

(39) 変位制約を受ける地下空洞の形状最適化について

SHAPE OPTIMIZATION OF UNDERGROUND SPACE FOR STORING SUBJECT TO DISPLACEMENTS

長谷川 明¹

Akira HASEGAWA

The optimum shape of an underground space to store is studied. When we assume that the space has such form as a long straight tunnel which section is uniform along the longitudinal direction, the section area of the space is required to be maximized under some constraints, taking the purpose of the space into account. In these analysis, we must generally consider many constraints such as stresses, displacements and relaxation of rock. In this paper, two fundamental examples of shape optimization constrained by displacements of the surface of the space after the excavation are described for a simple consideration.

Key Words: Shape optimization, Underground space, Displacements, SLP, FEM

1 はじめに

地下空間は、その建設に優れた掘削技術と多額の建設費を必要とするにも関わらず、地上空間に比べ安全性が高いこと、地上構造物と共存できること、周辺景観への影響が少ないことなどの理由により、原油等の貯蔵施設、地下鉄等の交通施設、発電所等のエネルギー施設、上下水道等の処理施設等の種々の目的に利用されている。特に近年は、都市地上の過密化、人工集中あるいは地下高騰の社会的背景と、掘削技術の開発により、社会資本の代替空間として、地下空間の利用が拡大している。本論では、これらの空洞の中で、岩盤内に建設される石油備蓄タンクのように貯蔵を目的として建設される地下空洞を対象としている。この施設が地下空間に設けられる理由は、地下水圧により原油の流出の危険性が少ない、周辺地域での事故や災害の影響を受けにくい、また周辺環境への影響が少ないことが大きい理由となっている。

このような地下空洞は、空洞を掘削することにより、周辺地盤に対して応力や変位などの力学的変化を与えるが、その影響はできるだけ少ないように建設することが安全のために期待されると考えられる。一方、貯蔵の目的を満足させるためには、地下空洞の容積をできるだけ大きくしたい要求がある。地下空洞は、通常かまぼこ形をしており、容積の拡大は、本論では断面積の拡大を意味することと考える。したがって、貯蔵を目的とした地下空洞では応力や変位などの力学的な変化が少ない条件のもとで、断面積を最大化したいという最適化問題が発生する。本論は、このような見地から、貯蔵を目的とする地下空洞について、その空洞の形と周

¹工博 八戸工業大学工学部土木工学科 (〒031 八戸市妙字大開88-1)

辺地盤へ与える力学的影響の関係を考察する。特に空洞掘削による空洞周辺の変位に着目し、この変位と空洞形状の関連を調べ、変位拘束を受け空洞断面積を最大とする形状を、逐次線形計画法で求め考察する。

なお、地下空洞の掘削に伴う力学的挙動の解析には、岩盤の異方性、節理、掘削による岩盤の緩みの発生また段階的な掘削等、多数の項目を考慮する必要があるが、本論では岩盤を単純化し、岩盤は等方弾性体であり、掘削による緩みは発生しないものとして解析している。

2 掘削後の変形解析

解析モデルは、これまでに建設された地下空洞を例とし、図-1に示すように、岩盤内の地下150mの位置を中心に空洞が掘削されるものと考え、岩盤はヤング率 $E=1.0\times10^5\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、単位体積重量 $\gamma=2.6\text{tf/m}^3$ の平面ひずみ状態の等方弾性体とした。空洞は、左右対称な断面を考え、解析した範囲は右半分の、図-1(a)の斜線部である。空洞掘削後に発生する変位は、1)図-1(b)に示す解析領域の自重と領域上部の土被り圧による初期応力解析、2)掘削により空洞部分の応力が解放されるので、その影響を上記1)で求めた空洞部分の応力を空洞周辺に逆方向に作用させる、の2回の有限要素解析で計算する。

地下空洞の形状と掘削による空洞周辺の変位との関係を調べるため、同一面積を有する長方形断面と楕円断面について検討した。

1)長方形断面：図-2は幅 a と高さ b の比が1:1.6, 1:1, 1.6:1の3ケースの長方形断面の空洞周辺の変位を比較した図である。天端中央の鉛直変位 d_1 、側壁中央の水平変位 d_2 および底盤部中央の鉛直変位 d_3 を比較すると、天端中央の鉛直変位と底盤部中央の鉛直変位は縦長な長方形とすると低下するが、側壁中央水平変位は横長な長方形とすると低下している。

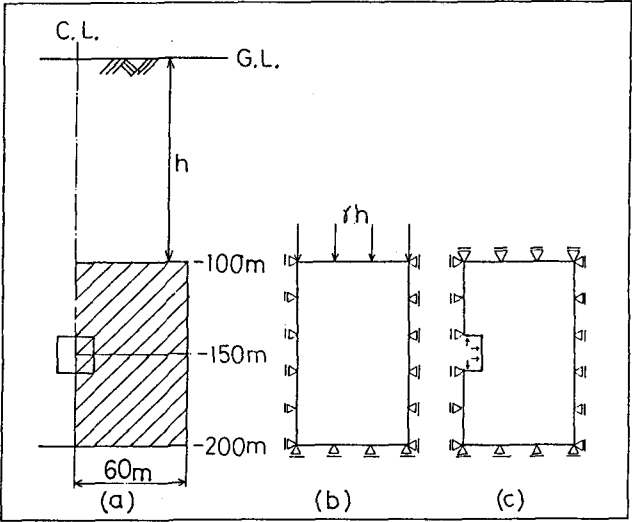


図-1 解析領域と解析手法

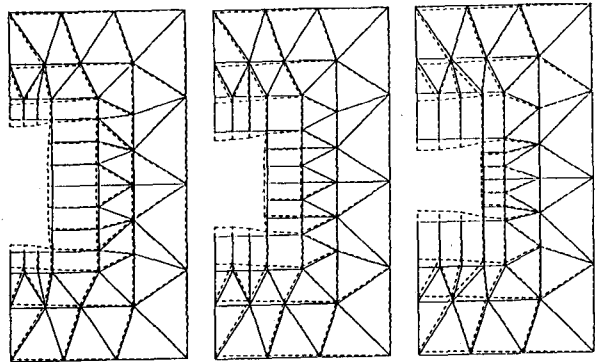


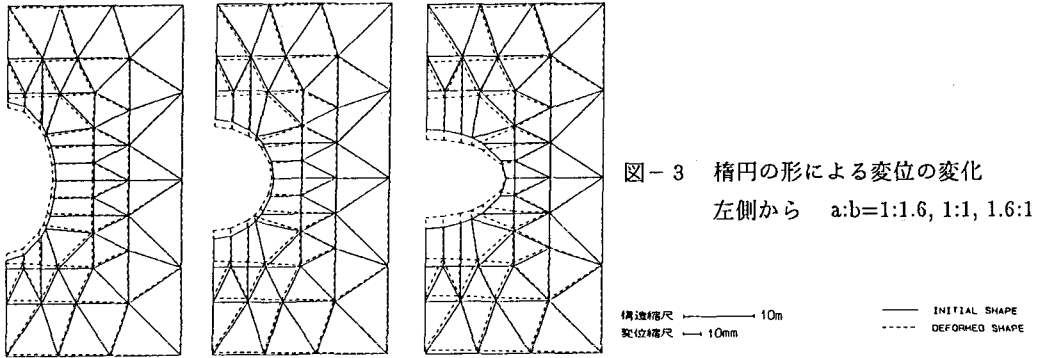
図-2 長方形の形による変位の変化
左側から a:b=1:1.6, 1:1, 1.6:1

構造縮尺 10m
変位縮尺 10mm

—— INITIAL SHAPE
----- DEFORMED SHAPE

2) 楕円断面：長方形断面と同様の同一の断面積を有し、水平軸 a と鉛直軸 b の比が異なる楕円空洞の掘削後の変位を計算した。図-3 は変位の形の違いによる変化を示したものである。この図から天端中央の鉛直変位と底盤部中央の鉛直変位は縦長な楕円とすると小さい値となり、逆に側壁の水平変位 d_3 は、大きい値となることが示されている。

このように同じ断面積を有する空洞でも、形によって掘削後の変位が大きく異なっていることが示されている。貯蔵を目的とする空洞の場合には、掘削後の空洞周辺に与える力学的挙動をできるだけ小さくしながら空洞の断面積を大きく取りたい要求が考えられ、形の検討が必要となる。



3 地下空洞の形状最適化

3.1 変位を拘束された最適空洞形状

ここでは岩盤タンクのような貯蔵を目的とした空洞の最適形状を検討しており、目的関数は空洞の断面積とし、これを最大化する問題と考えている。初期形状としては図-2 中央に示した正方形断面を与え、制約した変位は天端中央の鉛直変位、側壁中央の水平変位および底盤部中央の鉛直変位の3変位で、その許容値は正方形断面の時の各変位とした。設計変数は、天端周辺の鉛直座標(3座標)を選んだ。したがって、本最適化問題は次のように定式化される。

目的関数： 空洞面積 $A \rightarrow \max.$

制約条件： 変位 $d_i \quad d_{al} \leq d_i \leq d_{au} \quad (i = 1, \dots, m)$

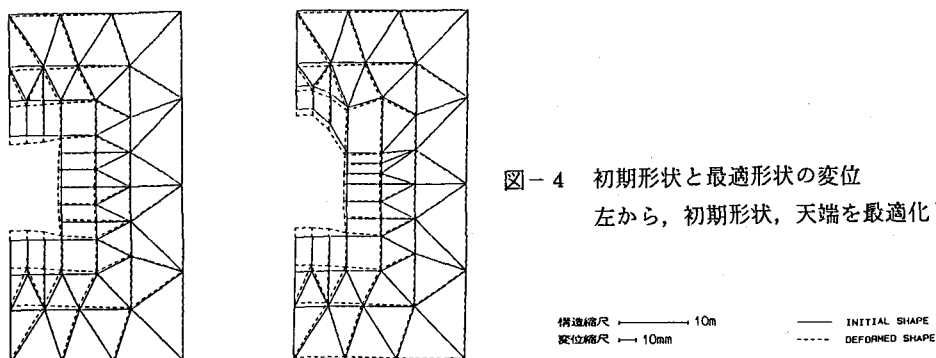
設計変数： 座標 $X_j \quad X_j \quad (j = 1, \dots, n)$

ここで、 d_{au}, d_{al} はそれぞれ許容変位の上限、下限値であり、 m, n はそれぞれ制約される変位条件の数、設計座標の数である。

本最適化問題は、非線形最適化問題であるため、これを線形最適化を繰り返して解く逐次線形計画法を使って最適化した。

図-4 に天端を改善した場合の最適形状とその空洞周辺変位を示す。これによると、最適形状は天端を斜めにして、空洞全体が長方形の上に三角形がある形をなし、このとき目的関数である空洞断面積を10%増大させることができることが示されている。最適化された形状の空洞掘削時の変位を調べると、側壁中央の水平変位が制約条件値と一致しアクティブな制約となっており、他の2条件に対しては余裕のある設計となっている。

なお、この計算は空洞の中心深度が地下150mの場合の最適形状である。同様の天端形状を最適化させる形状最適化計算を空洞中心深度を変えて行った結果、空洞中心深度に関係なく側壁中央水平変位がアクティブな制約となるため、同一の形状が最適形状として得られた。



3.2 掘削後の変位を最小化する楕円型最適空洞形状

最適化される形状は、空洞の上半分と下半分が異なる縦横比 b/a の半楕円をなす図-5に示す形とした。

上半と下半の縦横比 b_1/a と b_2/a による天端鉛直変位 (d_1)、側壁中央水平変位 (d_2) および底盤鉛直変位 (d_3) の3変位の等値線を描くことにより、次のことが示されている。

- 1) 天端鉛直変位 (d_1) は、上半分の b/a に大きく影響を受け、 b_1/a が大きくなると変位は小さい値をとる。下半分の b_2/a は、この変位に対してあまり影響を与えない。
- 2) 逆に底盤鉛直変位 (d_3) は上半分の b/a よりも下半分の b/a の影響を大きく受け、この値が大きくなると変位は小さくなる。
- 3) 側壁中央水平変位 (d_2) は、上半分と下半分の b/a によってほぼ同様に変化し、両者が大きくなって空洞が鉛直方向に長くなると変位は大きくなる。

ここでは、これらの天端中央鉛直変位 (d_1)、側壁中央水平変位 (d_2) および底盤中央鉛直変位 (d_3) のいずれもが小さな変位となる形状を求める計算を行った。ただし、空洞の断面積は同一 ($A = 225\text{m}^2$) であり、縦横比 b/a は上半、下半も掘削を考慮して、 $1/3 < b/a < 3$ としている。すなわち、本設計問題は次のように定式化される。

目的関数: $\max(d_1, d_2, d_3) \rightarrow \min.$

制約条件: $1/3 < b_1/a < 3$

$1/3 < b_2/a < 3$

断面積は一定

設計変数: $b_1/a, b_2/a$

図-6に空洞中心深度が50m、150mおよび500mの時、得られた最適形状を示す。3変位の最大値が最小となる最適形状は、空洞中心深度が地下150mの時は、鉛直方向に長く、特に下半分が縦長な形が選ばれている。この時、3変位は絶対値で $d_1 = 2.2\text{mm}$, $d_2 = d_3 = 2.6\text{mm}$ であった。このような形が選ばれる理由について検討する。はじめに、空洞が縦長となるのは、大きな変位を発生させている天端中央と底盤中央の鉛直変位を小さくするためであって、その縦長の限界は与えられた上限値である場合もあるが、縦に長くなるにつれて側壁中央水平変位が増大し、この変位が3変位の中で最大となるからである。つぎに、鉛直変位は初期地圧が深度に比例していることから上下対称な空洞断面では底盤側の方が大きい値となっており、下半分の楕円を上半分の楕円に比べ縦長となるように選択されている。

また、図-6 (a), (c) は、それぞれ空洞中心深度が地下50m, 500mの最適形状を示している。(a)の地下50mの場合は、空洞形状は設計変数の上限値となっている。500mの場合には(b)に比べ縦長の程度が小さい。これは、空洞中心深度が深くなると、空洞上部と下部の初期地圧の相対的な差が少なくなるため、これにともなって変位の天端部、底盤部の相対的な差は少なくなり、最適形状も上半分と下半分の楕円の b/a が近い値を選ぶものと考えられる。

なお、空洞中心深度が500mの場合、最適形状の3変位は約8.2mmとなって一致している。深度が50m, 150mの時は最適形状の空洞寸法が制約条件として与えた限界の寸法比となっているため、このような3変位の一致は見られなかった。

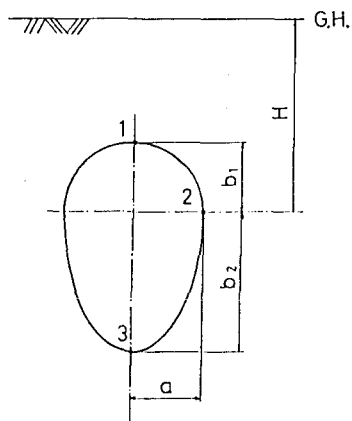


図-5 上下に2つの半楕円を使った空洞モデル

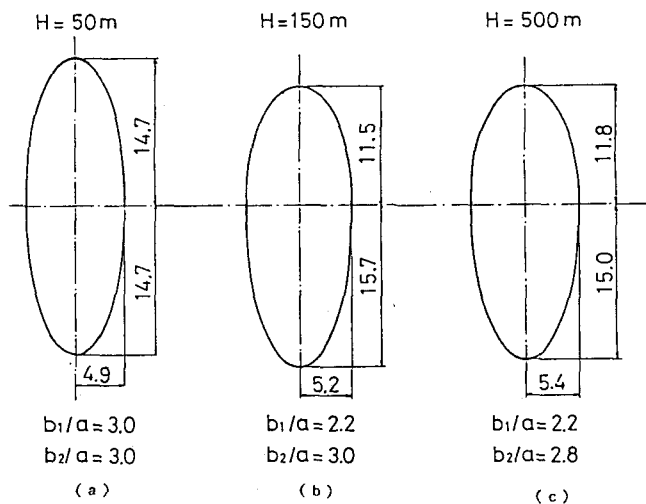


図-6 空洞中心深度による最適空洞形状の変化(寸法の単位はm)

左から深度が50m, 150m および 500m

空洞断面積はいずれも 225m^2

4 おわりに

本論は連続構造の形状最適化の具体的な事例として、岩盤タンクなどに利用される地下空洞の形状に注目し、その形状と力学的な変化ここでは変位との関係について考察したものである。扱った解析モデルが弾性体であること、限られた範囲の形での検討であること、あるいは最適化での制約が変位だけであることなど多くの課題を残しているが、本研究により次の結論を得た。

- 1) 同一面積を有する空洞を正方形断面と円断面とした場合で比較すると、円の方が変位が少ない。
- 2) 空洞断面が長方形、楕円の如何に関わらず、大きな変位は天端中央の鉛直変位、側壁中央の水平変位および底盤中央の鉛直変位である。
- 3) このうち、天端と底盤の中央の鉛直変位は、長方形でも楕円でも縦長の形状とすると減少させることができるが、逆に側壁水平変位は増大する。
- 4) 正方形断面を初期形状とし、そのときの天端中央の鉛直変位、側壁中央の水平変位および底盤中央の鉛直変位を許容値として変位制約を与え、空洞面積を最大化する最適化計算から、天端の形状を改善すると、10%の面積拡大ができる。この時アクティブな制約条件は側壁中央の水平変位であった。
- 5) 空洞周辺の天端中央の鉛直変位、側壁中央の水平変位および底盤中央の鉛直変位の3変位の最大値を最小化する形状を、空洞の上半と下半が異なる半楕円で最適化すると、空洞は鉛直方向に縦長の形となり、しかも下半の方がより縦長な形となることが示された。

本研究で得られた最適形状は一例であって、今後は応力制約をも取り入れた形状最適化、設計変数として多くの節点座標を扱う最適化あるいは形状表現に曲線関数を利用した効率的な形状最適化などの検討が必要と考えている。また、本解析は掘削される岩盤を等方性弾性地盤として扱っており、岩盤内の節理、掘削に伴う岩盤の緩み等が考慮されていない。今後は、これらの事項についても検討の必要がある。

謝辞：末筆ながら本研究を進めるに当たってご指導頂いた、東北学院大学佐武正雄教授、東北大学岸野佑次助教授、山口大学古川浩平教授、清水建設技術研究所田蔵隆氏、清水勝美氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 関本道尚：石油備蓄技術の現状と特色，土木学会誌 1980.3, PP.20-25, 1980
- 2) 佐藤邦明：燃料岩盤地下備蓄の現状とその水封．気密機能，土木学会誌 1989.9，pp.48-54, 1985
- 3) 桜井俊男：石油備蓄菊間実証プラントについて，土と基礎, 29-1(276), pp.15-22, 1981
- 4) 高橋由己，竹田一仁，世一英俊：地下発電所工事における掘削時の空洞側壁部の変形管理について，土と基礎，30-11(298), pp.41-47, 1982