

(18) 模型地盤を用いた室内試験によるアンカー定着機構に関する検討

東京電力(株) ○正会員 大久保 嘉雄
東京電力(株) 正会員 岸 清
東京電力(株) 正会員 都築 進
大成建設(株) 正会員 伊藤 文雄

A STUDY ON ANCHOR BEHAVIOR USING LABORATORY EXPERIMENT IN THE ARTIFICIAL ROCK

Yoshio Ohkubo Tokyo Electric Power Company
Kiyoshi Kishi Tokyo Electric Power Company
Susumu Tuzuki Tokyo Electric Power Company
Fumio Ito Taisei Corporation

A b s t r a c t

Anchor behavior depends on many factors which contains unsolved problem. To examine anchor behavior in detail, we conducted laboratory pull-out tests using the artificial rock. As the result, We understand that non-linear character of contact surface between strand and anchor mortar, or anchor mortar and rock, has the important role on the anchor behavior. In this paper we make the new numerical model, which consists of beam with shear spring, and we discuss about anchor behavior using this model.

1. はじめに

大規模掘削、さらには今後の地下空間の積極的な利用等を考慮した場合、大型山留め、地下空洞の支保部材としてのアンカーの定着機構についての検討が必要となるが、そのメカニズムの定量的な解明には至っていないのが現状である。アンカーの定着機構に関与するパラメータとしては、ストランドの形状効果、周辺地盤の強度、またそれに伴う拘束効果、定着モルタルの放射状割裂、さらには定着モルタルの仕上がり形状、モルタル注入圧等の様々な要因が挙げられる。一方設計としては、アンカー長の決定の際には有効定着長、アンカー耐力の把握が必要となる。これらを検討する際には一般に、①アンカーを軸対称または三次元の条件下でモデル化した有限要素解析、又は川本らによる理論解等の解析手法、②アンカーの耐荷力を決定するためのアンカーを模擬した室内試験、適用する地盤を直接用いた原位置引抜き試験が用いられている。しかしアンカーの形状、モルタルの材令、破壊モード、定着長等をパラメータとした定性的な検討にとどまり、アンカーを含めた構造物の安定性を直接定量的に推定するには相当な困難が伴う。ましてや定着機構の関与する要因を全て考慮した設計手法の確立は難しい。

本研究は、軟岩を対象にしたストランド形式の引張り型アースアンカーについての定着機構の定量的な把握を目的として、まず人工地盤を用いたモノストランドによる室内引抜き試験を実施し、破壊モード等に対する詳細な検討を行った。その結果、付着特性が挙動の支配的な因子であると判断されたことからストランドと定着モルタル間、定着モルタルと地盤間の付着特性を求めるための室内試験を実施し、その結果を反映できる数値解析手法(梁-バネモデル)を開発し、定着機構に対する考察を加えたものである。

2. 室内引抜き試験による検討

アンカー定着部の応力伝達機構を把握するため、軟岩を模擬した人工地盤を用いたアンカーの引抜き試験を行った。用いたモデルは図-1に示すように円筒形人工地盤（φ=600mm, l=2000mm）の中央に引張材（φ=15.2mm, 7本よりモノストランド）、及び定着モルタル（φ=60mm, セメントミルク充填）を配した3重構造である。また応力伝達機構の把握のため、ストランド、定着モルタル、地盤材に対する歪の測定も行った。

試験ケース及び試験結果を表-1に示す。人工地盤は西山地盤（ $q_u=25\text{kg/cm}^2$, $E=5000\text{kg/cm}^2$ 相当）、安田地盤（ $q_u=5\text{kg/cm}^2$, $E=500\text{kg/cm}^2$ 相当）の2種類とし、西山地盤に対して定着方式を変化させた場合、安田地盤に対しては定着方式及び定着長を変化させた場合の5ケースを実施した。引抜きモードは、西山地盤については定着方式に関わらずストランドと定着モルタル間の付着切れによって引抜けるモードⅢを示す。一方安田地盤については、定着方式に関わらず定着モルタルと地盤間で引抜けるモードⅠを示すが、定着長が長くなるとモードⅢを示す。ストランドの歪から応力に換算し、この各測点間の応力の差からストランドと定着モルタル間の付着応力を算定し、この結果を図-2に示す。

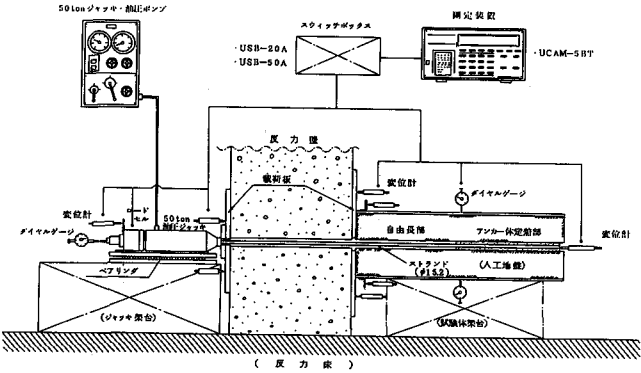


図-1 室内引抜き試験装置概要

表-1 アンカー引抜き試験ケース及び結果

場 所 C A S E	施 工 方 式 G F, G.	自由長 8 f (cm)	定着長 8 n (cm)	引 抜 荷 重 (t)		付 着 力 (kg/cm ²)		引 抜 モ ー ド	備 考	
				P _y (荷伏)	P _{max} (破壊)	地盤と 定着モルタル	定着モルタル とストランド			
西山 地盤	1	○	94	100	3.80	5.95	—	8.0	Ⅲ	
	2	○	99	95	3.80	8.05	—	8.4	Ⅲ	
安田 地盤	3	○	94	100	3.35	3.54	1.8 (1.9)	—	Ⅰ	定着モルタル周辺に微細 (滑動した跡)
	4	○	94	100	2.75	3.20	1.4 (1.7)	—	Ⅰ	同 上
	5	○	80	175	6.24	6.73	—	7.5	Ⅲ-Ⅱ	定着モルタルに放射状の クラック発生

定着方式 G : グリップ
FG : フリーグリップ
引抜きモード Ⅰ : 地盤と定着モルタル間の付着切れ
Ⅱ : 定着モルタルの破壊
Ⅲ : ストランドと定着モルタル間の付着切れ

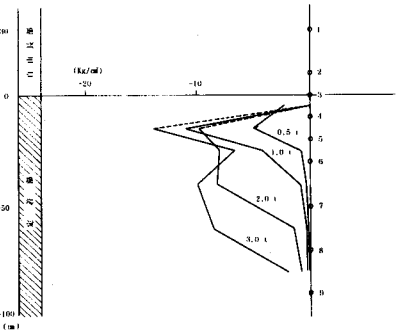


図-2 付着応力分布（ケース1）

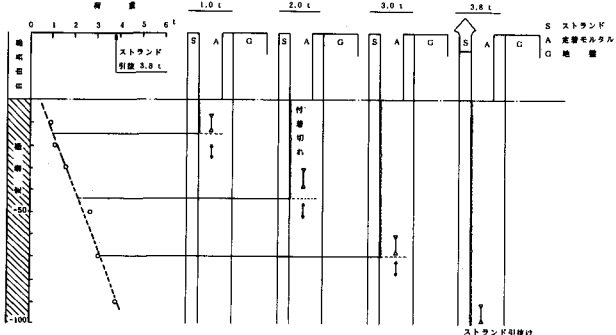


図-3 両付着面の付着切れの進行過程（ケース1）

同図の通り引張荷重の増加の伴いストランドと定着モルタル間に生ずる付着応力のピークは定着部下方へ移行し、かつピークを越えた定着部上方の付着応力は低下する。これは引張荷重の増大に伴い付着切れが定着部上方から下方へ順次進んでいることを示すものである。またストランドの歪の変曲点及び定着モルタルの圧縮歪から引張歪に移行する点に相当する位置からストランドと定着モルタル及び定着モルタルと地盤間の付着切れ進展状況を把握し、結果は図-3の通りである。以上から、応力伝達機構としては荷重の増大に伴い引張力が定着部下方に進展してゆくが周辺地盤の剛性によっては異なる破壊モードを示すこと、またアンカー定着部の挙動に大きな影響を及ぼす要因としてはストランドと定着モルタル間、定着モルタルと地盤間の両付着面の付着応力であることが把握できた。

3. 梁-バネモデルの開発

アンカー定着部の挙動に対する解析手法としては、一般に有限要素解析が用いられるが、本研究においても付着特性を薄層要素として評価した軸対称有限要素解析を実施した。しかし荷重増加に伴う非線形な挙動を再現するためには弾塑性解析となり付着面の非線形特性の評価が難しく、また相当量の計算時間を必要としたため、簡易にモデル化できる解析手法が望まれた。そこで、ストランドと定着モルタル間、定着モルタルと地盤間の両付着面の特性に着目し、付着面の非線形性を簡易にモデル化出来る梁-バネモデルを開発し、定着機構解明のためのツールとして用いることとした。今回開発した梁-バネモデルは定着機構に関与する因子をバネで離散化することを基本としており、バネ特性の厳密な構成因子としては

- ・ ストランドの軸方向バネ
- ・ ストランドと定着モルタル間の付着バネ
- ・ 定着モルタルの軸方向バネ
- ・ 定着モルタルのせん断方向バネ
- ・ 定着モルタルと地盤間の付着バネ
- ・ 地盤バネ

が挙げられる。しかし、アンカー定着部の挙動においては両付着面の付着特性が重要な要因であることから、本研究では定着モルタルのせん断方向バネ、地盤バネを無視し、図-4に示すモデルとした。このモデルの解析手順は、非線形特性を考慮した解析が行える様に仮想初期変位を与えバネ特性から算定したストランドの軸力より

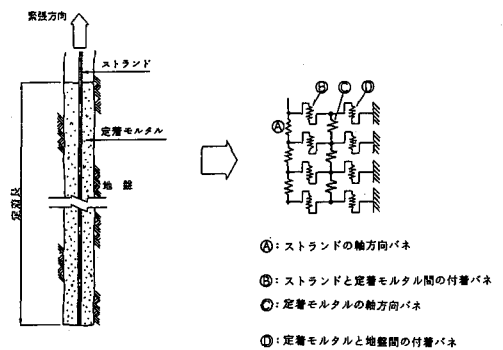


図-4 梁-バネモデルのモデル図

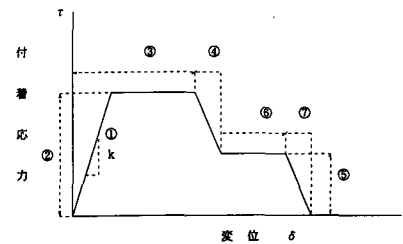


図-5 バネ特性を決定するパラメータ

表-2 ストランドと定着モルタル間のバネ値の基本特性

	バネ 特性 値	解析 条件 関係
① ピーク強度	条 件 ・ A, B, C の座軟化勾配は等しい。	定着モルタルおよびストランドの付着力分布図
④ ピーク強度の継続限界	条 件 ・ ピーク強度は同じ ・ 座軟化勾配の座軟化は同じ。	定着モルタルおよびストランドの付着力分布図
⑥ 定着モルタルのせん断方向バネ	条 件 ・ ピーク強度は同じ ・ 座軟化勾配の座軟化は同じ。	定着モルタルおよびストランドの付着力分布図

設定した荷重に対して収束計算を行うものである。この手法により、両付着面の任意の非線形特性を解析上評価することが可能となった。

4. バネ特性の評価

4.1 バネ特性の感度解析

一般に付着面のバネ特性は、図-5に示すように模式化出来る。本研究で用いる梁-バネモデルにおいて把握すべきパラメータを明らかにするため図-5に示す初期勾配、ピーク強度、ピーク強度の継続限界、歪軟化特性の勾配、残留付着強度をパラメータとして両付着面の特性を各々変化させた感度解析を実施した。その結果ストランドと定着モルタル間のバネ特性の内特に定着部の挙動に影響の大きいピーク強度、ピーク強度の継続限界、残留強度の三つについて両付着面の付着応力、定着モルタルの軸力分布との関係を示したのが表-2である。ピーク強度を大きくした場合ストランドの付着応力が大きくなり、定着モルタルへの伝達荷重も大きいため定着モルタルに発生する軸力は、引張力が増加する。またピーク強度の継続限界、残留付着強度を大きくした場合はストランドの付着応力のピークを示す範囲が定着部上方へ移動し、それに伴い定着モルタルの軸力は圧縮側から引張側へ変化する箇所が定着部上方へ移動する。なお定着モルタルと地盤間についても同様に三つのパラメータが支配的であった。また図-2に示したストランドと定着モルタル間の付着応力分布は、表-2の歪軟化特性を考慮した感度解析結果とほぼ同様な傾向を示している。以上の解析結果からこれらのパラメータの設定が重要であること並びにバネ特性の歪軟化特性の考慮が重要であることが示された。

4.2 バネ特性の検討

人工地盤を用いて両付着面のバネ特性の設定を目的としたストランド引抜き試験および定着モルタルと人工地盤の打ち継ぎ部供試体を用いた一面セン断試験を実施した。なお実施工においてアンカーが定着される地盤は西山地盤であることから検討対象としては西山地盤とした。まずストランド引抜き試験の概要を図-6に示し、ストランド引抜き時の周辺の地盤による拘束効果を模擬出来るよう室内引抜き試験の人工地盤の径と剛性を考慮した圧肉円筒理論より算定した厚さ3mmの塩化ビニルを拘束枠として設置した。なおこの拘束枠には歪ゲージを貼付し引抜き時の拘束圧を算定できるようにした。試験結果の一例を図-7に示す。同図の通りピーク強度と残留強度

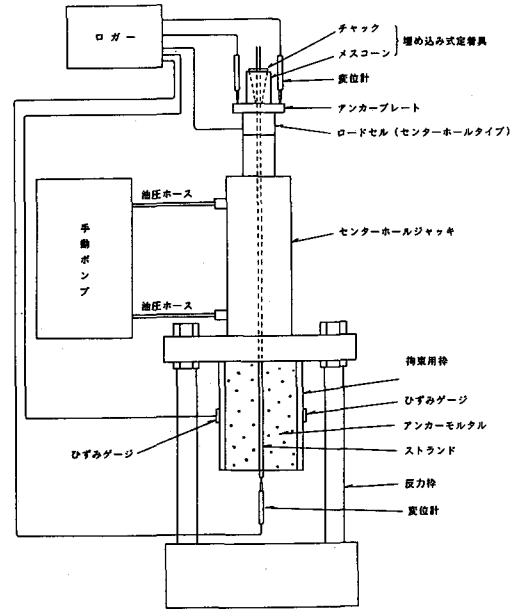


図-6 ストランド引抜き試験装置概要

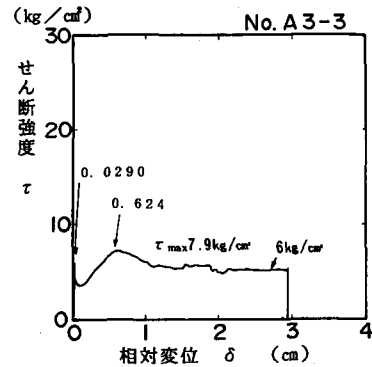


図-7 ストランド引抜き試験結果

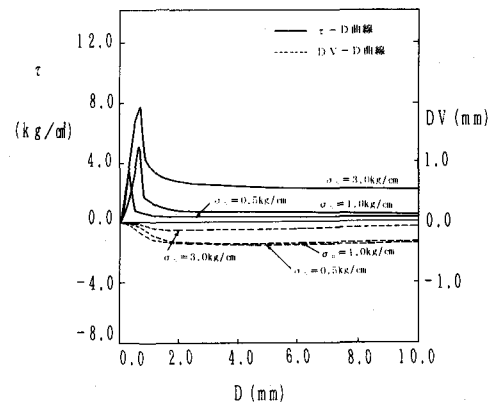


図-8 一面セン断試験結果

については把握できたが、ピーク強度の継続限界については試験方法の問題から設定することが困難であったため室内引抜き試験結果から得られているストランドと定着モルタル間の相対変形量を参考に推定した。

次に一面セン断試験の結果を図－8に示す。拘束棒に生じた歪より圧肉円筒理論を用いて算定した拘束圧は1.0 kg/cm²となり、図中のσ_n=1.0kg/cm²に相当する結果をバネ特性として採用した。以上の検討を踏まえて設定されたバネ特性を図－9に示した。

5. 梁－バネモデルによるシミュレーション

梁－バネモデルの適用性を確認するため、図－9のバネ特性を用いて梁－バネモデルによる室内引抜き試験結果のシミュレーションを実施した。解析結果を試験結果と共に図－10に示す。

引抜き耐力は試験結果とほぼ一致しており、破壊モードについてもストランドと定着モルタル間で付着切れが生じている。これは図－2に示した破壊進展状況とよく一致している。またストランドの軸歪分布は試験結果と解析結果は良い対応を示しているが、定着モルタルの軸歪分布は解析結果の方が大きい傾向を示し、圧縮側から引張り側へ変化する位置も試験結果とは異なる。これは設定したバネ特性の内ピーク強度の継続限界の設定方法に若干の問題があったためと考えられる。またストランドの付着力分布については、試験結果と解析結果は良く一致しておりストランドと定着モルタル間の歪軟化特性の評価が妥当であったことを意味するものもある。

以上から梁－バネモデルは、人工地盤を対象としたモノストランドの場合ではあるが、両付着面のバネ特性を設定出来る室内試験を実施すれば応力伝達機構を十分再現できる解析ツールであることが明らかとなった。

6. まとめ

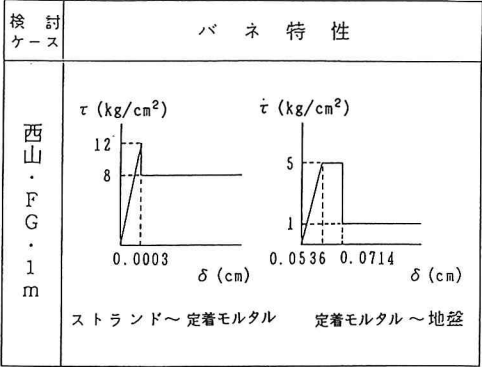
以上の検討から次のことが明らかになった。

1. アンカーの定着部の挙動に対してはストランドと定着モルタル、定着モルタルと地盤の両付着面の特性が支配的である。
2. 付着特性をバネで離散化した梁－バネモデルは非線形な定着部の挙動を良く再現でき、定着機構に対する解析ツールとしては有効である。

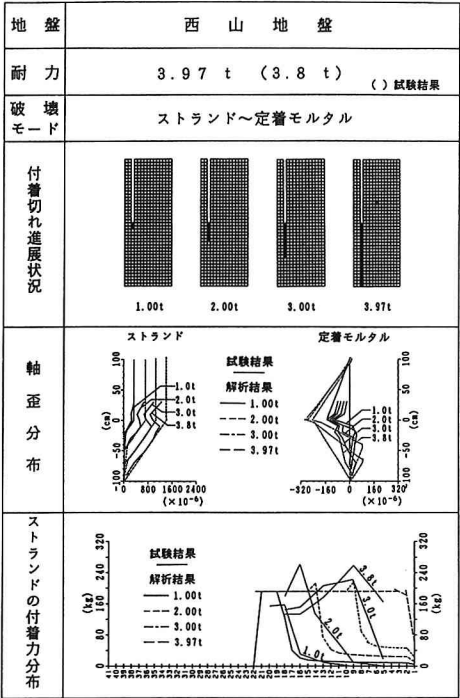
【参考文献】

1) 京谷修、伊藤利昭、大野清、沢内至武、泉博允、軟岩を対象にしたアンカー定着部支持機構に関する考察、第22回土質工学研究発表会昭和62年度発表講演集、PP1357-1360、1988

2) 岸清、村山恒雄、泉博允、アースアンカーの定着機構（その1）～梁－バネモデルの概要～、土木学会第45回年次学術講演概要集、第Ⅲ部門、PP.940-941、1990



図－9 室内試験から設定されたバネ特性



図－10 数値シミュレーション結果