

コンクリートの圧縮強度が道路橋RC床版の疲労耐久性に及ぼす影響

日大生産工(院) 大塚裕太 日大生産工 阿部 忠
日大生産工 木田哲量 淡江大学 李 鴻鈞

1. はじめに

道路橋示方書・同解説¹⁾(以下、現行示方書)は、性能規定型の基準を目指して改訂された。これは、道路橋床版に要求される性能を規定するために使用状況を想定して破壊に対する安全性に関わる性能を明確に示す設計手法である。一方、土木学会の鋼・合成構造標準示方書²⁾では、鋼橋RC床版に要求される性能を規定し、破壊に対する安全性を確保することを目的とした性能照査型設計法^{3,4)}の構築が進められている。その基本性能は、安全性、使用性、社会・環境適合性の3つの性能が定めており、安全性を具体的に確保するための性能として、耐荷力性能、疲労耐久性、材料耐久性が位置づけられている。また、鋼橋RC床版の耐荷力性能の照査項目の1つに面外せん断に対する照査が示されている。面外せん断に対しては、押抜きせん断耐荷力をもって照査されるが、押抜きせん断耐荷力は非常に多くの因子の影響を受けることから、正確な照査を行うことは困難である。

そこで本研究では、押抜きせん断耐荷力の影響因子の1つであるコンクリートの圧縮強度に着目し、圧縮強度の異なる2タイプの供試体を用いて、静荷重実験、走行荷重実験、定点疲労実験を行い、コンクリートの圧縮強度が道路橋RC床版の耐荷力性能および疲労耐久性に及ぼす影響を評価する。

2. 供試体概要

2.1 供試体材料

現行示方書の規定では、鋼橋RC床版におけるコンクリートの設計基準強度は $24\text{N/mm}^2 \sim 30\text{N/mm}^2$ が標準となっている。そこで、本供試体には、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、コンクリートの圧縮強度を 24N/mm^2 と 30N/mm^2 を目標に示方配合した。各供試体のコンクリートの圧縮強度をTable 1に示す。また、鉄筋にはSD295A, D10を用いた。鉄筋の材料特性値をTable 1に併記した。本供試体の記号は圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体をC21とし、 32N/mm^2 の供試体をC32とする。

2.2 供試体寸法

供試体の床版は、現行示方書の規定に基づいて、

Table 1 Characteristics of materials.

Specimen	Concrete compressive strength (N/mm ²)	Reinforcing bar (SD295 / D10)		
		Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (N/mm ²)
C21-S-1.2	21.0	370	511	200
C32-S-1.2	32.0	368	516	200
C21-R-1.2	21.0	370	511	200
C32-R-1.2	32.0	368	516	200
C21-F50	21.0	370	511	200
C30-F50	30.0	368	516	200

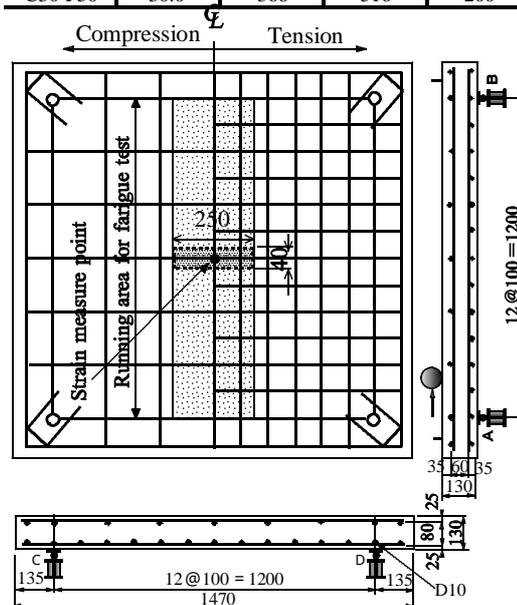


Fig. 1 Specimen size and reinforcement arrangement.

大型自動車の1日1方向の計画交通量を2000台以上を想定して厚さを決定し、その1/2モデルとした。よって、供試体は、全長 147cm 、支間長 120cm の等方性版とし、鉄筋は複鉄筋配置とした。鉄筋量は、引張側の軸直角方向および軸方向にD10を 10cm 間隔で配置し、圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置した。また、有効高さはそれぞれ 10.5cm 、 9.5cm とした。供試体は4辺単純支持とする正方形版とし、その寸法および鉄筋の配置をFig.1に示す。

3. 実験方法

3.1 静荷重実験

静荷重実験は、最大応力の生じる支間中央に輪荷

EFFECT OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE
ON FATIGUE DURABILITY OF RC SLAB FOR HIGHWAY BRIDGE

by Yuta OTSUKA

Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA and Lee, Hug-Chun

Table 2 Load-carrying capacity and failure mode.

Specimen	Maximum load (kN)	Average load (kN)	Load ratio		Failure modes
			C32/C21	R/S	
C21-S-1	180.3	182.7	-	-	Punching shear failure
C21S-2	185.1				Punching shear failure
C32-S-1	221.3	223.4	1.22	-	Punching shear failure
C32-S-2	225.4				Punching shear failure
C21-R-1	140.1	140.5	-	0.77	Punching shear failure
C21-R-2	140.8				Punching shear failure
C32-R-1	170.0	170.2	1.21	0.76	Punching shear failure
C32-R-2	170.4				Punching shear failure

重を載荷する実験である。荷重の大きさは、引張主鉄筋が降伏するまでは10kNずつ増加させ、鉄筋の降伏後は5kNずつ供試体が破壊するまで荷重を増加させる段階荷重とした。供試体名称はC21-S、C32-Sとする。

3.2 走行荷重実験

走行荷重実験は、輪荷重を供試体の支間中央に停止した状態で載荷させ、載荷位置から左右両支点方向に1往復走行させた後、元の支間中央に停止させる実験である。荷重の大きさは1走行ごとに引張鉄筋が降伏するまで10kNずつ増加させ、鉄筋降伏後は5kNずつ増加させる段階荷重とする。なお、走行速度は1往復2.4mを13secで走行する0.18m/sとする。供試体名称はC21-R、C32-Rとする。

3.3 定点疲労実験

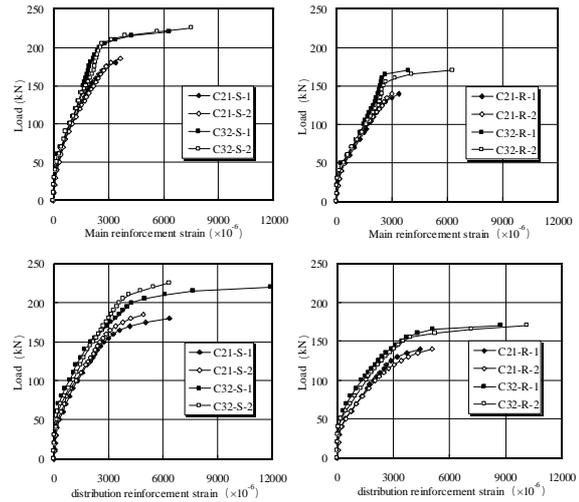
定点疲労実験は、静荷重実験と同様に床版中央に輪荷重を載荷させる実験である。荷重の大きさは、設計活荷重である100kNを基準荷重とし、基準荷重に対して±50%(上限荷重150kN、下限荷重50kN)とする。また、荷重振動数を周期5Hzの正弦波形による片振りとする。供試体名はC21-F50、C30-F50とする。

4. 静荷重実験・走行荷重実験における実験結果

4.1 実験耐荷力

静荷重実験および走行荷重実験における最大耐荷力および破壊モードをTable 2に示す。なお、走行荷重実験における最大耐荷力とは、往復走行を維持した最大荷重とする。

静荷重実験におけるコンクリートの圧縮強度が21N/mm²の供試体C21-Sの平均耐荷力は182.7kNであり、コンクリートの圧縮強度が32N/mm²の供試体C32-Sは223.4kNである。この供試体C21-S、C32-Sの耐荷力を比較すると、供試体C32-Sが供試体C21-Sの1.22倍となった。また、走行荷重実験においては、供試体C21-Rの平均耐荷力は140.5kNであり、供試体C32-Rは170.2kNである。走行荷重実験の場合の耐荷力を比較すると、供試体C32-Rが供試体C21-Rの1.21倍となった。したがって、RC床版の押抜きせん断耐荷力においては、コンクリートの圧



(1) Static load (2) Running load

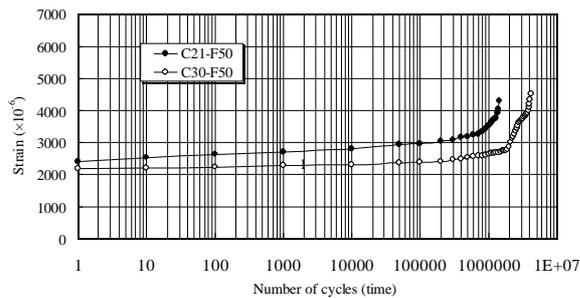
Fig. 2 Load and strain relation.

縮強度の影響が顕著となる結果となった。なお、筆者ら⁵⁾は現行示方書における1日1方向の大型車両の計画交通量が500台未満を想定したRC床版の耐荷力についても実験を行っている。このRC床版は実寸の1/2モデルであり、供試体寸法は、全長147cm、支間長120cm、床版厚11cmである。また、鉄筋量は軸直角方向にD10を10cm間隔、軸方向に12cm間隔とし、圧縮側はその1/2を配置した。有効高さは、軸直角方向が9cm、軸方向が8cmである。また、コンクリートの圧縮強度は30N/mm²、鉄筋の降伏強度、引張強度はそれぞれ365/mm²、510/mm²である。この床版厚が11cmの供試体の静荷重実験における押抜きせん断耐荷力の平均は180kNである。また、本実験の床版厚が13cmの供試体C21-Sの押抜きせん断耐荷力の平均が182.7kNである。よって、床版厚が2cm薄い供試体の押抜きせん断耐荷力とほぼ同程度である。

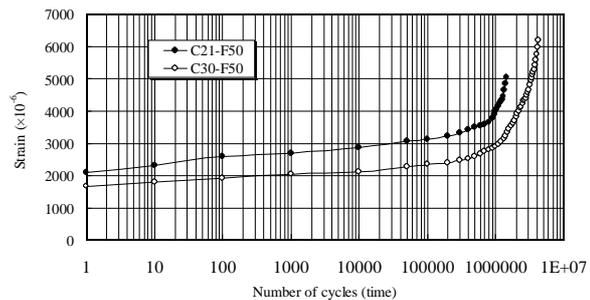
以上より、RC床版の押抜きせん断耐荷力に関しては、コンクリートの圧縮強度を高くすることで大幅に耐荷力が向上する結果となった。

次に、静荷重実験と走行荷重実験の場合の耐荷力を比較すると、コンクリートの圧縮強度が21N/mm²の供試体の場合には走行荷重が作用することによって23%耐荷力が低下している。また、コンクリートの圧縮強度が32N/mm²の供試体の場合には24%耐荷力が低下している。したがって、走行荷重が作用した場合の押抜きせん断耐荷力は静荷重が作用した場合に比して大幅に耐荷力が低下する結果となった。また、コンクリートの圧縮強度が21N/mm²の供試体と圧縮強度が32N/mm²の供試体の走行荷重による耐荷力の低下率はほぼ同程度である。

なお、破壊モードは全ての供試体で押抜きせん断破壊となった。



(1) Main reinforcement



(2) Distribution reinforcement

Fig. 3 Number of cycles and strain relation.

4.2 荷重とひずみの関係

RC床版中央に配置した主鉄筋および配力筋における荷重とひずみの関係をFig.2に示す。

(1) 静荷重実験

静荷重実験における軸直角方向、すなわち主鉄筋の荷重とひずみの関係は、コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体C21-Sの場合、荷重50kN付近からひずみが増加し始め、荷重140kN付近で主鉄筋が降伏し、その後は荷重の増加に伴い終局時までほぼ線形的に増加している。終局時のひずみは供試体C21-S-1, C21-S-2でそれぞれ 3300×10^6 , 3650×10^6 である。また、コンクリートの圧縮強度が 32N/mm^2 の供試体C32-Sの場合は、荷重150kN付近で主鉄筋が降伏し、その後は荷重205kN付近までは線形的に増加し、荷重205kN以降からひずみは急激に増加している。終局時のひずみは供試体C32-S-1, C32-S-2でそれぞれ 6300×10^6 , 7500×10^6 である。

次に、軸方向、すなわち配力筋の荷重とひずみの関係は、供試体C21-Sの場合、荷重125kN付近で配力筋が降伏し、その後はひずみの増加が大きくなり、終局時のひずみは供試体C21-S-1, C21-S-2でそれぞれ 6330×10^6 , 4920×10^6 である。また、供試体C32-Sの場合は荷重140kN付近で配力筋が降伏し、その後は荷重200kN付近まで線形的に増加し、荷重200kN以降からひずみの増加が著しくなっている。終局時のひずみは供試体C32-S-1, C32-S-2でそれぞれ 11800×10^6 , 6330×10^6 である。

供試体C21-SとC32-Sの鉄筋ひずみを比較すると、主鉄筋・配力筋ともに各荷重において供試体C32-Sのひずみが上回っている。また、主鉄筋と配力筋のひずみを比較すると、主鉄筋のひずみに比して配力筋のひずみは大きくなっている。これは、本供試体の支持条件を4辺単純支持としたことと、輪荷重の接地面が主鉄筋方向は250mm、配力筋方向が40mmであることから荷重分布幅の影響によるものであると考えられる。

(2) 走行荷重実験

走行荷重実験における主鉄筋の荷重とひずみの関

係は、供試体C21-Rの場合、110kN付近で主鉄筋が降伏し、その後は荷重の増加に伴い終局時までほぼ線形的にひずみは増加している。終局時のひずみは供試体C21-R-1, C21-R-2でそれぞれ 3300×10^6 , 3020×10^6 である。また、供試体C32-Rの場合は、110kN付近で主鉄筋が降伏し、荷重160kN付近までは線形的に増加し、荷重160kN以降からひずみの増加が急激になっている。終局時のひずみは供試体C32-R-1, C32-R-2で、それぞれ 3900×10^6 , 6200×10^6 である。

次に、配力筋の荷重とひずみの関係は、供試体C21-Rは荷重95kN付近で配力鉄筋が降伏し、降伏後は荷重120kN付近まではほぼ線形的に増加し、それ以降はひずみの増加がやや大きくなっている。終局時のひずみは供試体C21-R-1, C21-R-2で、それぞれ 4430×10^6 , 5070×10^6 である。また、供試体C32-Rの場合は、荷重110kN付近で配力筋が降伏し、その後は荷重155kN付近までは線形的に増加し、荷重155kN以降からひずみの増加が急激になっている。終局時のひずみは供試体C32-R-1, C32-R-2で、それぞれ 8700×10^6 , 10150×10^6 である。

供試体C21-RとC32-Rの鉄筋ひずみを比較すると静荷重実験と同様に、主鉄筋・配力筋ともに各荷重において供試体C32-Rのひずみが上回っている。

以上より、静荷重実験・走行荷重実験ともに、コンクリートの圧縮強度が高い供試体は破壊荷重付近で鉄筋ひずみが伸びており延性的な抵抗を呈するが、圧縮強度が低い供試体は、破壊荷重付近での鉄筋ひずみの伸びが小さい。これは、コンクリートの圧縮強度が低いことで、鉄筋の能力が十分に発揮しないうちに破壊に至ったものと思われる。

5. 定点疲労実験における実験結果

5.1 載荷回数と鉄筋ひずみの関係

RC床版中央に配置した主鉄筋および配力筋における載荷回数とひずみの関係をFig.3に示す。

主鉄筋においては、コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体C21-F50の場合、1回目の荷重載荷

Table 3 Number of cycles.

specimen	Number of cycles	Faliluemodes
C21-F50	1,450,000	Punching shear failure
C30-F50	4,200,000	Punching shear failure

時のひずみは 2398×10^6 であり、載荷後は載荷回数の増加に伴い緩やかに増加していき、800000回付近からひずみの増加は急激になっている。また、コンクリートの圧縮強度が 30N/mm^2 の供試体C30-F50の場合は、1回目の荷重載荷時のひずみは 2174×10^6 であり、載荷後は載荷回数の増加に伴い緩やかに増加していき、2000000回付近からひずみの増加は急激になっている。また、終局時のひずみは供試体C21-F50, C21-F50でそれぞれ 4280×10^6 , 4511×10^6 である。

次に、配力筋においては供試体C21-F50, C30-F50の1回目の荷重載荷時のひずみは、それぞれ 2110×10^6 , 1674×10^6 である。荷重載荷後は供試体C21-F50, C21-F50ともに載荷回数の増加に伴い緩やかにひずみは増加していき、供試体C21-F50は800000回付近、供試体C21-F50は1400000回付近からひずみの増加は急激になっている。また、終局時のひずみは供試体C21-F50, C21-F50でそれぞれ 5054×10^6 , 6190×10^6 である。

コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体と圧縮強度 30N/mm^2 の供試体の鉄筋ひずみを比較すると、主鉄筋・配力筋ともに各載荷回数において圧縮強度 21N/mm^2 の供試体のひずみが圧縮強度 30N/mm^2 の供試体のひずみを上回っている。また、1回目の荷重載荷時の鉄筋ひずみにおいては、主鉄筋の場合、圧縮強度 21N/mm^2 が 30N/mm^2 の1.10倍となり、配力筋の場合は1.26倍となった。終局時のひずみは、主鉄筋はほぼ同程度であり、配力筋は圧縮強度 30N/mm^2 の供試体の方が大きくなる結果となった。

5.2 破壊到達回数

定点疲労実験における破壊到達回数をTable 3に示す。コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体C21-F50における破壊到達回数は 1.45×10^6 回であり、コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体C30-F50は 4.2×10^6 回である。この供試体C21-F50と供試体C30-F50の破壊到達回数を比較すると、供試体C30-F50が供試体C21-F50の約3倍となった。したがって、疲労耐久性能においてもコンクリートの圧縮強度の影響が顕著となった。なお、破壊モードにおいては供試体C21-F50, C30-F50ともに押抜きせん断破壊となった。

6.まとめ

(1)静荷重実験および走行荷重実験の押抜きせん断

耐力力を比較すると、走行荷重が作用した場合はコンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 , 32N/mm^2 の供試体ともに24%程度の耐力力の低下が見られた。また、走行荷重の作用による耐力力の低下率においてはコンクリートの圧縮強度の影響は見られなかった。

- (2)コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体と 32N/mm^2 の供試体の押抜きせん断耐力力を比較すると、静荷重・走行荷重ともに圧縮強度 32N/mm^2 の供試体が圧縮強度 21N/mm^2 の供試体の1.22倍程度となった。したがって、押抜きせん断耐力力においてはコンクリートの圧縮強度の影響が顕著となる。
- (3)荷重とひずみの関係から、コンクリートの圧縮強度が高い供試体は、破壊荷重付近で鉄筋ひずみが伸びており延性的な抵抗を呈するが、圧縮強度が低い供試体は破壊荷重付近での鉄筋ひずみの伸びが小さい。これは、コンクリートの圧縮強度が低いことで、鉄筋の能力が十分に発揮しないうちに破壊に至ったものと思われる。
- (4)載荷回数と鉄筋ひずみにおいては、主鉄筋・配力筋ともに各回数においてコンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体が圧縮強度 30N/mm^2 の供試体のひずみを上回る結果となった。また、1回目の荷重載荷時の鉄筋ひずみにおいては、主鉄筋の場合、圧縮強度 21N/mm^2 が 30N/mm^2 の1.10倍となり、配力筋の場合は1.26倍となった。
- (5)コンクリートの圧縮強度が 21N/mm^2 の供試体と圧縮強度 30N/mm^2 の供試体の破壊到達回数を比較すると、圧縮強度 30N/mm^2 の供試体が圧縮強度 21N/mm^2 の供試体の約3倍となった。したがって、疲労耐久性能においてもコンクリートの圧縮強度の影響が顕著となった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2002.
- 2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書（総則編・構造計画編・設計編）, 2007, 土木学会,
- 3) (社)土木学会性能照査設計分科会：道路橋床版の性能照査型設計（道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上）, 2004, pp. 65-93
- 4) 川畑篤敬ほか：土木学会 鋼・合成構造標準示方書 設計編における床版に関する条文の概要, 第5回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 2006, pp. 103-106,
- 5) Tadashi ABE et al. : Punching Shear Capacity of RC Slab by Applying Limit State Design Method, THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS JAPAN, Vol. 55, 2006, pp.73-81