

新幹線駅舎高架橋アンダーピニング

における影響予測と計測管理

INFLUENCE ANALYSIS AND MEASUREMENT CONTROL OF UNDERPINNING VIADUCT OF SHINKANSEN STATION

加藤 光* ・高濱 文義** ・近藤 正直*** ・古山章一**** ・瀧内 義男*

Akira KATO, Humiyoshi TAKAHAMA, Masanao KONDO, Shoichi HURUYAMA and Yoshio TAKIUCHI

This paper reports on the influence analysis and the measurement of underpinning the viaduct of Sendai station on Tohoku Shinkansen in the construction of the subway which cross under the viaduct. For operating Shinkansen safety, the vertical displacement of the viaduct have been controlled by limiting 3mm. We are measuring the subsidence and the inclination, etc of the viaduct automatically. And the result of this measurement agrees with the analysis done before construction well. The viaduct dose not displace harmfully now. We are measuring in the construction, and we are appling the result of measurement to construction.

Keywords: underpinning, influence analysis, automatic measurement, underground railway tunnel

1. まえがき

現在、工事が進められているJR仙石線の仙台駅・苦竹間の延長約3.9Kmの地下化工事のうち、東北新幹線仙台駅直下を横断する部分については、新幹線を走行させながらの工事となることから、駅部新幹線高架橋を受替用基礎杭で受替えて地下鉄函体を構築するアンダーピニング工法を採用している。

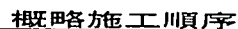
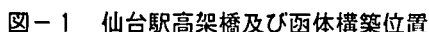
今回は、この駅舎部分のアンダーピニング工事がほぼ完了したので、影響予測解析と計測管理および計測結果の概要について報告する。

2. 工事概要

仙台駅は図-1に示すように、地上4階、地下1階の多層多径間ラーメン構造の高架橋であり、基礎は地中梁を有する直接基礎となっている。1柱当り最大2600tfの高架橋荷重を支持するこの基礎は、一軸圧縮強度 q_u が50kgf/cm²程度の凝灰質泥岩を支持地盤としている。

*	正会員	東日本旅客鉄道(株)	東北工事事務所	工事管理室
**		東日本旅客鉄道(株)	東北工事事務所	土木第一課
***		東日本旅客鉄道(株)	東北工事事務所	仙台工事区
****	正会員	東日本旅客鉄道(株)	構造技術センター	

新幹線高架橋基礎平面図



- 図-2 地下鉄函体の施工概念図

計画、設計上の主な特徴を以下に示す。

①駅や高架橋基礎の地中梁は本工事を想定し、無対策でも導坑掘削が可能のように、新幹線高架橋建設時に3スパン分について断面を大きくして補強している。(図-1参照)

②高架橋はラーメン構造であり、しかも地中梁を有する直接基礎は軟岩地盤中に根入れされているため、受替杭に対する地震の影響が少ないと考えられる。そこで、高架橋荷重を仮受時だけでなく将来的にも受替杭で支持させる設計とした。このため、地下鉄函体に高架橋荷重を載荷させない設計が可能となり、上床版厚等は非常に薄いものできた。

③駅舎高架橋に対する掘削による影響を最小限に抑えるため、導坑断面は受替杭を施工できる範囲で極力小さいものとした。そのため、受替杭は人力施工が可能な深礎杭を採用し、平面形状は荷重規模により図-3に示すように2種類の小判形とした。

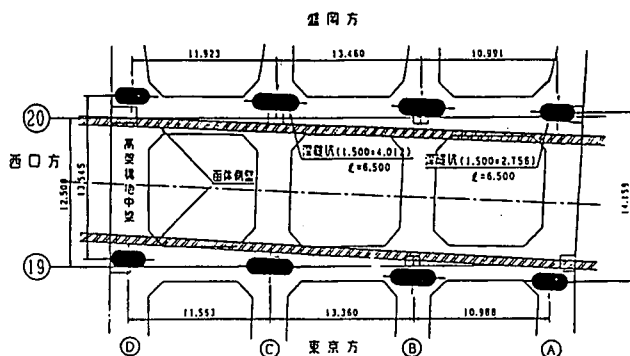


図-3 受替杭（小判形深礎杭）の配置図

3. 影響解析

施工に伴う既設高架橋の影響解析は、三次元弾性骨組構造解析(図-4)により行った。

なお、解析は以下の条件に基づいている。

- ①施工段階を考慮したステップ解析
- ②導坑掘削による周辺地盤のゆるみを考慮
- ③受替杭造成後、この杭と高架橋に応力導入を与えた解析
- ④高架橋を変位量と発生断面力の両方で照査

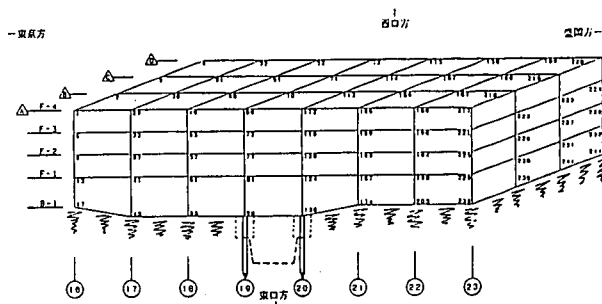


図-4 三次元弾性骨組構造解析モデル

解析の結果、19通り、20通りの受替杭造成後に各々の受替杭に対し応力導入（B列とC列に1500 tf/本、A列とD列に750 tf/本）を行えば、掘削完了後に変位調整（ジャッキ調整）を実施しなくても変位、発生断面力とも許容値を満足することが分かった。

なお、施工にあたっては、各施工段階毎（19通り導坑掘削後、20通り導坑掘削後）に計測結果を用いたシミュレーション解析（逆解析）を実施し、設計の妥当性と施工に対する安全性を検証し、次期施工による挙動を予測しながら工事を進めている。

4. 計測管理

新幹線の列車運行に支障することなく工事を進めるには、駅舎高架橋の変位、応力状態および周辺地盤の挙動とその傾向を的確に把握し、アンダーピニング支持部材をも含めて総合的にその安全性を確認しながら施工する必要がある。そこで、高架橋柱相互間の不同沈下が最も重要な管理項目であると考え、事前の影響解析結果、新幹線の走行安全性に対する軌道から定まる規制値、建物としての変位の限界値および過去の類

似施工例等より、隣接柱間の相対鉛直変位を3mmとして管理を行った。

計測内容については、高架橋、受替杭および周辺地盤については自動計測を行い、また、掘削等の作業による影響が直接現れると考えられるB1階においてはマイクロレベルによる測量も実施し、自動計測を補充するとともに、ダブルチェック体制で施工管理を行っている。

5. 計測結果

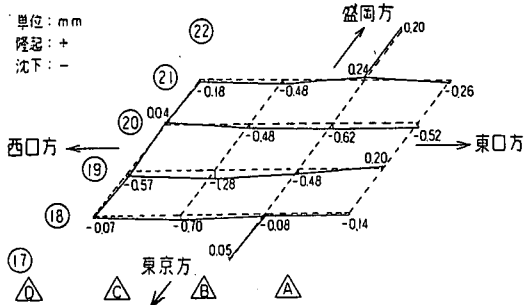
平成8年10月現在、地下鉄函体構築後の函体側部の埋戻し作業が完了したところである。（図-2参照）
主な作業の鉛直変位の比較を表-1に、作業毎の相対および絶対鉛直変位透視図を図-5に示す。

表-1 高架橋の鉛直方向絶対変位の比較（解析と計測結果）

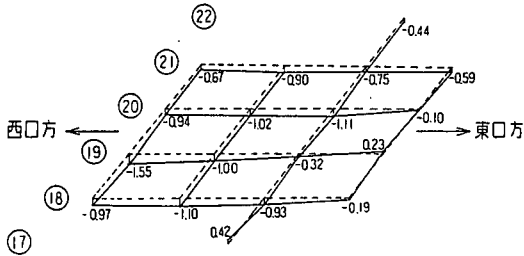
			単位:mm +:隆起 -:沈下																								
通り			(18) 通り				(19) 通り				(20) 通り				(21) 通り												
列	施工段階	年月日	種別	観測値		逆算値		計測結果		観測値		逆算値		計測結果		観測値		逆算値		計測結果		観測値		逆算値		計測結果	
				液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル	液主式	レベル
D 列	工事着手前	H 5. 1.12	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	
	19 導孔掘削	H 5. 3.16	-0.151	-0.021	-0.07	—	-1.291	-0.051	-0.57	—	-0.156	-0.016	0.04	0.0	0.030	0.026	-0.18	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	
	通 深掘削	H 5.11.30	—	—	—	—	—	—	-2.27	—	—	—	-1.34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	り 受 替	H 5.12. 1	-0.039	-0.174	-0.97	0.1	-0.286	-0.140	-1.55	1.3	-0.029	-0.248	-0.94	1.4	0.006	-0.519	-0.68	-0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	
	20 導孔掘削	H 6. 4. 1	0.007	-0.144	-0.13	—	-0.496	-0.169	-1.70	1.7	-1.622	-1.526	-2.56	0.1	-0.087	-0.717	-2.18	-1.4	—	—	—	—	—	—	—	—	
	通 深掘削	H 6. 7.25	—	—	—	—	—	—	-0.05	1.6	—	—	-1.18	0.3	—	—	0.06	-1.4	—	—	—	—	—	—	—	—	
	り 受 替	H 6. 7.27	-0.027	-0.165	0.36	1.2	-0.379	-0.162	0.32	2.2	-0.425	-0.446	0.15	1.0	-0.001	0.086	0.68	-1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	
	導孔掘削	H 6.11.3	—	-0.093	-1.71	—	—	-1.238	-2.13	—	—	-2.334	-4.45	—	—	0.015	-3.81	-2.3	—	—	—	—	—	—	—	—	
	函体側部掘削	H 7. 1.15	-0.018	-1.102	-4.30	—	-1.857	-2.688	-3.86	—	-2.353	-3.580	-7.48	—	0.014	-4.185	-5.82	-3.8	—	—	—	—	—	—	—	—	
	側部埋戻し前	H 8. 6. 1	—	-1.102	-6.36	—	—	-2.688	-6.68	-2.6	—	-3.580	-7.25	-2.1	—	-4.185	-6.32	-3.7	—	—	—	—	—	—	—	—	
側部埋戻し後	H 8.10. 1	—	-0.848	-6.20	—	—	-2.123	-6.67	-2.6	—	-2.833	-7.06	-2.1	—	-3.473	-6.13	-4.0	—	—	—	—	—	—	—	—		
C 列	工事着手前	H 5. 1.12	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	
	19 導孔掘削	H 5. 3.16	-0.256	-0.080	-0.70	-0.2	-1.912	-0.942	-1.28	-0.2	-0.221	-0.062	-0.48	0.0	0.038	0.041	-0.48	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	
	通 深掘削	H 5.11.30	—	—	-1.71	1.0	—	—	-2.21	-1.9	—	—	-1.53	—	—	—	0.31	0.0	—	—	—	—	—	—	—	—	
	り 受 替	H 5.12. 1	0.048	-0.274	-1.10	-1.6	-0.353	-0.342	-1.00	-1.7	-0.050	-0.362	-1.02	1.3	-0.069	-0.819	-0.92	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	
	20 導孔掘削	H 6. 4. 1	0.000	-0.231	-0.80	-2.0	-0.786	-0.526	-2.40	1.4	-2.473	-2.848	-2.37	0.4	-0.191	-1.237	-2.31	-0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	
	通 深掘削	H 6. 7.25	—	—	-0.69	-1.7	—	—	0.28	-2.6	—	—	-1.59	0.0	—	—	-1.37	-0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	
	り 受 替	H 6. 7.27	-0.037	-0.261	-0.61	-0.3	-0.512	-0.441	0.76	-1.0	-0.582	-1.076	0.15	0.3	-0.079	-0.885	-0.55	0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	
	導孔掘削	H 6.11.3	—	-0.657	-1.25	-1.5	—	-1.996	-3.32	-2.6	—	-3.062	-3.46	-1.2	—	-2.221	-4.49	-0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	
	函体側部掘削	H 7. 1.15	-0.056	-1.050	-3.73	-1.8	-2.052	-3.798	-5.27	-3.4	-2.348	-4.575	-6.17	—	-0.065	-4.521	-6.48	-1.9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	側部埋戻し前	H 8. 6. 1	—	-1.050	-4.20	-1.1	—	-3.798	-7.55	-4.0	—	-4.575	-7.12	-2.4	—	-4.521	-7.01	-3.4	—	—	—	—	—	—	—	—	
側部埋戻し後	H 8.10. 1	—	-0.718	-4.04	-1.0	—	-2.830	-7.46	-3.9	—	-3.429	-6.72	-2.0	—	-3.322	-6.64	-3.3	—	—	—	—	—	—	—	—		
B 列	工事着手前	H 5. 1.12	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	
	19 導孔掘削	H 5. 3.16	-0.265	-0.085	-0.08	0.0	-1.853	-0.932	-0.48	0.1	-0.202	-0.057	-0.62	0.5	0.036	0.040	0.24	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	
	通 深掘削	H 5.11.30	—	—	-1.28	—	—	—	-1.47	-1.8	—	—	-1.39	-1.2	—	—	-0.62	-1.3	—	—	—	—	—	—	—	—	
	り 受 替	H 5.12. 1	-0.030	-0.266	-0.93	-1.1	-0.308	-0.318	-0.32	-1.7	-0.054	-0.362	-1.11	-1.7	0.007	-0.855	-0.75	-1.9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	20 導孔掘削	H 6. 4. 1	0.016	-0.219	0.26	-0.8	-0.757	-0.519	-2.13	-2.2	-2.435	-3.093	-2.17	-2.3	-0.051	-1.346	-1.79	-1.9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	通 深掘削	H 6. 7.25	—	—	0.42	-0.7	—	—	-0.18	-1.4	—	—	-0.19	-2.4	—	—	0.13	-0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	
	り 受 替	H 6. 7.27	-0.022	-0.252	0.56	0.6	-0.451	-0.409	0.24	-0.2	-0.536	-1.183	0.63	-1.0	-0.007	-0.996	0.73	-0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	
	導孔掘削	H 6.11.3	—	-0.754	-0.45	-0.8	—	-2.014	-2.59	-1.8	—	-2.821	-3.53	-2.6	—	-1.040	-2.67	-0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	
	函体側部掘削	H 7. 1.15	0.010	-1.098	-1.78	-0.9	-2.107	-3.525	-4.69	-2.3	-2.199	-4.086	-4.14	-4.2	0.013	-2.316	-3.74	-2.5	—	—	—	—	—	—	—	—	
	側部埋戻し前	H 8. 6. 1	—	-1.098	-2.30	—	—	-3.525	-5.45	-3.0	—	-4.086	-3.72	-3.3	—	-2.316	-1.91	-1.9	—	—	—	—	—	—	—	—	
側部埋戻し後	H 8.10. 1	—	-0.732	-2.39	—	—	-2.643	-5.40	-2.6	—	-3.070	-2.96	-3.0	—	-1.313	-1.31	-2.2	—	—	—	—	—	—	—	—		
A 列	工事着手前	H 5. 1.12	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	0.000	0.000	0.00	0.0	
	19 導孔掘削	H 5. 3.16	-0.192	-0.038	-0.14	0.2	-1.159	-0.498	0.20	0.3	-0.094	-0.022	-0.52	0.2	0.040	0.031	-0.26	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	
	通 深掘削	H 5.11.30	—	—	-0.30	1.5	—	—	-0.44	0.8	—	—	-0.27	-0.2	—	—	-0.20	-0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	
	り 受 替	H 5.12. 1	-0.010	0.043	-0.19	2.8	-0.184	0.115	0.23	1.2	-0.028	-0.017	-0.10	0.8	0.009	-0.661	-0.59	-0.4	—	—	—	—	—	—	—	—	
	20 導孔掘削	H 6. 4. 1	0.035	0.077	0.01	2.9	-0.422	0.036	-2.14	0.7	-1.516	-1.377	-3.95	-0.3	-0.085	-0.897	-3.86	-0.9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	通 深掘削	H 6. 7.25	—	—	1.07	2.5	—	—	0.99	0.5	—	—	-2.95	-0.4	—	—	-2.15	-1.2	—	—	—	—	—	—	—	—	
	り 受 替	H 6. 7.27	-0.003	0.048	1.07	3.1	-0.246	0.119	1.13	1.3	-0.311	-0.048	-2.49	-0.1	-0.007	-0.646	-1.95	-1.7	—	—	—	—	—	—	—	—	
	導孔掘削	H 6.11.3	—	0.092	-0.32	3.0	—	-0.915	-0.03	2.2	—	-1.019	-2.04	0.9	—	-0.584	-3.98	-0.9	—	—	—	—	—	—	—	—	
	函体側部掘削	H 7. 1.15	-0.046	0.110	-2.53	2.3	-2.032	-1.415	-2.43	2.0	-1.905	-1.900	-7.67	0.9	0.047	-0.682	-8.30	-1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	
	側部埋戻し前	H 8. 6. 1	—	0.110	-1.67	1.7	—	-1.415	-2.21	-0.5	—	-1.900	-9.47	-1.1	—	-0.682	-8.92	-0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	
側部埋戻し後	H 8.10. 1	—	0.089	-2.02	1.3	—	-1.328	-2.03	-0.4	—	-1.724	-9.83	-0.9	—	-0.021	-9.61	-0.7	—	—	—	—	—	—	—	—		

⑬通り導坑掘削に伴う変位 (H5. 1. 12 ⇒ H5. 3. 16)

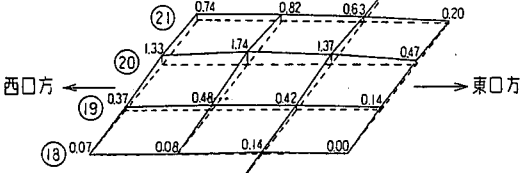
単位: mm
隆起: +
沈下: -



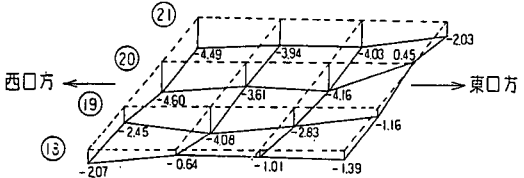
⑬通り受替後の絶対変位 (H5. 1. 12 基準)



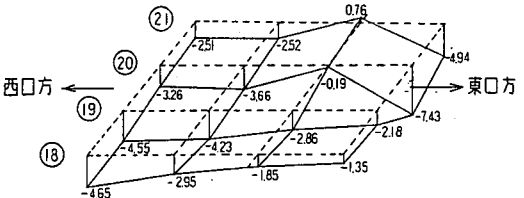
⑭通り受替に伴う変位 (H6. 7. 25 ⇒ H6. 7. 27)



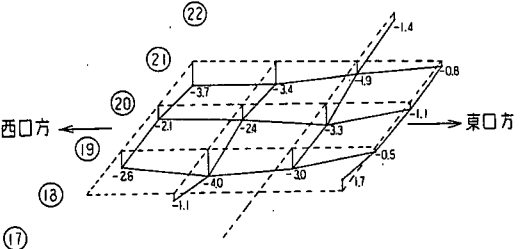
導坑間掘削に伴う変位 (液圧式、H6. 7. 27 ⇒ H6. 11. 3)



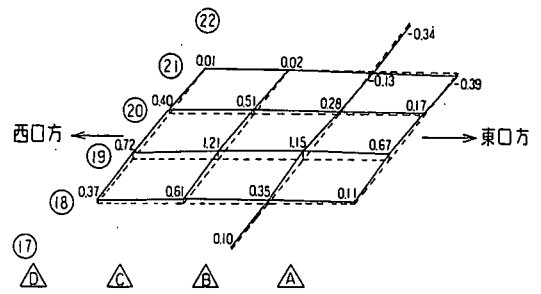
函体部掘削に伴う変位 (液圧式、H6. 11. 3 ⇒ H8. 6. 1)



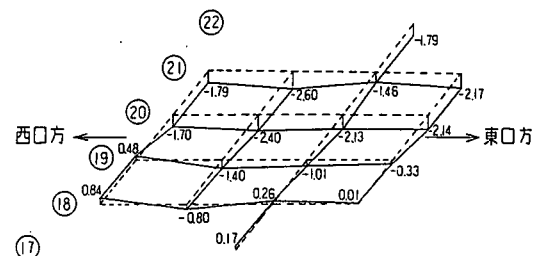
函体部掘削後の絶対変位 (レベル、H5. 1. 12 基準)



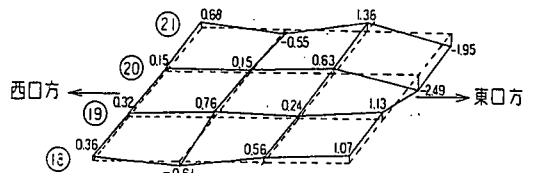
⑬通り受替に伴う変位 (H5. 11. 30 ⇒ H5. 12. 1)



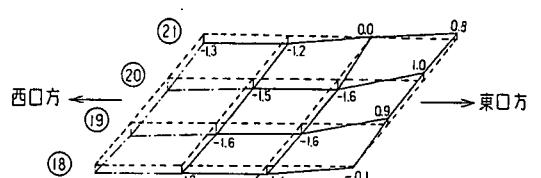
⑭通り導坑掘削に伴う変位 (H5. 12. 16 ⇒ H6. 4. 1)



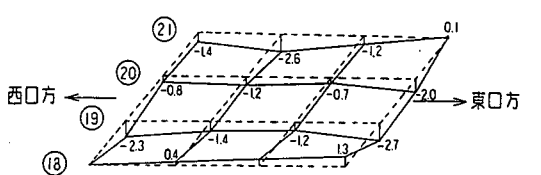
⑭通り受替後の絶対変位 (H5. 1. 12 基準)



導坑間掘削に伴う変位 (レベル、H6. 7. 27 ⇒ H6. 11. 3)



函体部掘削に伴う変位 (レベル、H6. 11. 3 ⇒ H8. 6. 1)



函体部掘削後の絶対変位 (逆解析、H5. 1. 12 基準)

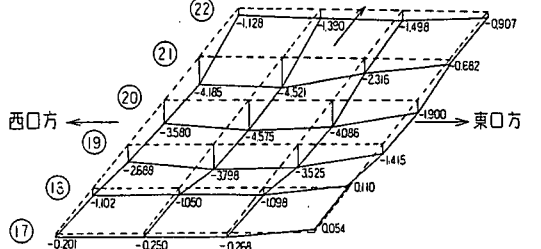


図-5 高架橋の鉛直変位透視図

(1) 19通りの作業について

導坑掘削に伴うA列の変位は、他の列と異なる傾向となっているが、これは、高架橋基礎建設の際に構築された地中連続壁と接触しており、高架橋の動きが地中連続壁により拘束されたためであると考えられる。

導坑掘削、受替工という施工段階毎の相対変位は、定性的には設計値と対応しているが、受替工に伴う隆起の量は設計値よりも小さな値となっている。

なお、図には示していないが、深礎杭施工時に高架橋全体が5～8mm程度沈下する現象がみられたが、これは、深礎掘削時の地下水の汲上げにより、地盤の有効重量が増加したために起こったものと考えられる。

(2) 20通りの作業について

導坑掘削により20、21通りが大きく沈下しているが、これは図-1に示すように、21通り以降の基礎地中梁の補強の規模が小さくなっており剛性が低下しているためであると考えられる。

また、受替工による隆起量が19通りの場合に比べて大きな値となっているが、これは、19通りに既に応力導入が成されていることや、19通りの受替杭のバネ値が20通りに比べ大きい値であったこと等が考えられる。

(3) 導坑間の掘削について

導坑間の切上げ作業からは、液圧式沈下計による自動計測結果とマイクロレベルによる計測結果に開きが出てきたことから、計測結果の変位透視図は双方を掲載している。

この結果、掘削によって全体的に沈下する傾向となり、20通りの導坑掘削と同様の挙動を示しているが、自動計測による沈下量がマイクロレベルによる沈下量の2倍以上になっていることが分かる。これは、液圧式沈下計設置後2年程度が経過し、点検調整は実施しているものの鉛直変位を過大に感知する傾向が強くなり、実態とはかけ離れた計測結果となっているものと考えられる。

以上より、短期的なものを除き、計測管理はマイクロレベルを主体とする考えに変更することとした。

(4) 函体部の掘削について

この部分の掘削作業では全体的に沈下傾向にあり、導坑間の切上げ同様、自動計測の結果がマイクロレベルの2倍以上の値となっている。なお、双方の計測結果ともA列の沈下が顕著であるが、これは、既設の地中連続壁の切断によるものであると考えられる。

(5) 函体側部の埋戻しについて

この部分の埋戻し材料は、函体や受替杭への影響および施工性を考慮して気泡モルタルを用いることとした。その結果、埋戻しによる大きな挙動変化はみられず、この時点での高架橋の変位が管理基準値である高架橋の柱相互間の相対変位量3mmを満足する結果であったことから、油圧ジャッキによる変位調整等は行わず、受替杭を永久構造物として使用し、高架橋荷重を受け持たせることとした。

6. あとがき

新幹線を走行させながらの施工であり、細心の注意を払いながら安全に工事を進めてきた。今後は函体上部の埋戻しを残すのみとなったが、工事が完了するまで高架橋の挙動を見守っていきたいと考えている。

最後に、本工事を進めるにあたり、東北学院大学の尾坂教授、東北大学の三浦教授、柳沢教授、ならびに(財)鉄道総合技術研究所の関係各位に多大なご指導を頂いている。ここに、深甚の謝意を表します。

7. 参考文献

- 1) 瀧内義男、佐々木光春、庄司公男、古山章一：仙石線地下化における仙台駅アンダーピニング計画、第2回トンネル工学研究発表会論文・報告集(1992年10月、報告(11))
- 2) 生田雄康、松本岸雄、古山章一、西澤政晃：新幹線駅舎高架橋におけるアンダーピニングの影響解析と計測、第4回トンネル工学研究発表会論文・報告集(1994年11月、報告(13))