

# 地下立体駐車場の山留め設計法

清 広 歳 宮 崎 祐 助

## Design Method for Earth Retaining Structure of Vertical Underground Car Park of Small Area and Deep Excavation

Hirotoishi Sei Yusuke Miyazaki

### Abstract

The characteristics of excavation for a rotating-gondola, vertical underground car park are small area and deep excavation. For earth retaining in such a case, reinforced concrete diaphragm walls would generally be used. The authors considered that in case of such walls, lateral earth pressure would be reduced by the three-dimensional effect of soil, and the deformations and bending moments of the walls during excavation would be reduced by the restraining effects of other earth retaining walls crossing perpendicularly with these walls. A study was made of the behaviors of such earth retaining walls of vertical underground car parks through measurements at three construction sites and various analyses. As a result of the examinations, the following were found: ① It is possible for design lateral earth pressures proposed assuming a general two-dimensional condition to be used as lateral earth pressures. ② It is possible for earth retaining walls of a vertical underground car park of three-dimensional shape to be designed by evaluating the restraining effect of walls perpendicularly crossing with the earth retaining walls as springs, and applying these to the design method for a one-dimensional plate of general type assuming a two-dimensional condition.

### 概 要

地下立体駐車場の山留めは、掘削深さに対し掘削平面が小さい点に特徴があり、山留め壁としては、RC連続地中壁を用いるのが一般的である。このような地下立体駐車場の山留めについては、一般的な山留めと比較して、三次元効果によって山留め壁に作用する側圧が小さく、また、掘削時における山留め壁の変形、曲げモーメントなどが、山留め壁に直交する壁体の効果によって小さくなると考えられる。このような地下立体駐車場の山留め挙動に関し、3工事場における実測、および種々の解析による検討を行ない、下記の点を明らかにした。① 側圧としては一般の二次元状態を想定して提案された設計用側圧を用いることができる。② 山留め壁に直交する壁体の拘束効果をバネ(「壁バネ」と呼称)として評価し、これを二次元状態を想定した一般的な一方向板の山留め設計法(弾塑性拡張法)に取り入れることにより、三次元的な形状の地下立体駐車場の山留めを設計することができる。

## 1. まえがき

近年、市街地のオフィス、ホテルなどに必要な駐車スペースを確保するため、建物の直下に、地下立体駐車場を建設するケースが増えつつある。このような地下立体駐車場の山留めは、建物の地下室を構築するための一般的な山留めと比較して、平面が小さく、掘削深さが深い点に特徴がある。

現在、山留め壁の設計は、二次元状態を想定して行なうのが一般的である。しかしながら、上記のような形状を有する地下立体駐車場の山留めについては、山留め壁に直交する壁体が、根切り時の山留め壁の変形や応力の発生を抑制するため、二次元状態を想定した一般的な設計法を、そのまま適用すると実状にそぐわない設計となる可能性が高い。

本報告では、このような山留め壁に直交する壁体の拘束効果を、従来の一般的な山留め設計法に取り入れた設計法を提案する。さらに、3工事場における地下立体駐車場の山留め挙動と比較し、この設計法の妥当性を検討する。

## 2. 地下立体駐車場を三次元 FEM モデルとして扱った場合と二次元 FEM モデルとして扱った場合の山留め挙動の比較

ここでは、地下立体駐車場の山留めを、実際の形状通り三次元モデルとして扱った場合、および一般的な山留めと同様、二次元モデルとして扱った場合の2ケースの山留め挙動について、有限要素法による解析を行ない、両モデルの山留め挙動の差異を明らかにする。

### 2.1 解析モデル・解析方法

解析の対象とした地下立体駐車場の山留め架構、地盤条件、側圧分布、掘削過程などを図-1に示した。山留め平面は、9×9 m角で、掘削は、深さG.L.-22 mまで、切梁5段を架け、6回に分けて行なうものとした。また、山留め壁は、根入れ深さG.L.-27 m、厚さ60 cmのRC連続地中壁とした。地盤は、地表面からG.L.-22 mまで弾性係数1,000 tf/m<sup>2</sup>、それ以深は弾性係数10,000 tf/m<sup>2</sup>の2層とした。

上記の地下立体駐車場の山留めを、それぞれ図-2、および図-3に示すような三次元および二次元モデルにモデ

ル化した。三次元モデルは、対称性を考慮して1/8モデルとし、地盤、連続地中壁の各エレメントには、20節点立体要素を、また切梁にはバネ要素を用いた。二次元モデルについては、連続地中壁、および地盤に8節点平面要素を、また切梁には三次元モデルと同様、バネ要素を用いた。

なお、側圧は三次元、二次元モデルとも同じ大きさで、深さ方向に三角形分布、水平方向に等分布と仮定した。

解析は弾性解析とし、各次掘削で掘削される部分の地盤要素を順次消去すると同時に掘削した部分の側圧を与え、その解析結果を前掘削段階の解析結果に加える方法をとった。

### 2.2 解析結果

三次元モデル、および二次元モデルの解析から得られる、山留め壁の変形、曲げモーメント、およびせん断力をそれぞれ図-4～6に、また、切梁軸力を表-1に示した。これらの図表によると、二次元モデルの山留め壁の変形、曲げモーメント、せん断力、および切梁軸力は、いずれも三次元モデルの値と比較してきわめて大きく、最大値で比較すると3～6倍の値を示している。これは、二次元モデルでは、山留め壁に直交する壁体の拘束効果を評価できないためと考えられる。

すなわち、地下立体駐車場の山留め解析を二次元モデルで行なう場合、何らかの形で上記の拘束効果を、考慮する必要があることがわかる。

### 3. 山留め壁に直交する壁体の拘束効果の評価法

既述のように、山留め壁に直交する壁体は、根切り時の山留め壁の変形や応力の発生を抑止する効果がある。これは、地下立体駐車場の水平断面における山留め壁が、図-7に示すように、山留め壁と山留め壁に直交する壁体の交点を固定端とする両端固定梁の状態になっているためと考えられる。そこで、本報告では、このような両端固定梁の状態を想定し、山留め壁に直交する壁体の拘束効果を、バネ  $K_w$  (以下「壁バネ」と呼称する) として次式で評価することにした。

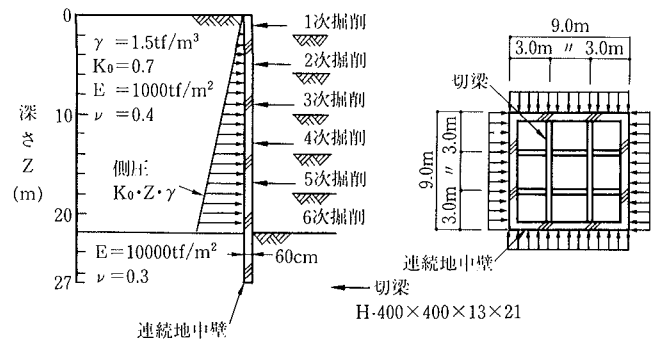


図-1 モデル地盤、山留め架構

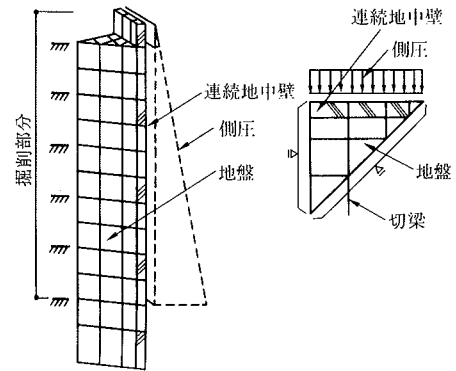


図-2 三次元モデル

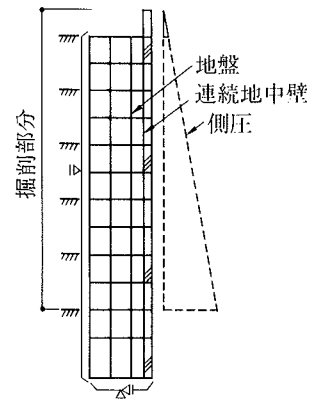


図-3 二次元モデル (壁バネなし)

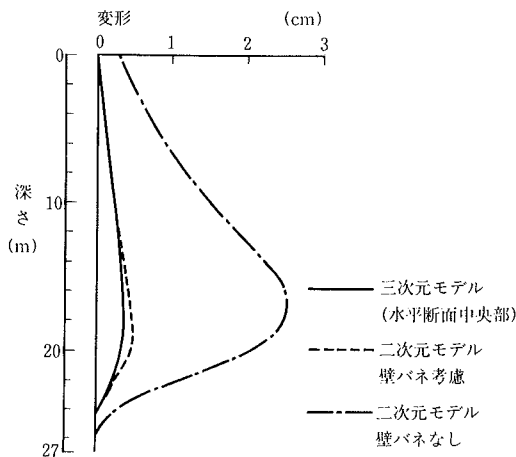


図-4 山留め壁変形

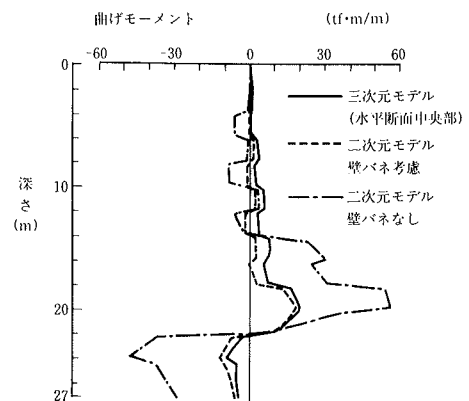


図-5 山留め壁曲げモーメント

$$K_w = \frac{w \cdot D}{\delta_1 + \delta_2} \dots\dots\dots(1)$$

- $K_w$  ; 「壁バネ」 ((t/m)/m)
- $\delta_1$  ; 側圧  $w$  が作用した時の山留め壁に直交する壁体の圧縮量 (全長に対して) の1/2 (m)
- $\delta_2$  ; 側圧  $w$  が作用した時の両端固定梁中央部の変位量 (m)
- $w$  ; 側圧 (t/m<sup>2</sup>)
- $D$  ; 壁バネで評価しようとする山留め壁の深さ方向の範囲 (m)

4. 山留め壁に直交する壁体の拘束効果を考慮に入れた二次元 FEM モデルによる山留め挙動の解析

山留め壁に直交する壁体の拘束効果を評価するため、二次元モデルに、切梁に加えて「壁バネ」を取り付けたモデルを考え、解析を行なった。この二次元モデルを、図-8 に示した。解析結果から得られた山留め壁の変形・曲げモーメント・せん断力を、図-4~6 に、また切梁軸力を表-1 に示した。なお、切梁軸力については、解析値が山留め壁中央の値であることを考慮し補正を行なっている。すなわち、両端固定梁の変形形状より、切梁位置と山留め壁中央での変位量の比率を求め、この比率に合わせて、解析から得られる切梁軸力を低減している。

これらの図表によると、「壁バネ」を取り付けた二次元モデルの解析値は、山留め壁の変形・曲げモーメント・せん断力、および切梁軸力のいずれについても、三次元モデルの解析値にかなり近い値となっている。

すなわち、「壁バネ」を取り付けた二次元 FEM モデルによって、地下立体駐車場の三次元的な、山留め挙動をシミュレートできることが分かる。

5. 地下立体駐車場の山留め設計法の提案、およびこの設計法に基づく山留め挙動と実測結果との比較

4章の解析結果から、二次元状態を想定した一般的な一方向板の山留め設計法(弾塑性拡張法)に「壁バネ」を取り入れることによって、三次元的な地下立体駐車場の山留め設計を行なうことができると考えられる。

本報告では、上記のような「壁バネ」を取り入れた一方向板の山留め設計法を、地下立体駐車場の実用設計法とし

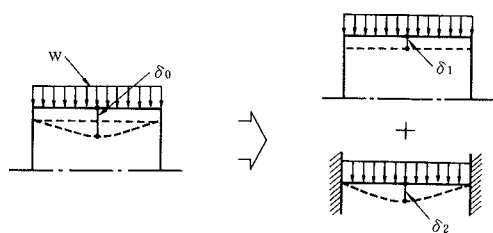


図-7 「壁バネ」の算定方法

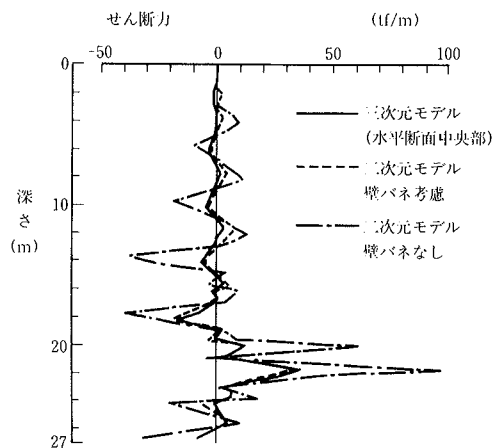


図-6 山留め壁せん断力

表-1 切梁軸力

(最終掘削完了時) tf

	三次元モデル	二次元モデル 壁バネ考慮	二次元モデル 壁バネなし
1段切梁	7.6	3.6	11.5
2段切梁	22.9	24.8	100.8
3段切梁	35.9	40.1	176.6
4段切梁	49.7	57.0	280.9
5段切梁	65.4	87.2	298.4

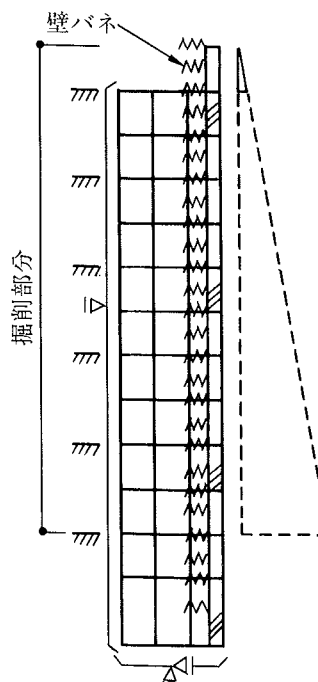


図-8 二次元モデル (壁バネ考慮)

て提案する。さらに、この実用設計法の妥当性を検討するため、以下に、3工事場における地下立体駐車場の山留め挙動の実測結果と、この設計法に基づく山留め挙動の比較を行なう。

5.1 地下立体駐車場の山留め挙動の実測例

山留め挙動の実測を行なった東京都区内のA, B, C, 3工事場における地盤条件・山留め架構の概要、および山留め挙動に関する測定項目を、表一2および図一9に示した。これらの図表によると、各工事の掘削平面は、短辺、長辺とも10m以下と小さく、掘削深さは、20~30m程度とかなり深い。

なお、山留め壁は、3工事ともRC連続地中壁であり、単位パネル間のジョイント方式は、A, C工事については、鉄

筋をパネル間で連結しないロッキングパイプ方式、B工事については、構造的にパネル間の一体化をはかる構造継手方式である。

地下立体駐車場のように掘削平面が小さく掘削深さが深い山留めに作用する側圧は、三次元効果によって、掘削平面が比較的大きい一般的な山留めに作用する側圧より小さくなる可能性がある。そこで、図一10~12の(a)に示す実測の側圧分布図中に、一般的な山留めを対象として提案されている側圧係数<sup>1)</sup>から求めた側圧分布の範囲を示し、両者を比較した。

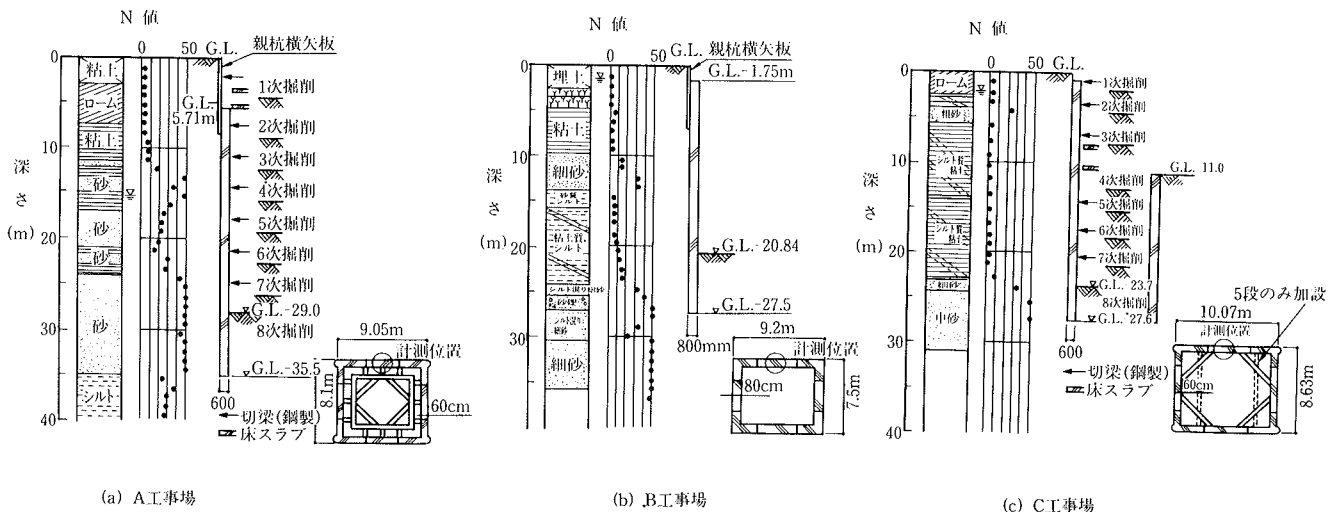
これらの図によると、実測側圧分布は、A工事場を除いて提案された側圧分布の範囲に入っている。なお、A工事場の実測側圧が、深さ16m程度まで、ほぼゼロとなってお

表一2 地盤・山留め架構および測定項目

	A 工 事	B 工 事	C 工 事
地 盤 条 件	粘性土層および砂層 (洪積層)	粘性土層と砂層の互層 (沖積層および洪積層)	軟弱な粘性土層 (沖積層)
掘 削 平 面	8.1×9.1m	7.5×9.2m	8.6×10.1m
掘 削 深 さ	G.L.-29.0m <sup>*1)</sup>	G.L.-20.8m	G.L.-23.7m <sup>*2)</sup>
掘 削 次 数	8段階 <sup>*1)</sup>	-----	8段階
切 梁 段 数	7段 <sup>*3)</sup>	無し	6段 <sup>*4)</sup>
山留め壁根入れ深さ	G.L.-35.5m <sup>*1)</sup>	G.L.-27.5m	G.L.-27.6m
連続地中壁単位 パネル間のジョイント	ロッキングパイプ方式 <sup>*5)</sup>	エレメント間構造継手方式	ロッキングパイプ方式 <sup>*5)</sup>
測 定 項 目	山留め壁の変形・応力(温度), 側圧	山留め壁の応力(温度), 側圧	山留め壁の変形・応力(温度), 側圧

\*1): G.L.-5.7mまで親杭横矢板による  
 \*2): 地下立体駐車場の山留め架構はG.L.-11.0m以深  
 \*3): 切梁7段のうち最上部1段は、親杭横矢板部分

\*4): 切梁6段のうち下部3段が地下立体駐車場部分  
 \*5): 相互のパネルは、鉄筋で連結されていない



図一9 各工事場における地盤および山留め架構

り、設計側圧と比較してきわめて小さな値を示している。これは、A 工事場においては、地下水位が、15 m 付近ときわめて深く、また、深さ 17 m 程度までが自立しやすい洪積粘土であることが原因と考えられる。

また、地下立体駐車場の実測側圧は、図-10~12の(a)に示すように一般的な山留め壁に作用する側圧と同様、掘削に伴って減少する傾向が認められる。地下立体駐車場の掘削平面が小さく掘削深さが深い山留めに作用する側圧については、地盤の三次元効果によって、その減少の割合が、掘削平面が比較的大きい一般的な山留めの側圧に比べ、大きくなる可能性も考えられる。そこで、3 工事場における掘削に伴う側圧係数の変化を求め図-13に示した。

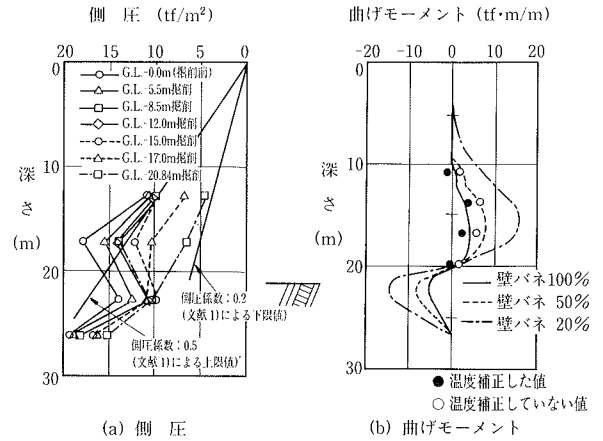


図-11 B 工事場における実測結果および解析結果

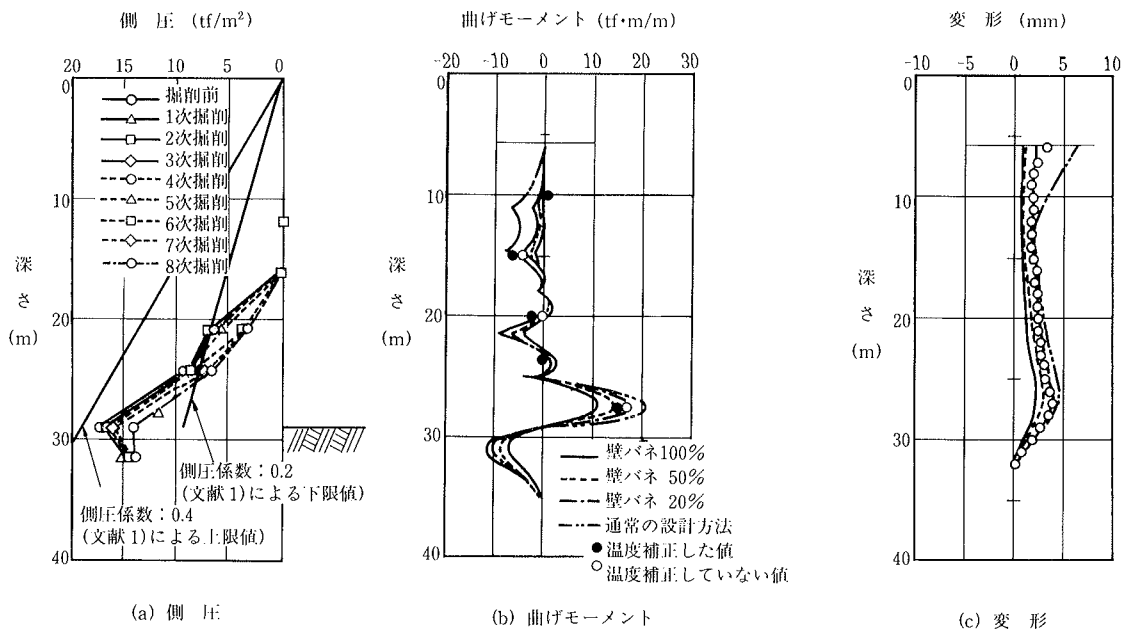


図-10 A 工事場における実測結果および解析結果

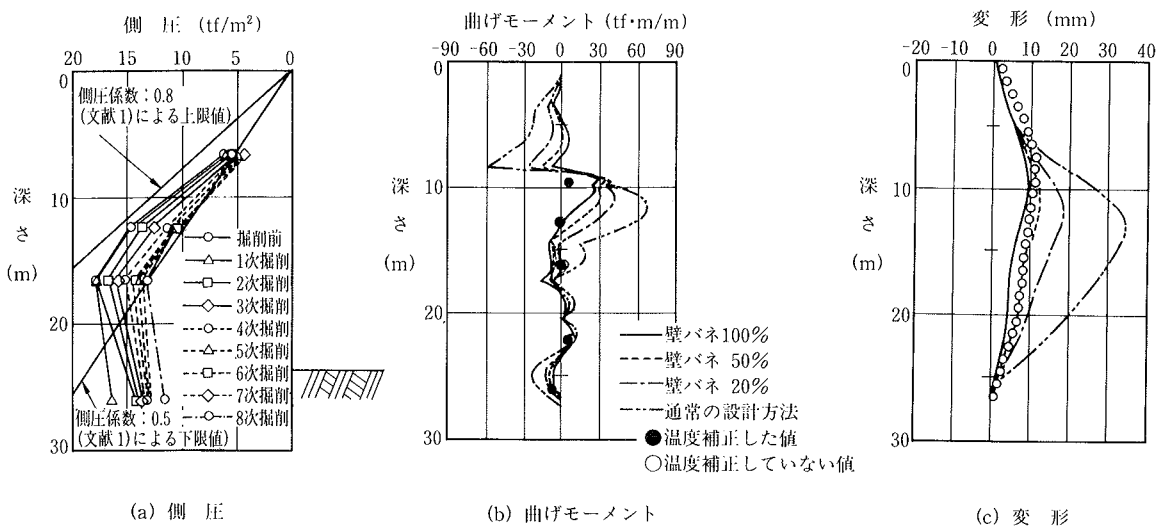


図-12 C 工事場における実測結果および解析結果

なお、この側圧係数は、各掘削段階とも最終掘削深さまでの実測側圧量から、側圧分布が三角形分布であると仮定して求めた値である。

この図によると、最終掘削終了時の側圧係数は、B工事場においては、掘削開始前の値の40%程度に大きく減少しているものの、A、C工事場においては、70,75%程度と掘削平面が比較的大きい一般的な山留めと同程度の減少を示している。すなわち、地下立体駐車場の山留め壁に作用する側圧の掘削に伴う減少の割合は、一般的な山留めと比較して、大きいと断定することはできない。

したがって、わずか3例の実測結果の検討に過ぎないが、以上から、地下立体駐車場の設計側圧として、一般的な山留め壁の設計側圧を利用できると考えられる。

また、山留め壁の曲げモーメント分布、および変形を図-10~12の(b), (c)に示した。なお、A工事については、深さ5.7mまで親杭横矢板工法によって掘削を行なっている。したがって、この影響を除去するため、図示した山留め壁の変形および曲げモーメントは、一次掘削終了時の値を初期値としている。また、曲げモーメントについては、温度補正を行なわない値、および鉄筋計による温度測定結果に基づき温度補正を行なった値をともに示してある。

これらの図によると、曲げモーメント、変形の実測値は、ともにこの程度の深さを有する一般的な山留めと比較して、かなり小さくなっている。これは、地下立体駐車場の山留め壁に直交する壁体が、山留め壁の変形や曲げモーメントの発生を、抑止するためと考えられる。

### 5.2 提案した設計法に基づく、山留め挙動と実測結果との比較

既述の本報告で提案した「壁パネ」を考慮に入れた一方向板の設計法によって、5.1に示す3工事における山留め壁の曲げモーメントおよび変形を求めて図-10~12の(b), (c)中に示し、実測値との比較を行なった。なお、この解析は、山留め壁単位パネル間のジョイント部の一体性が不明確であるため、「壁パネ」の値として、(1)式で求めた値を、100%、50%、20%とした3ケースについて、行なった。さらに、A、C工事については一般の山留め設計法と同様「壁パネ」を考慮していないケースについても解析を行なった。

これらの解析値を実測値と比較すると、単位パネル間のジョイント方式としてパネル間の一体化をはかる構造継手方式を採用したB工事については、「壁パネ」を100%とした解析値が、また、パネル間を構造的に接続しないロッキングパイプ方式を採用したA、C工事については、壁パネを20ないし50%とした解析値が、実測値と比較的よく対応している。

すなわち、パネル間のジョイント方式に応じた「壁パネ」値を採用すれば、二次元状態を想定した一般的な一方向板の設計法に「壁パネ」を取り入れることによって、三次元的な形状を有する地下立体駐車場の山留めを設計することができる。

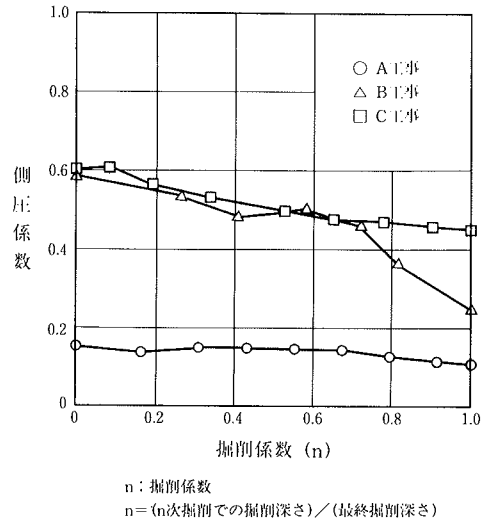


図-13 掘削に伴う側圧係数の変化

## 6. まとめ

地下立体駐車場の山留めは、掘削深さに対して、掘削平面が小さい点に特徴があり、山留め壁としてRC連続地中壁を用いるのが一般的である。

本報告ではこのような山留めの挙動に関する有限要素法による解析結果および3工事場における実測結果に基づき、下記の点を明らかにした。

- (1) 地下立体駐車場の山留め壁に対する設計側圧として、二次元状態を想定した一般の山留めに提案されている設計用側圧を採用することができる。
- (2) 地下立体駐車場の山留め壁の根切り時における変形、曲げモーメントおよびせん断力は、山留め壁に直交する壁体の拘束効果によって、二次元状態を想定できる一般的な山留め壁と比較して、小さくなる。したがって地下立体駐車場の山留めの設計においては、このような拘束効果を考慮する必要がある。
- (3) 上記の拘束効果を、「壁パネ」として評価し、これを二次元状態を想定した一般的な一方向板の山留め設計法(弾塑性拡張法)に取り入れるることによって、三次元的な形状を有する地下立体駐車場の山留めを設計することができる。

### 参考文献

- 1) (社)日本建築学会：山留め設計施工指針，p.91，(1988)
- 2) 岡田，栗原：地下連続壁を用いた立坑土留め壁の掘削時の挙動解析，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第3部，p.313~314，(1985)
- 3) 宮崎，森脇，清：小平面掘削における山留め設計法，第24回土質工学研究発表会講演集，p.1441~1444，(1989)