

## 地震時の深礎抑止杭の変形挙動

工務部 工務第二課 松浦 健二  
神戸第一建設部 北神工事事務所 富田 穰

### 要 約

平成7年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震は、市街地のみならず六甲山地やその周辺部に多大な被害をもたらした。北神戸線下谷上第3工区で施工中であった地すべり対策の切土斜面も、局部崩壊や計測機器の一部破損などの被害を被った。

地震発生時には、施工中の深礎抑止杭に、鉄筋計、土圧計、孔内傾斜計などを設置し地すべり動態を観測中であったことから、貴重なデータを収録することができた。

これら動態観測の結果から、地震時の斜面は、表層ほど累積変位の大きい前倒し型の変形と地すべり面付近の座屈型の変形が特徴的であった。深礎杭は、上部を背後から押された曲げ変形を示した。施工中の地すべり対策に対しては、未施工のアンカー工について深礎杭体の残留応力を考慮したプレロード量を設定することにより実施することを考えた。

キーワード：地すべり、地震、変形、深礎杭、プレロード

### まえがき

北神戸線下谷上第3工区は、兵庫県南部地震の震源より約20km離れた六甲山地中央部の北側斜面に位置している(図-1)。この地域には東北東-西南西方向に分布する有馬-高槻構造線上の六甲断層、射場山断層、山田断層が断続的に分布し、このうち、本工区は山田断層直上に位置している。

本工区の地すべり対策となる斜面は、平均傾斜35°、高低差約120mを有した北向き斜面である。

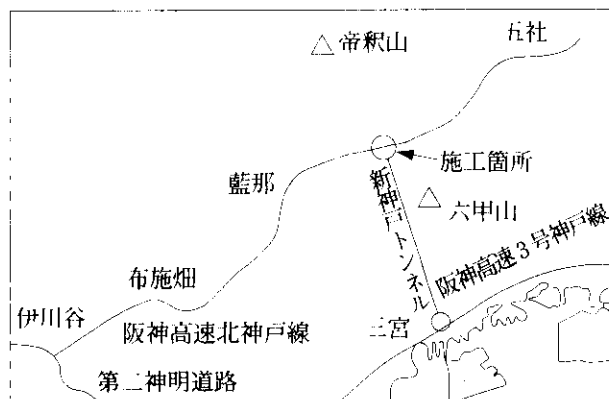


図-1 施工位置概要図

断層は斜面に対し、平行な等高線より約15°程度斜交して南東-北西方向の層厚で斜面中腹部に伏在している(図-2)。

断層上盤側には、中生代白亜紀の火山岩類である有馬層群の凝灰岩質流紋岩が分布し、断層下盤には第三紀漸新世の堆積岩類である神戸層群が分布する。山田断層は、有馬層群が神戸層群上に約70°で乗り上げる逆断層となっている。

事前の調査ボーリングでは、この基盤岩類を層厚10m~15m程度の地すべり堆積物ならびに崩積土が被覆していることが明らかとなっている。また、斜面における地すべりの滑落崖や舌部の状況は不明瞭であるが、基盤岩類と地すべり土塊の境界付近に地すべり粘土や層状破碎帯が連続して認められている。

平成7年1月17日の兵庫県南部地震は、斜面に多大な被害を与えた。その主なものを述べると、以下の代表的事例がある。

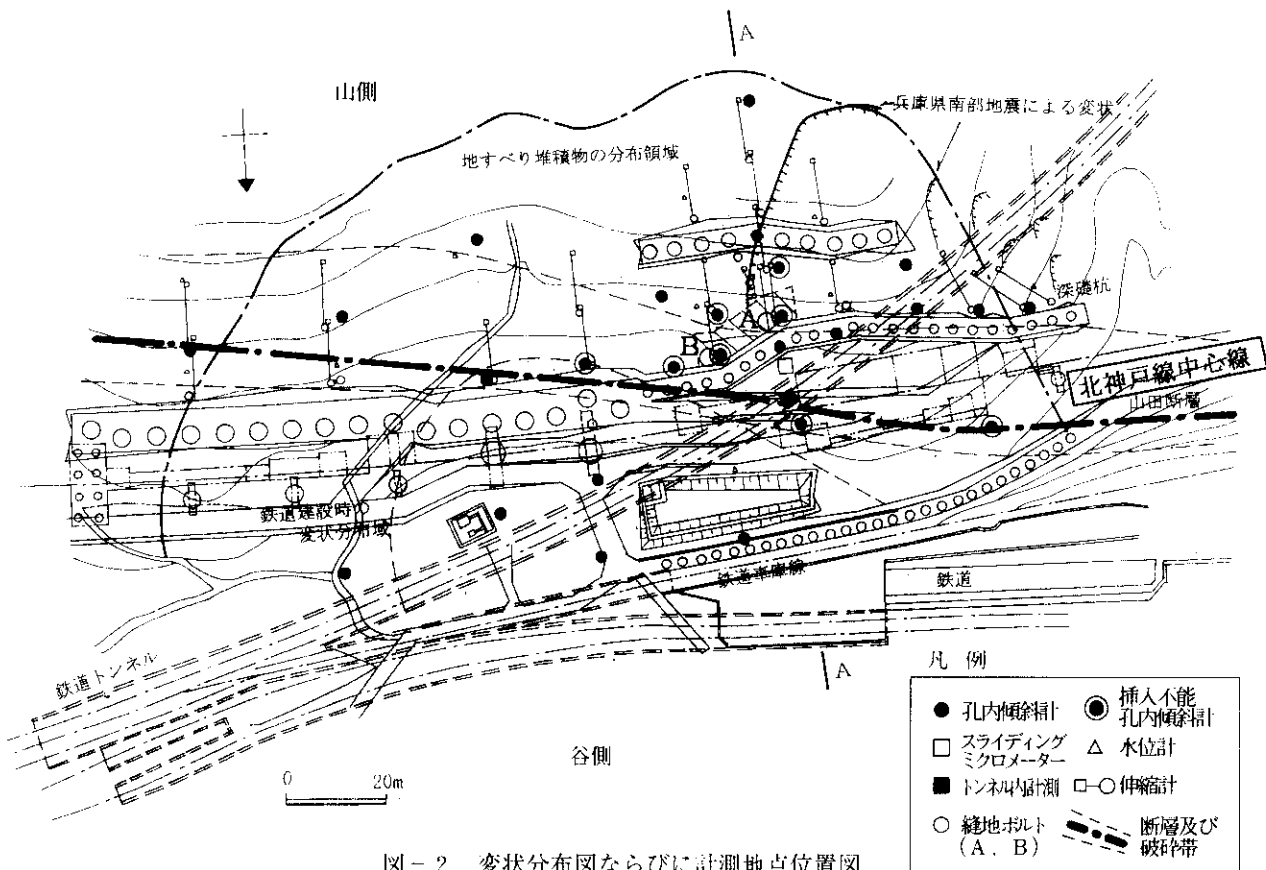


図-2 変状分布図ならびに計測地点位置図

- ①複数の小規模な斜面崩壊と幅60mにおよぶ段差数十cmの滑落崖を有する変状地形（図-2参照）
- ②伸縮計や孔内傾斜計などの地すべり計測器の破損
- ③上段深礎杭の仮設工であるミニ深礎杭の一部倒壊

そして、地すべり斜面の地震後の安定性評価、斜面下方の鉄道トンネル、鉄道車庫線への影響の解析などに対し、多大な時間を費やした。

その一方、計測中であつた計測器や地震後の斜面状況の把握調査では貴重なデータが得られたと考えられる。

本稿では、これらのデータを紹介し、地震後の斜面の安定性とその対策をどのように検討したかについて示す。

## 1. 地すべり対策工の概要

下谷上第3工区では、地すべり対策として深礎抑止杭ならびにアンカー工が実施される計画であ

る（図-3、図-4参照）。深礎抑止杭は、斜面下方に鉄道トンネルが斜交する位置で2段深礎抑止杭となっている。これは設計手法上、杭径が大きくなると杭長が長くなるため、トンネル斜交部では杭径を小さくすることでトンネルより1D（D：直径）内に杭長が達しないよう検討したためである。それにより、発生した不足力は地すべり上部に抑止杭を打設する設計となっている。また、高速道路の施工のため、切土部となる区間では、グランドアンカー（E5-7）を打設する計画となっている。

兵庫県南部地震発生時の施工状況は、深礎杭全体の約80%が終了している状況であり、各深礎杭分類別の施工状況を表-1に示した。

表-1 兵庫県南部地震発生時の施工状況

工種	平均長 (m)	計画数量	地震発生時施工終了数量
深礎杭 φ 3.0m	28.5	23	23
深礎杭 φ 4.0m	34.5	10	6
深礎杭 φ 5.0m	28.5	17	13
グランドアンカー (E5-7)	30.0	50	0

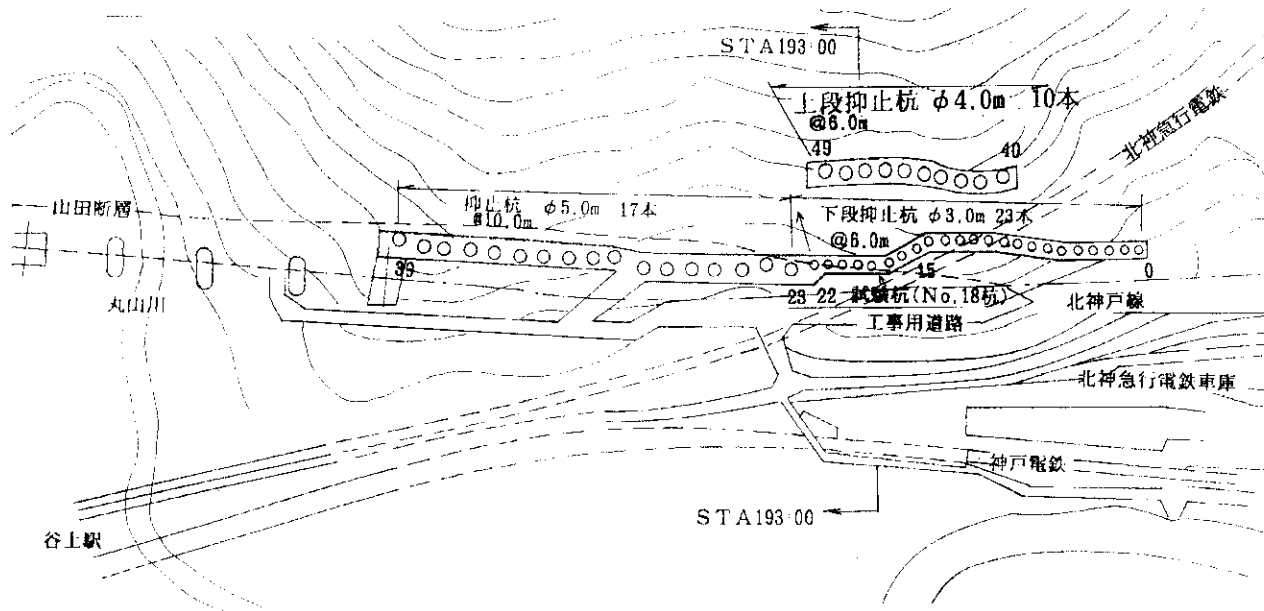


図-3 施工計画平面図

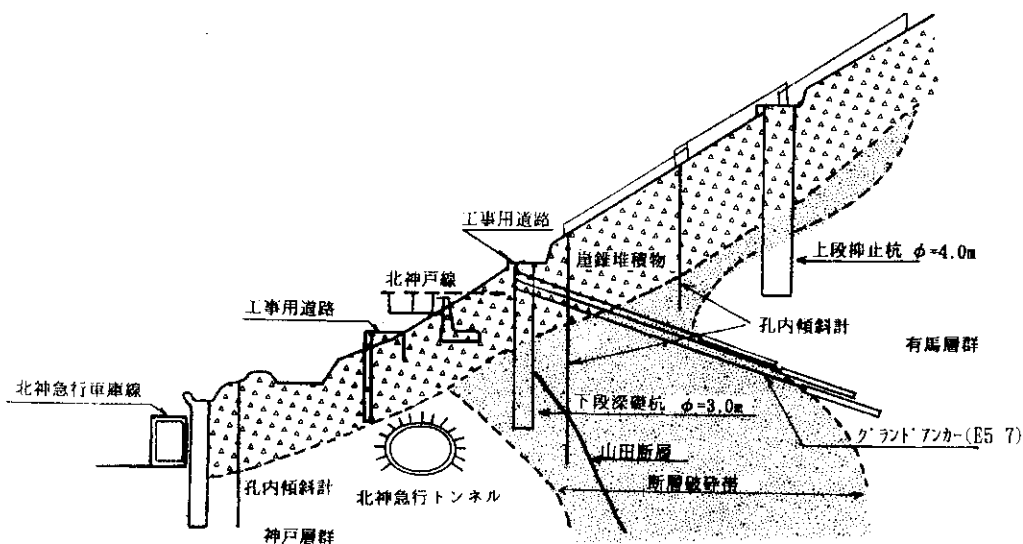


図-4 施工計画断面図

## 2. 地震時の斜面変形機構

地すべり面の分布する斜面の地震時の変形挙動は、地震前後の計測結果より推定することが可能である。本工区では、施工時の地すべり動態の把握と施工管理を目的として、図-2に示す多くの計測を実施中であった。

地震発生後の計測結果の代表例を図-5に示す。地すべり堆積物に関して、これらの変形は次

の2点であると考えられる。

- ① 地すべり面近傍の座屈変形
  - ② 崖錐堆積物中の前倒し変形
- 以下に、各変形について述べる。

### 2-1 地すべり面近傍の座屈変形

孔内傾斜計の観測では、26孔中8孔で地すべり面付近においてゾンデの挿入が不可能であった。また、各所において地すべり面付近に変形が認められる。しかしながら、この変形は、一般に地す

べり面で認められるせん断変形とは異なり、大きなバックリングを伴う変形である（図-5参照）。

この変形は、地すべり面近傍に作用した地震動に伴い発生した局所的な圧縮に伴う座屈変形と考えられる。

図-6には、縫い地ボルト軸力計の地震前後の応力変化を示した。

地すべり面近傍付近の鉄筋応力が $1000\text{Kgf/cm}^2 \sim 2000\text{Kgf/cm}^2$ 程度、圧縮側に増大していることが明らかである。

事前調査の地すべり堆積物の変形係数（ $D = 50\text{Kgf/cm}^2 \sim 400\text{Kgf/cm}^2$ ）は、基盤岩の変形係数（ $D = 3000\text{Kgf/cm}^2 \sim 6000\text{Kgf/cm}^2$ ）に比べて

極めて小さく、地震動に伴い基盤岩が振動した際、基盤と堆積物の境界付近に大きな圧縮力が作用したと考えられる。

## 2-2 崖錐堆積物中の前倒し変形

地震により斜面の伸縮計のすべてのワイヤーが断線した。つまり、斜面では水平方向の大きな変位が発生したといえる。その証拠として斜面上の径数+10cmもの礫が斜面下方へ1m程度移動している状況が観察された。

孔内傾斜計では、地すべり堆積物中で地表ほど変位が累積され大きくなる傾向が認められた。つまり、斜面にあって前倒し的な変形が発生したということを示している。

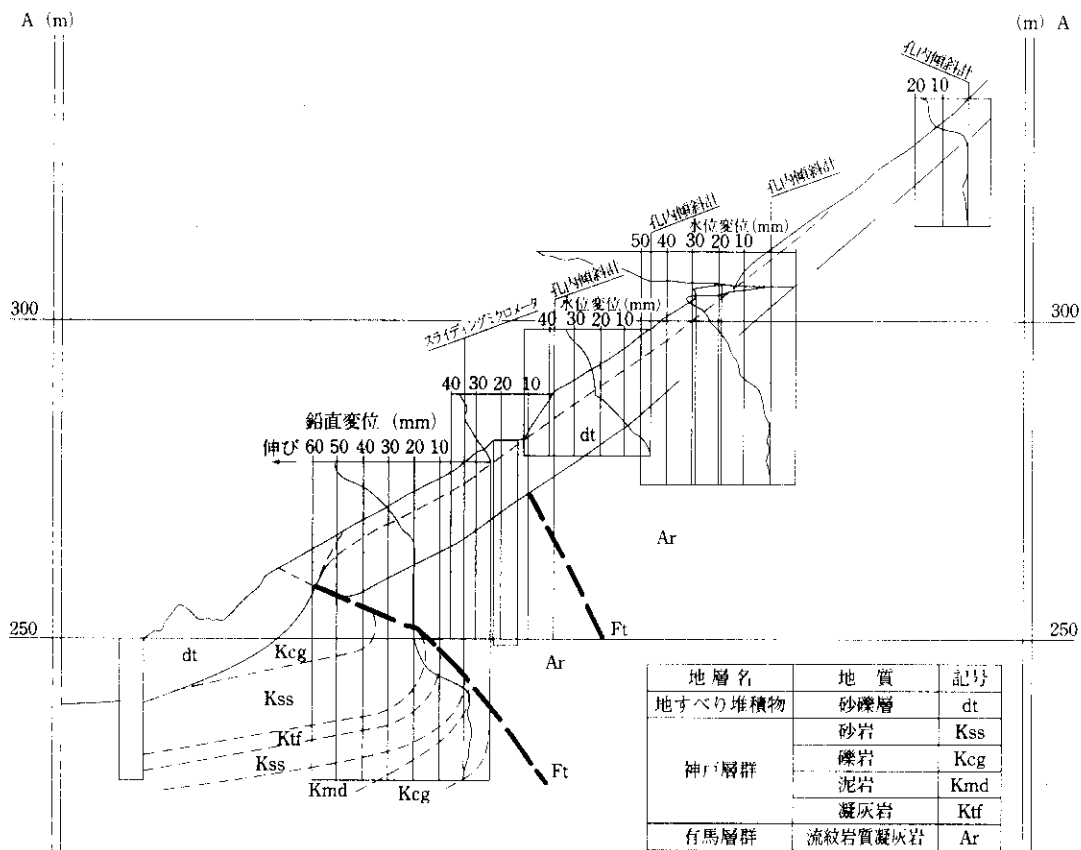


図-5 計測変位断面図 (STA. 192+80)

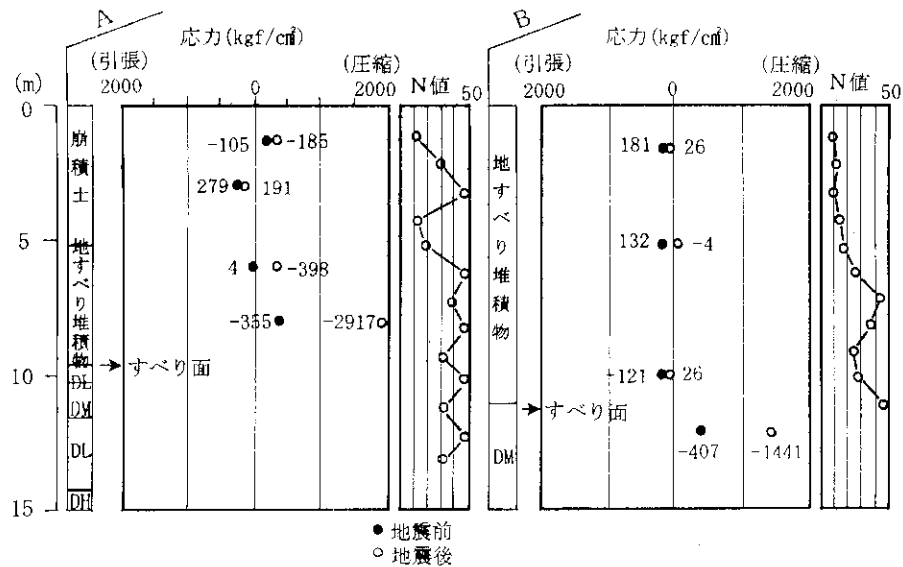


図-6 縫い地ボルト軸力の深度別変化図

### 3. 深礎抑止杭の変形挙動

施工中の深礎杭には、一部に鉄筋計をはじめとして孔内傾斜計、土圧計などの計器が設置されていた。

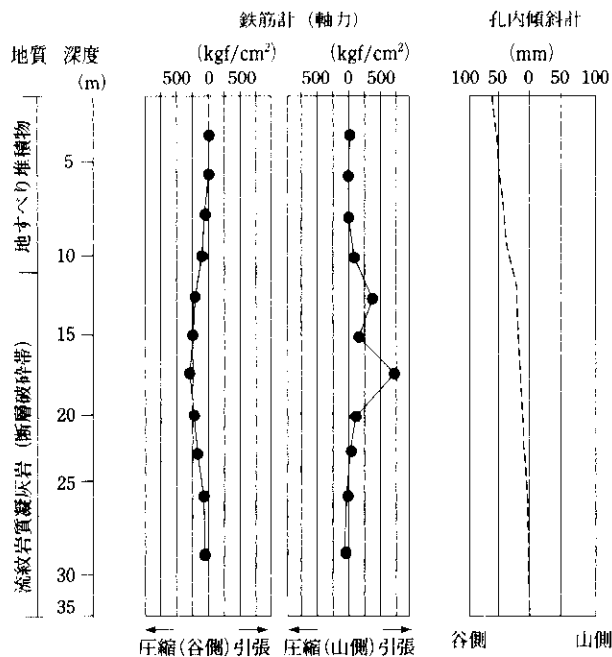
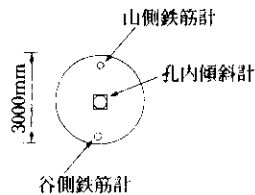


図-7 深礎杭鉄筋応力分布図 (No.15深礎杭)

これらの地震後の計測状況を図-7に示す。

鉄筋計は、発生軸力を測定するため、深礎杭の谷側と山側の両サイドに設置している。深度17.5m付近にピーク応力を示し、谷側で290Kgf/cm<sup>2</sup>の圧縮応力、山側で740Kgf/cm<sup>2</sup>の引張応力のピーク応力を示している。応力の分布状況からは『曲げ変形』の状態を示している。

深礎杭中の孔内傾斜計の変形からは、地表面累積変位量として7cm程度谷側へ移動しており、深礎杭頭部周辺に背後から力が作用していることを示している。

深礎杭に設置されている土圧計に関してみると、頭部付近に7tf/m<sup>2</sup>の力が作用している。鉄筋計に発生した応力 (Max740Kgf/cm<sup>2</sup>) と比較すると極めて小さいが、発生しているひずみは同程度のものであり、鉄筋と地すべり堆積物の剛性の相違によるものと考えられる。

### 4. 震災後の深礎杭の変形を考慮したアカー検討

地すべり対策工の検討において、当初アンカー工の抑止力はプレロード量を40~70%と設定して検討している。計測結果からは深礎抑止杭中に残留応力が考えられ、今後施工に際し予想される地すべりが発生した場合、現状の対策工で計画安全率 (Fs=1.2) が満足できるかどうかを確認してお

表-2 地震による残留応力を考慮した場合の  
プレロードの検討

杭 番号	プレ ロード (%)	最大 引張力 (tf)	最大曲げ モーメント (tf・m)	軸 力 (tf)	コンクリート 残留応力 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	鉄筋応力 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ total (Kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_s$ total (Kgf/cm <sup>2</sup> )	選 定
No. 14	40	67.9	2063	506	97	2280	120	3020	当 初
	50	70.3	1746	516	82	1829	105	2569	地震後採用
	60	75.6	1422	523	67	1374	90	2114	
No. 18	70	95.5	2242	501	105	2540	128	3280	当 初
	80	97.8	1843	512	87	1966	110	2706	
	90	100.9	1442	333	68	1619	91	2359	地震後採用

鉄筋残留応力  $\sigma_{se} = 740\text{Kgf/cm}^2$   
コンクリート残留応力  $\sigma_{ce} = 23\text{Kgf/cm}^2$

許容応力度  $\sigma_{ce} = 108\text{Kgf/cm}^2$   
 $\sigma_{se} = 2700\text{Kgf/cm}^2$

く必要がある。

そこで、計測結果を利用して、残留応力を考慮した上で対策工を再検討した。

#### 4-1 地震による深礎杭中の残留応力

兵庫県南部地震による径3.0mの深礎杭への影響は、鉄筋計で測定されている鉄筋応力の増分に現れている。地震による応力度の変化量は、3.で述べたとおり、引張りが最大740Kgf/cm<sup>2</sup>、圧縮が最大290Kgf/cm<sup>2</sup>であり、これらから推定されるコンクリート圧縮縁での圧縮応力度は最大23.5Kgf/cm<sup>2</sup>である。

地震発生後から現在までの応力度はほぼ変動がなく、杭体は地震以降安定した状態を維持しているものと考えられる。

したがって、杭体に残留している応力度は、鉄筋引張応力度で  $\sigma_{se} = 740\text{Kgf/cm}^2$ 、コンクリート圧縮応力度で  $\sigma_{ce} = 23\text{Kgf/cm}^2$  であると考えられる。

#### 4-2 残留応力を考慮したプレロード量の設定

アンカー打設予定である径3.0mの深礎抑止杭では、アンカーに導入するプレロード量によって杭体に発生する最大曲げモーメントが変化する。つまりプレロード量が小さい場合は、杭の最大曲げモーメントが大きく発生し、前者が大きい場合、

後者は小さいモーメントが発生する。また、当地のアンカーの場合、プレロード量の大きさによっては、アンカー最大引張力は余り変化しないことを確認している。

そこで当該地では、深礎杭体に発生した残留応力度が前述した最大値と仮定し、プレロード量を10~20%増加させることによって最大曲げモーメントを減少させ、残留応力を考慮しても杭体応力が許容値以内となるよう設定した(表-2参照)。表-2には、2本の検討杭を例として示した。

#### あとがき

下谷上第3工区では、兵庫県南部地震により多くの被害を受けた。しかしながら、地すべり分布斜面に対しては、深礎抑止杭が効果的に作用し、斜面下方への被害を最小限に食い止めたと考えられる。

最後に、本工事の検討および施工にあたりご指導、御協力を頂いた阪神高速道路公団トンネル地盤技術委員会(委員長:櫻井春輔 神戸大学教授)、および関係者各位に感謝いたします。