海洋開発論文集， 第24巻， 2008年7月

深く埋設されたアンカー用係留ラインの海底地盤による張力や形状に及ぼす影響

EFFCTS OF SEA BED SOIL STRENGTH ON THE ATTITUDE AND TENSION DISTRIBUTION OF A MOORING LINE CONNECTED TO A DEEPLY BURIED ANCHOR

関田欣治[1]・北勝利[1]・大久保寛[2]
Kinji SEKITA, Kazutoshi KITA and Hiroshi OKUBO

[1]正会員　工博　東海大学　海洋建設工学科（〒424-8610静岡市清水区折戸3-20-1）
[2]正会員　新日鉄ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ（株）海洋エネルギー部（〒229-1131神奈川県相模原市西橋本5-9-1）

For floating structures in deep sea, tout mooring is used rather than conventional catenary mooring, together with high holding anchors such as a plate like vertical loaded anchor or a suction pile and so on. While these anchors are deeply installed under sea bed, friction or adhesion and earth pressure act on a ground line laid under the sea bed. As a result, the attitude and tension induced in the buried ground line may be influenced. It becomes more important in mooring design, deeper an anchor is installed. So, we proposed a mooring design method for the line from an anchor undergrounded in clay or sand stratum to a floating unit. The paper describes the effects of soil strength, submerged weight of the line and mooring positions on the shape and tension distribution of the line quantitatively.

Key Words : *Mooring design method, soil strength, buried line, adhesion, anchor-mooring system*

1．緒言

最近，メキシコ湾やブラジル沖などの1,000mを超える大水深で石油開発のための浮体が設置されてきている．また，わが国周辺の海域でも風力や水流発電施設を搭載するための浮体式プラットフォームの研究がなされている．大水深での係留は，従来のカテナリーと言われる緩係留よりも，海底地盤に設置される平板アンカー，落下式杭やサクション杭等の引抜き抵抗のあるアンカーと組合せたトート係留が多く使用されている．これは，海中の一部に合成繊維や鋼索を用いることでライン長をできるだけ短く抑え経済的な係留を実現しようとするものである．トート係留においては，海底での係留ラインの立上角が数10°と大きく，アンカーとの結合点の深さも海底面下数10mにもなり，係留設計上ラインと周囲の土との相互作用を無視できないと言われている[1)]．

2．研究の目的と内容

図-1に示すように海底に貫入設置される新型アンカーでは，その深度が大きくなり，アンカーと

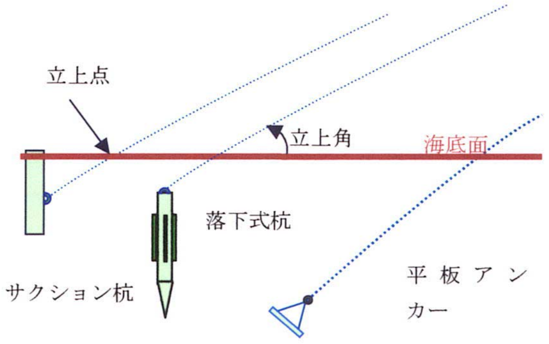

図-1 引抜き性能のある各種アンカー

係留ラインを結ぶ結合点も深くなる．また，アンカーの設置位置や深さが十分に把握できないことが多く，アンカー把駐力の評価に海底面でのライン立上点とその角度がトート係留では重要となる．この二つは，設置後の初期張力導入時に無人潜水艇（ROV）等である程度確認することも可能だが，深い海域では海上の浮体からのライン放出角と張力から推定することになる．その場合，地盤中のアンカー固定点からの海底面までの係留ラインは直線として推定されるが，より厳密に周囲の土による摩擦や付着抵抗及び土圧による張力影響がどの程度か把握することはトート係留の信頼性を高めることにな

る．したがって，本研究は，海底土層にある係留ラインとの摩擦や付着抵抗を考慮しラインの形状や張力推定を行う解析プログラムを作成し，粘土地盤を対象に種々の条件に対する検討を行い地盤強度がラインの形状や張力分布に及ぼす影響を明らかにするものである．

3．地盤及び海中ライン解析理論

(1) 海底地盤中ラインの解析

a) ラインのつり合い

今までGault et al[1]により，海底地盤中のチェーンと土との釣合い式が提案されている．これと同様，**図-2**に示すように長さdsなるライン要素に，自重（単位長さあたり水中重量相当）w，単位長当りの法線方向の支持土圧Qと接線方向の付着抵抗(砂の場合は摩擦)Fが作用するとする．ライン両端の張力(T,T+dT)とその角度（θ，θ+dθ）に対し，以下の力の釣り合いに関する微分方程式が得られる．

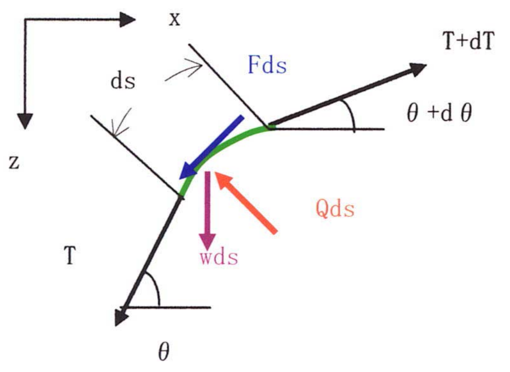

図-2 土中のライン要素のつり合い

$$\frac{dT}{ds} = F + w\sin\theta \qquad (1a)$$

$$T\frac{d\theta}{ds} = -Q + w\cos\theta \qquad (1b)$$

ここで注意すべきは，Fは張力の増加する反対方向に作用するが，Qはラインの曲率半径の中心方向から作用することである．もしライン形状が下に凸の曲線になる場合，Qの符合は上から押さえる向きに変わる．境界条件としては，アンカーへ固定点の深さDと角度θaを与え，両式を数値的に解き，海底面での角度θbと張力Tbを算定する．

b) 土圧と付着(摩擦)圧

粘性土の場合の土圧Qと付着圧Fについては，Neubecker et a[2]が後で述べるせん断強度$S_u(z)$を用いて次式で算定できるとしている．

$$Q = E_n d\, N_c S_u(z) \qquad (2a)$$

$$F = E_t\, d\, \alpha\, S_u(z) \qquad (2b)$$

ここで，E_nとE_tはそれぞれ法線及び接線方向のラインと土の接触面積を算定するためのチェーンの公称径dに対する有効幅を与える係数である．DNV基準[3]ではチェーンだけでなく合成繊維索ロープや鋼索ワイヤーのような円柱状のラインについても**表-1**のように有効幅係数を推奨している．

貫入時の粘土の付着係数αはチェーンでは0.3，ロープ等では0.5とされる．砂の摩擦を算定する場合はラインと砂の接触角による摩擦係数となる．粘土地盤における支持力係数N_cは，Degenkamp et al[4]による実験結果では10程度である．砂の場合の支持力係数N_qは8.6～10程度であり，せん断強度の代わりに平均有効上載圧はγ‘zを用いることになる．

表-1 有効幅係数（DNV）

ライン種	E_n	E_t
チェーン	2.5	11.3
ロープとワイヤー	1.0	π

(2) 海底地盤含めた係留ライン一体解析

地盤中のグランドラインの解析により，海底立上位置での張力Tbと傾斜角θbおよび水平位置Lsが得られる．グランドラインは海中部ラインと海底面上で結合されている（**図-3**の●印）．海底面から接続点高さh_2まではグランドラインと同じチェーンや鋼索が用いられ，ここではそのライン形状はカテナリー式で与える．

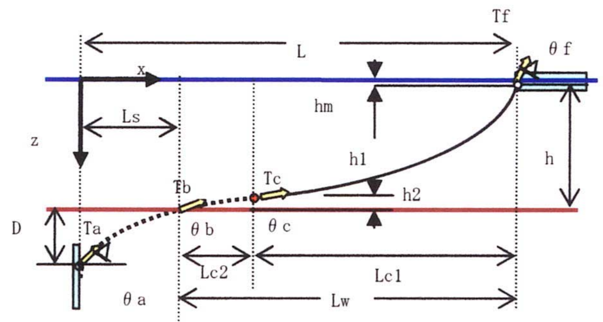

図-3 地盤中含めた全体ライン解析

すなわち，式(3a)～(3d)が成立する．

$$S_{G2} = \frac{T_h}{w}(\tan\theta_C - \tan\theta_b) \qquad (3a)$$

$$h_2 = \frac{T_h}{w}(\sec\theta_C - \sec\theta_b) \qquad (3b)$$

$$L_{C2} = \frac{T_h}{w}(\sinh^{-1}(\tan\theta_C) - \sinh^{-1}(\tan\theta_b)) \qquad (3c)$$

$$T_C = T_h / \cos\theta_C = T_b\cos\theta_b / \cos\theta_C \qquad (3d)$$

ここで，余長S_{G2}はグランドラインの実長S_{G0}と地盤中長さSbの差，すなわち残りの海中部分での長さにあたる．式（3a）～（3c）により接続点の傾斜角

θc，接続点高さh_2および水平長L_{C2}が決定できる．ついで，式（3d）により接合点での張力T_Cも算定できる．さらに，接続点から浮体係留点までも鋼索等であれば同様に解析できる．その結果，接続点高さh_1および水平長L_{C1}から，浮体係留点の放出角θfが決定できる．これに対し，伸び特性が大きい合成繊維索では張力部材として解けばよい．鋼索であっても張力からを軸弾性係数から伸びを含めた実長と換算水中重量を用いることで簡易的に伸び特性考慮することもできる．

係留ライン一体解析においては，アンカー係留点の張力Taは既知という条件で，アンカー係留点の角度θaを未知数としアンカー点から浮体係留点までの全水平長Lが設定値に一致するまで収斂計算により決定する．

4．海底地盤中のラインの解析結果

(1) 土質条件

ここでは海底は粘土地盤とし，そのせん断強度$S_u(z)$は式（4）で与えられる．

$$S_u(z) = S_O + k\, z \qquad (4)$$

ここで，So は海底面でのせん断強度であり，k は強度勾配である．水深 500m を超えると粘土や軟泥の土質が多いことから，粘土地盤についての係数が公表されており，以下参考のため代表的なものを**表-2** に示す．なお，アンカー貫入時のように土が乱される状態では，鋭敏比 St でそれぞれの係数を除すことによりせん断強度を低減する．

表-2 粘土地盤のせん断強度

海域　油田名	S_0(kPa)	k(kPa/m)
アンゴラ沖　Girasso	6	1.2
メキシコ湾　HornMountain	2.5	1.09
メキシコ湾　SiteA	7	1.36
ブラジル沖 Laminaria	6	1.2

(2) 海底地盤中のラインの特性

はじめに，3. で述べた海底地盤中のラインの解析法を各種ラインに適用し，地盤特性等が及ぼすライン形状や張力分布に関する典型的な特性を明らかにしておく．地盤の強度について，海底面の強度Soは0.0とし，勾配kのみを与えた．また本解析からカテナリー解も得られるので，参考に単位長さ当り水中重量wが1.96kN/mのチェーンの解析も行った．それらの結果を**図-4**と**図-5**に示す．境界条件として与える係留点張力Taはすべて500kNである．水中重量wが0.196kg/mの鋼索の解析では，kを1～3まで変えた．海底面をz軸原点とする地盤中のラインの形状をみると（**図-4**参照），①カテナリー②逆カテナリー③逆カテナリーからカテナリーと変わる逆S字形状に分類できる．地盤中（k=1kN/m³）のアンカー係留点の角度θaが1°の鋼索は，参考に解析した海水中（k=0kN/m³）のチェーンと類似したカテナリー状となる．一方，地盤の強度が中程度（k=2kN/m³）で角度θaが37°の鋼索は，逆カテナリーとなる．地盤の強度がやや大きい（k=3kN/m³）鋼索は，深い地盤では逆カテナリーであり，海底面に向って浅くなるにつれカテナリー状と変化する．

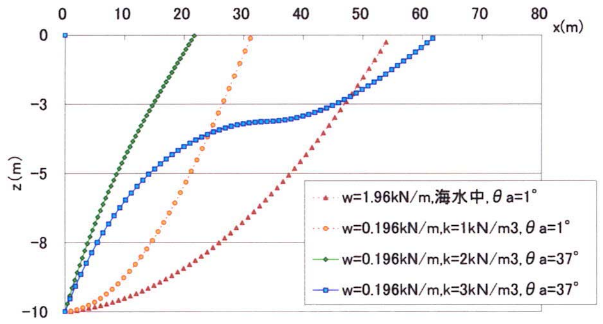

図-4 地盤中のライン形状の典型的な解析結果

次に，**図-5**にそれぞれの張力分布を示す．いずれの地盤中の鋼索の張力は，境界条件として与えたアンカー点の張力Ta500kNから増加する．水中のチェーンはカテナリーであることから，指数関数的に増加する．これ以外の張力分布から，地盤中の張力変化はライン敷設形状に拘わらず逆カテナリー状の張力分布となる．

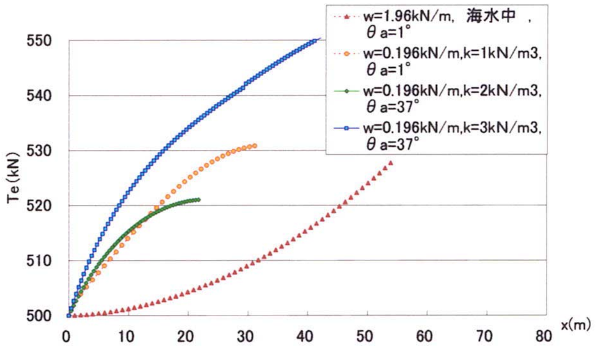

図-5 地盤中のライン張力分布の典型的な解析結果

ここでの解析は，境界条件としてアンカー係留点の張力と角度を与えたが，3つの典型的な地盤中の特性が得られた．

さて，このような結果が現れる理由を最初に述べておきたい．**3**．で述べた海底地盤中のラインの解析法における微分方程式（1b）において，dθがマイナスになるとθが減少し逆カテナリー状になる傾向にある．反対に符号が反転するとカテナリー状になる．すなわち，式(5)が逆カテナリーとなりやすい判定条件となる．

$$w\cos(\theta) < E_n d\, N_c (S_O + kz) \qquad (5)$$

すなわち，深さzにおける土の強度とラインの水中自重w及びライン傾斜角θにより式（5）が成立する場合がある．変数θは地盤中の傾斜角で境界条件θaに依存する．一般的には，両者が組み合わさって深い部分で逆カテナリー状となり，海底面に近づくとカテナリー状になる逆Ｓ字状となることもある．

(3) アンカー貫入時と設置後におけるライン解析

ここでは，筆者らが過去実施したラインを直線と仮定した平板アンカーの把駐力の解析結果[5]をもとに境界条件を与え，地盤中ラインの影響を解析する．その解析では，面積が$25m^2$，$14m^2$，$8m^2$である３種類の平板アンカー（順に平板１～３）を取り扱った．アンカー設置後の粘土のせん断強度は，Soが$1.5kN/m^2$，kが$2.0kN/m^3$とする．貫入時はその地盤の強度が乱されて低下するためのせん断強度は，1/St（Stは鋭敏比5.6）だけ小さくなる．ここで貫入時とは，アンカーが最終深さに達した状態でこれを解析対象とした．**図-6**に平板２の貫入時と設置後の地盤中のライン形状を示す．

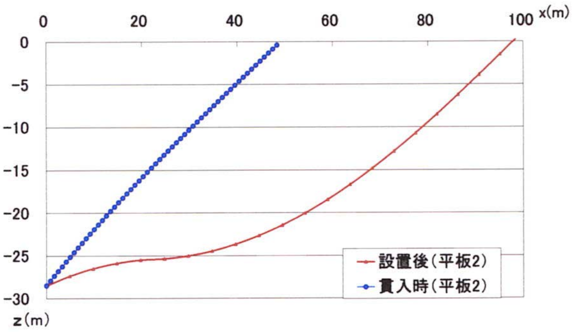

図-6 貫入時と設置後の地盤中のライン形状

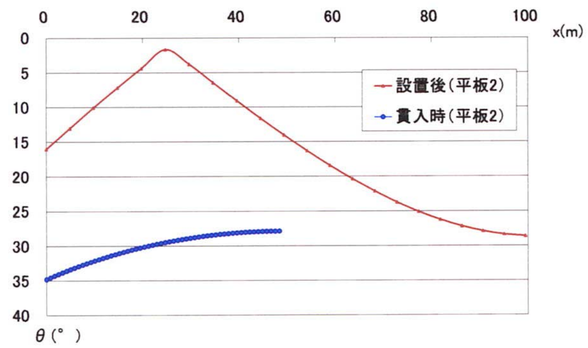

図-7 貫入時と設置後の地盤中のライン傾斜角比較

貫入時は，地盤強度の低いわりに張力Taが1,370kNと相対的に大きいため，直線に近い逆カテナリー状である．一方，設置後はアンカー位置の境界条件（Ta=4,600kN，θa=16°）において25m位置で変曲点を有する逆Ｓ字状形状となる．設置後の張力は貫入時の張力より大きいことから，土中での水平距離も長くなる．**図-7**には同じ平板２の貫入時と設置後のラインの傾斜角変化をそれぞれ示が，設置後の傾斜角変化は**図-6**のライン形状に対応し，傾斜角が徐々に減少していることが分かる．

張力や角度の大きさによる影響を調べるため，面積の異なる３種類の平板アンカーの貫入時と設置後のライン両端における張力と角度比を表-3に示す．

表-3 平板アンカー用ラインの張力と傾斜角比

アンカー	状態	Tb/Ta	θb/θa
平板１	貫入時	1.02	0.75
平板２		1.03	0.67
平板３		1.08	0.55
平板１	設置後	1.12	2.37
平板２		1.10	1.86
平板３		1.10	1.75

面積が一番大きい平板１は貫入時の抵抗も設置後の把駐力も大きい．いずれのアンカーも土中係留点の深さは，約30mと深い．アンカー係留点の張力Taと海底面での張力Tb比から，貫入時で2～8%，設置後では約10%張力が増加することが分かる．境界条件として与えたアンカー係留点のライン傾斜角θaは，貫入時は短い施工ラインによりアンカー敷設（AHV）船で引張られるので約30°と全般に大きく設定しており，設置後は長い係留ラインによる小さなスコープ（水深・ライン長さ比）となるよう約15°と小さめに与えた．**表-3**には立上角θbとアンカー点での傾斜角θaの比を示したが，貫入時の比は0.55～0.75となり逆カテナリー形状に相当し，また設置後は1.75～2.37となりカテナリー形状になることが分かる．なお，アンカー係留点と海底部の立上点を結ぶ直線距離Lに対し地盤中のライン実長Ｓとの比を算定した結果，S/Lは貫入時が1～3%，設置後が4～8%長くなり幾分だが形状の違いの影響が現れている．

(3) 張力がライン形状及ぼす影響

次に，張力が及ぼす影響を比較する．ラインは公称径92mmの水中重量1.66kN/mのチェーンである．地盤条件はkが1.5 kN/m^3で，アンカーでの傾斜角θa

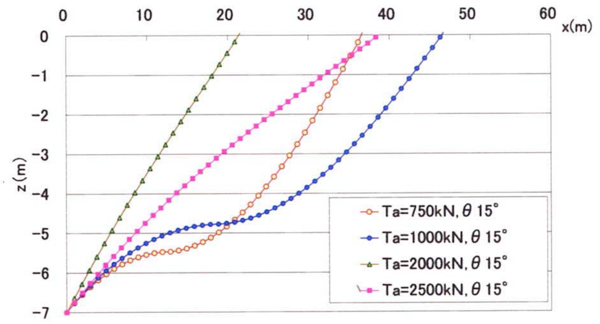

図-8 張力が地盤中のライン形状に及ぼす影響

を15° に設定した．**図-8**に示すように，張力Taが750, 1500, 2000, 2500kNの解析結果である．図にはないが1500kN含め張力が小さい範囲ではライン形状は逆Ｓ字状になる．これを超える張力範囲では逆カテナリー状になり，Taが2000kNでは直線に近い形状であるが，さらに張力が大きくなるにつれ逆カテナリー状の傾向が強まる．なお，θaを5° とした境界条件では概ね1500kN以下の張力ではカテナリー状でそれを超えると逆Ｓ字状になる．したがって，アンカー点での傾斜角が大きいほど，また張力が大きいほど逆Ｓ字状となる傾向が確認された．

なお，張力分布は図示していが，ライン形状にかかわらずいずれのケースも前述の通り逆カテナリー状に増加する．

5．地盤と海中まで含めた係留ライン解析

ここまでの解析では，地盤中のアンカー点における張力 Ta とライン傾斜角θa を境界条件として与えた．現実には，3.の(2)で述べたように地盤中のグランドラインは，海中ラインが繋がりさらに海上の浮体に接続される．通常，浮体係留点での張力 T_f や放出角 θ_f が監視されるのでこれらは既知量とされ，アンカー点での Ta とθa が未知量となる．その場合でも T_f と θ_f を既知量にして逆解析を行えば解けることなので，ここではアンカー点の Ta を与え角度θa は未知量とした．

検討を行うための海底土質は粘土地盤とし，海底面でのせん断強度 So を 1.0N/m^2，勾配 k を 3kN/m^3 とした．また，地盤中のアンカーから海底部に配置したグランドラインは**表-4** に示すように，海底や土中の礫等に対する磨耗影響を受けにくい高張力チェーン（船級協会規格４種級）とした．一方，海中部は 82mm 径の鋼索として伸びを考慮しカテナリー式を適用した．初期の長さを 800m とし，単位長さ当り水中重量は 0.27kN/m である．

解析条件としては，水深が 300m，浮体側係留点深さには-2.0m，アンカーから浮体側係留点までの水平距離が 950m になるように制約条件を与えた．

表-4 グランドラインの特性と土質との係数

チェーン公称径　d(mm)	92
チェーン水中重量　w(kN/m)	1.66
全長　Sgo（m)	70.0
係留点深さ　D(m)	20.0
法線有効幅　E_n	2.5
接線有効幅　E_t	11.3
付着係数　α	0.3
支持力係数　N_c	8.0
鋼索軸剛性　EA(MN)	6,550
鋼索水中重量　w(kN/m)	0.27

(1) ライン形状

張力3000kNをアンカー点に作用させた場合の鉛直高さzと水平距離の関係を**図-9**に示した．これから係留ラインは土中で上に凸の逆カテナリー形状となり，海中部分では直線的なカテナリーとなることが分かる．水平長では地盤中で41.7m，立上点と接合点間で22.2m，接合点と浮体係留点間で886.1m，全水平長が950mとなる．

ライン傾斜角をみてみると，収斂計算によって決定されたアンカー点の傾斜角θaは53.2° であり，これは立上点で15.2° と減少する(**図-10**参照)．逆にグランドチェーンと鋼索と接合点で15.8° さらに浮体放出角が20.0° と若干増えることから，海底面から浮体間は当然のことだがカテナリーであることが分かる．**図-10**にはアンカー点が浅い10mの場合も同時に示したが，同様の傾向にある．地盤中のラインが逆カテナリー形状となることは，**4.**の（3）で述べたようにθaとTaが大きい理由による．

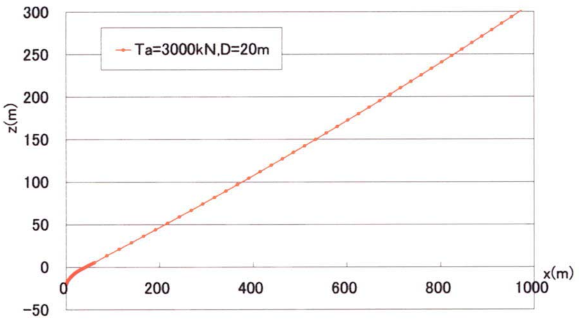

図-9 地盤まで含めたライン全体形状

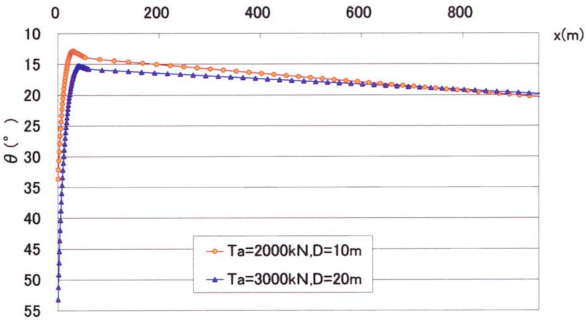

図-10 地盤まで含めたライン傾斜角変化

(2) 張力分布

張力分布については，**図-11**に示すように海底土中では平方根状に増加し，海底面上からはほぼ直線もしくは双曲線状に増加する．張力値としては，アンカー点で3,000kN，42.9m位置の海底立上点で3,404kN，63.9m位置に相当するチェーンと鋼索と接合点で3,414kN，浮体係留点で3,496kNと増加する．

以上からアンカー設置後は，地盤中が逆カテナリー，海中がカテナリーとなり易くその結果，張力分布，傾斜角変化も全体的には類似した傾向となる．

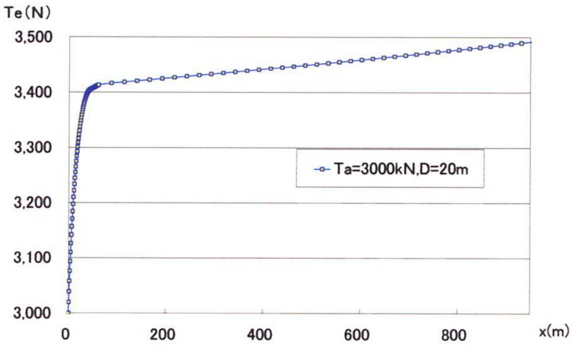

図-11 一体解析における係留ライン張力分布

(3) 貫入時の一体解析

次に地盤中へ平板アンカーが貫入する過程を想定し，深さD15mで張力Ta400kN, D25m, Ta750kNの条件で一体解析を行った．地盤条件は設置後と同じだが，鋭敏比Stを3.0としせん断強度を低減している．曳きラインは全長600mの径77mmの鋼索とし，アンカー点と敷設（AHV）船間は500mの間隔を保つとしている．**図-12**に浅い貫入の場合と深い場合の曳きラインの形状を示した．貫入が浅いと作用張力が小さいので地盤中ではカテナリーとなり，深くなると張力も大き目になる結果設置後と同じように逆カテナリーとなる．アンカー点の傾斜角はそれぞれ2°，56.8°，AHV船での放出角は44.5°，41.7°となる．

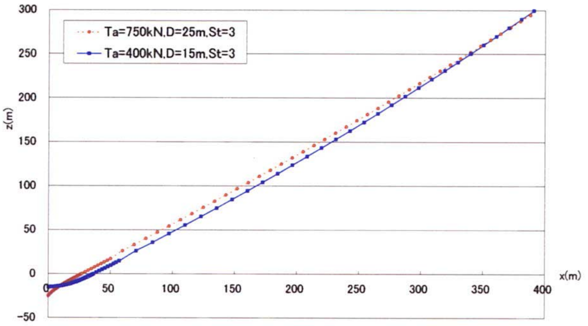

図-12 貫入時の曳きライン形状

(4) 海底地盤の強度による影響

地盤強度の影響を評価するため，アンカー点深さが 7m，水中重量 1.66kN/m のチェーン（実長 60m）のアンカー点に 2,000kN の張力が作用する条件で一体解析を行った．So が 3.0kN/m², k が 1.5kN/m³ の強度を基準に，地盤強度を 1/20～2 倍と変化させた．**図-13** から分かるように強度比が増すとアンカー点傾斜角が大きくなる反面，立上点での角度はあまり変らない．また，地盤中ライン長 Sb や水平長 xb が減少する．すなわち，地盤を含めたライン一体解析では，地盤強度の影響は立上点の傾斜角よりもアンカー点の角度に大きく作用することが判明した．

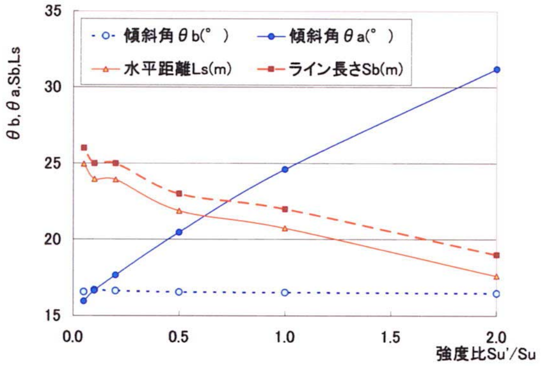

図-13 地盤強度による影響

6. まとめ

海底地盤中に埋設された係留ラインと周囲の土との摩擦や付着抵抗及び支持圧を考慮した係留ラインの解析をアンカー深さ，ライン張力，作用高さ，地盤強度，ラインの種類等の種々の条件で実施した結果，次の知見が得られた．

(1) 海底地盤中のラインはカテナリー，逆カテナリー，逆カテナリーからカテナリーと変化する逆Ｓ字形状になる．土の強度とライン水中自重，アンカー点での深さ，傾斜角及び張力の境界条件によって決定される．しかしながら，ライン張力分布は，いずれの形状に拘わらず逆カテナリー状となる．

(2) 貫入時も設置後も地盤及び海中ライン一体解析を行うことで，アンカー点のライン傾斜が決定でき地盤中や海中のライン形状が得られる．

謝辞：本研究は平成19年度「外洋上プラットフォームに関する研究」の一環で，(独)海上技術安全研究所の委託研究を受け実施したものである．ここで，関係者への感謝を厚く表明する．

参考文献

1) Gault,J.A. and Cox,W.R. :Method for Predicting Geometry and Load Distribution in an Anchor Chain from a Single Point Buoy to a Buried Anchorage, *Proc. of 6th Offshore Technology Conference*, OTC2062, ,pp.309-318,1974.
2) Neubecker,S.R. and Randolph, M.F. :Profile and Frictional Capacity of Embedded Anchor Chains, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE,Vol.121(no.11),pp. 797-803,1995.
3) DNV : Recomended Practice （RP-E301） ,Design and Installation of Fluke Anchors In Clay, 2005.
4) Degenkamp, G and Dutta, A: Soil Resistance to Embedded Chains in Soft Clay, *Journal of Geotechnical Engineering*,ASCE,Vol.115(no.10),pp. 1420-1438,1995.
5) 関田欣治，大村優太，臼井慧介，大川 豊：トート係留に使用するための杭型及び平板アンカーの試設計と適用性検討，土木学会，海洋開発論文集，VOL. 22, pp. 739-744, 2006.