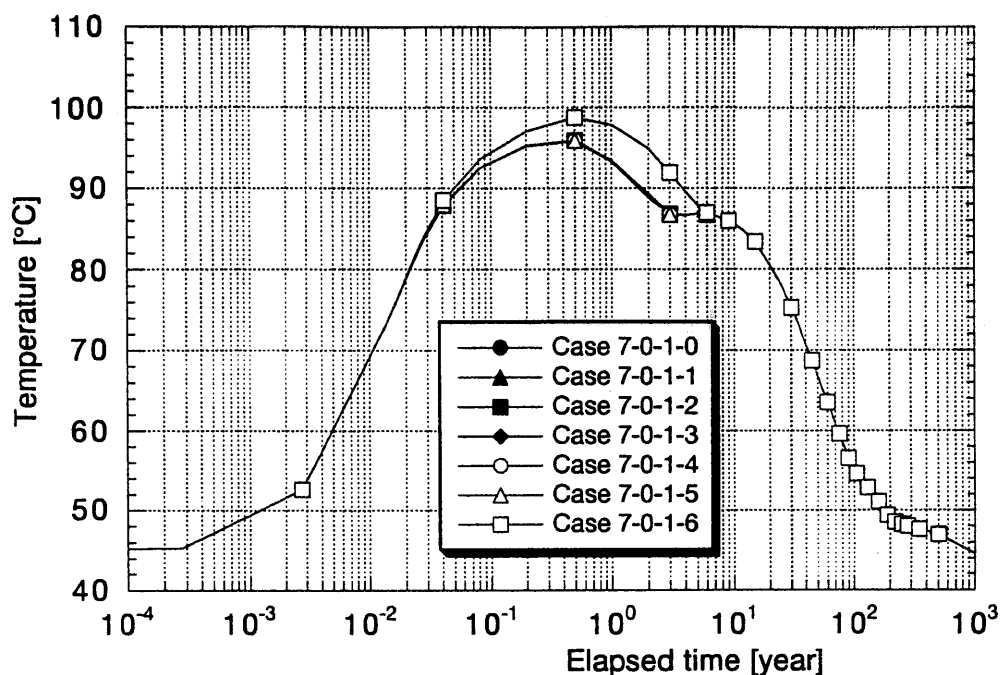


図6-10 緩衝材の内側（オーバーハック側）の温度の経時変化

($\omega_o=7.0\%$, $D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P_o=1000\text{m}$)

Case 7-0-1-0 : $P=\text{Fix}$, Case 7-0-1-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 7-0-1-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 7-0-1-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$
 Case 7-0-1-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 7-0-1-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 7-0-1-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

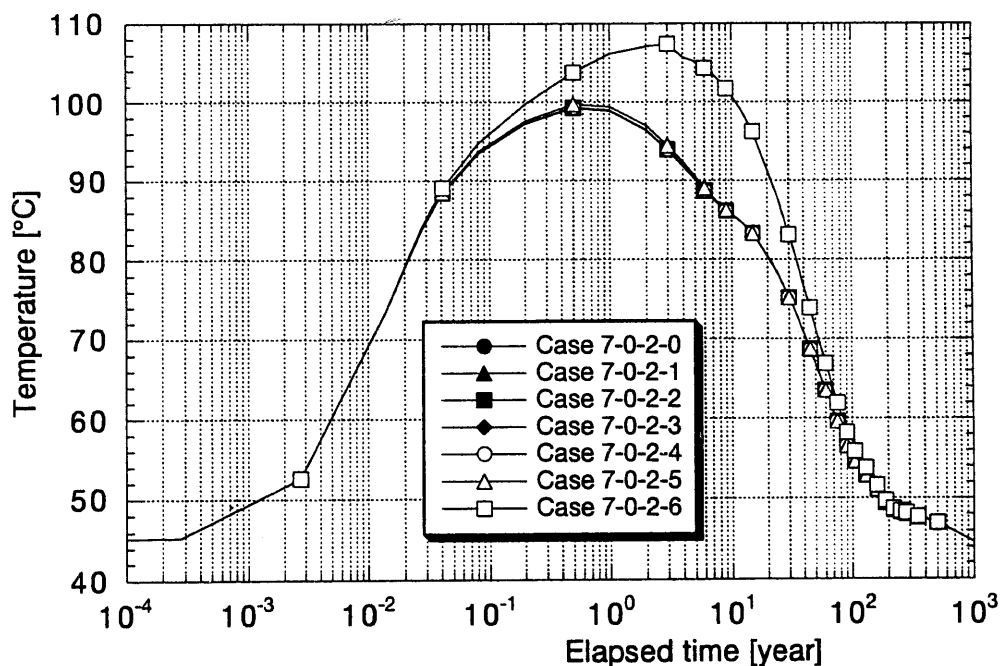


図6-11 緩衝材の内側（オーバーハック側）の温度の経時変化

($\omega_o=7.0\%$, $D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P_o=0\text{m}$)

Case 7-0-2-0 : $P=\text{Fix}$, Case 7-0-2-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 7-0-2-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 7-0-2-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$
 Case 7-0-2-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 7-0-2-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 7-0-2-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

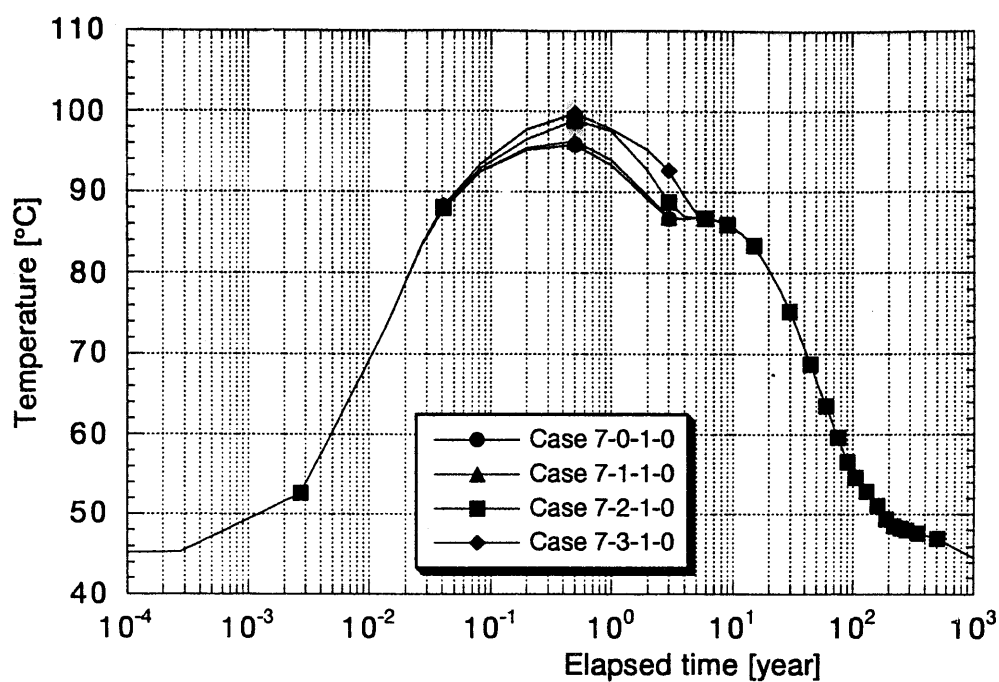


図6-12 緩衝材の内側（オハ-ハッ側）の温度の経時変化

($\omega_o=7.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $P=\text{Fix}$)

Case 7-0-1-0 : $D_r=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-1-1-0 : $D_r=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

Case 7-2-1-0 : $D_r=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-3-1-0 : $D_r=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

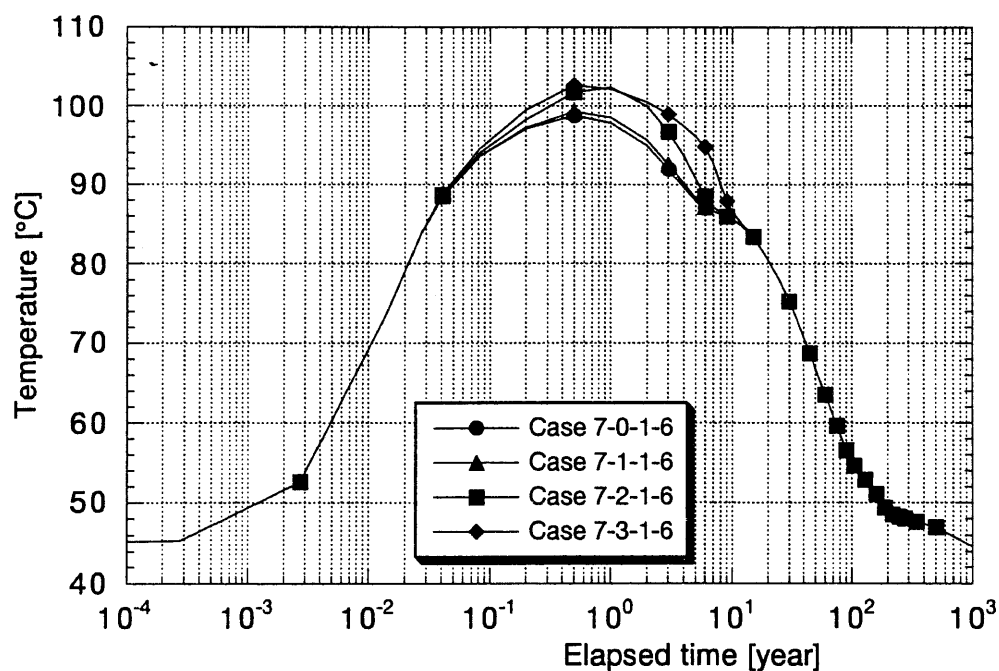


図6-13 緩衝材の内側（オハ-ハッ側）の温度の経時変化

($\omega_o=7.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)

Case 7-0-1-6 : $D_r=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-1-1-6 : $D_r=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

Case 7-2-1-6 : $D_r=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-3-1-6 : $D_r=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

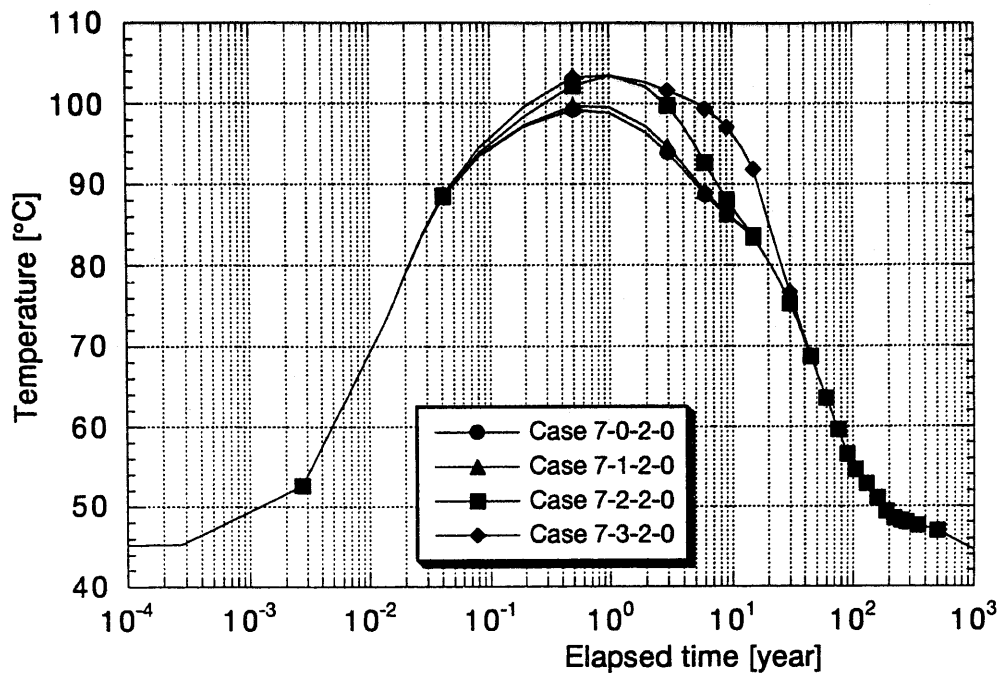


図6-14 緩衝材の内側（オハ・ハック側）の温度の経時変化

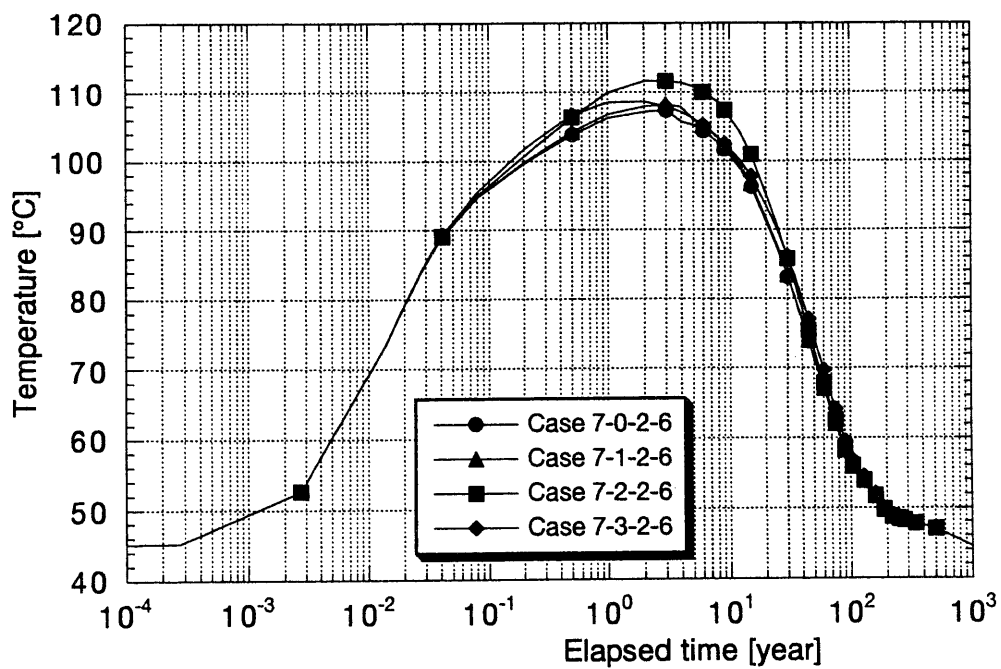
($\omega_o=7.0\%$, $P_o=0m$, $P=Fix$)Case 7-0-2-0 : $D_r=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-1-2-0 : $D_r=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ Case 7-2-2-0 : $D_r=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-3-2-0 : $D_r=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ 

図6-15 緩衝材の内側（オハ・ハック側）の温度の経時変化

($\omega_o=7.0\%$, $P_o=0m$, $K=10^{-20} \text{ m}^2$)Case 7-0-2-6 : $D_r=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-1-2-6 : $D_r=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ Case 7-2-2-6 : $D_r=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 7-3-2-6 : $D_r=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

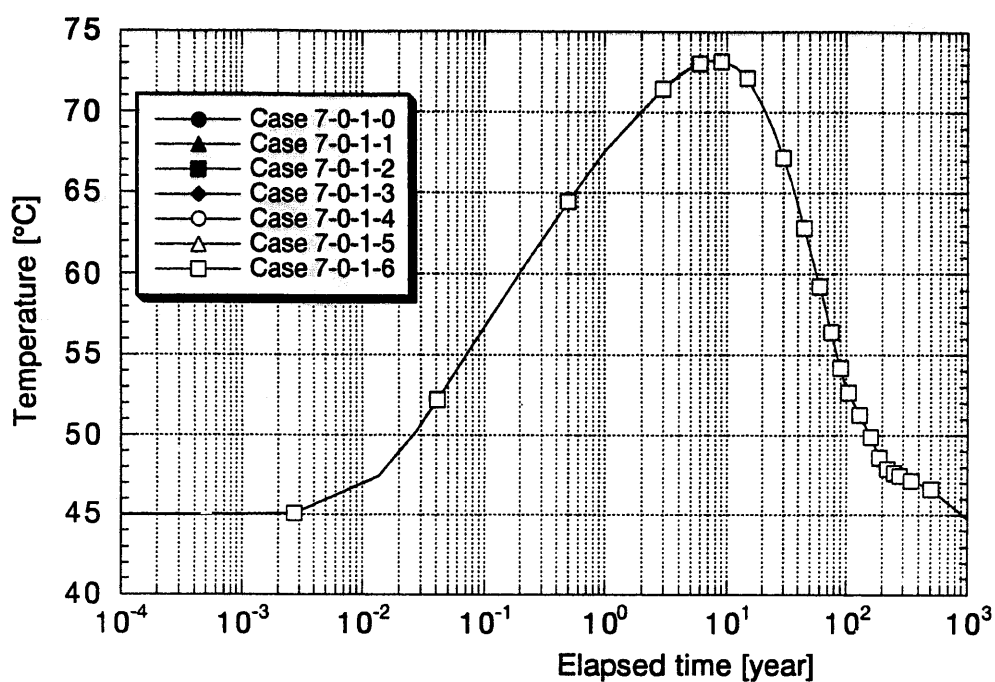


図6-16 緩衝材の外側（岩盤側）の温度の経時変化

 $(\omega_o=7.0\%, D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P_o=1000\text{m})$

 Case 7-0-1-0 : $P=\text{Fix}$, Case 7-0-1-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 7-0-1-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 7-0-1-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$

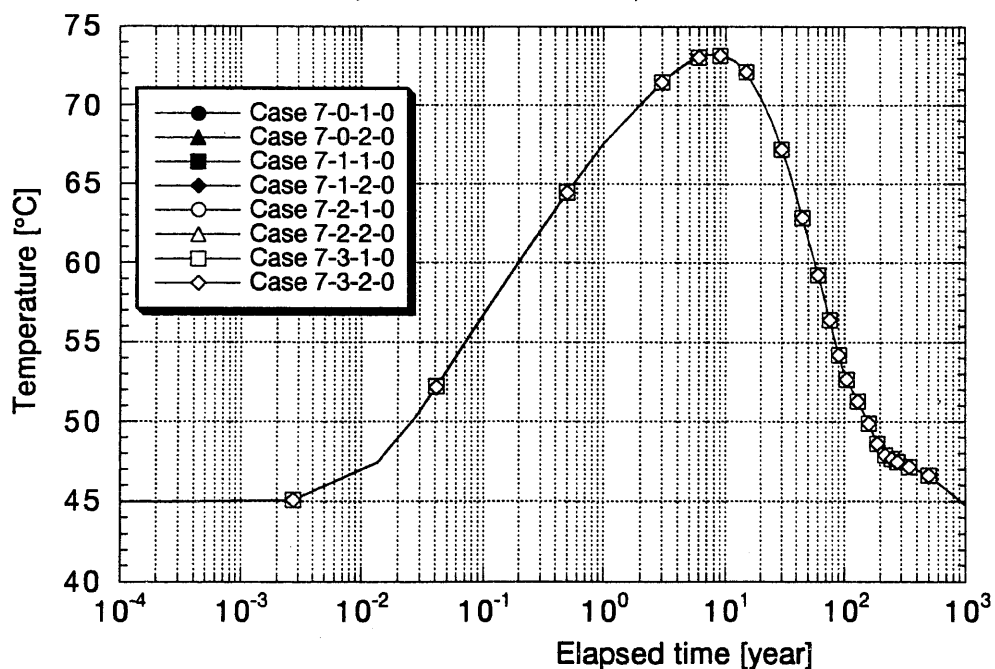
 Case 7-0-1-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 7-0-1-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 7-0-1-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$


図6-17 緩衝材の外側（岩盤側）の温度の経時変化

 $(\omega_o=7.0\%)$

 Case 7-0-1-0 : $D_r=0.0 \times 10^0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P=1000\text{m}$, Case 7-0-2-0 : $D_r=0.0 \times 10^0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P=0\text{m}$

 Case 7-1-1-0 : $D_r=1.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P=1000\text{m}$, Case 7-1-2-0 : $D_r=1.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P=0\text{m}$

 Case 7-2-1-0 : $D_r=7.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P=1000\text{m}$, Case 7-2-2-0 : $D_r=7.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P=0\text{m}$

 Case 7-3-1-0 : $D_r=2.0 \times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P=1000\text{m}$, Case 7-3-2-0 : $D_r=2.0 \times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P=0\text{m}$

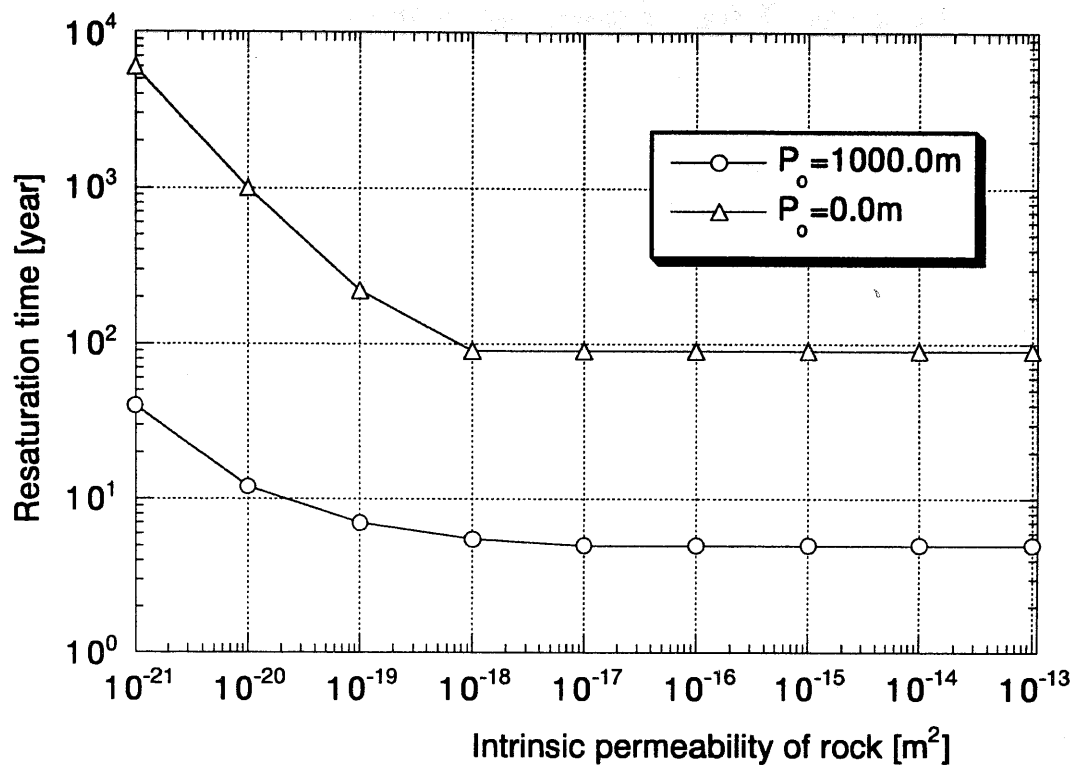


図6-18 岩盤の固有透過度と再冠水時間の関係
 $(\omega_o=7.0\%, D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C})$

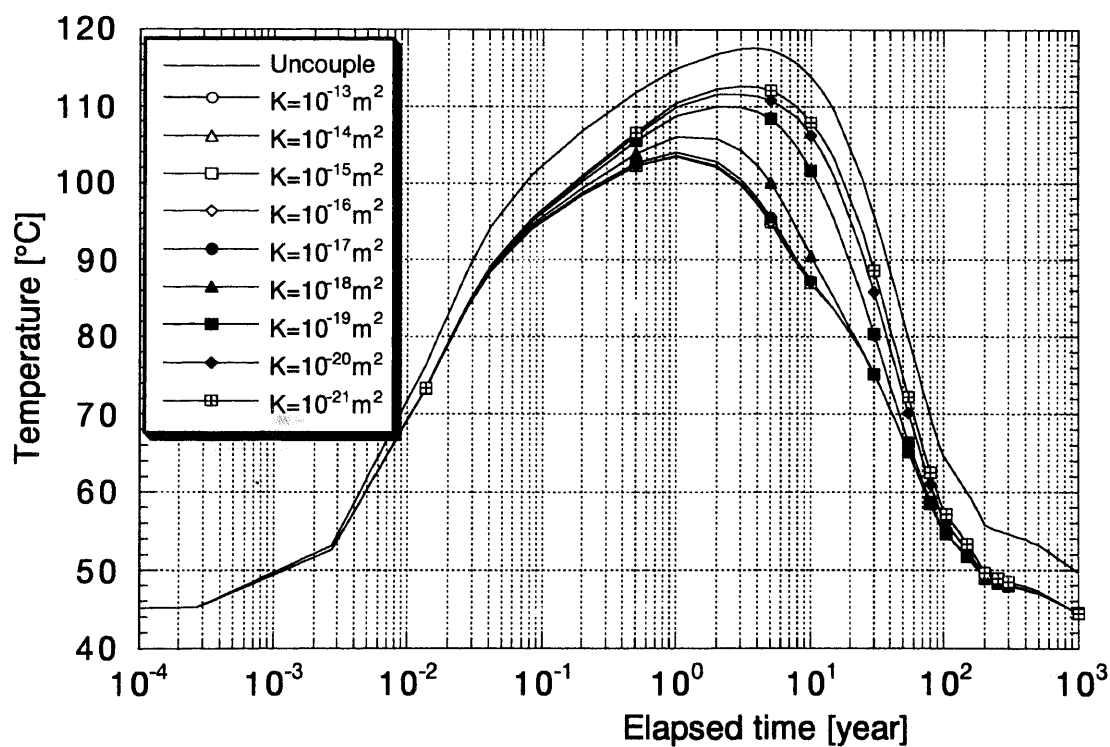


図6-19 緩衝材の内側（オバーハック側）の温度の経時変化
 $(\omega_o=7.0\%, D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}, P_o=1000\text{m})$

(2) 1/2の発熱量を用いた計算（初期含水比が17%のケース）

図6-20に緩衝材の初期含水比が17.0%，温度勾配水分拡散係数 D_r が $0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ ，岩盤の初期圧力水頭 P_0 が1000mで岩盤の透水性が異なる7ケースの緩衝材の含水比の経時変化を示す。出力点は緩衝材の最も内側のオーバーパックに接している部分である。この場合も初期含水比が7.0%の時と同様に，固有透過度が 10^{-20}m^2 の場合のみ再冠水時間が長くなっている。また，図6-21には初期圧力水頭が0mのケースの結果を示す。初期含水比が7%のケースと比べると再冠水時間は若干短くなっており，岩盤の初期圧力水頭の違いおよび岩盤の透水性の違いによる再冠水時間の差も小さくなっている。

図6-22，6-23には同じケースにおける岩盤の緩衝材に接している部分の圧力水頭の経時変化を示す。緩衝材の初期含水比が7.0%の場合と同様に，圧力水頭が変動するケースでは圧力水頭は初期値より低下している。また，岩盤の固有透過度が小さくなるにつれて圧力水頭が初期値より小さくなる期間が長くなり，特に固有透過度が 10^{-20}m^2 のケースは値もかなり小さくかつ期間も長くなっている。しかし，緩衝材の初期含水比が7.0%の場合に比べると，負圧の値は小さく期間も短くなっている。

図6-24～6-27には岩盤の初期圧力水頭が1000mのケースの D_r の違いによる含水比の経時変化の比較を示す。 D_r の値が大きくなるにつれて再冠水時間が長くなる傾向は緩衝材の初期含水比が7%のケースと同じである。岩盤の圧力水頭が1000mで固定で， D_r が $0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ の時が再冠水時間が最も短く約2年である。一方， D_r として室内試験で同定された値（ $7.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ ）を用いた場合は，岩盤の初期圧力水頭が1000.0mで固定の時は再冠水時間が約3年，岩盤の固有透過度が 10^{-20}m^2 の時が約6年である。初期圧力水頭が0.0mの時はそれぞれ約80年，約500年となった。

図6-28，6-29には図6-20，6-21と同ケースにおける緩衝材内側の温度の経時変化を示す。また，図6-30～6-33には D_r の違いによる緩衝材内側の温度の経時変化の違いを，図6-34，6-35には緩衝材の外側の温度の経時変化を示す。温度の経時変化の傾向は緩衝材の初期含水比が7.0%の時と全く同じである。すなわち，緩衝材の外側の温度に関しては，岩盤の透水性が小さいほど，あるいは D_r が大きいほど，最高温度は高くなっている。また，緩衝材の外側の温度に関しては，全てのケースで同じになっている。

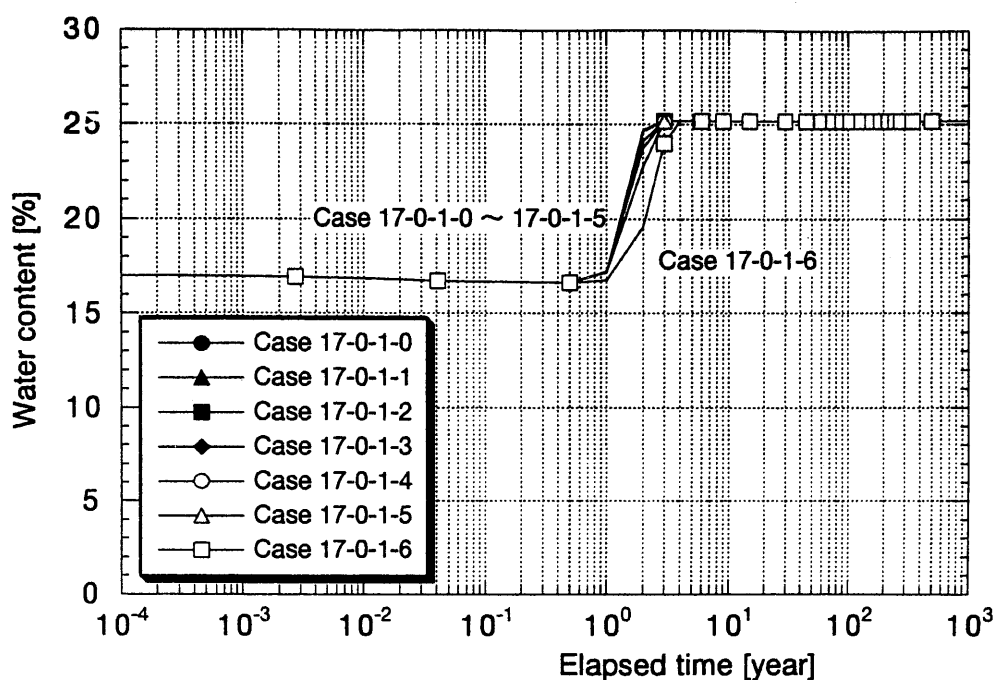


図6-20 緩衝材の内側（オハ°ハ°ツク側）の含水比の経時変化

($\omega_o=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P_o=1000\text{m}$)

Case 17-0-1-0 : $P=\text{Fix}$, Case 17-0-1-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 17-0-1-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 17-0-1-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$
 Case 17-0-1-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 17-0-1-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 17-0-1-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

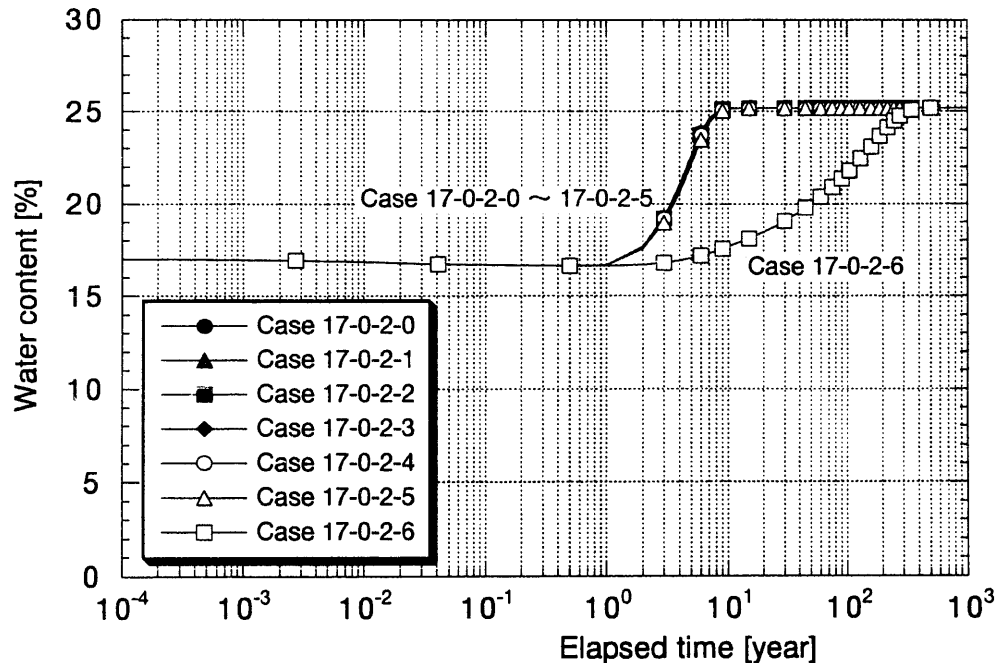


図6-21 緩衝材の内側（オハ°ハ°ツク側）の含水比の経時変化

($\omega_o=17.0\%$, $D_T=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P_o=0\text{m}$)

Case 17-0-2-0 : $P=\text{Fix}$, Case 17-0-2-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 17-0-2-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 17-0-2-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$
 Case 17-0-2-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 17-0-2-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 17-0-2-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

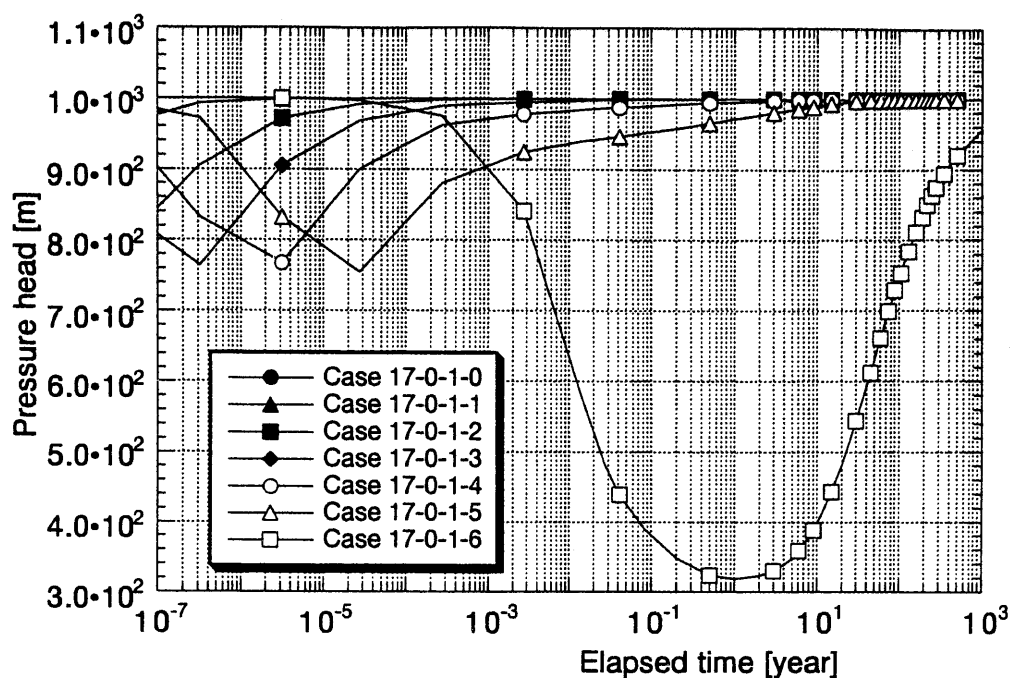


図6-22 岩盤内の緩衝材に接する部分の圧力水頭の経時変化

($\omega_o=17.0\%$, $D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P_o=1000\text{m}$)

Case 17-0-1-0 : $P=\text{Fix}$, Case 17-0-1-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 17-0-1-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 17-0-1-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$

Case 17-0-1-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 17-0-1-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 17-0-1-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

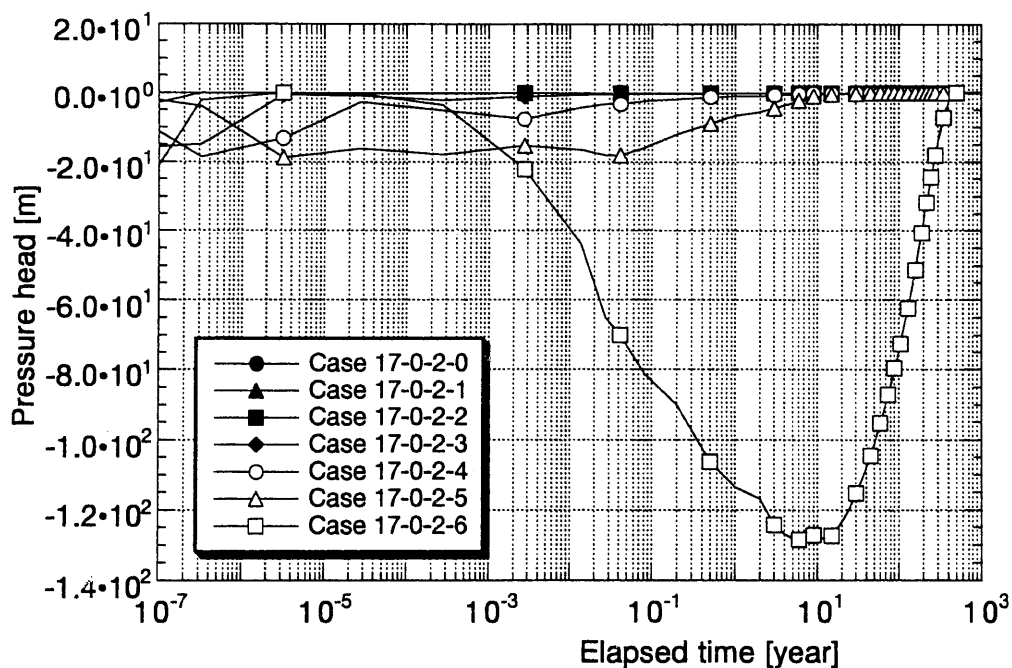
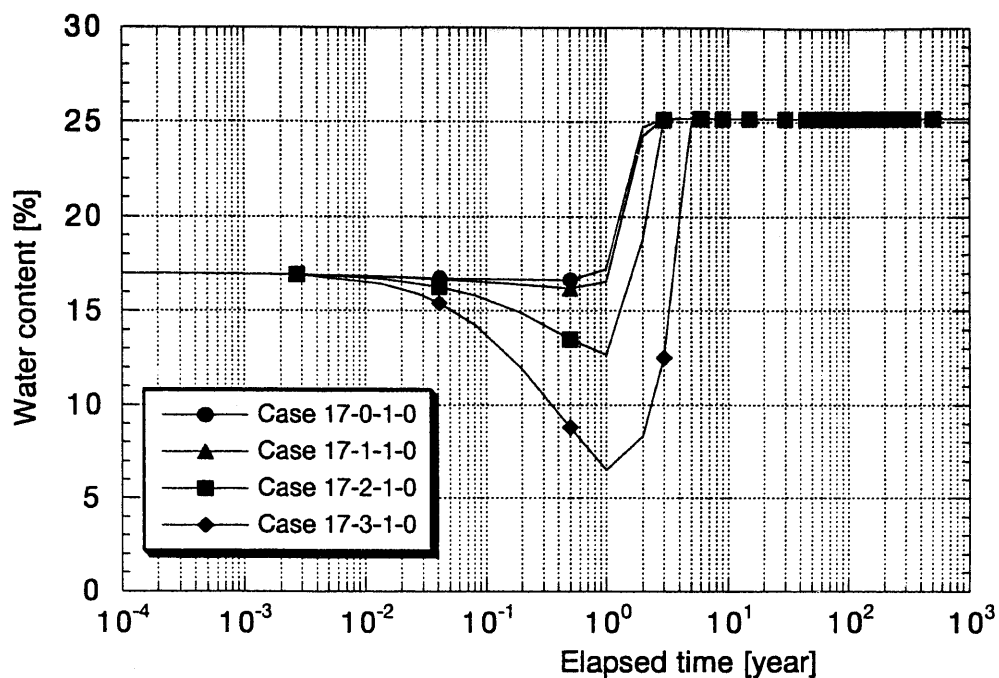
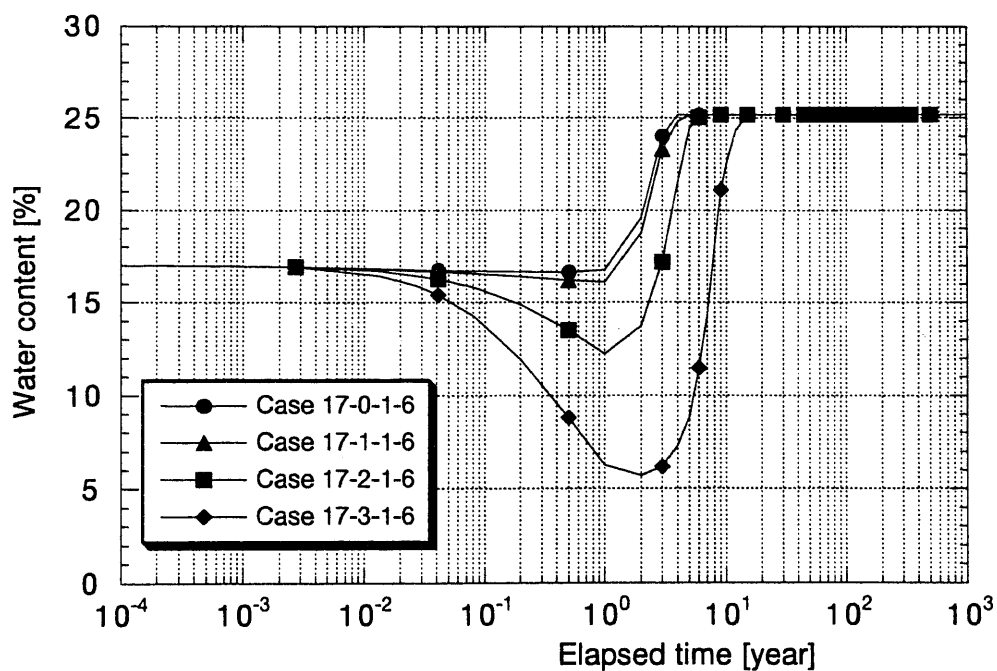


図6-23 岩盤内の緩衝材に接する部分の圧力水頭の経時変化

($\omega_o=17.0\%$, $D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P_o=0\text{m}$)

Case 17-0-2-0 : $P=\text{Fix}$, Case 17-0-2-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 17-0-2-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 17-0-2-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$

Case 17-0-2-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 17-0-2-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 17-0-2-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

図6-24 緩衝材の内側（オハ⁺ハ⁺ック側）の含水比の経時変化($\omega_o=17.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $P=\text{Fix}$)Case 17-0-1-0 : $D_T=0.0 \times 10^0 \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 17-1-1-0 : $D_T=1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ Case 17-2-1-0 : $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 17-3-1-0 : $D_T=2.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ 図6-25 緩衝材の内側（オハ⁺ハ⁺ック側）の含水比の経時変化($\omega_o=17.0\%$, $P_o=1000\text{m}$, $K=10^{-20}\text{m}^2$)Case 17-0-1-6 : $D_T=0.0 \times 10^0 \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 17-1-1-6 : $D_T=1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ Case 17-2-1-6 : $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 17-3-1-6 : $D_T=2.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

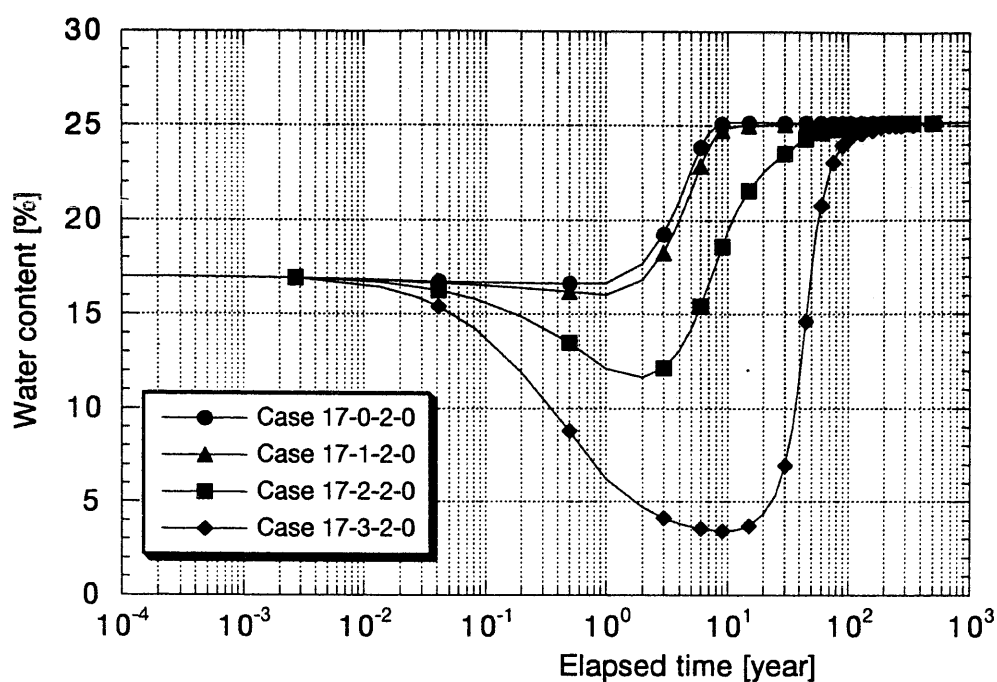


図6-26 緩衝材の内側（オーバーハック側）の含水比の経時変化
 $(\omega_o=17.0\%, P_o=0\text{m}, P=\text{Fix})$

Case 17-0-2-0 : $D_T=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 17-1-2-0 : $D_T=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

Case 17-2-2-0 : $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 17-3-2-0 : $D_T=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

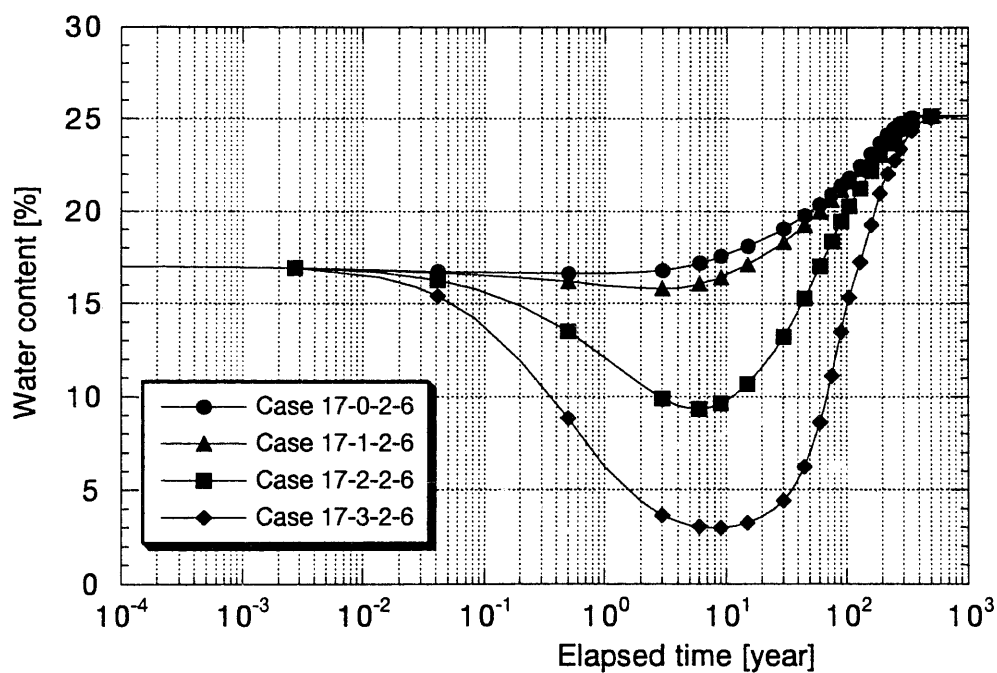


図6-27 緩衝材の内側（オーバーハック側）の含水比の経時変化
 $(\omega_o=17.0\%, P_o=0\text{m}, K=10^{-20} \text{ m}^2)$

Case 17-0-2-6 : $D_T=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 17-1-2-6 : $D_T=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

Case 17-2-2-6 : $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, Case 17-3-2-6 : $D_T=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$

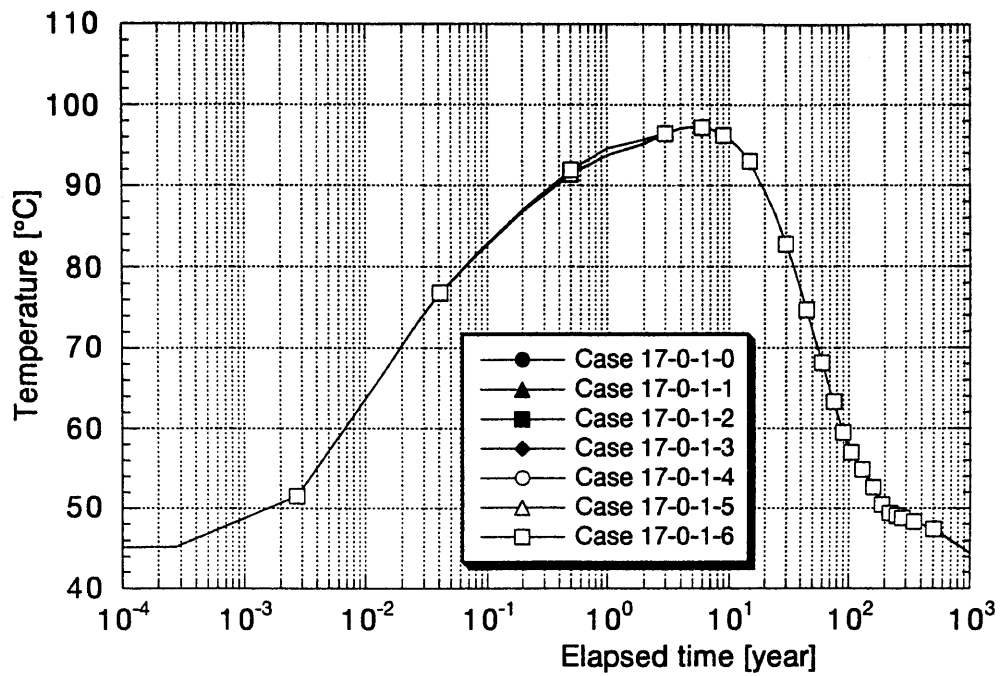


図6-28 緩衝材の内側（オーバーハック側）の温度の経時変化

 $(\omega_o=17.0\%, D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P_o=1000\text{m})$

Case 17-0-1-0 : $P=\text{Fix}$, Case 17-0-1-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 17-0-1-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 17-0-1-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$
 Case 17-0-1-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 17-0-1-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 17-0-1-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

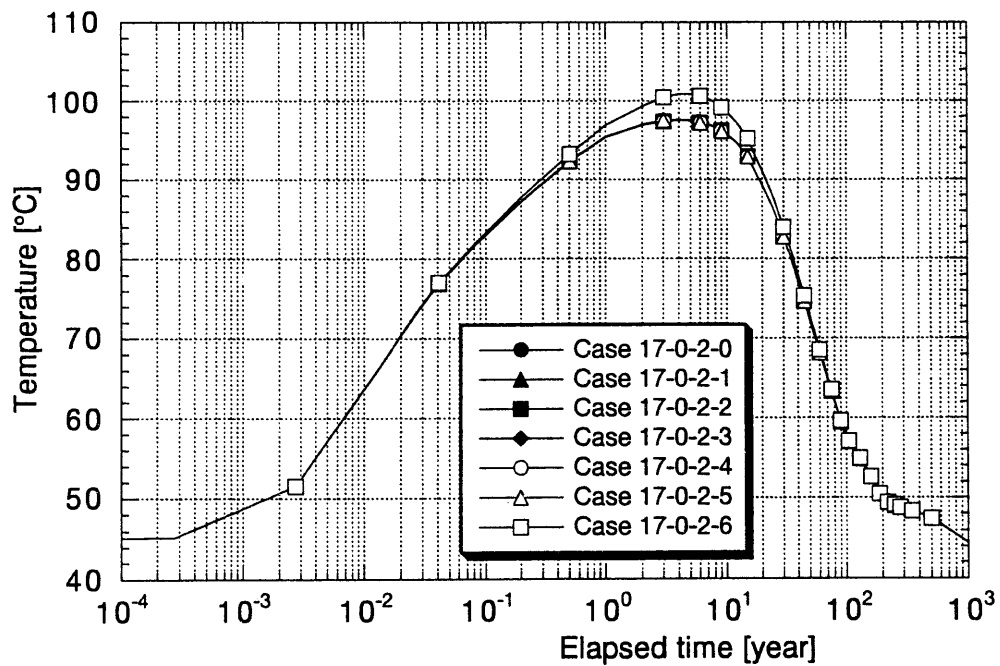


図6-29 緩衝材の内側（オーバーハック側）の温度の経時変化

 $(\omega_o=17.0\%, D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}, P_o=0\text{m})$

Case 17-0-2-0 : $P=\text{Fix}$, Case 17-0-2-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 17-0-2-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 17-0-2-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$
 Case 17-0-2-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 17-0-2-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 17-0-2-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

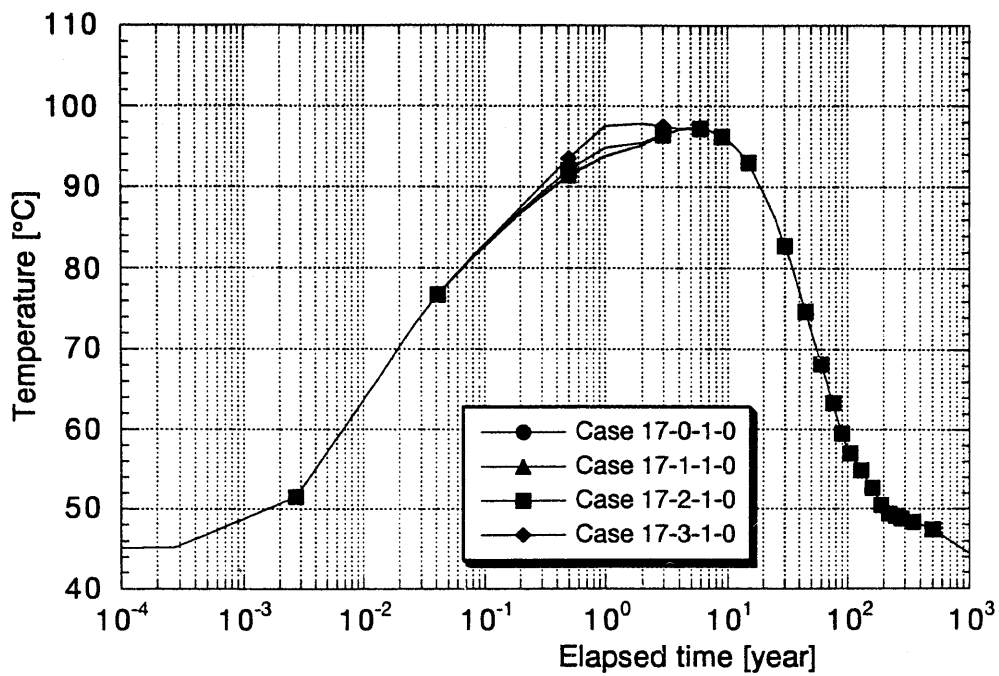


図6-30 緩衝材の内側（オーバーハック側）の温度の経時変化

 $(\omega_o=17.0\%, P_o=1000\text{m}, P=\text{Fix})$

 Case 17-0-1-0 : $D_T=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, Case 17-1-1-0 : $D_T=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$

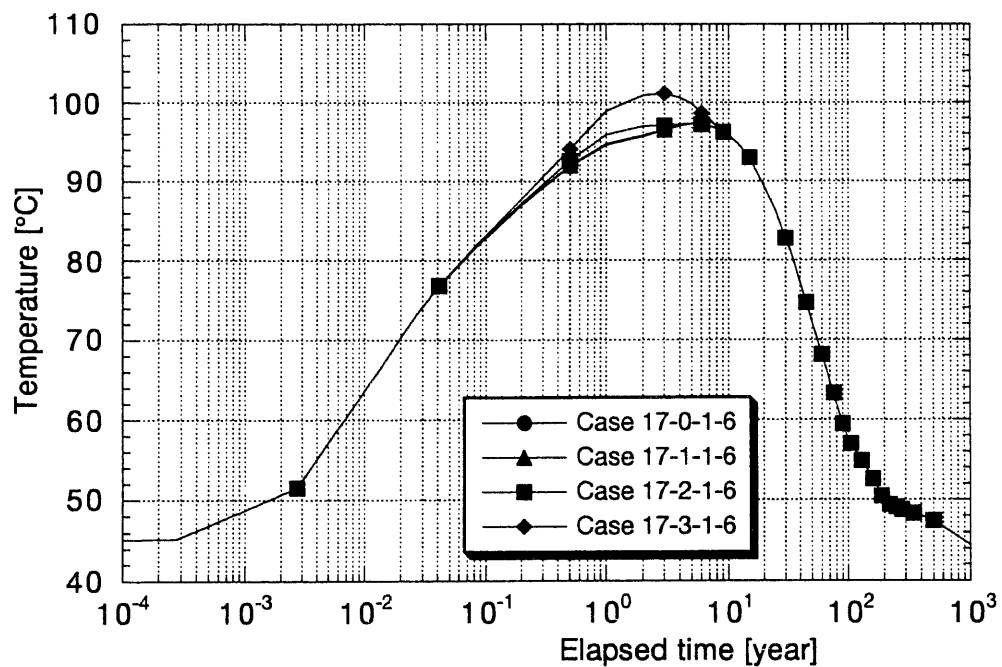
 Case 17-2-1-0 : $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, Case 17-3-1-0 : $D_T=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$


図6-31 緩衝材の内側（オーバーハック側）の温度の経時変化

 $(\omega_o=17.0\%, P_o=1000\text{m}, K=10^{-20}\text{m}^2)$

 Case 17-0-1-6 : $D_T=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, Case 17-1-1-6 : $D_T=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$

 Case 17-2-1-6 : $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, Case 17-3-1-6 : $D_T=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$

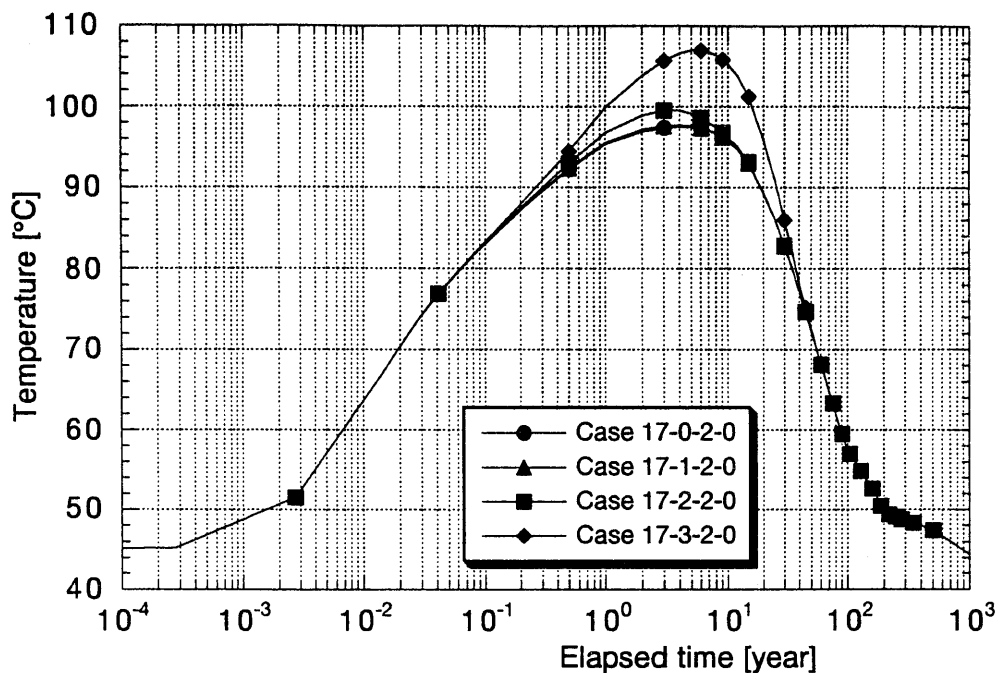


図6-32 緩衝材の内側（オハ・ハック側）の温度の経時変化

($\omega_o=17.0\%$, $P_o=0m$, $P=Fix$)

Case 17-0-2-0 : $D_T=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, Case 17-1-2-0 : $D_T=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$

Case 17-2-2-0 : $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, Case 17-3-2-0 : $D_T=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$

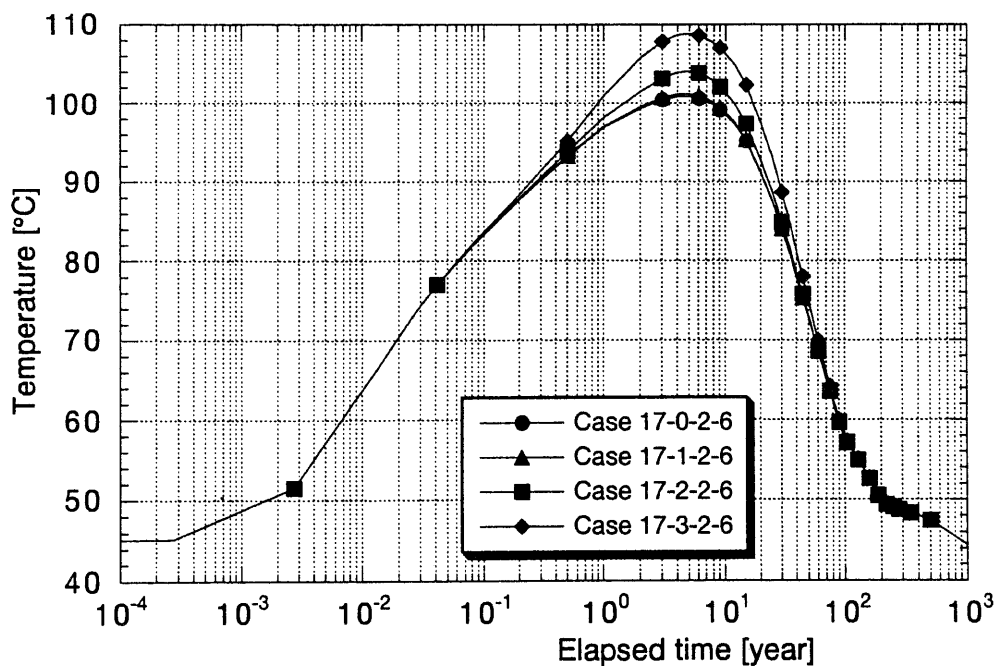


図6-33 緩衝材の内側（オハ・ハック側）の温度の経時変化

($\omega_o=17.0\%$, $P_o=0m$, $K=10^{-20} \text{ m}^2$)

Case 17-0-2-6 : $D_T=0.0 \times 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, Case 17-1-2-6 : $D_T=1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$

Case 17-2-2-6 : $D_T=7.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$, Case 17-3-2-6 : $D_T=2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}^\circ\text{C}$

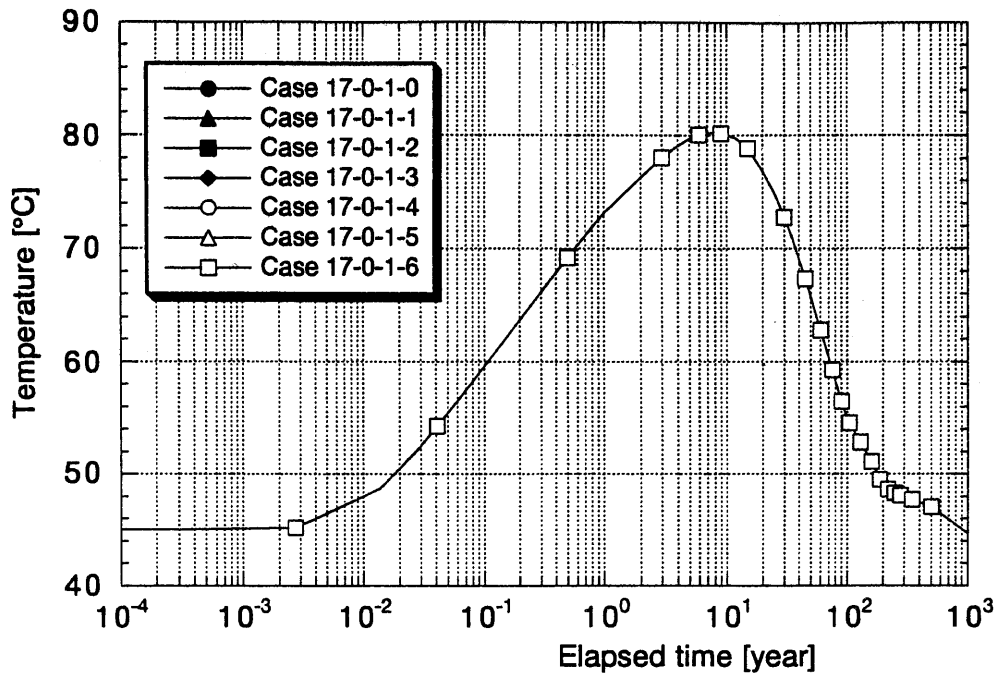


図6-34 緩衝材の外側（岩盤側）の温度の経時変化

($\omega_o=17.0\%$, $D_r=0.0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P_o=1000\text{m}$)

Case 17-0-1-0 : $P=\text{Fix}$, Case 17-0-1-1 : $K=10^{-13}\text{m}^2$, Case 17-0-1-2 : $K=10^{-14}\text{m}^2$, Case 17-0-1-3 : $K=10^{-15}\text{m}^2$
 Case 17-0-1-4 : $K=10^{-16}\text{m}^2$, Case 17-0-1-5 : $K=10^{-17}\text{m}^2$, Case 17-0-1-6 : $K=10^{-20}\text{m}^2$

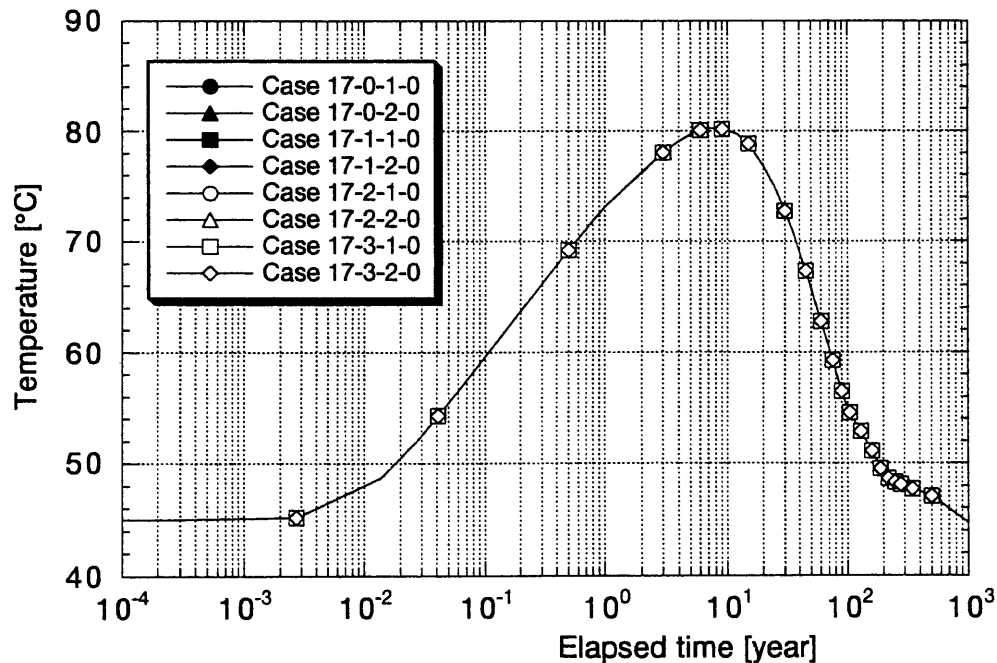


図6-35 緩衝材の外側（岩盤側）の温度の経時変化

($\omega_o=17.0\%$)

Case 17-0-1-0 : $D_r=0.0 \times 10^0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P=1000\text{m}$, Case 17-0-2-0 : $D_r=0.0 \times 10^0\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P=0\text{m}$
 Case 17-1-1-0 : $D_r=1.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P=1000\text{m}$, Case 17-1-2-0 : $D_r=1.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P=0\text{m}$
 Case 17-2-1-0 : $D_r=7.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P=1000\text{m}$, Case 17-2-2-0 : $D_r=7.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P=0\text{m}$
 Case 17-3-1-0 : $D_r=2.0 \times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P=1000\text{m}$, Case 17-3-2-0 : $D_r=2.0 \times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$, $P=0\text{m}$

6.1.3 まとめ

以上の検討結果をまとめると以下のようなになる。

- ・岩盤の固有透過度が 10^{-15}m^2 程度の場合、緩衝材の初期含水比が再冠水時間に与える影響は小さく岩盤の圧力水頭が支配的となる。圧力水頭が0～1000mの場合、再冠水時間は約3～80年となる。
- ・再冠水時間は岩盤の圧力水頭に大きく影響を受けるが、岩盤の透水性が固有透過度で $10^{-13} \sim 10^{-18} \text{m}^2$ の範囲ではその透水性に影響を受けない。
- ・温度勾配による水分移動を考慮しない場合に比べ考慮することにより再冠水時間は長くなる。長くなる割合は岩盤の圧力水頭が小さいほど大きくなる。圧力水頭が1000mの場合は約2倍であるが、0mの場合は約10倍となる。
- ・岩盤に亀裂が少なく、岩盤の透水性が基質部の固有透過度と同程度となる場合は、上記に比べ再冠水時間はさらに長くなる。また、緩衝材の初期飽和度にも再冠水時間は依存してくる。この場合も再冠水時間は岩盤内の圧力水頭に最も大きな影響を受け、その割合は岩盤の透水性が大きい場合に比べさらに大きくなる。岩盤内の圧力水頭が高い場合は岩盤の透水性が高い場合の再冠水時間の2倍程度である、圧力水頭が低い場合は再冠水時間が500～1000年程度となることも予想される。

6.2 二次元軸対称モデルを用いた検討

6.2.1 解析の目的

前節において簡易モデルを用いてニアフィールドの連成解析を行ない、緩衝材の再冠水時間等に関して概略的な検討を行なった。ここでは、より実的なモデルを用いてニアフィールドの挙動に関して評価を行なう。

6.2.2 解析条件

(1) 解析物性値

解析に用いた物性値は表6-2の通りである。緩衝材はケイ砂混合材（30wt%），埋め戻し材はベントナイト混合材（ベントナイトと骨材（ケイ砂およびズリ）の混合材，ベントナイト混合率15wt%）とした。緩衝材の弾性係数 [MPa]，比熱 [kJ/kg/K]および熱伝導係数[W/m/K]は次式のように含水比の関数として与えた（鈴木ほか，1999）。

$$\text{弾性係数} : E = 84.34 - 3.744\omega \quad (6-1)$$

$$\text{比熱} : c = \frac{34.1 + 4.18\omega}{100 + \omega} \quad (6-2)$$

$$\text{熱伝導率} : \lambda = 4.44 \times 10^{-1} + 1.38 \times 10^{-2}\omega + 6.14 \times 10^{-3}\omega^2 - 1.69 \times 10^{-4}\omega^3 \quad (6-3)$$

緩衝材の水分拡散係数，不飽和水分特性および温度勾配による水分移動に関する係数については，第3章で設定されたものを用いた。

埋め戻し材の不飽和浸透特性に関しては次の様に設定する。ベントナイト混合材の水分ポテンシャル（サクション）はモンモリロナイトの含有率に依存すると考えられるため，含水比を(6-4)式に示すモンモリロナイトの含有率で正規化した含水比

（ ω_{mon} [%]，Normalized water content）で整理すると水分ポテンシャル ψ [Pa]と ω_{mon} の関係は(6-5)式で表せる（鈴木ほか，1996）。

$$\omega_{mon} = \omega / R_{mon} \quad (6-4)$$

$$\begin{aligned} \psi = & \rho g [(-1.37 \times 10^4 T + 1.23 \times 10^6) \\ & \times \exp(-9.5 \times 10^{-3} (\omega_{mon} R_{mon})^2) + 3.5 \times 10^5 (\omega_{mon} R_{mon})^{-0.95}] \end{aligned} \quad (6-5)$$

ここで， ω は含水比[%]， R_{mon} はモンモリロナイト含有率[-]， T は温度[°C]， ρ は水の密度[g/cm³]， g は重力加速度[cm/s²]である。

そこで，(6-4)，(6-5)式を用い，ベントナイト混合率15wt%の埋め戻し材のサクションと含水比の関係を算出する。そして，van Genuchtenによる関数モデル（van Genuchten, M., 1980）を適用し，埋め戻し材の不飽和水分特性曲線を同定し，同モデルから埋め戻し材の不飽和透水係数を設定する。van Genuchtenによると有効飽和度 S_e および不飽和透水係数 k は次式で表される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \{1 + |\alpha \psi|^n\}^{-m} \quad (\alpha > 0) \quad (6-6)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (0 < m < 1, n > 1) \quad (6-7)$$

$$k_r = \frac{k}{k_s} = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (6-8)$$

ここで、 θ は体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小含水量、 k_r は比透水係数、 k_s は飽和透水係数、 α および n は同モデルのパラメータである。各パラメータは以下のよう設定した。

$$\theta_s = 0.333, \theta_r = 0.000, \alpha = 1.5 \times 10^{-4} [\text{1/cm}], n = 3.0 \quad (6-9)$$

図6-36には(6-4)、(6-5)式を用い算出されたベントナイト混合材料のサクシオンとvan Genuchtenによる関数モデル(VG model)により得られた不飽和浸透特性を示す。また、埋め戻し材の熱物性に関しては、緩衝材と同じものを使用し、岩盤の不飽和浸透特性に関しては、図6-37に示すものを用いた。(Watanabe, K., 1991)

表6-2 解析に用いた物性値一覧

物性値	ガラス固化体	オーバーハック	緩衝材	埋め戻し材	岩盤
弾性係数 [MPa]	8.2×10^4	2.0×10^5	(6-1) 式	3.0	3.7×10^4
ポアソン比 [-]	0.3	0.3	0.3	0.4	0.25
乾燥密度 [g/cm ³]	2.80	7.80	1.90	2.10	2.67
固有透過度 [m ²]	1.0×10^{-30}	1.0×10^{-30}	4.0×10^{-20}	6.0×10^{-19}	1.0×10^{-15}
比熱 [kJ/kg/K]	0.96	0.46	(6-2) 式	(6-2) 式	1.0
熱伝導率 [W/m/K]	1.2	53.0	(6-3) 式	(6-3) 式	2.8
熱膨張係数 [1/K]	1.0×10^{-6}	1.64×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

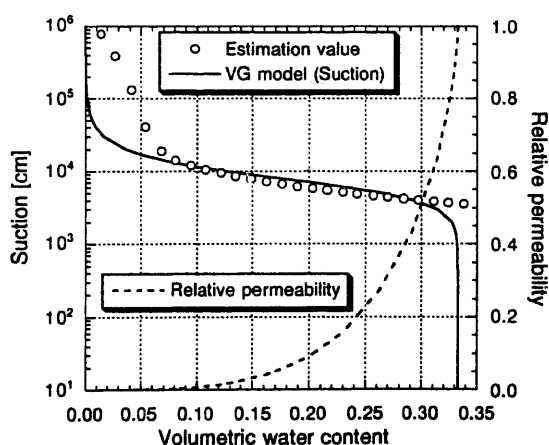


図6-36 埋め戻し材の不飽和浸透特性

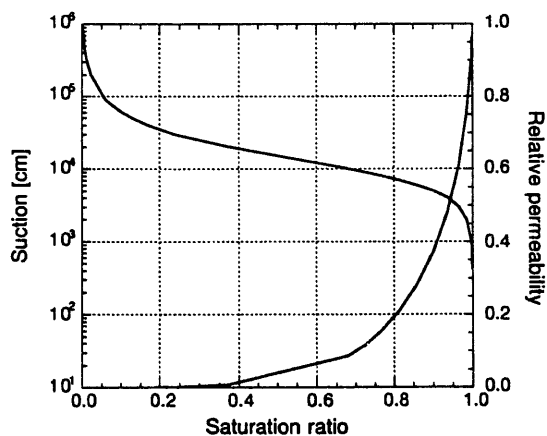


図6-37 岩盤の不飽和浸透特性

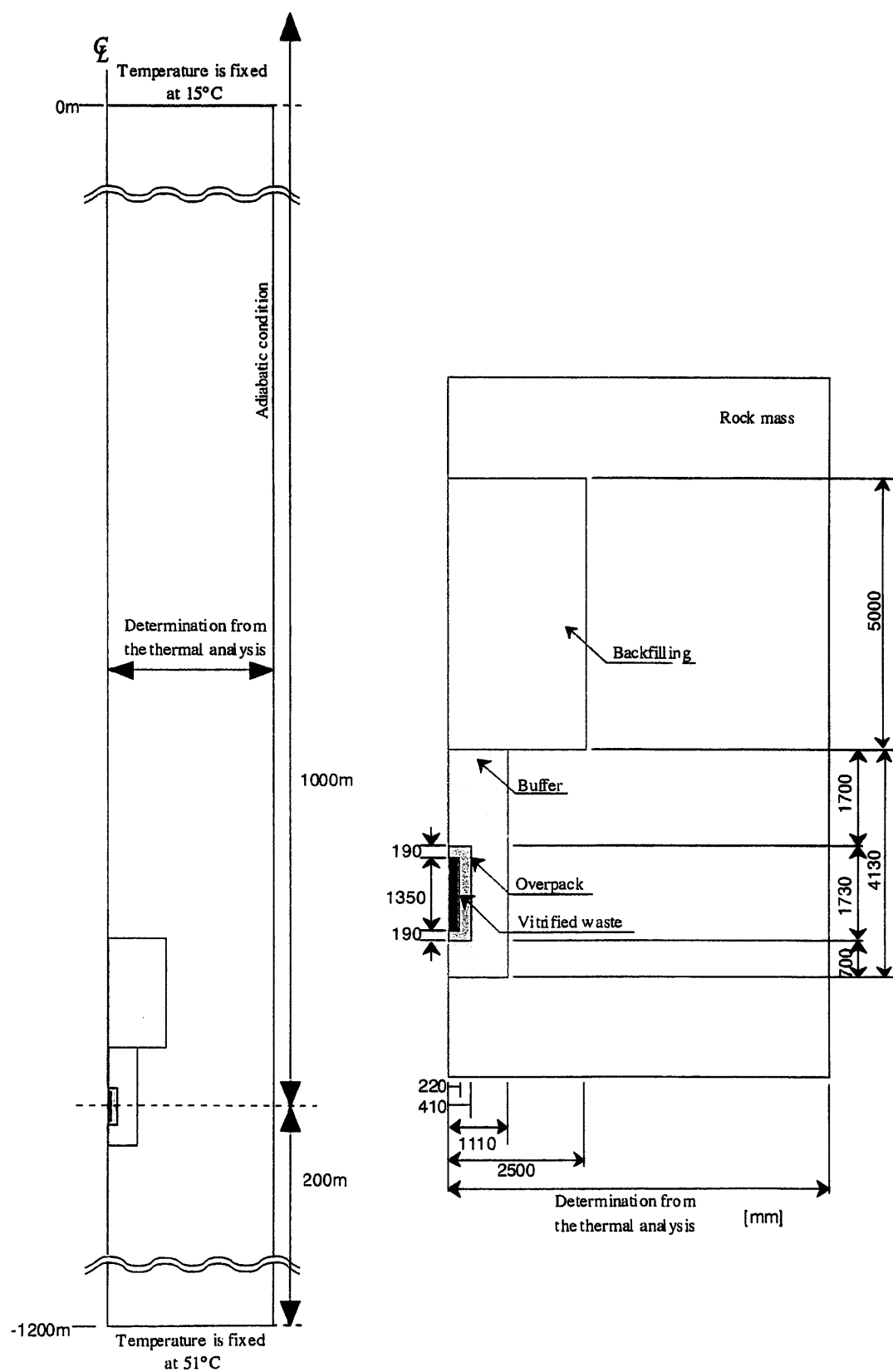


図6-38 解析モデルの概念図

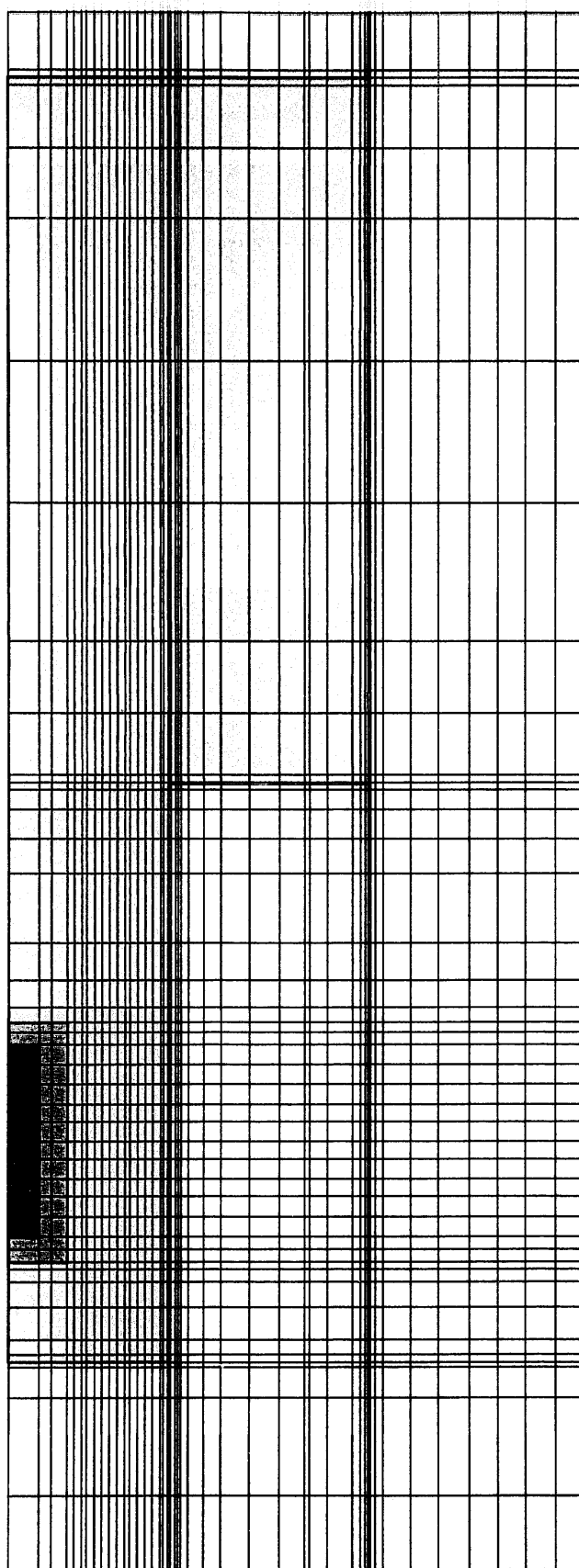


図6-39 処分孔周辺のメッシュ図

(2) 解析モデル

解析は処分孔豎置方式について軸対称モデルを用い実施する。モデルの概念図を図6-38に示す。また、処分孔周辺のメッシュ図を図6-39に示す。解析モデルは処分深度を1000mとし、廃棄体の埋設密度に関しては同モデルにおいて緩衝材および埋め戻し材を初期含水比として熱解析を実施し、緩衝材内の最高温度が100℃以下になるように設定する。すなわちモデル領域の幅に関しては熱解析から設定する。

(3) 初期条件および境界条件

熱的初期条件としては、地表面の温度を15℃とし、深度方向に3℃/100mの温度勾配を与えた。熱的境界条件については、地表面を15℃、モデル底面を51℃の温度固定境界とし、側面は断熱境界とした。

水理的初期条件としては、緩衝材の初期含水比は7.0%、埋戻し材の初期含水比は10.0%とした。また、岩盤に関しては表6-3のようなケースを設定する。

表6-3 解析ケース

	Case01-1	Case01-2	Case02	Case03-1	Case03-2
水理的 初期条件	間隙水圧0.0MPa		地表面に地下水面のある静水圧状態	地表面に地下水面のある静水圧状態において処分坑道および処分孔の掘削を行ない、掘削5年後に廃棄体を処分	
岩盤の 固有透過度 [m ²]	1.0×10^{-15}	1.0×10^{-20}	1.0×10^{-15}	1.0×10^{-15}	1.0×10^{-20}

(4) 廃棄体の発熱特性

本解析で使用する廃棄体の発熱量の経時変化を図6-40に示す。これは中間貯蔵期間を50年とした場合の発熱量に相当する。発熱量は、ガラス固化体に相当する各要素に単位体積当たりの発熱量を与えた。

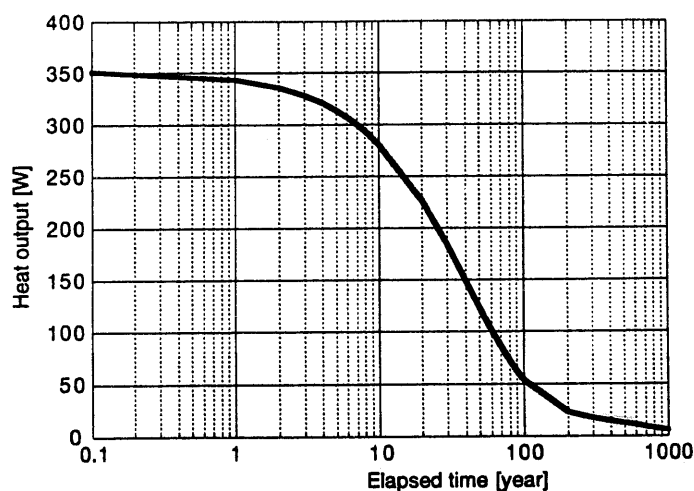


図6-40 ガラス固化体の発熱量の経時変化

6.2.3 解析結果

(1) 結果の比較点

解析結果は、図6-41に示す出力点および出力ラインで比較した。(A)は温度および圧力水頭、(B)は含水比に関する出力点である。(A)の(1)から(7)は出力ライン上の点で、(1)は廃棄体中心、(2)は緩衝材の内側部分、(3)は緩衝材の中央部分、(4)は緩衝材の外側部分、(5)、(6)は岩盤内で、それぞれ緩衝材外側から5.0cm、1.0mの距離の点の部分である。また、(7)はモデルの外端部の点である。(8)～(10)は軸対称の中心線上で、(8)はオーバーパックの下部、(9)はオーバーパックの上部、(10)は埋め戻し材との境界部である。(B)については、(a)から(k)が緩衝材内部、(l)が埋め戻し材内部の点である。

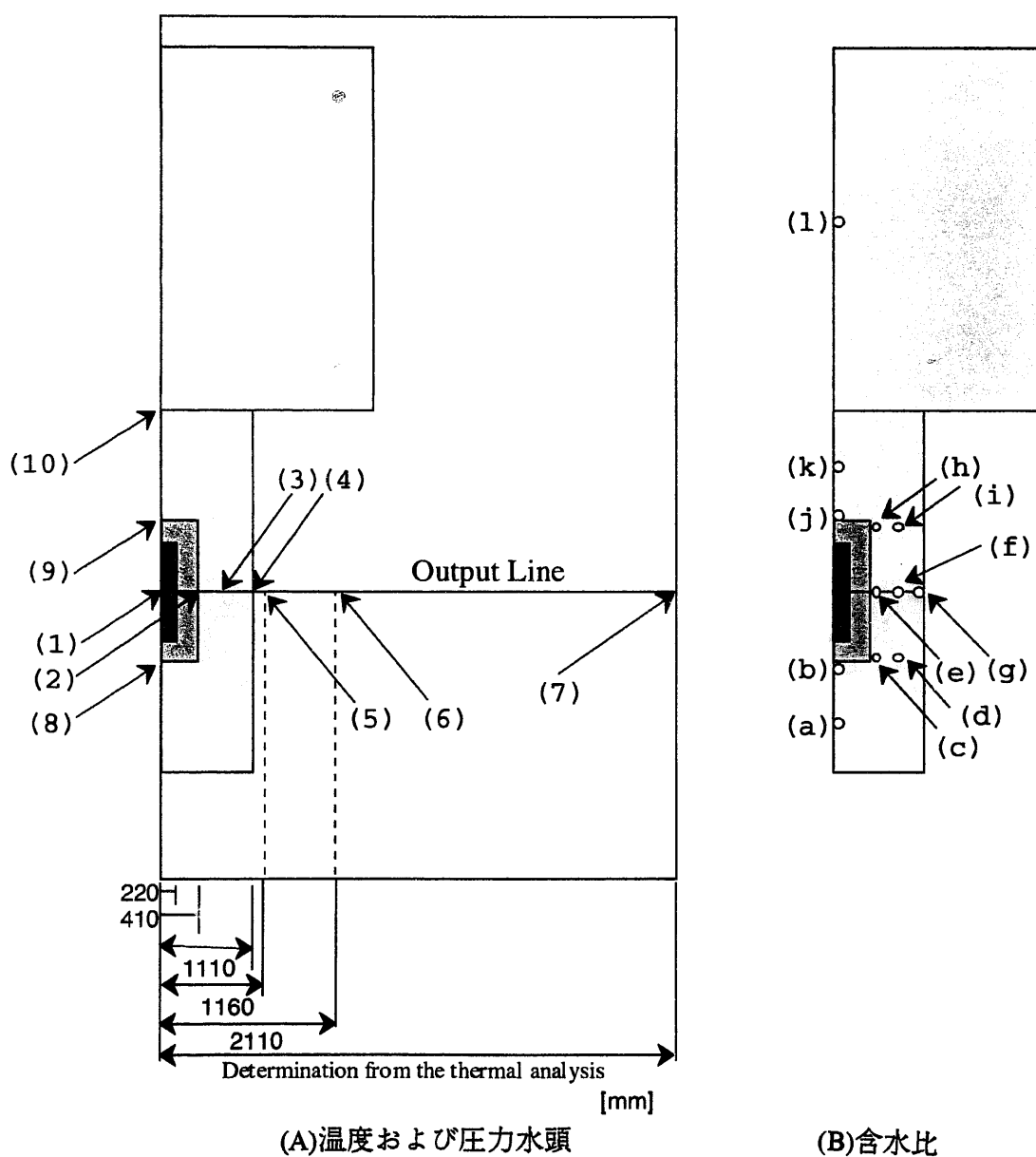


図6-41 解析結果の出力ラインおよび出力点

(2) 熱解析結果

図6-42にモデルの横幅を4.0mとしたときの、各出力点上の温度の経時変化を示す。横幅を4.0mとした場合、緩衝材の内側の点(2)の最高温度は約100℃となった。よって、連成解析におけるモデルの横幅は4.0mとすることとした。このときの廃棄体一本当たりの専有面積は約50m²となる。

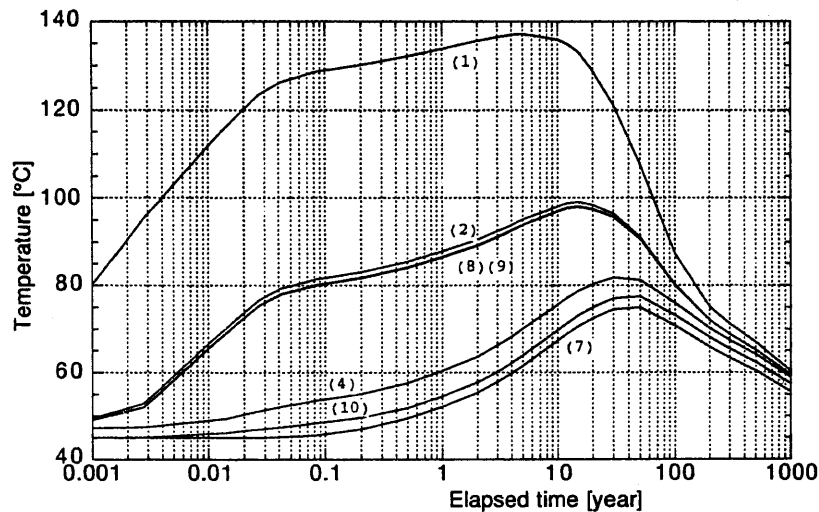


図6-42 熱解析の結果（モデルの横幅4.0m）

(3) 連成解析結果

図6-43には処分坑道掘削を想定したケース（Case03-1, Case03-2）の処分坑道掘削前後の出力ライン上の圧力水頭の経時変化を示す。(a)はCase03-1, (b)はCase03-2である。岩盤の透水性の違いにより水压低下量は大きく異なっている。Case03-1の方が透水性が大きいため、水压低下量は大きくなっている。図6-44には掘削から5年が経過した時点での岩盤内の圧力水頭分布を示す。Case03-1の方がCase03-2に比べて、圧力低下が大きく広範囲に渡って水压が低下している様子がわかる。図6-45には廃棄体処分後の出力ライン上の圧力水頭を示す。(a)は処分直後の水压分布, (b), (c), (d)はそれぞれ処分後1年, 10年, 100年経過した時点での水压分布である。処分直後はCase02およびCase03-2における岩盤内は高い圧力となっているが、その他のケースは低い圧力である。処分坑道掘削を想定したケースに関しては、透水性の高い場合（Case03-1）は処分後の岩盤内の圧力はほぼ均一で、時間とともに上昇している。一方、透水性の低い場合は、緩衝材近傍に関しては時間とともに圧力水頭が上昇しているが、さらに外側の部分に関しては、緩衝材内に浸潤していった水分を補うだけの地下水の供給が無いため、圧力水頭は初期より低下している。また、岩盤の透水性が小さくさらに初期の圧力水頭を0.0mとした場合は、岩盤内の圧力水頭は時間とともに低下しており、100年後でも負圧のままである。

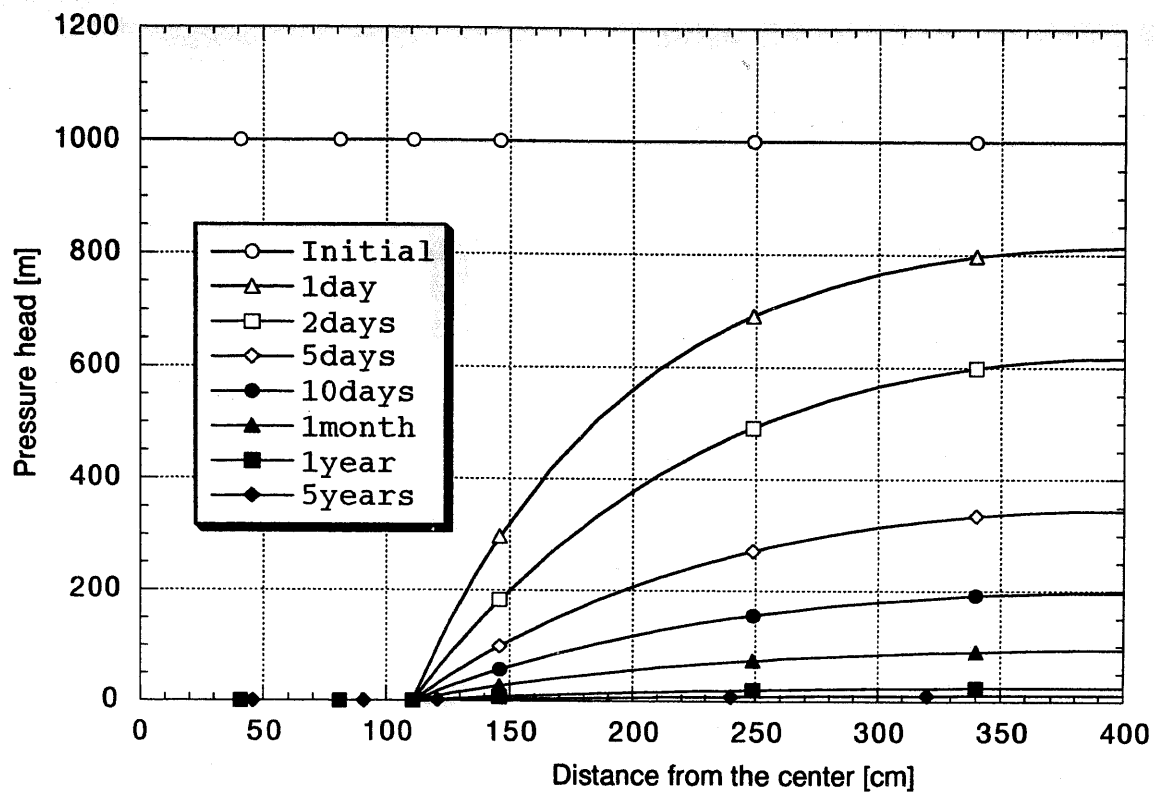
図6-46にはCase01-1における廃棄体処分後の各点における緩衝材の含水比の経時変化を示す。(a)は出力ライン上の点, (b)はオーバーパックの側面部, (c)は解析モデルの対称軸上の出力点の含水比と点(e)である。出力ライン上の点を比較する

と、緩衝材の外側は早期に飽和となっており、内部に関しては温度の影響で一時期初期より含水比が低下しているが50年程度で飽和となっていることがわかる。また、(b)における各点を比較すると、高さ方向にはそれほど大きな差は無いが、若干、下部の方が浸潤が早くなっている。対称軸上の点をみると、埋め戻し材内の点(i)が最も早く約10年程度で飽和となっており、その他では点(j)が最も遅くまで含水比が低い状態が続いているが、最終的に飽和となるのはほぼ同じになっている。図6-47にはCase01-2における含水比の経時変化を示す。このケースの場合、1000年後でも緩衝材は飽和とならず、緩衝材が飽和となるのにかなりの時間を要することが考えられる。また、埋め戻し材に関しては、1000年後でも含水比は数%上昇したのみであり、飽和するのに緩衝材よりさらに多くの時間を要するものと思われる。図6-48には各ケースにおける緩衝材内の各点の含水比経時変化の比較を示す。(a)は点(e)、(b)は点(f)、(c)は点(j)である。どの点もCase02が最も早く飽和となっている。ついで、Case03-1、Case03-2、Case01-1となっており、Case01-2が最も遅くなっている。これは、岩盤内の圧力水頭が高い順となっている。点(j)の位置が飽和に達するまでに最も多くの時間を要しており、この点の位置が飽和になった時間を緩衝材の再冠水時間とすると、各ケースの再冠水時間は表6-4のようになる。Case01-2を除けば全て50年以内となっている。図6-49には埋め戻し材内の含水比の経時変化を示す。Case01-2を除けば、全て緩衝材内より飽和に達するまでの時間は短くなっている。図6-50、6-51には廃棄体処分後の緩衝材内の含水比分布を示す。それぞれ(a)は処分後1年、(b)は処分後5年経過した時点である。処分後1年経過した時点では両者に大きな差はないが、その後はCase03-1の方が浸潤が早くなっており、緩衝材内の含水比は高くなっている。しかし、含水比に分布状況は良く似ており、廃棄体の上部部分が緩衝材が飽和するのに最も多くの時間を要している。図6-52にはCase01-2における含水比分布を示す。このケースでは他のケースとは異なり、処分後5年後でもオーバーパック周辺の含水比は初期より低下している。そして、100年経過した時点でも緩衝材内は不飽和状態のままである。

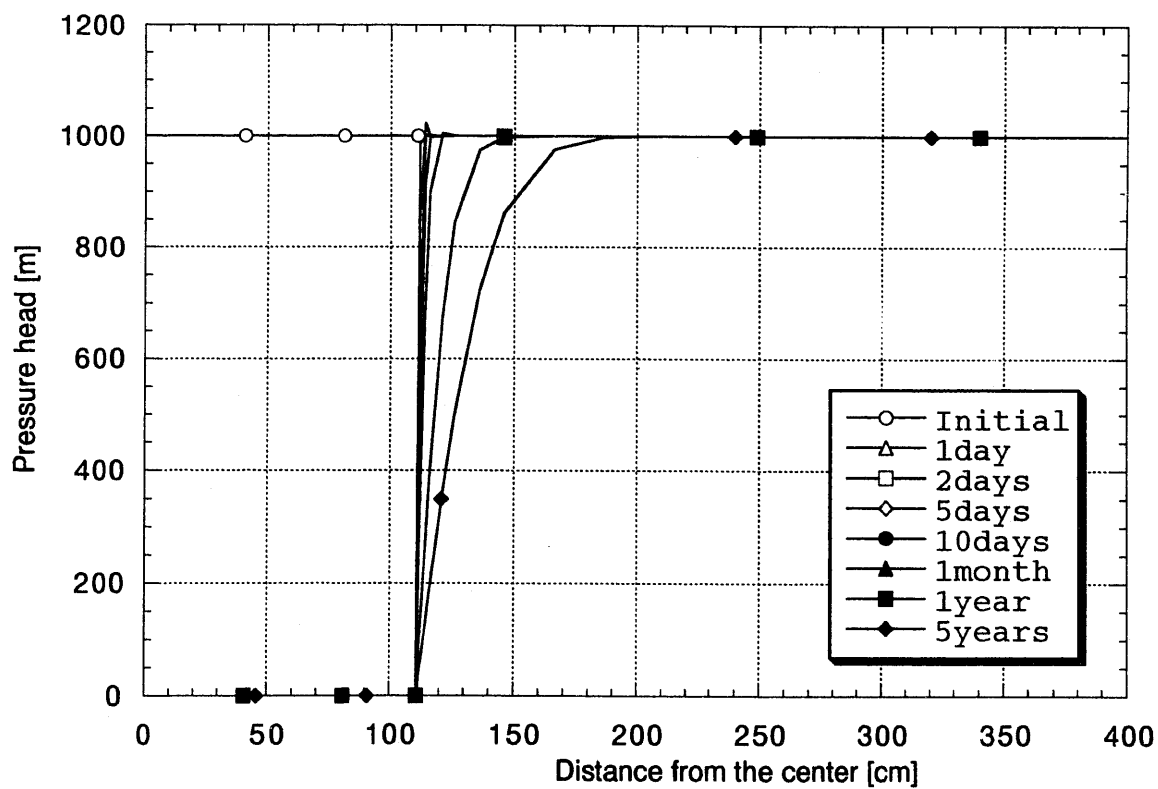
図6-53には、温度の経時変化の比較を示す。(a)が緩衝材の内側の点(2)、(b)が緩衝材の外側の点(4)であり、各図には非連成解析（熱解析）の結果も示している。熱解析の際には、緩衝材および埋め戻し材の熱物性は初期含水比の時の値を用いている。緩衝材の内側の点は、緩衝材が飽和に達するのが早いケースほど最高温度が低くなっている。また、外側の点に関しては各ケース間で大きな差異はない。しかし、緩衝材の内側の点も外側の点も連成解析の結果は全て熱解析の結果に比べて温度が低くなっている。図6-54には緩衝材の再冠水時間が最も短いCase02と最も長いCase01-2における処分後10年経過した時点での温度分布を示す。緩衝材の内側部分に関してはCase01-2の方が含水比が低いため温度が高くなっているが、緩衝材の外側部分における温度の広がり状況は両者で大きな差はない。

表6-4 各ケースにおける再冠水時間の比較

解析ケース	Case01-1	Case01-2	Case02	Case03-1	Case03-2
再冠水時間[年]	50	>1000	10	15	30

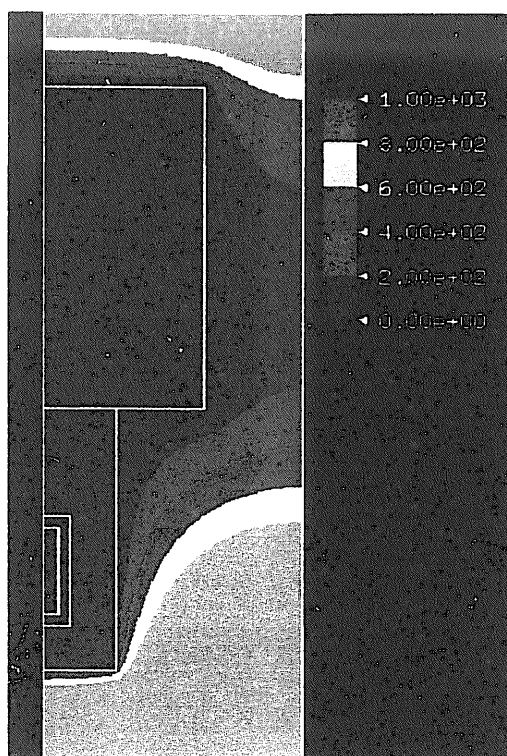


(a) Case03-1



(b) Case03-2

図6-43 処分坑道掘削後の岩盤内の圧力水頭変化

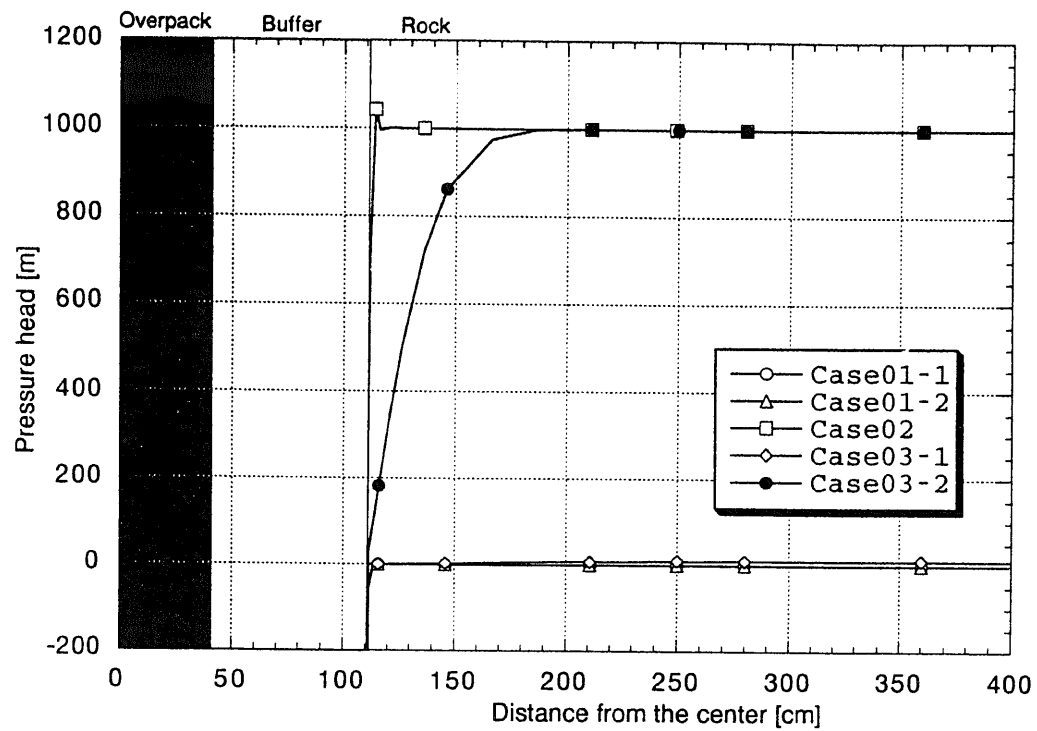


(a) Case03 - 1

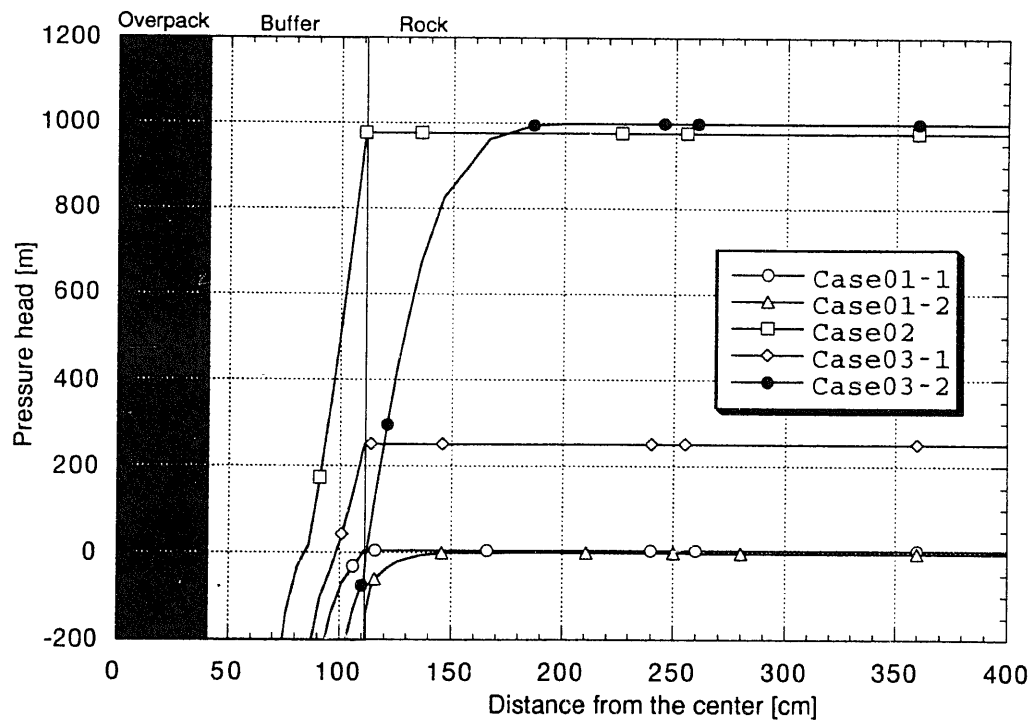


(b) Case03 - 2

図6-44 処分坑道掘削後の岩盤内の圧力水頭 [cm] 分布（掘削後5年）

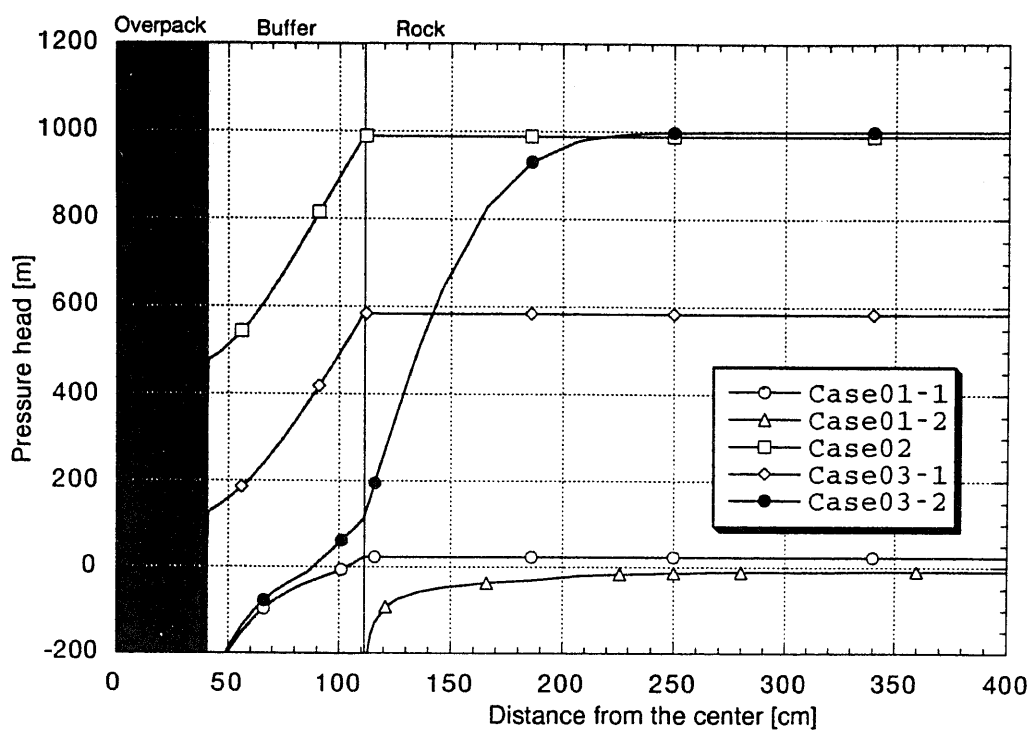


(a) 処分直後

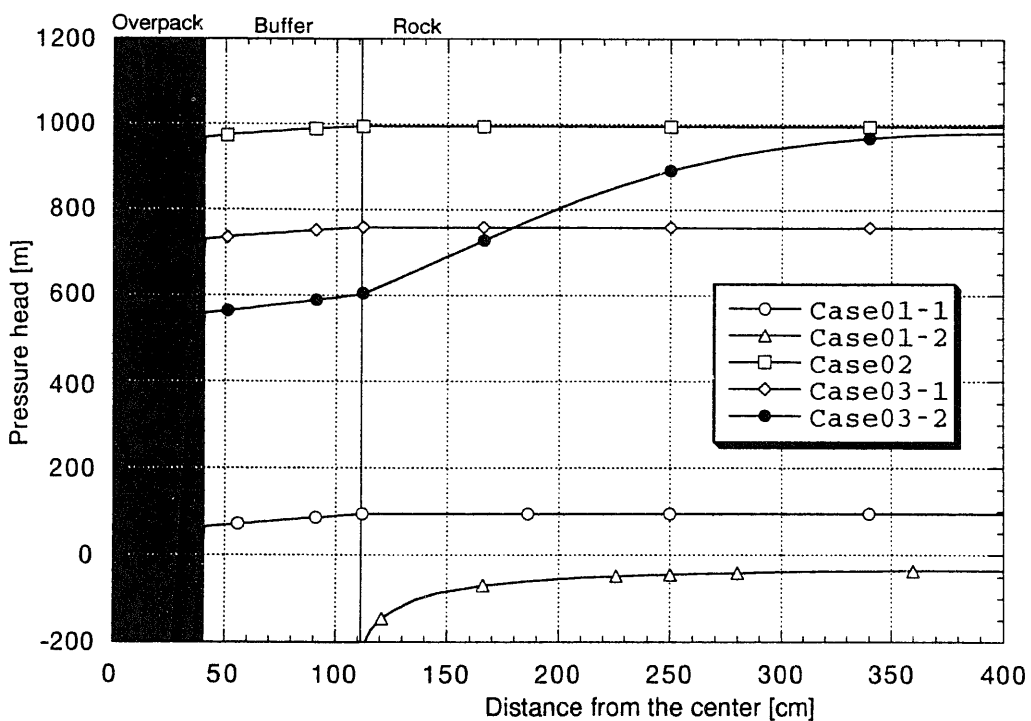


(b) 処分後1年

図6-45 廃棄体処分後の岩盤内の圧力水頭変化

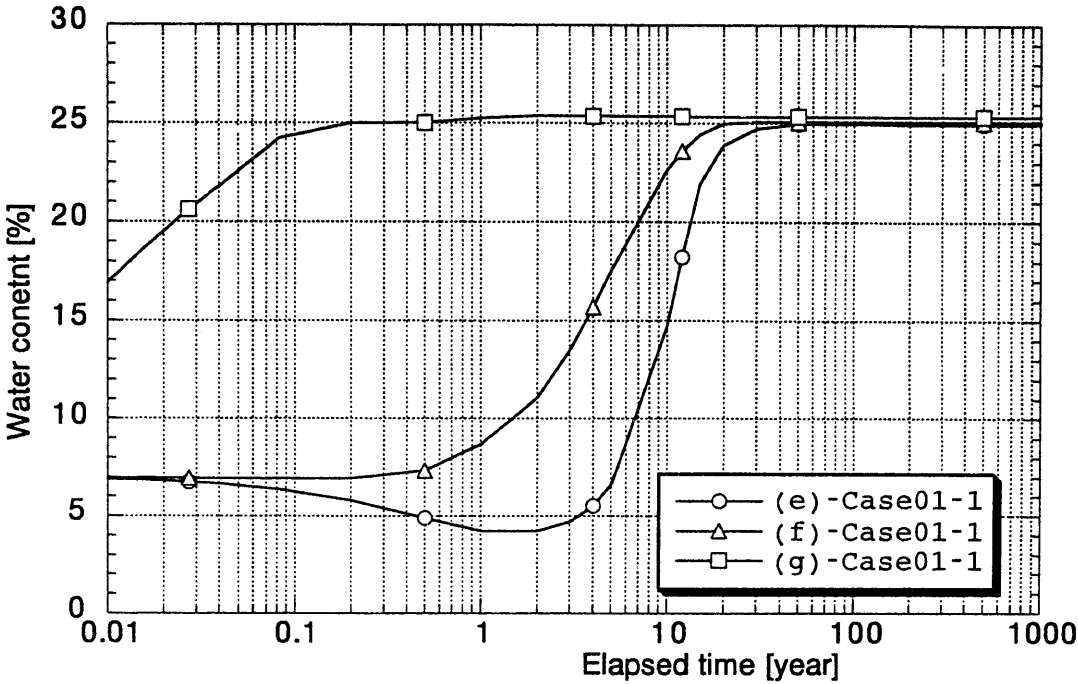


(c) 処分後10年

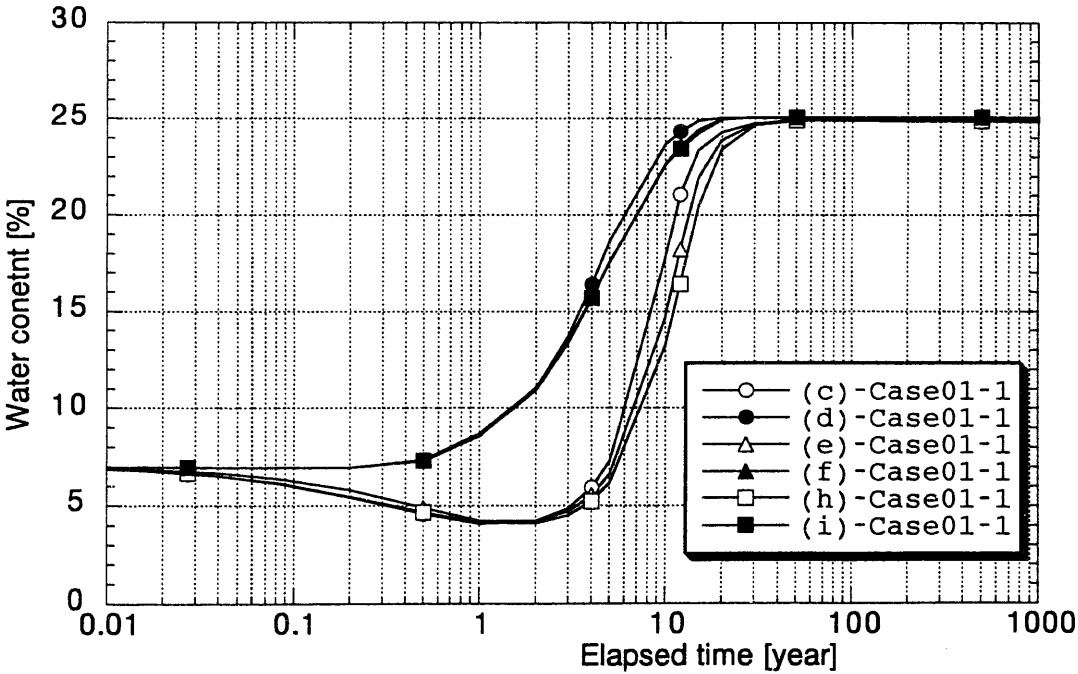


(d) 処分後100年

図6-45 廃棄体処分後の岩盤内の圧力水頭変化（続き）

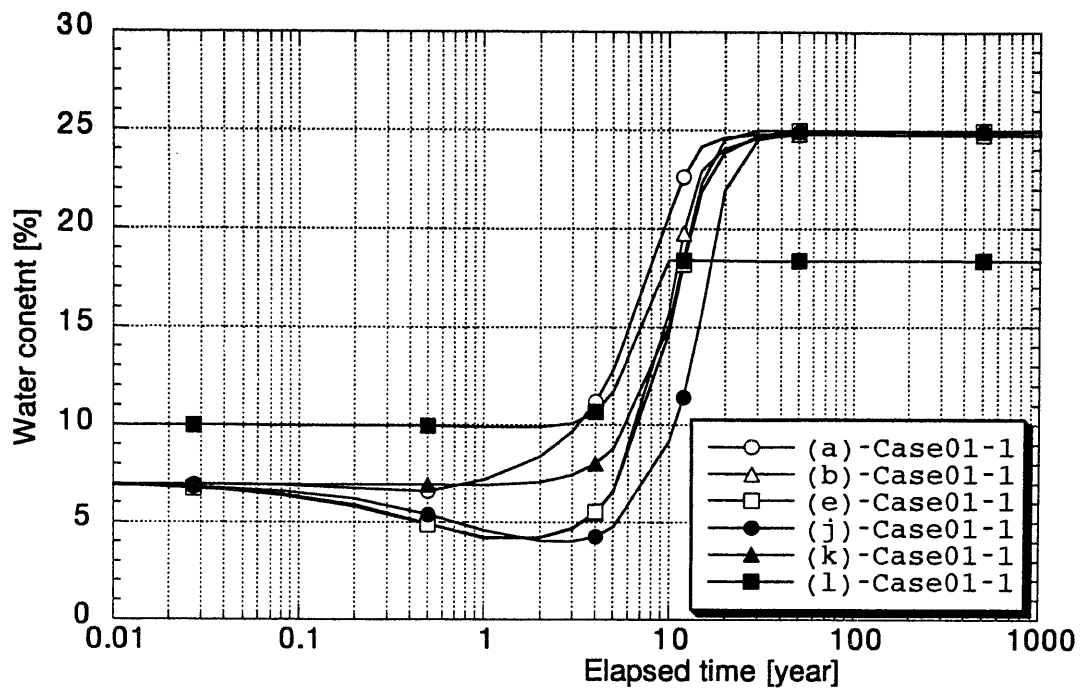


(a) 点(e), (f), (g)



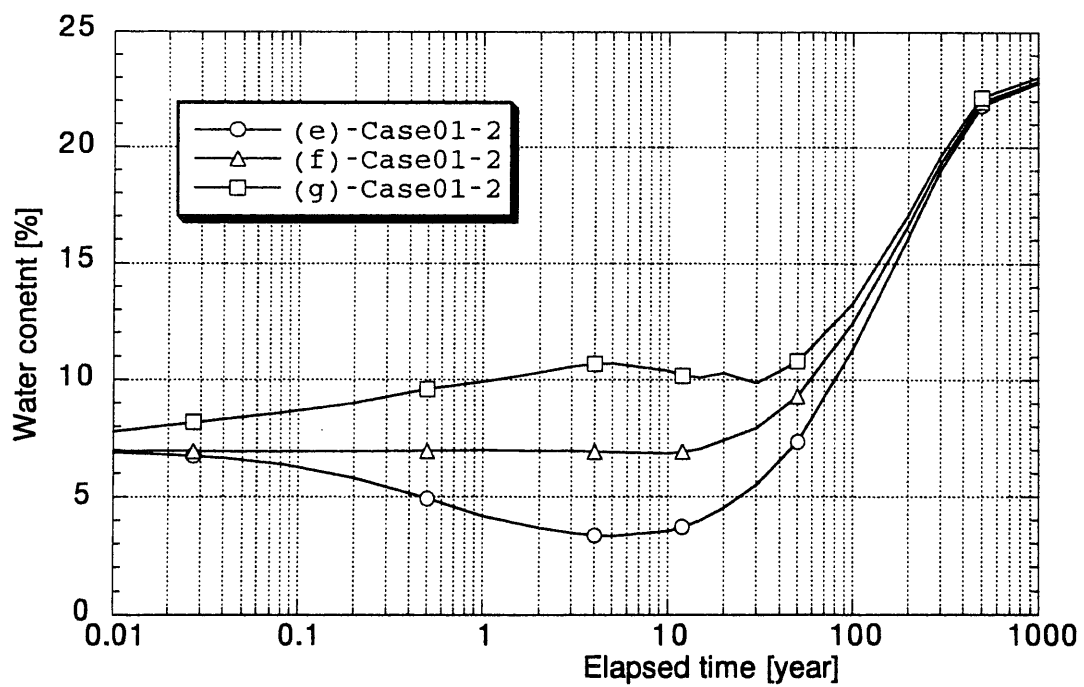
(b) 点(c), (d), (e), (f), (h), (i)

図6-46 含水比の経時変化 (Case01-1)



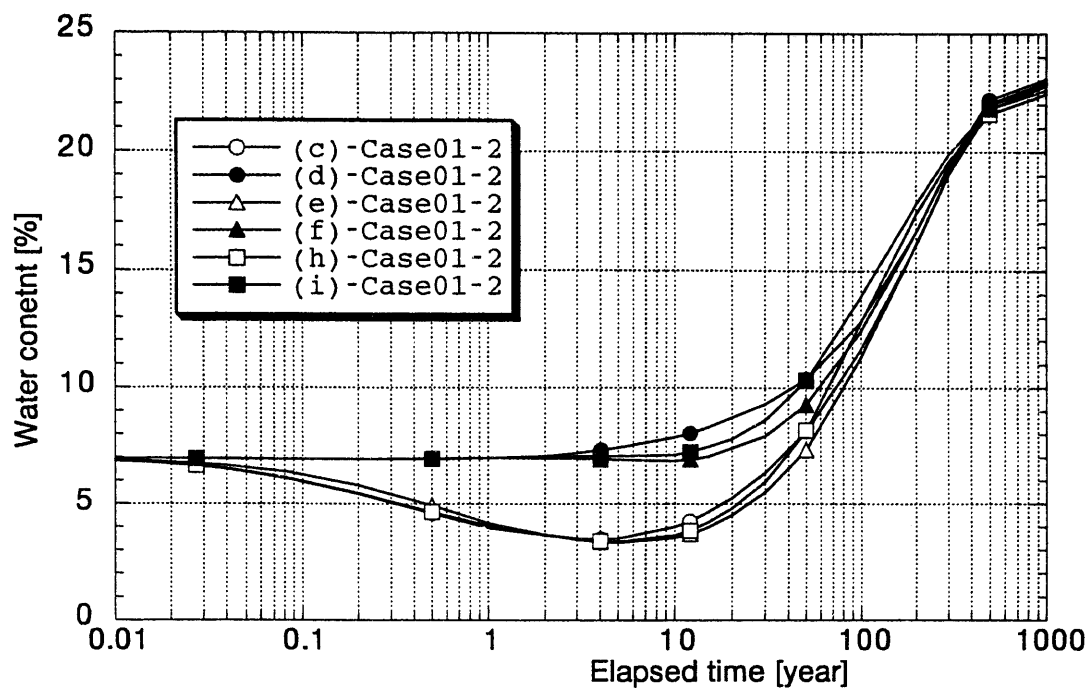
(c) 点(a), (b), (e), (j), (k), (l)

図6-46 含水比の経時変化 (Case01-1) (続き)

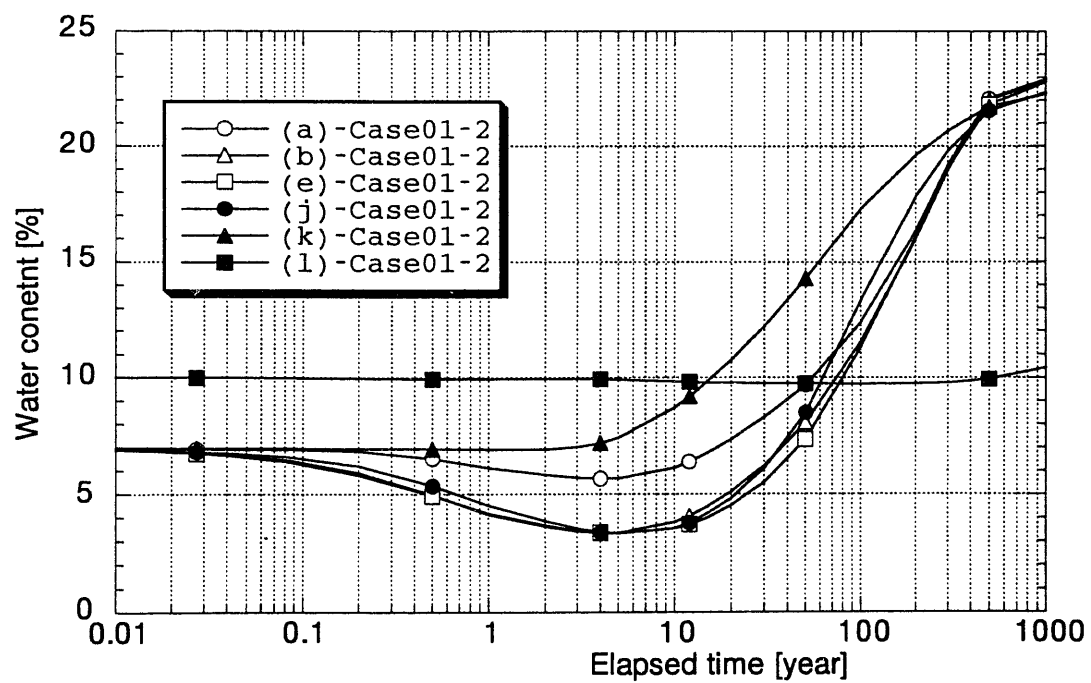


(a) 点(e), (f), (g)

図6-47 含水比の経時変化 (Case01-2)

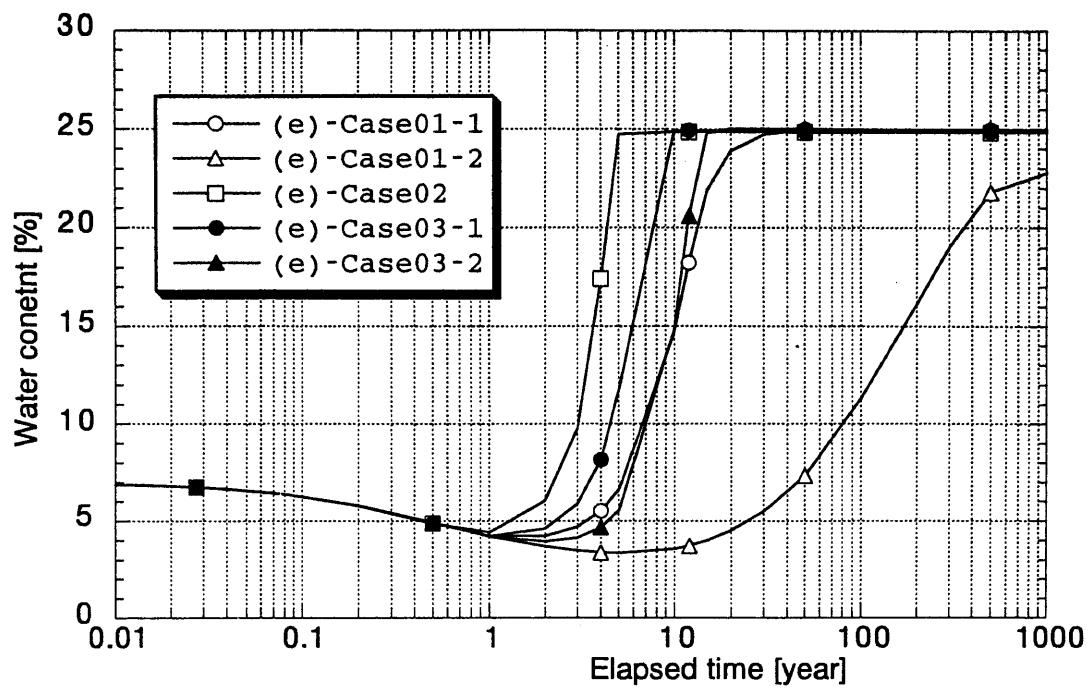


(b) 点(c), (d), (e), (f), (h), (i)

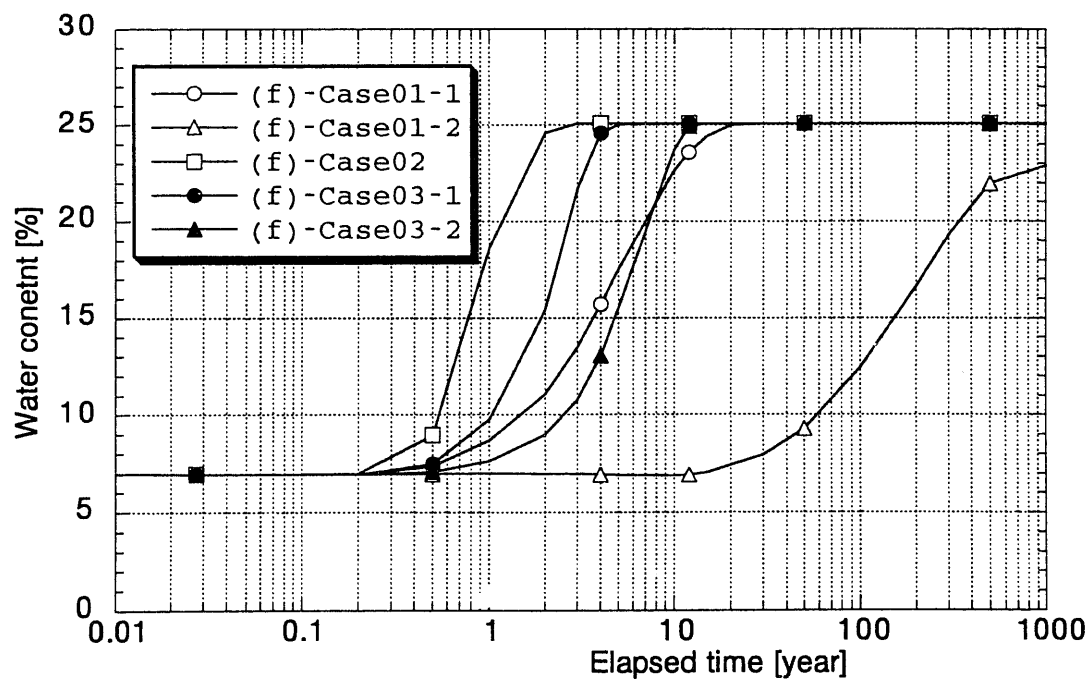


(c) 点(a), (b), (e), (j), (k), (l)

図6-47 含水比の経時変化 (Case01-2) (続き)

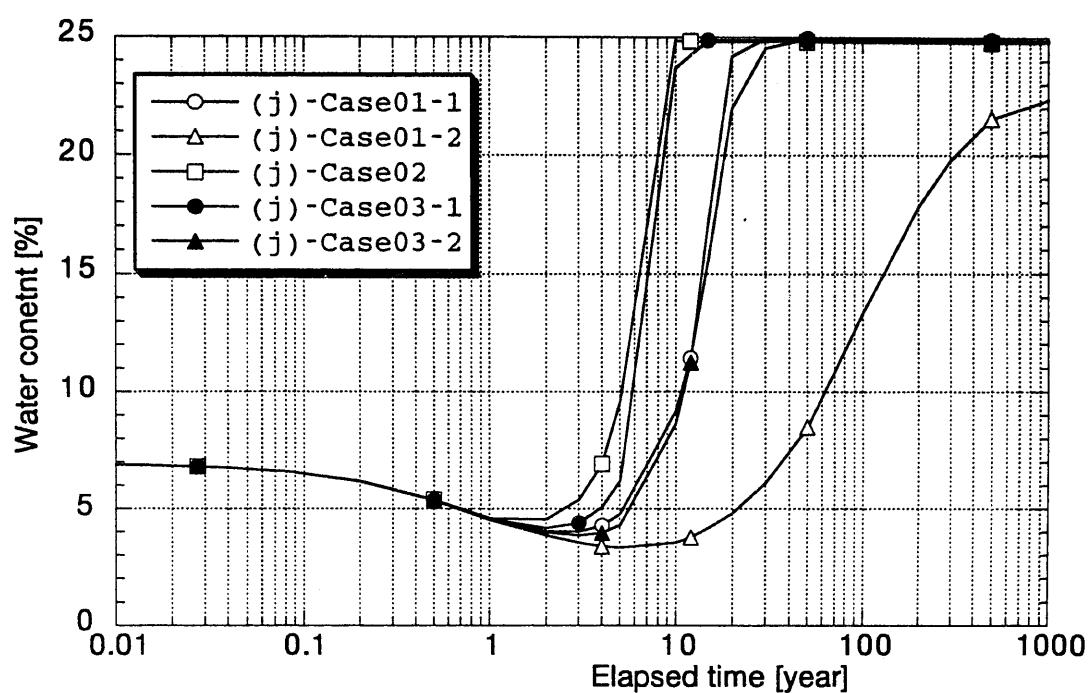


(a) 点(e)



(b) 点(f)

図6-48 各ケースにおける緩衝材内の含水比の経時変化の比較



(c) 点(j)

図6-48 各ケースにおける緩衝材内の含水比の経時変化の比較 (続き)

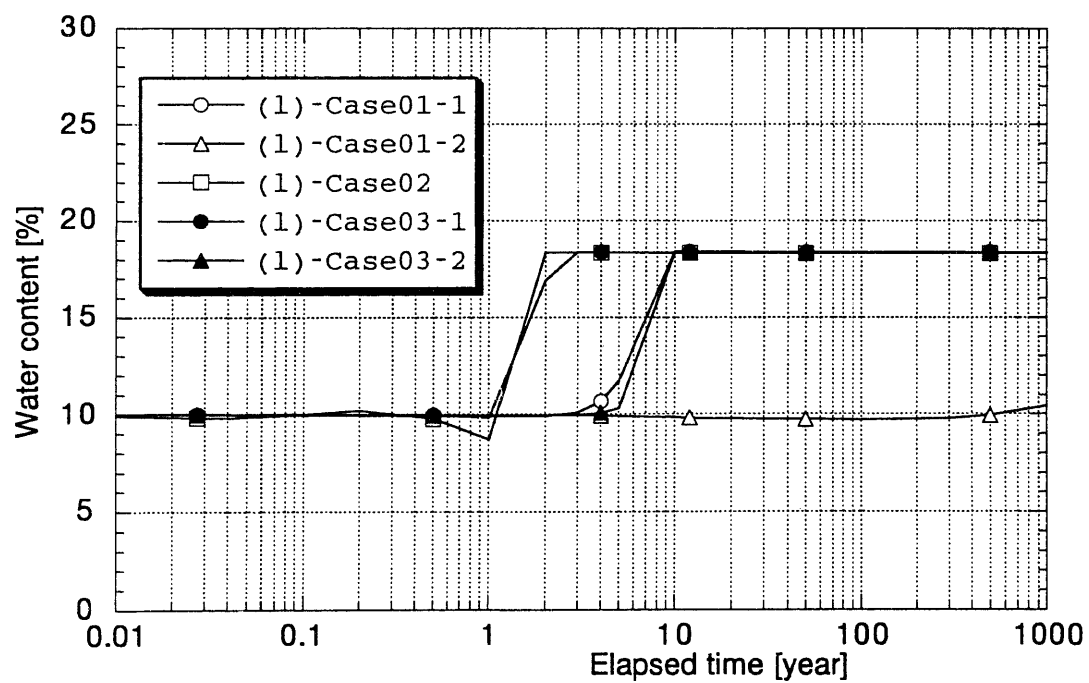
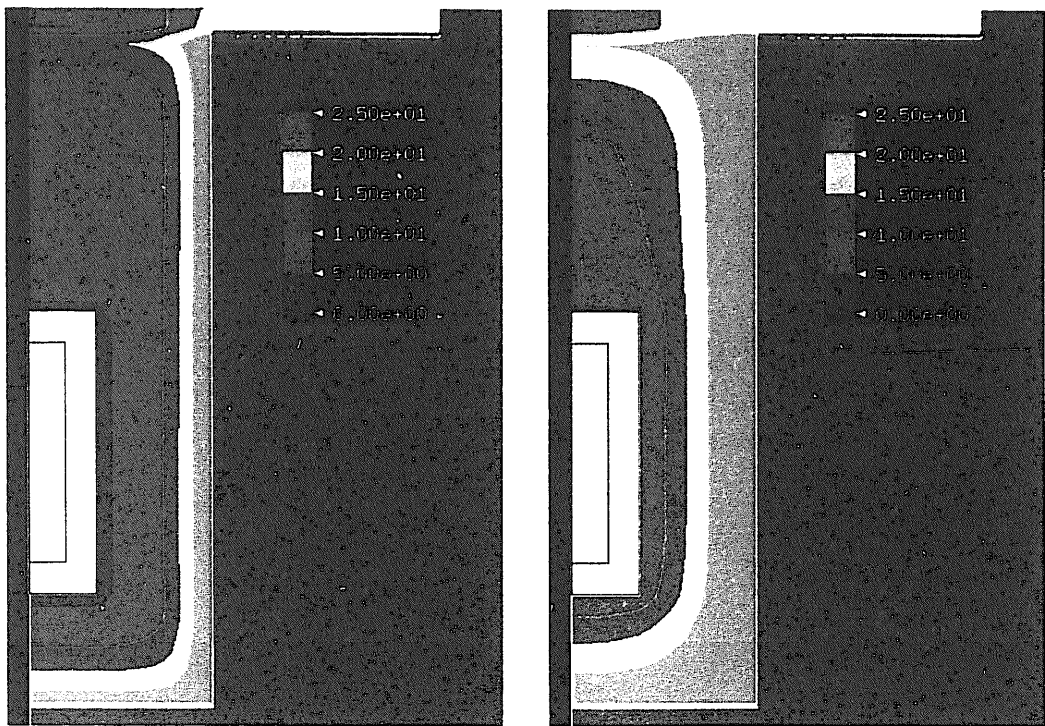


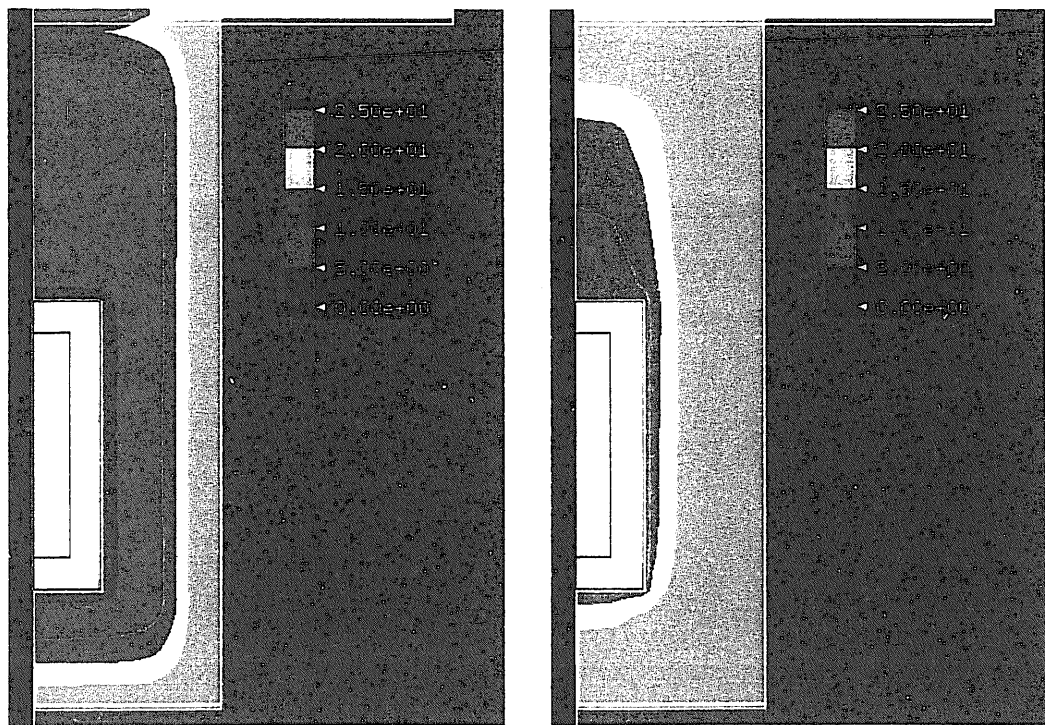
図6-49 各ケースにおける埋め戻し材内の含水比の経時変化の比較 (点(1))



(a) 処分後1年

(b) 処分後5年

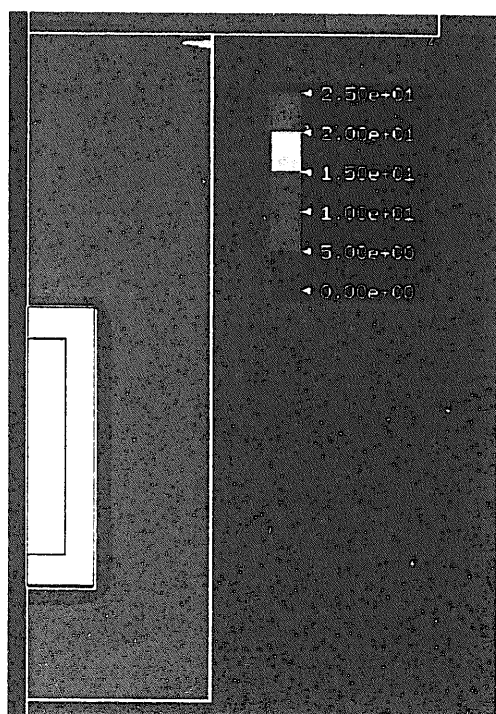
図6-50 廃棄体処分後の緩衝材内の含水比分布 (Case01-1)



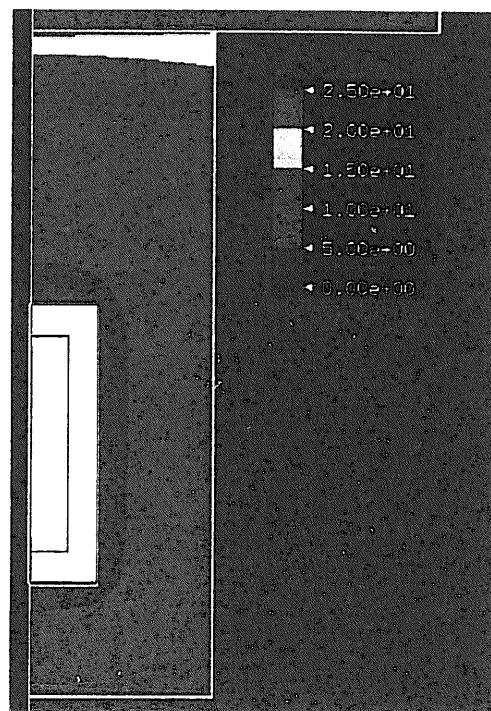
(a) 処分後1年

(b) 処分後5年

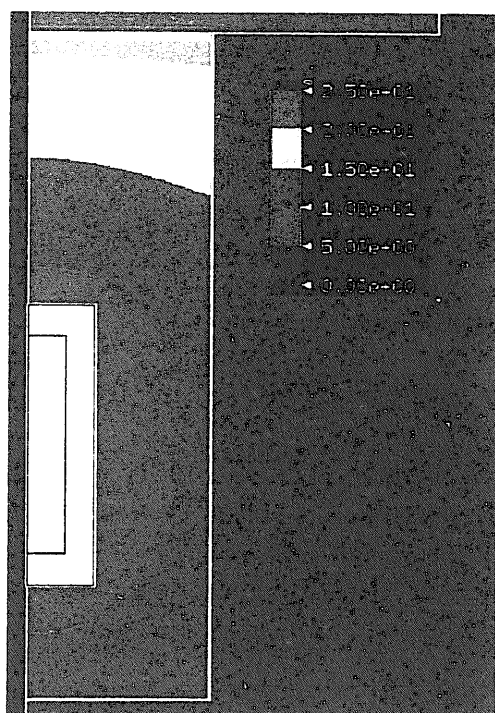
図6-51 廃棄体処分後の緩衝材内の含水比分布 (Case03-1)



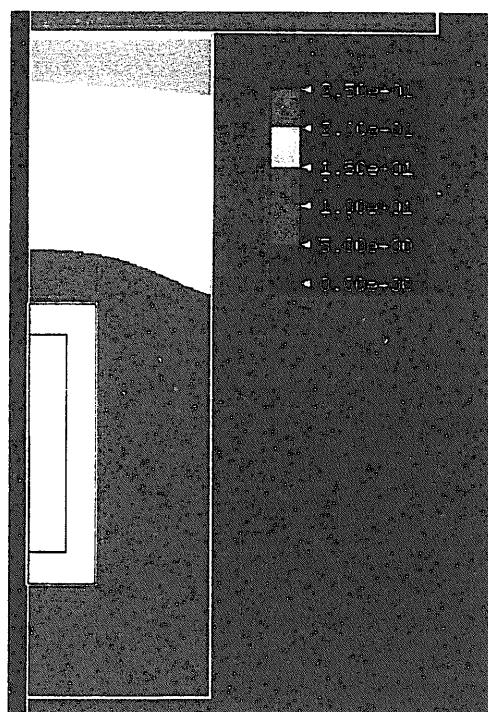
(a) 処分後1年



(b) 処分後5年

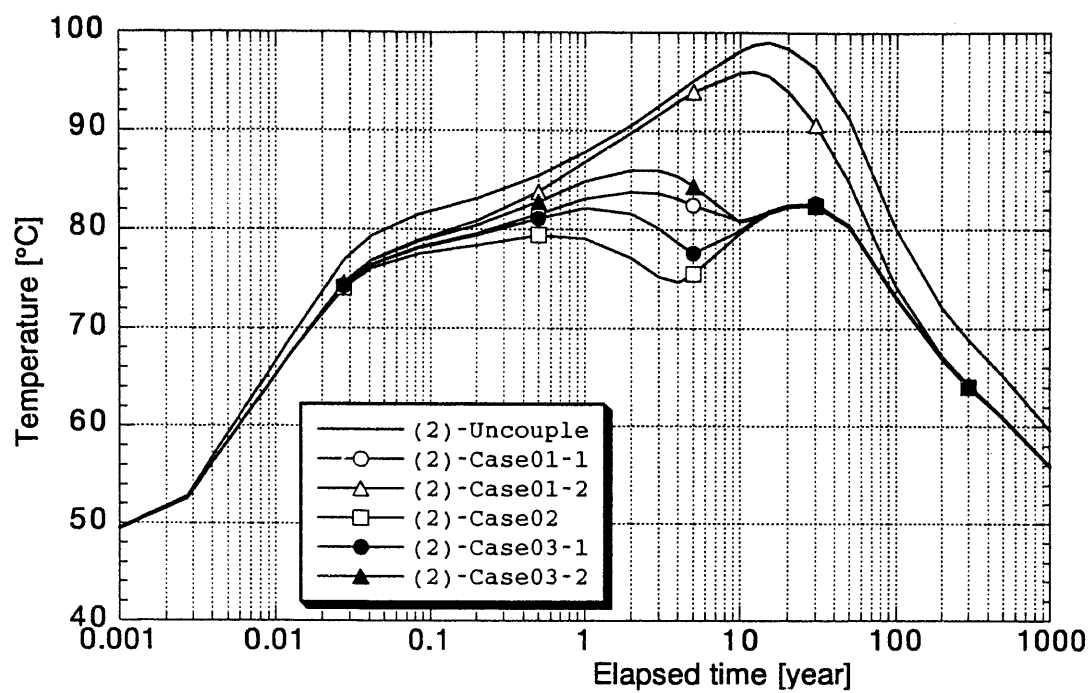


(c) 処分後10年

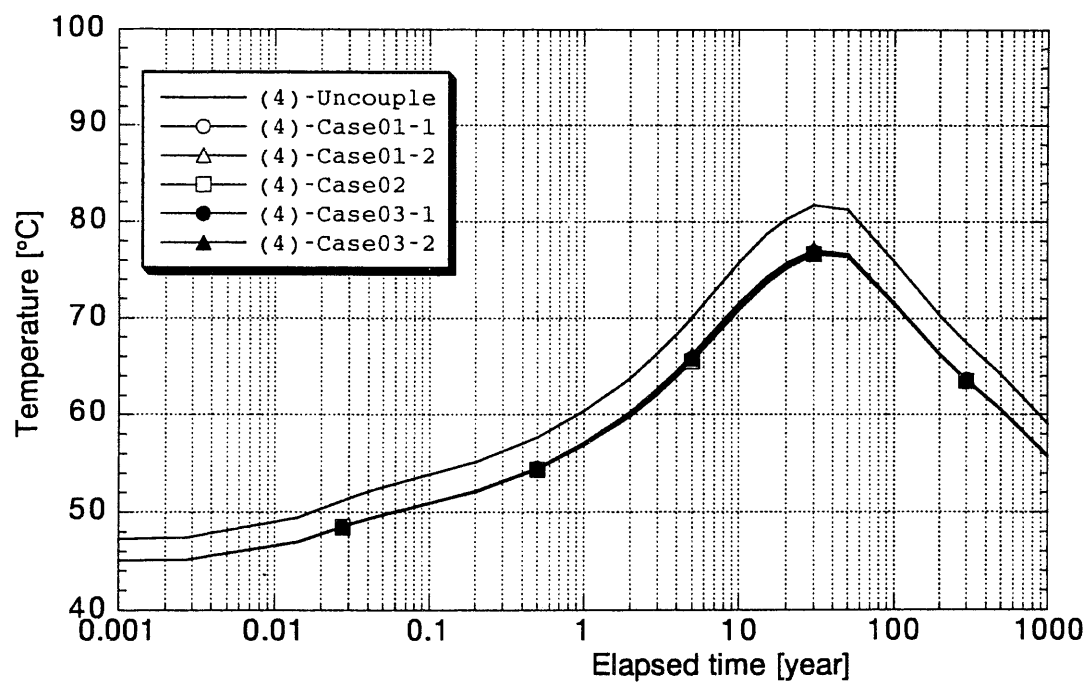


(d) 処分後100年

図6-52 廃棄体処分後の緩衝材内の含水比分布 (Case03-2)



(a) 点(2)



(b) 点(4)

図6-53 各ケースにおける温度の経時変化の比較



(a)Case01-2



(b)Case02

図6-54 廃棄体処分後の温度分布（処分後10年）

(4) オーバーバック周囲の緩衝材の再冠水時間の比較

ここでは、オーバーバック周囲の緩衝材の再冠水時間の比較を行なう。オーバーバック周囲の緩衝材の各点が飽和となる時間に、よりばらつきが出るように図6-55に示す解析モデルによる解析ケースを前述のケースに加えて実施した。図6-55に示す解析モデルでは緩衝材側部の岩盤に高水压帯があると想定し、圧力水頭を1000mで固定した。また、その他の岩盤の初期圧力水頭は0mとし、表6-5に示すように圧力水頭を初期値で固定とするケースと変動するケースを設定した。

比較は図6-41に示す緩衝材内の出力点(b), (c), (e), (h), (j)で行なった。

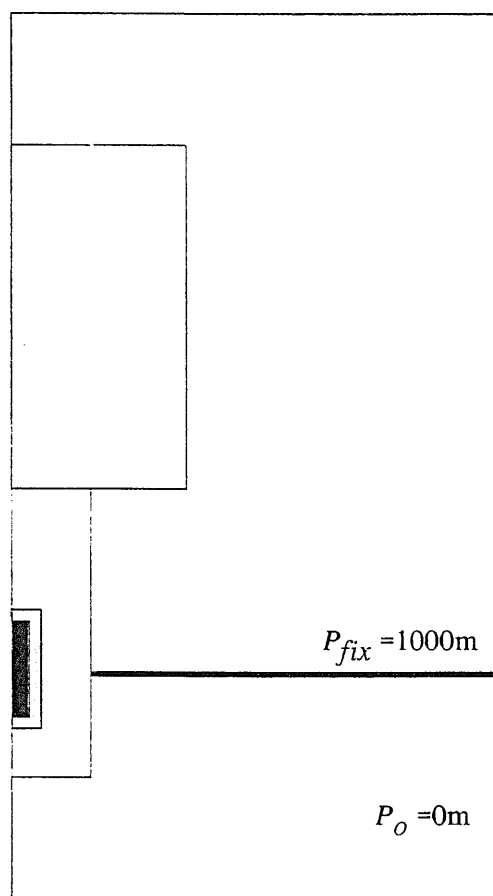
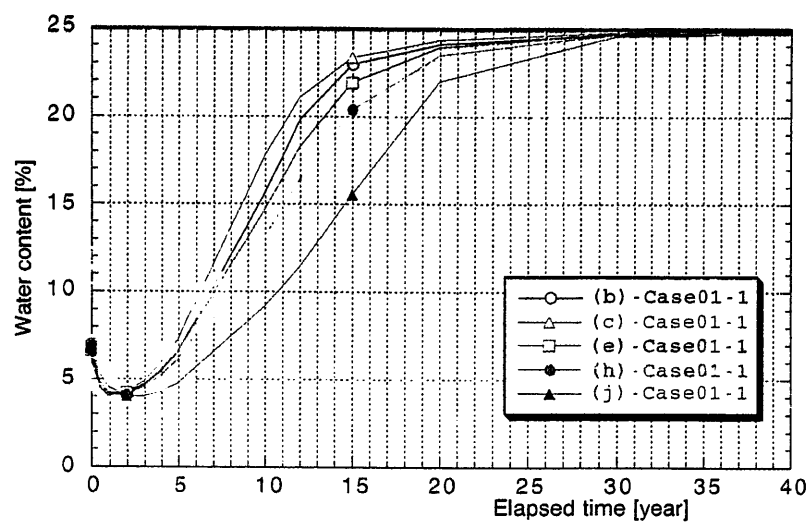


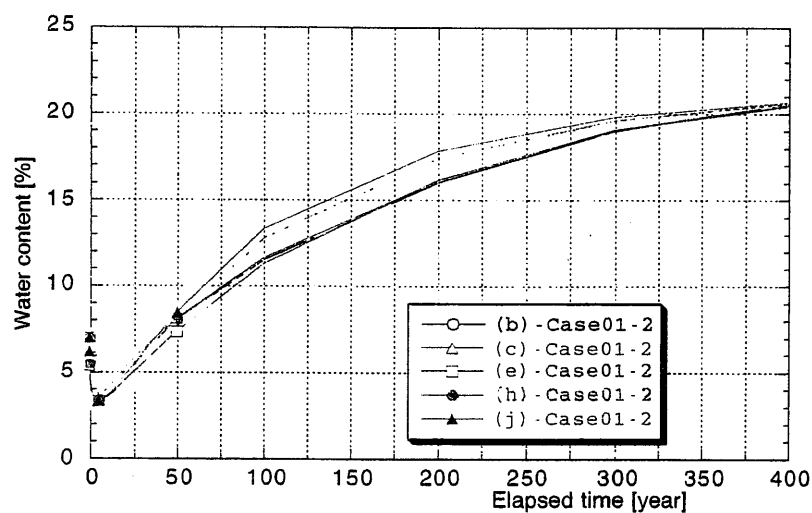
図6-55 高水压帯を含む解析モデル

表6-5 解析ケース

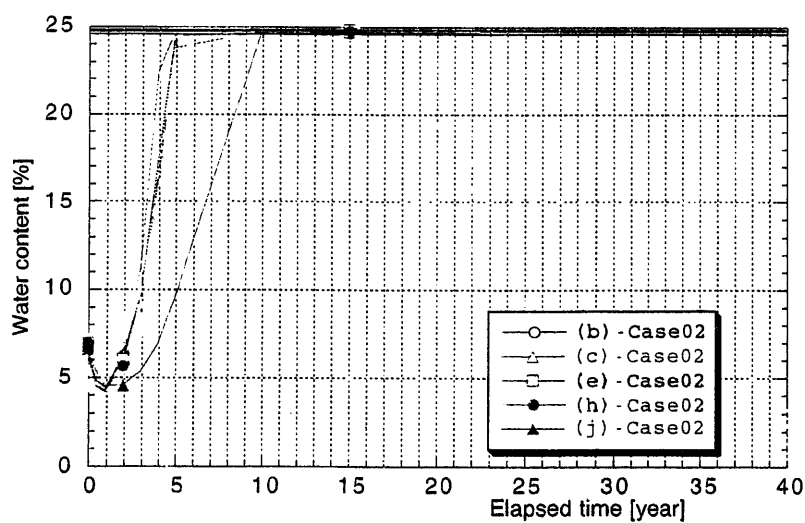
解析ケース		Case04 - 1	Case04 - 2
初期圧力水頭	高水压帯	1000m	1000m
	その他の岩盤	0m	0m
岩盤の固有透過度 [m ²]		1.0×10^{-15}	水頭固定



(a)Case01-1

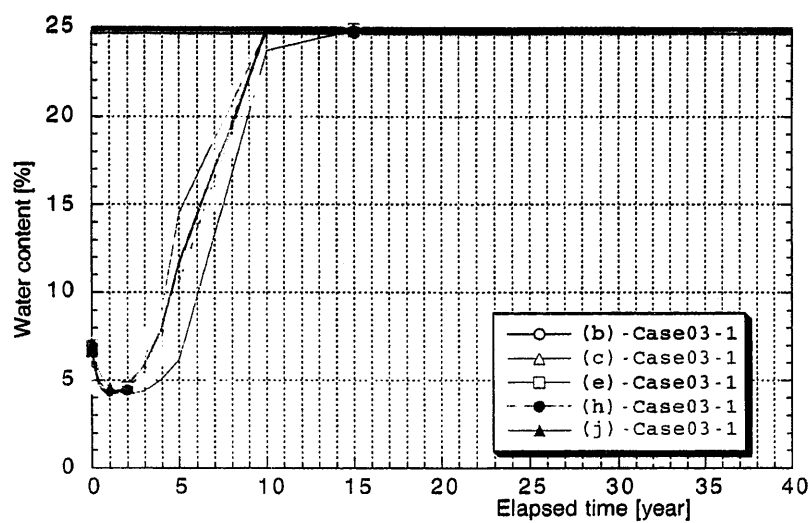


(b)Case01-2

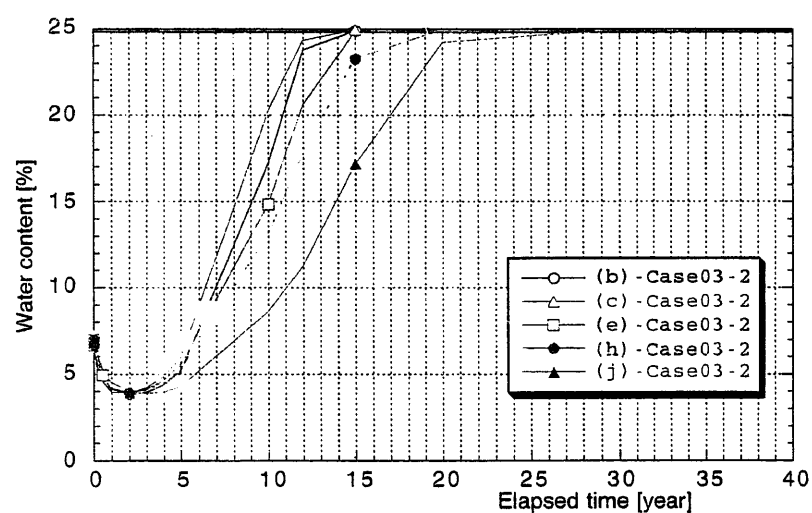


(c)Case02

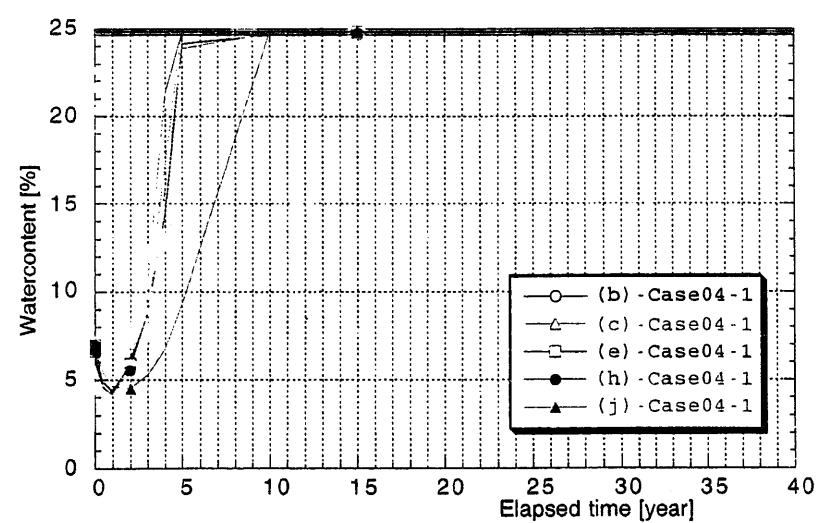
図6-56 オーバーパック周囲の緩衝材の含水比経時変化



(d)Case03-1



(e)Case03-2



(f)Case04-1

図6-56 オーバーパック周囲の緩衝材の含水比経時変化（続き）

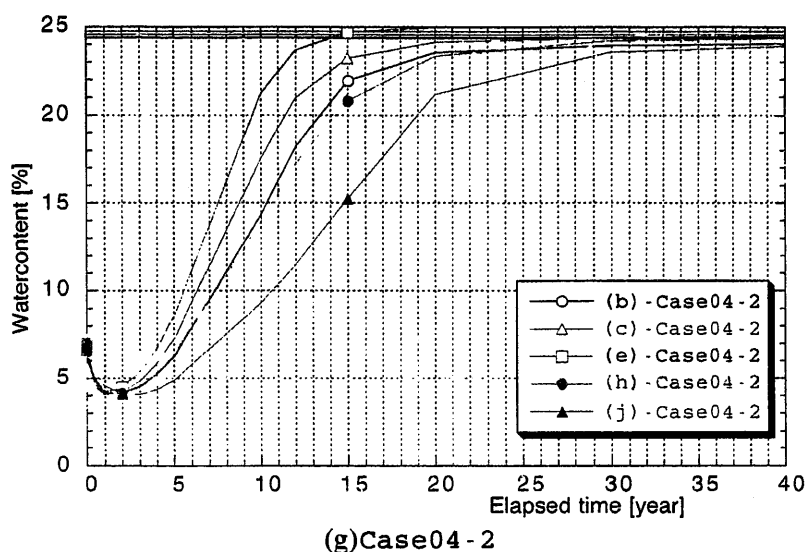


図6-56 オーバーパック周囲の緩衝材の含水比経時変化（続き）

図6-56に全ケースの解析結果を示す。岩盤の初期圧力水頭および透水性の低いケース（Case01-2）以外は、点(c)の位置が最も早く飽和に達しており、点(j)の位置が最も遅く飽和に達している。Case01-2では全体が飽和するのに1000年以上の時間を要しているが、400年程度経過した時点で各点の含水比はほぼ値となっている。Case04-2では岩盤内の高水圧帯の延長線上の点(e)が最も早く飽和に達しており、最も遅い点は他のケースと同様に点(j)である。

Case01-2以外のケースのオーバーパック周囲の緩衝材の再冠水時間の差は、岩盤の透水性が低いと大きくなり、透水性が高いと小さくなる結果となった。また、岩盤の圧力水圧を0mで固定し、高水圧帯部の圧力水頭を1000mで固定したケースCase04-2（最も極端なケースとして想定）が最も再冠水時間の差が大きくなり、差は約20年程度となった。次いではCase03-2で約15年、その他は約5年程度となった。以上より、オーバーパック周辺の緩衝材の再冠水時間の差には岩盤の間隙水圧の分布が最も大きな影響を与えられと考える。

第7章 おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における廃棄体定置後の緩衝材の熱-水-応力連成現象を評価するためのモデル化を行ない、そのモデルの確証解析を行なった。ここで、本モデルにおけるパラメータの幾つかは、室内で実施された粘土の要素試験結果から逆解析的に算定した。また、各種要素試験の結果得られた物性値を入力データとしてニアフィールドの熱-水連成解析を実施し、熱解析と連成解析の比較および原位置試験において得られたデータと解析との比較を実施した。さらに簡易モデルおよび二次元軸対称モデルを用いて緩衝材が飽和するまでの時間（再冠水時間）の計算を実施した。解析評価は処分孔豎置方式（緩衝材；ケイ砂混合材料（ケイ砂混合率30%），乾燥密度 1.6g/cm^3 ，厚さ70cm）に関して実施した。本検討で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 実験により得られた水分拡散係数の実験式およびvan Genuchtenによる不飽和水分特性曲線を用いることにより、各材料の浸潤試験の結果が再現できた。
- (2) 温度勾配水分拡散係数 D_T を用いることにより温度勾配による水分移動を再現した。この係数を温度の関数とすることで、一つの材料について一つのパラメータを用いることにより、条件の異なる試験を再現できた。
- (3) 膨潤圧に関しては、係数 F を用いることにより、最終的な値を実験値と一致させることは出来た。しかし、その発生状況はまだ解析結果と実験結果では大きく異なっている。
- (4) 室内実験から同定された温度勾配水分拡散係数 D_T を用い連成解析を実施した。その結果、緩衝材の初期含水比が7%、17%のいずれのケースも緩衝材内の最高温度は熱解析で得られた値より小さい結果となった。
- (5) 緩衝材の初期含水比が高く、温度勾配による水分移動が大きい場合は緩衝材内の最高温度は初期含水比の熱物性値を用いて実施した熱解析で得られた温度より高くなる場合がある。しかし、この場合でも初期含水比が低い場合の熱解析の結果得られる最高温度よりは低くなると考えられる。
- (6) 岩盤からの地下水の供給が無い場合、緩衝材内の最高温度は初期含水比の熱物性値を用いて実施した熱解析で得られた温度より高くなる。
- (7) 岩盤の固有透過度が 10^{-15}m^2 程度の場合、緩衝材の初期含水比が再冠水時間に与える影響は小さく岩盤の圧力水頭が支配的となる。
- (8) 再冠水時間は岩盤の圧力水頭に大きく影響を受けるが、岩盤の透水性が固有透過度で $10^{-13}\sim 10^{-18}\text{m}^2$ の範囲ではその透水性に影響を受けない。
- (9) 温度勾配による水分移動を考慮しない場合に比べ考慮することにより再冠水時間は長くなる。長くなる割合は岩盤の圧力水頭が小さいほど大きくなる。圧力水頭が1000mの場合は約2倍であるが、0mの場合は約10倍となる。
- (10) 岩盤に亀裂が少なく、岩盤の透水性が基質部の固有透過度と同程度となる場合は、上記に比べ再冠水時間はさらに長くなる。また、緩衝材の初期飽和度にも再冠水時間は依存してくる。この場合も再冠水時間は岩盤内の圧力水頭に最も大きな影響を受け、その割合は岩盤の透水性が大きい場合に比べさらに大きくなる。岩盤

内の圧力水頭が高い場合は岩盤の透水性が高い場合の再冠水時間の2倍程度である、圧力水頭が低い場合は再冠水時間が500～1000年程度となることも予想される。

- (11) 二次元軸対称モデルを用い、処分坑道の掘削による水位低下を考慮したニアフィールドの熱-水-応力連成解析を実施した。その結果、岩盤内の初期圧力水頭が1000m程度の場合、再冠水時間は10～30年程度となる。
- (12) オーバーパック周囲の緩衝材の再冠水時間の差は長くても15年程度である。

【参考文献】

- Andrews, R.W, D.W. La Fleur and S.B. Pahwa (1986) : Resaturation of backfilled tunnels in granite, Nagra Technical Report 86-27.
- Börgesson, L. and J. Hermelind (1994) : DECOVALEX TEST CASE 3 - Calculation of the BIG BEN experiment-, Coupled modelling of the thermal, mechanical and hydraulic behavior of water-unsaturated buffer material in a simulated deposition hole, SKB ARBETSRAPPORT 94-49.
- 千々松正和ほか (1995) : 膨潤応力を考慮した熱-水-応力連成解析, 土木学会第50回年次学術講演会, 講演概要集第3部(A), pp.26-27.
- Chijimatsu, M., T. Fujita, Y. Sugita, H. Ishikawa and Y. Moro (1996a) : Coupled Thermo - Hydro - Mechanical experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 02-95-02, Instrumentation, PNC TN8410 96-056.
- Chijimatsu, M., T. Fujita, Y. Sugita, H. Ishikawa and A. Kobayashi (1996b) : Coupled Thermo - Hydro - Mechanical experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 07-95-07, Hydraulic Tests, PNC TN8410 96-058.
- de Vries, D.A. and N.H. Afgan (1975) : Heat transfer in soils, Heat and Mass transfer in the Biosphere, Advances in thermal engineering, 3, John Wiley & Sons Inc.
- 動力炉・核燃料開発事業団 (1992) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告—平成3年度—, PNC TN1410 92-081.
- ENRESA (1998) : FEBEX Full-scale engineered barriers experiment in crystalline host rock, pre-operational stage, summary report.
- Fujita, T., Y. Sugita, T. Sato, H. Ishikawa and T. Mano (1994) : Coupled Thermo - Hydro - Mechanical experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 01-95-01, Plan, PNC TN8020 94-005.
- Fujita, T., M. Chijimatsu, H. Ishikawa, H. Suzuki and K. Matsumoto (1997) : Coupled Thermo - Hydro - Mechanical experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 11-96-04, Fundamental Properties of Bentonite OT-9607, PNC TN8410 97-071.
- Fujita, T., M. Chijimatsu, Y. Sugita and K. Amemiya (1998) : Field experiment of coupled T-H-M processes in the near field, 5th International Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, Barcelona.

Jing,L., O.Stephansson, C.-F. Tsang and F.Kautsky (1996) : DECOVALEX -Mathematical Models of Couples T-H-M Processes for Nuclear Waste Repositories, Executive Summary for Phases I,II and III.

Kjartanson,B., N.A.Chandler, A.W.L.Wan, H.S.Radhakrishna and K.-C. Lau (1993) : In Situ Assessment of Bentonite/Sand Buffer Material, Joint CSCE-ASCE National Conference on Enviromental Engineering, pp. 747-755 .

松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明 (1997) : 緩衝材の飽和透水特性, 動燃技術資料, PNC TN8410 97-296.

中野政詩, 雨宮悠, 藤井克己, 石田朋靖, 石井明俊 (1984) : 拘束された不飽和粘土の浸潤と膨張圧, 農業土木学会論文集, 第112号, pp.55 - 66.

中野政詩 (1991) : 土の物質移動学, 東京大学出版会.

Neerdael,B., P.Meynendonckx and M.Voet (1992) : The Bacchus backfill experiment at the Hades under- ground reserch facility at Mol, Belgium, Final Report, EUR 14155 .

Ohnishi,Y., H.Shibata and A.Kobayashi (1985) : Development of Finite Element Code for the Analysis of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Behaviors of a Saturated-Unsaturated Medium, Proc. of Int. Symp. on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, Berkeley , pp. 263 - 268.

Philip.J.R.and de Vries, D.A. (1957) : Moisture movement in porous materials under tempereture dradient, Transactions, American Geophysical Union, Vol.38, No.2, pp. 229 - 237.

Pusch,R. and L.Börgesson (1985) : Final report of the buffer mass test - volume II, SKB Technical report 85-12.

Sato,S., A.Kobayashi, K.Hara, H.Ishikawa and N.Sasaki (1991) : Full scale test on coupled thermo-hydro-mechanical process in enginnered barrier system, Proc. of '91 Joint Int. Waste Management Conference, ASME, Seoel, Korea, Oct.

Sugita,Y., M.Chijimatsu, T.Fujita and H.Ishikawa (1997) : Coupled thermo-Hydro-Mechanical experment at Kamaishi Mine, Technical Note 12-96-05, Instrumentation in Buffer Mass, PNC TN8410 97-072.

鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬 (1992) : 緩衝材の特性試験 (I) , 動燃技術資料, PNC TN8410 92-057.

鈴木英明, 藤田朝雄, 菅野毅 (1996) : 緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数, 動燃技術資料, PNC TN8410 96-117.

鈴木英明, 谷口航 (1999) : 緩衝材の熱物性試験 (II) , サイクル機構技術資料, JNC TN8430 99-006.

van Genuchten, M.Th. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, Soil Sci. Am. J., vol.44, No..5, pp.892-898.

Watanabe, K. (1991) : Back analytical technique for evaluating the hydraulic parameters of unsaturated rock, International Congress on Rock Mechanics.