

(12) 大型航空機を対象とした鋼コンクリート合成床版橋の実挙動とモニタリングシステムを用いた橋梁の常時計測

金子 雅廣¹・白井 洋史²・匂阪 興平³・山口 浩平⁴・日野 伸一⁵

¹正会員 成田国際空港株式会社 整備部 (〒282-8601 千葉県成田市成田国際空港内 NAAビル)

E-mail:m-kaneko@naa.jp

²成田国際空港株式会社 整備部 (〒282-8601 千葉県成田市成田国際空港内 NAAビル)

E-mail:h-shirai@naa.jp

³成田国際空港株式会社 整備部 (〒282-8601 千葉県成田市成田国際空港内 NAAビル)

E-mail:k-sagisaka@naa.jp

⁴正会員 一般財団法人橋梁調査会 (〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東2-9-1)

E-mail:yamaguchi-k@jbec.or.jp

⁵フェロー会員 九州大学大学院工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

E-mail:hino@doc.kyushu-u.ac.jp

成田空港の誘導路には、既存施設等の制約から、その一部に合成床版形式の橋梁構造が採用されている。橋梁形式の誘導路は世界的にも事例が少なく、現状では設計手法が確立されているとは言い難い。このため、設計においては道路橋の設計手法が用いられたが、FEMによる検証とともに、コンクリート床版については実規模大供試体を用いた押抜きせん断試験により床版の安全性を確認した。さらに、実機を用いた載荷試験により、応力状態を検証し、本橋の安全性を確認した。またコンクリート床版内及び主桁には建設時から計測器が設置され、継続的計測により、航空機走行時のひずみ挙動等が確認されている。本論文では、誘導路橋梁への複合構造形式の適用事例、一連の実験等から得られた知見等を紹介する。

Key Words : Taxiway-bridge, Punching shear strength, Loading test by real aircraft, Regular measurement of responses by aircraft taxiing

1. はじめに

成田空港では、空港容量拡大のため新たな誘導路が整備された。その際、既設構造物による制約、大型航空機荷重への耐荷重性能の観点から、橋梁には低桁高を実現でき、かつ床版部の疲労耐久性が相対的に高い鋼コンクリート合成床版桁が採用された¹⁾。設計荷重は、空港土木施設構造設計要領及び設計例²⁾において表-1、図-1に示されるLA-0である。390kNの1輪当り輪荷重は道路橋設計荷重の約4倍に相当し、床版厚は320mmと一般の道

路橋床版より厚い。航空機荷重に特化した橋梁形式構造物に対する設計体系が確立されているとは言い難い状況を踏まえ、設計段階では道路橋の設計手法を採用しつつもこれを検証するためのFEM、実規模大供試体を用いた押抜きせん断試験が行われ部材諸元が決定された^{3,4)}。本橋には、建設の段階から床版、桁等に計測器が設置され、温度、ひずみデータが継続的に計測されている。供用後には、これら計測器を用い、実際の航空機を用いた載荷試験が行われ、使用性、安全性について更

表-1 設計荷重及び自動車荷重 (T 荷重) の諸元

	総重量 (kN)	前輪		後輪	
		輪荷重 (kN)	タイヤ圧 (N/mm ²)	輪荷重 (kN)	タイヤ圧 (N/mm ²)
LA-0	6664	436	1.52	390	2.71
自動車荷重 (T 荷重)	254	—	—	100	1.00

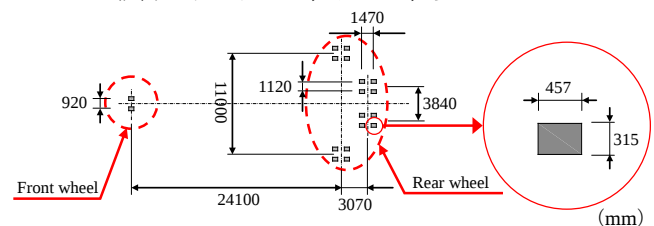


図-1 設計対象航空機 (LA-0) の脚及び輪配置

なる検討が実施されている^{5,9)}。また、供用後は本橋に特化した維持管理に係る研究が民学共同で進められた。研究では、航空機が走行する際の橋梁特有の挙動を把握することを目的とした常時計測とTVカメラを組み合わせた計測システムが試作され、航空機の走行とこれによるひずみ挙動の把握が可能となっている^{7,8,9)}。現在、データの蓄積が進められ、維持管理業務への活用が検討されている。本論文では、誘導路橋梁への合成構造の適用事例として本橋を紹介するとともに、一連の実験等から得られた知見ならびに航空機走行の計測等について述べる。

2. 誘導路橋梁の概要

当該橋梁及び航空機の载荷状態は、図-2に示されるとおり、橋長48m、幅員は誘導路として必要な60mを確保した2径間連続構造である。初期設計段階では、既存の道路の建築限界と航空機の安全な走行を確保するための橋梁形式に関する検討が行われ、合成床版形式の橋梁が最適であると結論付けられた。前述のとおり、設計には

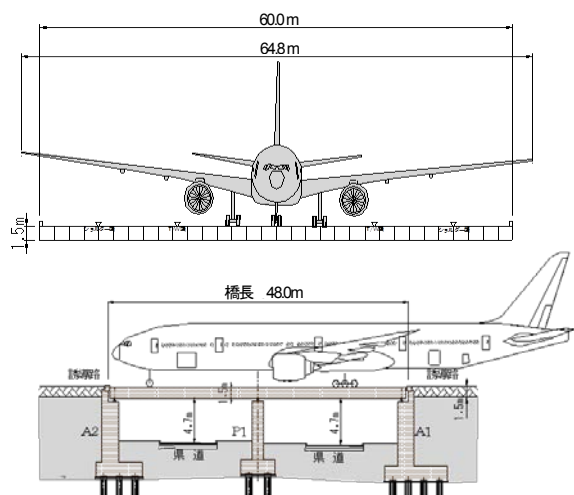


図-2 橋梁と航空機の载荷状況

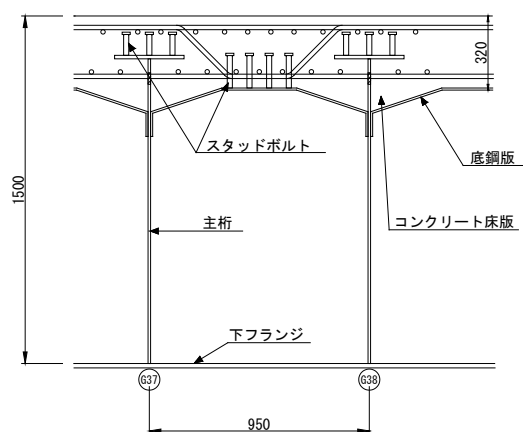


図-3 誘導路橋梁上部工詳細断面図

道路橋の設計手法が準用されたが、FEMによる応力、変形についての解析により、道路橋の設計手法による結果の数値解析上の妥当性が検証された。さらに、室内での実規模大供試体による押抜きせん断試験により床版の疲労耐久性能が確認され、図-3に示す構造が決定された。低桁高を実現するため主桁が大きくコンクリート床版内に入った合成構造となっており、床版との合成は主桁と主桁上フランジのスタッドボルトにより確保されている。また、型枠兼用の底鋼板は、設計ではその効果は考慮されていないが、コンクリートとの一体化に対し一定の効果を期待し、スタッドボルトが設置されている。コンクリート床版は、大きな集中荷重である航空機荷重を支持するため厚さが320mmと道路橋の一般的なコンクリート床版に比べ厚いことが特徴である。

3. 実規模大供試体による押抜きせん断試験

(1) 目的

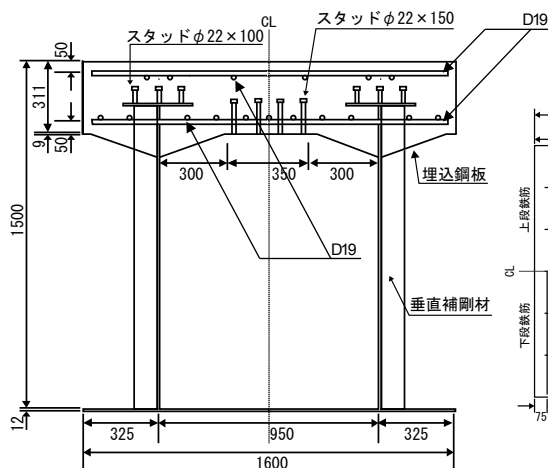
一連の数値解析において、橋梁の安全性は評価されたが、これら解析によって本橋における想定外の挙動が起こり得る可能性が全て排除されているとは言いがたい。特に、本橋のコンクリート床版の疲労性能評価において準用した既往の知見¹⁰⁾については、床版の厚さが道路橋のコンクリート版厚に比べ厚いことから、その適用可能性については注意する必要があるものであった。このため、押抜きせん断耐力を確認するとともに破壊メカニズムを検証することを目的とし、床版の疲労特性と関係の大きい押抜きせん断耐力に着目した実規模大の供試体を用いた試験が実施された。

(2) 供試体

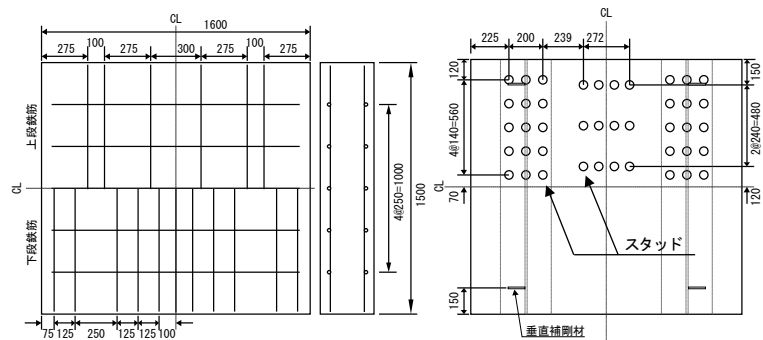
事前検討において、载荷試験装置の性能の上限である2000kNでは、実橋を再現した供試体において押抜きせん断破壊に至らないことが確認された。このため、実橋を模擬した供試体に加え、破壊メカニズムを検証するため、底鋼板及びハンチを省略し、かつコンクリート強度及び鉄筋量を低減させた供試体が作成された。供試体詳細を図-4に、試験に用いた供試体のコンクリート配合及びコンクリートの力学特性を表-2、3に示す。

(3) 载荷試験

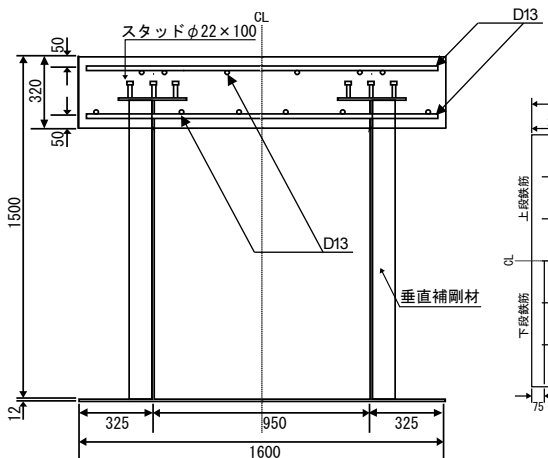
载荷試験の装置は、門型フレームに2000kNジャッキが装備されたものである。载荷に用いた载荷板は315mm×475mmであり、設計対象航空機荷重の設置面積を模擬したものである。ひび割れの発生及び進展を確認するため50kNステップで载荷荷重が増加された。また同時に、供試体に貼付されたひずみ計、変位計によりデ



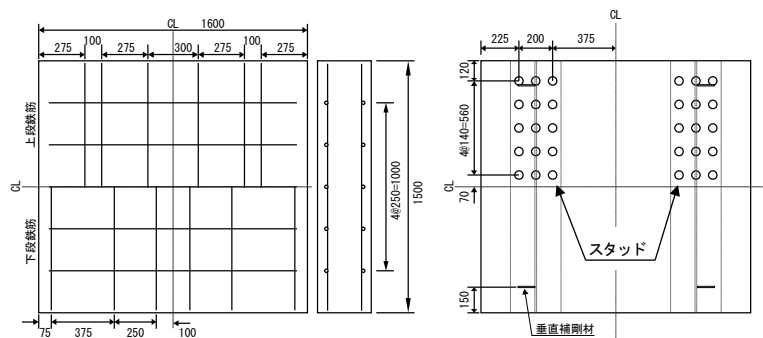
供試体断面図 (ケース 1)



供試体上面図 (ケース 1)



供試体断面図 (ケース 2)



供試体上面図 (ケース 2)

図-4 供試体詳細

表-2 供試体に用いたコンクリートの配合

供試体	W/C (%)	S/A (%)	kg/m ³						
			水	セメント	粗骨材	細骨材		混和剤	
						海砂	砕砂	減水剤	AE 剤
ケース 1	55.0	46.0	185	336	952	336	413	3.36	—
ケース 2	70.5	50.9	184	261	897	555	376	2.61	0.652

表-3 試験実施当日におけるコンクリートの力学特性

	強度(N/mm ²)				ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
	圧縮	引張	曲げ	せん断		
ケース 1	28.7	2.85	3.74	7.81	28.3	0.19
ケース 2	18.5	1.98	2.98	4.88	26.3	0.20

ータが計測された。実橋を模擬したケース 1 では、2000kN 以内では事前の予測どおり最大荷重が確認されなかった。このため、2000kN 載荷後のケース 1 を用い、ケース 1-2 として、載荷板を 100mm×100mm に取替え再度載荷を行った。

(4) 結果と考察

a) 荷重と変位の関係

最大荷重載荷後の供試体状況を図-5に、荷重とコン

クリート版下面中央で計測された変位の関係を図-6に示す。ケース1では載荷重600kN付近で床版下面にひび割れの発生が確認された。この時点においてコンクリート床版の剛性は低下したものと考えられるが、耐力の著しい低下と考えられる状態は確認されなかった。また、ケース1は、設計想定荷重である390kNに対し十分な押抜きせん断耐力を有することが確認された。ケース1-2では、最大荷重1719kNを記録した後、変位は増加したものの脆性的な破壊は見られなかった。ケース2では、載

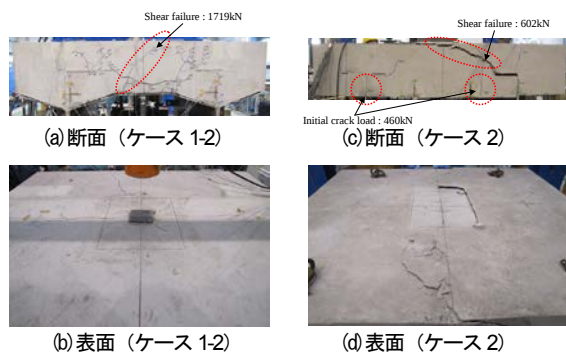


図-5 最大荷重載荷後の供試体状況

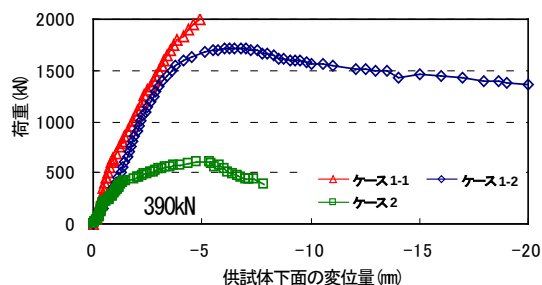


図-6 荷重と供試体下面の変位量の関係

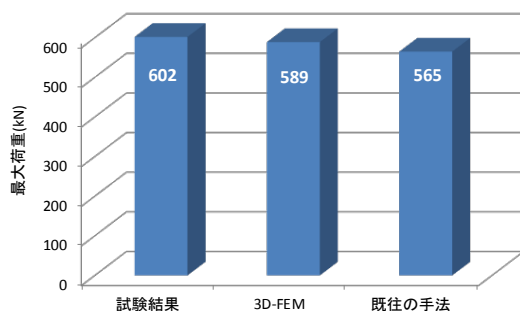


図-7 試験値と評価手法の比較 (ケース 2)

荷重200kN付近からひび割れが発生し、最大荷重602kNで押抜きせん断破壊が確認された。

b) 押抜きせん断強度の評価

実橋を模擬したケース 1 においては、設計荷重に対し十分な押抜きせん断耐力を有していることを確認した。また、ケース 1 及びケース 1-2 では、明確な押抜きせん断破壊は確認されなかった。これは、下鋼板及びスタッドボルトにより、コンクリート床版が拘束され、脆性的破壊が抑制されたものと推測される。ケース 2 について、既往の研究¹⁰⁾に基づき鉄筋 2 方向を考慮し押抜きせん断耐力を算出すると 565kN となる。また、3 次元非線形 FEM により算出した場合、589kN となり、ともにケース 2 より得られた押抜きせん断耐力 602kN と比べ図-7 に示すように、安全側での評価となることが認められた。以上から、本橋のように厚い床版においても、従来の道路橋の評価手法によりせん断耐力の評価が可能であることが確認された。疲労耐久性については、既往の研究¹¹⁾により梁状化した RC 床版の押抜きせん断力学モデル及び

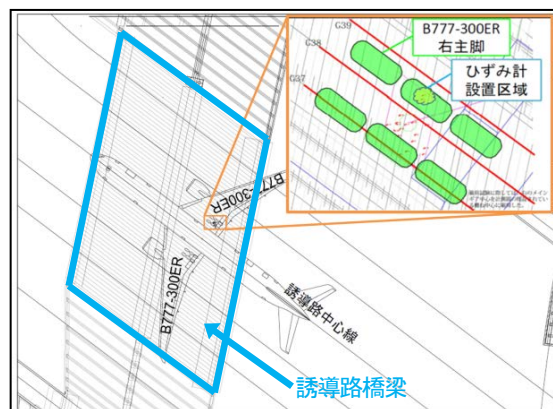


図-8 実機載荷状況



図-9 実機載荷試験の実施状況

耐力式が提案されており、これを基に実橋での 91 日強度から許容交通量を算出すると、水の影響を考慮した場合において、100 年以上の供用が担保されることが確認された。

4. 実機載荷試験

(1) 試験の概要

橋梁完成後、使用性能を把握することを目的とした実機載荷試験が計画され、コンクリートひずみ計、桁等鋼材に設置されたひずみゲージ及びトータルステーション等により載荷時の橋梁の諸挙動が計測された。コンクリートひずみ計は、床版コンクリート打設に先立ち、航空機のメインギアの通過頻度が高いと想定される位置の床版上面から高さ方向に30mm、160mm、290mmの位置に橋軸方向及び橋軸直角方向に設置されている。載荷に使用された機材はメインギア1脚に6輪を有するB-777-300ERであり、当日の総重量は1754kNであった。試験はトローイングトラクターにより実機を計測位置まで牽引し、静止一定時間後に各種計測を行うもので、計4回実施された。当日の載荷位置及び実施状況を図-8、9に示す。

(2) 床版コンクリート等の力学特性

床版コンクリートの設計基準強度は36N/mm²であったが、打設されたコンクリートの実強度等の発現状況は実

機載荷試験実施日である材齢179日において表-4のとおりであった。また、鉄筋の力学特性は表-5のとおりである。

(3) 使用状態においてコンクリート床版に生じる応力の評価

主桁に貼付された橋軸方向ひずみゲージ及び主桁直上の橋軸方向コンクリートひずみ計の载荷による平均応答値を図-10に示す。この図から主桁とコンクリート床版の明確な合成効果が確認され、合成構造として機能していることが確認される。また、コンクリート床版はRC断面として設計されており、曲げひび割れ発生の有無について明確でない。そこで载荷試験に使用した航空機重量の輪荷重を基に、道路橋示方書・同解説¹²⁾に従い床版支間方向のモーメントを算出し、さらに床版全断面を有

表-4 床版コンクリートの力学特性

材 齢 (日) (载荷試験当日)	強度(N/mm ²)		弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
	圧縮	引張		
179	55.9	3.4	40.8	0.23

表-5 鉄筋の力学特性

種 別	強度(N/mm ²)		弾性係数 (kN/mm ²)
	降伏	引張	
SD345	384	613	200

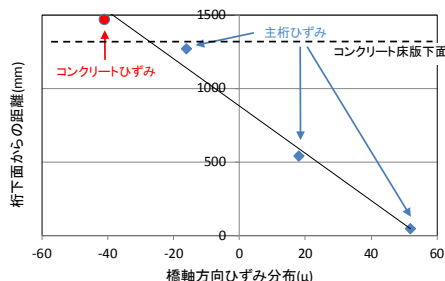


図-10 载荷時における主桁位置の平均ひずみ応答

効とし橋軸直角方向の応力を算出し、床版支間方向の設計曲げモーメントの算出方法を評価することとした。同時に、LA-0及び死荷重によるコンクリート床版引張側に生じる応力と曲げひび割れ強度を比較し、曲げひび割れの発生について評価した。曲げひび割れ強度は、コンクリート標準示方書（設計編）¹³⁾に基づき、表-4、5に示される材料強度等を用い算出された。床版に生じる応力について、実測ひずみから求めた値と計算値を図-11に示す。実測ひずみから求めた応力値と計算値は概ね一致し、中立軸もほぼ同位置である。これは、道路橋の床版に対するモーメント算出手法が航空機を対象とする床版においても準用できることを示している。また、LA-0が本橋に载荷した場合、床版下面曲げ引張応力度は、曲げひび割れ強度に達しない結果となり、曲げひび割れが発生しないことが確認された。合成床版橋である本橋において、曲げひび割れが生じないことは合成を確保することに繋がるもので、安全性を担保するうえで重要であり、実機载荷試験からこれを確認できたことは貴重である。

5. 航空機の走行によるひずみ応答の常時計測における傾向と課題

(1) 航空機の走行によるひずみ応答の常時計測と傾向

橋梁上を走行する航空機の機材を特定し、走行時のひずみ出力を管理し、異常値の検出等が可能となれば、一つの有効な維持管理手法と成る可能性がある。そこで前述のとおり、本橋では計測器とカメラを連動させた図-12に示すモニタリングシステムによるデータ集積が行われ、現段階では出力される応答値の解析及びシステムの改良等の検討が進められている。システムからは、一例として、図-13に示す様な航空機の走行記録に対応し

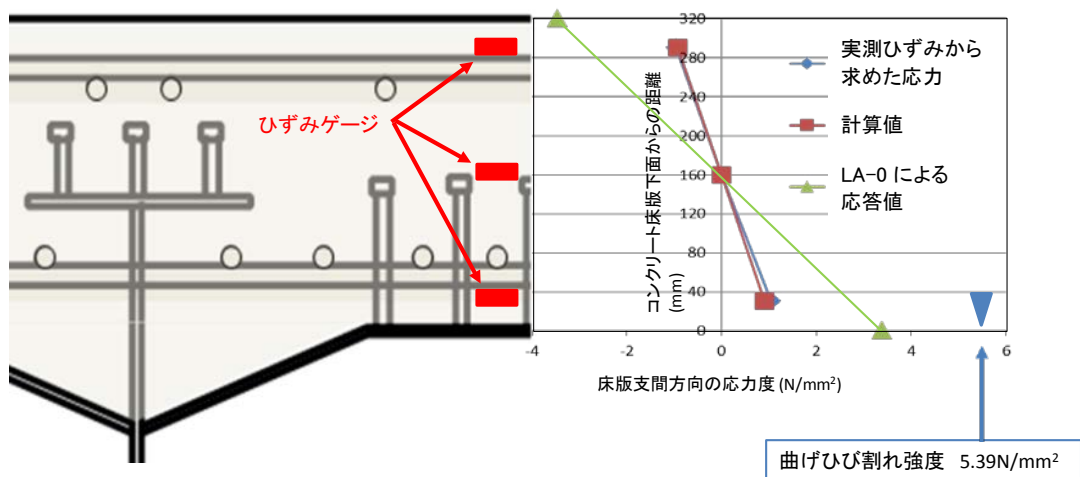


図-11 コンクリート床版支間方向に生じる応力度

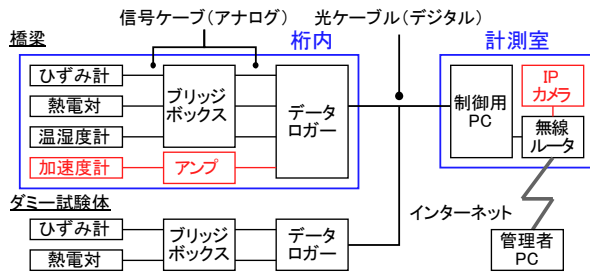


図-12 計測器・カメラ連動計測システム

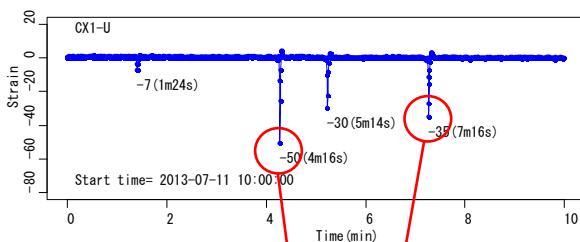


図-13 航空機の走行に対応したひずみ応答の一例

たひずみ変動が得られている。ここでは、試行として得られた成果の一例と今後の課題を述べる。図-14は橋軸方向に走行した航空機荷重の全重量と、主桁下側に貼付されたひずみゲージから得られたひずみ値との関係の一例である。ここでは航空機の重量を航空機メーカーが公

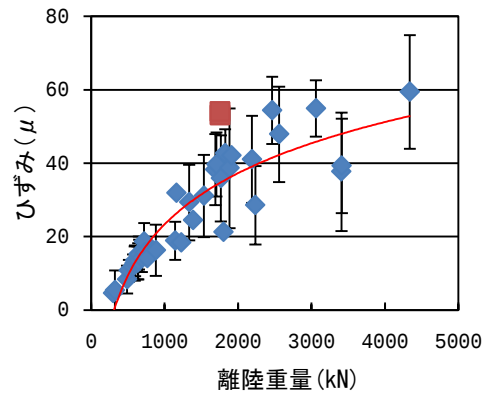


図-14 航空機走行時の離陸重量ひずみ関係の一例

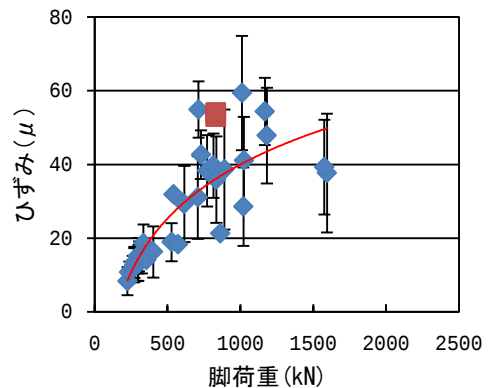


図-15 航空機走行時の脚荷重ひずみ関係の一例

表している離陸重量に統一した。ばらつきは大きいものの機材の重量と応答ひずみには一定の相関関係が認められる。これは、同型機材であっても離陸機と到着機、就航路線の距離によって重量が大きく異なることや、機材の脚配置や走行位置のばらつきによるものと考えられる。同様に脚荷重に着目し整理したものが図-15であるが、図-14同様一定の相関が認められる。このことは、離陸重量とひずみあるいは脚荷重とひずみの関係をモニタリングすることが、維持管理に資する可能性を有することを示唆しているものと考えられる。

(2) データの活用等による維持管理へ向けた課題

現在、得られるひずみデータと航空機走行との関連性を活用した維持管理手法の検討が進められている。データ活用の課題としては、図-14, 15に示す結果の整理手法が挙げられる。現状では、カメラにより記録される航空機走行映像から同時刻の走行機材を特定し、対応するひずみ応答の特定を人力で行っている。維持管理業務への展開を考えた場合、現在の手法には膨大なデータ処理への対応に向けた改善、改良が必要である。このため、システムの機能向上についての検討が現在行われている。また、桁等に設置した計測器にも耐用年数があることから、計測器の寿命対策が併せて検討されている。

6. まとめ

本論文では、成田国際空港の誘導路に採用された複合構造形式の橋梁について紹介した。

また、航空機を対象とした橋梁が、世界的にも稀であることから、設計段階から完成後に至るまで、実規模大の供試体を用いた押抜きせん断試験、実機載荷試験等様々な実験、検証が行われたことを述べた。

また、供用後の挙動を把握するために建設段階から計測器が設置され、モニタリングシステムの試作により航空機走行とひずみ応答が計測されていることから、そのシステムの概要と結果の一部を紹介し、さらに日常の維持管理業務へ展開するための課題について述べた。

押抜きせん断試験からは、本橋のコンクリート床版が十分な押抜きせん断耐力を有し、高い疲労耐久性能を有していることが確認された。また、押抜きせん断耐力の評価について、本橋のように厚い床版においても、従来の道路橋の評価手法によりせん断耐力の評価が可能であることが確認された。

実機載荷試験からは、主桁とコンクリート床版の明確な合成効果が確認されるとともに、道路橋の床版設計において用いられている設計モーメント算出手法が航空機を対象とした床版においても準用できることが確認された。また、床版の全断面を有効とした検討からは、LA-0が載荷した場合でも曲げひび割れが生じないことが確認され、本橋の安全性を担保する貴重な知見が得られた。

最後に、航空機走行に対応したひずみの常時計測からは、試作されたモニタリングシステムから得られた航空機走行とひずみの関係に一定の相関関係があることが認められ、維持管理業務への展開の可能性が示唆された。

7. 終わりに

成田国際空港株式会社では、今後もデータの解析、データを活用した維持管理手法の検討及び、維持管理システムの開発等に積極的に取り組み、合成構造である本構造の維持管理業務の高度化と効率化を目指すこととしている。

謝辞：これまでの一連の研究にあたり、当時、九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻 堀 陽介氏（現 大成建設㈱）ならびに清水建設㈱技術研究所 稲田 裕氏に多大のご協力を戴いた。末尾ながらここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 郭 勝華他：大型航空機荷重に対応した鋼・コンクリート合成床版橋の誘導路への適用，土木学会第 63 回年次学術講演会，V-570，2008.
- 2) 一般財団法人港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木施設設計要領及び設計例，平成 20 年 7 月.
- 3) 金子雅廣他：大型航空機を対象とした合成床版の押抜きせん断耐力，土木学会第 67 回年次学術講演会，I-600，2012.
- 4) Masahiro Kaneko, et al.: Development of Steel-Concrete Composite Deck Bridge of Taxiway for hypothetical aircraft load, IABSE-IASS Symposium, CD-ROM, 2011.
- 5) 金子雅廣他：大型航空機を対象とした誘導路橋梁コンクリート床版の使用性能の評価，土木学会第 68 回年次学術講演会，I-297，2013.
- 6) 堀 陽介他：大型航空機に対応した合成床版橋の実機載荷試験および解析的検討，土木学会第 68 回年次学術講演会，I-296，2013.
- 7) 稲田 裕他：誘導路合成床版橋の施工／供用一貫モニタリングシステムの構築，土木学会第 68 回年次学術講演会，I-298，2013.
- 8) 稲田 裕他：誘導路橋梁モニタリングの供用下の運用とシステム更新，土木学会第 69 回年次学術講演会，VI-461，2014.
- 9) 堀 陽介他：大型航空機荷重に対応した合成床版橋のひずみモニタリング，土木学会第 69 回年次学術講演会，VI-462，2014.
- 10) 前田幸雄他：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文集，第 348 号／V-1，1984.
- 11) 公益社団法人土木学会，鋼構造委員会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004 年 11 月.
- 12) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説（平成 24 年 3 月），2012 年 11 月.
- 13) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書（設計編 2012 年制定），2012 年.

BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE DECK BRIDGE FOR HYPOTHETICAL AIRCRAFT AND REGULAR MEASUREMENT OF THE BRIDGE USING MONITORING SYSTEM

Masahiro KANEKO, Hiroshi SHIRAI, Kohei SAGISAKA,
Kohei YAMAGUCHI and Shinichi HINO

A part of newly constructed taxiway in Narita international airport, steel-concrete composite deck bridge is adopted where the taxiway strides over existing road. Taxiways those have bridge style are rare in the world and the design method for the taxiway bridge is not clearly established at this moment. Thus, in addition to well-used design method of road bridge, FEM analysis and punching shear experiments with full scale specimens were carried out to verify the safety of the bridge and concrete slab. After completion of the construction work, loading tests by real aircraft were also executed to verify the distributions of stresses in the slab and safety of the bridge. Gauges and thermocouples were installed in concrete slab and on the girders at construction stage. Up to the present, continuous measurement is ongoing using the gauges and monitoring systems and the behavior by aircraft taxiing were measured. This paper introduces the taxiway bridge as one example of composite structures and describes some knowledges from the experiments and studies.