

広島新交通建設工事における計測管理について

Monitoring in the construction of the new traffic system in Hiroshima

地本勝行' (Katsuyuki Chimoto)
 大村繁之" (Shigeyuki Ohmura)
 村上広吉"' (Hiroyoshi Murakami)
 白石光玉"" (Mitsuyoshi Shiraishi)
 佐々木邦之"" (Kuniyuki Sasaki)
 尾越公也"" (Kimiya Ogoshi)

本報告は、広島新交通システム（アストラムライン）の起点となる本通り駅の開削工事において実施した計測管理についてまとめたものである。

本工事は、広島デルタ上に位置する広島市中心部を掘削するもので様々な技術上の問題点があったが、施工管理に計測管理を導入し、無事開削工事を終了することができた。よってその計測計画と、計測結果、および解析結果について報告する。

キーワード：新交通システム，計測管理，開削工法，大規模掘削，市街地掘削，近接施工，被圧水，軟弱地盤（IGC：H-2）

1. まえがき

本工事は広島新交通1号線建設工事のうち、駅舎部延長111mと線路部88m、計199mを幅約16mの開削工法で施工したものである。なお、全工事区間において路面電車の軌道仮受けを行い、掘削が約6m完了後、被圧水対策として底部および山留め壁下部沿いに薬液注入¹⁾を行った。

本工事は技術的問題点を以下に示す。

- ① 過去、広島市内においてほとんど施工例のない掘削深度（GL-15.5m）であり、かつ大規模掘削であること。
- ② 地表より約6～9m以深に軟弱な沖積粘性土層（A₀層）が約12～16mの層厚で厚く堆積しており、地盤

条件が悪いこと。

- ③ A₀層下端の洪積層（D_s～D_g層）にGL-3.0m程度の被圧水頭を有する被圧水が存在し、盤ぶくれの危険性が考えられること。
 - ④ 広島市中心部の市街地を掘削する典型的な近接施工であること。
 - ⑤ 工事中も路面電車が営業するため、軌道の安全を図り、走行の安全性を確保する必要があること。
 - ⑥ 掘削対象土層（A₀層、A₁層）に硫化水素が含まれており、工事中は作業員ならびに歩行者、住民等に対する災害防止に十分配慮する必要があること。
- したがって、①～⑥の問題に対処するため施工管理に計測管理を導入した。

' 広島市建設局都市交通部 参事

" 広島市建設局第二建設事務所 専門員

''' 鹿島・佐藤・錦建設工事共同企業体 新交通本通工事事務所 所長

"" 鹿島・佐藤・錦建設工事共同企業体 新交通本通工事事務所 次長

"" 鹿島・佐藤・錦建設工事共同企業体 新交通本通工事事務所 工事課長

"" 株式会社 計測リサーチコンサルタント

- 本工事の計測管理目的は、
- ・ 仮設構造物の安全管理
 - ・ 周辺地盤の変状管理
 - ・ 労働災害の防止

の3つに大別できる。

管理対象として、山留め架構，周辺地盤，硫化水素を選定し、現場の主要な箇所に各種の計測器を配備し、現場事務所内でコンピュータによる自動計測システムを中心とした集中管理計測を行った。

この結果、無事開削工事を終了することができたので、その計測計画と、山留め壁の計測管理を主体とした計測結果，および解析結果について以下に報告する。

工事現場位置図を図1-1に、工事工程表を表1-1に示す。



図1-1 工事現場位置図

表1-1 工事工程表

工 程	単 位	1 区			2 区			3 区			4 区			5 区			
		12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9
1. 本通り及び横断線工事																	
1) 打撃工																	
2) 工費の残及び中間杭工																	
3) 降下掘工																	
4) 掘削保安工																	
5) 基礎柱人工																	
6) 掘削工																	
7) 埋戻し工																	
8) 埋戻し(土留め物)																	
2. 地下歩道工事																	
3. 出入口工事																	
4. 埋戻し工																	
技術検討委員会		第1回 2/28			第2回 2/8			第3回 2/12			第4回 2/15			第5回 2/19			

2. 計測計画

2.1 計測管理の目的

本計測は、現場の主要箇所に配置した各種の計測器の情報（データ）を、いち早く処理・解析して工事コントロールへフィードバックすることにより、工事の安全施工管理に、また路面電車の走行安全性確保ならびに作業員，歩行者，住民等に対する災害防止に寄与せしめることを目的とした。

2.2 計測項目

管理対象としては、

- ・ 山留め架構
- ・ 周辺地盤
- ・ 硫化水素

とした。

これらにおける計測項目を図2-1に示す。

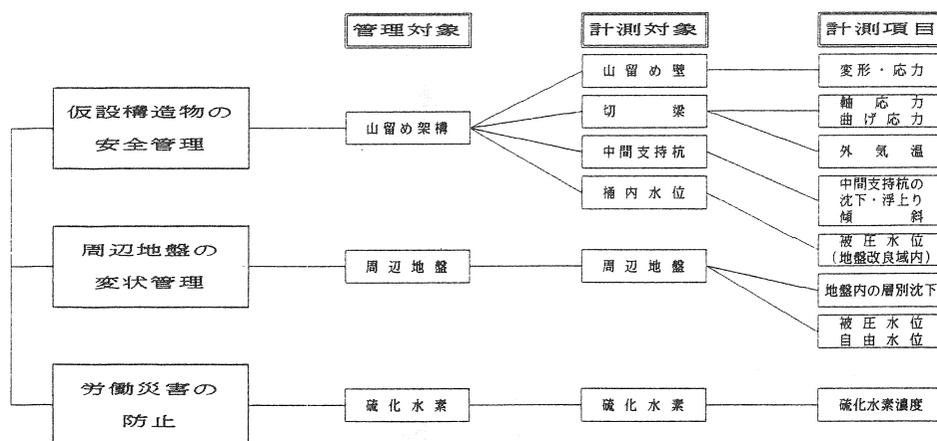
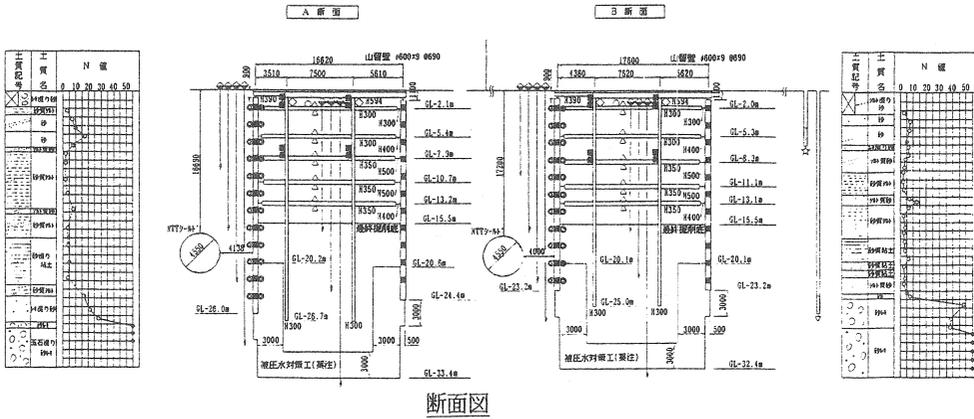
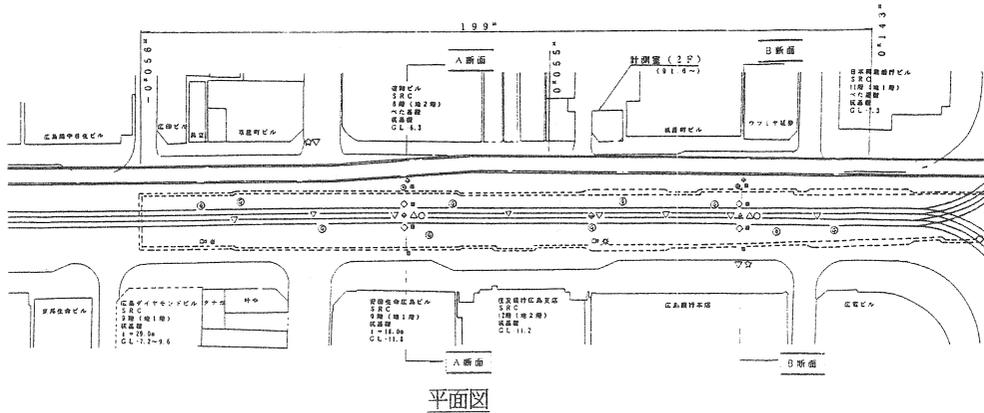


図2-1 管理対象と計測項目

2.3 計器配置

各計器の配置を図2-2に示す。



凡例

記号	計器名	記号	計器名
■	固定傾斜計	◇	変位計
◎	表面歪計 (圧力バランス型)	☆	間隙水圧計 (自由水位)
△	表面歪計 (標準耐水型)	▽	間隙水圧計 (被圧水位)
○	温度計	⊕	ガス検知器
◇	水盛式沈下計	☒	サイレン・回転灯

図2-2 計器配置図

2.4 計測システムと日常管理・解析

日常管理は図2-3に示すシステムをベースに行い、データの入力, 保存, 各種管理図の出力により, 挙動把握, 設計値との対比, 管理基準値との対比, 安全の確認等を行った。また, 必要に応じて修正設

計, 施工へのフィードバック, あるいは硫化水素対策では, 換気の際しての送気量の調整等へフィードバックした。山留め弾塑性解析についても一括してパソコンを利用して行ったが, 解析内容の詳細は後述する。また, 計測管理のフローを図2-4に示す。

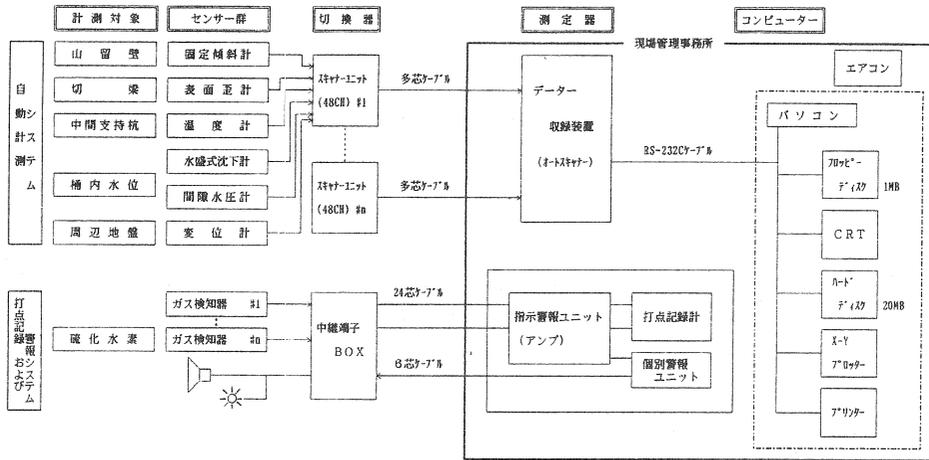


図2-3 システムブロック図

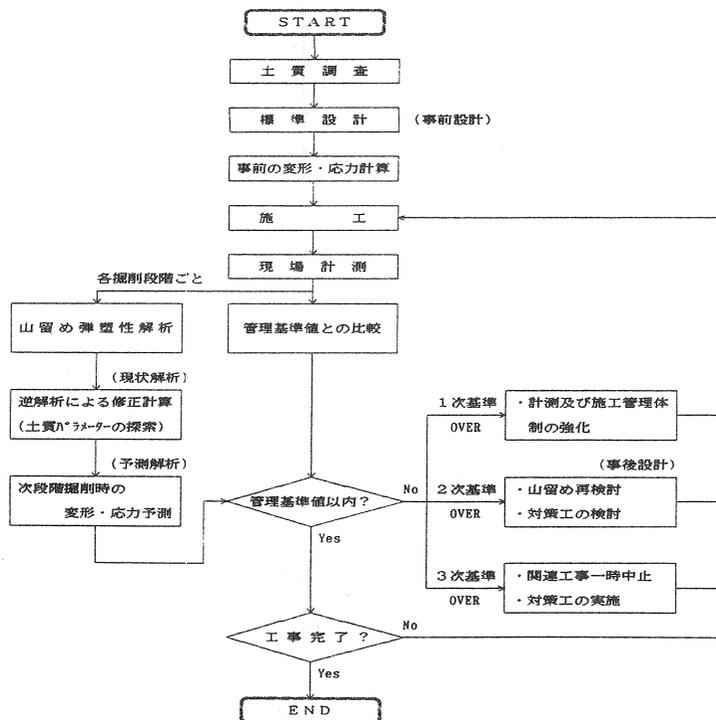


図2-4 計測管理のフロー

2.5 管理基準値

管理基準値は、表2-1に示す文献を参考に表2-2のように設定した。

表2-1 管理測定基準²⁾

測定項目		比較値(基準値)	(1)第1次規準値	(2)第2次規準値	(3)第3次規準値	備考	
連壁	側圧(水圧)	設計側圧分布	100%	—	—	設計側圧分布と比較を行ない有意な変動を示した場合には、その原因を考察する。	
	応力	鉄筋応力度	鉄筋引張許容応力度(中期)	60%	80%	100%	鉄筋応力度計測値から曲げモーメントを正確に求めることは困難であるが、目安として許容曲げモーメントと比較する。
		曲げモーメント	許容曲げモーメント(中期)	60%	80%	100%	
	変形	切梁架構設計時の計算値	100%	—	—	設計計算値と比較し、有意な変動を示した場合には、その原因を考察するとともに、周辺環境調査結果などを含めて判断する。	
切梁	切梁軸力	許容圧縮力(中期)	60%	80%	100%		
火打ち梁	火打ち梁軸力	許容圧縮力(中期)	60%	80%	100%		
腹起し	腹起し応力	許容曲げモーメント(中期)	60%	80%	100%		
	斜め部変形	計器の測定誤差	100%	—	—		
対策基本方針			計測および施工管理体制を強化する	次段階以後の予測計算結果が、第3次規準値を超える場合、山留め構の再検討を行ない、適切な予防処置を講じるとともに、対策を検討する。	関連工事を一時中断し前段階で検討した適切な対策処置を講じる。		

表2-2 管理基準値一覧表

管理目的	計測対象	計測項目	計測器	主目的			設計値	管理基準値			摘要
				現状	予測	補足		1次	2次	3次	
仮設構造物の安全管理	山留め壁	変形	固定傾斜計	○	○	-		60m/m	70m/m	85m/m	事前解析による
		応力	表面歪計	○	○	-	許容応力度 $\sigma=2000\text{kg}/\text{cm}^2$	許容値 $\times 0.8$ 1600kg/cm ²	許容値 $\times 1.0$ 2000kg/cm ²	2300kg/cm ²	
	切梁	応力	表面歪計	○	○	-	許容応力度 $\sigma=1300\text{kg}/\text{cm}^2$	許容値 $\times 0.8$ 1000kg/cm ²	許容値 $\times 1.0$ 1300kg/cm ²	1600kg/cm ²	
		外気温	温度計	-	-	○	なし	-	-	-	
	中間坑	変形	固定傾斜計	○	-	-					
		沈下 浮上り	水盤式沈下計	○	-	-	沈下 10m/m(推定値) 沈下	10m/m	-	-	
桶内水位	被圧水位	間隙水圧計	○	-	-					各掘削段階でFs=1.1	
周辺地盤の変状管理	周辺地盤	層別沈下	変位計	-	-	○	なし	-	-	-	
		自由水位	間隙水圧計	-	-	○	GL-2m	-	-	-	
		被圧水位	間隙水圧計	-	-	○	GL-3m	-	-	-	
	硫化水素	硫化水素	ガス検知器	○	-	-	なし				10ppmを上限とする
摘要							計測工および施工管理体制を強化する	山留め再検討・対策工の検討	関連工事一時中止・対策工の実施		

3. 計測結果

掘削の進行に伴う各計測値の動きが認められたが、底床コンクリート打設以降は概ね安定した。

3.1 山留め壁の変形及び曲げ応力

A断面の山留め壁最大変位量は、西:8.0cm, 東:6.0cmであった。(西側は2次基準値を、東側は1次基準値を超えた。) 最大曲げ応力は、1547kg/cm²と管理基準値を下回った。B断面の山留め壁最大変位量は、西:6.4cm, 東:7.2cmであった。(西側は1次基準値を、東側は2次基準値を超えた。) 最大曲げ応力は、2036kg/cm²と2次基準値を超えた。A, B断面とも切梁撤去により山留め壁の曲がり方が緩和され、切梁撤去段階から曲げ応力が減少した。B断面については最終的に1664kg/cm²と2次基準値以下の値となり、応力的に問題はなかった。なお、A断面-西側以外の計測地点は山留め壁の根入れが支持層まで達していない可能性があり、実際には根入れ下端が前面側へ変位したと推察される。

山留め壁の変形及び曲げ応力分布図を図3-1に示す。

3.2 切梁応力

切梁応力はA, B断面とも管理基準値を下回り、問題はなかった。

3.3 中間杭の鉛直変位・傾斜

中間杭の浮上りは、A, B断面とも薬液注入時に顕著であった(A;1.5~1.8cm, B;2.7~3.0cm)。しかしその後の掘削にともなう挙動変化はほとんどみられず、傾斜の計測値もあわせて問題はなかった。

3.4 桶内水位

桶内の揚水量は約0.5ℓ/分~2.2ℓ/分と微量であり、地盤改良効果は十分であったと判断できる。

また、桶内水位はほとんど変動なく一定であった。

3.5 周辺地盤における層別沈下

各層の沈下量は掘削の進捗に応じて増大したが、最終的な沈下量は4mm~17mm程度(山留め壁から離隔3m地点)と小さく問題なかった。

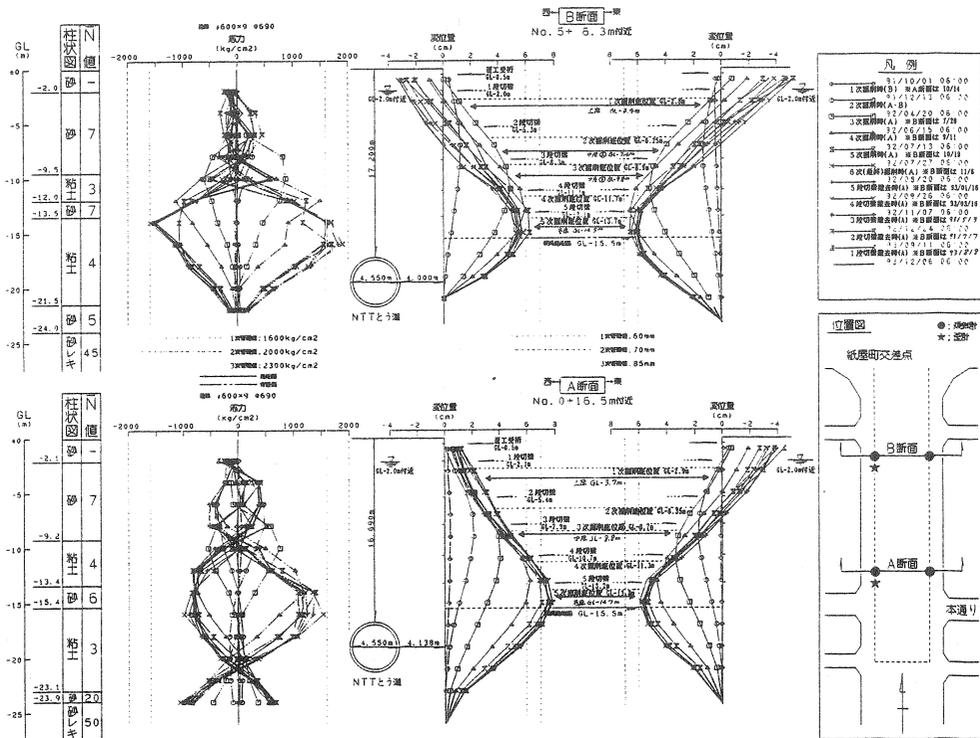


図3-1 山留め壁の変形及び曲げ応力分布図

3.9 硫化水素

掘削期間中の硫化水素の検出濃度は0~10数PPMの間で推移したが、作業休止時間は検出されなかった。

なお、硫化水素検知器は一酸化炭素(CO)にも干渉を受ける特性を持つことから、作業時間中の検出濃度の大部分は、構内の重機の排気ガスの影響によると考えられる。

構内では多少の悪臭があったものの、硫化水素濃度は管理基準値を上回るほどのものではなく、作業員、歩行者、住民等に影響を及ぼすことはなかった。

4. 対策工

計測結果に基づき山留め架構には次のような対策工を実施した。

3次掘削の段階で山留め壁の変位、切梁軸力の増加が予測されたため、3段~5段切梁をH300からH350に、3段・4段腹起しをH400からH500にそれぞれ変更した。

また、3段~5段切梁に60~100t/本(許容値の約50%程度)のプレロード荷重を導入し、山留め壁の変形を抑制した。

B断面付近では3次掘削以降、支保工仮設のための余掘量を0.8mから0.6mに変更し、さらに5段(最下段)切梁の設置深度を設計より0.2m浅くすることにより、先行して山留め壁の変形を抑制した。

5. 山留め弾塑性解析(現状解析と予測解析)

日常管理と並行して、各段掘削時に山留め弾塑性解析を行った。山留め弾塑性解析は、次段階掘削時以降の山留め架構の状態予測を目的として実施した。

図2-4の計測管理のフローの中で、「逆解析による土質パラメータの探索」-現状解析(フィッティング)-「次段階掘削時の変形、応力予測」-予測解析-を行ったもので、次段階掘削前にあって山留め架構の安全度を事前に評価した。

予測解析結果に問題がなければそのまま掘削を行い、問題があると予測された場合には、必要な対策を施した後掘削を行った。

解析検討は、原則として各掘削段階ごと、ならびに躯体構築時の切梁撤去ごと繰り返し実施した。

なお、現状解析、予測解析は安全側を考慮し、変位量の大きいA断面-西側、B断面-東側でそれぞれ行った。

5.1 解析手順

解析のフローを図5-1に示す。

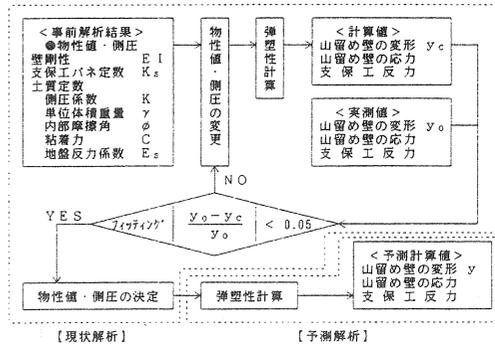


図5-1 山留め弾塑性解析のフロー

現状解析とは、山留め解析の必要な入力値である土圧・水圧等の外力、地盤の変形係数等を試行錯誤の上で変化させることにより、計測された山留め壁の変形・応力、支保工反力等を再現できる定数を推定することである。具体的には計測データの信頼性の高い変形を中心に着目し、計算変位量との誤差が5%程度を目標に定数の推定を行った。

現状解析は、主として最大変位量および変形の分布性状に着目して行い、土質定数は主として弾塑性計算において比較的感度の高い(計算結果に大きく影響する)横方向地盤弾性係数Eを变化させて行った。そして、現状解析で得られた諸定数をもとに次段階施工時以降の山留め壁の変形・応力、支保工反力を計算し、応力照査を行った。

5.2 解析の基本仮定

山留め弾塑性解析の基本仮定を以下に示す。

- 掘削面側の抵抗土圧は壁体の変位に比例し、かつ有効受働土圧を超えない。
- 切梁は設置後弾性支承となる。
- 壁体は有限長とし、地盤条件により先端をヒンジ、固定、自由の3種類とする。(本解析では自由。)弾塑性モデルの概念図を図5-2に示す。

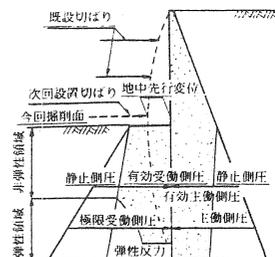


図5-2 弾塑性モデルの概念図

5.3 解析ステップ

A断面-西側の解析ステップを図5-3に示す。

なお、予測解析による検討から、切梁撤去時に盛替梁の設置は行わなかった。

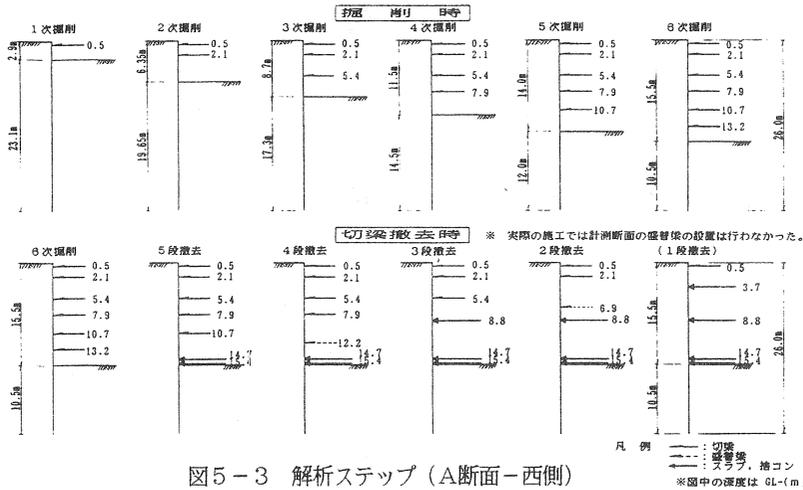


図5-3 解析ステップ (A断面-西側)

5.4 部材定数

山留め壁,切梁,スラブ等の部材定数を表5-1に示す。

表5-1 部材定数一覧表

		解析値	断面諸元
壁剛性 E I		2.220×10^{11}	鋼管矢板 $\phi 600 \times 9 @ 690$ $A = 242.2 \text{ cm}^2/\text{m}$ (断面積) $E = 210000 \text{ kg/cm}^2/\text{m}$ (弾性係数) $I = 105700 \text{ cm}^4/\text{m}$ (断面2次モーメント) $Z = 3521 \text{ cm}^3/\text{m}$ (断面係数)
kg·cm			
A断面	切梁 部材定数 K_s	0段	1235
		1段	11418
		2段	11418
		3段	16876
		4段	16876
	t/m/m	5段	16876
		上床	108946
		中床	108949
		底床	163424
		捨刃	27237
		$K_s = \alpha \frac{2 \cdot E \cdot A}{L \cdot S}$	$\alpha = 1$ (ゆるみ係数・左右対象構造) $E = 210000 \text{ kg/cm}^2$ (弾性係数) $A = 136.0 \text{ cm}^2$ (H390:0段:覆工桁) 104.8 cm^2 (H300:1・2段) 154.9 cm^2 (H350:3・4・5段) (断面積) $L = 15.42 \text{ m}$ (長さ) $S = 2.5 \text{ m}$ (分担幅)
		スラブ	$E = 210000 \text{ kg/cm}^2$ $A = 4000 \text{ cm}^2$ (上床) 4000 cm^2 (中床) 6000 cm^2 (底床) 1000 cm^2 (捨刃) $S = 1.0 \text{ m}$

表5-2 部材の許容値一覧表

5.5 部材の許容応力度, 許容切梁反力

許容応力度(鋼管矢板)、許容切梁反力(切梁, 腹起し)を表5-2に示す。

各許容値の算出は、「山留め設計施工指針 日本建築学会」に基づいて行った。

5.6 土質定数と作用側圧

事前解析では、広島市内の掘削工事における計測(解析)事例に基づき、土質定数, 作用側圧を設定した。

鋼管矢板力の度	切梁			腹起し			
	段数	H	許容切梁反力 R_w [曲げ] (t/m)	段数	H	許容切梁反力 R_w [曲げ] (t/m)	R_s [鉛直] (t/m)
$\sigma_{aa} = 2000 \text{ kg/cm}^2$	1段	H300	48.6	1段	H300	28.8	25.9
	2段	H300		2段	H400	76.9	44.8
	3段	H350	85.1	3段	H500	155.6	108.0
	4段	H350		4段			
	5段	H350	85.1	5段	H400	76.9	44.8

6. 解析結果

6次（最終）掘削時の現状解析(フィッティング)例 (A断面-西側における現状解析結果と求めた入力定数

数)を図6-1に、6次（最終）掘削時の予測解析例 (A断面-西側における4・5段梁撤去時の予測解析結果と入力定数)を図6-2にそれぞれ示す。

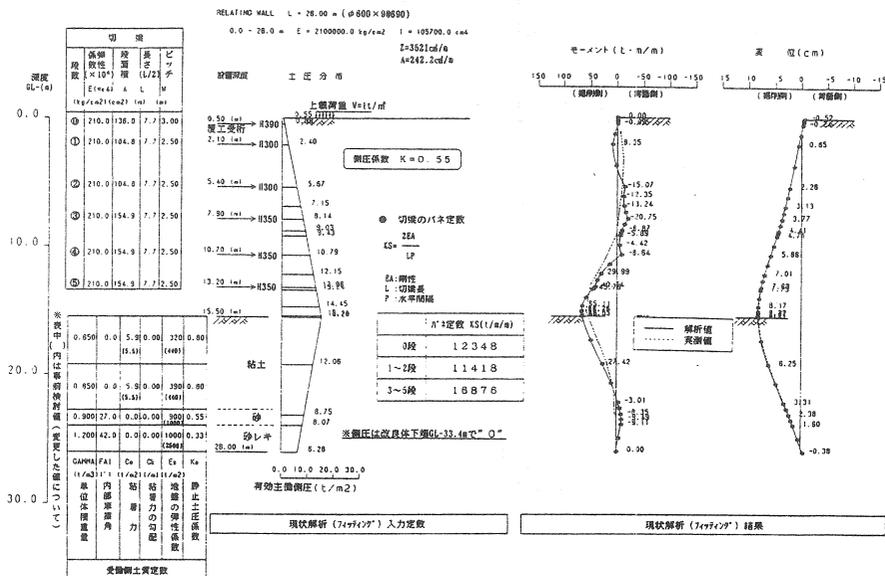


図6-1 6次掘削時の現状解析例 (A断面-西側)

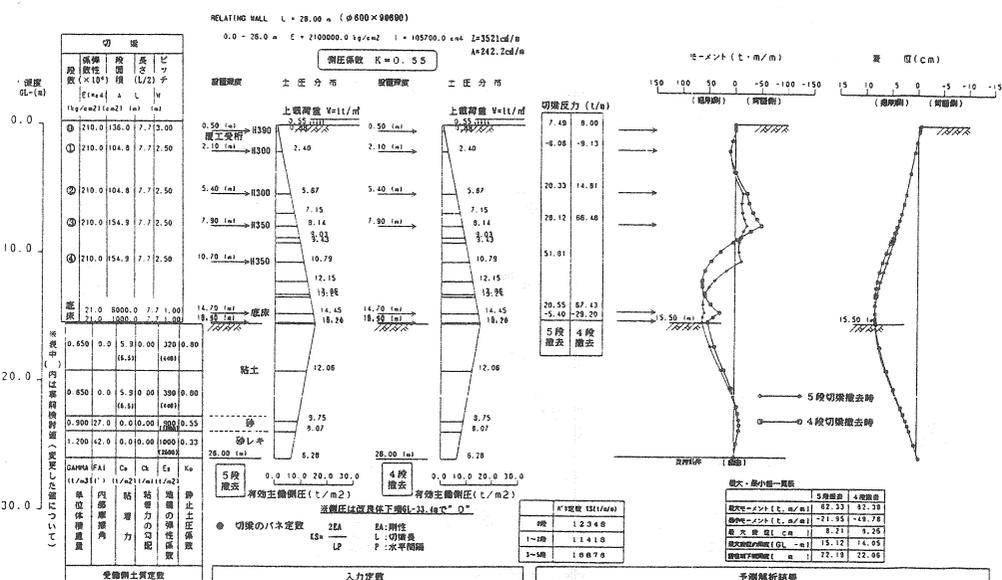


図6-2 6次掘削時の予測解析例 (A断面-西側)

7. まとめ

(1) 山留め壁

変位量、曲げ応力とも2次基準値を超え、変形の最大値は約8cm、曲げ応力の最大値は約2000kg/cm²と、許容値近い値となった。なお、曲げ応力については切梁撤去により山留め壁の曲げが緩和され、最終的に許容値の80%程度まで減少した。

(2) 支保工（切梁・腹起し）

切梁の水平間隔が2.5mと小さく、段数、断面等も合理的な設計であったと考えられ、実際に発生した切梁軸力は最大でも許容値（腹起し）の90%程度となった。なお、切梁のプレロードは許容値の50%程度とした。

また、計測結果と予測解析による検討から、切梁撤去時の盛替梁の設置は行わなかった。

(3) 盤ぶくれ

中間杭の浮上りは薬注時に最大3cm程度であり、掘削による影響はほとんどなかった。

(4) 被圧水対策

桶内の揚水量は0.5ℓ/分～2.2ℓ/分と微量であり、地盤改良効果は十分であったと判断できる。

また、桶内水位はほとんど変動なく一定であった。

(5) 周辺地盤

周辺地盤の層別沈下量は4mm～17mm程度と小さく問題とならなかった。

(6) 硫化水素

検出された値は小さく問題はなかった。

各計測値は掘削の進行に伴って変動したが、底床コンクリート打設後にはほぼ安定し、躯体構築以降の施工による動きはほとんどみられなかった。

次に、山留め弾塑性解析の現状解析(フィッティング)で求めた解析定数を以下に示す。

・ 上載荷重

$$W = 1.0 \text{ t/m}^2 \text{ (1次掘削時はなし)}$$

・ 側圧係数（土水圧係数）

$$K = 0.55 \text{ (最大)}$$

(ランキン・レザール式による換算側圧係数は

$$K = 0.66 \text{ 程度})$$

側圧強度は、

$$P_a = K \cdot \gamma_t \cdot H \quad \gamma_t: \text{単位体積重量}(\text{t/m}^3)$$

$$H: \text{層厚}(\text{m})$$

で計算され、掘削底を最大とし、地盤改良体下端で0となる分布。

・ 下部粘性土の弾性係数

$$E_s = 320 \sim 390 \text{ t/m}^2$$

$$\approx (60 \sim 70) C \quad C: \text{粘着力}(\text{t/m}^2)$$

なお、最終的に求めた下部粘性土の弾性係数 E_s は、事前解析で設定した値の80%程度の値となったが、この低減した E_s を1次掘削に適用する場合は、側圧係数を $K = 0.3$ 程度に低減させると実際の変形に合いやすい。

本工事は、広島市中心部の市街地で供用中の路面電車を仮受けしながらの大規模な開削工事であり、種々の技術的問題点があったが、施工管理に計測管理を導入し、無事開削工事を終了することができた。

最後に、当工事の技術検討委員会において終始適切なご指導を頂いた、広島大学名誉教授 網干寿夫先生、広島大学教授 吉國洋先生、ならびに関係各位に当紙面をお借りして厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 地本勝行, 大村繁之, 白石光玉, 佐々木邦之, 楠本千賀志 (1993): 広島新交通建設工事における被圧水対策について, 「地盤と建設」, Vol.11, No.1, pp.139-150
- 2) 生川克彦 (1984): 金杉発電所における山留め管理計測, 「基礎工」, Vol.12, No.5, pp.99-104