

低温物質貯蔵時の液漏れおよび冷氣漏れ対策としての高分子系材料の適用性

稲田善紀¹・関正造²

¹フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-77 松山市文京町3番)

²正会員 工修 兵庫県土木部 尼崎港管理事務所 (〒660 尼崎市道意町9丁目21)

本研究では、地山岩盤内空洞に低温物質を貯蔵した場合に熱収縮により生じる放射状の亀裂からの液漏れおよび冷氣漏れ対策として引張応力に対して比較的強度の大きい高分子系材料のライニングを空洞表面に設けることについて検討した。まず、低温下における高分子系材料の強度・変形特性および熱物性値を実験により求め、とくに低温物質貯蔵に有利と考えられる高分子系材料を選定した。次にそれらの値を用いて要素分割法および亀裂解析法にて解析を行い、空洞周辺岩盤の挙動およびライニングの熱的安定性について考察した。その結果、ライニングを岩盤と切り離して設け、それぞれの挙動を自由にするにより、液漏れおよび冷氣漏れ対策になり得ることがわかった。

Key Words: *underground openings, low temperature material, resin lining, Finite Divided Element Method, Crack Analysis Method*

1. 緒言

現在、石油代替エネルギーとしてLNGおよびLPGが注目され、需要は堅調に推移している¹⁾。一方、食生活の多種多様化や共働き夫婦の増加などを背景として冷凍食品の需要量も増加傾向を示している²⁾。以上のことから今後安定供給のための大規模なLNGおよびLPGの貯蔵施設や冷凍倉庫が増加するものと予想される。

我が国においてはこれら低温物質は臨海部の埋立地に貯蔵されているものが多いが³⁾、これらの貯蔵方式は広大な敷地を必要とし、環境保全や維持管理費等の点からも必ずしも得策と言えない。そこで、土地の立体的有効利用、環境保全等を考慮した貯蔵方法として地山岩盤内に設けた空洞に低温物質を直接貯蔵することが考えられる。その際、空洞に存在する亀裂や熱収縮により発生する亀裂からの液漏れおよび冷氣漏れ対策が重要な課題となってくる^{4), 5)}。

筆者らはこれまで熱収縮により亀裂が発生しても水封ボーリングからの水が亀裂内に浸透し、低温の影響を受け氷結することによって亀裂をふさぎ、液漏れおよび冷氣漏れを防ぐ水封式や空洞表面に氷の

層を設けて空洞内の気密性を向上させる水ライニング方式等が有効な手段となり得ることを報告してきた⁶⁾。本研究では、液漏れおよび冷氣漏れ防止対策の別の方法として、熱収縮により発生する引張応力に対して比較的強度の大きい高分子系材料を空洞表面にライニング材として用いることを提案し、検討した。まず、低温下における高分子系材料の強度・変形特性および熱物性値を実験により求め、それを母岩と想定している花崗岩と比較し、高分子系材料の熱的特性を把握した。次に、これをライニングとして用いた場合の解析を行い、空洞周辺岩盤の挙動およびライニングの安定性について検討し考察した結果について述べる。

2. 低温下における高分子系材料の強度・変形特性

(1) 実験に使用した試料

本実験ではコンクリート用プライマーとして用いられているU社製のエポキシ樹脂 (sample1)、ガラスフレーク混入エポキシ樹脂 (sample2) および水中硬化型ガラスフレーク混入エポキシ樹脂 (sample3)

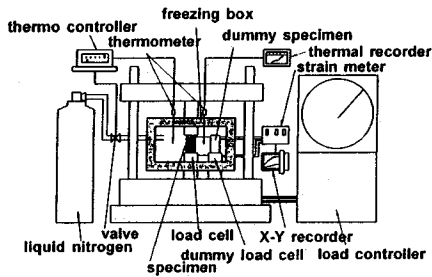


Fig.1 Schematic diagram of the test.

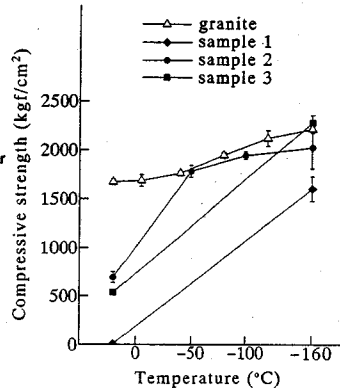


Fig.2 Compressive strength of resin at low temperature.

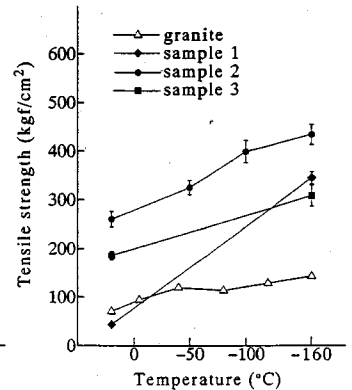


Fig.3 Tensile strength of resin at low temperature.

の3種類の高分子系材料を試料として用いた。sample2は重量比で20%、sample1およびsample3は重量比で50%の硬化剤を加え、 $\phi 3 \times 15\text{cm}$ の型枠に流し込み常温にて養生した後実験に用いた。

(2) 圧縮強度および引張強度

まず、低温下における試料の圧縮強度および引張強度を測定した。圧縮試験用は $\phi 3 \times 6\text{cm}$ 、引張試験は圧裂引張試験としたため $\phi 3 \times 3\text{cm}$ に成形した供試体を用意した。強度試験装置の概念図をFig.1^{6), 7)}に示す。ここでは低温下におけるストレインゲージやリード線の温度変化による諸影響をキャンセルさせるためダミーゲージを併用した。供試体を冷却する際の降温速度は熱衝撃が生じないように $1^\circ\text{C}/\text{min}$ とし⁸⁾、所定の温度に達した後の保温時間は供試体の中心部まで同一の温度となるよう60分間とした⁶⁾。なお、各試験とも各温度下で5、6回の試験を行い結果を平均した。圧縮強度の試験結果をFig.2に示す。図中の値の幅は標準偏差を示している。供試体を圧縮した際のひずみ速度は強度に大きな影響を及ぼさないと考えられる速度とし⁹⁾、試行錯誤の結果、 $6000 \times 10^{-6}/\text{min}$ (一定)とした。また、比較のために母岩と想定している花崗岩(愛媛県越智郡大島産)の低温下における圧縮強度も示している。後に述べるFig.6からもわかるが、試料が収縮して硬化するためFig.2より、温度低下に伴い圧縮強度が上昇していることがわかる。また、高分子系材料の圧縮強度はいずれの温度においても花崗岩と比べて小さいが、強度上昇の割合は比較的大きく、極低温になると圧縮強度は花崗岩に近づいていくことがわかる。次に、引張強度の結果をFig.3に示す。温度の低下とともに値は上昇しており、い

ずれの試料とも極低温に近づくにつれて花崗岩より値は大きくなっており、sample2が最も引張強度が大きいことがわかる。

(3) 接線弾性係数およびポアソン比

圧縮試験の際に供試体の表面に張り付けたひずみゲージにより得られた応力-ひずみ曲線より破壊応力の30%付近の接線弾性係数およびポアソン比を求めた。結果をそれぞれFig.4およびFig.5に示す。接線弾性係数は圧縮強度と同様の傾向で温度低下とともに上昇しており、花崗岩と比較するとかなり小さい。また、ポアソン比はほぼ一定で花崗岩より値は大きいことがわかった。

3. 低温下における高分子系材料の熱物性値

(1) 線膨張係数

石英ガラス棒を用いた比較法¹⁰⁾により、低温下における試料のひずみを測定した。この際、降温速度は $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 、所定の温度に達した後の保温時間は60分間とした。測定結果をFig.6に示す。温度低下に伴い試料が収縮しており、sample1よりもsample2およびsample3の方が熱収縮量が小さく、ガラスフレークの影響により熱収縮量が抑制されているものと推察される。また、花崗岩と比較すると高分子系材料の熱収縮量はかなり大きいことがわかる。得られたひずみの結果から試料の接線線膨張係数および割線線膨張係数を求めた結果をFig.7およびFig.8に示す。温度低下に伴いいずれの試料も値がわずかに小さくなっており、収縮する割合が次第に小さくなっていることがわかる。また、ひずみの値が花崗岩よりかなり大きいため、線膨張係数も花

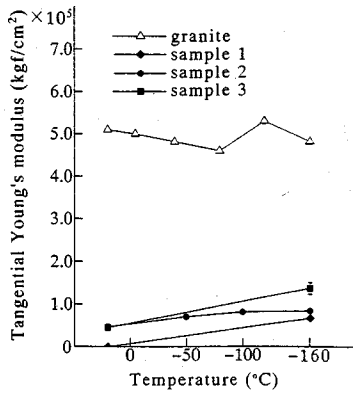


Fig.4 Tangential Young's modulus of resin at low temperature.

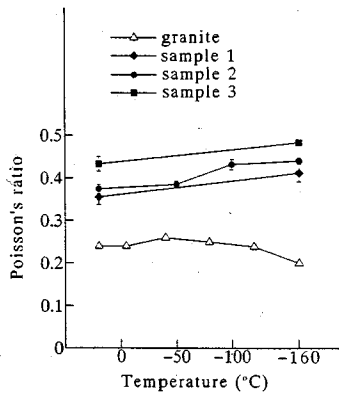


Fig.5 Poisson's ratio of resin at low temperature.

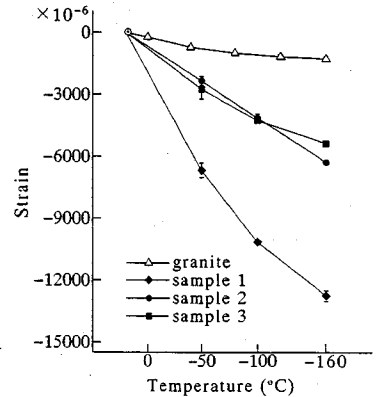


Fig.6 Strain of resin at low temperature.

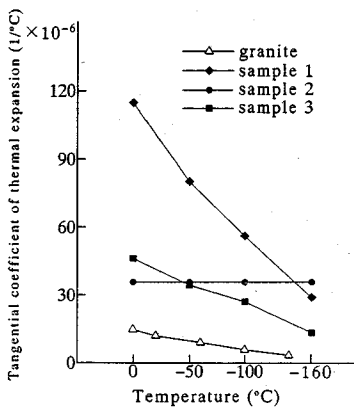


Fig.7 Tangential coefficient of thermal expansion of resin at low temperature.

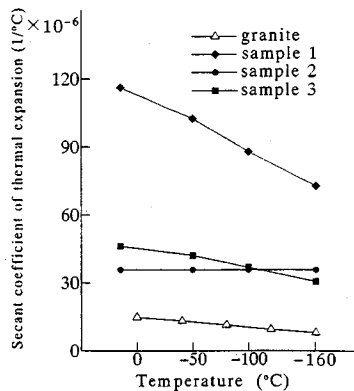


Fig.8 Secant coefficient of thermal expansion of resin at low temperature.

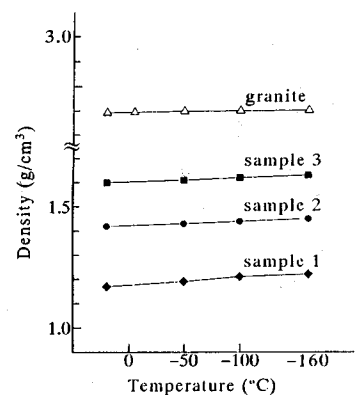


Fig.9 Density of resin at low temperature.

崗岩より大きいことがわかる。

次に、上述したひずみの結果から低温下における試料の密度の変化を求めた結果を Fig.9 に示す。密度は温度の低下とともに上昇しており、特にひずみの変化の大きかった sample1 では 20 ~ -160 °C で約 7 % 上昇している。以上の強度・変形特性および線膨張係数の結果から、① sample2 および sample3 のひずみが sample1 に比べて半減している。② sample2 の引張強度が最も大きい。③ sample2 の接線弾性係数が sample3 よりも小さい。という理由で、sample2 が低温物質貯蔵時に熱収縮により発生する引張応力に対して最も有利であると判断し、以下の熱物性値は sample2 の値のみ求めることとした。

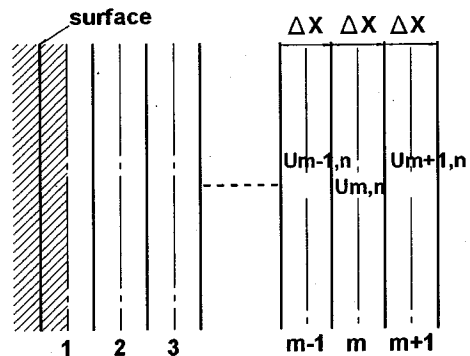


Fig.10 Illustration of Finite Divided Element Method of one dimensional case.

(2) 熱拡散率および比熱

要素分割法に実測値を適用させることにより低温

下における試料の熱拡散率を求めた。供試体は、15 × 25 × 10cm に成形し、1次元の熱伝導が得ら

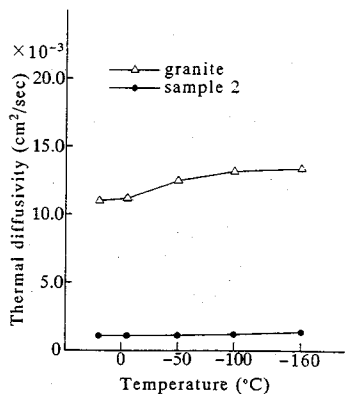


Fig.11 Thermal diffusivity of resin at low temperature.

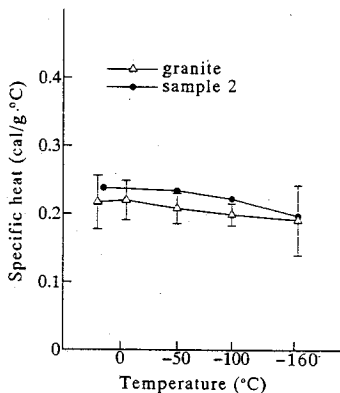


Fig.12 Specific heat of resin at low temperature.

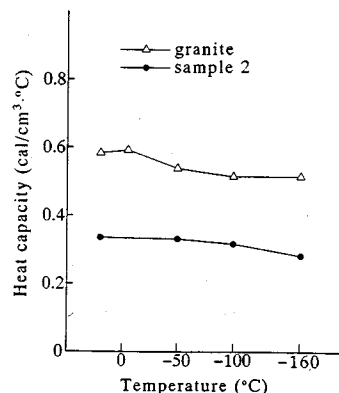


Fig.13 Heat capacity of resin at low temperature.

れるように、5つの面を断熱材で覆い、外気の影響を受けないようにし、残りの1面(15×10cm)に冷気を吹き付け、この面から5mm間隔で5本の温度センサーを平行に挿入し、温度変化を測定した。熱源として液体窒素を用い、表面温度はコントローラーにより一定温度(-160°C±2°C)に保った。このようにして得られた温度曲線を以下に述べる要素分割法に適用し、熱拡散率を求めた¹¹⁾。

要素分割法では、平面状の熱源で1次的に熱が伝わる場合には Fig.10 に示すように、伝熱方向にΔXの等間隔で分割しm番目の要素の時間nにおけるおける温度を $U_{m,n}$ とすると次式が成り立つ¹²⁾。

$$\left(\frac{\Delta X^2}{\kappa \Delta t} - 2 \right) U_{m,n} + U_{m+1,n} + U_{m-1,n} = \frac{\Delta X^2}{\kappa \Delta t} U_{m,n+1} \quad (1)$$

ただし、
 Δt : 時間間隔
 ΔX : 要素間隔
 κ : 熱拡散率
 m : 要素番号
 n : 時間
 $U_{m,n}$: m番目の要素の時間nにおける温度
 $U_{m,n+1}$: Δt 時間の終わりにおけるm番目の要素の温度

各要素における温度-時間曲線が得られれば、任意の時刻nおよび時間 Δt 後の時刻n+1の各要素の温度 $U_{m,n}, U_{m+1,n}, U_{m-1,n}$ および $U_{m,n+1}$ を式(1)に代入することによって熱拡散率を求めることができる。ただし、 κ は平均温度 $(U_{m,n} + U_{m,n+1})/2$ における熱拡散率である。試料の熱拡散率の測定結果を Fig.11 に示す。ほぼ一定の値であり、花崗岩

に比べると1/10程度であることがわかる。

続いて低温下における試料の比熱の測定を行った。あらかじめ供試体の質量を測定しておき、断熱ボックスに供試体を入れて液体窒素で冷却した。その後蒸留水を入れた断熱容器に所定の温度に冷却した供試体を投入し、攪拌してその温度変化を測定した。実験に用いた供試体は熱の授受を効率よくさせるため、また、供試体を包む水が適度な温度変化を示すように形と大きさを考慮し、試行錯誤の結果40×40×5mm程度に成形したものをを用いた。なお、降温速度は1°C/min、所定の温度に達してからの保温時間は60分間とした。温度変化を測定した後に、次式を用いて比熱を求めた。

$$c_1 m_1 (t_1 - T) = c_2 m_2 (T - t_2) \quad (2)$$

ただし、
 c_1 : 供試体の比熱
 c_2 : 水の比熱
 m_1 : 供試体の質量
 m_2 : 水の質量
 T : 供試体と水の平衡状態に達した温度
 t_1 : 供試体の所要温度
 t_2 : 水の初期温度

得られた結果を Fig.12 に示す。温度低下に伴いわずかに値が小さくなっており、花崗岩の比熱ともほぼ同様の値であることがわかった。

(3) 熱容量および熱伝導率

次に、前述の比熱および密度の結果より熱容量を求めた結果を Fig.13 に示す。温度変化に関係なく

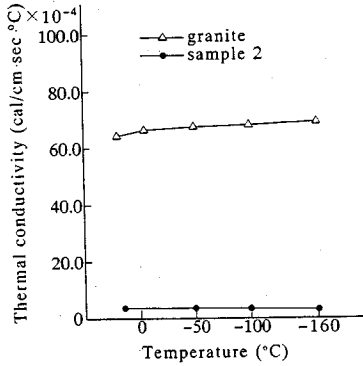


Fig. 14 Thermal conductivity of resin at low temperature.

ほぼ一定の値であり、試料の熱容量は花崗岩よりも小さいことがわかった。先に求めた熱拡散率と熱容量の値を用いて熱伝導率を求めた。結果を Fig. 14 に示す。実用上ほぼ一定とみなせる値であり、花崗岩と比べると 1/10 程度とかなり小さいことがわかる。

4. 空洞周辺岩盤の温度分布

ここでは、Fig. 15 に示す花崗岩岩盤中に設けた空洞の表面に、sample2 のライニングを施し、仕上がり直径を 10m とした空洞内に冷凍食品を貯蔵した場合の空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を要素分割法により求めた。ここでライニングについては通常のトンネルのように荷重をもたせるものではなく、液・冷気漏出防止対策としてのライニングであるので施工は吹付等で行い、厚さは数 mm ~ 1cm 程度で充分であると考えられるが、ここでは低温の影響を受けることや解析にて高分子系材料の挙動を確認し得る厚さを考慮し 3cm および 5cm のライニングを設けることを想定した。空洞内の温度は、食品の冷凍では最も低い温度のマグロの貯蔵に要する -60°C を想定した。Fig. 16 に示すような矩形要素分割を行うと、式 (1) は次式に書き換えられる^{1,2)}。

$$\left[\frac{\Delta X^2}{\kappa \Delta \tau} l_m - l_{m+1} - l_{m-1} \right] U_{m,n} + l_{m+1} U_{m+1} + l_{m-1} U_{m-1} = \frac{\Delta X^2}{\kappa \Delta \tau} l_m U_{m,n+1} \quad (3)$$

ただし、 l_m : m 番目の要素の長さ

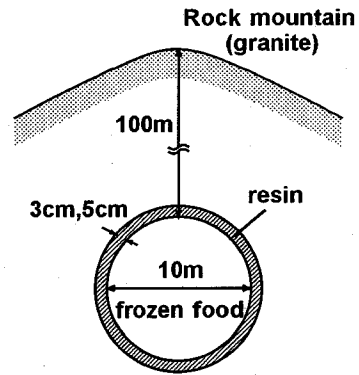


Fig. 15 Opening model used in analysis.

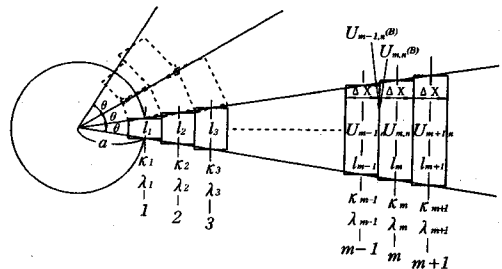


Fig. 16 Illustration of Finite Divided Element Method of two dimensional case.

ここで、sample2 のライニングを空洞表面に設けた場合を想定すると隣接要素が互いに異質な物質が接しているため、いわゆる複合材料問題となるためここでは式 (3) を式 (4) に発展させ複合材料問題として解析を行った^{1,3)}。

$$\left\{ \frac{\Delta X^2}{\kappa_m \Delta \tau} l_m - \frac{\lambda_{m-1}}{\lambda_{m-1} + \lambda_m} (l_{m-1} + l_m) - \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_m + \lambda_{m+1}} (l_m + l_{m+1}) \right\} U_{m,n} + \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_m + \lambda_{m+1}} (l_m + l_{m+1}) U_{m+1,n} + \frac{\lambda_{m-1}}{\lambda_{m-1} + \lambda_m} (l_{m-1} + l_m) U_{m-1,n} = \frac{\Delta X^2}{\kappa \Delta \tau} l_m U_{m,n+1} \quad (4)$$

ただし、 κ_m : m 番目の要素の熱拡散率
 λ_m : m 番目の要素の熱伝導率

sample2 のライニングを空洞表面に 3 cm 設けた場合および 5 cm 設けた場合の結果を Fig. 17(a) ~ (c) に示す。なお、比較のために岩盤のみの温度分

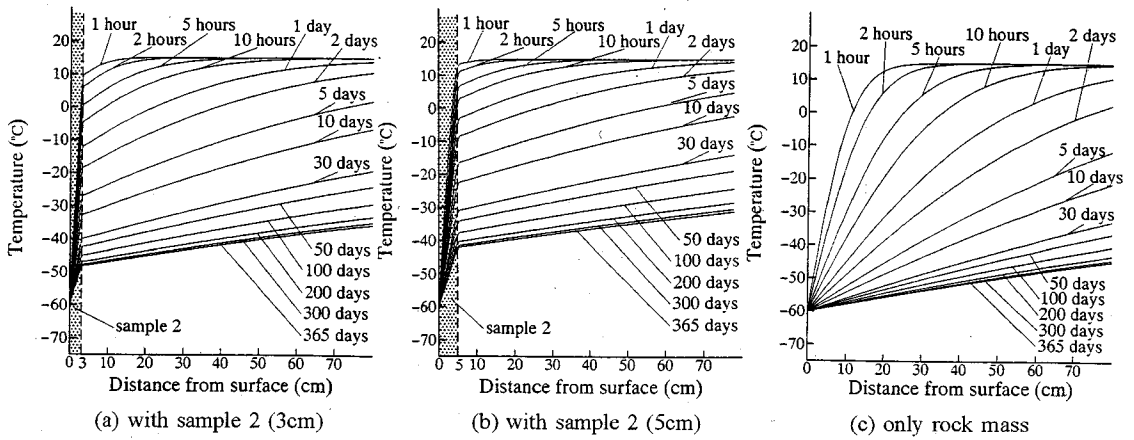


Fig.17 Temperature distribution around opening.

Table 1 Physical properties of granite.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁴	Young's modulus (kgf/cm ²) × 10 ⁶	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Density (kg/cm ³) × 10 ⁻²
20~10		0.494	0.250	-1670.0	79.0	0.269
10~0	0.1510	0.494	0.250	-1670.0	79.0	0.269
0~-10	0.1490	0.495	0.250	-1678.0	95.0	0.269
-10~-20	0.1450	0.495	0.250	-1689.0	104.0	0.269
-20~-30	0.1400	0.496	0.250	-1711.0	111.0	0.269
-30~-40	0.1360	0.496	0.250	-1741.0	116.0	0.269
-40~-50	0.1320	0.497	0.240	-1778.0	121.0	0.269
-50~-60	0.1270	0.497	0.240	-1819.0	124.0	0.269
-60~-70	0.1230	0.498	0.240	-1859.0	127.0	0.269
-70~-80	0.1190	0.498	0.240	-1899.0	129.0	0.270
-80~-90	0.1140	0.499	0.240	-1938.0	132.0	0.270
-90~-100	0.1100	0.499	0.230	-1978.0	133.0	0.270
-100~-110	0.1060	0.500	0.230	-2017.0	135.0	0.270
-110~-120	0.1010	0.500	0.230	-2057.0	137.0	0.270
-120~-130	0.0970	0.501	0.230	-2097.0	138.0	0.270
-130~-140	0.0930	0.501	0.230	-2137.0	140.0	0.270
-140~-150	0.0880	0.501	0.220	-2176.0	142.0	0.270
-150~-160	0.0840	0.502	0.220	-2216.0	143.0	0.270
-160~-170	0.0800	0.502	0.220	-2256.0	145.0	0.270

Table 2 Physical properties of sample 2.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁴	Young's modulus (kgf/cm ²) × 10 ⁴	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Density (kg/cm ³) × 10 ⁻²
20~10		4.814	0.376	-729.4	265.4	0.142
10~0	0.3590	5.019	0.380	-803.6	275.0	0.142
0~-10	0.3590	5.225	0.383	-877.8	284.7	0.142
-10~-20	0.3590	5.430	0.387	-952.0	294.3	0.142
-20~-30	0.3590	5.635	0.391	-1026.2	303.9	0.143
-30~-40	0.3590	5.840	0.394	-1100.4	313.6	0.143
-40~-50	0.3590	6.046	0.398	-1174.6	323.2	0.143
-50~-60	0.3590	6.251	0.402	-1248.8	332.8	0.143
-60~-70	0.3590	6.456	0.405	-1323.0	342.4	0.143
-70~-80	0.3590	6.661	0.409	-1397.3	352.1	0.143
-80~-90	0.3590	6.866	0.413	-1471.5	361.7	0.144
-90~-100	0.3590	7.072	0.416	-1545.7	371.3	0.144
-100~-110	0.3590	7.277	0.420	-1619.9	380.9	0.144
-110~-120	0.3590	7.482	0.424	-1694.1	390.6	0.144
-120~-130	0.3590	7.687	0.427	-1768.3	400.2	0.144
-130~-140	0.3590	7.893	0.431	-1842.5	409.8	0.144
-140~-150	0.3590	8.098	0.435	-1916.7	419.5	0.144
-150~-160	0.3590	8.303	0.438	-1990.9	429.1	0.145
-160~-170	0.3590	8.508	0.442	-2065.1	438.7	0.145

布も示している。いずれも初期の時間には急激な勾配を示しており、空洞周辺にはまだ温度が及んでいないことがわかる。しかし、時間の経過とともにその勾配は緩やかになり、空洞周辺に温度が及んでいくことがうかがえる。

また、空洞表面から同一距離における温度変化は、時間の経過とともに緩慢となり、貯蔵1年後には温度変化が極めて緩慢となる、いわゆる準定常状態となることがわかる。また、sample2のライニングを設けた場合の方が熱伝導に遅れがみられる。これは、sample2の熱拡散率および熱伝導率が花崗岩の1/10程度と小さいことからsample2のライニングを設けた場合の方が熱を岩盤部分に遅く伝えるためと考えられ、ライニングの厚さが3cmの場合と5cmの場合を比較すると5cmの場合の方がより熱伝導に遅れがみられることがわかる。

5. 空洞周辺岩盤の応力分布

本解析では、前述で得られた温度分布をもとに、有限要素法に時間の概念を取り入れ逐次破壊を考慮した亀裂解析法^{4), 14)}を用い、空洞表面に厚さ3cmおよび5cmのsample2のライニングを施した場合の冷凍食品貯蔵時における応力解析を行った。花崗岩およびsample2の物性値については2および3で述べた値をさらに10℃毎に見積もった値を用いて解析を行った。それらをTable 1およびTable 2に示す。まず、ライニングの厚さが3cmの場合の解析結果をFig.18に示す。ただし、図中のライニングの厚さについては実際の縮尺寸法より拡大して示している。解析結果より、冷凍食品を貯蔵した際、まず、熱収縮により空洞周辺岩盤に亀裂が発生しているものの、引張強度が花崗岩に比べて大きいためsample2のライニングは破壊していない。また、時

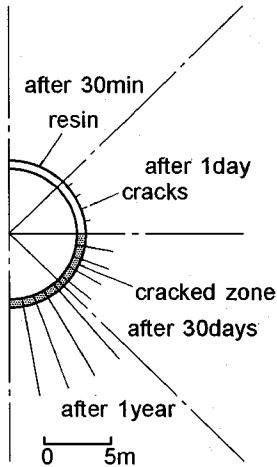


Fig.18 Crack and cracked zone around opening (with sample 2, 3cm).

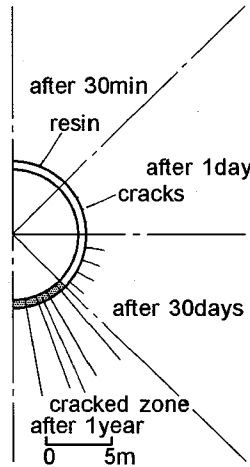


Fig.19 Crack and cracked zone around opening (with sample 2, 5cm).

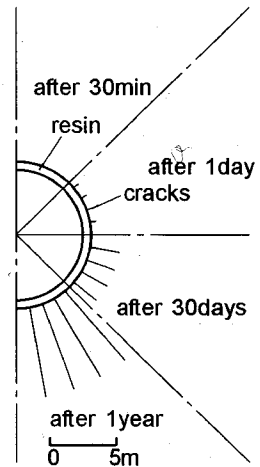
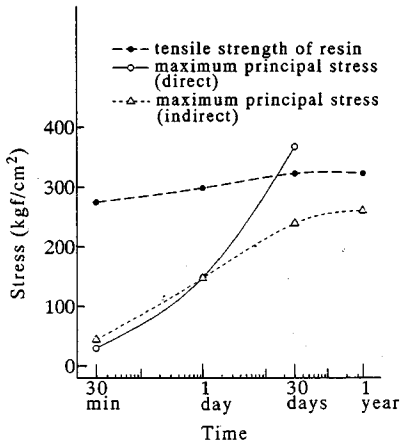
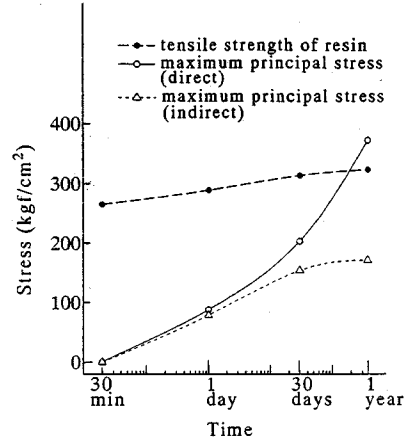


Fig.20 Crack and cracked zone around opening (with sample 2, 3cm, indirect).



(a) sample 2, 3cm



(b) sample 2, 5cm

Fig.21 Maximum principal stress of resin.

間の経過とともに空洞表面に生じた亀裂は空洞周辺に進展し、貯蔵30日後にはライニングが破壊することがわかった。このことよりライニングは岩盤の挙動に大きく影響を受け、破壊したものと考えられる。続いて、ライニングの厚さが5cmの場合の解析結果をFig.19に示す。冷凍食品の貯蔵1年後には、ライニングが破壊しており、ライニングの厚さが3cmの場合よりも時間的に遅れてライニングに亀裂が発生している。これは、ライニングの厚さが厚く、その上3cmの場合よりは熱伝導に遅れがあるため、低温の影響により空洞周辺の岩盤が熱収縮し、見かけの上では空洞は放射状に亀裂を伴い広がる^{15)~17)}という挙動の影響をやや受け難いためであると考えられる。

以上のことから、空洞表面に直接高分子系材料のライニングを設けた場合、高分子系材料は岩盤と密着していることから岩盤の挙動の影響を受け、いずれは破壊することが予想される。さらに、低温の影響を受けた際、岩盤と高分子系材料の挙動に違いがあるため、高分子系材料のライニングが接着面から剥がれることも予想される。そこで、前述の問題点を考慮した施工方法の一つとして、空洞周辺岩盤の挙動の影響を受けずにライニングを施すことについて検討を行った。その施工の一つの方法として、まず、岩盤にコンクリートの吹き付けを行い、さらに成形のため、コンクリートで二次覆工を行った後、防水シート等を施し、その上から高分子系材料の吹き付けを行いライニングを設けることが考えられる。

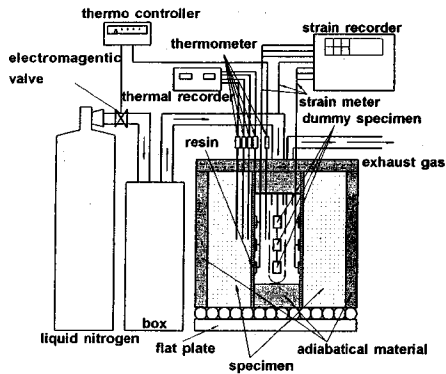


Fig.22 Schematic diagram of the test.

このことにより、高分子系材料のライニングと空洞周辺岩盤は互いに独立しており、高分子系材料のライニングは空洞周辺岩盤の挙動の影響を受けずに安定しているものと推察される。このことを確かめるため、高分子系材料のライニングを岩盤と切り離して設けた場合の冷凍食品貯蔵時を想定した応力解析を行った。すなわち、岩盤とライニングとが共有の接点をもたず互いに自由に挙動できるものとして解析を行った。ライニングの厚さが3cmの場合の解析結果を Fig.20 に示す。Fig.20 より、空洞周辺岩盤は熱収縮により亀裂が発生し、時間の経過とともに進展しているものの、sample2のライニングは貯蔵1年後においても安定していることがわかった。また、ライニングの厚さが5cmの場合も同様の結果が得られた。次に、高分子系材料の最小巻厚についての検討を行った。sample2のライニングを岩盤と密着して設けた場合と切り離して設けた場合についてライニングに生じる水平軸付近(土平付近)の最大主応力の経時変化を比較した。解析結果を Fig.21(a),(b) に示す。冷凍食品の貯蔵1日後までは接着状態による値の差はほとんどみられないものの、1日以降では直接接着させた場合において、ライニングの厚さが3cmの場合および5cmの場合のいずれも、ライニングに生じる最大主応力が高分子系材料の引張強度を超えており破壊に至っている。また、岩盤と切り離してライニングを設けた場合の貯蔵1年後における応力状態を比較すると、ライニングの厚さが5cmの場合の方が3cmの場合より値が小さく、より安定した状態にあることがわかる。このことより、ライニングの厚さが厚いものの方がより安全側にあることが予想されるが、実際の問題としてライニングの厚さを増せば増すほどコストの面からも高価になり得策とは言い難い。このことから、安全性を考慮した最小厚さは今回想定したモデルでは

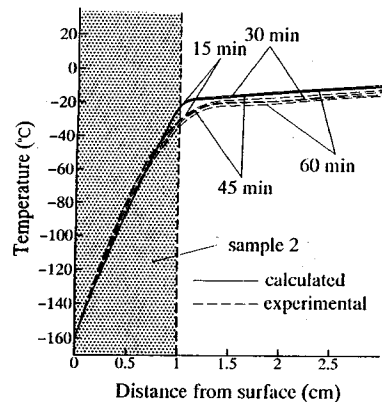


Fig.23 Temperature distribution.

3～5cm程度が最も妥当であるものと考えられる。

6. 室内実験

ここでは、前述の温度分布および応力分布の解析結果の妥当性を検討するため、sample2の層を花崗岩の岩石供試体の孔表面に施した場合について室内実験を行った。本実験は、30×30×30cmの花崗岩の中央にφ11cmの孔を設け孔表面に厚さ1cmのsample2の層を施したものを供試体として用いた。実験装置の概念図を Fig.22 に示す。供試体周囲を断熱材で覆い、外気の影響を受けないようにした。孔周辺には孔壁から5～30mmの距離に5mm間隔で直径2mm、深さ50mmの孔を設け、直径1mmの熱電対を挿入し孔壁の熱源側に接触させ、隙間は岩粉を詰めた。これにより時間の経過に伴う温度分布を測定した。液体窒素を用いて孔に冷気を送り込み、実験開始から終了まで絶えず冷気を流すようにし、一定の温度を保ちつつ実験を行った。また、sample2の層の表面にひずみゲージを接着し、時間の経過に伴う層の表面のひずみの変化も測定した。底面が熱収縮によって変位する際の摩擦の影響を受けないように供試体底面には鋼球を敷き詰めた。温度分布の実測値と解析値を比較したものを Fig.23 に示す。実測値と解析値はほぼ同様の値であり、時間の経過とともに孔周辺に温度が及んでいくことがわかる。また、sample2の層を境界として勾配が変わっており、空洞モデルの解析結果と同様の傾向を示している。続いてsample2の層の表面のひずみの実測値と解析値を比較したものを Fig.24 に示す。時間の経過とともに値が上昇しており、層が広がっていることがわかる。これは、sample2の層と花崗岩が密着しているため低温の影響を受けsample2の層が収縮する際、接着面に向かって収縮したことに

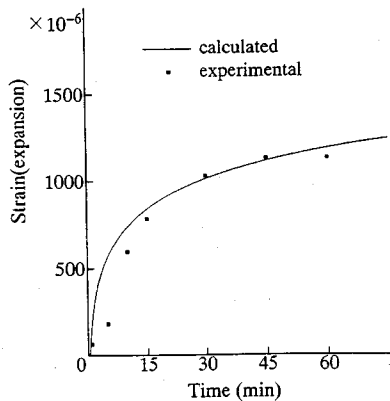


Fig.24 Strain of surface of resin (direct).

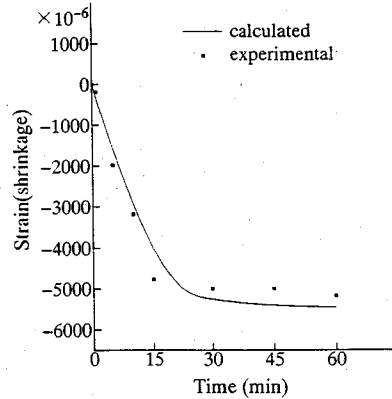


Fig.25 Strain of surface of resin (indirect).

よるものと考えられる。

次に、花崗岩と sample2 の層を切り離して孔表面に施した場合の層の表面のひずみの実測値と解析値を比較したものを Fig.25 に示す。Fig.25 より時間の経過に伴い層が収縮しており、sample2 の層が花崗岩から完全に独立しているため、低温の影響を受け層が収縮したことがうかがえる。このことから、高分子系材料の層は岩石との接着状態によりその挙動が大きく異なることが確かめられた。

本実験により、先に述べた空洞モデルの温度分布および応力分布の解析結果の妥当性が確認でき、低温物質貯蔵時における液漏れおよび冷気漏れ対策として高分子系材料のライニングを岩盤と切り離して設けることが、適当であることがわかった。

7. 結 言

本研究では、地山岩盤内空洞に低温物質を貯蔵した場合の液漏れおよび冷気漏れ対策として空洞表面に高分子系材料のライニングを設けることを提案し、解析によりライニングの安定性について検討を行った。また、室内実験を行い解析結果の妥当性を確かめた。本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 低温下における高分子系材料の圧縮強度および引張強度は温度低下とともに上昇する。接線弾性係数も温度低下とともに上昇するが接線弾性係数自体は花崗岩に比べてかなり小さい。

(2) 低温下における高分子系材料のひずみは花崗岩よりもかなり大きく、ガラスフレークを混入することによりひずみは抑制される。また、熱拡散率および熱伝導率は花崗岩の 1/10 程度とかなり小さい。

(3) 高分子系材料のライニングを岩盤と切り離して設けることにより、液漏れおよび冷気漏れ対策になり得るものと考えられる。

(4) 室内実験による温度分布とひずみの値は解析の結果とほぼ同様の値であり、空洞モデルの解析結果の妥当性を確認することができた。

参考文献

- 1) (財)矢野恒太郎記念会：日本国勢図会，p.144，国勢社，1995.
- 2) 前掲 1) p.317.
- 3) 稲田善紀：地下の空間利用，pp.70-79，森北出版，1989.
- 4) 稲田善紀，谷口浩二：液化天然ガスの地下岩盤内空洞貯蔵による空洞周辺の塑性領域，日本鉱業会誌，Vol.103，No.1192，pp.365-372，1987.
- 5) 稲田善紀，甲村雄一，藤原育都：低温物質の地山岩盤内貯蔵時における亀裂からの液漏れおよび冷気漏れ対策に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.445/III-18，pp.65-73，1992.
- 6) 稲田善紀，八木則男：低温の影響を受けた岩石の力学特性，材料，Vol.28，No.313，pp.979-985，1979.
- 7) Y.Inada and K.Yokota: Some Studies of Low Temperature Rock Strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, No.3, pp.145-153, 1984.
- 8) 山口梅太郎，宮崎道雄：熱による岩石の変化あるいは破壊について，日本鉱業会誌，Vol.86，No.986，pp.347-348，1970.
- 9) 稲田善紀，利藤房男：極低温が高分子系岩盤接着剤に及ぼす影響，愛媛大学工学部紀要，Vol.10，No.1，pp.343-350，1982.
- 10) 稲田善紀，寺田孚，伊藤一郎：岩石の線膨張係数について，水曜会誌，Vol.17，No.5，pp.200-203，1971.
- 11) 前掲 3) pp.101-103.

- 12) 前掲 3) pp.97-99.
- 13) 稲田善紀, 木下尚樹, 関正造, 兵頭学: 低温物質貯蔵時の断熱材による熱応力軽減の効果, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集第 3 部 (B), pp.1368-1369, 1995.
- 14) 前掲 3) pp.118-119.
- 15) 前掲 3) pp.112-127.
- 16) 稲田善紀: 地下・地下・地下! ,pp.142-147, 森北出版, 1992.
- 17) 稲田善紀, 木下尚樹, 関正造, 松尾暁, 成行惇, 越智健三: 低温の影響を受けた空洞周辺岩盤の熱的挙動に関する一二の知見, 土木学会論文集, No.547/ III -36, pp.211-220, 1996.

(1996. 4. 9 受付)

APPLICATION OF RESIN LINING SYSTEM FOR COUNTERMEASURES FOR PREVENTING LEAKAGE FROM OPENINGS IN LOW TEMPERATURE MATERIALS STORAGE

Yoshinori INADA and Shozo SEKI

In the case of low temperature materials storage in openings excavated in rock mountain, such as LNG, LPG and frozen food etc., cracks occurs around openings by shrinkage of rock mass have been shown. Also in the cases a "water curtain system" and an "ice lining system" for countermeasure for preventing leakage of gas and liquid from the openings have been proposed. In this study, as another method a "resin lining system" was proposed, physical properties of resin at low temperature were obtained by the test. From the results of the stress analysis using these value, it was found that by the lining of resin make independent with rock, that is the "resin lining system" is an effective way to prevent leakage of gas and liquid from the openings.

大好評！ パソコン用土木構造解析シリーズ

ツージー フロー

お待たせしました！
ソフトブレインが送る
浸透流解析システム。

2D-Flow

Copyright © SOFTRAIN Co., Ltd.

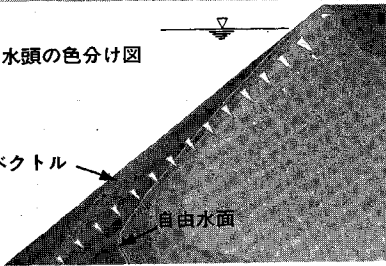
新登場！

それぞれ無料体験版を
ご用意しております。

圧力水頭の色分け図

流速ベクトル

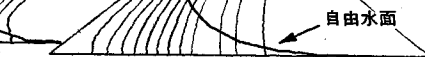
自由水面



Step:1 time:1.000000

Step:4 time:10.000000

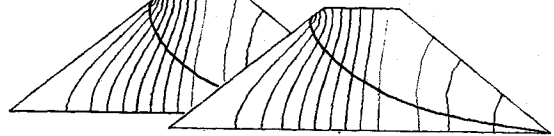
時間ステップ毎の
全水頭コンター図



自由水面

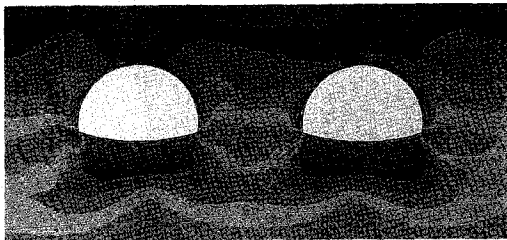
Step:6 time:20.000000

Step:8 time:30.000000



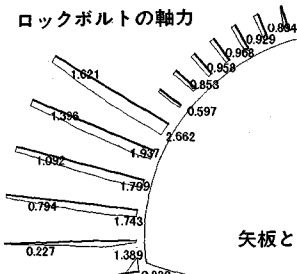
- 複雑な図面入力も、内蔵CADで簡単に！
- 工学的な条件は、画面上でビジュアルに！
- 解析結果も、画面上で手に取るように！

2D-6 for Windows

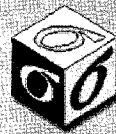


トンネル周辺の応力

ロックボルトの軸力



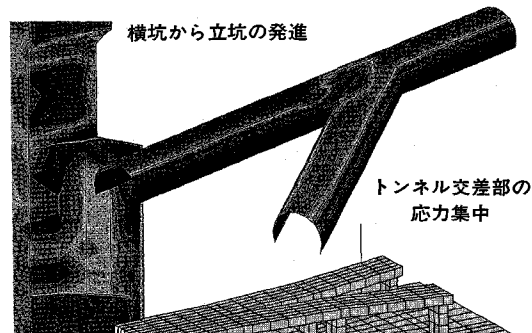
矢板と接触面の滑り



3D-6

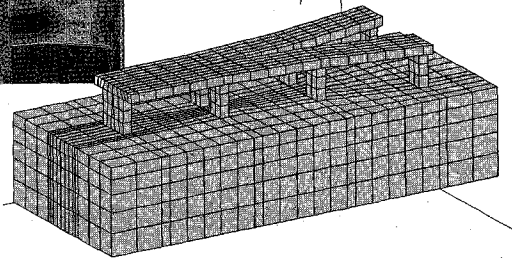
Copyright © SOFTRAIN Co., Ltd.

横坑から立坑の発進



トンネル交差部の
応力集中

高架橋合流部分のメッシュ図



- 有限要素の概念は表に出ない、誰にでも使えるシステム。
- 膨大な解析容量と高速解析。5千節点は2、3分で完了。
- CADやワープロ、編集機能を内蔵。報告書作成までOK。

- 強力な3次元表示機能を豊富に実装。表示を自在設定。
- 要素や節点等の有限要素の概念に触れる必要は無し。
- 数万節点でも解析可能。6千節点に2時間の高速解析。

対応 OS: MS-Windows 95/NT3.51



ソフトブレイン株式会社 お問合せは **03-5695-1009**

本社：〒001 札幌市北区北37条西4丁目王陽ビル
東京営業所：〒103 東京都中央区日本橋茅場町3-8-5 308ビル

TEL:011-736-7009 FAX:011-736-7449
TEL:03-3663-7009 FAX:03-3663-7008

地盤の非線形解析プログラム

■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)

FLAC-2D/3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua)

- 幾何学的大変形及び材料非線形を取り扱うことができます。陽解法のため歪み軟化解析が容易です。
- 複雑な3次元地盤をモデル化するため、優れたジェネレーター機能をそなえています。
- 機能追加のための開発ツールFISHプログラミング言語を備えていますので、機能追加が容易です。

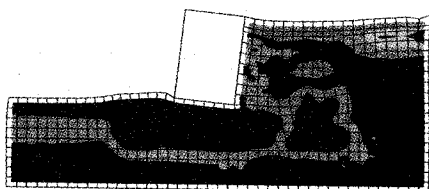
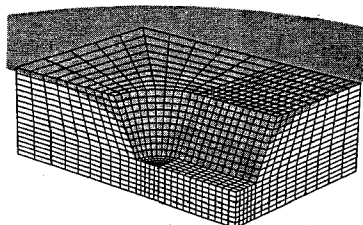
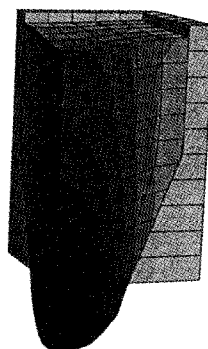


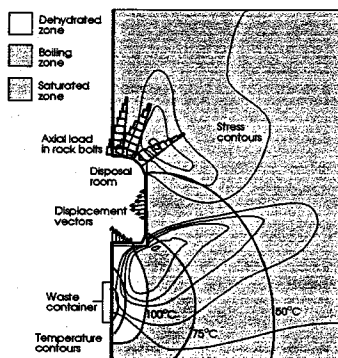
Figure 2. Distorted grid and contours of pore pressure ratio after shaking at base



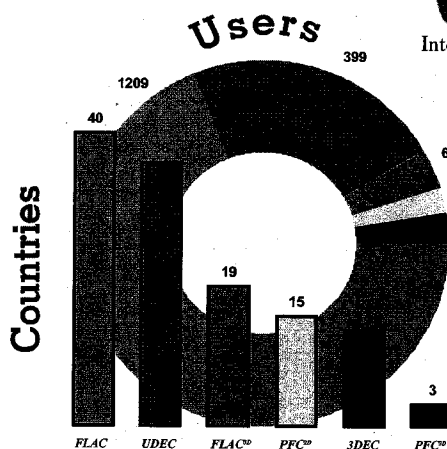
Water flow analysis



Interaction analysis



Thermomechanical conditions five years after nuclear waste emplacement.



■価格(ロード・モジュール)

- FLAC-2D SUN/IBM-PC(標準バージョン).....90万円
(Dynamic, Creep, Thermal Optionを含む場合).....140万円
- FLAC-3D SUN/IBM-PC(標準バージョン).....190万円
(Dynamic, Creep, Thermal Optionを含む場合).....250万円

Itasca Software & Windows 95

Yes, Itasca codes do run under Microsoft Windows95. *Windowsは米国マイクロソフト社の商標です。

*当社は1988年7月からITASCA社の販売代理店をしています。

OKL 株式会社 応用工学研究室

TEL.03-3437-2164 FAX.03-3437-2652
〒105 東京都港区虎ノ門5-1-4 東都ビル6F
株システムネットワーク内

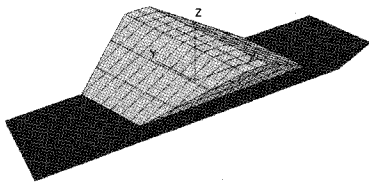


Figure 1. Grid for earth dam and foundation

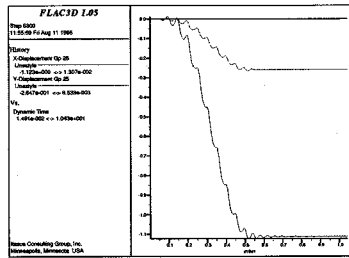


Figure 2. Displacement records (in x- and y-directions) at crest of dam

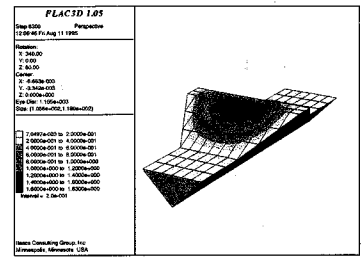
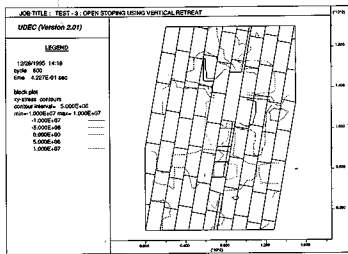


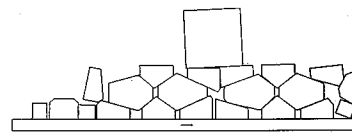
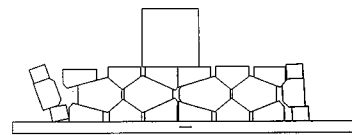
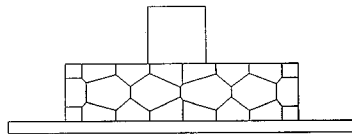
Figure 3. Contours of final displacement magnitude

Dynamic analysis

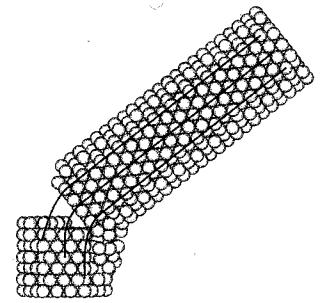
個別要素法プログラムシリーズ



UDEC

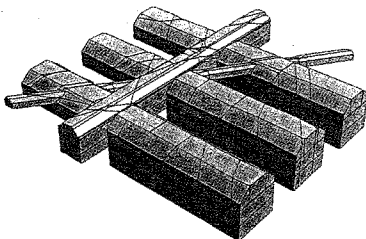


BFLOW

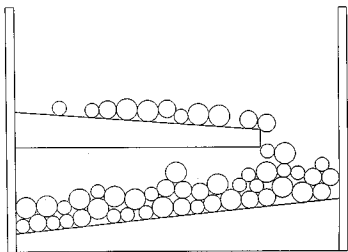


Toppling of pier after horizontal crack forms near base, (reinforcement has pulled out of concrete)

PFC-3D



3DEC



BALL-Poly

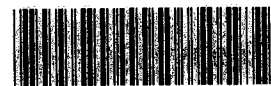
■価格

●ロード・モジュール

- UDEC 3.0 Version SUN.....140万円
- IBM-PC.....130万円
- Barton-Bandis Option.....45万円
- 3DEC SUN/IBM-PC550万円
- PFC-2D SUN/IBM-PC70万円
- PFC-3D SUN/IBM-PC250万円

※尚、UDEC 3.0 Version以前のVersionをお持ちの方は、本Versionに限りソース・コードを提供します。

日本技術開発株式会社



◆FLAC、個別要素法コードとも導入時に移植費等の追加料金はありません。将初期購入価格の10~15%程度です。但し、比較的開発の新しいPFC-3Dを除き
◆当社ではこれらソフトによる解析コンサルタント、問題に応じた機能追加も行っ

CIVAS; Civil Engineering Analysis Service

CRC総研がお届けする土木・建設分野向けサービス

地盤解析には 3次元地盤FEM解析プログラム for Windows®

Mr.SOIL-3D 95



[Mr.SOIL-3D for Windows 95]
[トンネル掘削による主応力コンター図]

450本を超える販売実績をもつ地盤FEM解析の定番ソフトです。3D解析を可能にしており、FEM解析初心者でも、使い易い3Dプリポストプロセッサも完備。もちろん2D解析も可能で非線形弾性解析(電中研法、Duncan-Chang法)、弾塑性解析(歪み軟化、硬化)等の多岐にわたる解析が選択できます。ステップ解析機能を有し、施工順序に従って地盤の挙動を把握できます。

'97.1 リリース

'96.9 リリース

地下水解析には 広域地下水変動解析プログラム for Windows®

PC/UNISSF 95



[UNISSF for Windows 95]
[掘削に伴う水位低下コンターと流速ベクトル図]

データ作成、結果の表示等のFEM解析に必要な諸作業がすべてマウスで行える強力なプリポスト機能を備えた浸透流解析ソフトです。準3次元解析版と断面2次元解析版があります。工事施工時の周辺地下水影響解析等の定常/非定常解析が可能です。降雨・揚水井・浸出面が取り扱え、水位・流量の経時変化に加え、浸出点の位置、流量を求めることができます。

実力の解析ツール群 続々登場!

連成解析には 応力・浸透・熱連成解析プログラム for Windows®

CONHEAT 95



[CONHEAT for Windows 95]
[地中温排水パイプ周りの温度と流速分布図]

圧密解析から、応力・浸透・熱の連成問題まで解析が可能な2次元FEM解析ソフトです。多段階掘削・盛土や降雨条件が扱え、経時観測記録より、変形・透水係数を逆解析で求めることができます。弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤に適用でき、凍結についても適用可能です。プリポスト完備で優れたユーザーインターフェースを実現しています。

'96.11 リリース

'96.11 リリース

地質解析には 3次元地質解析プログラム for Windows®

GEORAMA 95



[GEORAMA for Windows 95]
[3次元地質モデル図]

EWS版で好評を得た3D地質解析ソフトのWindows95対応版です。地形データやボーリングデータ等の情報から地質面を3次元的に推定後、3D地質モデルを構築し、任意断面及び、3Dの各種地質関連断面を出力表示します。人手に頼っていた地質図作成、地質モデルデータベース管理等に大幅なコストダウンをもたらします。計画立案等のプレゼンテーションを強力にサポートします。

㈱CRC設計企業

CRC

株式会社 **CRC総合研究所**

東京本社

〒136 東京都江東区南砂 2-7-5
科学システム事業部 営業第1部
TEL:03-5634-5790 FAX:03-5634-7337

西日本事業部

〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3
西日本事業部 科学システム営業部
TEL:06-241-4730 FAX:06-241-4136

新製品リリース時に発売キャンペーンを実施!
キャンペーン期間中、新規ユーザー向け特別価格
&旧バージョンユーザー向け優待価格を設定。
また、上記プログラムを用いての受託解析サービスも展開。詳しくは左記までお問合わせください。

- 掲載の社名・製品名・ロゴは各社の各面での商標・登録商標です。
- UNISSFは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発した製品です。
- 製品の仕様・価格は将来予告なしに変更することがあります。