

論文 UFC埋設型枠を用いたRCはりの耐荷力および破壊状況

阿部忠*¹・木田哲量*²・反田泰人*³・片桐誠*⁴

要旨：本研究は、RC 部材における型枠施工の合理化・省力化を目的として製作した超高強度繊維補強コンクリート（UFC）埋設型枠と RC はりとを合成させた供試体を用いて、静荷重実験、走行荷重実験を行い、その終局耐荷力、破壊メカニズムから UFC 埋設型枠の実用性を検証したものである。その結果、UFC 埋設型枠の付着面をディンプル形状としたことから RC はりとの付着性が良く、終局時までは UFC 埋設型枠のはく離は見られない。また、UFC 埋設型枠に配合された鋼繊維の架橋効果により、曲げ耐荷力が向上し、変形量の増加も抑制された。したがって、走行荷重が作用する道路橋にも使用可能である。

キーワード：UFC 埋設型枠，静荷重実験，走行荷重実験，耐荷力

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（Ultra-high-strength Fiber Reinforced Concrete：以下，UFC）の1つである反応性粉体コンクリート（Reactive Powder Concrete）は、反応性微粉末を使用した無機系複合材料の技術を応用し、鋼繊維補強によりじん性を高めたセメント系材料である¹⁾。この材料は、極めて緻密な硬化体構造を持つため、高強度を有するだけでなく、中性化、塩分浸透、凍結融解および磨耗などに対する耐久性にも優れている^{1)~4)}。このような反応性粉体コンクリートの長を活かした用途の一つとして、UFC 埋設型枠が提案されている⁵⁾。UFC 埋設型枠は、超耐久性、かつ薄肉の埋設型枠であり、付着面をディンプル形状とすることにより、RC はりの引張縁コンクリートとの付着力を高めている⁶⁾。UFC 埋設型枠に関する既往の研究⁵⁾では、ブロック化（300×300mm，板厚 15mm）した埋設型枠を RC はり部材の底面に付着させた場合の一体性に関する研究であり、200 万回の疲労実験においても RC はりと埋設型枠とはく離はみられず、実用性が評価されている。

そこで本研究では、UFC 埋設型枠と RC はり部材の底面全体に埋設した合成構造についての実験研究である。供試体は RC はりの底面かぶり内に UFC 埋設型枠を用いて製作した RC はり供試体を用いて、静荷重実験と走行荷重実験を行い、最大耐荷力、破壊メカニズムおよび UFC 埋設型枠と RC はりとの合成効果を検証し、UFC 埋設型枠の実用性を評価した。

2. 供試体の使用材料および寸法

2.1 UFC埋設型枠の使用材料

UFC 埋設型枠の使用材料は、水（W）、ポリカルボン酸系の高性能減水剤（SP）、プレミックス材料（DP，密度 2.85g/cm³）および繊維とした。繊維は、直径 0.2mm，長さ 15mm の鋼繊維（FM，密度 7.85g/cm³）を体積比で 2.0 % 使用した。プレミックス材料は、セメント、シリカフューム、珪石粉末などが最密充填されるように配合されており、骨材としては粗骨材は用いず最大粒径 2mm の珪砂が混合されている。混和剤使用量は、目標フロー値を 240mm として決定した。ここで、UFC 埋設型枠に用いた鋼繊維で補強した

*1 日本大学 生産工学部土木工学科 教授 博士(工) (正会員)

*2 日本大学 生産工学部土木工学科 教授 工博 (正会員)

*3 日本大学大学院

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所ダクトル技術開発チーム 博士(工) (正会員)

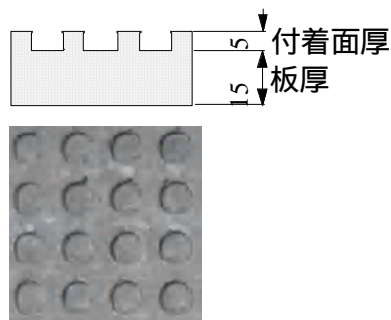


図 - 1 付着面形状および寸法

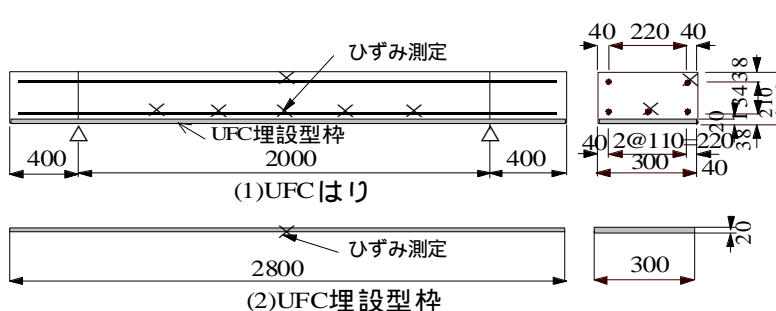


図 - 2 UFC埋設型枠RCはりの寸法および鉄筋の配置

UFC の特性値は，圧縮強度が 210.4N/mm^2 ，弾性係数が 55.0kN/mm^2 ，曲げ強度が 34.9N/mm^2 である。

2.2 RCはりの使用材料

RC はりのコンクリートには，普通ポルトランドセメントと最大寸法 20mm の粗骨材を使用し，鉄筋には SD295A，D16 を使用した。コンクリートの圧縮強度は 38N/mm^2 であり，鉄筋の材料特性値は降伏強度が 370N/mm^2 で，引張強度は 570N/mm^2 ，弾性係数が 200kN/mm^2 である。

2.3 UFC埋設型枠の寸法

UFC 埋設型枠と RC はりとの付着性を高めるための型枠の付着面の処理方法は種々検討されている^{たとえば5), 6)}。一般に，埋設型枠には付着面の形状により，P タイプと K タイプに分類されている。P タイプは凸型付き型枠材を用いて付着面に凹部（ディンプル）を一様に設けたものであり，K タイプは付着面に粗骨材（粒度：1310，散布量： 7kg/m^2 ）を一様に配したものである。なお，両タイプともに耐荷力の増減および付着力低下によるはく離に関しては，同等な結果が報告されている⁵⁾。そこで本供試体には，P タイプを用いるものとし，その断面形状および付着面形状を図 - 1 に示す。

UFC 埋設型枠供試体に用いた P タイプの付着面は，直径 9mm，付着面厚 5mm とし，ディンプルの占める面積率は 40 % である。UFC 埋設型枠の養生（成形後）は，前置き時間を 48 時間とし，脱型後蒸気養生は最高温度 90 を 24 時間保持して行った。なお，P タイプのコンクリートとの打継ぎ面のせん断強度は，母材コン

クリートと同程度の値を示されていることから十分な付着が得られることが確認されている⁵⁾。よって，本供試体の UFC 埋設型枠の寸法は幅 300mm，長さ 2800mm，板厚 15mm とする。UFC 埋設型枠供試体の寸法を図 - 2 に示す。

2.4 UFC埋設型枠RCはり供試体

本供試体は道路橋 RC 床版の施工の合理化を目的としたことから，道路橋示方書・同解説⁷⁾（以下，現行示方書）に基づいて，RC 床版の設計支間と大型車両の 1 日 1 方向あたりの計画交通量が 500 台未満であるとして厚さを決定した。また，現行示方書によると，道路橋 RC 床版はせん断補強筋を用いない構造となっている。したがって，本供試体にはせん断補強筋を配置しないものとする。よって，供試体の寸法は支間長 2000mm，幅 300mm，はり高さ 210mm（RC はり：190mm，UFC 埋設型枠：20mm）とし，鉄筋は引張側に D16 を 3 本，圧縮側に D16 を 2 本配置し，有効高さを 172mm とした。

UFC 埋設型枠 RC はり供試体の作製は，型枠底部に UFC 埋設型枠を設置した後，UFC 埋設型枠の底面から純かぶり 30mm とし，引張鉄筋を配置した。そして，コンクリートを打設して UFC 埋設型枠と一体構造とした。この供試体名称を UFC 埋設型枠 RC はりと称し，鉄筋の配置および寸法を図 - 2 に示す。

3．実験方法

3.1 実験概要

RC はりの底面に UFC 埋設型枠を合成した供試体を用いて静荷重実験および走行荷重実験を

行い、それぞれの実験耐荷力および破壊状況から UFC 埋設型枠の実用性について検証する。次に、道路橋 RC 床版をモデルとしたことから大型自動車を想定した走行荷重実験を行う。走行荷重実験は輪荷重の作用によって、耐荷力の低下率が最も大きいと報告⁸⁾されている支間中央から走行させる実験である。実験装置および実験状況を写真 - 1 に示す。

3.2 実験方法

静荷重および走行荷重実験に関する実験方法を図 - 3 に示す。

(1) 静荷重実験

静荷重実験は図 - 3 (1) に示すように、最大曲げ応力が生じる支間中央に車輪を停止した状態の実験である。載荷方法は荷重制御により 5.0kN ずつ供試体が破壊するまで荷重を増加させる。静荷重実験における UFC 埋設型枠 RC はりの供試体名称を UFC-S とする。

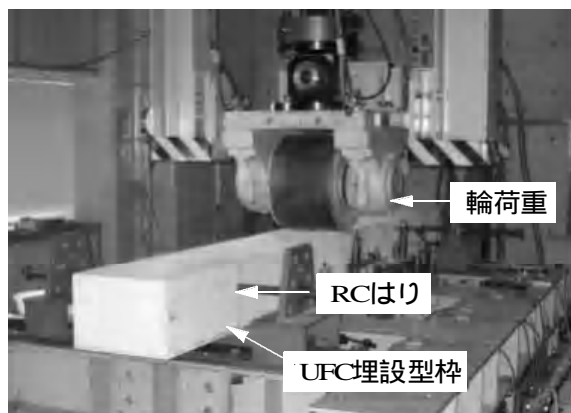
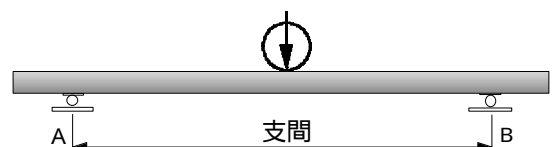


写真 - 1 実験装置および実験状況



(1) 静荷重実験



(2) 走行荷重実験

図 - 3 実験方法

(2) 走行荷重実験

走行荷重実験は図 - 3 (2) に示すように、荷重が供試体上を連続的に支間中央から左右支点方向へ往復走行した後に、支間中央で車輪（幅 250mm）を停止させた状態の実験である。輪荷重の走行方法は、支間中央から左右の支点方向に走行させ、元の支間中央で停止させる。走行速度は、1 往復 4.0m を 22cm/sec で走行させる。荷重は 1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加させる段階荷重載荷とする。そして、供試体が破壊するまで荷重の増加と走行を繰り返す。走行荷重実験における UFC 埋設型枠 RC はりの供試体名称を UFC-R とする。

4. 実験耐荷力

静荷重実験および走行実験における最大耐荷力を表 - 1 に示す。なお、本実験における走行荷重実験の最大荷重とは、一往復走行を維持した最大荷重とする。

UFC 埋設型枠 RC はりの静荷重実験における最大耐荷力は、供試体 UFC-S-1, 2 で、それぞれ 102.3kN, 107.5kN である。また走行荷重が作用した場合の最大耐荷力は供試体 UFC-R-1, 2 で、それぞれ 102.1kN, 105.3kN である。静荷重実験の平均耐荷力は 104.9kN, 走行荷重実験の場合は 103.7kN であり、ほぼ同程度の結果となった。筆者らは、通常の型枠を用いて製作した RC はり供試体を用いて静荷重実験および走行荷重実験を行い、走行荷重が静的耐荷力に及ぼす影響について実験研究を行っている。これによると、一定荷重での走行実験の場合、静的耐荷力に比して走行荷重の場合が 15 % 程度曲

表 - 1 実験耐荷力

供試体	実験耐荷力 (kN)	平均耐荷力 (kN)	耐荷力比	破壊モード
UFC-S-1	102.3	104.9	—	曲げ破壊
UFC-S-2	107.5			曲げ破壊
UFC-R-1	102.1	103.7	0.99	せん断破壊
UFC-R-2	105.3			曲げ破壊

UFC: UFC埋設型枠使用RCはり、S: 静荷重実験、R: 走行荷重実験

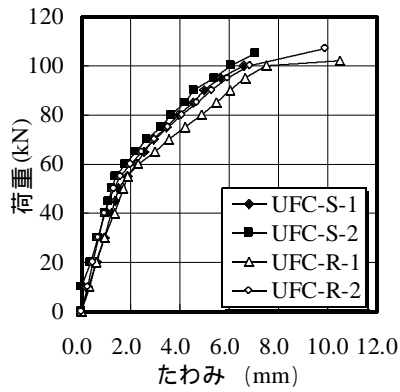


図 - 4 荷重とたわみの関係

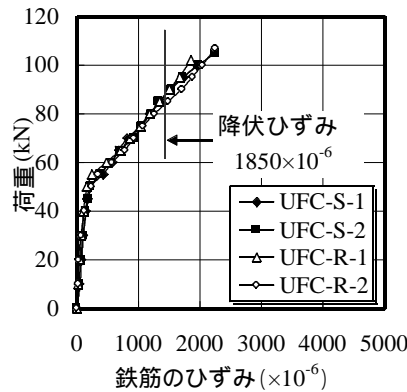


図 - 5 主鉄筋の荷重とひずみの関係

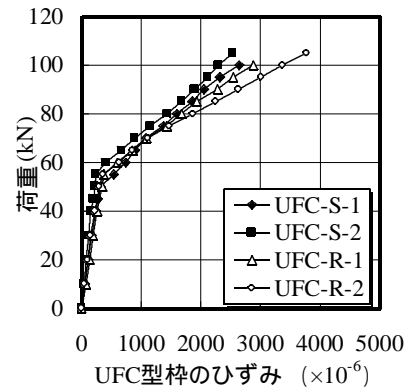


図 - 6 UFC埋設型枠の荷重とひずみの関係

げ耐荷力が低下する結果を報告している⁸⁾。しかし、UFC 埋設型枠 RC はりの場合は、静荷重実験の場合の最大耐荷力と走行荷重実験の場合の最大耐荷力がほぼ同程度であり、耐荷力の低下はみられない。これは、UFC 埋設型枠に無数配合された鋼繊維の曲げ引張抵抗、すなわち架橋効果によるものと、付着面をディンプル形状にしたことにより RC はりとの付着力が高まり、合成効果が得られたためである。

5. 荷重とたわみの関係

静荷重実験および走行荷重実験の場合の支間中央の荷重とたわみの関係を図 - 4 に示す。

5.1 静荷重実験における荷重とたわみの関係

UFC 埋設型枠 RC はりの静荷重実験における荷重とたわみの関係は、供試体 UFC-S-1, 2 とともに荷重 55kN までは約 1.59mm 程度であり、その後やや変形量が大きくなったものの、最大荷重時までほぼ線形的にたわみが増加している。終局時のたわみは、供試体 UFC-S-1 の場合に荷重 102.3kN で 6.6mm、UFC-S-2 の場合は荷重 107.5kN で 7.07mm である。

5.2 走行荷重実験における荷重とたわみの関係

UFC 埋設型枠 RC はりの走行荷重実験における荷重とたわみの関係は、供試体 UFC-R-1, 2 のいずれも荷重 55kN まで線形的に増加し、その後たわみの増加がやや大きくなるものの荷重 100kN までは線形的に増加し、その後の荷重増

加で、やや増加が大きくなった。終局時のたわみは、供試体 UFC-R-1 は最大荷重 102.1kN で 9.90mm である。また、供試体 UFC-R-2 の場合に最大荷重 105.3kN でたわみは 10.5mm である。静荷重実験の場合の最大荷重付近のたわみと比較すると、走行荷重実験の場合が約 1.15 倍上回っている。しかし、最大荷重付近のたわみまでは急激な増加がみられない。

6. 荷重とひずみの関係

静荷重実験および走行荷重実験におけるスパン中央の引張主鉄筋の荷重とひずみの関係を図 - 5 に示す。また、UFC 埋設型枠の荷重とひずみの関係を図 - 6 に示す。

6.1 鉄筋のひずみ

静荷重実験における引張鉄筋の荷重とひずみの関係は、供試体 UFC-S-1, 2 とともに荷重 50kN までは線形的に増加し、その時のひずみは約 218×10^{-6} 程度である。その後の荷重増加でも、ひずみはやや増加するものの、荷重 60kN から終局時までほぼ線形的に増加している。終局時には供試体 UFC-S-1 の場合に荷重 102.3kN で 1970×10^{-6} 、供試体 UFC-S-2 の場合に荷重 107.5kN で 2250×10^{-6} である。

走行荷重実験における引張鉄筋のひずみは荷重 50kN までは線形的に増加し、その時点のたわみは 230×10^{-6} である。その後の荷重増加に対するひずみの増加はやや大きくなるものの最大

荷重付近まで線形的に増加し、終局時のひずみは供試体 UFC-R-1 の場合に荷重 102.1kN で 1850×10^{-6} 、供試体 UFC-R-2 の場合に荷重 105.3kN で 2250×10^{-6} であり、ひずみの増加傾向は静荷重実験の場合と同様となった。

以上の結果より、鉄筋の荷重とひずみの関係に見られるように、UFC 埋設型枠も引張力を分担し、鉄筋ひずみの増加が抑制されている。よって、UFC 埋設型枠は走行荷重の影響を受ける道路橋 RC 部材の型枠として有用であると考えられる。

6.2 UFC埋設型枠のひずみ

静荷重実験における UFC 埋設型枠のひずみは各供試体ともに荷重 55kN までは線形的に増加している。静荷重実験によるひずみは供試体 UFC-S-1, 2 の場合に荷重 55kN で、それぞれ 320×10^{-6} 、 230×10^{-6} である。その後の荷重増加においては線形的にひずみが増加し、終局時のひずみは、供試体 UFC-S-1, 2 で、それぞれ 2500×10^{-6} 、 2600×10^{-6} である。

走行荷重実験の場合も静荷重実験と同様に、荷重 55kN 付近からひずみの増加が著しくなり、終局時のひずみは供試体 UFC-R-1, 2 で、それぞれ、 2800×10^{-6} 、 3700×10^{-6} である。

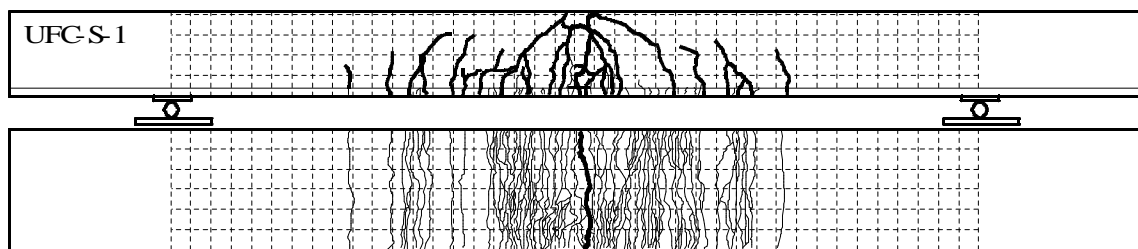
以上より、静荷重実験および走行荷重実験に

おいては、ひび割れ発生後の荷重に対する鉄筋のひずみと同様に UFC 材の引張ひずみの増加が大きくなっている。これは、RC はりと UFC 埋設型枠とが合成作用をなして、引張力を分担しているためであると考えられる。したがって、UFC 埋設型枠は RC はりとの合成効果により、全体としての耐荷力の向上を図ることが可能であると思われる。

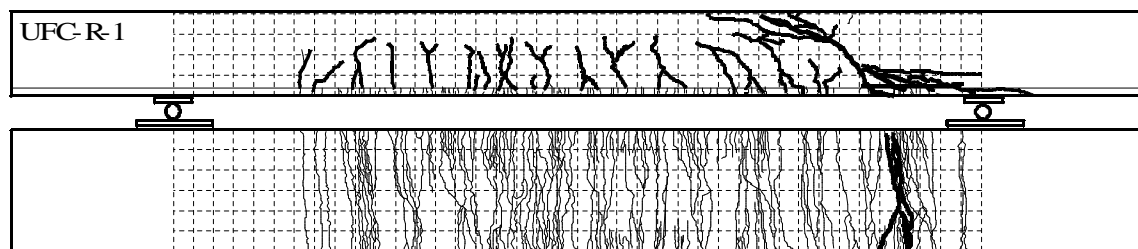
7. 破壊状況

本実験における静荷重実験および走行荷重実験の場合の破壊後のひび割れを図 - 7 に示す。

静荷重実験におけるひび割れ状況は図 - 7 に示すように、RC はりは荷重載荷位置から 30 度から 45 度の範囲に 7cm から 10cm 程度の間隔でひび割れが発生し、荷重増加に伴って上縁の輪荷重方向に進展している。また、UFC 埋設型枠の側面および底面には測定困難なヘアクラックが供試体下面に発生し、ひび割れ抑制効果が認められた。破壊は、支間中央で曲げ破壊となった。UFC 埋設型枠のヘアクラックは、無数に配合された鋼繊維の架橋効果により、曲げ領域に分散され、RC はりの部のひび割れが抑制されている。破壊位置の UFC 埋設型枠と RC はりとの離は支間方向に 100mm 程度である。



(1) 静荷重実験



(2) 走行荷重実験

図 - 7 破壊状況の一例

走行荷重実験の場合の、RC はり部には、ほぼ等間隔で曲げ領域にひび割れが発生している。荷重の増加と走行を繰り返すことにより圧縮鉄筋付近までひび割れが発生している。また、UFC 埋設型枠にも曲げ領域内にヘアクラックが発生し、荷重の分散効果がみられる。供試体 UFC-R-1 は、輪荷重が走行中に支点 B から 500mm、すなわちせん断スパン比 $a/d = 2.9$ (a : 支点から破壊荷重位置, d : 有効高) の位置でせん断破壊となった。UFC 埋設型枠のはく離はせん断破壊となった底面から支点までの 200mm の範囲にはく離がみられた。また、供試体 UFC-R-2 は荷重増加中に支間中央で曲げ破壊となり、UFC 埋設型枠と RC はり部のはく離はほとんどみられない。

以上より、静荷重実験および走行荷重実験においても、UFC 製埋設型枠は RC はりと合成構造として挙動することが確認された。また、UFC 埋設型枠に配合された鋼繊維の架橋効果により曲げ破壊、およびせん断破壊においてもひび割れが抑制されて応力が広範囲に伝達されている。

8. まとめ

本研究は、UFC 埋設型枠と RC はりとを合成構造とした供試体を用いて、静荷重実験と走行荷重実験を行った結果、以下の成果が得られた。

(1) 静荷重実験と走行荷重実験による最大耐荷力を比較するとほぼ同程度となった。したがって、UFC 埋設型枠を RC はりの底面に埋設いた構造は、走行荷重が作用する道路橋部材への適用も可能である。

(2) RC はり部の主鉄筋と UFC 埋設型枠の荷重とひずみの関係より、UFC 埋設型枠と RC はりの主鉄筋とは耐荷力を分担している。したがって、RC はり部との付着性が高まって合成効果が得られた。

(3) UFC 埋設型枠 RC はりは、静荷重実験の場合は荷重載荷位置で曲げ破壊となった。また、走行荷重の場合は、輪荷重が走行中に、中央での

曲げ破壊とせん断スパン比 $a/d = 2.9$ の位置でせん断破壊破壊となった。

(4) UFC 埋設型枠の付着面を、P タイプの凹型とした場合は、埋設型枠のひび割れおよび埋設型枠と内部コンクリート間のはく離はみられなかった。したがって、UFC 埋設型枠は合成構造として実用的にも評価できるものである。

参考文献

- 1) 土木学会、コンクリートライブラリー「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」, (2004)
- 2) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書「高強度セメント系材料を用いた高耐久性薄肉埋設型枠「ダクトアルフォーム」」, (2005)
- 3) 畑秀彦ほか：反応性粉体コンクリートの力学特性に関する実験研究、セメント・コンクリート論文集, No. 58, pp. 448-453(2004)
- 4) Tetsukazu KIDA, Kazuhiko MINAKUCHI, Tadashi ABE, Toshiaki SAWANO, and Makoto KATAGIRI : Experimental Study on Mechanical Properties of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Beam , THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS JAPAN, Vol. 55 , pp. 73-83(2006)
- 5) 牧隆輝ほか：UFC 埋設型枠を用いた RC はりの載荷実験、コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, pp. 289-294 (2005)
- 6) 土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書「FRP と高強度モルタルの複合部材による高耐久性埋設型枠材(H・Rフォーム)」, (1995)
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 , , (2003)
- 8) Tadashi ABE et al.: Effect of Running Load on Flexural Load-Carrying Capacity of Reinforced Concrete Beams and Dynamic Effects, TRANSACTIONS OF THE JAPAN CONCRETE INSTITUTE, Vol.22, pp. 345-352(2000)