

地震の影響を受けた抑止杭の残留力対策

Residual Stress Countermeasures for the Landslide Prevention Piles
Affected by the Great Hanshin Earthquake岡井 崇彦*
Takahiko Okai新村 憲和**
Norikazu Shinmura杉本 正***
Tadashi Sugimoto山澤 加吉****
Katsuyoshi Yamasawa橋本 慎治*****
Shinji Hashimoto

要 約

高速道路建設に際し、斜面の安定を確保する地すべり抑止杭を施工中に兵庫県南部地震が発生した。既にほとんどの杭本体が施工を完了していたため、斜面の安定は確保できた。しかし、抑止杭の鉄筋応力計測結果からは、杭本体にこの地震による応力が発生し、地震後も残存したままの状態であることが確認された。地震後の計測から、斜面は新たなつり合い状態を維持しているが、抑止杭の内、杭前面を掘削しグラウンドアンカーで支持する構造となっているアンカー付き抑止杭では、この残留応力を考慮した再検討が必要と判断された。既に杭本体の施工が完了していたことから、残留応力対策は掘削時にグラウンドアンカーに導入するプレロード量の増加およびアンカー自由長の長い部分ではそれに加えてアンカー引張材を増量して対処した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要および地形地質概要
- § 3. アンカー付き抑止杭の設計
- § 4. 地震の影響とそれに対する評価
- § 5. 残留応力対策
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

本報文は、施工中に兵庫県南部地震の影響を受け、設計時に考慮していない残留応力が発生した抑止杭の残留応力対策についてとりまとめたものである。

本抑止杭は、阪神高速道路北神戸線の道路建設時および完成後の斜面の安定を確保するために計画されたものである。施工箇所を図-1に示す。対象とする地すべりブロックが大規模であり、地すべりブロック下部に活線の鉄道および民家が存在することから、抑止杭は道路延長約300m間に計50本配置された。

兵庫県南部地震は、50本の抑止杭の内、44本の杭本体施工が完了した時点で発生した。これら施工済みの抑止杭の効果によって、斜面は大規模な変状に至ることなく安定を確保できた。しかし、抑止杭は地震の影響を受け

* 土木設計部設計課

** 関西(支)有野(出)

*** 関西(支)土木部(出)

**** 関西(支)神鉄谷上(出)

***** 関西(支)布施畑(出)

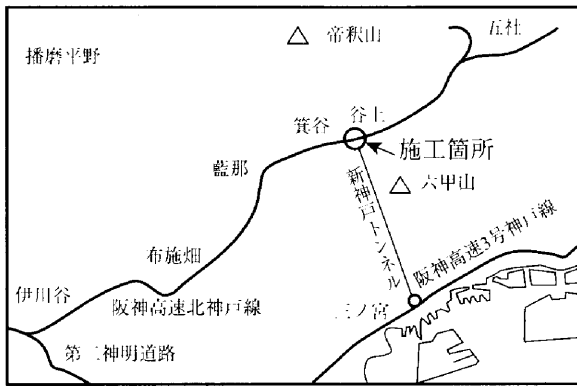


図-1 施工箇所位置図

表-1 必要抑止力一覧

測点	必要抑止力 (tf/m)	設計地すべり力	抑止杭形式
STA192+20	90	P0= 90tf/m P1=197 tf/m (下方杭P1'=176 tf/m) 上方杭P1''= 46 tf/m	深礎杭 φ 3.00m (@6.00m) 2段深礎杭 下方杭 φ 3.00m (@6.00m) 上方杭 φ 4.00m (@8.00m)
+40	197		
+60	190		
+80	322		
STA193+0	390	P2=400 tf/m (下方杭P2'=226 tf/m) 上方杭P2''=217 tf/m	深礎杭 φ 5.00m (@10.00m)
+20	400		
+40	361		
+60	227		
+80	189	P3=227 tf/m P4=140 tf/m	深礎杭 φ 5.00m (@10.00m)
STA194+0	113		
+20	140		
+40	92		
+60	140		
+80	66		

ており、その影響は地震後の杭体に残留応力として残った状態となった。

本報告では、グラウンドアンカー付き抑止杭の設計手法および残留応力に対する評価とその対策について報告する。

なお、紙面の都合上、図表中の値についてはSI単位の併記を省略した。

表-2 抑止杭概要

杭径 (m)	杭No. (西から)	本数	平均杭長 (m)	グラウンドアンカー
φ 3.0	No.0~No.22	23	28.5	各段2本×3~5段 (9-φ12.7<当初>)
φ 5.0	No.23~No.39	17	28.5	—
φ 4.0	No.40~No.49	10	34.5	—

抑止杭は深礎工法によるRC杭

§ 2. 工事概要および地形地質概要

2-1 工事概要

本抑止杭工事が対象とする地すべり抑止力を表-1に示す。

この抑止力に対する抑止杭の概要を表-2に示す。また、抑止杭平面配置および本工事において管理計測工と

して実施された計測機器配置を図-2に示す。計測断面の主測線の1つであるSTA.192+80の断面図を図-3に示す。本図には、配置した計測機器も併せて示した。上部のφ4.0m杭列は下部のφ3.0m杭列との2段配置となっている。その理由は、地すべりブロック下部を通過している北神急行線トンネルへの影響を考慮して杭径をφ3.0mに抑え、杭の必要根入れ長を短くしたためである。また、杭配置を山側へ移動し、同トンネルへの工事の影響を最

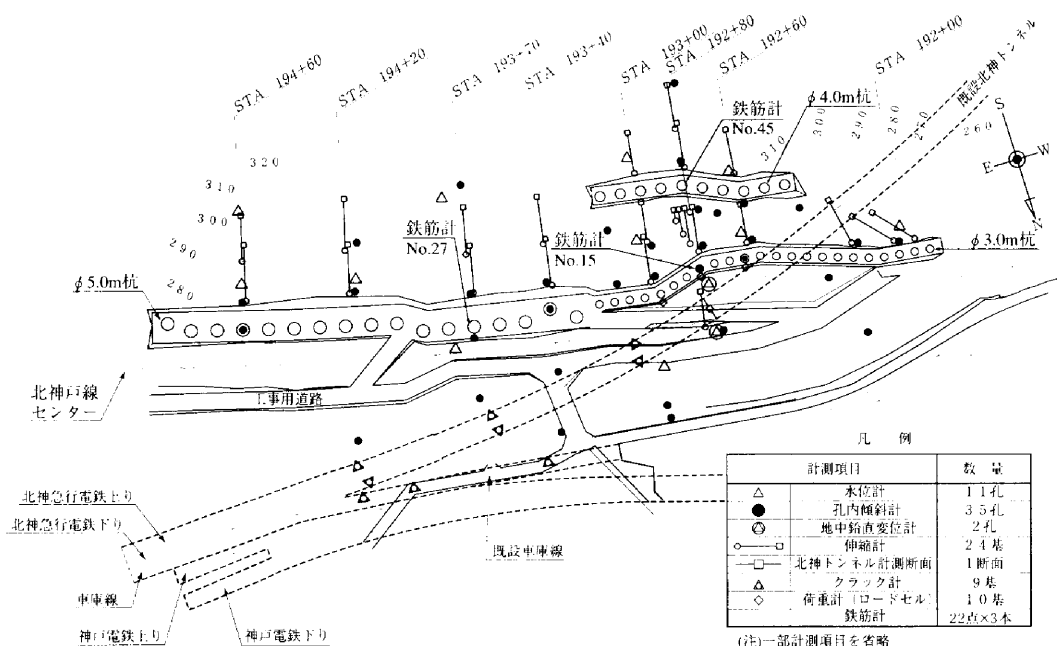


図-2 抑止杭および計測機器配置図

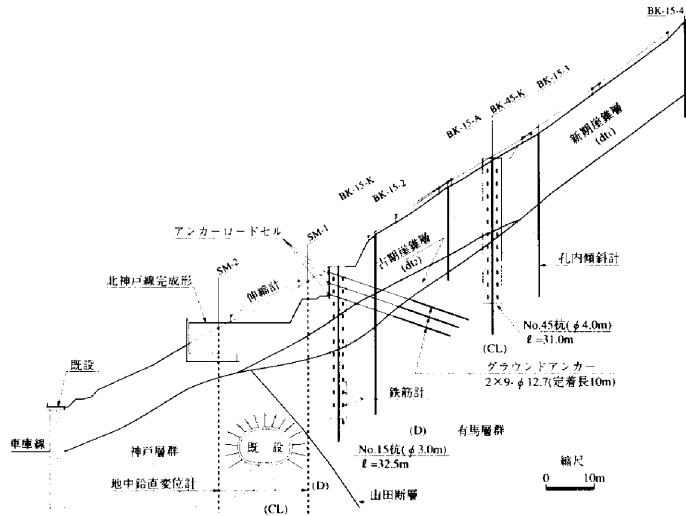


図-3 STA192+80断面図

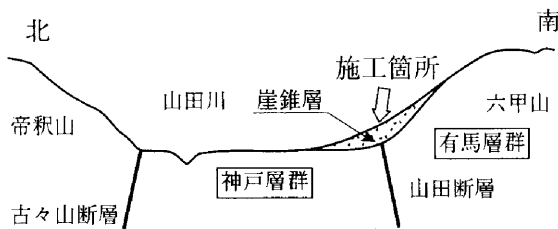


図-4 施工箇所周辺模式地質断面図

- ①斜面の安定性の評価
- ②抑止工の健全度の確認
- ③既設北神戸線トンネルへの影響の評価

これらを満足するための各種計測機器配置が図-2および図-3である。

§ 3. アンカー付き抑止杭の設計

抑止杭の設計は、地山の断面形状および抑止力がそれぞれ異なるため代表杭を設定して行った。今回の工事で採用されたアンカー付き抑止杭は、抑止杭前面の掘削段階毎にグラウンドアンカーを施工し杭を安定させる構造となっている。ここでは、多段アンカー付き抑止杭の設計について説明する。

3-1 抑止杭諸元

多段アンカー付き抑止杭であるφ3.0m杭の内、設計代表杭の諸元を表-3に示す。各段に2本設置するグラウンドアンカーは、確実な定着層である有馬層群のC級岩盤に定着している。アンカー傾角は20°、また、定着域における相互の干渉を避けるためアンカー水平角を2°としている。これらのアンカーは、山田断層に起因する破

表-3 φ3.0m設計代表杭諸元

杭 No.	杭長 (m)	前面掘削高 (m)	すべり層厚 (m)	必要抑止力 (tf/m)	グラウンドアンカー(各段2本)		
					段数	自由長(m)	定着長(m)
1	31.5	15.0	—	—	5	6.5	10.0
5	28.5	13.8	5.6	90	5	42.5	10.0
10	28.5	14.2	9.0	176	5	18.5	10.0
14	32.0	8.0	16.8	226	3	17.8	10.0
18	27.5	7.7	13.1	102	3	41.5	10.0
19	27.5	6.2	13.2	102	3	50.5	10.0
22	29.5	10.1	15.6	102	3	31.5	10.0

(注) グラウンドアンカーの自由長は最大値を示した。
No.1杭は橋台掘削時の土留杭

小限に抑える配慮がなされている。

今回施工した抑止杭の内、φ3.0m杭は杭前面土塊が掘削されるため多段のグラウンドアンカーで構造を維持する形式である。

2-2 地形地質概要

図-4に施工箇所周辺の模式地質断面を示す。抑止杭の施工箇所は、斜面中腹に位置しており、その斜面勾配は30~35°前後である。

施工箇所には、山田断層が北神戸線ルートと並行してほぼ東西方向に存在する。

断層の南側には六甲花崗岩、流紋岩の有馬層群が分布し、北側には神戸層群が分布する。これらの基盤岩上の崖錐堆積層が地すべりブロックを形成しており、その層厚は最大20mにもなる。

今回、抑止対象となった地すべりブロックは、特に集中豪雨等による崖錐層内の地下水位の上昇によって不安定化すると考えられており、安定解析時における地下水位は、崖錐層厚の1/4に設定されている。

2-3 計測管理

工事にあたっては各種の計測機器を配置し、計測管理を実施した。計測の主目的を以下に示す。

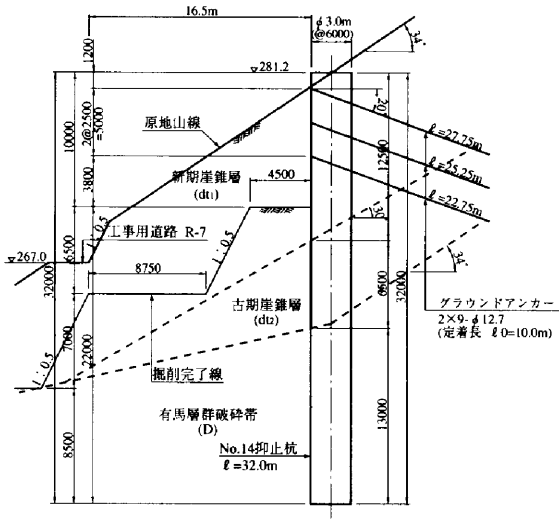


図-5 No.14 杭検討断面図

砕帯が存在するため、自由長が長いことが特徴として挙げられる。

図-5に設計代表杭の1本であるNo.14杭の検討断面を示す（後述する鉄筋計を配置したNo.15杭に隣接する杭であり構造寸法・アンカー配置はほぼ同じである）。

3-2 解析手法

本抑止杭は斜面上に位置することに加えて段階的な掘削過程およびアンカーによる拘束効果を考慮する必要があることから、弾塑性逐次解析法を用いて、以下の仮定および方針で設計した。

- ①考慮する地すべり荷重は最終形状で全荷重が作用する。
- ②杭前面掘削に応じて地すべり荷重が段階的に増加する。
- ③地すべり荷重はすべり層厚内で三角形分布とする。
- ④杭前面の抵抗土圧は、斜面形状および各掘削段階の切土形状を考慮した受働土圧とする。
- ⑤アンカー設置位置にはプレロードを考慮する。
- ⑥アンカーは自由長を考慮した弾性支承とする。
- ⑦地盤パネルは杭ピッチを考慮して低減した値を用いる。
- ⑧抑止力は集中豪雨等によって地下水位が上昇した状態で得られていることから、杭体の設計は短期で考える。ただし、構造的に重要度の高いアンカーについては長期で設計する。

図-6に地すべり荷重入力方法の概念図を示す。

3-3 代表杭の設計

(1) プレロード量の設定

当該抑止杭に採用したアンカーは、地すべりの発生要因・アンカーとすべり面のなす角度等を考慮し、引き止め機能のみを期待し、緊張力による摩擦抵抗力は期待しない設計としている。また、大きなプレロード量を期待して杭体を設計した場合、プレロードを導入後、地山の

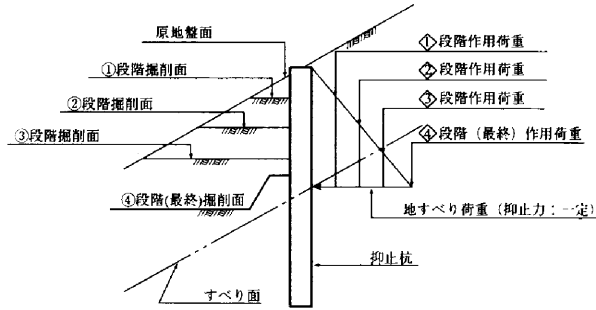


図-6 地すべり荷重入力方法

表-4 元設計（地震前）プレロード量

杭 No.	プレロード量 (水平方向：tf/段)	プレロード比率	適用杭番号
1	37.8	20%	No.0～No.3
5			
10	76.0	40%	No.4～No.16
14			
18	132.0	70%	No.17～No.18
19			
22	113.0	60%	No.19～No.22

プレロード比率：許容アンカー力に対する割合

クリープやアンカー引張材のリラクセーションによって減少するような事態となると、杭体の断面耐力を超える断面力が発生し危険を伴うこととなる。このような点に配慮し、比較検討を行った結果、基本的なプレロード量を許容アンカー力の40%に設定した。ただし、アンカー自由長の相違等によって周辺の杭と大きく異なる断面力となるため、各杭のプレロード量の設定値は表-4に示す通りとした。

(2) 代表杭の設計

設計例として、代表杭であるNo.14杭の計算結果を図-7に示す。

この断面力を基に決定した配筋を図-8に示す。最大曲げモーメント発生位置における応力度照査結果、最大アンカー引張力照査結果を表-5に示す。

§ 4. 地震の影響とそれに対する評価

兵庫県南部地震以前までは、工事用道路掘削時に一部表層部分の動きが認められ補強工を施工したものの、抑止杭施工斜面は若干のクリープ的挙動を示すのみで大きな動きは計測されていない。しかし、兵庫県南部地震によって特に山田断層の近傍は大きな変形を生じた。

4-1 斜面の挙動

図-9に計測断面STA.192+80における兵庫県南部地震による変形状況を示す。この内、斜面下方のSM-1は鉛直方向の変位計の計測結果である（SM-2は図-9 矢印位置

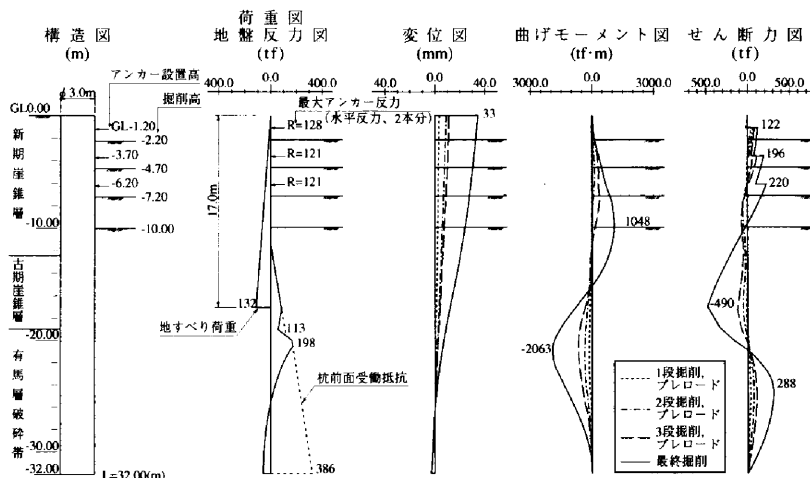


図-7 No.14杭断面力計算結果

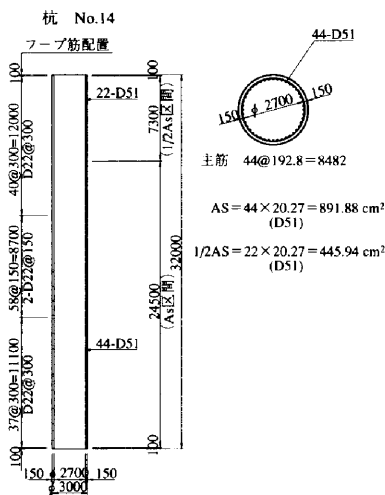


図-8 No.14杭概略配筋図

表-5 No.14杭解析結果

杭 体		グラウンドアンカー	
Mmax (tf·m)	N (tf)	Tmax (tf/本)	Ta (tf/本)
2063	506	67.9	101.0
主 筋 44-D51 (@19.3cm)			
	σ_s (kgf/cm ²)	σ_s' (kgf/cm ²)	σ_c (kgf/cm ²)
発生応力度	2280	1260	97
許容応力度	2700	2700	108

4-2 抑止杭の挙動

抑止杭ではその健全度を確認する目的で、杭体施工が完了しているNo.15・No.27・No.45の3本で鉄筋応力を計測していた。

図-10にNo.15の鉄筋応力経時変化図を示す。本図は地震発生日を基準にして示したものであり、特に応力変動の大きかった杭中央部付近の値を示した。地震発生前までの応力変動量は数10kgf/cm² (数MPa) 程度であったものが、地震によって大きな応力変動を示していることがわかる。この地震による影響はNo.27・No.45においても認められたが、No.15ほど顕著ではない。また、地震後は斜面の挙動と同様、鉄筋応力には大きな変化は認められない。

地震発生前を基準にした杭の応力分布を図-11に示す。No.15およびNo.27の応力度分布は、杭全長にわたって山側で引張、谷側で圧縮となっている。地震前後の変化量の最大値は、No.15のほぼ杭中央部で発生しており、引張応力740kgf/cm² (72.6MPa)、圧縮応力290kgf/cm² (28.4MPa) である。この応力変動分布は、地震によって崖錐層に相当する杭上部付近の土塊が谷側へ移動し杭が

から挿入不能)。水平方向の移動量を計測する孔内傾斜計も途中から挿入不能になるほどのガイド管の変形があるものもあり、正確な変位量は計測できていない。しかし、少なくとも50mmは変位したことを示す結果が得られており、一気に相当な変形が生じたものと推察される。また、山田断層の近傍における測定値が大きかった。せん断変形の認められる部分は、地すべり面の想定深度とよく一致しており、設計上考慮したすべり土塊が移動しやすい状況であったことが推察されるとともに、設計の妥当性が確認されたと言える。

なお、当計測断面を含め、設置していた伸縮計は、地震による慣性力によって伸縮計の重りが揺れ、インバー線が切断されたため表面の移動量は把握できていないのが実態である。

地震後、特に孔内傾斜計の測定時間間隔を密にし、斜面の挙動を監視したが、変位の増大は認められず、安定状態を再度維持しているものと判断された。

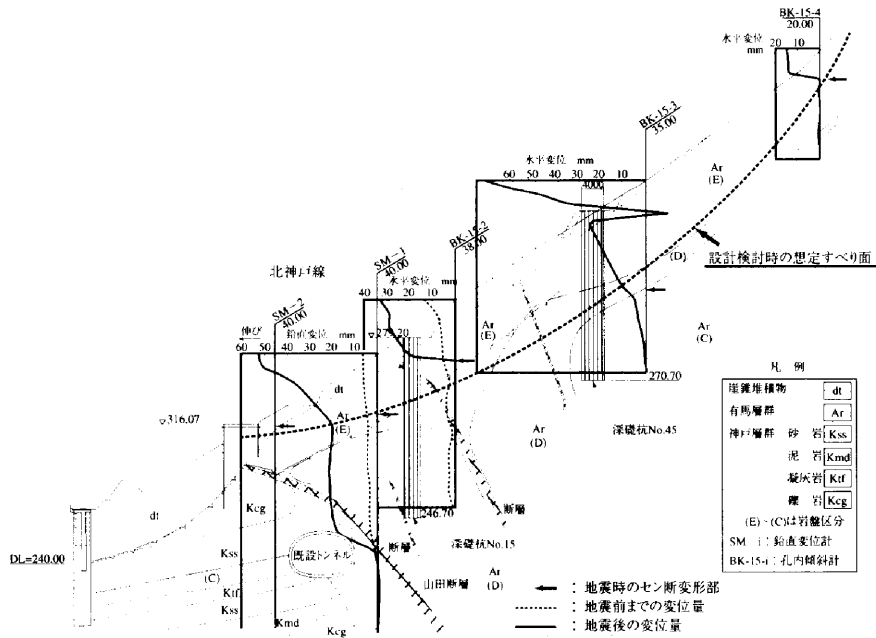


図-9 兵庫県南部地震による地盤の変形状況 (STA.192+80)

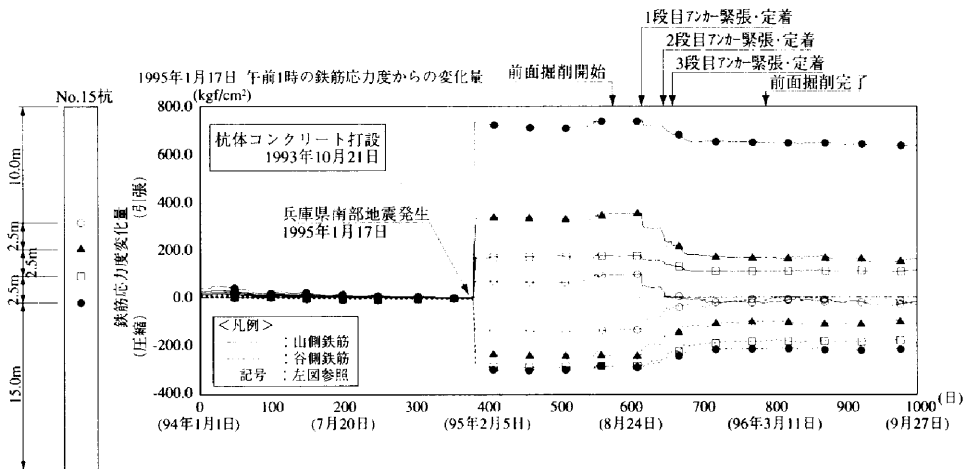
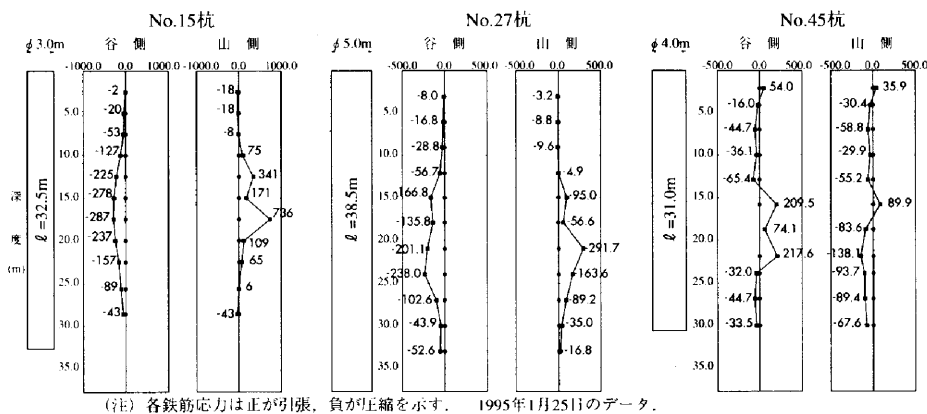


図-10 No.15鉄筋応力経時変化



(注) 各鉄筋応力は正が引張、負が圧縮を示す。1995年1月25日のデータ。

図-11 地震による鉄筋応力変動分布

変形したことを現している。No.45については挙動が複雑であり明確ではない。

4-3 地震の影響に対する評価

計測された鉄筋応力は、前述のように地震後ほぼ変動がなかった。これは、計測によって確認された地山の挙動は地震によって引き起こされたものであり、その後の地山は再度つり合い状態を維持しているためと考えられる。抑止杭の鉄筋応力の変動分は杭体の残留応力となるが、見方を変えると、この応力発生分だけの抑止力を発揮していることと同じ意味であると言える。これを抑止力を含めたつり合い状態で考えると以下ようになる。

【地震発生前】：応力変動がないことから抑止力は発揮されていないと考えられる。

$$R/S \geq 1.0$$

ここに、 R：すべり土塊の抵抗力
S：すべり土塊の起動力

【地震発生時】：杭が最低限必要な抑止力を発揮した状態と考えられる。

$$(R + P_p) / (S + E) = 1.0$$

ここに、 P_p：抑止杭が発揮した抑止力
E：地震による起動力

【地震後】：杭の応力に変化がないことから、抑止力が発揮されたままの状態と考えられる。

$$(R + P_p) / S > 1.0$$

ここで、地震後に各杭に残留している応力度は許容応力度に比較して十分小さい値である。このことから、地震時に抑止杭が発揮した抑止力P_pと計画安全率から設定されている設計抑止力Pr₀とは次の関係にあると言える。

$$Pr_0 > P_p$$

以上より、地山形状が変化しない場合は杭の抑止力が設計抑止力まで発揮されることによって計画安全率を確保できると言える。したがって、埋設杭であり杭前面が原地形のままであるφ4.0mおよびφ5.0mの各杭については、地震によって発生した残留応力が存在しても設計上は問題ないものと判断できる。

しかし、抑止杭の前面を掘削するφ3.0m杭に関しては、掘削によって作用荷重のバランスが失われるため、掘削時に発生する変形および応力は残留応力に付加されると考えられる。したがって、残留応力分を設計上軽減する対策が必要であると判断した。

§ 5. 残留応力対策

5-1 対策基本方針

φ3.0m杭の地震による残留応力に対する対策は、杭本

体が施工済みであることから実際的に考えて杭体を補強することは困難であるため、前面掘削時に施工するグラウンドアンカーで実施することになる。方法としては以下の2案が考えられる。

①プレロード量の増加：

アンカー設置時のプレロード量を増加して、杭の変形を抑制し、掘削時に発生する断面力を低減する。

②アンカー引張材の増強：

作用荷重に対する杭の変形を抑制するために、アンカー引張材のランクアップ（鋼材断面積の増加によってアンカーのバネ値を大きくする）、または、アンカー段数の追加を行う。

この内、プレロード量の増加は設計で決定された材料のままで実施できる対策であり、経済的である。ただし、プレロード量の増加はアンカーの重要性を更に高めることとなり、緊張力の管理が非常に重要となる。この点に関しては、アンカーヘッドに再緊張可能タイプを採用していること、アンカー反力を計測する杭を追加し施工後の反力管理を充実させることによって補えるものと考えた。

そこで、プレロード量を増加させることを基本方針とし、残留応力を考慮しても杭体応力が許容値以内となるプレロード量を検討した。

なお検討に際し、φ3.0m杭に発生した残留応力は安全側にすべてNo.15で計測された最大値であると仮定した。

5-2 プレロード量検討結果

3-2に示した方法によってプレロード量を増加させ、残留応力分を加えても杭体の許容応力度を満足する値を検討した。その結果得られた各設計代表杭のプレロード量を表-6に示す。また、最大アンカー反力とアンカー許容引張力の比率を表-7に示す。

表-6からわかるように、プレロード量が大きい杭は設計代表杭のNo.18~No.22であり、これらはアンカー自由長が25m以上のグループである。自由長が長いために変位を抑制する効果が小さく、大きなプレロード量によって変位を抑える必要があるという結果である。

この結果から、プレロード量に関する明確な規定はないものの、地すべり荷重が地下水位の上昇によって繰り返し発生する可能性のあること、定着層のクリープなどが懸念されること、直下が高速道路であり重要構造物であること、等を考慮すると施工時に導入するプレロード量を低減することが望ましいと判断した。

そこで、これら自由長の長い杭については、プレロード作用時の許容引張力に対する荷重比率を低減させるとともに、掘削時の変形抑制効果が期待できることから、

表-6 プレロード再検討結果

杭 No.	プレロード量 (水平方向:tf/段)	プレロード比率	適用杭番号
1	37.8	20%	No.0~No.2
5	76.0	40%	No.3~No.6
10	95.0	50%	No.7~No.15
14			
18	161.0	85%	No.16~No.18
19	132.0	70%	No.19~No.20
22	123.0	65%	No.21~No.22

表-8 引張材補強部プレロード量

杭 No.	再検討時引張材 9-φ12.7		補強時引張材 12-φ12.7	
	プレロード量 (水平方向:tf/段)	プレロード比率	プレロード量 (水平方向:tf/段)	プレロード比率
18	161	85%	151	60%
19	132	70%	127	50%
22	123	65%	127	50%

引張鋼材本数を増加することとした。その結果、プレロード量は同量であるが許容引張力に対する比率を15%~25%低減することができることがわかった。引張材補強部のプレロード量を表-8に、アンカー反力とアンカー許容引張力の比率を表-9に示す。

以上の検討結果から、残留応力に対する対策はプレロード量の増加とアンカー鋼材の増強の両者で対処することとした。

5-3 施工時導入プレロード量

これまで示したプレロード量は設計上期待する初期有効緊張力である。実際の施工時には鋼材のリラクセーションやアンカー tendon とグラウトのクリープ、グラウトと地盤のクリープなどがあるため、設計時に考慮したプレロードよりも大きな緊張力を作用させる必要がある。このクリープ等による緊張力の減少量は、現状では不確定な要因によるものが大きく正確に予測することはできない。また、再緊張タイプのアンカーヘッドを使用しているものの、掘削の進行および完成後の再緊張は困難を伴うものである。

これらを考慮し、施工時導入プレロード量は設計時に考慮した量+10%とした。

§ 6. おわりに

抑止杭の施工がほぼ完了した時点で兵庫県南部地震が発生したことは、当該斜面の状況から判断すると不幸中

表-7 最大アンカー反力再検討結果

杭 No.	原設計		再検討結果	
	Td (tf/本)	Td/Ta (%)	Td (tf/本)	Td/Ta (%)
5	53.9	53.4	53.9	53.4
10	79.0	78.2	83.3	82.5
14	67.9	67.2	70.3	69.6
18	95.5	94.6	99.3	98.3
19	79.2	78.4	82.6	81.8
22	82.5	81.7	84.4	83.6

Td:設計(最大)アンカー反力
Ta:許容アンカー力
Ta=101.0 tf/本 (9-φ12.7)

表-9 引張材補強部最大アンカー反力

杭 No.	再検討時引張材 9-φ12.7		補強時引張材 12-φ12.7	
	Td (tf/本)	Td/Ta (%)	Td (tf/本)	Td/Ta (%)
18	99.3	98.3	100.0	74.3
19	82.6	81.8	84.0	62.4
22	84.4	83.6	88.8	66.0

許容アンカー力 9-φ12.7 Ta=101.0 tf/本
12-φ12.7 Ta=134.6 tf/本

の幸いであったと言える。このような場所であったからこそ計測が充実しており、その計測結果が杭耐力確保のための再検討に反映できたことは、構造物の健全性維持という面からは計測が非常に有効であったことを示している。

本報文で示した対策を講じて、アンカー付き抑止杭の杭前面掘削は慎重に施工した。施工中および最終掘削後もアンカー反力・杭体応力を監視し、その挙動を把握している。杭体の耐力に大きな影響のあるアンカー反力は、施工後からほとんど変動はなく、また、心配したクリープ等によるアンカー反力の減少は平成8年12月現在認められていない。

多段アンカー付き抑止杭の健全性を管理していく上では今後もアンカー反力および杭体応力を計測していく必要がある。それほど、今回採用された抑止杭の構造はアンカーの重要度が高いと認識しなければならない。

本工事は無事平成8年7月竣工した。本報文が、今後同様な構造の抑止杭の設計の参考になれば幸いである。

最後に、本抑止杭の施工にあたり御指導・御尽力を頂いた阪神高速道路公団神戸建設部・トンネル地盤技術委員会(阪神高速管理技術センター)の方々はじめ、関係者各位に深く感謝致します。