

後施工型のせん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

岡崎 大宜

国土交通省 広島港湾・空港整備事務所 工務課



広島空港は大都市拠点空港として航空輸送上重要な空港に位置づけられた。これを受け、空港基本施設の耐震性能照査を行った結果、空港直下を通る用倉トンネルにおいて、せん断耐力が不足しており、滑走路等に影響を及ぼすことが判明した。そこで、耐震補強の詳細な検討を行い、後施工型のせん断補強工法による施工を行った。本稿では、施工工法決定に至るまでの検討と施工について報告する。

キーワード 耐震性能照査, 耐震補強対策工法, 空港基本施設

1. 概要

広島空港は、2007年4月に国土交通省航空局が開催した「地震に強い空港のあり方委員会」において、大都市圏拠点空港として空港輸送上重要な空港に位置づけられた。これを受け、広島港湾・空港整備事務所主催の「広島空港耐震検討委員会」を開催し、レベル2地震動に対する滑走路、誘導路、地下構造物の耐震性能照査を行った。

この結果、広島空港の基本施設直下を通る地下構造物（用倉トンネル）においてせん断耐力が不足していることが判明した。用倉トンネルは、現場打ちのアーチカルバートの上に20m弱の盛土を行った構造物である。この盛土部分とアーチカルバートを対象に耐震対策が必要な範囲と耐震補強工法の選定・検討を行い、2010年度より鉄筋差込工法（RMA工法）で現地施工を行った。



図-1 用倉トンネル位置図

地震動	照査基準
レベル1	①構造に影響を与えるような地盤の液状化を許容しない ②損傷を許容しない
レベル2	①構造物の浮き上がりや損傷に影響を与える地盤の液状化を許容しない ②人命、財産又は社会的経済活動に重大な影響を及ぼす恐れのある場合、ひび割れの補修等が短期間で補修できる程度の損傷

2. 耐震性能照査

広島空港に最大級の強さの地震動をもたらす入力地震動(レベル2地震動(竹原起震断層、M6.5直下地震、東南海・南海地震))に対する地震応答解析(FLIP)を行った。この結果から、耐震補強対策範囲の検討及び耐震補強対策工法の選定を行った。用倉トンネルにおける耐震性能照査基準を表-1、位置図を図-1、標準断面図を図-2に示す。

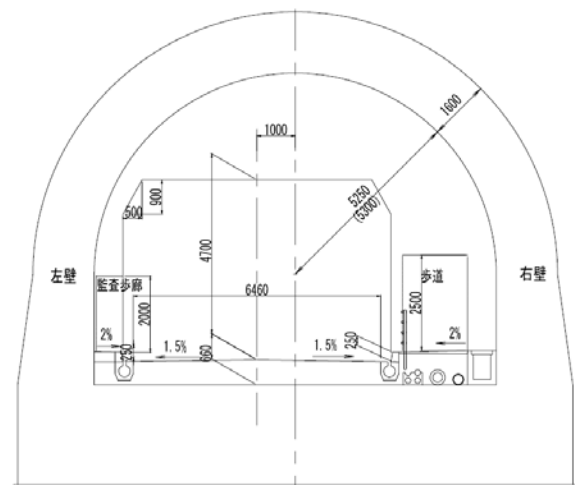


図-2 標準断面図

3. 耐震補強対策範囲の検討

耐震性能照査の結果(図-3、表-2)から、用倉トンネルの大部分の断面で耐震補強対策が必要であるという結果が得られた。そこで、トンネルの崩壊が空港の基本施設に影響を及ぼす範囲について耐震補強対策を行うこととした。

トンネルのカルバートブロック割りを考慮し、滑走路についてはショルダー端から16mの範囲、誘導路についてはショルダー端から15mの範囲を耐震補強対策範囲とした。

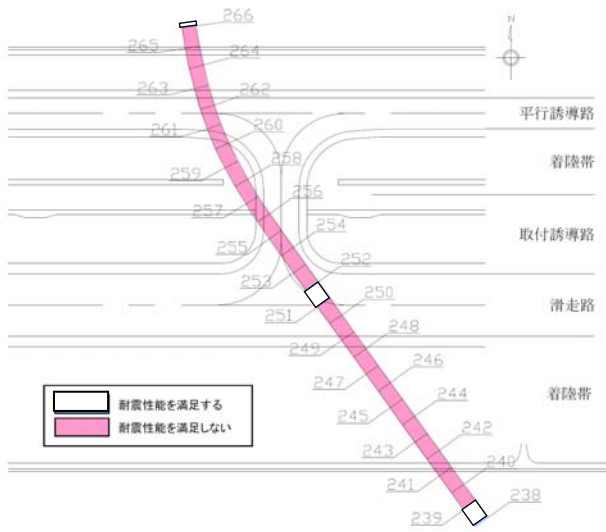


図-3 耐震照査結果

表-2 耐震照査結果 (抜粋)

No.	Vd(kN)	Vd/Vyd	判定
No.239	543.7	0.667	○
No.256	968.2	1.365	×
No.263	1007.7	1.431	×

Vd:せん断力、Vyd:せん断耐力

4. 地盤改良による耐震補強工法

(1) 空港被災のメカニズム

広島空港周辺で大規模地震が発生した場合、アーチカルバート周辺の盛土が大きく変位することで、カルバートへ大きな力が加わってしまう。これにより、空港の地下構造物であるカルバートが被災し崩れることで、空港基本施設である滑走路や誘導路に陥没等の影響が出ると考えられる。

(2) 工法の抽出

空港の耐震補強工法として、まず、周辺地盤を改良することによって盛土の変位を防ぐ地盤改良工法が考えられる。図-4に抽出した工法について検討・比較を行った結果を示す。

(2) 工法の選定

一次選定の段階で、深層混合処理（噴射攪拌式）以外の工法は、周辺への影響や改良効果が低い等の理由で候補から外している。

深層混合処理については、施工後2時間で供用を開始できることや、仙台空港での実績があり、広島空港においても施工可能であると判断した。

(3) 深層混合処理

深層混合処理については、空港場内での施工となるため作業は夜間施工となり、施工時間も限られるため工期が長くなることが懸念される。また、地下トンネルへの影響範囲を考慮し改良幅を設定すると、改良幅は約20mとなり、改良深さは10mを超えるため、概算工事費は施工延長10mあたり約7億円と施工費が高価になる。

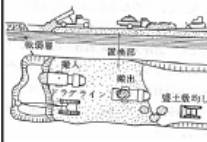
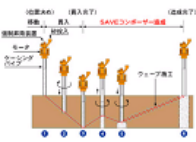
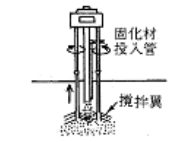
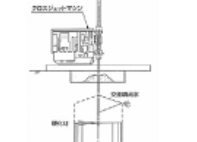
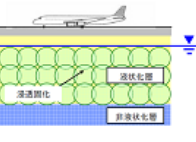
工法の目的	地盤の補強				
	置換	締固め	固結工法		薬液注入
対策工法名	置換工法	SCP工法 (CPG工法)	深層混合処理 (機械攪拌式)	深層混合処理 (噴射攪拌式 (X-jet))	浸透固化処理工法
概略図					
工法概要	軟弱土を良質土で置換する工法	砂を地盤中に圧入し、地盤の締固め効果により密度を増して、せん断強さを増大する工法	粉末、スラリー状の石灰、セメント系の安定剤を地中に注入、混合攪拌し、現位置で安定処理度を形成する工法	粉末、スラリー状の石灰、セメント系の安定剤を地中に注入、混合攪拌し、現位置で安定処理度を形成する工法	溶液型の恒久薬液を低圧力で浸透注入し、地盤を低強度で固化する工法。
長所	・掘削深度が浅ければ、経済的な工法である	・施工実績が多い ・経済的な対策である ・施工機械が小型である (CPG工法の場合)	・施工実績が多い	・X-jet工法では、改良径の管理可能であり、施工後2時間で供用が可能である (仙台空港で実績)。	・施工機械が小型である
短所	・掘削深度が深くなると土留め等の仮設構造物が必要 ・用倉トンネル周辺は転圧された盛土なので、改良効果が低い	・周辺地盤への変位の影響が大きい	・近接構造物へ影響がある場合がある ・施工機械が大型である。	土被りが薄い場合、改良直後には地上の使用ができない	改良後のGが1.1倍にしかならないため、変形の抑制に対する改良効果が小さい
用倉トンネルへの適用性	×	×	×	○	×

図-4 工法の選定(地盤改良)

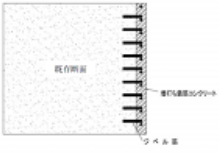
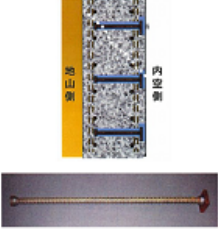
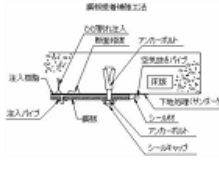
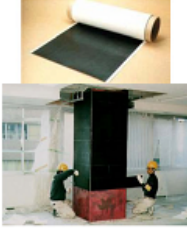
工法の目的	構造物の補強			
対策工法名	増厚工法	鉄筋差込工法	接着工法	巻き立て工法
概略図				
工法概要	既存断面にコンクリートを増打ちし、せん断耐力、曲げ耐力を増加する	既存断面を削孔して補強鉄筋を挿入し、せん断耐力を増加する工法	既存部材に鋼板を巻き立て、空隙に無収縮モルタルやエポキシ樹脂を充填し、曲げ耐力を向上する工法	既存部材の表面に引っ張り強度が高い炭素繊維シート(鉄筋の10倍程度)を張付し、耐力を向上する工法
長所	<ul style="list-style-type: none"> 実績が多い RCであるため、施工費が安価である 確実に耐力が増加する 	<ul style="list-style-type: none"> 補強前と同等の内空を確保できる せん断力に対して、確実に耐力が増加する 	<ul style="list-style-type: none"> RC橋脚で実績が多い 	<ul style="list-style-type: none"> RC橋脚で実績が多い 補強前と同等の内空確保が可能
短所	<ul style="list-style-type: none"> 道路の建築限界を満足しない可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 他工法と比較して実績少ない(新千歳空港で実績) 曲げ耐力は増加しない 	<ul style="list-style-type: none"> 巻き立てない場合、耐力の向上効果が一面のみとなる 	<ul style="list-style-type: none"> 炭素繊維が高価である 巻き立てない場合、耐力の向上効果が一面のみとなる
用倉トンネルへの適用性	×	○	×	×

図-5 工法の選定(構造物の補強)

以上のことから深層混合処理による施工は現実的ではないと判断した。

5. 地下構造物の補強による耐震補強工法

(1) 工法の抽出

空港基本施設を間接的に守るために、地下構造物である用倉トンネルを補強する工法として図-5に抽出した工法について検討・比較を行った結果を示す。

(2) 工法の選定

一次選定の段階で、鉄筋差込工法以外の工法は、トンネルへの適用性や道路の建築限界を考慮し候補からはずしている。

鉄筋差込工法については、新千歳空港での実績があることから広島空港においても施工可能であると判断した。

(3) 鉄筋差込工法

鉄筋差込工法は、①施工後においても現況の内空断面を確保する。②坑内から施工が可能である(空港施設内での施工が不要)。③1車線規制を行い道路を供用しながら短期間で施工が可能である。④施工後は既設構造物と一体となりメンテナンスフリーである。⑤施工費が他案と比べ安価である。以上の条件を満たすことから鉄筋差込工法を本トンネルの耐震補強対策工法として選定した。



写真-1 用倉トンネル

6. 鉄筋差込工法による施工

(1) 鉄筋差込工法の概要

新技術である鉄筋差込工法は、既設構造物の壁面に削岩機等で削孔を行い、グラウト材等を注入、補強鉄筋を挿入し、既設構造物と一体化を図り、せん断耐力を増加させる工法である(図-6)。特徴としては5.(3)に挙げたとおり、既設のトンネル補強に適した工法といえる。

(2) 鉄筋差込工法による耐震対策範囲の詳細決定

FLIPによる耐震照査の結果、①トンネル東側(右側)の地山形状が発生断面力に大きな影響を及ぼす。②地山高が高いほど発生断面力が小さくなる。ということが判明した。これにより、地山高の高い部分(図-7)ではアーチカルバートの右側壁においてレベル2地震動に対する耐震性能を満足する部分が確認された(図-8)。これら

の結果を踏まえて、詳細設計時に耐震対策範囲の設定を行った。(図-9)

通常のトンネル補強は左右対称に耐震補強対策を講じるが、地山形状の違いを考慮することで、片側(左側壁)のみの補強で、せん断耐力が満たせることにより、大幅にコスト縮減をはかることができた。

表-3(図-10)は各断面での実際のせん断耐力不足量であり、不足耐力に見合う鉄筋量を補うこととした。

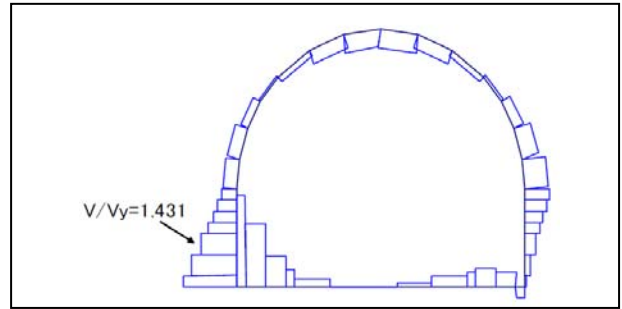


図-8 せん断力図

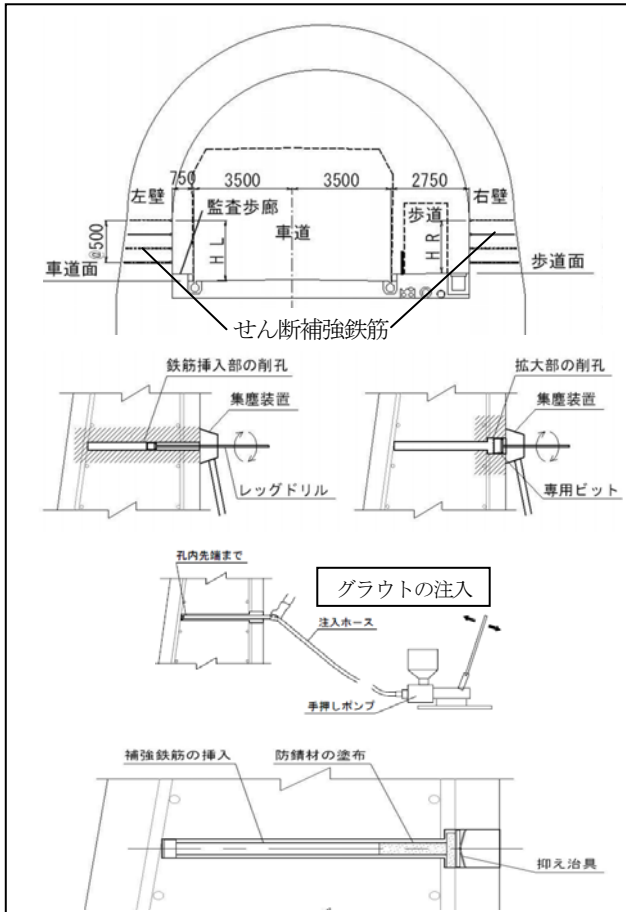


図-6 鉄筋差込工法 (PHb 工法の場合)

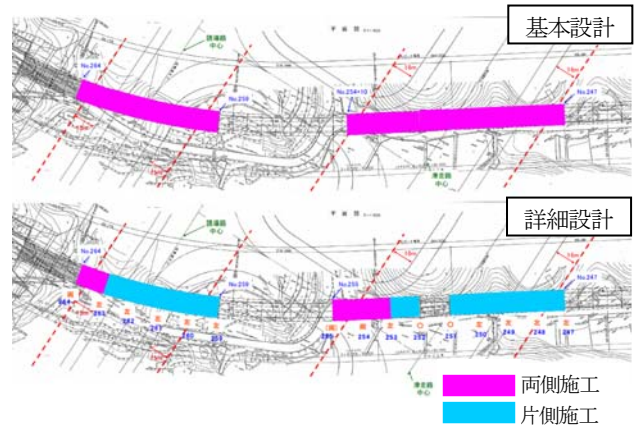


図-9 耐震対策範囲

測点No.	補強壁面(左壁、両壁)	必要せん断耐力(不足分) (kN)
247	左壁	212.9
249	左壁	155.1
250	左壁	147.6
253	両壁	153.5
254	両壁	173.4
260	左壁	57.2
261	左壁	25.7
262	左壁	303.5
263	両壁	303.5
264	両壁	299.9

表-3 せん断補強値まとめ

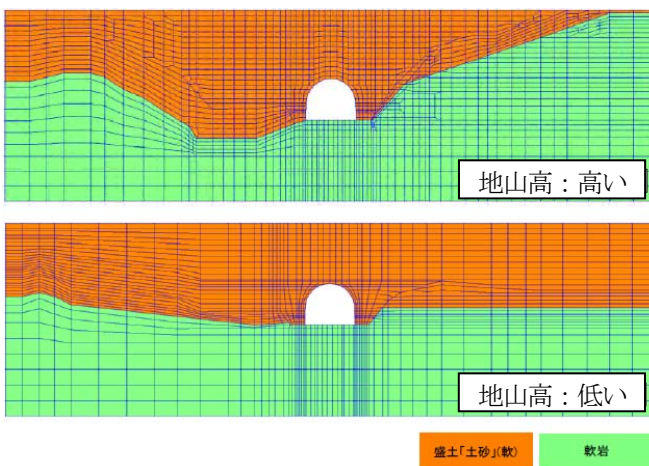


図-7 地山高の違い

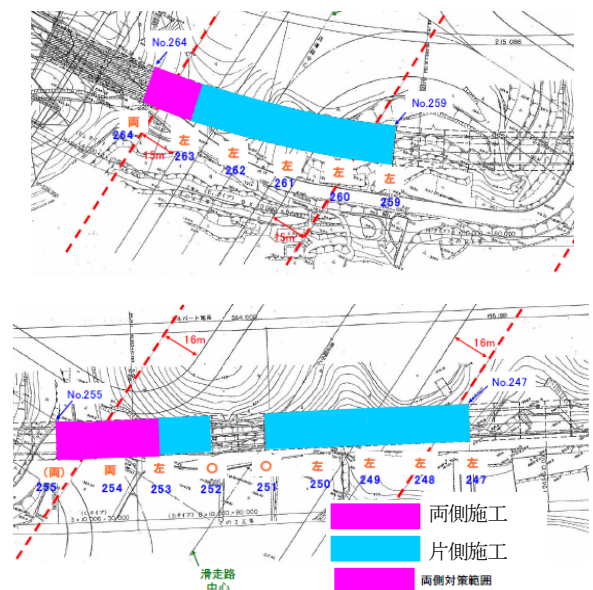


図-10 詳細設計拡大図

(3) 鉄筋差込工法の種類

鉄筋差込工法の代表的な工法として、「後施工プレート定着型せん断補強工法 (PHb工法)」「紙チューブ式接着アンカー工法 (RMA工法)」「後施工セラミック定着型せん断補強工法 (CCb工法)」などが挙げられる。今回の現場ではRMA工法により施工を行った。

(4) RMA (Reinforcement by Mortar Anchor) 工法

RMA工法の特徴は、定着材としてプレミックスモルタルカプセル(Qタイト)を使用することで、特別な施工管理を要さずに安定した品質を確保でき、シール・注入・仕上げの3工程が1工程で行えるため、工期の縮減が可能となる。補強鉄筋にプレートや定着体を取り付けないため、二次削孔の必要がない。削孔機は削岩機又はダイヤモンドコアマシーンを使用する。NETIS登録あり。(図-10)



図-10 RMA工法



写真-2 ダイヤモンドコアマシーン削孔状況

6. RMA工法による実施

(1) 本現場でRMA工法を採用する利点

施工にあたって、削孔機にダイヤモンドコアマシーン(写真-2)を採用することで、特殊な架台等を使用する必要がなくなり、最下段の削孔においても既設歩道を撤去することなく施工でき、施工の簡易化・工期の短縮・通行人への配慮が実現可能となった。

また、定着材にプレミックスモルタルカプセル(Qタイト)を使用することで、特別な養生工程の必要が無く、品質管理が容易となった(写真-3、写真-4、図-11)。



写真-3 Qタイト浸漬前



写真-4 鉄筋挿入状況

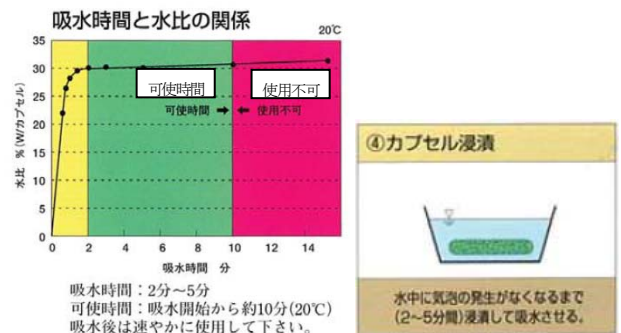


図-11 Qタイト品質管理

7. 結論

今回の地下トンネル耐震補強工事では、空港基本施設の耐震補強という概念にとらわれず、地下構造物を補強する鉄筋差込工法という新技術を採用することで、他の工法よりも工期が短縮でき、コストも抑えることが可能となった。

また、現場条件や工法の特徴を考慮した結果、耐震対策の範囲設定の絞込みを行うことが可能となり、更なる事業費の縮減や工期の短縮をはかることが可能となり、早期且つ費用対効果の高い事業が実施できた。

今後、高度成長期に建設された建造物の更新が問題となるが、建造物の補修に活用されるツールとして期待できると考えられる。

謝辞：本論文の執筆に携わっていただいた多くの方々に感謝するとともに、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）、2007
- 2) 土木学会：コンクリート建造物の補強指針（案）、1999
- 3) 日本工営技術情報No.31、2010
- 4) （財）土木研究センター：Post-Head-bar 設計・施工マニュアル、2005
- 5) （財）土木研究センター：セラミックキャップバー（ccb）工法 設計・施工マニュアル、2009