

13. 大型航空機荷重を対象とした合成床版の押し抜きせん断耐力

山中 翔太

1. 目的

空港拡張工事の問題点としては、施工時に空港土木施設や周辺の道路を長期間閉鎖し、既存の施設を大きく改修しなければならない。また誘導路や滑走路の路面高の変更が厳しいなどの制約条件が挙げられる。そこで既設構造物（幹線道路）や既設滑走路に影響を与えない拡張方法が必要となる。さらに、LA-0 荷重という大きな輪荷重が走行する環境下での疲労耐久性の確保が必要であることから、その橋梁形式として低い桁高を実現でき、かつ最もクリティカルな部位となる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橋を採用した。今回の床版の設計においては、輪荷重は1輪あたり 390kN（以下、設計荷重）を対象とし、道路橋における設計荷重の約4倍となっており、床版厚は320mmと通常の道路橋の2倍程度となっている。疲労耐久性の確保にあたっては、自動車荷重として実績のある評価手法をそのまま適用しているが、床版厚320mmにLA-0荷重が作用した際には材料の非線形性の影響や予期せぬ応力集中が発生する可能性がある。そこで本研究では、疲労設計の前提となる押し抜きせん断耐力の確保、各部位の応力性状の整合性、アーチ型補強鋼板の効果について検討した。さらに、FEM解析により、本実験の妥当性の確認および実験ではみることができない供試体内部のひび割れなどの確認を行った。

2. 内容

2.1 試験概要

供試体概要を表-1に、供試体概略図を図-1に示す。case1(実橋梁タイプ)、case2(コンクリート圧縮強度、鉄筋量低減)およびcase3(RC床版タイプ)となっており、コンクリート圧縮強度、配筋、ハンチおよび底鋼板の有無をパラメータとした。使用したコンクリート、鉄筋の力学特性を表-2、表-3に示す。載荷装置は載荷能力2000kNの門型載荷装置を用い、下フランジをアンカーボルトで固定し、荷重載荷は油圧ジャッキを用い、LA-0荷重の接地面積(315×457mm)の載荷板を介して行った。また、多数の実験によって整合性が確認されている松井式で押し抜きせん断耐力を推定した。式(1)、(2)に松井式(1方向、2方向)を示す。

$$P = 2(b + 2d_d)(\tau_{s,max} \cdot x_m + \sigma_{t,max} \cdot C_m) \tag{1}$$

$$P = \tau_{s,max} \{2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m\} + \sigma_{t,max} \{2(4C_d + 2d_d + b)C_m + 2(a + 2d_m)C_d\} \tag{2}$$

a, b : 主鉄筋方向、配力鉄筋方向の載荷板辺長(cm), x_m, x_d : 主鉄筋、配力鉄筋に直角な断面の中立軸深さ(cm), d_m, d_d : 主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ(cm), C_m, C_d : 主鉄筋、配力鉄筋からのかぶり厚さ(cm), $\tau_{s,max}, \sigma_{t,max}$: コンクリートの最大せん断応力度, 最大引張応力度(kg/cm²)

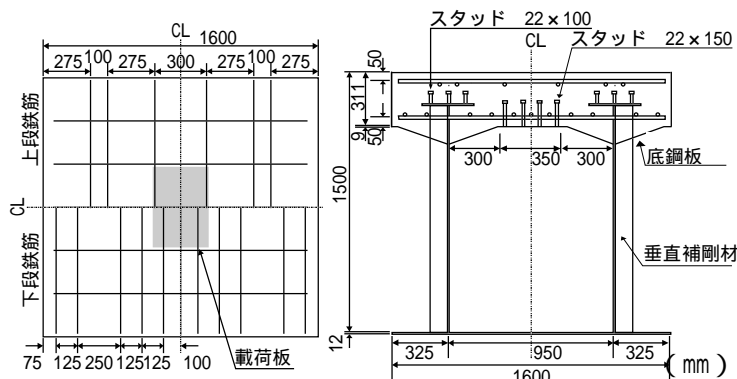


図-1 供試体概略図 (case1)

表-1 供試体概要

種類	設計基準強度 (N/mm ²)	主鉄筋	配力鉄筋	ハンチ	底鋼板 (mm)
case1	36.0	D19@250	D19@125	1 : 3	9
case2	18.0	D13@250	D13@250		
case3	18.0			-	-

表-2 コンクリートの力学特性

種類	強度 (N/mm ²)				ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
	圧縮	引張	せん断	曲げ		
case1	28.7	2.85	7.81	3.74	28.3	0.19
case2	20.8	2.31	5.67	2.44	25.0	0.18
case3	18.5	1.98	4.88	2.98	26.3	0.20

表-3 鉄筋の力学特性

種類	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D13	126.7	384	613	200
D19	286.5	396	585	200

2.2 FEM 解析

解析プログラムは DIANA ver.9.4 を用いた。図-2 に解析モデルを示す。コンクリートは 8 節点ソリッド要素および 6 節点ソリッド要素，鉄筋は埋込み鉄筋要素，鋼材は 4 節点シェル要素を用いた。拘束条件は，下フランジを鉛直方向に拘束し，荷重条件は荷重板面積に等分布荷重とした。また，case1 および case2 の供試体において，底鋼板は本来型枠であり，特に，ハンチ部分にはスタッドがないため，解析上では付着を考慮しない付着-すべり関係をインターフェース要素に入力した(図-3)。節点数は 3012~3674，要素数は 2596~3791 である。また，図-4

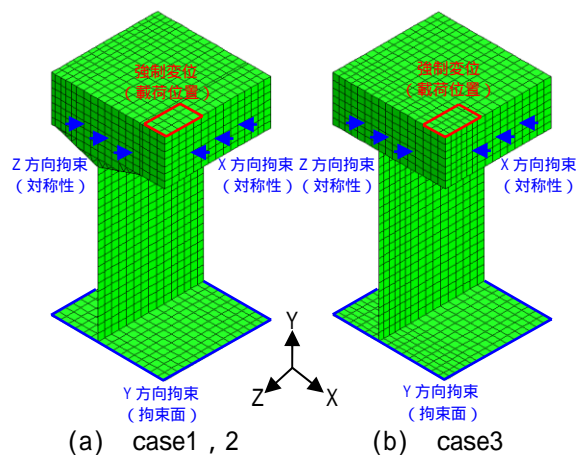


図-2 解析モデル (1/4 モデル)

に鉄筋および鋼材の材料構成則を示す。降伏強度(400N/mm²)到達後応力一定となるバイリニアモデルとし，Von Mises の降伏条件を用いた。図-5 にコンクリートの材料構成則を示す。圧縮域は材料試験の結果を用い，引張域は引張強度までは線形で増加するものとし，引張軟化域は切り欠きはりの3点曲げ試験結果を用いた逆解析結果より求めた引張軟化特性を用いて算出した。

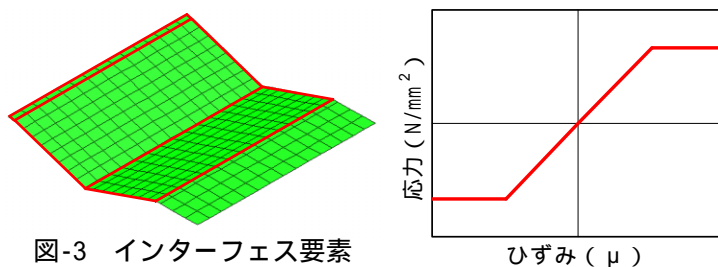


図-3 インターフェース要素

入力位置 (底鋼板) 図-4 材料構成則 (鉄筋，鋼材)

2.3 結果および考察

松井式の計算値を底鋼板の有無，ハンチ部の有無を考慮し，3パターンとしている。また，結果に示すひずみは全て床版方向である。

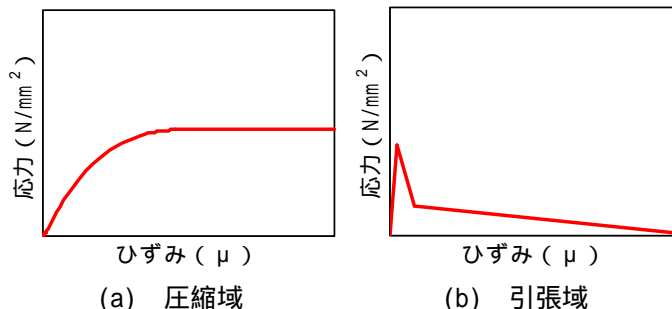


図-5 材料構成則 (コンクリート)

表-4 に供試体の最大耐力を示す。case1 は荷重装置の荷重能力 2000kN に達しても供試体が破壊に至らなかったため，実験値はないものとする。同表より，case3 において実験値 602kN，解析値 589kN，松井式 (1 方向) 565kN といずれも概ね一致していることがわかる。case2 において実験値 1131kN，解析値 861kN，松井式 (1 方向，底鋼板無・ハンチ 50) 811kN と実験値が十分安全側に評価できていることがわかる。case1 において実験値はないが，2000kN に達しても破壊を呈さなかったため，航空機的设计荷重の5倍以上と十分安全側に評価できていることが確認できた。しかし，case1 および case2 において，底鋼板の構造物としての効果が不明であるため，終局時付近の平面保持の確認を行うとともに，全ケースでこれらの評価の妥当性の確認を行った。

表-4 最大耐力

種類	実験値 (kN)	解析値 (kN)	松井式計算値 (kN)					
			底鋼板無 ハンチ無		底鋼板無 ハンチ50		底鋼板有 ハンチ50	
			1方向	2方向	1方向	2方向	1方向	2方向
case1	-	1046	936	1435	1174	2034	2412	4379
case2	1131	861	616	861	811	1347	1993	3559
case3	602	589	565	792	-	-	-	-

図-6 に各ひずみ測定箇所の断面図 (床版直角方向にも中央) を図-7 にひずみ分布 (コンクリート下面のひび割れ前後，case1) を示す。同図よりコンクリート下面のひび割れ発生前までは，応力分布が線形であり底鋼板は合成床版として機能している。しかし，ひび割れ発生後は底鋼板の発生ひずみが下段主鉄筋と比較し，

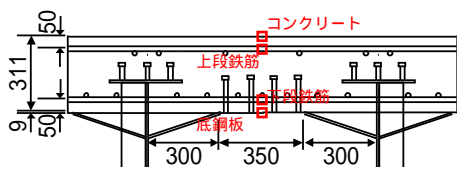
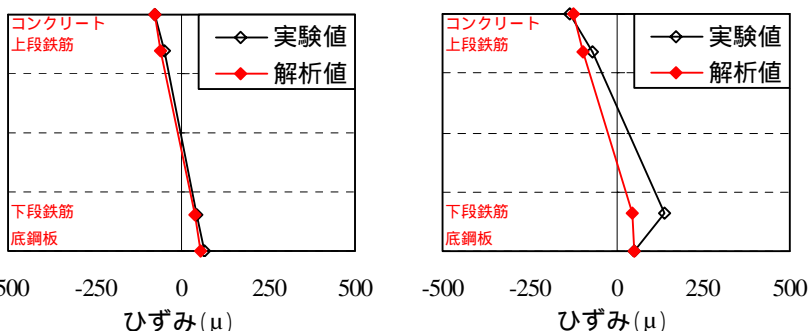


図-6 ひずみ測定箇所



(a) ひび割れ前 (400kN) (b) ひび割れ後 (800kN)
図-7 ひずみ分布 (case1)

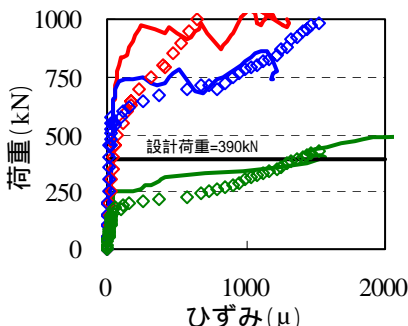
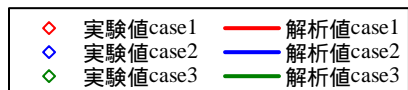


図-8 荷重-ひずみ関係
(下段主鉄筋中央部)

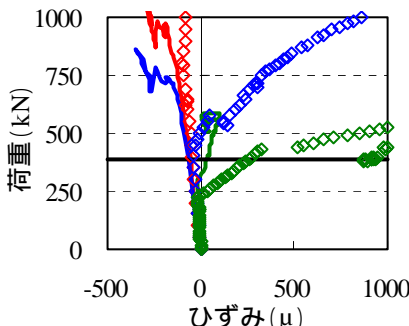


図-9 荷重-ひずみ関係
(上段主鉄筋中央部)

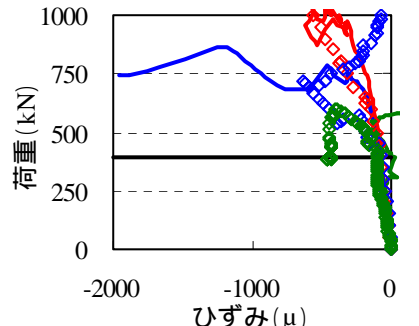


図-10 荷重-ひずみ関係
(コンクリート上面中央部)

極端に小さくなっていることが確認できる．したがって，底鋼板は，終局時には合成床版における構造物としてほぼ機能していないと考えられ，松井式の耐力評価において考慮しないことが妥当だと考えられる．

図-8 図-9 および図-10 に下段主鉄筋中央部，上段主鉄筋中央部およびコンクリート上面中央部の荷重-ひずみ関係を示す．なお，同図の黒線は航空機的设计荷重である．同図より，いずれのケースも実験値と解析値で線形領域付近，特に初期合成は非常に一致していることが確認できる．さらに図-8 より，各ケースのひずみの伸び始める荷重はそれぞれ 600 450 および 190kN となっている（以下，ひび割れ荷重）．

各ケースのひび割れ荷重を実験値と解析値と比較すると，RC 床版タイプの case3 は概ね一致しているが，実橋梁と同様の合成床版の case1, case2 は解析値がわずかに大きくなっている．これは，底鋼板とコンクリート間の付着関係が影響していると考えられる．また case1 の設計荷重時においては，下段，上段主鉄筋およびコンクリート上面にはひずみがほぼ発生しておらず，航空機荷重を支える誘導路橋として十分な安全性を有していることが確認できた．しかし，case1 および case2 の解析における非線形後の挙動は，最大耐力の把握などのため，今後更なる検討が必要であると考えられる．

図-11 に解析終了時および実験終了時のひび割れ分布を示す．なお，中央部，端部の位置は床版直角方向の中央部と端部である．case1 において同図 (c) より，2000kN に達しても供試体に著しいひび割れは発生しておらず，特に設計荷重時には，目視によるひび割れは発生していなかった．一方，同図 (b) より，1000kN 時には，ハンチ部付近からコンクリート上面に向かってひび割れが発生している．このひび割れ状況の違い

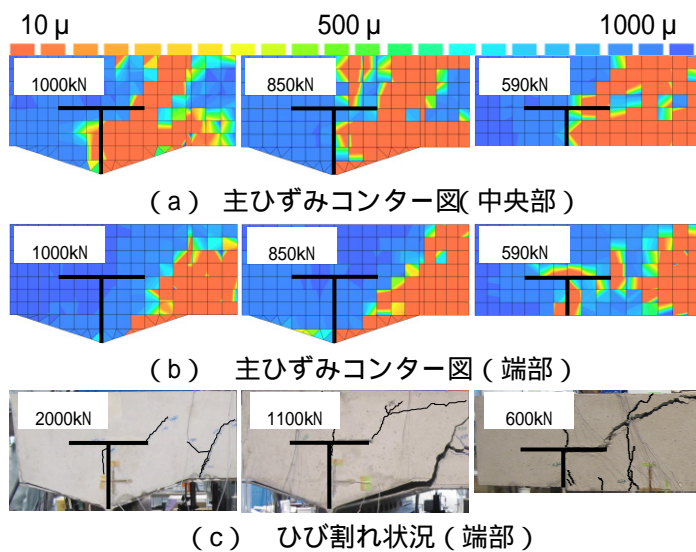


図-11 ひび割れ分布

が実験と解析における発生応力や変形性状の違いだと考えられる。また、同図 (a) より、実験では確認できないコンクリート床版中央部側面のひび割れ状況を見ると、いずれのケースにおいても端部のひび割れ状況よりも顕著であった。また同図 (c) と同様に、載荷板から約 45 度の角度で斜めひび割れが発生し、その後上フランジに到達している。これは、松井式で想定している破壊面角度と一致していることを確認できた。

2.4 case1' モデル

上述した通り、ハンチ部および底鋼板のない RC 床版タイプの case3 の解析値は実験値と比較し、主鉄筋・コンクリート上面の荷重-ひずみ関係の挙動、最大耐力およびひび割れ状況は概ね再現できていることが確認できた。そこで、実橋梁である case1 に関して、ハンチ部、底鋼板を取り除いたモデル (以下、case1') で解析を実施し、松井式への適用性および case1 の安全性の確認を行った。なお、解析モデルは図 - 2 (b) と、材料構成則は case1 と同様である。

図-12 に下段主鉄筋中央部、上段主鉄筋中央部およびコンクリート上面中央部の荷重-ひずみ関係を示す。同図 (a) より case1' は、400kN 付近でコンクリート下面中央部にひび割れが発生したことで傾きが変化し、その後ひずみが急激に伸びている。しかし case1 は、ひび割れ発生後も下段主鉄筋のひずみが急激に伸びることなく荷重が増加している。また、同図より、case1 の実験値および解析値は、case1' よりも剛性が大きく、発生ひずみは case1' より小さく、十分に安全側となっている。これらは、ハンチ部および底鋼板の効果であると考えられる。さらに case1' の最大耐力は、解析値 1005kN、松井式 936kN (表-4) と概ね評価できていることがわかる。したがって、本実験のような床版厚

(320mm) の合成床版においても、評価可能な許容範囲が最大 200mm 程度までの松井式で十分評価可能であることを確認でき、実橋梁 case1 の安全性も確認することができた。

3. 結論

本研究では、対象としている合成床版橋において、押し抜きせん断耐力の確保、各部位の応力の発生状況、アーチ型補強鋼板の効果を確認することを目的とし、実物スケールで載荷試験を行った。また、FEM 解析により実験の妥当性を確認した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- ・ 対象とした合成床版橋は航空機荷重を支える誘導路橋として十分な構造であることが確認できた。
- ・ 本実験において、本来型枠である底鋼板の効果は、航空機の設計荷重時付近までは構造物として合成挙動し、脆性的な破壊に非常に有効であったが、終局時には荷重をほぼ負担しておらず、耐力評価への影響は無いことが確認できた。
- ・ 本実験のような床版厚の合成床版においても、FEM 解析で線形領域付近までは概ね再現可能であり、特にハンチ部および底鋼板がない case3 (RC 床版) の場合は、終局時までの挙動および最大耐力も概ね一致した。また、松井式で十分評価可能であることを確認できた。

今後、ハンチ部および底鋼板がある場合の合成床版 (case1 および case2 のようなタイプ) において耐力評価などを把握するため、FEM 解析での更なる検討が必要である。また、実航空機による載荷試験のため、実橋梁における FEM 解析を実施する必要がある。

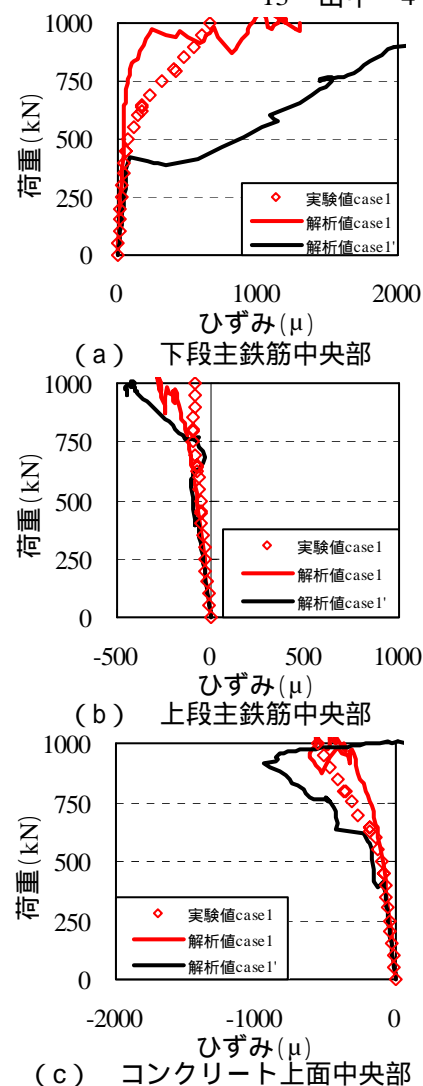


図-12 荷重-ひずみ関係