

発破振動制約下におけるトンネル急速施工

亀山 克裕¹・岩田 修¹・本多 康成¹・高村 浩彰²

¹正会員 西松建設株式会社 国際事業本部 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1丁目20-10)
E-mail:k-kameyama@nishimatsu.com.hk

²正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1丁目20-10)
E-mail:hiroaki_takamura@nishimatsu.co.jp

地下構造物構築において、岩盤を対象とした全断面トンネル発破工法がしばしば採用される。しかし、重要構造物などの振動規制対象物が発破地点に近接する場合、振動速度規制値を遵守する必要がある。これにより、発破場所から計測地点までの離隔距離によって使用できる爆薬の斉発量に制限が発生する。本稿では、このような環境下で、いかに安全かつ急速にトンネル掘削を行うかに主眼を置き、特殊なトンネル発破工法として1孔を2回に分け起爆するダブルデッキ工法とトンネル芯抜き先行全断面発破工法(パイロット/ストリップ工法)の実地試験施工を行った。その結果、同一斉発量において一般的発破工法と比較し、ダブルデッキ工法では一発破あたり最大約2.3倍、パイロット/ストリップ工法ではパイロット部の斉発量を増やすことで約1.3倍の進行が得られることを実証した。

Key Words : Drill and Bast, Tunnel, Double Deck Charging, Pilot and Strip, Concurrent Blast

1. はじめに

今日に至るまで、トンネル発破掘削の振動低減工法については多くの研究・報告¹⁾²⁾³⁾がなされてきている。

しかし、保全対象に与える振動を規制値以下に保ちつつ、1発破進行長を効率的に長くする方法については、あまり議論がなされていない。

本稿では、2種類の特殊な制御発破工法を立案し、その振動低減効果と掘削進行の向上に関して香港特別行政区内の地下鉄トンネルを対象に検証した結果を報告する。

特殊な制御発破とは、1孔を2回に分けて起爆するダブルデッキ工法と、先進導坑の要領でトンネル断面積の約30%を常に数m先行させ、振動規制対象と切羽との離隔距離をより確保できる先進部で斉発量を多く、離隔距離の短い払い部で斉発量を少なくし同時に起爆する芯抜き先行全断面発破工法(以下、パイロット/ストリップ工法と称する)である。一般にダブルデッキまたはそれ以上のデッキ工法は、露天鉱物採掘現場などのベンチ発破でよく用いられる工法であるが、トンネル工事に適用した事例は国内外ともに極めて少ない。また、パイロット/ストリップ工法については国内の実例はなく、トンネルボーリングマシンによる先進導坑掘削ののち、発破で拡張した事例⁴⁾や、不良地山との遭遇などにより全断面掘削が困難となった際に先進導坑を採用した事例⁵⁾などが

類似すると言えるが、これらは何れも切羽前方の地山性状の把握に主眼を置いたものであり、振動速度の規制された条件下でいかに進行を得るかに焦点を当てた今回の提案は、上述の施工方法と一線を画すものである。

本試験施工の結果より、両工法は一般的な発破工法と比較し、それぞれ約2.3倍、約1.3倍の進行長が得られ、掘削技術として信頼できる工法であることを確認した。さらに、その特徴と利用できる現場条件について考察する。

2. ダブルデッキ工法試験施工

(1) 試験場所概要

ダブルデッキ工法による試験施工は、香港地下鉄西港線工事のうち、704工区(SYP&HKU stations and SYP to KET tunnels)⁶⁾を対象とした。本工事は、香港島西部地区に位置し、上環駅からケネディタウンまで延伸することを目的としており、地下80~40mに地下鉄本線トンネルおよび2つの地下駅ならびに連絡坑等を建設する。トンネル発破掘削に際しては、とくに工区の東側地域は、土被りが小さく、古い建物や病院ならびに学校が多く存在する特徴を有していた。試験施工は、2012年2月に図-1の第1回試験施工位置に示すB1 連絡坑内で3回、図-2の第2回試

験施工位置に示すA2連絡坑内で3回の計6回実施した。

(2) 試験施工方法詳細

ダブルデッキ工法とは、図-3の装薬概念図に示すように1孔あたり2箇所のそれぞれ独立した箇所に親ダイを配置し2つのデッキA(自由面側)、B(孔底側)に異なる秒時差を付与することで、起爆は自由面側が先発し、続いて孔底側が後発する方法である。

a) 装薬量の設定

試験施工の実施に際し、諸条件を設定した。第1回試験施工では、地表部の計測点における最大振動速度を5mm/secと仮定し、1段当たりの斉発量に制約を設けダブルデッキ工法による発破効率の向上を検証した。第2回試験施工においては、本工法がどこまでのさく孔長に対応できるかを確認するため、一般的なドリルジャンボに搭載される14フィートガイドセルでさく孔長4mとし、その効率を確認した。

第1回試験施工において、装薬はすべてカートリッジタイプの含水爆薬を使用した。また第2回試験では増しダイにバルクエマルジョンを使用することで、装薬時間の短縮とデカップリングによる影響を排除した。表-1に装薬条件を示す。なお表中、各孔の装薬量において、「ブースター」はバルクエマルジョンを殉爆させるための親ダイとなるカートリッジタイプの爆薬を示している。この表から明らかなように、第2回試験では各デッキの火薬装充量を均一とせず、デッキB(孔底側)の装薬量を多く、デッキA(自由面側)の装薬量を少なくしている。これは、デッキ間の詰め物の位置が深すぎる場合、設置が困難となること、またデッキBの死圧を避けるため安全側の装薬方法としたものである。長孔発破であるため、第1回試験に比べ火薬原単位は大きくなっている。また、発破番号3～6では、払い部にスームブラスティングを採用し、孔底に親ダイ、孔中間部に40g/mの導爆線2本と、間隔を置いて数個の増しダイを配置している。

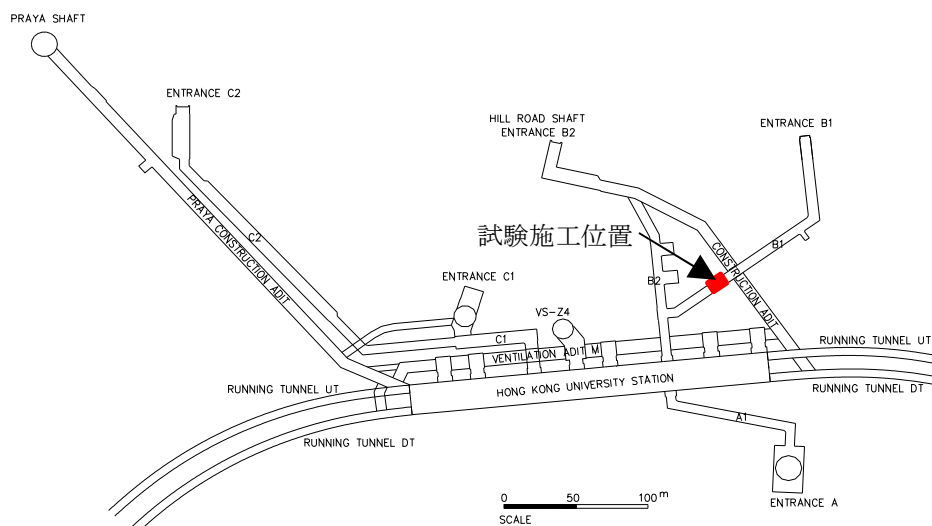


図-1 第1回試験施工位置(香港大学駅連絡坑)

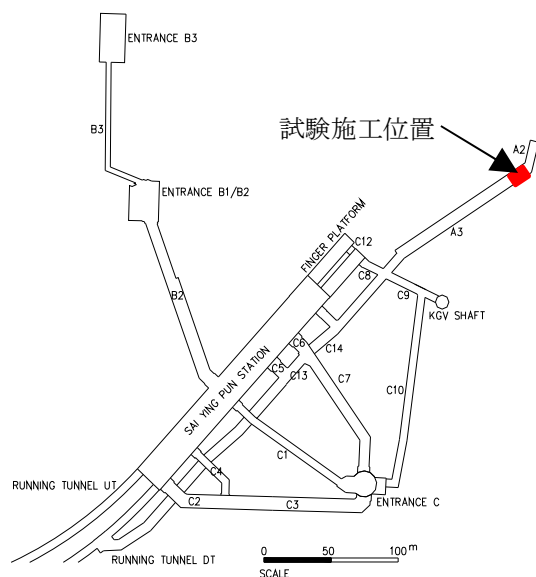


図-2 第2回試験施工位置(西營盤駅連絡坑)

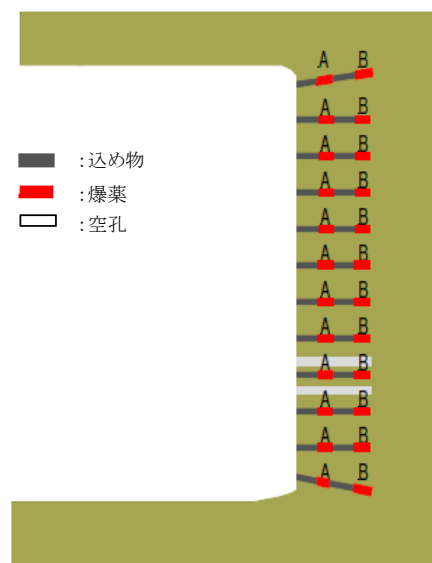


図-3 ダブルデッキ装薬概念図

表-1 装薬条件一覧

番号		装薬 シミュ レーション	発破孔	掘削断面 m ²	掘削体積 m ³	デッキ長 (込め物長含) m	孔数 hole	ブースター φ21mm x 138mm		カートリッジ				導爆線 40g m/hole kg/m		バルク エマルジョン kg/hole	火薬量 kg	原単位 kg/m ³	総原単位 kg/m ³	
								pc/hole	kg/pc	φ32mm x 200mm pc/hole kg/pc	φ25mm x 200mm pc/hole kg/pc									
第1回試験施工	1/2	A	a. 払い部	37.5	18.8	0.5	30			1	0.185						5.550	1.766	1.766	
		b. その他	143						1	0.185						26.455				
		c. 芯抜き部	6						1	0.185						1.110				
		B	a. 払い部	37.5	18.8	0.5	30			1	0.185					5.550				
		b. その他	143						1	0.185						26.455				
		c. 芯抜き部	6						1	0.185						1.110				
	3	A	a. 払い部	37.5	33.8	0.9	113			2	0.185						-	1.416		
		b. その他	6						2	0.185						41.810				
		c. 芯抜き部	26						1	0.185			2.6	0.040		7.514				
		B	a. 払い部	37.5	33.8	0.9	113			2	0.185						41.810			
		b. その他	6						2	0.185						2.220				
		c. 芯抜き部	6						2	0.185						2.220				
第2回試験施工	4	A	a. 払い部	45.0	45.0	1.0	115	1	0.025							0.890	105.225	2.460	2.817	
		b. その他	6				1	0.025								0.890	5.490			
		c. 芯抜き部	28									4	0.116	7.0	0.040		20.832			
		B	a. 払い部	45.0	135.0	3.0	115	1	0.025							3.079	356.960			
		b. その他	6				1	0.025								3.079	18.624			
		c. 芯抜き部	28													-	-			
	5	A	a. 払い部	45.0	54.0	1.2	115	1	0.025							1.017	119.830	2.335		2.561
		b. その他	6				1	0.025								1.017	6.252			
		c. 芯抜き部	28									4	0.116	7.0	0.040		20.832			
		B	a. 払い部	45.0	126.0	2.8	115	1	0.025							2.570	298.425			
		b. その他	6				1	0.025								2.570	15.570			
		c. 芯抜き部	28													-	-			
	6	A	a. 払い部	45.0	54.0	1.2	115	1	0.025							1.017	119.830	2.335	2.561	
		b. その他	6				1	0.025								1.017	6.252			
		c. 芯抜き部	28									4	0.116	7.0	0.040		20.832			
		B	a. 払い部	45.0	126.0	2.8	115	1	0.025							2.570	298.425			
		b. その他	6				1	0.025								2.570	15.570			
		c. 芯抜き部	28													-	-			

b) 起爆時間設定

雷管には、起爆時間精度が高く、細かな秒時差設定が可能な電子雷管を使用するものとし、各雷管の起爆時間を原位置で任意に設定できる機能を有する雷管を使用した。図-4に第1回試験施工時の、図-5に第2回試験時のさく孔パターンと孔番を示す。トンネル断面は38~45m²であり、国内における単線鉄道トンネルと同程度である。芯抜きには直径102mmの3つの空孔を設けたバーンカットを採用し、切羽面に凹凸があっても孔底が同一測点となるようコンピュータジャンボを用いてさく孔した。空孔以外のさく孔径は直径45mmである。

ダブルデッキ工法では、シングルデッキにおける縦、横方向の起爆順序と秒時差に加え、デッキA、Bという奥行き方向が加わることから、その発破効果に及ぼす影響を確認するため、複数の起爆順序と秒時差により試験発破を行った。各試験発破の秒時差設定について、図-6~図-9に示す。

発破番号1(図-6参照)および3(図-8参照)では、芯抜きおよび周辺部のみデッキAに続きデッキBを起爆し、その後はデッキAの起爆がすべて完了してから、デッキBを起爆した。発破番号1では孔番6まで、発破番号3では孔番34までをデッキA,B連続で起爆し、デッキ間にはそれぞれ8msの秒時差を与えた。発破番号2(図-7参照)では、孔番6までを同様の起爆方法としているが、残りのデッキBの起爆時間はデッキAの起爆完了を待たず、同じ孔が100~600msの遅れで起爆するよう設定した。一方、発破番号4~6(図-9参照)では、デッキ間にそれぞれ8~60msの秒時差を与え、全孔がデッキAに続いてデッキBが起爆する順序とした。

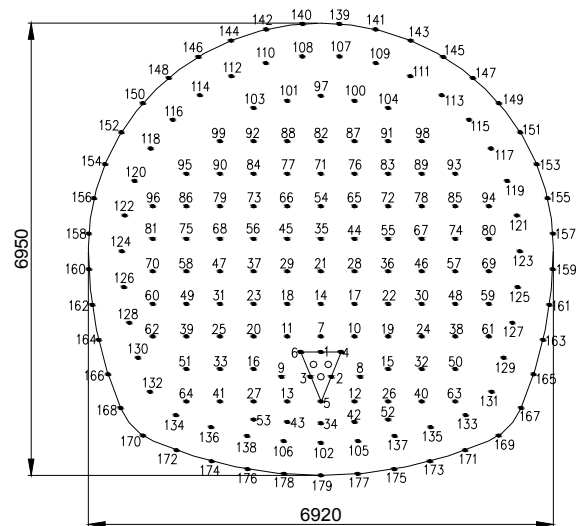


図-4 第1回試験施工時の孔配置図

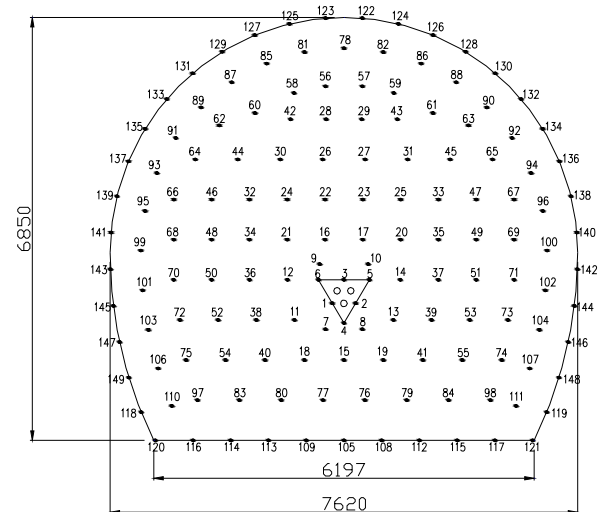


図-5 第2回試験施工時の孔配置図

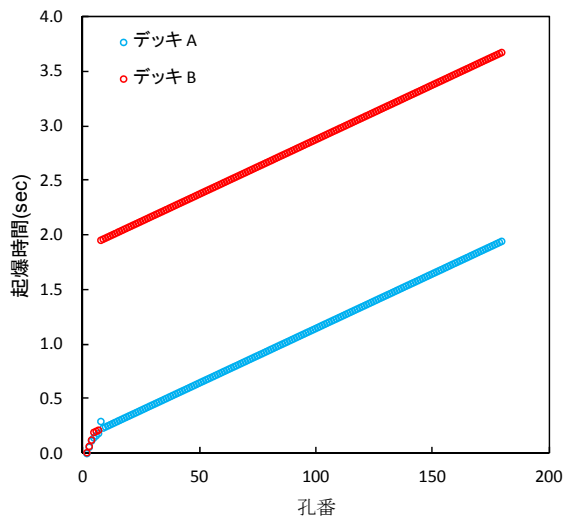


図-6 第1回試験施工 発破番号1の起爆時間

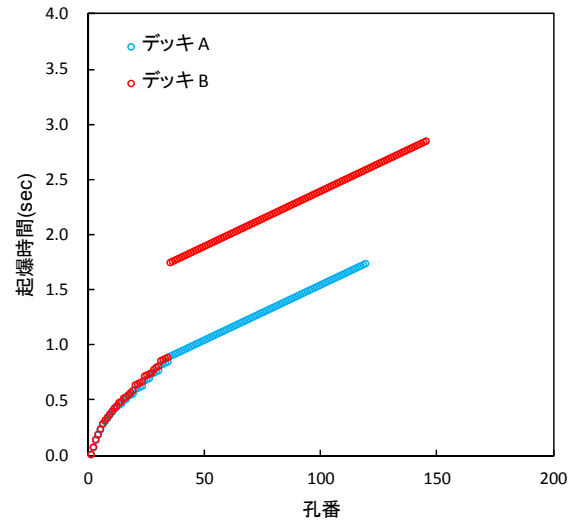


図-8 第1回試験施工 発破番号3の起爆時間

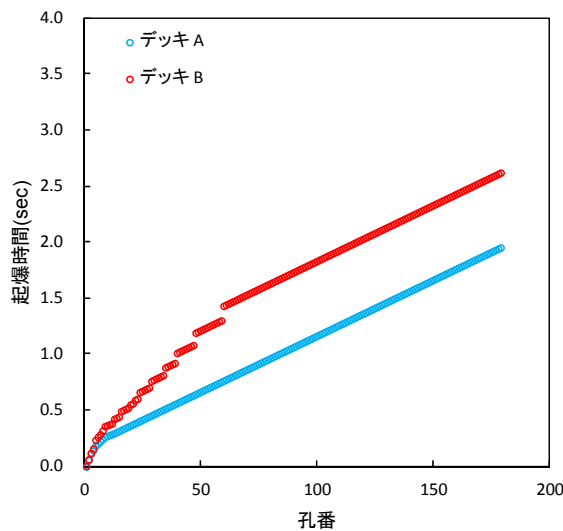


図-7 第1回試験施工 発破番号2の起爆時間

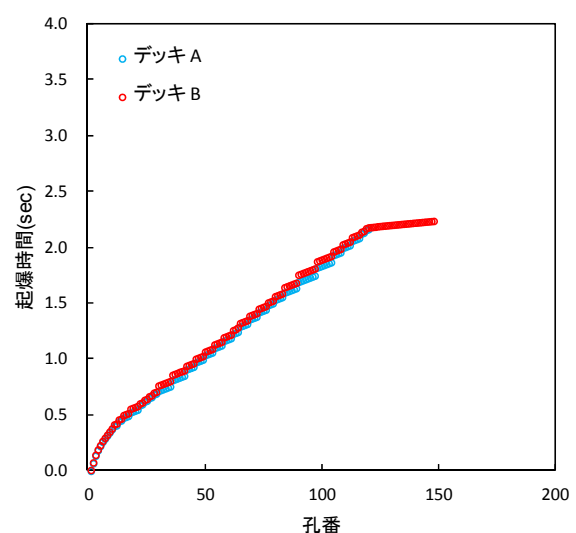


図-9 第2回試験施工 発破番号4～6の起爆時間

(3) 振動測定結果

振動速度の計測には、Instantel社のMinimateを用いて、3方向の速度をサンプリング周波数1000Hzで記録した。なお、振動速度は一般に発破場所から計測地点までの離隔距離と斉発量により一定の予測が可能であり、その算出には複数の算出式が提案されている。本稿では、香港特別行政区土木工程拓展署(Civil Engineering and Development Department, 以下CEDDと呼ぶ)が推奨するLi,U.K and Ng,S.Yら⁸⁾の式を引用し振動予測を実施した。

$$PPV = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-b} \quad (1)$$

ここで、

- PPV : Peak Particle Velocity 振動速度 (mm/sec)
- D : 発破場所から対象までの離隔距離(m)
- W : 一段あたりの装薬量(kg/段)
- K, b : 現場定数 (K=644, b=1.22 : CEDD推奨値)

Li and Ngら⁸⁾によると、導火管付き雷管を使用した通常発破の場合、 $K=644$, $b=1.22$ とすることで、84%の信頼度となることが報告されており、香港では一般にこの定数を用いた振動予測を行っている。

計測を行った各計測点は、通常発破時に管理測点となっている法面、建物やライフラインなどで、試験発破中は発破ごとに定められた地点で計測を実施した。発破振動速度の計測結果を表-2に示す。表中の実測結果において、 $<0.508\text{mm/s}$ と表示している結果は、計測精度が得られないほど振動が小さかったことを示している。斉発量の多い発破番号4～6では、やや計測値のバラツキが大きくなったが、予測値よりはるかに小さい計測値を記録しており、今回のダブルデッキ発破は導火管付き雷管を使用した通常発破と同等あるいはそれ以下の振動値であることを確認した。

また、一例として発破番号4における計測点VB-55で計測した振動波形を図-10に示す。波形から0.5s付近で最

表-2 斉発量と離隔にもとづく振動予測結果と測定結果の比較

試験 発破	斉発量 (kg/段)	受信体VB-108				受信体VB-102				受信体VB-5				受信体VB-107				受信体VB-105				受信体VB-109			
		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値	
			予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測
No1	0.185	66.286	1.380	<0.508	35.217	2.984	<0.508	51.776	1.865	0.648	64.474	1.427	<0.508	34.018	3.113	0.660	48.774	2.006	<0.508						
No2	0.185	65.450	1.401	0.554	35.459	2.959	0.660	51.140	1.893	0.823	63.565	1.452	<0.508	34.158	3.097	0.933	48.080	2.041	0.684						
No3	0.370	64.620	2.172	0.684	35.727	4.475	0.684	50.515	2.933	<0.508	62.659	2.255	<0.508	34.328	4.699	0.783	47.397	3.170	0.524						

試験 発破	斉発量 (kg/段)	受信体VB-55				受信体VB-38				受信体VB-77				受信体VB-79				受信体VB-69				受信体VB-68			
		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値		離隔 (m)	振動値	
			予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測		予測	実測
No4	3.079	59.901	8.677	1.980	79.637	6.130	1.820	43.542	12.804	1.400	71.703	6.967	2.740	38.331	14.958	0.730	74.907	6.605	0.813						
No5	2.570	60.868	7.621	1.380	81.066	5.372	1.400	44.132	11.281	0.813	73.033	6.102	2.640	38.615	13.277	2.630	76.262	5.788	0.803						
No6	2.570	62.948	7.315	1.360	83.992	5.145	1.560	45.554	10.853	1.530	75.779	5.833	0.696	39.481	12.923	1.250	79.054	5.540	0.684						

大振幅を示しており、図-5に示す芯抜きに近い孔番17付近で振動速度が大きくなったことが読み取れる。また、2.0sを越えた付近、すなわち、払い部の孔番110以降で振動速度が小さくなる特徴を示している。この結果は、式(2)に示す国内で一般的に使用されている発破振動予測式の K 値において、芯抜き部の K 値が500～1000に対し、払い部は200～500程度との報告³⁾と同等の傾向を有していると考えられる。

$$V = KW^m D^n \quad (2)$$

V : 最大振動速度 (cm/sec)
 D : 発破場所から対象までの離隔距離(m)
 W : 一段あたりの装薬量(kg/段)
 K : 現場定数(芯抜き500～1000, 払い250～500)
 m, n : 現場定数($m=2/3, n=-2$: 旭化成提案)

このため、ダブルデッキ発破は、複数デッキを用いているものの一般全断面発破と同等の振動速度の特性を有しており、通常発破においても既存の予測式を流用することが可能と考えられる。

(4) 掘削進行の向上

ダブルデッキの採用による進行向上の程度を評価するため、表-3にダブルデッキ発破とシングルデッキ発破の実進行比較を示す。これより短尺発破(第1回試験施工)においては、約2.3倍の進行を得られることを実証した。一方、長尺発破(第2回試験施工)では約1.2倍の進行しか得られていないが、前述のとおり今回の試験発破では、デッキAの装薬量を控えたためであり、両デッキの装薬量を均等に近づけることで、より進行長を延ばすことが今後可能なものと考えられる。

3. パイロット/ストリップ工法試験施工

(1) 試験場所概要

試験施工は、香港地下鉄観塘線延伸線工事(Yau Ma Tei

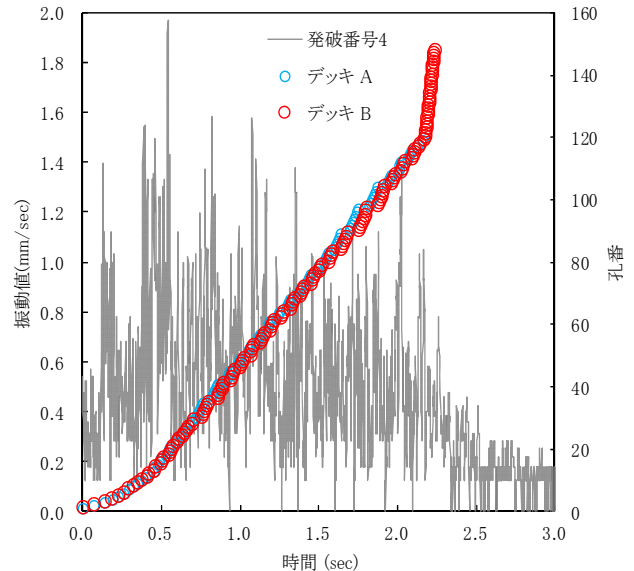


図-10 振動速度波形と起爆時間の関係(発破番号4)

表-3 ダブルデッキとシングルデッキによる実進行長

発破番号	装薬量 (kg/段)	ダブルデッキ (試験施工実績)		シングルデッキ (704区における同装薬量 下での実績)		ダブルデッキ/ シングルデッキ 百分率 E=B/D
		さく孔長(m) A	実進行長(m) B	さく孔長(m) C	実進行長(m) D	
第1回 試験施工	1	0.185	1.0	0.7	0.3	231%
	2	0.185	1.0	0.5	0.3	
	3	0.373	1.8	0.9	0.7	
	小計	3.8	3.0	1.9	1.3	
第2回 試験施工	4	3.079	4.0	3.4	3.0	120%
	5	2.570	4.0	3.0	2.7	
	6	2.570	4.0	3.5	3.0	
	小計	12.0	10.1	9.4	8.4	

to Whampoa Tunnels and Ho Man Tin Station)¹⁰⁾を対象とした。本工事は図-11に示すように既設の油麻地(Yau Ma Tei)駅から新設される黄埔(Whampoa)駅まで香港九龍地区を東西に走る延長約2.1kmのトンネル、および途中駅となる何文田(Ho Man Tin)駅の建設工事である。とくに、何文田駅から黄埔駅へ向かうトンネル地上部は古い住居ビルが密集している。また、試験施工を実施したトンネルは海岸側へ近づくに従い、図-12に示す地質縦断面図から読み取れるように土被りが小さくなるため、一般的な振動規制であるものの、斉発量が大きく制約される。このため、地山性状が良好な場合においても一進行長に制限が発生する。また、掘削中の切羽は弱風化～中硬岩の花崗

岩であり、当該区間のロックシュミットハンマより推定した岩盤強度は30～120MPaであった。参考までに掘削中に採取した代表的な掘削ズリを写真-1に示す。

(2) 試験方法詳細

a) 工法説明

パイロット/ストリップ工法とは、図-13に示す概念図のように、つねにパイロットトンネル(幅4m、高さ4m)をストリップ断面より数m先進させ、両切羽同時発破を行う手法である。この手法を採用する目的は、パイロット天端を全断面時の天端高さより低く抑えることで、発破場所から地上部の振動規制対象物までの離隔距離を長くし、装薬量を増やすことでパイロットトンネルの一進行長を延ばすとともに、ストリップ断面ではパイロットトンネルによる自由面を活用し、低装薬でパイロットと同等以上の進行を得ることを目的としている。当初の全断面発破では、図-14に示す斉発量が規定されていたものの、本工法の提案によりパイロットトンネルでは、全断面発破と比較しおおむね0.4kg/段の斉発量増加が可能となった。なお、パイロットトンネルが常に先進した状態となるため、支保パターンは、切羽観察から算出されるQ値¹¹⁾に基づいて、それぞれ異なる支保パターンの設計を準備した。毎切羽の観察はCEDDより承認された専門知識を有する地質技術者が行い、必要な支保の設置がすべて完了するまで次作業に移れない施工システムとなっている。表-4および表-5に、それぞれの支保パターンを示す。ここで、スポットボルトと呼ばれるものは、切羽観察時に予測されるキープロックを地山へ縫い付けつるためのロックボルトを意味している。

本試験施工の適用性を評価するにあたり、全断面発破との総発破回数を比較し、採用する上での工期的メリットを確認した。シュミレーションは、トンネル測点CH8000～7900までの延長100m区間を対象とし、全断面発破で計60回、パイロット/ストリップ工法ではそれぞれ計38回、39回と試算した。両発破工法とも日当たり2発破(週末のシフトチェンジなどを考慮しない)とした場合、全断面発破で30日、パイロット/ストリップ工法で20日の作業日数と工程的にも有利であると判断し実地試験に踏み切った。表-6、表-7および表-8に、全断面発破、パイロットおよびストリップそれぞれで規定した斉発量に応じた進行予測ならびに発破回数を示す。

b) 起爆時間設定

起爆には、非電気式雷管とバンチコネクターによる制御発破方法を採用した。特徴として、異なるパネルに同一段数の雷管が配置された状況においても、バンチコネクターが持つ秒時差により、すべての孔で異なる起爆時間を与えることができる。図-15および図-16に、代表的なパイロット/ストリップ工法の発破パターンおよび各孔

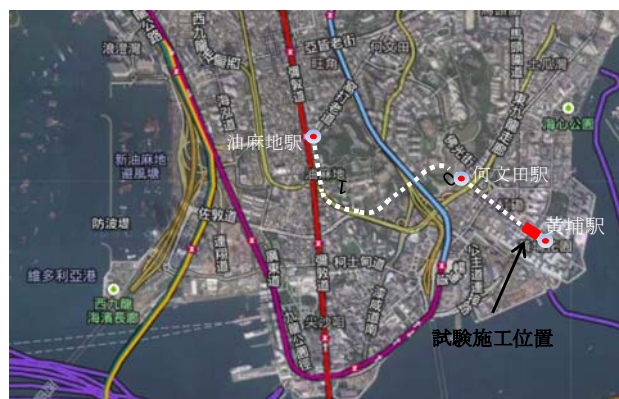


図-11 パイロット/ストリップ工法試験施工位置図

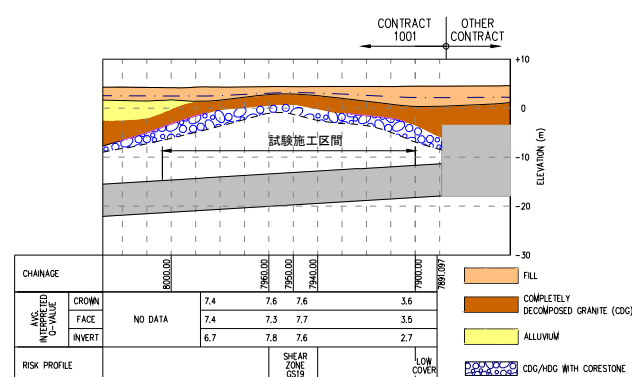


図-12 試験施工区間地質縦断面図



写真-1 代表的な掘削ズリ性状

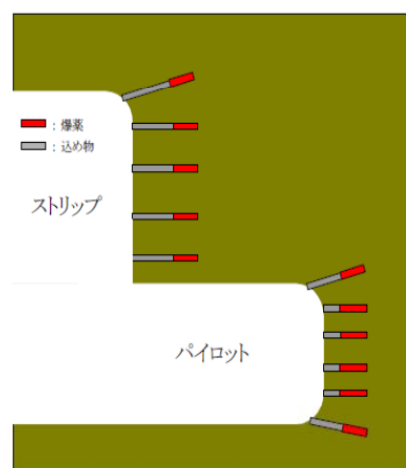


図-13 パイロット/ストリップ工法概念図

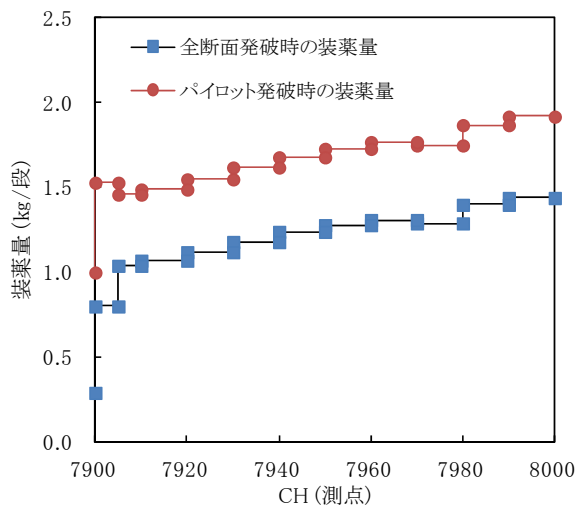


図-14 全断面発破とパイロット発破の装薬量

表-4 パイロットトンネル支保パターン

支保パターン	Q値	支保		
		スポットボルト	ロックボルト	吹付コンクリート 30MPa
I, II, III	$Q \geq 0.24$	切羽観察に応じ	無し	切羽観察により必要な場合 t25mm
IV	$0.10 \leq Q < 0.24$	切羽観察に応じ	L=2.6m @1.5m	ファイバーコンクリート t50mm
V	$0.05 \leq Q < 0.10$	切羽観察に応じ	L=2.6m @1.3m	ファイバーコンクリート t90mm

表-5 ストリップ断面支保パターン

支保パターン	Q値	支保		
		スポットボルト	ロックボルト	吹付コンクリート (30MPa)
I, II	$Q \geq 1.76$	切羽観察に応じ	無し	切羽観察により必要な場合 t25mm
III	$0.94 \leq Q < 1.76$	切羽観察に応じ	L=3.3m @1.7m	切羽観察により必要な場合 t25mm
IV	$0.26 \leq Q < 0.94$	切羽観察に応じ	L=3.3m @1.8m	ファイバーコンクリート t50mm
V	$0.08 \leq Q < 0.26$	切羽観察に応じ	L=3.3m @1.5m	ファイバーコンクリート t90mm

表-6 全断面での予定発破回数

CH		装薬量	トンネル 延長	想定した進行長/発破回数			トンネル 断面	トンネル 体積	装薬量	原単位	さく孔数		装薬孔		払い孔			
		全断面		1進行長	発破回数	さく孔長					装薬孔	払い孔	カートリッジ 含水爆薬	カートリッジ 含水爆薬	導爆線 40g			
From	To	kg/段	m	m	回	m	m2	m3	kg	kg/m3	孔/発破	孔/発破	nos/孔	kg/孔	nos/孔	kg/孔	m/孔	kg/孔
7905.06	7900.00	0.80	5.06	1.20	4	1.40	44.74	53.69	76.69	1.43	86	29	4.0	0.80	1.00	0.20	1.80	0.07
7910.06	7905.06	1.04	5.00	1.40	3	1.60	44.74	62.64	94.35	1.51	86	29	5.0	1.00	1.00	0.20	2.20	0.09
7920.06	7910.06	1.07	10.00	1.40	7	1.60	44.74	62.64	94.35	1.51	86	29	5.0	1.00	1.00	0.20	2.20	0.09
7930.06	7920.06	1.12	10.00	1.50	6	1.70	44.74	67.11	103.18	1.54	86	29	5.5	1.10	1.00	0.20	2.40	0.10
7940.06	7930.06	1.18	10.00	1.50	6	1.70	44.74	67.11	103.18	1.54	86	29	5.5	1.10	1.00	0.20	2.40	0.10
7950.06	7940.06	1.24	10.00	1.60	6	1.80	44.74	71.58	112.02	1.56	86	29	6.0	1.20	1.00	0.20	2.60	0.10
7960.06	7950.06	1.28	10.00	1.60	6	1.80	44.74	71.58	112.02	1.56	86	29	6.0	1.20	1.00	0.20	2.60	0.10
7970.06	7960.06	1.31	10.00	1.60	6	1.80	44.74	71.58	120.62	1.68	86	29	6.5	1.30	1.00	0.20	2.60	0.10
7980.06	7970.06	1.29	10.00	1.60	6	1.80	44.74	71.58	112.02	1.56	86	29	6.0	1.20	1.00	0.20	2.60	0.10
7990.06	7980.06	1.40	10.00	1.80	5	2.00	44.74	80.53	135.48	1.68	86	29	7.0	1.40	2.00	0.40	3.00	0.12
8000.00	7990.06	1.44	9.94	1.80	5	2.00	44.74	80.53	135.48	1.68	86	29	7.0	1.40	2.00	0.40	3.00	0.12
Total			100.00	-	60													

表-7 パイロットトンネルでの予定発破回数

CH		装薬量	トンネル 延長	想定した進行長/発破回数			トンネル 断面	トンネル 体積	装薬量	原単位	さく孔数		装薬孔		払い孔			
		パイロット		1進行長	発破回数	さく孔長					装薬孔	払い孔	カートリッジ含水 爆薬	kg/孔	カートリッジ含水 爆薬	kg/孔	m/孔	kg/孔
From	To	kg/段	m	m	回	m	m2	m3	kg	kg/m3	孔/発破	孔/発破	nos/孔	kg/孔	nos/孔	kg/孔	m/孔	kg/孔
7905.06	7900.00	1.53	5.06	2.30	2	2.50	14.97	34.43	53.78	1.56	31	13	7.5	1.50	2.00	0.40	4.00	0.16
7910.06	7905.06	1.46	5.00	2.20	2	2.40	14.97	32.93	50.58	1.54	31	13	7.0	1.40	2.00	0.40	3.80	0.15
7920.06	7910.06	1.49	10.00	2.20	4	2.40	14.97	32.93	50.58	1.54	31	13	7.0	1.40	2.00	0.40	3.80	0.15
7930.06	7920.06	1.55	10.00	2.30	4	2.50	14.97	34.43	53.78	1.56	31	13	7.5	1.50	2.00	0.40	4.00	0.16
7940.06	7930.06	1.62	10.00	2.40	4	2.60	14.97	35.93	56.98	1.59	31	13	8.0	1.60	2.00	0.40	4.20	0.17
7950.06	7940.06	1.68	10.00	2.40	4	2.60	14.97	35.93	56.98	1.59	31	13	8.0	1.60	2.00	0.40	4.20	0.17
7960.06	7950.06	1.73	10.00	2.50	4	2.70	14.97	37.43	60.19	1.61	31	13	8.5	1.70	2.00	0.40	4.40	0.18
7970.06	7960.06	1.77	10.00	2.50	4	2.70	14.97	37.43	60.19	1.61	31	13	8.5	1.70	2.00	0.40	4.40	0.18
7980.06	7970.06	1.75	10.00	2.50	4	2.70	14.97	37.43	60.19	1.61	31	13	8.5	1.70	2.00	0.40	4.40	0.18
7990.06	7980.06	1.87	10.00	2.60	3	2.80	14.97	38.92	63.39	1.63	31	13	9.0	1.80	2.00	0.40	4.60	0.18
8000.00	7990.06	1.92	9.94	2.70	3	2.90	14.97	40.42	66.60	1.65	31	13	9.5	1.90	2.00	0.40	4.80	0.19
Total			100.00	-	38													

表-8 ストリップ断面での予定発破回数

CH		装薬量	トンネル 延長	想定した進行長/発破回数			トンネル 断面	トンネル 体積	装薬量	原単位	さく孔数		装薬孔		払い孔			
		ストリップ		1進行長	発破回数	さく孔長					装薬孔	払い孔	カートリッジ含水 爆薬	カートリッジ含水 爆薬	導爆線 40g			
From	To	kg/段	m	m	回	m	m2	m3	kg	kg/m3	孔/発破	孔/発破	nos/孔	kg/孔	nos/孔	kg/孔	m/孔	kg/孔
7905.06	7900.00	0.80	5.06	1.60	3	1.80	29.77	47.63	50.11	1.05	52	28	4.00	0.80	1.00	0.20	2.60	0.10
7910.06	7905.06	1.04	5.00	2.20	2	2.40	29.77	65.49	67.46	1.03	52	28	5.00	1.00	2.00	0.40	3.80	0.15
7920.06	7910.06	1.07	10.00	2.20	4	2.40	29.77	65.49	67.46	1.03	52	28	5.00	1.00	2.00	0.40	3.80	0.15
7930.06	7920.06	1.12	10.00	2.30	4	2.50	29.77	68.47	72.88	1.06	52	28	5.50	1.10	2.00	0.40	4.00	0.16
7940.06	7930.06	1.18	10.00	2.30	4	2.50	29.77	68.47	72.88	1.06	52	28	5.50	1.10	2.00	0.40	4.00	0.16
7950.06	7940.06	1.24	10.00	2.40	4	2.60	29.77	71.45	78.30	1.10	52	28	6.00	1.20	2.00	0.40	4.20	0.17
7960.06	7950.06	1.28	10.00	2.40	4	2.60	29.77	71.45	78.30	1.10	52	28	6.00	1.20	2.00	0.40	4.20	0.17
7970.06	7960.06	1.31	10.00	2.40	4	2.60	29.77	71.45	83.50	1.17	52	28	6.50	1.30	2.00	0.40	4.20	0.17
7980.06	7970.06	1.29	10.00	2.40	4	2.60	29.77	71.45	78.30	1.10	52	28	6.00	1.20	2.00	0.40	4.20	0.17
7990.06	7980.06	1.40	10.00	2.60	3	2.80	29.77	77.40	89.15	1.15	52	28	7.00	1.40	2.00	0.40	4.60	0.18
8000.00	7990.06	1.44	9.94	2.60	3	2.80	29.77	77.40	89.15	1.15	52	28	7.00	1.40	2.00	0.40	4.60	0.18
Total			100.00	-	39													

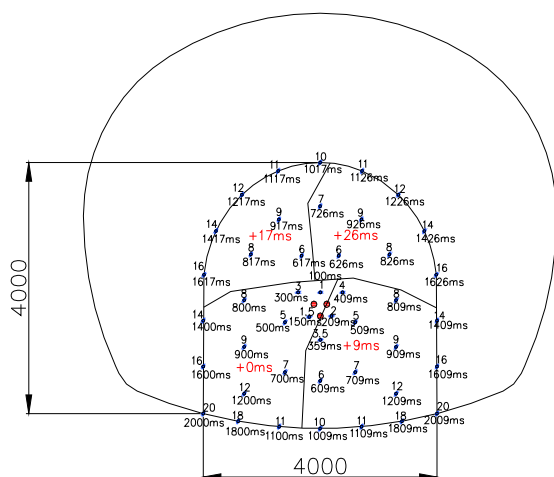


図-15 パイロットトンネル発破パターン

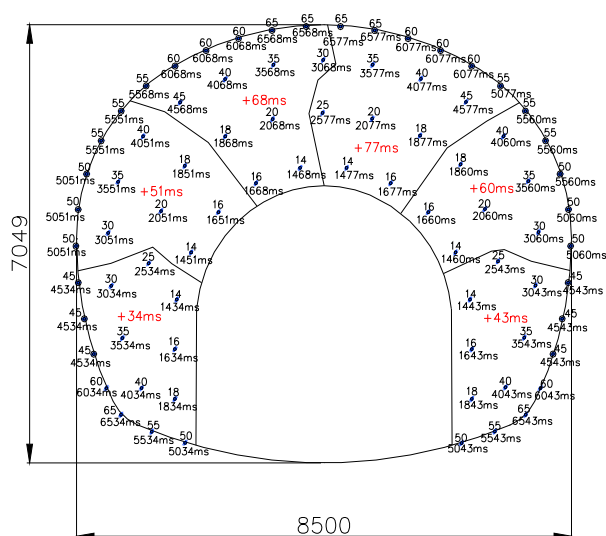


図-16 ストリップ断面発破パターン

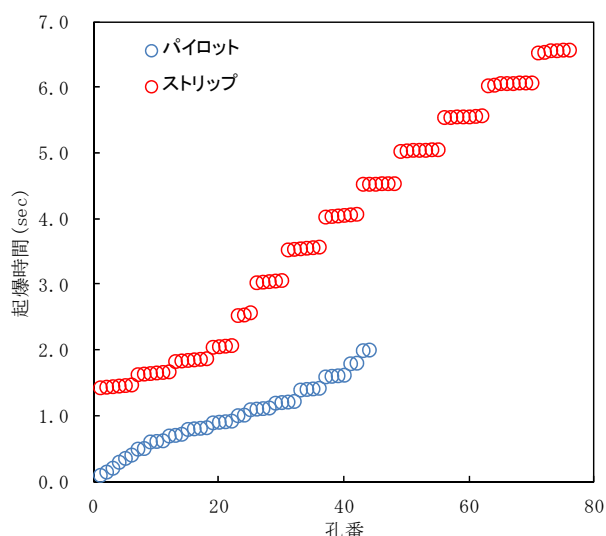


図-17 孔番と起爆時間の関係

起爆時間を示す。パイロットトンネルでは、ダブルデッキ工法同様に起爆中の自由面形成にバーンカットホールを採用した。ここで各孔に示す番号は、非電気式雷管の段数番号を表している。

また、起爆時間の早い孔より附番したものを孔番号とした時間設定を図-17に示す。パイロットトンネル踏前え部の起爆が起こるタイミングでストリップ断面の自由面に近い部分より順次起爆が開始される発破パターンとした。なお、さく孔にはダブルデッキ試験施工時同様に、コンピュータジャンボを使用し、孔底位置が各孔で均一になるようにした。

(3) 振動測定結果

試験施工中、発破毎にその切羽近傍に位置する6地点で振動測定を実施した。図-18に、式(1)による振動予測値と、実測値の関係を示す。試験施工区間100m掘削中に測定される計測点は合計15地点で、そのうち13地点の規制値は25mm/sec、残り2地点は13mm/secと規定されていた。実測値は予測値よりおおむね小さく、すべてが規制値以下となった。このため、CEDDの推奨値である式(1)の現場定数 K および b が、本試験施工区間で妥当であったことが確認できる。

一例として、最大斉発量が1.8kg/段で発破地点と計測地点の離隔距離が23.5mにおける振動測定結果を図-19に示す。図中のプロットは、各非電気式雷管の設計起爆時間を示しており、計測された振動速度と設計起爆時間は、おおむね一致していることが読み取れる。また、最大振動速度は、パイロットトンネル払い部およびストリップ断面が起爆を始める時間に発生している。さらに、3.0s付近(ストリップ断面の払い助け部)で再度振動速度が上昇する。上述の波形特性は、他の計測結果においても同様であった。

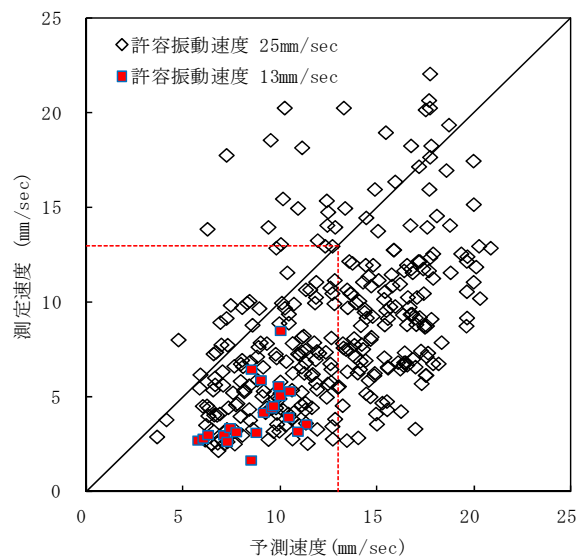


図-18 振動予測値と測定値

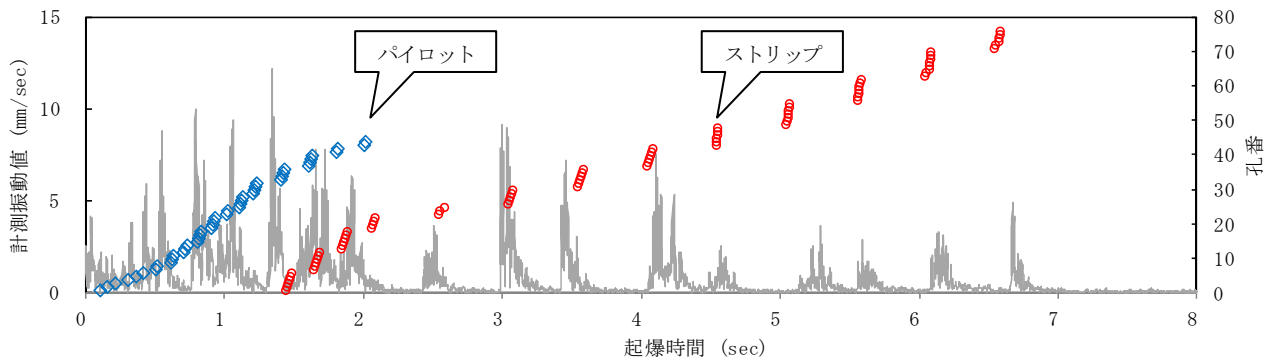


図-19 計測振動と起爆時間の関係

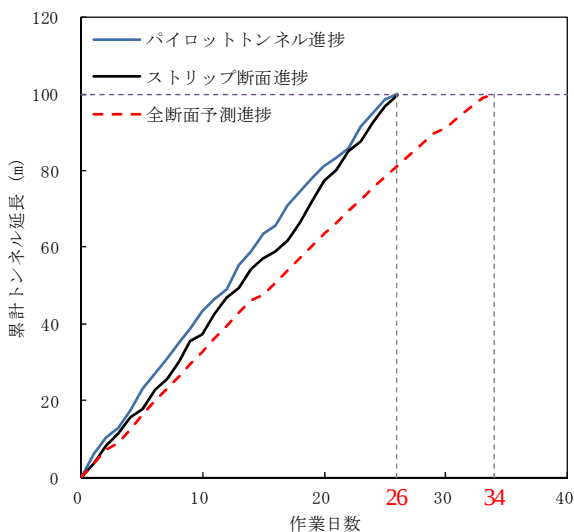


図-20 試験施工時のトンネル進捗実績と予測実績の関係

(4) 掘削進行の向上

100m区間の試験施工において、パイロットトンネルのみの発破を16回、パイロット/ストリップ同時発破を40回実施した。ストリップの発破回数は表-7において試算した予定発破回数とほぼ同等であり予定どおりの結果が得られた。図-20に、パイロット/ストリップ工法の実績進捗と全断面発破を採用した場合の予定進捗比較を前方探査などに要する日数を作業日数に加算し示す。トンネル100m区間の掘削に際し、今回提案する工法を採用することで、全断面掘削と比較して作業日数を8日間短縮したことがわかる。日当たりで換算した場合、パイロット/ストリップ工法は全断面発破に対し1.3倍の進捗が得られたこととなる。

本制御発破工法では、パイロットトンネルは常にストリップ断面より先行することで、自由面を形成する。これに対し、ストリップ断面は、すべてが払い発破として取り扱えるため、必要な原単位が小さくなり、さく孔長をパイロットトンネルより長く設定することが可能となる。本試験施工においては、パイロットトンネルの実進

捗が予定進捗に到達せず、パイロット/ストリップ断面がほぼ同一測点となる場面が発生した。このため、パイロットトンネルを先行させるための単独発破を行ったことで、若干作業日数が増加した。この原因は、当該掘削区間の岩盤強度を50MPa程度と想定し発破パターンを計画したが、トンネル進行に伴い花崗岩が硬質化したことが挙げられる。なお、当該工区では、発破点火時間が朝7時～夜11時までと規制されていたため、日当たりの発破回数は、パイロット/ストリップ同時発破の場合は2発破、もしくはパイロット単独2発破+パイロット/ストリップ1発破という実績であった。

4. 実証した特殊制御発破の展望

本試験施工の結果より、一般的な発破工法と比較して両工法ともに、振動規制を満足しながら進行を向上させる掘削技術であることを確認した。本報告で示した制御発破工法の特徴と利用できる現場条件について、考察した結果を以下に示す。

(1) ダブルデッキ工法

- ・保全対象が重要構造物で厳しい振動規制が要求されたり、保全対象構造物との離隔距離が極端に短いなどの理由により、1孔当たりの装薬量が規制される場合、本工法の採用によりシングルデッキと同等の斉発量で最大約2.3倍の進捗が得られる。

ただし、本工法は1孔を2回にわけて起爆する方法であるため、一般的な発破工法と比較し発破パターンのパラメータが増える。今後、最適な発破パターンの作成に関する基準を明確にするためには、適正な原単位(m^3 あたりの装薬量)なども含めて実績を積む必要がある。

(2) パイロット/ストリップ工法

- ・パイロット/ストリップ工法は、地山の自立性がよく、

先行するパイロットトンネル（芯抜き部）が軽微な支保（吹付けコンクリートのみなど）で安定化を図れることが適用条件となる。仮にパイロットトンネルの地山状況によって、H鋼支保工建込みなどが必要となる場合は、その設置と発破後の鋼材除去作業などが要求され、通常的全断面発破がより有利となる場合がある。

- ・保全対象に厳しい振動規制が設けられているなどの理由により、斉発量が規制される場合、振動規制対象と切羽間の離隔を確保することでパイロットトンネルの装薬量を増やし一発破進行長を延ばすことができる。
- ・ストリップ断面は、払い発破となるため斉発量制約下においても、芯抜き発破と比較して原単位(m^3 あたりの装薬量)を小さく設定できるため、一発破進行長を延ばすことができる。
- ・常にパイロットトンネル（芯抜き部）をストリップ断面（払い部）に対し進行させ、この2断面を同時発破とすることで、合計発破回数を低減させることで工期短縮に寄与できる。

ただし、パイロット/ストリップ工法は二次覆工を永久支保とする海外の施工標準に基づいて検討した掘削方法であり、パイロットトンネルへの軽微な支保を前提としている。このため、一次覆工を永久支保とし比較的重厚な支保が要求される日本国内のトンネル現場へ、そのまま適用できる可能性は少ない。しかし、荷の重い芯抜き部、踏まえ隅などと荷の軽い払い部などそれぞれに対して、保全対象までの離隔距離と斉発量の関係を計測管理によって検討を続けることで、通常的全断面の発破掘削においても、パイロット/ストリップ工法の利点を応用できる可能性がある。

5. おわりに

(2014.9.15 受付)

本稿では、振動規制下での急速施工を図る2つの特殊制御発破工法を立案し、試験施工によって有効性を実証した。とくに、ダブルデッキ工法は、シングルデッキ工法と比較し、同じ斉発量で最大23倍の進行長を得られることを確認した。また、パイロット/ストリップ工法では、 45m^2 の断面を有するトンネルにおいて100m区間を連続で施工した結果、通常的全断面発破掘削に比べて13倍の進行、言い換えると24%の工程短縮実績を示した。

最後に、これらの工法は香港特別行政区の2現場を対象とし実施したものであるが、トンネル掘削をいかに安全かつ効率的に行うかはトンネル現場の最前線で働く技術者が直面する問題であり、今回の実績が今後のトンネル発破技術進展の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 萩森健治, 武知芳男, 古川浩平, 中川浩二: ストリップ工法を用いた低振動発破工法に関する研究, 土木学会論文集, 第391号, VI-8, pp.142-150, 1988.
- 2) 若松和人, 木村能隆, 多田芳葉, 高橋渉: 民家直下における心抜き自由面発破の振動低減効果, 土木学会第66回年次学術講演会, VI-387, pp.773-774, 2011.
- 3) あんな発破 こんな発破 発破事例集, 日本火薬工業会, pp.3-24, 2002.
- 4) 城間博通, 赤城渉, 高崎英邦, 山口泰男, 関伸也: TBM機械データを用いた支保パターン選定に関する一考察, pp.15-22, トンネル工学研究論文・報告集第11巻, 2001.
- 5) 溝口健二, 宮崎武雄, 柴田剛志, 花崎春男: 鍋立山トンネルの超膨張性地山の克服と注入工法, pp.31-35, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1996.
- 6) 遠藤智: 「住宅直下の地下鉄工事」香港ケネディタウンより, トンネルと地下, pp.15, Vol.42, 2011.
- 7) 岩田修: 市街地直下におけるトンネル発破掘削, 建設機械, pp.33-38, 2013.
- 8) Li, U.K, Ng, S.Y : Prediction of blast vibration and current practice of measurement in Hong Kong, *Proceedings of the Asia Pacific Quarrying the Rim*, Hong Kong, pp.119-135, 1992.
- 9) Osamu Iwata, Katsuhiro Kameyama, Rohan Stevens and Jinming Liao : Double Deck Blasting for Rapid Tunnel Advance in Hong Kong, *The Journal of Explosives Engineering*, Vol.30, pp.6-14, 2013.
- 10) <http://www.mtr-kwuntonglineextension.hk/en/project-details/alignment.html>
- 11) Burton.N.R : Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.39, pp.185-216, 2002.

Rapid Tunnel Excavation under the Restricted Vibration Limit generated by Blasting

Katsuhiro KAMEYAMA, Osamu IWATA, Yasunari HONDA
and Hiroaki TAKAMURA

The blasting methodology to bore the tunnel by full face is being commonly adopted in the underground works. However, in case the excavation face is located under important structures where the limitation of peak particle velocity generated by blasting is given, the charge weight per delay will be restricted due to its severe velocity limitation or insufficient distance between the blasting point and the structure. In this study, two unique blasting methods, i.e. double deck and pilot/strip simultaneous blast are demonstrated in Hong Kong subway tunnelling site focusing on how rapidly and safely the excavation can be carried out. As a result, both blasting methods, double deck and pilot/strip achieved longer pull out per blast under the same charge weight limitation, the former 2.3 times and the latter 1.3 times respectively, comparing with conventional blasting method.