

大阪市立大学工学部

学生員○小原 菜美子

大阪市立大学院工学研究科

正会員 北田 俊行

大阪市立大学院工学研究科

正会員 山口 隆司

大阪市立大学院工学研究科

正会員 松村 政秀

1. まえがき

近年、鋼構造物の設計基準類が従来の許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行しようとする大きな流れがある。またこれに加え、力学的・経済的合理性のために、鋼部材とコンクリート部材(RC もしくは PC)を混合した複合構造が数多く採用されている。このような構造では、それぞれの部材の破壊確率 P_f が等しくなるように安全率をそれぞれ設定し、設計することでより合理的な構造物になると考えられる。したがって、本研究では、混合構造を含む複合橋梁の設計法確立に必要な基礎的資料の提供を目的に、鋼部材およびコンクリート部材の曲げ破壊確率 P_f に着目して、終局曲げモーメントおよび許容曲げモーメントの確率分布形状を載荷実験により調べた。さらに、鋼部材とコンクリート部材それぞれの曲げ破壊確率 P_f および信頼性指標 β を同定し、それぞれの部材の適切な部分安全率 γ について検討した。

2. 実験概要

実験では、簡単のため鋼部材としてH型鋼を、コンクリート部材として曲げ圧縮破壊するように鉄筋が降伏しないように設計した単鉄筋 RC 梁を用いた。各供試体の形状を図-1 に示す。なお、供試体の持つ材料特性のばらつきを考慮するため、発注業者や施工方法を変えて各供試体ともに10体製作した。両供試体とも、図-1 に示す位置に万能試験機を用いて最大荷重が得られるまで単調載荷した。なお、着目した支間中央部は純曲げを受ける。計測項目は、荷重および支間中央におけるたわみとひずみである。

3. 実験結果

H型鋼供試体と鉄筋コンクリート供試体の実験から求めた各種限界状態における曲げモーメントの確率分布特性を表-1 に示す。曲げ強度の評価に用いる信頼性指標 β は平均値と標準偏差のみで決まる次式で求められる¹⁾。

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{R}$:強度の平均値、 $\bar{S}$:荷重効果の平均値、 σ_R :強度の標準偏差、 σ_S :荷重効果の標準偏差である。強度 R は実験より求め、荷重効果 S は設計曲げモーメントをあてはめる。

設計荷重を一定値とした場合の信頼性指標 β と破壊確率 P_f を表-2 に、度数分布および確率密度関数による強度 R と荷重効果 S との関係を図-2 にそれぞれ示す。

表-2 信頼性指標 β と破壊確率 P_f

(a) H型鋼供試体		
	信頼性指標 β	破壊確率 P_f
M_{su} (終局)に対して	11.36	3.06E-30
M_{sy} (降伏)に対して	8.01	5.71E-16
M_{sa} (許容)に対して	16.11	9.73E-59
(b) 鉄筋コンクリート供試体		
	信頼性指標 β	破壊確率 P_f
M_{su} (終局)に対して	8.67	1.93E-18
M_{su} (使用限界)に対して	3.17	8.14E-04
M_{sa} (許容)に対して	16.14	6.82E-59

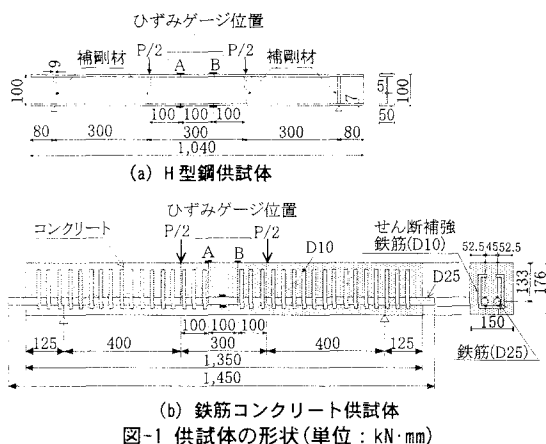
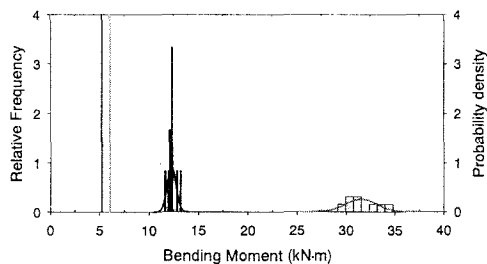


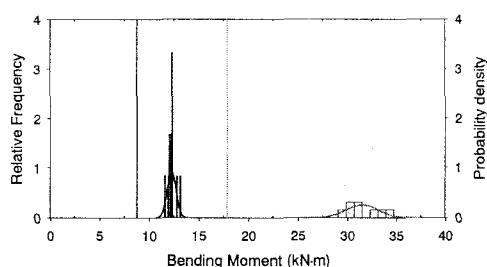
図-1 供試体の形状(単位: kN・mm)

表-1 曲げモーメントの確率分布特性(単位: kN・m)

(a) H型鋼供試体			
	平均値: $\bar{E}(x)$	標準偏差: σ	変動係数: v
終局曲げモーメント	13.513	0.3252	0.0241
降伏曲げモーメント	12.299	0.4381	0.0356
許容曲げモーメント	5.1732	0.1045	0.0202
(b) 鉄筋コンクリート供試体			
	平均値: $\bar{E}(x)$	標準偏差: σ	変動係数: v
終局曲げモーメント	31.577	1.5808	0.0501
使用限界曲げモーメント	9.3534	0.6674	0.0714
許容曲げモーメント	6.5980	0.6493	0.0984



(a) 荷重効果を許容曲げモーメントとした場合



(b) 荷重効果を降伏および終局曲げモーメントとした場合

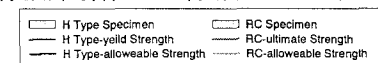


図-2 相対度数分布と確率密度関数による強度と荷重効果の関係

これより、荷重効果 S が一定値の場合、鋼部材とコンクリート部材の荷重効果を許容曲げモーメントにした場合の信頼性指標 β はほぼ同じ値を得た。

次に、荷重効果が変動した場合の信頼性指標 β と破壊確率 P_f について検討する。作用曲げモーメントに占める死荷重と活荷重の貢献度が、鋼部材とコンクリート部材、および支間長などで大きく異なるため、実際値ではないけれど、ここでは、荷重効果は設計許容曲げモーメント値を平均値とし、文献 2) で使われている荷重の変動係数 $v=0.061$ 、および 0.122、0.183 の正規分布と仮定した²⁾。得られた各種限界状態における信頼性指標 β と破壊確率 P_f を表-3 に示す。また、 $v=0.122$ の場合を例に、度数分布および確率密度関数による強度 R と荷重効果 S との関係を図-3 に示す。荷重効果 S が変動した場合、両部材ともにその変動が大きくなるほど信頼性指標 β は小さくなり、破壊確率 P_f はともに大きくなった。同じ変動係数 v に対しては、鋼部材の破壊確率 P_f の方が高くなる結果が得られ、信頼性指標 β の変化も鋼部材の方が大きくなった。

4. 破壊確率を同じにする場合の部分安全率の設定

両部材の許容曲げモーメントに対する破壊確率 P_f が等しくなるよう部分安全係数 γ の設定を試みた。実際には多数の実績データでキャリブレーションを行う必要があるが、ここでは、両部材の目標信頼性指標 β を仮に 7.0(破壊確率 $P_f=0.1280E-11$) に設定し、強度 R の標準偏差 σ_R を実験より得られた値とした。

両部材の部分安全係数 γ_s および γ_c は、以下の式(2)、(3)と定義する。

$$\gamma_s = \frac{M_{sy}}{M_{dsa}}, \quad \gamma_c = \frac{0.85M_{cu}}{M_{dca}} \quad (2), (3)$$

ここで、 M_{sy} ：鋼部材の設計降伏曲げモーメント(強度の平均値)、 M_{dsa} ：鋼部材の設計許容曲げモーメント、 M_{cu} ：コンクリート部材の終局曲げモーメント(強度の平均値)、 M_{dca} ：コンクリート部材の設計許容曲げモーメントである。以上より、求められた両部材の部分安全係数 γ を表-4 に示す。

荷重効果 S の変動が大きくなると、両部材の部分安全係数 γ は小さくなっている。

5. まとめ

荷重効果を一定値と仮定した場合の鋼部材とコンクリート部材の信頼性指標 β は、許容曲げモーメントおよび終局曲げモーメントのそれぞれの場合に対してほぼ同じ値を示した。すなわち、同じ設計荷重 S に対して、鋼部材とコンクリート部材とはほぼ同じ破壊確率 P_f を有している。

次に、設計荷重 S を変動させた場合の両部材の信頼性指標 β は、一定値の場合に比べてどちらも減少し、破壊確率 P_f は高くなった。また、破壊確率 P_f は、鋼部材の方が高くなった。また、荷重効果 S の変動の割合が大きくなるほど両部材の信頼性指標 β は小さくなり、破壊確率 P_f は大きくなった。コンクリート部材より鋼部材の方がその影響は顕著に現れた。

今後、データの信頼性、精度を高めるために母数を増やし、より適合する分布を用いて破壊確率をより精度よく算定しなければならぬ。さらに、組合せ荷重といった曲げ以外の荷重が作用した場合についても検討する必要がある。

参考文献

1) 土木学会：構造物の安全性・信頼性、1976。
2) 阪神高速道路公団：阪神高速道路設計荷重体系に関する調査研究、1986.12。

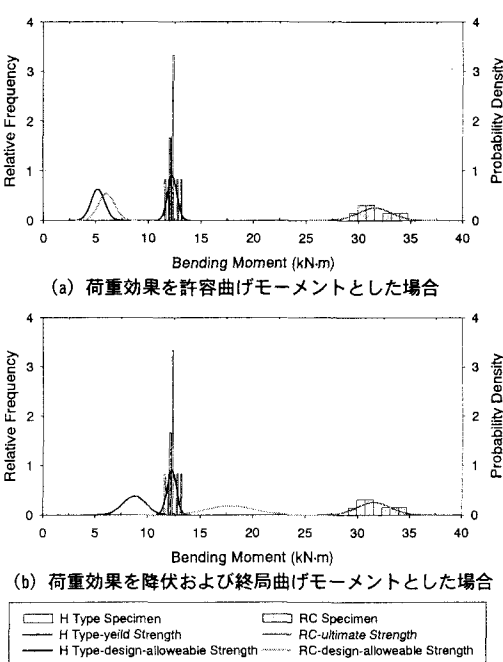


図-3 荷重変動時の相対度数分布と確率密度関数による強度と荷重効果の関係

表-3 荷重効果が変動した場合の信頼性指標 β と破壊確率 P_f

荷重 S の 変動係数 v	H型鋼供試体 M_{sy} (降伏)		RC供試体 M_{cu} (終局)	
	信頼性指標 β	破壊確率 P_f	信頼性指標 β	破壊確率 P_f
0.061	5.07	1.95E-07	7.14	4.46E-13
0.122	3.03	1.22E-03	5.09	1.71E-07
0.183	2.10	0.0179	3.77	8.80E-05

荷重 S の 変動係数 v	H型鋼供試体 M_{sa} (許容)		RC供試体 M_{ca} (許容)	
	信頼性指標 β	破壊確率 P_f	信頼性指標 β	破壊確率 P_f
0.061	13.02	4.89E-39	15.71	5.84E-56
0.122	9.11	3.98E-20	14.61	1.06E-48
0.183	6.70	9.67E-12	13.20	3.96E-40

表-4 推定される部分安全係数 γ

荷重 S の 変動係数 v	H型鋼供試体		RC供試体	
	M_{sy} (降伏) (kN・m)	部分安全係数 γ_s	M_{cu} (終局) (kN・m)	部分安全係数 γ_c
0.061	9.04	1.72	17.44	2.44
0.122	10.66	2.04	18.29	2.56
0.183	12.62	2.41	19.59	2.74