

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職	
	木村 亮（きむら まこと）		京都大学大学院 工学研究科		教授	
②研究 テーマ	名称	大型実験および数値解析による連続アーチカルバート盛土の設計規範の構築に関する研究				
	政策 領域	[主領域]	【領域4】	公募 タイプ	タイプⅡ	
		[副領域]	【領域5】			
③研究経費（単位：万円）	平成24年度	平成25年度	平成26年度	総合計		
※H24は精算金額、H25は受託金額、H26は計画額を記入。端数切り捨て。	1,098	2,500	1,300			
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏名		所属・役職				
井上 晋		大阪工業大学・教授				
岸田 潔		京都大学・准教授				
長屋 淳一		(株)地域地盤環境研究所・取締役				
澤村 康生		京都大学・博士後期課程（日本学術振興会特別研究員）				
⑤研究の目的・目標	（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）					
<p>高規格道路を建設する際には、機能上の理由により盛土や高架橋によって他の道路や鉄道などと立体交差させて分離する必要がある。ここで、盛土は地域を分断し、高架橋は盛土に比べて建設・維持管理が高価であるという問題がある。そこで申請者らは、盛土内に複数のアーチカルバートを設置した新しい盛土構造を提案し、その実用化を目指している。</p> <p>提案する構造は、柔なアーチカルバートを連続的に含むものであり、地震時のカルバートと盛土の動的挙動、相互作用を解明する必要がある。そこで本研究では、振動実験（大型振動台、遠心模型実験）と数値解析、現場計測およびプレキャストカルバートの継手試験を実施し、アーチカルバートを複数含む盛土構造の耐震安定性と地震時要求性能を解明し、耐震性を考慮した設計規範の確立を目指す。</p>						

⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、これまでに得られた研究成果や目標の達成状況とその根拠（データ等）を必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。)

本研究では、アーチルバートを複数含む盛土構造の耐震安定性と地震時要求性能を解明し、耐震性を考慮した設計規範の確立および復旧性に関する検討を行うために、(A) 遠心模型実験、(B) 大型振動台実験、(C) カルバート構造形式の検討、の3点について研究を実施している。以下には、それぞれの項目について平成25年度に実施した研究の進捗状況を示す。

(A) 遠心模型実験

平成25年度は、カルバート縦断方向における耐震性について検討を実施した。カルバート縦断方向の動的遠心模型実験は昨年度にも実施し、基本的な動的挙動について知見を得た。そこで平成25年度は、昨年度の結果を踏まえて、さらに実構造に近い条件について検討を実施した。

実験では、縦断方向のカルバートの連結の有無をパラメータとした。図-1に概略図、図-2に実験ケースと壁面変位計測位置をそれぞれ示す。地盤は江戸崎砂を用いて締固め度 $D_c = 92\%$ ($w = 15.9\%$) とし、入力波はプロトタイプ1 Hzのテーパ付sin波を、 0.5 m/sec^2 から 0.5 m/sec^2 刻みで 5.0 m/sec^2 まで段階的に入力した。

図-3に左側の壁面における滑動量を示す。図より、カルバート同士を分離したCase-2において、壁面が大きく滑動していることがわかる。またCase-2では、加振後に図-4に示すように目地の開きが発生し、坑口付近のカルバート底板に大きな曲げモーメントが発生することを確認した。

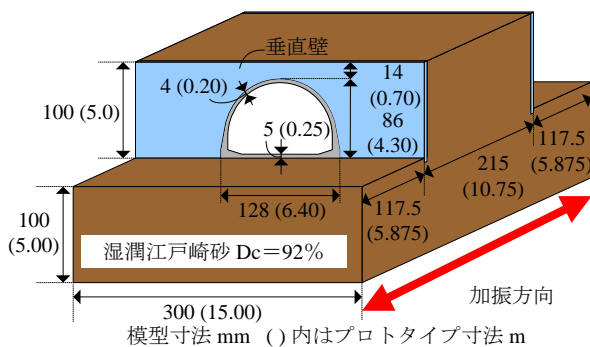


図-1 実験概略図

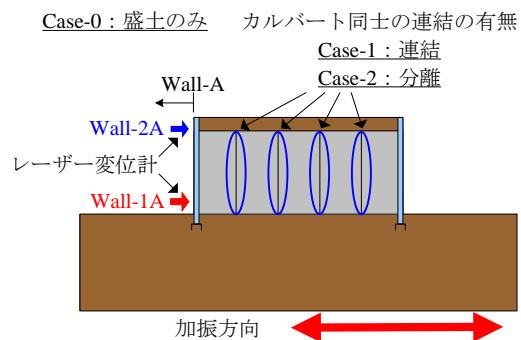


図-2 実験ケースと壁面変位計測位置

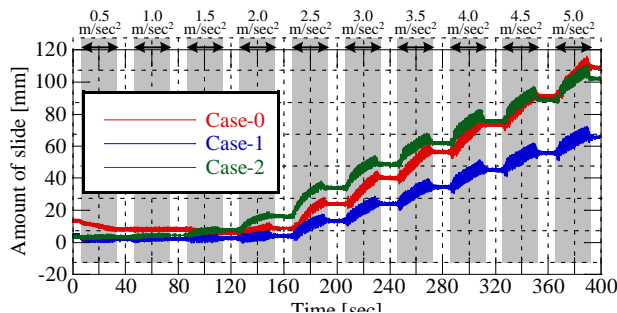


図-3 左側壁面の滑動量

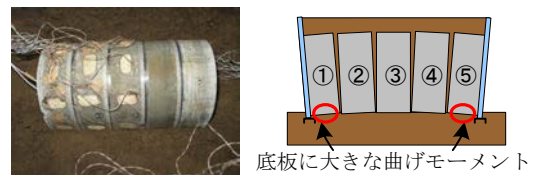


図-4 Case-2で発生した目地の開き

(B) 大型振動台実験

実際に配筋を施したプレキャストアーチカルバートのL1, L2地震動に対する地震時挙動を検討するため、平成25年度は肩部にヒンジ機能を有する2ヒンジプレキャストアーチカルバートに対して2回の大型振動台実験を実施した。頂部および両脚部にヒンジ機能を有する3ヒンジタイプについては、平成25年度の2月に実験を実施する予定である。

本実験は、京都大学防災研究所所有の強震応答実験室にある大型振動台（幅5m，奥行き3m）を用いて実施した。カルバートのような地中構造物の挙動は、周辺地盤の変形が支配的に影響するものと考えられる。したがって、モデル地盤が自由にせん断変形できることが望ましく、多くの振動実験においてせん断土槽が用いられている。しかしながら、本実験のために新たにせん断土槽を作製することは費用の面から困難であったため、1回目の実験では平成24年度に作製した剛土槽の側壁に緩衝材を設置することで、土槽による地盤の拘束を軽減することとした。2回目の実験においては、1回目の実験を踏まえて土槽の改良を行い、再度実験を実施した。以下にはそれぞれの実験の成果について記す。

【1回目の実験（2013年8月）】

図-5に実験土槽の概略図を示す。土槽のサイズはおよそ横幅4 m，高さ2 m，奥行き1 mであり，その中にカルバートを3リング並べた。カルバートのサイズは振動台の定格重量と側壁との距離を加味しつつ，できるだけ大きな断面を用いるという意図のもと決定した。また，本実験で用いた2ヒンジプレキャストアーチカルバートは，このように決定した内空および土被りに対し，現行の基準を用いて設計した「実物」である（図-6）。相似則等を用いることなく直接実験を行うことで，実際の構造における挙動を把握できると考えた。

1回目の実験では，剛土槽による地盤の拘束を軽減するために，土槽側壁に緩衝材を設置した。緩衝材の選定にあたっては，事前解析による検討を行っている。図-7に解析メッシュを示す。緩衝材の厚みと材料定数をパラメータとした解析により，厚さ150 mmのゴムスポンジが緩衝材として最適であるという結果を得た。加振は繰り返し訪れる地震に対する挙動を確認するために，レベル1地震動とレベル2地震動を交互に二度入力することとした。

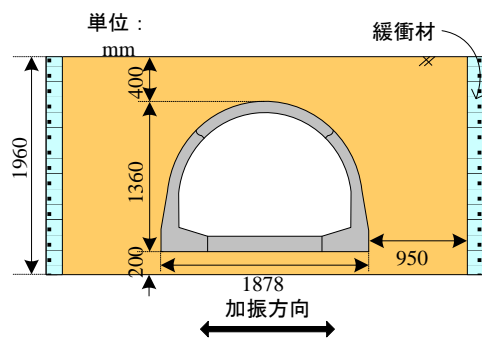


図-5 土槽概要図



図-6 カルバート模型

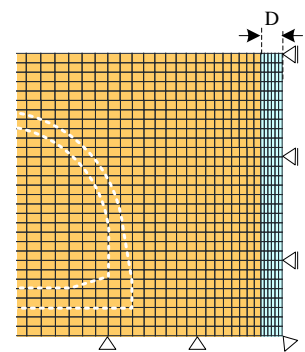


図-7 解析メッシュ

図-8に最大加速度発生時（レベル2地震動 [1回目]）における、カルバート周面の土圧分布を示す。カルバート左肩部と右脚部で土圧の上昇が見られ、逆に右肩部と左脚部では土圧が減少していることが分かる。このカルバート対角における土圧の増減により、部材断面力およびヒンジ挙動に変動が見られたが、いずれも許容値内に収まる範囲のものであり、この実験条件ではレベル2地震動に対してもカルバートは十分に安定性を保つことが確認された。

実験方法の確立等の点においても、1回目の実験は一定の成果を得ることができた。一方で課題としては、①緩衝材の影響により側方土圧が作用しにくい、②緩衝材を用いた方法では地盤のせん断変形量の定量的な評価が難しく、変位量もある程度で制限される可能性がある、③計測点数を追加する必要がある、ことなどが挙げられる。これらの課題を踏まえ、2回目の実験では土槽の改造を行い、より厳しい条件で実験を行った。

【2回目の実験（2013年11月）】

2回目の実験では土槽側壁下部をヒンジ条件とし、単純せん断変形を無制限に許容する構造とした。計測点も変位計を中心に大幅に増設し、地盤とカルバートの相互作用がより定量的に分析できるように工夫を行った。最大加速度発生時における、曲げモーメントの分布を図-9に示す。カルバート左上の土圧の上昇により、カルバート左脚部で部材外側に引張が発生する向きのモーメントが発生し、右脚部では逆の傾向が見られる。また、1回目よりも2回目の方が大きなモーメントが発生しており、土槽改良の効果が確認できる。この時刻における地盤およびカルバートの水平変位量を図-10に示す。カルバート肩部は地盤と同様の変位量を示している一方で、ボードおよびインバートの変位は地盤と異なる値を示している。増設した変位計のデータから、カルバート対角における土圧の増減は、地盤とカルバートの水平変位の差から説明できることが分かった。なお、2回目の実験においても部材およびヒンジにレベル2地震動が与える影響は限定的で、明確なひずみの蓄積やヒンジ部のずれ等は確認されなかった。

以上より、今年度実施した2回の実験の範囲では、2ヒンジプレキャストアーチカルバートはレベル2地震動に対しても十分な耐震性を有することが確認できた。

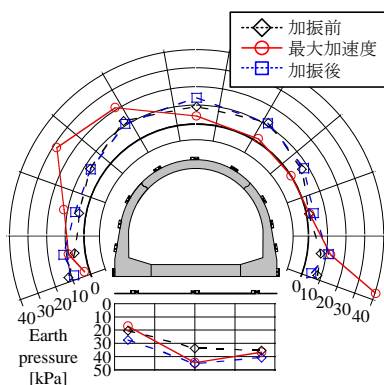


図-8 土圧分布

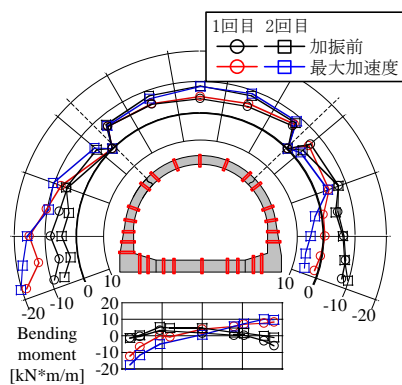


図-9 曲げモーメント分布

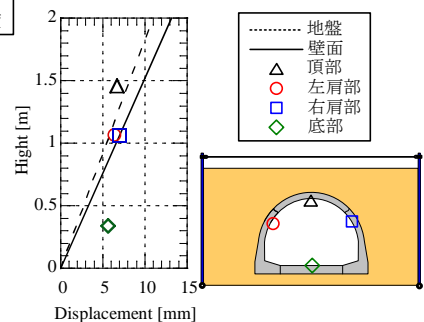


図-10 水平変位量

(C) カルバート構造形式の検討

【継手部の性能試験】

肩部に継手構造を有する2ヒンジ式のプレキャストアーチカルバートは、設計においては肩部をヒンジ構造としている。しかし実際の構造においては、地震時の部材落下防止対策として継手部に曲りボルトを挿入し、ボルトのシーすへは腐食防止のためモルタルを充填している。

これまで継手単体における性能は確認されていなかったことから、本研究では平成24年度に継手部の曲げおよびせん断試験（図-11）を実施した。平成25年度は実験結果を整理し、継手間の回転剛性を算出、またその定数を用いて継手部をヒンジ構造とした場合の比較を行った。

図-12に継手部を外空側（正方向）および内空側（負方向）に回転させた場合の継手部の回転角と継手部に発生する曲げモーメントの関係を示す。図より、負方向でも0.08 rad（約4.6 deg）までは過大な回転剛性をとらないことが確認できる。図-12より、両方向の回転剛性をそれぞれバイリニア型にモデル化し、実物大の断面について肩部をヒンジ構造、実験から得られた回転剛性を有するモデル、剛構造、とした場合について解析を実施した。その結果、実験より得られた回転剛性を用いた場合でも、肩部をヒンジ構造とした場合との差はわずかであることを確認した。



図-11 継手部の曲げ試験

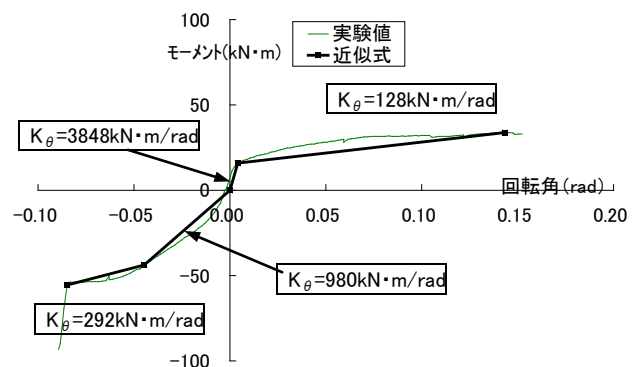


図-12 継手部の回転剛性

【現場計測および現地調査】

平成24年度の現場計測において、アーチカルバートを設置する基礎地盤に軟弱地盤が存在する場合は、表層の地盤を改良しても盛土荷重により沈下が発生し、特に2連型のアーチカルバートを設置した場合にはセンターピアとサイドウォール脚部で不同沈下が生じ、フーチング部の曲げモーメントが大きくなることを確認した。

平成25年度は、上記の知見を踏まえて軟弱地盤上に設置された1連型のアーチカルバートについて現地調査を実施した。その結果、1連型のアーチカルバートにおいても、両脚部と底板中央で不同沈下が発生した場合については、断面力の増加により部材にひび割れが発生することを確認した。さらに、縦断方向に対して盛土高さが増加している場合、その影響を強く受けることも確認した。平成24年、25年の現場計測結果より、アーチカルバートの設計においては、沈下および不同沈下の許容値を設定する必要があることを確認した。

図-13に本研究における計画案と、研究実施体制を示す。平成25年度は、8月および11月に2ヒンジタイプのプレキャストアーチカルバートに対する大型振動台実験を実施し、さらに2月には3ヒンジタイプの大型振動台実験を予定しており、本申請の目玉である大型振動台実験を遂行した。また、遠心模型実験においては、平成24年度に計画を前倒しで実施することができたため、平成25年度は申請時から新たな実験ケースを追加・実施し、道路軸直角方向の検討を進めることができた。大型振動台実験および道路軸直角方向に関する遠心模型実験の数値解析は、数値解析のパラメータを決定するための基礎実験を実施し、解析モデルを構築中である。

さらに、カルバート構造形式に関する検討では、継手試験および現場計測を実施し、本研究結果が実問題に即したものとなること、実用化されることなどを念頭に研究を進めた。

以上より、本年度はほぼ計画通りに研究を進めることができたと考える。

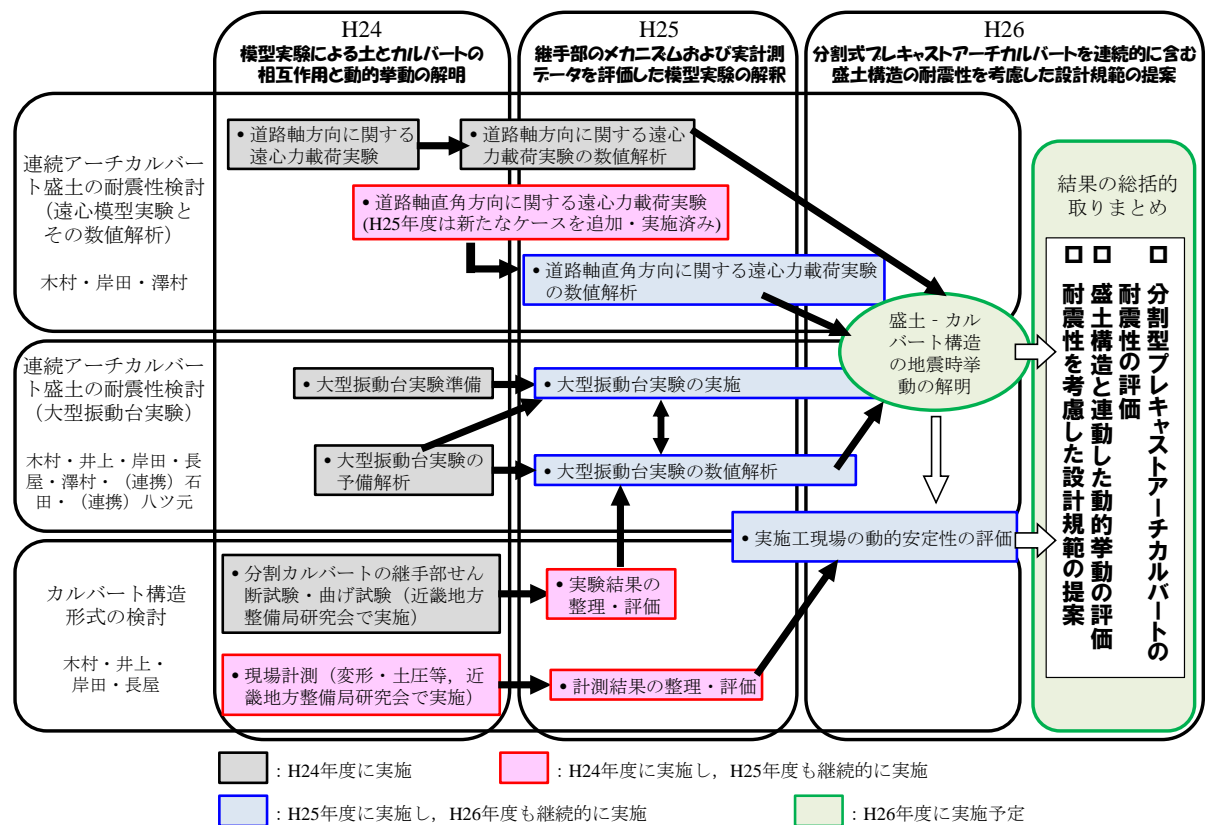


図-13 本研究における計画案と研究実施体制・進捗状況

⑦研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

- 1) 澤村康生, 岸田 潔, ハツ元仁: 壁面工を有する盛土内に設置されたカルバートにおける縦断方向の耐震性に関する基礎データの収集と地震時挙動の把握・地震時要求性能の明確化, 第 48 回地盤工学研究発表会発表論文集, 地盤工学会, 特別セッション 平成 24 年度道路保全地盤技術向上に資する調査・研究成果報告会 資料, 2013-7.
- 2) 並川卓矢, 澤村康生, 岸田 潔, 木村 亮: カルバート縦断方向の地震時挙動と盛土高さの影響に関する実験的検討, 第 68 回土木学会学術講演会講演概要集, I-001, pp.1-2, 2013-9.
- 3) 石原央之, 澤村康生, 岸田 潔, 木村 亮: アーチカルバート壁面に作用する動土圧に関する実験的研究, 第 68 回土木学会学術講演会講演概要集, III-338, pp.675-676, 2013-9.
- 4) Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Dynamic behavior of multi-arch culverts embankment considering the installation interval of consecutive arch culverts, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.1591-1594, 2013-9.
- 5) Namikawa, T., Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Dynamic Centrifuge Model Tests on Culverts and Embankment with the Influence of Perpendicular Walls, Proc. of the 26th KKHTCNN Symp. on Civil Engineering, G-4-2, Singapore, 2013-11.
- 6) Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Numerical Study on Seismic Performance of Multi-arch Culverts Embankment in Large Earthquake, Proc. of the 26th KKHTCNN Symp. on Civil Engineering, G-4-7, Singapore, 2013-11.
- 7) Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Dynamic Centrifuge Model Tests on Culvert Embankment with Perpendicular Wall in Culvert Longitudinal Direction, Proc. of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, pp.883-889, Perth, 2014-1.

⑧研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等を記入。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのかについて記述。)

平成25年度は、大型模型実験を実施し、継手構造を含むカルバートと盛土の動的挙動の解明を行った。サイズや継手構造を模擬した点で実構造に近い模型で実験を実施することができた。結果として、L2地震動を複数回加振しても、懸念していた継手部の変状、カルバートボード部の落下、クラックの発生などは確認できなかった。これらの結果は、数値解析、正負交番試験結果等と総合的に評価を行うことで、耐震性能を考慮した設計規範の構築につながるものとする。次年度は、厳しい条件での大型模型実験を計画しているが、主として数値解析や正負交番試験結果を踏まえて、設計規範の構築を目指す予定である。

一方、道路軸直角方向の動的試験は、遠心力場での実験をほぼ終了させており、次年度以降数値解析を実施することで、盛土およびカルバートの動的挙動の解明を行い、それらの知見を設計規範に援用することを目指す。

⑨特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

知見・成果：平成25年度には以下の研究成果が得られている。

- (1) 大型振動台実験による2ヒンジプレキャストアーチカルバートのL1, L2地震動に対する地震時挙動
- (2) カルバート縦断方向におけるカルバート同士、坑口の処理方法と地震時挙動
- (3) 実現場における現場計測と設計における相違点、設計における留意点の把握
- (4) 継手部における回転剛性と限界状態、高軸力下における継手部の挙動

学内外等へのインパクト：本研究によって得られた成果は以下のように公表している。

- (1) 第48回地盤工学会研究発表会(H25.7)
- (2) 土木学会第68回年次学術講演会(H25.9)
- (3) The 26th KKHTCNN Symp. on Civil Engineering (H25.11)
- (4) The 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2014. (H26.1)

今後も以下の予定で初年度の成果を発表予定である。

- (1) 地盤工学ジャーナル（投稿中）
- (2) 第48回地盤工学会研究発表会(H26.7)
- (3) 土木学会第68回年次学術講演会(H26.9)
- (4) The 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. (H26.9)
- (5) The 27th KKHTCNN Symp. on Civil Engineering (H26.10)

また、平成25年度は、近畿地方整備局で実施されている産官学の連携のプロジェクト会議で研究成果発表を行った。また、平成24年度進めてきた近畿地方整備局内のカルバート盛土の計測の分析を産官学で実施し、様々な立場の人と意見交換を行い、本研究成果が実問題に即したものとなること、実用化されることを念頭に研究を進めた。

大型模型実験では、実験結果や実験方法の意見交換会、実際の実験の見学会を実施し、近畿地方整備局、土木研究所、防災科学技術研究所の研究員に参画いただいた。

見通し・進捗：平成25年度は、本申請の目玉である大型振動台実験を遂行した。また、遠心模型実験においては、申請時から新たな実験ケースを追加・実施し、道路軸直角方向の検討を進めることができた。さらに、カルバート構造形式に関する検討では、継手試験および現場計測を実施し、実務における課題や施工法を念頭に研究を進めた。

以上より、本年度はほぼ計画通りに研究を進めることができたと考える。